

**Er is helaas voor deze rapportage een verkeerd
projectnummer gebruikt, Z2644 moet Z2864**

Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ
Bibliotheek (Middelburg)

C-13912 712

Getijasymmetrie in de Westerschelde

Een 1D model onderzoek naar invloed van geometrie op getijasymmetrie

P.K. Schoeman



CLIENT:	DG Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ Middelburg							
TITLE:	Getijasymmetrie in de Westerschelde							
ABSTRACT:	Het verticale getij aan de monding van de Westerschelde is (nagenoeg) symmetrisch. De vorm van de Westerschelde zorgt ervoor dat de optredende stromingen en waterstandsvariaties niet symmetrisch in de tijd zijn. Dit verschijnsel wordt getijasymmetrie genoemd. Deze getijasymmetrie is van invloed op het residuele sedimenttransport in het estuarium. In dit rapport wordt ingegaan op het verband tussen de getijasymmetrie en de geometrie/bathymetrie. Hiervoor wordt in dit rapport een ééndimensionaal model opgezet waarin de getijasymmetrie bij verschillende geometrie van dwarsprofielen wordt bepaald. Het doel van de studie is een relatie te vinden tussen de getijasymmetrie en parameters die de geometrie van het dwarsprofiel beschrijven. Met die relatie kan dan later op een relatief eenvoudige manier de invloed van ingrepen in de morfologie op de getijasymmetrie bepaald worden.							
REFERENCES:								
VER.	ORIGINATOR	DATE	REMARKS	REVIEW	APPROVED BY			
	P.K. Schoeman	21-11-2000		M.C.J.L. Jeuken	M.J.F. Stive			
PROJECT IDENTIFICATION:		Z2644						
KEYWORDS:		Getijasymmetrie, Westerschelde						
CONTENTS:	TEXT PAGES	69	TABLES	11	FIGURES	19	APPENDICES	4
STATUS:	☐ PRELIMINARY ☐ DRAFT ☒ FINAL							

Voorwoord

Dit rapport beschrijft een onderzoek dat is uitgevoerd in het kader van afstuderen aan de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, sectie Kustwaterbouwkunde aan de Technische Universiteit Delft.

De opdracht bestaat uit een 1D model onderzoek naar invloed van geometrie op getiasymmetrie in de Westerschelde. De opdracht is uitgevoerd bij WL|Delft Hydraulics in Delft en is financieel gesteund door Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Middelburg. Het werk is uitgevoerd als onderdeel van een onderzoek naar residuele sedimenttransporten onder het projectnummer Z2644.

Graag wil ik de leden van mijn afstudeercommissie, prof.dr.ir. M.J.F. Stive, dr.ir. Z.B. Wang, drs. M.C.J.L. Jeuken, drs. B.A. Kornman en dr.ir. J.C. Winterwerp bedanken voor hun begeleiding en beoordeling. Ook ben ik mijn collega-afstudeerders en medewerkers bij WL | Delft Hydraulics dankbaar voor de vrijwillige hulp die ze geboden hebben. Mijn familie en vrienden bedank ik voor de steun in alles mijn studie. Mijn vader bedank ik voor het optimisme dat hij het afgelopen half jaar in zijn bijzondere situatie heeft laten zien en waar ik een voorbeeld aan heb kunnen nemen.

Inhoud

Voorwoord	1
Lijst van Figuren	
Lijst van Tabellen	
Samenvatting	1
1 Inleiding	1-1
1.1 Achtergrond	1-1
1.2 Probleemomschrijving	1-1
1.2.1 Probleemstelling	1-2
1.2.2 Doelstelling	1-2
1.2.3 Uitgangspunten	1-2
1.3 Opzet onderzoek	1-2
2 Algemene Theorie	2-1
2.1 Algemeen	2-1
2.2 Basis theorie getiasymmetrie	2-2
2.2.1 Inleiding	2-2
2.2.2 Niet-lineaire interacties	2-2
2.2.3 Getijgolf in een bekken met gesloten rand	2-4
2.3 Asymmetrie van het verticale getij	2-6
2.4 Asymmetrie van het horizontale getij	2-9
3 Opzet simpel prismatisch model.....	3-1
3.1 Inleiding	3-1
3.2 Simpel prismatisch model	3-1
3.3 Gebruik van relatie voor de hypsometrie in simpel prismatisch model.....	3-3
3.4 Gevoeligheidsanalyse	3-4
3.4.1 Inleiding	3-4
3.4.2 Opgelegde getijcomponenten	3-5
3.4.3 Invloed afvoer Schelde en gedeelte grens-Gentbrugge.....	3-8

3.4.4 Superpositie van componenten	3-9
3.5 Bepalen van bereik parameters a/h en V_g/V_c	3-11
3.6 Bereik van de alternatieve parameter A_f/A	3-14
3.7 Te modelleren situaties	3-16
4 Resultaten simpel prismatisch model.....	4-1
4.1 Inleiding	4-1
4.2 Toepassing van diagram van Friedrichs en Aubrey (1988) op resultaten van simpel prismatisch model	4-1
4.3 Alternatieve parameters	4-2
4.4 Asymmetrie van het horizontale getij	4-6
4.5 Discussie resultaten	4-7
4.6 Conclusies voor simpel prismatisch model	4-7
5 Opzet complex model.....	5-1
5.1 Inleiding	5-1
5.2 Schematisatie Westerschelde, Zeeschelde en Schelde.....	5-1
5.3 Calibratie model.....	5-2
5.4 Historische situatie.....	5-6
5.5 Conclusie geldigheid model.....	5-7
6 Resultaten complex model.....	6-1
6.1 Inleiding	6-1
6.2 Vakken 1955 in basismodel	6-1
6.3 Verdieping '97/'98	6-4
6.4 Conclusies voor complex model	6-5
7 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen	7-1
7.1 Samenvatting en conclusies	7-1
7.2 Aanbevelingen	7-2
Literatuur	1

Figuren en Bijlagen

A Input naar Output	1
A.1 Algemeen	1
A.2 Bepalen van asymmetrie parameters.....	1
A.2.1 Vertikaal	1
A.2.2 Horizontaal.....	2
A.3 Bepalen van geometrie-parameters	2
B Figuren hoofdstuk 4	1
C Schematisatie complex model en figuren hoofdstuk 5	1
D Figuren hoofdstuk 6	1

Lijst van Figuren

Figuur 2.1 Resonantie in eenzijdig gesloten bekken uit Battjes, 1997	2-5
Figuur 2.2 Invloed faseverschil op duurverschillen tussen stijgend en dalend waterniveau.....	2-7
Figuur 2.3 Contour diagram van de parameters die de niet-lineaire verstoring bepalen als functie van a/h en V_s/V_c , volgend uit 84 model systemen. De 180 graden contourlijn verdeelt het diagram in eb- en vloeddominante gebieden. (naar: Speer e.a., 1991)	2-8
Figuur 2.4 Asymmetrie van het horizontale getij.	2-9
Figuur 3.1 Simpel prismatisch model	3-2
Figuur 3.2 $\alpha=2$ (links) en $\alpha=3$ (rechts).....	3-4
Figuur 3.3 Asymmetrie van het verticale getij bij variatie van amplitude en fase van opgelegd M_4	3-5
Figuur 3.4 Gevoeligheid model voor opgelegde getijcomponent M_6	3-7
Figuur 3.5 Invloed amplitude M_2 op getiasymmetrie	3-8
Figuur 3.6 Invloed debiet en invloed Nederlands-Belgische grens tot aan Gentbrugge.....	3-8
Figuur 3.7 Verduidelijking vectoroptelling.....	3-9
Figuur 3.8 V_s en V_c bij schematisatie Speer en Aubrey (1985).....	3-12
Figuur 3.9 V_s en V_c bij gebruik hypsometrische relatie	3-12
Figuur 3.10 Bereik parameters a/h en V_s/V_c	3-14
Figuur 3.11 Bereik parameter Af/A	3-15
Figuur 5.1 Schematisatie Westerschelde voor 1996 (getrokken lijn) en 1955(onderbroken lijn) breedtevariatie(links) en diepte(rechts)	5-2
Figuur 5.2 Calibratie op getijverschil	5-3
Figuur 5.3 Calibratie op richting asymmetrie van het verticale getij	5-4
Figuur 6.1 Invloed verdieping op asymmetrie van het verticale getij	6-5

Lijst van Tabellen

Tabel 2.1 Generatie van hogere harmonische getijcomponenten t.g.v. niet-lineaire interactie	2-4
Tabel 3.1 Parameters die de hypsometrie karakteriseren voor 6 vakken in de Westerschelde in 1955 en 1996.....	3-2
Tabel 3.2 Vectoroptelling.....	3-10
Tabel 3.3 Grenzen maximale diepte bij verschillende α	3-14
Tabel 3.4 Interessegebied variatie parameters	3-16
Tabel 3.5 Te modelleren situaties simpel prismatisch model	3-16
Tabel 4.1 Randvoorwaarde monding	4-1
Tabel 5.1 Vergelijking getijvolumina Westerschelde en model.....	5-5
Tabel 6.1 Veranderingen d/α tussen 1955 en 1996.....	6-2
Tabel 6.2 Afstanden van middens van vakken tot monding	6-2
Tabel 6.3 Volumetoename per vak (in Mm^3) als gevolg van baggeren van juli '97 t/m september '98.....	6-4

Samenvatting

Het doel van de studie is inzicht te verkrijgen in de relatie tussen geometrische eigenschappen van de Westerschelde en de getiasymmetrie in dit estuarium. Deze relatie is van belang, omdat getiasymmetrie een residueel sedimenttransport kan veroorzaken. Getiasymmetrie is de vervorming van de getijkromme in het estuarium. Door de vervorming van de aan de monding nagenoeg symmetrische getijkromme is er een verschil tussen de duren van stijgend en dalend waterniveau (asymmetrie van het verticale getij) en een verschil tussen de maximale eb- en vloedsnelheden (asymmetrie van het horizontale getij). De richting van de asymmetrie van het verticale getij wordt beschreven met het teken van het relatieve faseverschil tussen de getijcomponenten M_2 en M_4 . Een positief relatief faseverschil duidt op vloeddominantie voor het verticale getij (duur stijgend waterniveau korter dan duur dalend waterniveau) en een negatief relatief faseverschil duidt op ebdominantie voor het verticale getij (duur dalend waterniveau korter dan duur stijgend waterniveau). De intensiteit van de asymmetrie van het verticale getij wordt beschreven met de amplitudeverhouding tussen de getijcomponenten M_2 en M_4 : aM_4/aM_2 . Een grotere verhouding aM_4/aM_2 duidt dan op een sterkere asymmetrie.

Om de relatie tussen geometrische eigenschappen van het dwarsprofiel en getiasymmetrie te onderzoeken zijn twee ééndimensionale modellen gebouwd waarin het systeem is geschematiseerd tot een één-geul systeem:

- een simpel prismatisch model met uniforme geometrie in langsrichting en
- een complex model dat een schematisatie is van het gehele Schelde estuarium, waarbij de geometrie wél varieert in langsrichting.

In het simpel prismatisch model wordt het gedeelte van de Nederlands-Belgische grens tot aan Gentbrugge verwaarloosd, in het complex model maakt dit gedeelte wél deel uit van het model.

Met gebruik van één gemiddeld profiel voor de gehele Westerschelde is de gevoeligheid van het simpel prismatisch model voor opgelegde randvoorwaarden bepaald. De gevoeligheidsanalyse voor het simpel prismatisch model geeft aan dat zowel de richting als de intensiteit van de asymmetrie van het verticale getij sterk afhangt van de opgelegde getijcomponent M_4 . Wanneer de getijcomponent M_4 met een grotere amplitude wordt opgelegd ontstaat aan het einde van het estuarium een kleiner relatief faseverschil tussen de getijcomponenten M_2 en M_4 . Tevens blijkt een aan de monding opgelegde asymmetrie door te werken in het estuarium. In het simpel prismatisch model is ook nagegaan of superpositie van getijcomponenten uit verschillende situaties geoorloofd is. De conclusie van de analyse over superpositie luidt dat de voortplanting van het M_4 getij in het estuarium sterk wordt beïnvloed door het bestaan van de getijcomponent M_2 in datzelfde estuarium. Het betekent dat superpositie dus niet geoorloofd is. De gevoeligheid van het simpel prismatisch model voor opgelegd debiet is onderzocht door een debiet van $100 \text{ m}^3/\text{s}$ aan de rand op te leggen en het is gebleken dat het debiet weinig invloed heeft op het relatieve faseverschil tussen de getijcomponenten M_2 en M_4 . In het simpel prismatisch model worden aan de monding de

getijcomponenten M_2 , M_4 en M_6 zoals in de Westerschelde opgelegd en een gesloten rand aan het einde van het estuarium.

In voorgaand onderzoek van Speer e.a.(1991) werd de asymmetrie van het verticale getij in korte wrijvingsgedomineerde estuaria onderzocht. Zij concludeerden dat ondiepe estuaria naar vloeddominantie tenderen en dat diepere estuaria met grote intergetijdegebieden naar ebdominantie tenderen. De in het onderzoek van Speer e.a.(1991) gebruikte set van parameters is vanwege de sterke afhankelijkheid van de parameters voor de Westerschelde niet handig toepasbaar.

Na modelleren van 55 verschillende situaties met verschillende geometrie van het dwarsprofiel blijkt in het simpel prismatisch model de asymmetrie van het verticale getij voornamelijk afhankelijk te zijn van de gemiddelde diepte en de lengte van het estuarium. In feite is dus één van de twee parameters (ratio amplitude verticale getij en gemiddelde diepte) uit de set van parameters van Speer e.a.(1991) bepalend voor de asymmetrie van het verticale getij in systemen als de Westerschelde. Een grotere gemiddelde diepte in het gehele estuarium veroorzaakt een afname van het relatieve faseverschil tussen de getijcomponenten M_2 en M_4 (een verandering in de richting van ebdominantie) en kleinere gemiddelde diepte in het gehele estuarium veroorzaakt een toename van het relatieve faseverschil (een verandering in de richting van vloeddominantie). Tevens neigt een langer estuarium naar vloeddominantie en een korter estuarium naar ebdominantie. De verschillen tussen maximaal optredende eb- en vloedsnelheden blijken een koppeling te hebben met verschillen tussen de tijdsduren van stijgend en dalend waterniveau. In het simpel prismatisch model geldt dat, voor eb- en vloedsnelheden ten opzichte van elkaar, een dieper estuarium leidt tot hogere maximale ebsnelheden en een ondieper estuarium leidt tot hogere maximale vloedsnelheden.

Het complex model is gecalibreerd (door variatie van de wrijvingsfactor) voor het jaar 1996 voor plaats van optreden van maximale getijslag en asymmetrie van het verticale getij. Geverifieerd voor 1996 is of het faseverschil tussen vertikaal en horizontaal getij, de asymmetrie van het horizontale getij en de getijvolumina overeenkomen met de metingen. Het model blijkt het getij in de Westerschelde in 1996 goed te reproduceren. Daarna is voor de situatie van 1955 geverifieerd of het getij in dat jaar goed gereproduceerd wordt én of de veranderingen in getijslag en asymmetrie van het verticale getij van 1955 tot 1996 gereproduceerd worden. De vergelijking tussen modelresultaten en metingen voor het getij in 1955 en de veranderingen in modelresultaten tussen de twee jaren geven vertrouwen in de geldigheid van het model.

Door veranderingen aan te brengen in het complex model voor de situatie van 1996 moet duidelijk worden wat de gevolgen zijn van lokale veranderingen in de morfologie op de getiasymmetrie. Dit leidt tot het inzicht dat er zowel lokaal als in het gehele estuarium veranderingen in de getiasymmetrie kunnen ontstaan. De relatie verkregen met de resultaten uit het simpel prismatisch model, waarin verdiepingen en verondiepingen over de gehele lengte van het estuarium worden aangebracht, geeft geen sluitende verklaring over de invloed van lokaal aangebrachte wijzigingen op de asymmetrie van het verticale getij in het gehele estuarium. Wanneer bijvoorbeeld lokaal een verondieping wordt aangebracht, kan dit leiden tot méér vloeddominantie voor het verticale getij stroomopwaarts van de

verondieping en stroomafwaarts van de verdieping kan dan méér ebdominantie voor het verticale getij optreden. De verdieping in de periode juli 1997 t/m september 1998 is een verdieping die in het oostelijk deel van de Westerschelde relatief groter is. De verdieping veroorzaakt volgens het complex model minder vloeddominantie voor het verticale getij in het oostelijk deel van het estuarium. De verdieping heeft slechts invloed in stroomopwaartse richting.

I Inleiding

I.1 Achtergrond

De Westerschelde is een open estuarium (trechtermonding) in het zuiden van Nederland. De laatste decennia hebben grootschalige baggeractiviteiten (en daarmee ook stortingswerkzaamheden) plaatsgevonden teneinde de scheepvaartroute naar Antwerpen te onderhouden en aan te passen aan de ontwikkelingen in de zeevaart. Het is van belang te begrijpen wat het gevolg is van menselijk ingrijpen op de morfologische ontwikkeling.

De natuurlijke morfologische ontwikkeling is het gevolg van wisselwerking tussen waterbeweging, sedimenttransport en vorm van het estuarium. De waterstandsvariatie (getij) op zee veroorzaakt een waterbeweging (waterstandsvariaties en stromingen) in het estuarium en de stromingen veroorzaken sedimenttransport. Het residuele (netto) sedimenttransport in het estuarium is de oorzaak van morfologische ontwikkeling.

Het verticale getij op zee is (nagenoeg) symmetrisch. De vorm van de Westerschelde zorgt ervoor dat de optredende stromingen en waterstandsvariaties niet symmetrisch in de tijd zijn. Dit verschijnsel wordt getiasymmetrie genoemd. Deze getiasymmetrie is van invloed op het residuele sedimenttransport in het estuarium.

Analyse van historische data van getijden en morfologische ontwikkeling in de Westerschelde (Gerritsen e.a., 1999) laat zien dat er een duidelijke relatie is tussen de verandering van getiasymmetrie en de morfologische ontwikkeling in het estuarium. Tevens wordt getoond dat er waarschijnlijk een directe relatie is tussen de asymmetrie van het verticale getij en het netto sedimenttransport.

Het is dus van belang de oorzaak van getiasymmetrie te begrijpen en daarmee veranderingen in getiasymmetrie als gevolg van morfologische ontwikkeling te kunnen voorzien.

I.2 Probleemomschrijving

Getiasymmetrie is van invloed op het sediment transport. Voor ontwikkelingen op langere termijn (enkele tientallen jaren) zijn de residuele sedimenttransporten ten gevolge van getiasymmetrie van belang. Deze transporten kunnen berekend worden aan de hand van de optredende (en voorspelde) stromingen in de Westerschelde. In dit rapport wordt ingegaan op het verband tussen de getiasymmetrie en de geometrie/bathymetrie.

Dit verband is van belang, want als verdieping zou leiden tot ebdominantie, zou dat tot gevolg kunnen hebben dat het estuarium daarna op natuurlijke wijze steeds dieper wordt. Het tegenovergestelde geval zou ook kunnen optreden: na verondieping door bijvoorbeeld storten van gebaggerd sediment kan vloeddominantie ontstaan en blijft het ondieper

worden. Beide situaties, d.w.z. uiteindelijke 'verdrinking' of dichtslibben van het estuarium of gedeelten daarvan is niet gewenst. Vanwege de verschillende functies die de Westerschelde heeft is het nodig om inzicht te krijgen in de gevolgen van ingrepen.

1.2.1 Probleemstelling

Het is niet goed bekend wat de gevolgen zijn van morfologische ontwikkeling van de Westerschelde op de getiasymmetrie in de Westerschelde. Deze asymmetrie is op haar beurt weer van invloed op de morfologische ontwikkeling. Vanwege de verschillende functies van de Westerschelde is het gewenst een eventuele ontwikkeling in de morfologie te kunnen voorzien. Voor deze voorspelling is het nodig de getiasymmetrie bij verschillende geometrie/bathymetrie te onderzoeken.

1.2.2 Doelstelling

Een verband afleiden tussen morfologische eigenschappen van de Westerschelde en getiasymmetrie van dit estuarium.

1.2.3 Uitgangspunten

- In het onderzoek zal er van worden uitgegaan dat ten aanzien van de getiasymmetrie de resultaten van een geschematiseerd estuarium (ééndimensionaal) gebruikt kunnen worden voor de Westerschelde.
- De effecten ten gevolge van zout-zoetwater menging worden niet meegenomen in het onderzoek.

1.3 Opzet onderzoek

Om de relatie tussen de morfologie van de Westerschelde en de getiasymmetrie in dit estuarium te onderzoeken zal het rapport bestaan uit beschrijving van de in de literatuur gevonden theorie aangaande deze relatie en gevonden conclusies van vergelijkbare onderzoeken in hoofdstuk 2.

Om in een eenvoudig model het ontstaan van getiasymmetrie na te gaan, zal in hoofdstuk 3 een eenvoudig model opgezet worden, waarvan in hoofdstuk 4 de resultaten gepresenteerd en toegelicht worden. In hoofdstuk 4 wordt dan beschreven waar de getiasymmetrie van afhankelijk blijkt te zijn.

Nadat voor het eenvoudig model duidelijk is welke factoren van belang zijn voor de getiasymmetrie wordt in hoofdstuk 5 een complex model opgezet dat vergelijkbaar is met de Westerschelde. Een aantal variaties worden dan aangebracht op de schematisatie voor de Westerschelde en zo wordt onderzocht waar de getiasymmetrie in de Westerschelde van afhangt (hoofdstuk 6). In hoofdstuk 7 worden verschillende conclusies uit het onderzoek samengevat en bijeengebracht en worden enkele voorstellen gedaan voor vervolgonderzoek.

2 Algemene Theorie

2.1 Algemeen

In dit hoofdstuk wordt de algemene theorie over getiasymmetrie behandeld. In 2.2 wordt de basis theorie samengevat. Enige aspecten van asymmetrie van het verticale getij worden in 2.3 beschreven en voor de asymmetrie van het horizontale getij staat dit in 2.4.

Getiasymmetrie is in het algemeen de vervorming van de (nagenoeg) symmetrische getijkromme (waterstandsvariatie in de tijd) aan de monding. Vanaf de monding gezien vervormt de symmetrische getijkromme landinwaarts. Dit komt omdat er in het estuarium hogere harmonische getijcomponenten opgewekt worden. De duur van stijgend en dalend waterniveau is dan niet meer aan elkaar gelijk. Het verticale getij wordt vloeddominant genoemd als de duur van dalend waterniveau langer is dan de duur van stijgend waterniveau. In tegenovergestelde situatie wordt het verticale getij ebdominant genoemd.

In deze studie wordt naast het verticale getij (waterstandsvariatie in de tijd) ook het horizontale getij (stroomsnelheidsvariatie in de tijd) beschouwd. Het horizontale getij wordt vloeddominant genoemd als de maximale vloedsnellheid groter is dan de maximale ebsnellheid. In tegenovergestelde situatie wordt het horizontale getij ebdominant genoemd.

De zojuist genoemde definities van asymmetrie van het verticale getij en asymmetrie van het horizontale getij worden in deze studie beschouwd over de periode van het M_2 getij. De getijperiode bestaat in principe niet, omdat het getij in werkelijkheid niet periodiek is in strikt mathematische zin. Zie Wang e.a. (1999) voor een exacte uitwerking hiervan.

Deze studie richt zich op een ééndimensionale (1D) analyse. Naast de tijd bestaat dan in het model slechts één ruimtelijke dimensie: de lengte (langs de rivieras). De getijvoortplanting wordt dan bepaald door over het dwarsprofiel gemiddelde eigenschappen.

In diverse onderzoeken is uitvoerig aandacht geschonken aan uitwerking van de 1D-vergelijkingen. Een analytische oplossing geeft meer inzicht in de vervorming van de getijkromme. Voor een analytische oplossing moeten echter altijd aannames (bv. zuiver lopende golf of amplitude getij verwaarloosbaar ten opzichte van gemiddelde diepte) gemaakt worden die in de Westerschelde (en ook voor de schematisatie ervan) niet geoorloofd zijn. Dit is de reden om een numeriek model op te zetten voor de waterbeweging in de Westerschelde en de getiasymmetrie in de resultaten te bekijken. Voor een beter begrip van het proces van getijvoortplanting in het algemeen en vervorming van de getijkromme worden in 2.2 de basisvergelijking gegeven en enkele uitwerkingen hiervan.

2.2 Basis theorie getijasymmetrie

2.2.1 Inleiding

Sedimenttransport in estuaria is voornamelijk afhankelijk van de waterbeweging. De sedimentconcentratie in het water heeft een zeer geringe invloed op de waterbeweging. Dit is de reden om in eerste instantie de waterbeweging te analyseren en daarna het sedimenttransport. In deze studie zal echter alleen de waterbeweging bestudeerd worden.

De voornaamste oorzaak van de waterbeweging in goed gemengde estuaria als de Westerschelde zijn het astronomisch getij, de meteorologische effecten en het rivierdebiet. Het astronomisch getij wordt gewoonlijk beschreven door een aantal harmonische componenten, waarvan de frequentie astronomisch bepaald is (beweging van hemellichamen). De amplitude en fase van elke component varieert in plaats. Een groot aantal getijkrommen kan door combinatie van deze astronomische componenten worden beschreven.

De meeste astronomische frequenties bestaan rond een geheel getal per maan- of zoncycclus, maar er bestaan tevens oscillaties met een lage frequentie en residuele stromingen. In het zuidelijk deel van de Noordzee is het halfdaags (ook vaak dubbeldaags genoemd) maansgetij, aangegeven met M_2 (Moon, 2 maal per maan-dag), dominant. Een tweede halfdaags getij is het zonsgetij, aangegeven met S_2 (Sun, 2 maal per dag). Verder zijn er enkeldaagse getijden zoals K_1 en O_1 die refereren aan de dagelijkse ongelijkheid.

De lineaire combinatie van twee componenten met frequenties ω_1 en ω_2 ($\omega_2 > \omega_1$) levert een amplitudemodulatie op met frequentie $\omega_2 - \omega_1$. Uitgedrukt in harmonische componenten zorgt dit mechanisme voor lagere harmonische getijden (bv. springtij-doodtij cycli). Niet lineaire interacties van getijcomponenten zorgen voor zowel lagere harmonische als hogere harmonische getijden (M_4 , M_6 , M_8 , etc.) als gevolg van de interactie van M_2 met zichzelf, maar ook veel gecombineerde hogere harmonische getijden, als gevolg van interacties van verschillende componenten).

De niet-lineaire interacties van getijcomponenten worden in 2.2.2 nader beschouwd om een beeld te krijgen van de oorzaken van het ontstaan van de hogere harmonische componenten.

2.2.2 Niet-lineaire interacties

De ééndimensionale getijbeweging in een prismatisch kanaal met constante breedte wordt beschreven met de vergelijkingen (2.1) en (2.2).

BEWEGINGSVERGELIJKING

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - c_f \frac{u|u|}{h_0 + \zeta} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (2.1)$$

(A) (B) (C) (D) (E)

CONTINUÏTEITSVERGELIJKING

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{u(h_0 + \zeta)\} = 0 \quad (2.2)$$

(F) (G)

waarin:

t	= tijd
x	= afstand tot begin van kanaal
$u(x,t)$	= over dwarsprofiel gemiddelde stroomsnelheid
$\zeta(x,t)$	= waterstand ten opzichte van gemiddeld zeeniveau
h_0	= waterdiepte onder gemiddeld zeeniveau
ν_t	= eddy viscositeit
g	= zwaartekrachtversnelling
c_f	= bodemwrijvingsfactor

De termen in de impulsbalans zijn:

- (A) de lokale versnellingsterm
- (B) de advectione versnellingsterm
- (C) de verhangterm
- (D) de bodemwrijvingsterm
- (E) de horizontale diffusie term

De termen in de continuïteitsbalans zijn:

- (F) bergingsterm
- (G) debiet gradiënt term

De lokale versnelling term (A), de verhangterm (C) en de bergingsterm (F) zijn lineair. In turbulente stroming is de eddy viscositeit in de horizontale diffusie term (E) in het algemeen een functie van de stroomsnelheid. Daarom is het een niet-lineaire term. In de toepassing in dit onderzoek zal de longitudinale snelheidsgradiënt zo klein blijven dat de horizontale diffusie term (E) verwaarloosd kan worden.

De debietsgradiënt term G kan gesplitst worden in een lineair en niet-lineair deel:

$$\frac{\partial}{\partial x} \{u(h_0 + \zeta)\} = \frac{\partial}{\partial x} \{uh_0\} + \frac{\partial}{\partial x} \{u\zeta\} \quad (2.3)$$

De twee termen in het rechterlid van 2.3 worden respectievelijk G1 en G2 genoemd.

Nu blijven de advectione versnellingsterm (B), de wrijvingsterm (D) en de debietsgradientterm G2 over als de bron van de niet-lineaire interactie.

De wrijvingsterm D kan voor relatief kleine amplitudes (ten opzichte van gemiddelde diepte, dus $a/h \ll 1$) gesplitst worden:

$$\frac{u|u|}{h_0 + \zeta} \approx \frac{u|u|}{h_0} - \frac{\zeta u|u|}{h_0^2}$$

De twee termen in het rechterlid van 2.4 worden respectievelijk D1 en D2 genoemd.

De benadering $a/h \ll 1$ is niet geldig in alle delen van de Westerschelde. Het geeft in ieder geval meer inzicht in de ontwikkeling van de termen in de bewegingsvergelijking.

Wanneer nu een lopende golf beschouwd wordt:

$$u(x, t) = U(x) \cos(\omega t - kx) \quad (2.5)$$

waarin:

U = stroomsnelheidsamplitude,

ω = frequentie, en

k = golfgetal = $2\pi/l$, waarin

l = lengte getijgolf.

Invullen van 2.5 in de advectieve versnellingsterm (B), de wrijvingstermen (D1 en D2) en het niet-lineaire deel van de debietsgradient (G2) levert een beeld op van de oorzaak van de opwekking van de hogere harmonische componenten. In Wang e.a.(1999) worden de vergelijkingen uitgeschreven. In Tabel 2.1 wordt een voor dit onderzoek van belang geacht deel van het resultaat van de uitwerkingen gegeven:

Tabel 2.1 Generatie van hogere harmonische getijcomponenten t.g.v. niet-lineaire interactie

term	veroorzaakt
B	M_4
D1	M_4, M_6
D2	M_6
G2	M_4

2.2.3 Getijgolf in een bekken met gesloten rand

Voor meer inzicht in de voortplanting van de getijgolf in een bekken met gesloten rand zoals dat in hoofdstuk 3 gebruikt gaat worden, wordt hier kort verslag gedaan van een belangrijk deel uit het werk van Dronkers (1964).

Er wordt uitgegaan van een getijbeweging waarin de snelheid u oscilleert met een frequentie ω en een amplitude $\hat{u}$. De lokale versnelling is dan van de grootte orde $\omega \hat{u}$ terwijl de weerstandsterm in de bewegingsvergelijking (2.1) van de orde $c_f \hat{u}^2/h_0$ is.

De wrijvingsterm (D) in verhouding tot lokale versnellingsterm (A) uit de bewegingsvergelijking (2.1) is

$$\sigma = c_f \frac{\hat{u}}{\omega h_0}$$

waarin:

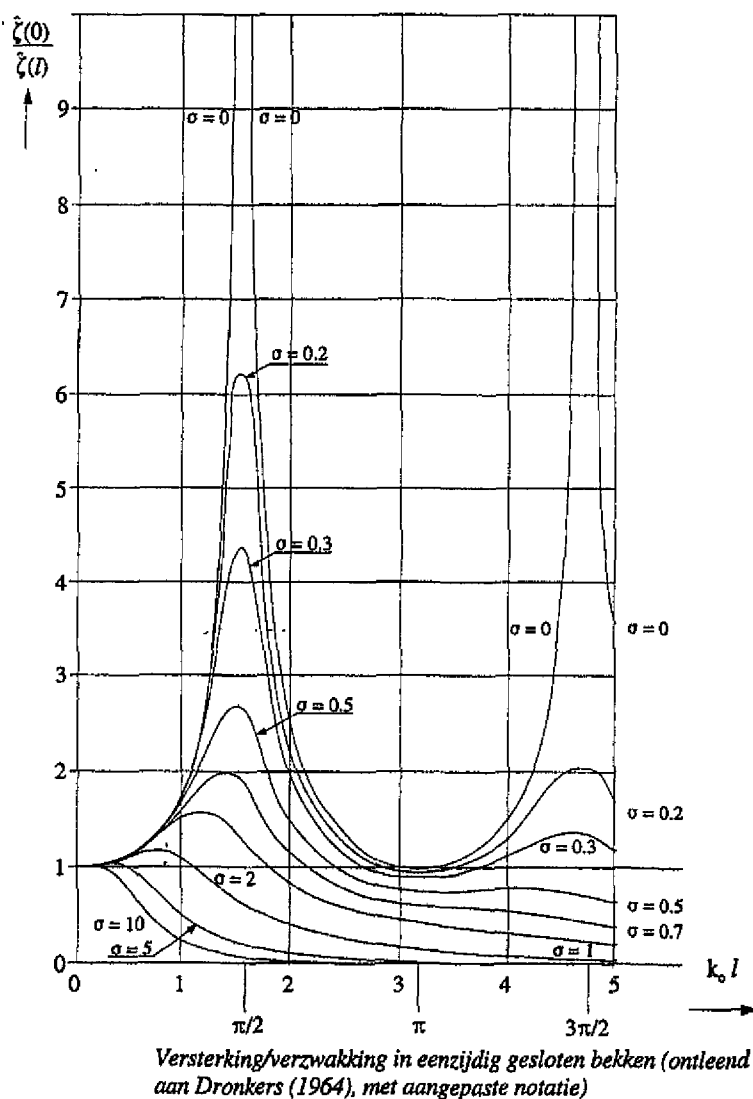
$c_f = g/C^2$, g is de zwaartekrachtsversnelling, C de Chezy-coëfficiënt voor bodemwrijving

$\bar{u}$ = over het dwarsprofiel gemiddelde stroomsnelheid
 ω = hoeksnelheid
 h_0 = diepte onder gemiddeld zeeniveau

Dronkers (1964) leidt een uitdrukking af voor de verhouding tussen de amplitude aan de gesloten rand en de amplitude aan het open einde:

$$\frac{\zeta(0)}{\zeta(l)}$$

en kl (het faseverschil tussen beide einden in een lopende golf). Het bijbehorende diagram van Battjes (1997) (ontleend aan Dronkers, 1964) wordt in Figuur 2.1 weergegeven.



Figuur 2.1 Resonantie in eenzijdig gesloten bekken uit Battjes, 1997

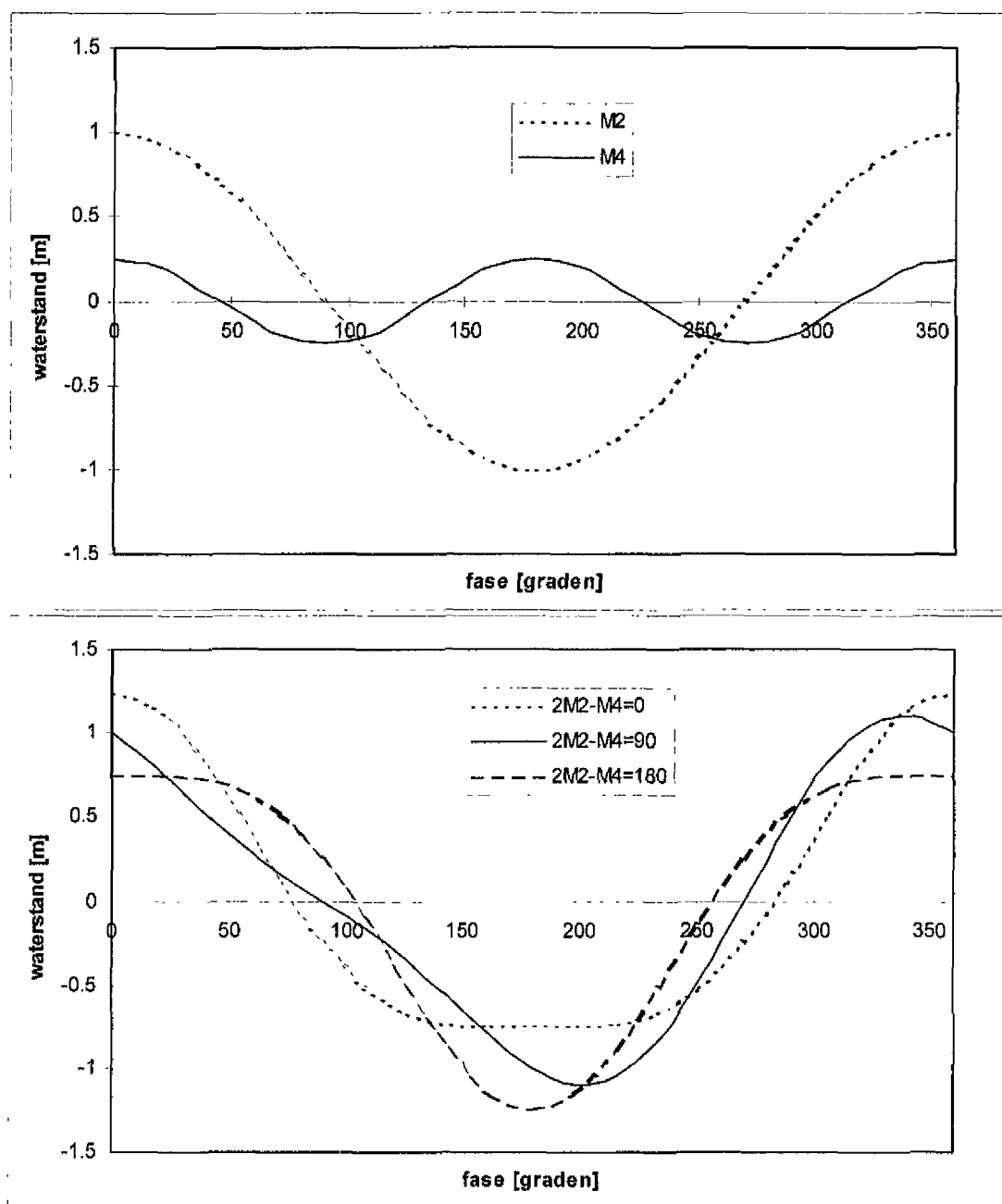
Uit de Figuur 2.1 kan geconcludeerd worden dat er opslingingering plaatsvindt als het bekken een lengte heeft van een kwart maal de getijgolfenlengte bij verwaarloosde wrijving (dan is het faseverschil tussen het open einde en gesloten einde $\pi/2$ rad.) in het bekken bij een $\sigma=0$

(wrijvingloos). Maximale opslinging treedt bij $\sigma > 0$ niet op bij een faseverschil tussen einde en open rand van $\pi/2$ rad maar bij een kleiner faseverschil.

2.3 Asymmetrie van het vertikale getij

In deze paragraaf wordt de relatie tussen de asymmetrie van het vertikale getij (verschil in periode van dalend en stijgend waterniveau) en de getijcomponenten behandeld. De intensiteit van de asymmetrie van het vertikale getij hangt af van de verhouding tussen de amplitude van de hogere harmonische component (bv. M_4) en de amplitude van het dubbeldaags getij (bv. M_2). De richting van de asymmetrie van het vertikale getij (eb- of vloeddominant) hangt af van het relatieve faseverschil tussen het viermaal daags getij en het dubbeldaags getij. Het vertikale getij is vloeddominant bij een relatief faseverschil tussen 0 en 180 graden, tussen 0 en -180 graden ebdominant. Hier wordt aangenomen dat het dubbeldaags en het viermaal daags getij een zuiver harmonische functie is. Dit is in werkelijkheid niet het geval. Het komt erop neer dat deze berekening klopt als het getij beschreven wordt met een halfdaagse periode, hetgeen in deze studie het geval is.

In werkelijkheid bestaat er niet één dubbeldaagse en één viermaal daagse getijcomponent, maar bestaan er meerdere dubbeldaagse en viermaal daagse getijcomponenten. Speer e.a. (1991) beredeneerden op basis van getijobservaties dat de richting van de asymmetrie van het vertikale getij bepaald kan worden met het relatieve faseverschil tussen de getijcomponent M_4 en de getijcomponent M_2 : $2\phi_{M_2} - \phi_{M_4}$. Een positieve waarde van $2\phi_{M_2} - \phi_{M_4}$ gaat gepaard met een kortere periode van stijgend waterniveau (vloeddominantie) en een negatieve waarde van $2\phi_{M_2} - \phi_{M_4}$ gaat gepaard met een kortere periode van dalend waterniveau (ebdominantie). Figuur 2.2 laat de superpositie zien van twee getij componenten met ω_1 en ω_2 , waarin $\omega_2 = 2 * \omega_1$ en amplitudes resp. 1 en 0,25. Figuur 2.2 laat de superposities voor de relatieve faseverschillen $2\phi_1 - \phi_2 = 0$ graden, 90 graden en 180 graden. Voor het relatieve faseverschil van 90 graden is de periode van stijgend waterniveau beduidend korter dan de periode van dalend waterniveau. De twee getijcomponenten met ω_1 en ω_2 kunnen dan gezien worden als M_2 resp. M_4 .



Figuur 2.2 Invloed faseverschil op duurverschillen tussen stijgend en dalend waterniveau

Dit levert de volgende te hanteren definities (en notaties) in dit rapport:

De richting van de asymmetrie van het verticale getij wordt weergegeven met het teken van het relatieve faseverschil $2M_2 - M_4$.

De intensiteit van de asymmetrie van het verticale getij wordt weergegeven met de amplitudeverhouding aM_4/aM_2 .

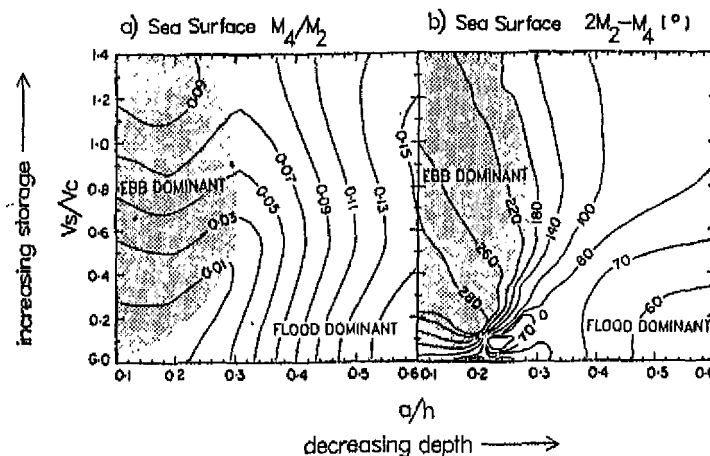
Invloed morfologie op getiasymmetrie

Uit de basisvergelijkingen in 2.1 volgt dat de morfologische parameters voor de waterbeweging als gevolg van het getij de breedte en gemiddelde diepte zijn.

Speer en Aubrey (1985) en Friedrichs en Aubrey (1988) bestudeerden door middel van 1D-modellering de invloed van de geometrie en bathymetrie van korte wrijvingsgedomineerde en goed-gemengde esutaria op de asymmetrie van het verticale getij. Zij concludeerden dat in zo'n estuarium de volgende parameters de asymmetrie van het verticale getij bepalen:

1. verhouding van de amplitude van het totale getij en de gemiddelde waterdiepte: a/h .
2. de verhouding van het watervolume tussen hoog water en laag water boven de platen en het watervolume in het kanaal onder gemiddeld waterniveau: V_s/V_c .

Zij gebruikten relatief ondiepe estuaria: a/h variërend van 0 tot 0,6. De door hun gemodelleerde estuaria hebben tevens een relatief groot intergetijdegebied: V_s/V_c variërend van 0 tot 1,4.



Figuur 2.3 Contour diagram van de parameters die de niet-lineaire verstoring bepalen als functie van a/h en V_s/V_c , volgend uit 84 model systemen. De 180 graden contourlijn verdeelt het diagram in eb- en vloeddominante gebieden. (naar: Speer e.a., 1991)

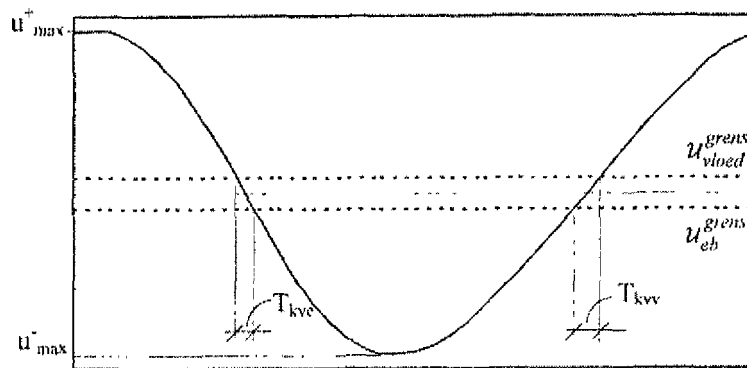
In Wang e.a.(1999) is gebleken dat een kwalitatieve toepassing van het diagram uit Friedrichs en Aubrey (1988) mogelijk is op de Westerschelde. De conclusie in Wang e.a.(1999) is dat de verandering van de asymmetrie van het verticale getij tussen twee opeenvolgende lokaties kwalitatief bepaald kan worden met de verandering van de parameters V_s/V_c en a/h tussen die lokaties in de Westerschelde. Verder in dit rapport zal het diagram in Figuur 2.3 het diagram van Friedrichs en Aubrey genoemd worden.

De conclusie van Wang e.a.(1999) is gebaseerd op basis van de asymmetrie van het verticale getij in een in 6 vakken opgedeelde Westerschelde in twee verschillende jaren. Onderbouwing van de conclusie in Wang e.a.(1999) door middel van 1D-modellering is gewenst, omdat met het Friedrichs en Aubrey diagram op een relatief eenvoudige wijze de gevolgen van ingrepen voor de residuele sedimenttransporten in de Westerschelde voorzien kunnen worden.

2.4 Asymmetrie van het horizontale getij

Voor berekeningen van sedimenttransport is kennis van de asymmetrie van het horizontale getij noodzakelijk. De asymmetrie van het horizontale getij kan op twee manieren een residueel sedimenttransport veroorzaken:

1. verschil in kenteringsduur
2. verschil in maximale eb- en vloedsnellheden



Figuur 2.4 Asymmetrie van het horizontale getij.

De asymmetrie van het horizontale getij wordt bepaald met de parameters (zie Figuur 2.4):

1. T_{kve} en T_{kvv}
2. u_{max}^+ en u_{max}^-

Het verschil tussen de duur van kentering voor eb (T_{kve}) en de duur van kentering voor vloed (T_{kvv}) wordt bepaald door:

eerst de over het dwarsprofiel gemiddelde snelheid te berekenen met het totale debiet en het totale doorstroomoppervlak, dan een grens vloed- en ebsnelheid te bepalen voor de situatie kentering: u_{vloed}^{grens} en u_{eb}^{grens} waarna de kenteringsduren: T_{kve} en T_{kvv} bepaald kunnen worden.

Het verschil tussen maximaal optredende eb- en vloedsnellheden wordt bepaald door het verschil tussen $u_{max}^- - u_{max}^+$ zoals in Figuur 2.4 weergegeven.

In dit onderzoek zal alleen het verschil tussen maximaal optredende eb- en vloedsnellheden behandeld worden, omdat dit verschil belangrijk is voor zandtransport. Een verschil in kenteringsduren is van invloed op transport van fijn sediment zoals slib. De asymmetrie van het horizontale getij refereert in dit rapport dan ook aan het verschil tussen maximale eb- en vloedsnellheden.

3 Opzet simpel prismatisch model

3.1 Inleiding

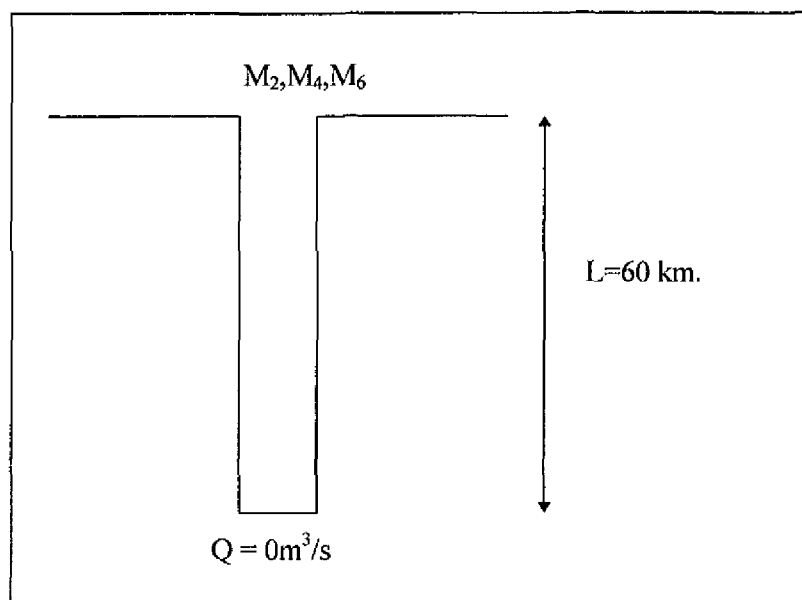
Om de invloed van de geometrie op de getiasymmetrie te onderzoeken, wordt in dit hoofdstuk een simpel prismatisch model gebruikt. Met simpel prismatisch wordt bedoeld dat er geen variatie van het dwarsprofiel in de langsrichting van het estuarium is. Voor de dwarsprofielen worden vormen gebruikt die karakteristiek zijn voor de Westerschelde (3.3). De gevoeligheid van het model voor opgelegde randvoorwaarden wordt bepaald door te onderzoeken of opgelegde hogere harmonische componenten invloed hebben op de getiasymmetrie (3.4.2). De invloed op de getiasymmetrie van een opgelegd debiet wordt bepaald in 3.4.3. In dit hoofdstuk wordt de invloed van het gedeelte van de Nederlands-Belgische grens tot aan Gentbrugge verwaarloosd; de invloed van het gedeelte van de grens tot aan Gentbrugge wordt bepaald in 3.4.3 om te laten zien in hoeverre er een vergelijking met de Westerschelde gemaakt kan worden. De asymmetrie van het verticale getij bleek in Wang e.a.(1999) een verband te hebben met geometrische parameters voor de plaat-geul verhouding en voor de relatieve gemiddelde diepte (ratio amplitude verticale getij en gemiddelde diepte in kanaal). Met de in Wang e.a.(1999) gebruikte geometrische parameters wordt het interessegebied van het onderzoek in dit hoofdstuk bepaald (3.5). In Wang e.a.(1999) wordt reeds vermeld dat een nadeel van de gebruikte parameters is, dat deze niet onafhankelijk zijn. De afhankelijkheid van bestaande en ook alternatieve parameters wordt daarom geanalyseerd in 3.5 en 3.6. Het interessegebied dat bepaald is met geometrische parameters bepaalt uiteindelijk de variatie van dwarsprofielen(3.7). Het verband tussen geometrische parameters en de daarbij optredende getiasymmetrie wordt beschreven in hoofdstuk 4.

In appendix A wordt beschreven hoe de resultaten verkregen worden via gebruik van formules en software.

3.2 Simpel prismatisch model

Het simpel prismatisch 1D model heeft de volgende opzet:

- Uniforme geometrie in langsrichting
- Lengte 60 km, dit is de monding tot aan de Nederlands-Belgische grens
- Dwarsprofielen afgeleid met de relatie voor de hypsometrie voor de Westerschelde uit Wang e.a.(1999) (zie 3.3)
- Variatie van geometrische parameters voor dwarsprofielen met randvoorwaarde dat volume van model gelijk is aan dat van de Westerschelde in 1996: 2689,1 miljoen m³.
- Aan de monding worden de getijcomponenten M_2 en M_4 en M_6 opgelegd (zie 3.4.2 Opgelegde getij) en er wordt geen debiet opgelegd(zie 3.4.3).



Figuur 3.1 Sempel prismatisch model

In Wang e.a.(1999) wordt een tabel gegeven met parameters die met een formule(3.1) voor het volume op een bepaald niveau voor 6 verschillende vakken de hypsometrie karakteriseren in de Westerschelde (Tabel 3.1). Vaknummer 1 beschrijft het vak dat meest stroomopwaarts ligt. De waarde van de parameter C is niet direct duidelijk uit de oorspronkelijke tabel, daarom worden twee kolommen met de waardes van C toegevoegd.

Tabel 3.1 Parameters die de hypsometrie karakteriseren voor 6 vakken in de Westerschelde in 1955 en 1996

Vak		1955			1996			
	d(m)	α	Cd^α	d(m)	α	Cd^α	C_{1955}	C_{1996}
1	20	2.7	131.9	20	1.94	182.5	0.040501	0.546091
2	20	2.57	254.8	20	2.16	270	0.115492	0.417964
3	30	2.47	503	30	2.67	472.8	0.113	0.053798
4	40	3.59	441.3	40	3.59	441.3	0.000782	0.000782
5	50	3.99	670.7	50	4.42	691.3	0.000112	2.14E-05
6	40	3.43	631.2	40	3.43	631.2	0.002019	0.002019

De parameters in Tabel 3.1 zijn in Wang e.a.(1999) bepaald met het volume op een bepaald niveau:

$$V = C(d+z)^\alpha \quad (3.1)$$

of:

$$V = Cd^\alpha \left(1 + \frac{z}{d}\right)^\alpha \quad (3.2)$$

Uit Tabel 3.1 blijkt dat in de jaren de maximale diepte gelijk is gebleven, de parameter α enigszins varieert en dat Cd^α in eenzelfde grootte-orde blijft. De parameter Cd^α geeft het volume onder het referentie-niveau N.A.P. weer.

Hiermee kan de som van de volumes van de zes vakken worden berekend voor de jaren 1955 en 1996.

1955: 2632.9 miljoen m³

1996: 2689.1 miljoen m³

3.3 Gebruik van relatie voor de hypsometrie in simpel prismatisch model

Uit Wang e.a.(1999) zijn de formules voor volume V (3.3) en bergend oppervlak F (3.4) overgenomen:

$$V = C(d + z)^\alpha \quad (\text{watervolume onder niveau } z) \quad (3.3)$$

z is het niveau ten opzichte van N.A.P. (=het referentieniveau)

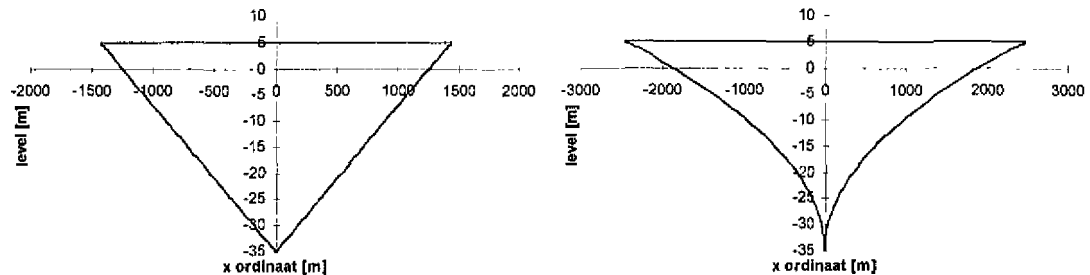
$$\text{en: } F = \frac{\partial V}{\partial z} = \alpha C(d + z)^{(\alpha-1)} \quad (\text{wateroppervlak op niveau } z) \quad (3.4)$$

Bij verwaarlozing van de breedtevariatie binnen een vak en bepaling van de lengte L van een vak langs de rivieras volgt hieruit volgt de breedte b op een bepaald niveau in (3.5):

$$b = \frac{\alpha C}{L} (d + z)^{(\alpha-1)} \quad (3.5)$$

Met (3.5) is dan een gemiddeld profiel per vak te bepalen.

Figuur 3.2 geeft de invloed van α weer. Een toenemende α bij gelijke maximale diepte d doet dus de gemiddelde diepte afnemen.



Figuur 3.2 $\alpha=2$ (links) en $\alpha=3$ (rechts)

Voor de gemiddelde diepte h wordt de definitie gesteld in (3.6):

$$h = \frac{A_{s,z=0}}{B_{z=0}} = \frac{V_{z=0} / L}{B_{z=0}} \quad (3.6)$$

waarin: $A_{s,z=0}$ is het doorstroomoppervlak op $z=0$ m

$V_{z=0}$ is het volume onder $z=0$ m

$B_{z=0}$ is de breedte op $z=0$ m

Na substitutie van (3.1) en (3.5) in (3.6) volgt in (3.7):

$$h = \frac{d}{\alpha} \quad (3.7)$$

waarin:

h = gemiddelde diepte onder N.A.P.

3.4 Gevoeligheidsanalyse

3.4.1 Inleiding

In de gevoeligheidsanalyse wordt een dwarsprofiel gebruikt dat als een gemiddeld profiel van de Westerschelde gezien kan worden:

$d=35$ m. (maximale diepte)

$\alpha=3$ [-]

$C=0.0614$ [-]

$V=2632$ miljoen m^3

In Figuur 3.2, rechts, staat dit dwarsprofiel

De asymmetrie van het verticale getij in het model is bekeken op gevoeligheid voor:

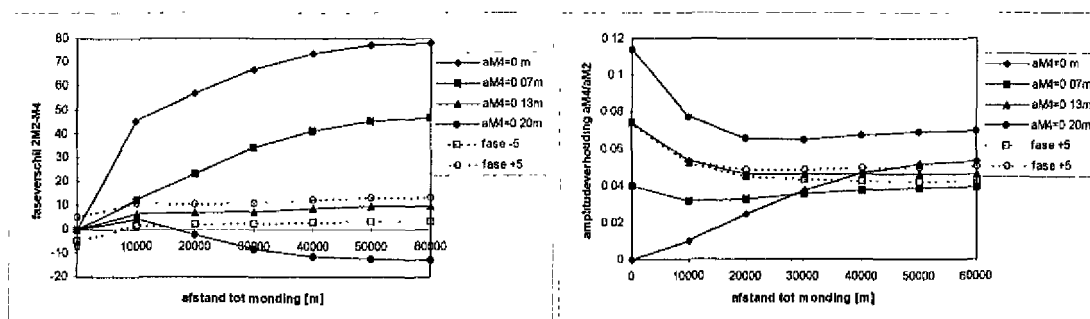
- Opgelegd getij (3.4.2)
- Opgelegd debiet van jaargemiddeld debiet van $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (3.4.3)
- Verlenging van het model met een gedeelte dat de Nedelands-Belgische grens tot aan Gentbrugge voorstelt (3.4.3)

Om het gedrag van de getiasymmetrieën het model te analyseren is bekeken of een opgelegd M_4 gesuperponeerd mag worden op een intern gegenereerd M_4 in een situatie zonder opgelegd M_4 d.m.v. vectoroptelling(3.4.4)

3.4.2 Opgelegde getijcomponenten

De amplitude van de getijcomponent M_2 is 1.75m (zoals in Vlissingen, volgens RIKZ, 2000). De amplitude van de opgelegde getijcomponent M_4 getij wordt gevarieerd van 0 tot 0,20m (vier model runs). In de afgelopen decennia vertoont de getiasymmetrie bij Vlissingen een schommeling van enkele graden (Gerritsen e.a., 1999). Daarom wordt tevens bij de amplitude van $M_4=0,13\text{m}$ een negatief en positief relatief faseverschil van 5 graden opgelegd (2 model runs). Het relatieve faseverschil $2\phi_{M2}-\phi_{M4}$ aan de monding wordt nul gekozen in de overige 4 situaties. De richting van de asymmetrie wordt uitgedrukt in het faseverschil $2\phi_{M2}-\phi_{M4}$. De intensiteit van de asymmetrie wordt uitgedrukt in de amplitudeverhouding a_{M4}/a_{M2} . Een positieve waarde voor $2\phi_{M2}-\phi_{M4}$ betekent dat het verticale getij vloeddominant is en een negatieve waarde betekent dat het verticale getij ebdominant is.

In Figuur 3.3 staat het resultaat van 6 model runs.



Figuur 3.3 Asymmetrie van het verticale getij bij variatie van amplitude en fase van opgelegd M_4

Toelichting:

De richting van de asymmetrie van het verticale getij in het model blijkt gevoelig voor de amplitude van de opgelegde getijcomponent M_4 . Het faseverschil $2\phi_{M2}-\phi_{M4}$ neemt significant af bij een toenemende opgelegde amplitude van M_4 ten opzichte van situaties met een kleinere opgelegde amplitude van M_4 .

Bij een grotere opgelegde amplitude (vergelijk $aM_4=0.13\text{m}$ en $aM_4=0.20\text{m}$ met $aM_4=0.07\text{m}$) van de getijcomponent M_4 bestaat er een grotere intensiteit in het model. De

intensiteit (amplitudeverhouding a_{M4}/a_{M2}) wordt opgelegd bij de zeewaartse rand. Tot 20 km van de monding treedt bij een amplitude van de opgelegde getijcomponent M_4 van meer dan 0.07m een afname van de intensiteit op, waarna de intensiteit min of meer constant blijft. Bij een opgelegde amplitude van de getijcomponent M_4 van 0.07m is de intensiteit constant over de lengte van het estuarium en bij géén opgelegd M_4 (amplitude 0m) neemt de intensiteit toe tot op 50 km vanaf de monding. De intensiteit in de twee situaties dat er tevens een relatief faseverschil bij de monding wordt opgelegd (fase+5 en fase-5) verschilt nauwelijks van de situatie met eenzelfde amplitude zonder faseverschil ($a_{M4}=0,13m$). De intensiteit in het gehele estuarium hangt dus af van de amplitude van de opgelegde getijcomponent M_4 .

Uit de resultaten waarbij een relatief faseverschil is opgelegd aan de monding blijkt dat een opgelegd faseverschil doorwerkt in landwaartse richting (vergelijk de situaties $a_{M4}=0,13m$ en de situaties fase+5 en fase-5). Dit leidt tot het inzicht dat de situatie aan de monding mede bepalend is voor de getiasymmetrie in het hele systeem.

Conclusie:

Zowel de amplitude als de fase van de opgelegde getijcomponent M_4 zijn van invloed op de asymmetrie van het verticale getij (zowel intensiteit als faseverschil). Een amplitude en fase voor het M_4 wordt opgelegd zoals die in de Westerschelde aan de monding is: $a_{M4}=0,13 m$ met een relatief faseverschil tussen M_2 en M_4 van 0 graden.

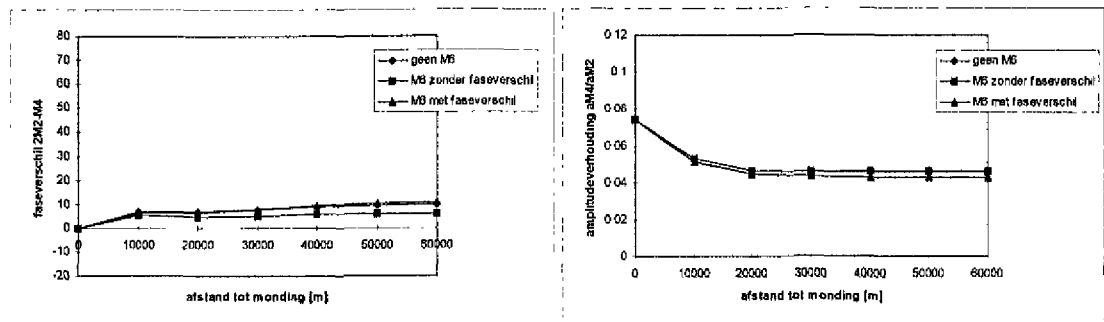
Invloed M_6 getij

Het getij bij de monding bevat volgens RIKZ (2000) tevens een M_6 getijcomponent met een amplitude van 9 cm.

De gevoeligheid van het model voor een opgelegd M_6 getij moet daarom ook bekend zijn. In Figuur 3.4 is het resultaat te zien van model runs met tevens een opgelegd M_6 .

Het opgelegde getij voor de situatie:

"geen M_6 ":	$a_{M4}=1.75m$. $a_{M4}=0,13 m$.
" M_6 zonder faseverschil":	$a_{M4}=1.75m$. $a_{M4}=0,13 m$. $a_{M6}=0,09m$. relatief faseverschil $3M_2-M_6=0$
" M_6 met faseverschil":	$a_{M4}=1.75m$. $a_{M4}=0,13 m$. $a_{M6}=0,09m$. relatief faseverschil $3M_2-M_6=68$ graden



Figuur 3.4 Gevoeligheid model voor opgelegde getijcomponent M_6

Het faseverschil $2M_2-M_4$ is gevoelig voor een opgelegd M_6 getij. De verschillen tussen de de model runs in Figuur 3.4 zijn veel kleiner dan de verschillen tussen de model runs in Figuur 3.3 (enkele graden t.o.v. tientallen graden).

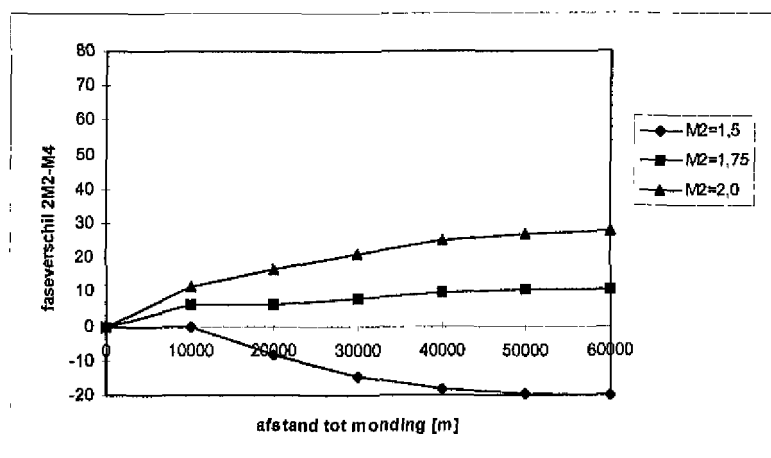
Conclusie:

Alhoewel de amplitude van het opgelegd M_6 getij van weinig invloed is op de asymmetrie van het verticale getij uitgedrukt in het faseverschil $2M_2-M_4$, wordt een M_6 wordt opgelegd zoals die in de Westerschelde aan de monding is: $aM_6=0,09$ m. met een relatief faseverschil van $3M_2-M_6=68$ graden.

Invloed amplitude M_2 op getiasymmetrie

Tot nu toe is de amplitude van de getijcomponent M_2 constant gehouden en dit zal in het verdere onderzoek ook zo zijn. Om aan te tonen dat de amplitude van deze component ook van invloed is op de getiasymmetrie worden op de situatie “M6 met faseverschil” uit de vorige paragraaf nog twee variaties aangebracht: één met een amplitude voor $M_2=1,5$ m en één met een amplitude voor $M_2=2,0$ m. Dit is namelijk een reële variatie voor de amplitude van het dubbeldaags getij in een springtij-doodtij cyclus.

De uitgangssituatie “M6 met faseverschil” is in Figuur 3.5 de situatie $M_2=1,75$ m. De resultaten in Figuur 3.5 laten zien dat bij een grotere amplitude het relatieve faseverschil toeneemt en dat bij een kleinere amplitude het relatieve faseverschil afneemt. Dit is van belang, omdat in hoofdstuk 4 de asymmetrie wordt uitgedrukt met parameters die de amplitude van het verticale getij bevatten. Omdat de amplitude van het opgelegde totale getij verder in het onderzoek niet gevarieerd wordt, kan de berekening in deze paragraaf dienen ter verificatie van de invloed van de opgelegde amplitude van het totale getij.



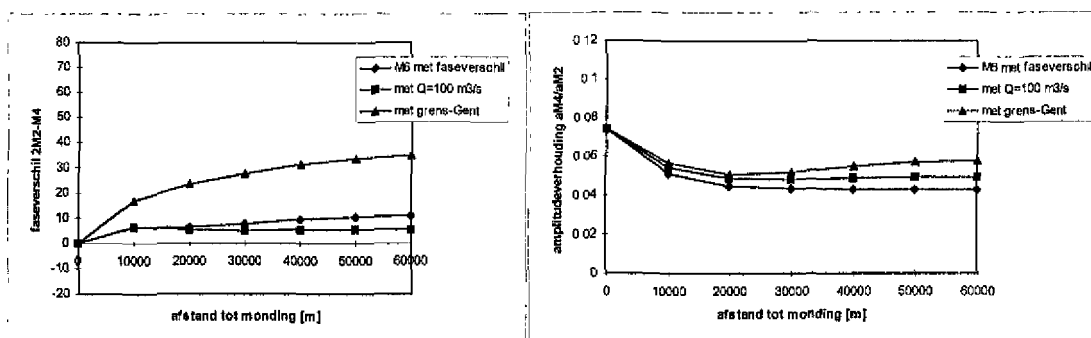
Figuur 3.5 Invloed amplitude M_2 op getiasymmetrie

3.4.3 Invloed afvoer Schelde en gedeelte grens-Gentbrugge

Om het model eenvoudig te houden, wordt in het simpel prismatisch model geen debiet opgelegd en het gedeelte van de Nederlands-Belgische grens tot aan Gentbrugge wordt niet meegenomen in de schematisatie. In deze paragraaf wordt duidelijk wat het gevolg is van deze schematisatie.

In het model wordt een debiet opgelegd van $100 \text{ m}^3/\text{s}$, wat een jaargemiddelde afvoer van de Schelde is. Het opgelegde getij is zoals volgt uit de conclusie in de vorige paragraaf (M_6 met faseverschil). Het verschil is te zien in Figuur 3.6. Het verschil ten opzichte van " M_6 met faseverschil" is dat het getij enigszins minder vloeddominant wordt (het faseverschil $2M_2-M_4$ is kleiner geworden).

Het eerder verwaarloosde gedeelte van de Nederlands-Belgische grens tot aan Gentbrugge wordt nu aan het model toegevoegd. De gegevens zijn op basis van Van der Male (1996). Zie voor de schematisatie van het gedeelte Nederlands-Belgische grens tot aan Gentbrugge de beschrijving in Appendix C. Het opgelegde getij is zoals volgt uit de conclusie in de vorige paragraaf (M_6 met faseverschil) en er wordt geen debiet opgelegd.



Figuur 3.6 Invloed debiet en invloed Nederlands-Belgische grens tot aan Gentbrugge

Toelichting:

In de resultaten in Figuur 3.6, links, is te zien dat de richting van de asymmetrie van het verticale getij verandert wanneer aan het model het gedeelte van Nederlands-Belgische

grens tot aan Gentbrugge toegevoegd wordt (het faseverschil $2M_2-M_4$ wordt kleiner ten opzichte van model "M6 met faseverschil").

In Figuur 3.4, rechts is nauwelijks een verschil te zien tussen de geplote lijnen. De intensiteit (amplitudeverhouding aM_2/aM_4) verandert weinig ten gevolge van een opgelegd debiet. Toevoeging van het gedeelte Nederlands-Belgische grens tot aan Gentbrugge zorgt voor een geringe toename van de intensiteit ten opzichte van model "M6 met faseverschil".

Conclusie:

Voor vergelijking met de Westerschelde is de invloed van het gedeelte van Nederlands-Belgische grens tot aan Gentbrugge van belang. Bij het complexe model moet hier rekening mee worden gehouden om de Westerschelde te kunnen simuleren. Een opgelegd debiet heeft weinig invloed.

3.4.4 Superpositie van componenten

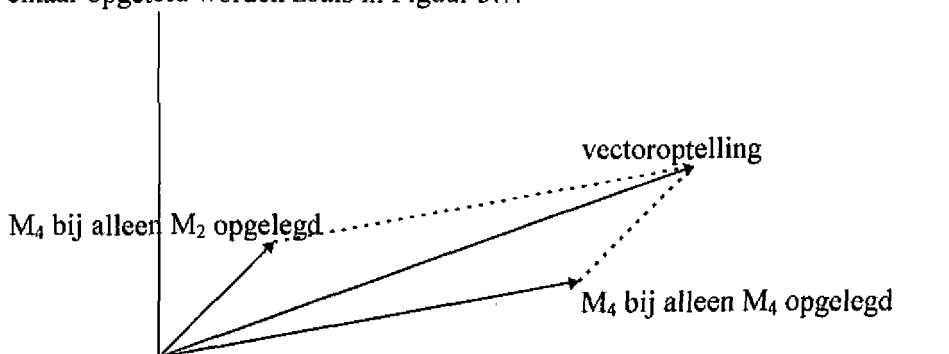
Het M_4 getij in de situatie dat zowel een M_2 als een M_4 wordt opgelegd, wordt geanalyseerd door te bekijken of vergelijkbare resultaten ontstaan bij vectoroptelling van M_4 bij de twee situaties:

- alleen M_4 opgelegd met amplitudde van 0,15 m. ('M4 opgelegd' in Tabel 3.2)
- alleen M_2 opgelegd met amplitude van 2 m. ('M2 opgelegd' in Tabel 3.2)

Het doel van de analyse in deze paragraaf is te duidelijk te maken of superpositie van opgelegd M_4 en gegenereerd M_4 op een aantal afstanden vanaf de monding uit bovenstaande 2 situaties geoorloofd is.

Hier wordt weer het eerst genoemde dwarsprofiel van deze paragraaf gebruikt (zie 3.4.1) Vervolgens wordt bekeken hoe het opgelegde M_4 getij zich ontwikkelt in de eerste situatie ('M4 opgelegd' in Tabel 3.2) en hoe het M_4 getij intern gegenereerd wordt in de tweede situatie ('M2 opgelegd' in Tabel 3.2).

Met een vectoroptelling (Figuur 3.7) wordt bekeken of het M_4 uit de eerste situatie opgeteld bij het M_4 uit de tweede situatie ('vectoroptelling' in Tabel 3.2) eenzelfde M_4 oplevert in de situatie dat zowel een M_4 als een M_2 aan de rand wordt opgelegd ('M2 en M4 opgelegd' in Tabel 3.2). De getijcomponenten kunnen worden voorgesteld als een vector: met een hoek die de fase voorstelt en een lengte die de amplitude voorstelt. Twee vectoren kunnen dan bij elkaar opgeteld worden zoals in Figuur 3.7.



Figuur 3.7 Verduidelijking vectoroptelling

Tabel 3.2 Vectoroptelling

	M4 opgelegd		M2 opgelegd		vectoroptelling		M2 en M4 opgelegd	
lokatie	fase M4	amplitude M4	fase M4	amplitude M4	fase M4	amplitude M4	fase M4	amplitude M4
0	0.005	0.15	-8.612	0	0.005	0.150	0.006	0.15
10000	56.89	0.18	-27.419	0.019	50.956	0.183	18.631	0.109
20000	80.651	0.293	-15.554	0.056	69.671	0.292	34.311	0.105
30000	89.171	0.407	-13.672	0.095	75.674	0.397	41.605	0.113
40000	92.499	0.498	-14.723	0.125	77.979	0.476	43.627	0.122
50000	92.499	0.498	-16.484	0.142	75.947	0.471	43.585	0.126

Wanneer alleen een M_4 getij opgelegd wordt is duidelijk resonantie waarneembaar, de amplitude neemt sterk toe in landwaartse richting. Dit is te verklaren met de resonantie getijgolf lengte van het M_4 getij. Met de formules 3.8 en 3.9

$$c = \sqrt{g \frac{A_s}{B}}, \text{ de voortplantingssnelheid van de getijgolf (Dronkers, 1964)} \quad (3.8)$$

$$L_R M_4 = \frac{1}{4} \sqrt{g \left(\frac{A_s}{B} \right)} T_{M_4} \quad (3.9)$$

waarin:

- $L_R M_4$ = resonantie getijgolf lengte van het M_4 getij bij verwaarloosbare wrijving
- g = zwaartekrachtsversnelling
- A_s = doorstroomoppervlak op N.A.P.
- B = breedte op N.A.P.
- T_{M_4} = periode M_4 getij

wordt de resonantielengte ongeveer 63 km. Het prismatisch model rekent met een lengte van 60 km, dus hiermee is de resonantie van deze situatie verklaard.

Wanneer het M_4 dat gegenereerd wordt door het M_2 ('M2 opgelegd' in Tabel 3.2) hierbij wordt opgeteld (zie kolommen 'vectoroptelling' in Tabel 3.2), ontstaat een golf met toenemende amplitude in landwaartse richting.

Nu wordt de vectoroptelling vergeleken met de situatie waarin zowel een M_2 als een M_4 wordt opgelegd (meest rechtse twee kolommen in Tabel 3.2). In Tabel 3.2 is te zien dat de uitkomsten van de vectoroptelling en de situatie waarin zowel een M_2 als een M_4 wordt opgelegd, niet hetzelfde zijn. De amplitude neemt in landwaartse richting eerst af en dan weer enigszins toe in de situatie dat zowel een M_2 als een M_4 wordt opgelegd en is op 50 km vanaf de monding ongeveer een factor 4 kleiner dan in de uitkomsten van superpositie van componenten uit twee verschillende situaties.

De conclusie is dat de intern gegenereerde en opgelegde M_4 niet opgeteld kunnen worden. Dit kan twee oorzaken hebben:

- Het opleggen van een M_4 getij heeft invloed op de interne generatie van het M_4 getij.
- De voortplanting van het M_4 getij in het estuarium wordt beïnvloed door de aanwezigheid van een M_2 getij in het estuarium. Anders geformuleerd is dit: het M_4 gaat anders lopen wanneer deze meeloopt met een M_2 .

De tweede verklaring is het meest waarschijnlijke omdat de waterbeweging in het estuarium in de situatie met M_2 significant verschilt van de situatie zonder M_2 .

Het bestaan van een M_2 getij in het estuarium heeft dus invloed op de voortplanting van het M_4 getij.

3.5 Bepalen van bereik parameters a/h en V_s/V_c

Omdat de relatie voor de hypsometrie al vastligt kan met deze relatie bij een vooraf bepaalde amplitude het bereik van de later toe te passen parameters (bv. V_s/V_c en a/h) vooraf bepaald worden. Dit is van belang om realistische combinaties van d en α te kunnen bepalen. In de Westerschelde bereikt a/h een maximum van 0.25 en V_s/V_c een maximum van 0,1 (Wang e.a. 1999). Deze maxima van V_s/V_c en a/h bepalen het interessegebied van de te modelleren situaties in dit onderzoek.

Nu wordt de relatie tussen de parameters die de hypsometrie karakteriseren (d , α en C) zoals in Tabel 3.1 en V_s/V_c en a/h bij een bepaalde amplitude bepaald:

De volgende definities gelden:

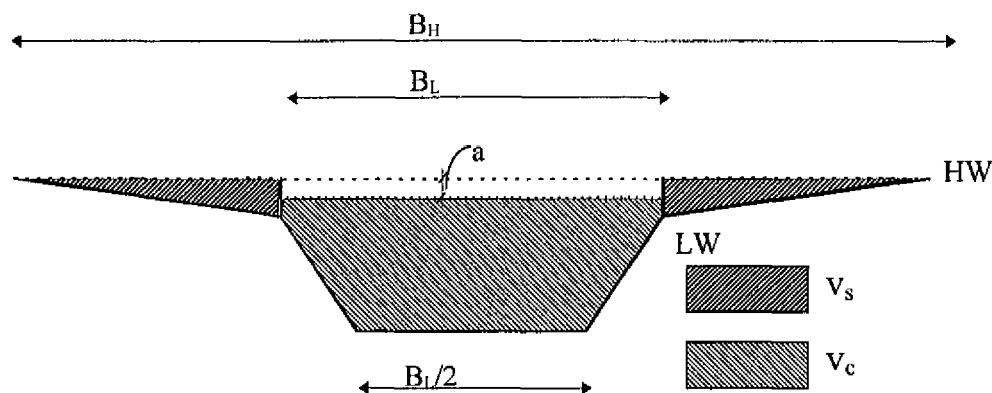
V_s het watervolume dat bestaat tussen HW en LW boven de platen.

V_c het watervolume dat bestaat in het kanaal tot gemiddeld waterniveau

a amplitude

h gemiddelde waterdiepte in het kanaal

In het onderzoek van Speer en Aubrey(1985) werd het geschematiseerde dwarsprofiel zoals in Figuur 3.8 gebruikt. In Figuur 3.8 staat tevens de betekenis van de parameters V_s en V_c aangegeven.



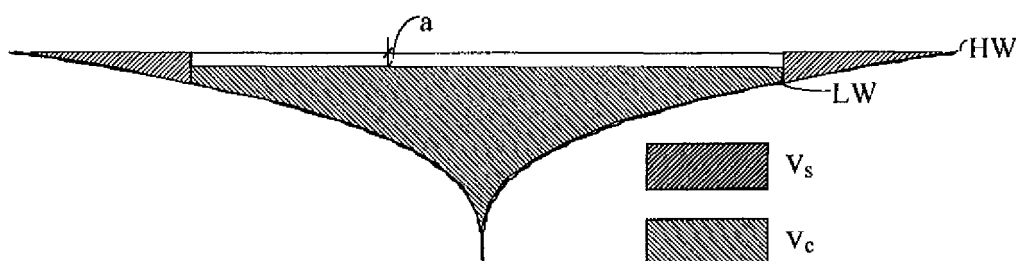
Figuur 3.8 V_s en V_c bij schematisatie Speer en Aubrey (1985)

De volgende formules werden hier gebruikt:

$$V_s = (B_H - B_L)a$$

$$V_c = \frac{3}{4} B_L H + \frac{1}{4} B_L a$$

H = waterdiepte in kanaal: $(HW + LW)/2$



Figuur 3.9 V_s en V_c bij gebruik hypsometrische relatie

Voor de relatie voor de hypsometrie bij $\alpha > 2$ laat Figuur 3.9 de betekenis van de parameters V_s en V_c zien.

De volgende formules worden gebruikt:

$$V_s = V(a) - V(-a) - 2F(-a)a$$

$$V_c = V(-a) + aF(-a)$$

$$h = \frac{V_c}{F(-a)} \quad (= \text{gemiddelde waterdiepte in kanaal})$$

Bij invullen van de relatie voor de hypsometrie volgt:

$$\frac{V_s}{V_c} = \frac{(d+a)^\alpha - (d-a)^\alpha - 2a\alpha(d-a)^{(\alpha-1)}}{(d-a)^\alpha + a\alpha(d-a)^{(\alpha-1)}}$$

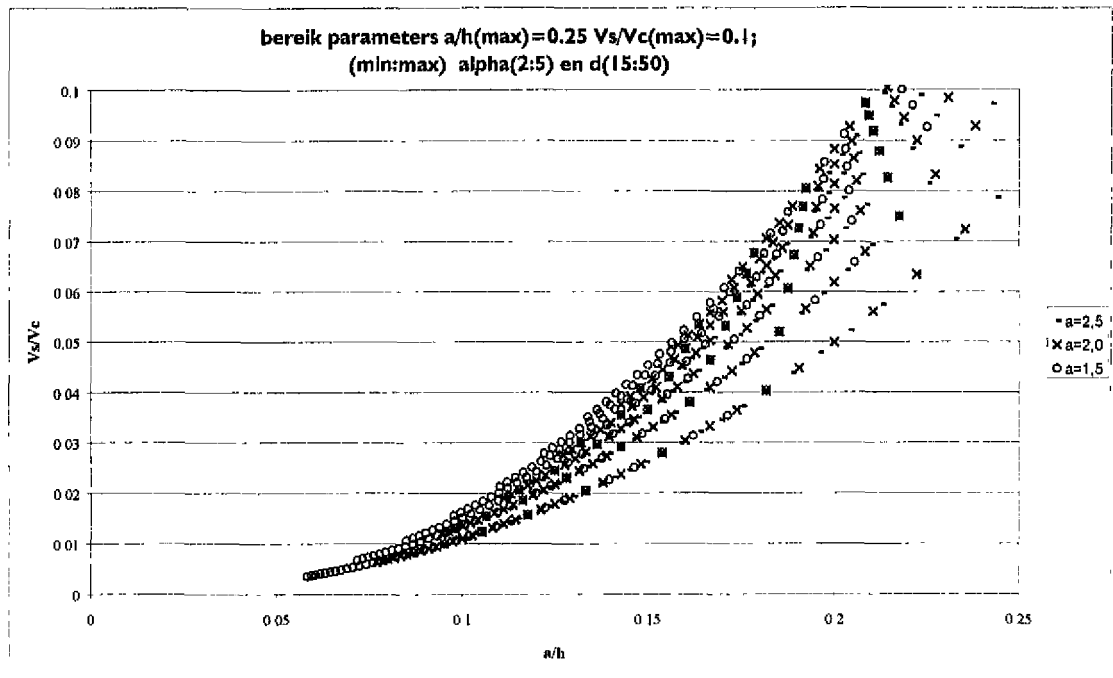
$$\frac{a}{h} = \frac{a\alpha(d-a)^{(\alpha-1)}}{(d-a)^\alpha + a\alpha(d-a)^{(\alpha-1)}}$$

De parameter C en de lengte van het estuarium L hebben uiteraard in het prismatische model geen invloed hebben op het bereik van V_s/V_c .

Met bovenstaande formules kan het bereik bij een aangenomen amplitude bepaald worden. Dit wordt gedaan voor een amplitude van 1.5 , 2.0 en 2.5 m.

In Figuur 3.10 is te zien dat deze variatie niet een erg grote spreiding oplevert in het diagram. Over de lijnen die verondersteld kunnen worden is α constant en varieert de maximale diepte d. Het diagram is gemaakt met een variatie van de maximale diepte van 15 tot 50 m bij een stapgrootte van 1m.

Veel combinaties van α en d vallen buiten de grenzen van het $a/h; V_s/V_c$ diagram wanneer de grenzen voor de Westerschelde worden aangehouden en worden daarom niet meegenomen in het model. In feite komt het erop neer dat er situaties gemodelleerd worden die een orde van grootte overeenkomst van V_s/V_c en a/h met de Westerschelde hebben. Uit Tabel 3.1 volgt dat α varieert van 2 tot 5 in de Westerschelde. Wanneer α gevarieerd wordt van 2 tot 5 met een stapgrootte van 0,5 en V_s/V_c en a/h een orde van grootte overeenkomst hebben met de Westerschelde, volgen hieruit bij elke α een maximale en minimale diepte in Tabel 3.3. Hiermee is het interessegebied voor het simpel prismatisch model bepaald.



Figuur 3.10 Bereik parameters a/h en V_s/V_c

Tabel 3.3 Grenzen maximale diepte bij verschillende α

α	$d_{\min}$	$d_{\max}$
5,0	32	50
4,5	30	50
4,0	26	50
3,5	22	50
3,0	19	50
2,5	15	50
2,0	15	50

3.6 Bereik van de alternatieve parameter A_f/A

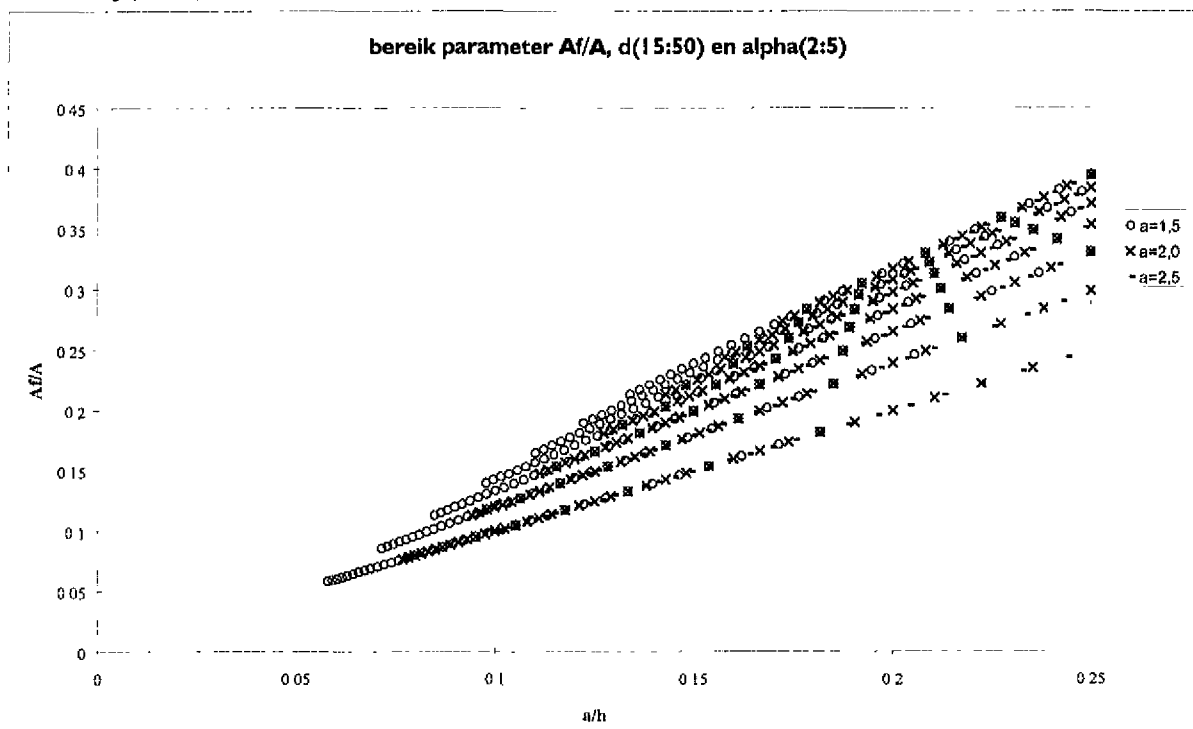
In Wang e.a.(1999) is een voorstel gedaan om de parameter V_s/V_c te vervangen door A_f/A waarin A_f de horizontale oppervlakte op de platen is en A de totale horizontale oppervlakte. Binnen het interessegebied afgeleid in de vorige paragraaf wordt het bereik van de parameter A_f/A bepaald. In het prismatisch model kan dan de volgende formule gebruikt worden:

$$\frac{A_f}{A} = \frac{F(a) - F(-a)}{F(a)}$$

hieruit volgt dan met de relatie voor de hypsometrie:

$$\frac{A_f}{A} = 1 - \left(\frac{(d-a)}{(d+a)} \right)^{(\alpha-1)}$$

In Figuur 3.11 is op de horizontale as een maximum waarde van $a/h=0,25$ gekozen. In Figuur 3.11 wordt de amplitude gevarieerd ($a=1,5$; $a=2,0$; $a=2,5$). Het blijkt dat variatie van de amplitude de spreiding in het diagram in Figuur 3.11 (A_f/A en a/h .) niet veel vergroot. In het diagram in Figuur 3.11 is nl. te zien dat tussen de tekens ('o', 'x' en '-') die de waarde van A_f/A en a/h bij een bepaalde amplitudes weergeven, weinig spreiding ontstaat. De parameters A_f/A en a/h zijn niet onafhankelijk van elkaar en dit zorgt dan voor weinig spreiding in het diagram. Gebruik van de parameter A_f/A zal dus niet veel voordelen opleveren ten aanzien van onafhankelijkheid van parameters ten opzichte van die van Speer en Aubrey(1985).



Figuur 3.11 Bereik parameter A_f/A

3.7 Te modelleren situaties

De grenzen voor de te modelleren situaties zijn afgeleid in 3.5 en dat heeft grenzen opgeleverd zoals in Tabel 3.3.

Rond de waarde van $a/h=0,15$ is meer informatie gewenst, omdat dit een verhouding is die in de Westerschelde vaker voorkomt (zie Wang e.a.1999). Bij een amplitude van 2 meter en een diepte variatie van 15 tot 50 m wordt bekeken bij welke combinaties van α en d de a/h ongeveer 0,15 ($0,14 < a/h < 0,16$) is en daar wordt dan de diepte met kleinere stap gevarieerd.

Tabel 3.4 Interessegebied variatie parameters

bij $a=$	d
2,0	22-26
2,5	27-32
3,0	32-38
3,5	37-44
4,0	42-50
4,5	46-50
5,0	-

Tussen de waarden in Tabel 3.4 zal de maximale diepte met een stapgrootte van 2,5 meter worden gevarieerd. Bij de overige waarden met een stap van 5 meter. De parameter α wordt gevarieerd van 2 tot 5 met een stapgrootte van 0,5. De minimum en maximum waarden voor α zijn zo gekozen, omdat deze in de Westerschelde ook tussen deze waarden varieert.

De situaties in Tabel 3.5 worden gemodelleerd (aangeduid met een 'x'):

Dit zijn in totaal 55 situaties.

Tabel 3.5 Te modelleren situaties simpel prismatisch model

$d \backslash \alpha$	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
15	x	x					
20	x	x	x				
25	x	x	x	x	x		
27.5	x	x					
30	x	x	x	x	x	x	x
32.5		x	x				
35	x	x	x	x	x	x	x
37.5			x	x			
40	x	x	x	x	x	x	x
42.5				x	x		
45	x	x	x	x	x	x	x
47.5					x	x	
50	x	x	x	x	x	x	x

4 Resultaten simpel prismatisch model

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de analyse van de resultaten van het model van hoofdstuk 3 besproken. Het model heeft de volgende eigenschappen:

- Lengte estuarium is constant en gelijk aan 60 km (in 4.3 tevens enkele lengte variaties)
- Uniforme geometrie in langsrichting
- Variatie van geul-plaat verhouding in 55 situaties (55 model runs)
- Doorstroomoppervlak op gemiddeld waterniveau is gelijk in alle 55 situaties
- Randvoorwaarde monding: M_2, M_4, M_6 als in Westerschelde (Tabel 4.1)

Tabel 4.1 Randvoorwaarde monding

	M_2	M_4	M_6
fase (graden)	0	0	-68
amplitude (cm.)	175	13	9

- Tijdens elke model run wordt op de lokaties 0(=mondning), 10, ..., 60 km de waterstand, het debiet en het doorstroomoppervlak weggeschreven.

In de resultaten wordt een verband gezocht tussen de getijasymmetrie en één of meerdere geometrische parameters die voor elke model run de gebruikte schematisatie van het dwarsprofiel karakteriseren. Het doel van dit hoofdstuk is te concluderen met welke parameters de getijasymmetrie in het simpel prismatisch model het best beschreven kan worden.

Eerst wordt in 4.2 het diagram van Friedrichs en Aubrey (1985) (zie 2.3) toegepast op de resultaten van het simpel prismatisch model. Vervolgens wordt in 4.3 getracht een verband te vinden tussen de asymmetrie van het verticale getij en alternatieve parameters. Na analyse van de asymmetrie van het verticale getij wordt de voor de asymmetrie van het verticale getij gevonden parameter toegepast op de asymmetrie van het horizontale getij in 4.4. Na discussie van de resultaten in 4.5 volgt in 4.6 de conclusie voor het simpel prismatisch model.

4.2 Toepassing van diagram van Friedrichs en Aubrey (1988) op resultaten van simpel prismatisch model

Zoals in 2.3 uitgelegd, geeft het diagram van Friedrichs en Aubrey informatie over de asymmetrie van het verticale getij (uitgedrukt in het faseverschil $2M_2 - M_4$). Het diagram relateert de asymmetrie van het verticale getij in een bekken aan de morfologische eigenschappen van dat bekken. De morfologische eigenschappen worden weergegeven door de parameters a/h (ratio amplitude verticale getij en gemiddelde diepte in het kanaal) en

V_s/V_c (volume boven platen gedeeld door volume in kanaal). In 3.5 bleek al dat de parameters a/h en V_s/V_c niet onafhankelijk zijn.

Voor de gemodelleerde situaties (Tabel 3.5) zijn in figuur B1 (figuur in Appendix B) met stippen de bijbehorende waarden van a/h en V_s/V_c op een aantal afstanden (aangegeven in m boven iedere plot) vanaf de monding geplot. De getiasymmetrie is niet overal in het estuarium gelijk en daarom worden 6 plots voor verschillende afstand tot de monding gemaakt.

Voor de amplitude in de parameter a/h is de helft van de lokale getijslag gebruikt. Uit figuur B1 blijkt dat de stippen niet ver uiteen liggen, wat aangeeft dat de parameters a/h en V_s/V_c in de gemodelleerde situaties sterk van elkaar afhankelijk zijn. Om de getiasymmetrie weer te geven, is het nodig op de geplotte punten in figuur B1 contourlijnen te tekenen die het faseverschil $2M_2-M_4$ weergeven. Een getekende lijn is dan een interpolatie tussen twee punten met eenzelfde faseverschil $2M_2-M_4$. Het gewenste resultaat is een figuur waarin duidelijk eb- en vloeddominantie voor het verticale getij aan te geven zijn. De gekleurde contourlijnen in figuur B1 geven echter niet een duidelijk beeld waar de scheiding tussen eb- en vloeddominantie (faseverschil $2M_2-M_4=0$ graden) in het diagram. Dit komt vooral door de sterke afhankelijkheid van de parameters a/h en V_s/V_c . In de diagrammen in figuur B1 is ook geïnterpoleerd tussen punten die in het diagram nogal ver uiteen liggen en is het dus niet zeker of alle geplotte lijnen geldig zijn. Later zal blijken dat een parameter vergelijkbaar met de parameter a/h alléén al een goed beeld kan geven van de asymmetrie van het verticale getij.

Het diagram van Friedrichs en Aubrey(1988) kan eb- en vloeddominantie van het verticale getij enigszins scheiden mits dit diagram gemaakt wordt voor elke lokatie apart. Dit is te verklaren met het asymmetrieverloop in het estuarium. Immers aan de monding is het faseverschil nul en dit faseverschil neemt dan landinwaarts toe in de meeste situaties. De parameters a/h en V_s/V_c variëren over de lengte van het estuarium in geringe mate en de getiasymmetrie (voornamelijk de richting) varieert sterk over de lengte van het estuarium in de meeste situaties. Hierdoor ontstaat er rondom één punt in het diagram van Friedrichs en Aubrey(1988) verschillende asymmetrieën en zodoende geen duidelijke scheiding wanneer alle lokaties in hetzelfde diagram geplot worden.

4.3 Alternatieve parameters

Omdat het diagram van Friedrichs en Aubrey(1988) een niet duidelijke scheiding van eb- en vloeddominantie voor het verticale getij weergeeft (er is niet één duidelijke scheidingslijn tussen eb en vloeddominantie aan te wijzen), wordt getracht de asymmetrie van het verticale getij uit te drukken met alternatieve parameters. De parameters a/h en A_f/A (horizontale oppervlakte boven platen gedeeld door totale horizontale oppervlakte) bieden hier weinig uitkomst, omdat deze net als de parameters a/h en V_s/V_c sterk van elkaar afhankelijk zijn (zie Figuur 3.11).

Daarom wordt getracht de asymmetrie uit te drukken met de parameters voor de Westerschelde afgeleid in Wang e.a. (1999).

In het diagram wordt α (dimensieloze parameter) op de horizontale en a/d (amplitude/maximale diepte) op de verticale as gezet. Voor de amplitude a wordt de helft van de lokale getijslag gebruikt. De contourlijnen geven het faseverschil $2M_2-M_4$ weer. Voor deze set van parameters wordt een plot gemaakt op 6 afstanden vanaf de monding (figuur B2, afstanden in m. boven iedere plot).

De set van parameters α en a/d toont een wat duidelijker beeld: de lijn waarover het getij symmetrisch is (faseverschil $2M_2-M_4=0^\circ$) is duidelijk te vinden in het diagram. Bij gelijkblijvende α neemt het faseverschil toe met toenemende a/d ; dit komt overeen met de conclusie die in 3.4.2 getrokken is dat bij toenemende amplitude het faseverschil toeneemt. Echter, de parameters α en a/d zijn niet erg 'handig'. De maximale diepte in een vak moet echter in de werkelijkheid vaak nogal willekeurig bepaald worden. Bij voorkeur zijn de gebruikte parameters eenduidig te bepalen. Het scheidingsgebied tussen eb- en vloeddominantie bevestigt de suggestie over de bruikbaarheid voor beschrijving van de getiasymmetrie van de set van parameters α en a/d in Wang e.a.(1999).

In de tot nu toe gebruikte diagrammen, was het duidelijk nodig de asymmetrie te bekijken op een bepaalde afstand vanaf de monding. Dit geeft aanleiding tot het zoeken naar een andere parameter waarbij dit niet nodig is.

Nu wordt bekeken of er een verband bestaat tussen het faseverschil $2M_2-M_4$ en de theoretische (wrijvingsloze) resonantie getijgolf lengte van het M_4 getij gedeeld door de lengte van het estuarium: $L_R M_4/L$

$$\frac{L_R M_4}{L} = \frac{1}{4} \sqrt{g \left(\frac{A_s}{B} \right)} T_{M_4} \quad (4.1)$$

waarin:

L lengte estuarium=60 km

$A_s = \frac{V_{z=0}}{L}$ doorstroomoppervlak op N.A.P (in alle situaties gelijk)

$B = \frac{\alpha C}{L} d^{(\alpha-1)}$ breedte op N.A.P.

$L_R M_4 = \frac{1}{4} c T_{M_4}$ de resonantie getijgolf lengte voor M_4

$\sqrt{g \frac{A_s}{B}} = c$ voortplantingssnelheid bij verwaarloosbare wrijving

uit Dronkers (1964)

De voortplantingssnelheid bij verwaarloosbare wrijving is in feite: $c = \sqrt{g \frac{d}{\alpha}}$. Dit volgt uit vergelijking 3.6. Dit houdt dan in dat $L_R M_4/L$ (de resonantie getijgolf lengte is dimensieloos gemaakt door deze te delen door L) evenredig is met d/α . Voor alle 55 model runs en voor de afstanden 10,20,...60 km vanaf de monding worden nu de faseverschillen $2M_2-M_4$ in figuur B3 geplotted. Het resultaat is dat er bij één waarde van $L_R M_4/L$ meerdere

faseverschillen $2M_2-M_4$ bestaan, wat aangeeft dat de parameter $L_R M_4/L$ alléén niet voldoende is om de asymmetrie van het verticale getij mee uit te drukken. Het is wel duidelijk in figuur B3 dat een scheiding tussen eb- en vloeddominantie bij de waarde $L_R M_4/L \approx 1$ ligt.

Het resultaat in figuur B3 is niet bevredigend, omdat er bij één waarde van $L_R M_4/L$ nog veel variatie in het faseverschil $2M_2-M_4$ kan bestaan. Om die variatie te verkleinen, worden nu van alle 55 model runs de resultaten op 6 verschillende afstanden vanaf de monding geplot in figuur B4 (afstanden in m. boven iedere plot). In figuur B4 is te zien dat er nu minder variatie in het faseverschil $2M_2-M_4$ bij eenzelfde $L_R M_4/L$ is en dat de relatie tussen $L_R M_4/L$ en het faseverschil $2M_2-M_4$ dichterbij de monding sterker is dan verder landinwaarts.

Hier moet wel vermeld worden dat de lengte van het estuarium constant gehouden is in dit model. Hier wordt later in deze paragraaf op teruggekeken.

Het getij blijkt bij de waarden $L_R M_4/L > 1.5$ vertikaal symmetrisch te zijn. Dit is geheel rechts in de 6 diagrammen in figuur B4. Bij afnemende waarden van $L_R M_4/L$ is te zien dat de asymmetrie van het verticale getij ebdominant (faseverschil $< 0^\circ$), dan weer symmetrisch (faseverschil $= 0^\circ$) wordt en vervolgens vloeddominant (faseverschil $> 0^\circ$) wordt.

De parameter $L_R M_4/L$ kan de asymmetrie van het verticale getij gedeeltelijk bepalen. Bij eenzelfde waarde van $L_R M_4/L$ bestaan verschillende faseverschillen in figuur B4 (tot 20 km vanaf de monding is de relatie sterker).

Een tweede parameter die de asymmetrie samen met $L_R M_4/L$ geheel kan beschrijven wordt gezocht. Bij voorkeur is de tweede parameter onafhankelijk van $L_R M_4/L$ en toepasbaar voor zowel de richting (faseverschil $2M_2-M_4$) als de intensiteit (amplitudeverhouding aM_4/aM_2) van de asymmetrie. Omdat de parameter $L_R M_4/L$ de parameters α , d en L bevat, bestaat er in principe geen andere onafhankelijke geometrische parameter. De variatie van de dwarsprofielen in de model runs is namelijk bepaald door variatie van de parameters d en α .

In figuur B4 liggen bepaalde punten dichterbij (verder: 'series'). Deze punten hebben ongeveer eenzelfde verhouding van d/α en hierdoor een geringe variatie in $L_R M_4/L$. Uit analyse blijkt dat de waarde van V_s/V_c en A_f/A binnen deze zgn. 'series' (waarbij d/α is ongeveer constant) verschilt. Bij het uitzetten van $L_R M_4/L$ tegen V_s/V_c en A_f/A blijkt ook dat deze parameters bijna geheel onafhankelijk zijn voor waarden van $L_R M_4/L = \pm 0.9$ (figuur B5 en B6). Bij eenzelfde waarde van $L_R M_4/L$ bestaat nl. variatie van V_s/V_c (in B5) en variatie van A_f/A (in B6). Eén van deze twee parameters (A_f/A of V_s/V_c) zou gebruikt kunnen worden als tweede parameter om de asymmetrie van het verticale getij in uit te drukken. Het verloop van zowel V_s/V_c als A_f/A in het diagram laat zich echter niet eenvoudig visualiseren.

Variatie van de lengte van het estuarium

In eerste instantie is gemodelleerd met een constant volume en constante lengte van het estuarium in alle 55 situaties. Om de invloed van de lengte van het estuarium op de

asymmetrie van het verticale getij te bepalen wordt de lengte voor bepaalde situaties gevarieerd. Interessant zijn de situaties waarbij bij afnemende $L_R M_4/L$ ebdominantie overgaat in vloeddominantie. Bij gelijke maximale diepte d ontstaat er voor toenemende α (gemiddelde diepte neemt dus af) eerst ebdominantie, deze neemt dan weer af, wordt vervolgens weer symmetrisch en dan ontstaat vloeddominantie. De situaties waarbij de asymmetrie van het verticale getij overgaat van eb- naar vloeddominant (bij afnemende waarden van $L_R M_4/L$) worden nu gebruikt om te testen of vloeddominantie overgaat in ebdominantie in het geval van een kleinere estuariumlengte ($L_R M_4/L$ neemt dan toe). De omgekeerde situatie wordt ook bekeken: of ebdominantie overgaat in vloeddominantie bij verlenging van het estuarium ($L_R M_4/L$ neemt dan af). Voor deze situaties wordt het model bij ebdominantie het estuarium 10 km langer gemaakt en bij vloeddominantie 10 km korter. De overige karakteristieken (maximale diepte d en α en C) blijven gelijk. Hiermee blijft het doorstroomoppervlak op N.A.P. gelijk aan de situaties met een estuariumlengte van 60 km.

11 situaties worden bekeken waarvan 5 ebdominant en 6 vloeddominant (figuur B7, er bestaan punten met markering 'x' waarvan 5 met een faseverschil $<0^\circ$ en 6 met een faseverschil $>0^\circ$). Voor de situaties van de serie 'ebdominante punten' worden nu 5 model runs gemaakt met een estuariumlengte van 70 km ($L=70$ in figuur B7). Voor de situaties van de serie 'vloeddominante punten' worden nu 6 model runs gemaakt met een estuariumlengte van 50 km ($L=50$ in figuur B9).

Bij verlengen en verkorten van het estuarium blijkt de parameter $L_R M_4/L$ toepasbaar (figuur B7). Bij verlenging van L ($L=70$ in figuur B7) wordt het getij namelijk vloeddominant (in één situatie neemt de ebdominantie sterk af tot bijna vloeddominant). Bij verkorting ($L=50$ in figuur B9) wordt het getij ebdominant.

Nu voor de richting van de asymmetrie (het faseverschil $2M_2-M_4$) duidelijk is dat de parameter $L_R M_4/L$ toepasbaar is, wordt ook bekeken of deze parameter de intensiteit van de asymmetrie (amplitudeverhouding aM_4/aM_2) goed beschrijft (zie figuur B8, afstanden tot monding in m. boven iedere plot).

Figuur B8 toont een duidelijk verband tussen $L_R M_4/L$ en de amplitudeverhouding aM_4/aM_2 . Een tweede parameter is ook hier eigenlijk nodig omdat bij eenzelfde waarde van $L_R M_4/L$ variatie kan bestaan in aM_4/aM_2 .

Opmerkelijk in figuur B8 is dat de amplitudeverhouding aM_4/aM_2 in de model runs waarin de resonantie getijgolf lengte van het M_4 getij gelijk is aan de lengte van het estuarium (dus $L_R M_4/L=1$) een minimum bereikt. In figuur B8 is alleen de amplitudeverhouding aM_4/aM_2 geplot; om meer informatie te verkrijgen over de absolute amplitudes van het M_2 , M_4 en ook M_6 getij, worden de absolute waarden van de amplitudes voor het totale getij (a), $M_2(aM_2)$, $M_4(aM_4)$ en $M_6(aM_6)$ geplot in figuur B9 en in figuur B10 nogmaals M_4 en M_6 op andere schaal. In figuur B9 en B10 staat boven elke plot de afstand tot de monding in meters aangegeven.

Figuur B9 laat zien dat de amplitude van het M_2 getij een maximum bereikt voor $L_R M_4/L \approx 1$. Dit is te verklaren met Figuur 2.1 van Dronkers (1964) dat laat zien dat voor $\sigma=2$ (betekenis zie 2.2.3) maximale resonantie optreedt bij $k_0/l \approx \pi/4$ (en niet bij $\pi/2$). Dit houdt in dat voor

systemen met relatief meer wrijving maximale resonantie niet optreedt als de bekkenlengte $1/4$ van de getijgolf lengte in het estuarium is, maar dat maximale resonantie optreedt als de bekkenlengte kleiner is dan $1/4$ van de getijgolf lengte in het estuarium. De waarde $L_R M_4/L \approx 1$ komt voor het M_2 feitelijk overeen met $k_0/l \approx \pi/4$, dus daarmee is het maximum van de amplitude van het M_2 bij $L_R M_4/L \approx 1$ verklaard.

Figuur B10 laat ook zien dat de amplitude van het M_4 getij een minimum heeft bij $L_R M_4/L \approx 1$ vanaf 40 km vanaf de monding. Dit is opmerkelijk, omdat in een bekken gelijk aan $1/4$ van de lengte van de getijgolf lengte in dat bekken juist maximale resonantie te verwachten is volgens Figuur 2.1.

In 3.4.4 is al geconcludeerd dat het M_2 getij van invloed is op het M_4 getij. In de situatie die in 3.4.4 gemodelleerd werd, zorgt de aanwezigheid van M_2 voor een afname van de amplitude van het M_4 in landwaartse richting. Deze afname in landwaartse richting staat nl. tegenover de toename in landwaartse richting van het M_4 getij in de situatie zonder aanwezigheid van het M_2 .

Het verloop van de amplitudes van het M_4 en M_6 getij op 10 km vanaf de monding in figuur B10 vertoont een opmerkelijk sterke relatie met de parameter $L_R M_4/L$. Op grotere afstand vanaf de monding is die relatie minder sterk. Op 10 km vanaf de monding bereikt de amplitude van het M_4 een minimum waar het M_6 een lokaal maximum bereikt. Le Provost en Fornerino(1985) concludeerden dat het M_2 energie trekt van de overige componenten, maar de overige componenten trekken ook energie van M_2 . Dit zou in dit geval betekenen dat op 10 km vanaf de monding het M_2 getij in een bepaalde situatie (dus bij een bepaalde waarde van $L_R M_4/L$) energie afstaat aan óf M_4 óf M_6 .

4.4 Asymmetrie van het horizontale getij

De relatie tussen morfologie en de asymmetrie van het verticale getij zijn nu bekend. Informatie over het horizontale getij is gewenst omdat het horizontale getij de link is naar het sedimenttransport. De asymmetrie van het horizontale getij wordt uitgedrukt in het verschil tussen maximale eb- en vloedsnelheden

De asymmetrie van het verticale getij geeft aan dat er duurverschillen tussen periodes van stijgend en dalend waterniveau zijn. De maximaal optredende eb- en vloedsnelheden zijn van de duurverschillen afhankelijk en zullen daarom ook een relatie hebben met de parameter $L_R M_4/L$.

In figuur B11 is dan te zien dat de asymmetrie van het horizontale getij eenzelfde relatie heeft met de parameter $L_R M_4/L$ als de asymmetrie van het verticale getij:

$u^+_{\max}$ is de maximale vloedsnelheid en

$u^-_{\max}$ is de maximale ebsnelheid

De snelheden zijn gemiddelde snelheden over het gehele doorstroomoppervlak.

Het horizontale getij blijkt bij de waarden $L_R M_4/L > 1.5$ symmetrisch te zijn. Dit is geheel rechts in de diagrammen in figuur B11. Bij afnemende waarden van $L_R M_4/L$ is te zien dat de asymmetrie van het horizontale getij ebdominant ($u^+_{\max} - u^-_{\max} < 0$) wordt tot een maximum verschil, dan weer symmetrisch ($u^+_{\max} - u^-_{\max} = 0$) wordt en vervolgens vloeddominant ($u^+_{\max} -$

$u_{\max} > 0$) wordt. Dat op 60000 m. vanaf de monding de snelheidsverschillen nul zijn, is triviaal daar het een gesloten eind betreft.

4.5 Discussie resultaten

In Wang e.a. (1999) werd de kwalitatieve toepasbaarheid van het diagram van Friedrichs en Aubrey(1988) verondersteld: Afnemende waarden van a/h en afnemende waarden van V_s/V_c geven ebdominantie voor het verticale getij weer in de Westerschelde. Uit de resultaten blijkt dat dit ook opgaat voor het simpel prismatisch model. Tevens ontstaat bij verder afnemende waarden van beide parameters a/h en V_s/V_c weer symmetrie.

Uit de analyse in 4.3 blijkt dat de asymmetrie van het verticale getij voornamelijk op kleinere afstand tot de monding sterk afhangt van de verhouding tussen de resonantie getijgolf lengte van het M_4 getij en de lengte van het estuarium ($L_R M_4/L$). In feite geeft het diagram van Friedrichs en Aubrey(1988) eenzelfde relatie tussen de gemiddelde diepte en de asymmetrie van het verticale getij. De parameter $L_R M_4/L$ kan gezien worden als een maat voor de gemiddelde diepte gedeeld door de lengte van het estuarium. De relatie tussen de gemiddelde diepte en asymmetrie van het verticale getij werd al voorgesteld door Speer en Aubrey(1985), zij het dat daar de gemiddelde diepte in het kanaal werd gebruikt en in de parameter $L_R M_4/L$ is dat de gemiddelde diepte t.o.v. N.A.P. Wanneer van het diagram van Friedrichs en Aubrey(1988) alléén de parameter a/h gebruikt zou worden om de asymmetrie van het verticale getij mee uit te drukken, zal het resultaat vergelijkbaar zijn met figuur B4. Voordeel van de parameter $L_R M_4/L$ is dat deze ook de lengte van het estuarium bevat.

Tevens is een duidelijk verband gevonden tussen de parameter $L_R M_4/L$ en de horizontale getijasymmetrie in 4.4. Dit verband is belangrijk om een link te kunnen leggen naar sedimenttransport.

4.6 Conclusies voor simpel prismatisch model

De parameter $L_R M_4/L$ geeft de asymmetrie beter weer dan de set van parameters gebruikt in het diagram van Friedrichs en Aubrey(1988), omdat de parameter $L_R M_4/L$ naast de gemiddelde diepte tevens de lengte van het estuarium bevat. Bij gebruik van de set van parameters gebruikt in het diagram van Friedrichs en Aubrey(1988) zou de parameter a/h alléén al genoeg inzicht geven in de asymmetrie van het verticale getij, omdat de parameter V_s/V_c afhankelijk is van de parameter a/h .

De gemiddelde diepte (met de relatie voor de hypsometrie is dit d/α) is van wezenlijk belang voor de getijasymmetrie (zowel vertikaal als horizontaal). Dit blijkt uit het gebruik van de parameter $L_R M_4/L$ in figuur B3. De parameter $L_R M_4/L$ is nl. recht evenredig met de wortel uit de gemiddelde diepte onder N.A.P. : $\sqrt{h} = \sqrt{\frac{d}{\alpha}}$. Voor de situatie van de

Westerschelde ($L_R M_4/L$ is ongeveer 1) geldt bij toename van $L_R M_4/L$ een afname van het relatieve faseverschil $2M_2-M_4$ en een afname van het verschil tussen de maximale vloed- en ebsnelheden: $u_{\max}^+ - u_{\max}^-$. Voor ingrepen in de morfologie van de Westerschelde betekent dit dat wanneer de gehele Westerschelde verdiept wordt zowel het verticale getij als het

horizontale getij in het gehele estuarium een verandering in de richting van ebdominantie (meer ebdominant of minder vloeddominant, afhankelijk van de uitgangssituatie) ondergaat. Voor een verondieping in het gehele estuarium geldt dan voor zowel het vertikale als het horizontale getij een verandering in de richting van vloeddominantie (minder ebdominant of meer vloeddominant, afhankelijk van de uitgangssituatie).

Voor de Westerschelde betekent dit dat een dieper estuarium leidt tot hogere maximale ebsnelheden en een ondieper estuarium leidt tot hogere maximale vloodsnelheden.

5 Opzet complex model

5.1 Inleiding

Tot nu toe is de getiasymmetrie bekeken in modelsystemen met uniforme geometrie in langsrichting van het estuarium (het eenvoudig prismatisch model beschreven in hoofdstuk 3). Met het eenvoudig prismatisch model bleek de getiasymmetrie voor systemen vergelijkbaar met de Westerschelde voornamelijk afhankelijk te zijn van de gemiddelde diepte. Met het eenvoudig prismatisch model kan echter niet goed het getij in de Westerschelde gesimuleerd worden en daarom wordt een nieuw model opgezet met variërende geometrie in langsrichting en dit wordt het complex model genoemd. Een ander verschil tussen het eenvoudig prismatisch model en het complex model is dat in het complex model het gedeelte van de Nederlands-Belgische grens tot aan Gentbrugge ook deel uitmaakt van het model, omdat dit gedeelte in 3.4.3 van invloed bleek te zijn op de getiasymmetrie. In het complex model is het einde van het estuarium Gentbrugge, daar kan het getij zich niet verder voortplanten, omdat zich daar een sluis bevindt. Het doel van dit hoofdstuk is een basismodel te creëren waarin de asymmetrie (van het verticale getij) op eenzelfde manier gevoelig is voor veranderingen in de morfologie als in de Westerschelde.

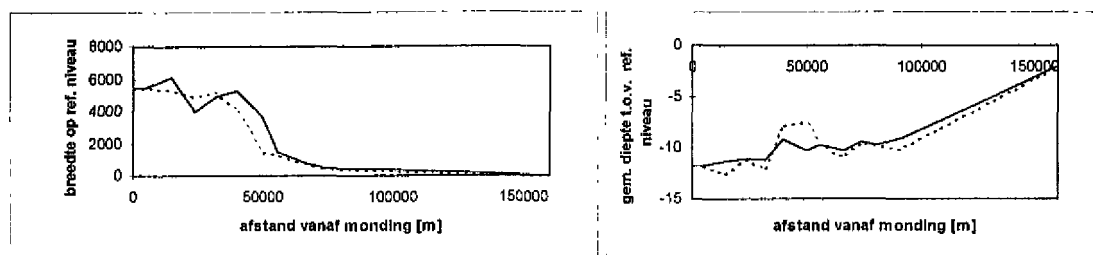
Om dit doel te bereiken wordt het Schelde-estuarium van 1996 geschematiseerd tot een 1D-model (5.2). Om het getij in het basismodel vergelijkbaar te maken met de metingen in 1996 wordt het basismodel gecalibreerd door middel van variatie van de wrijvingsfactor (5.3). Na calibratie wordt het Schelde-estuarium van 1955 gemodelleerd om te controleren of het getij in de modellen voor de twee jaren eenzelfde verandering ondergaat als de verandering zoals in werkelijkheid opgetreden (5.4). Na vergelijking van modelresultaten met metingen (5.3 en 5.4) wordt een conclusie getrokken ten aanzien van de geldigheid en toepasbaarheid van het basismodel (5.5).

Om de invloed van veranderingen in de morfologie op de getiasymmetrie te bepalen, worden op het basismodel veranderingen aangebracht en wordt de verandering van de getiasymmetrie in de resultaten bekenen (hoofdstuk 6).

5.2 Schematisatie Westerschelde, Zeeschelde en Schelde

Het Schelde estuarium wordt geschematiseerd door een aantal dwarsprofielen te plaatsen, waartussen dan geïnterpoleerd wordt; voor de exacte beschrijving wordt verwezen naar Appendix C. In Figuur 5.1 staat de gemiddelde diepte onder het referentieniveau en breedte op N.A.P. van het basismodel. Het model voor 1996 wordt na calibratie het basismodel.

In Figuur 5.1 wordt het geschematiseerde estuarium voor de jaren 1955 en 1996 weergegeven.



Figuur 5.1 Schematisatie Westerschelde voor 1996 (getrokken lijn) en 1955 (onderbroken lijn) breedtevariatie (links) en diepte (rechts)

Randvoorwaarden model:

Het getij in Tabel 4.1 wordt aan de monding opgelegd. Dit getij is hetzelfde als bij het eenvoudig prismatische model.

Aan het einde van het estuarium bij Gentbrugge wordt een gesloten rand geplaatst.

5.3 Calibratie model

In deze paragraaf worden de modelresultaten vergeleken met de metingen voor de situatie van 1996. De modelresultaten zullen t.g.v. schematisering niet exact overeenkomen met metingen. De eis wordt gesteld dat er minimaal bepaalde overeenkomsten moeten bestaan. Dit houdt de volgende eisen in voor prestatie van het model:

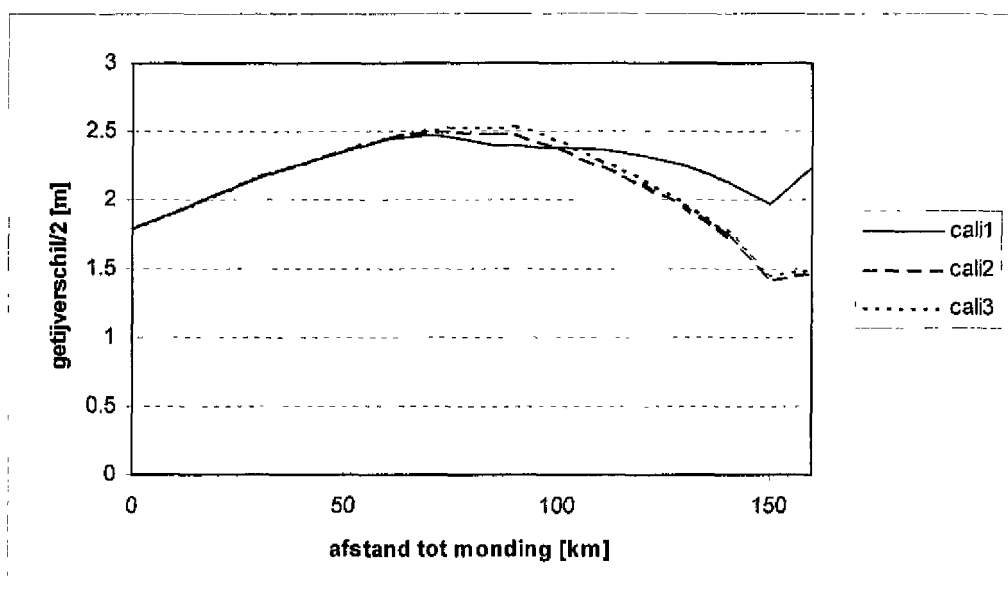
- 1 plaats van optreden van maximaal getijverschil moet in model en werkelijkheid gelijk zijn.
- 2 richting van de asymmetrie van het verticale getij (richting eb- of vloeddominantie) moet in de Westerschelde (0 tot 60 km vanaf monding) overeenkomen,
- 3 karakter getijgolf van 0 tot 60 km vanaf monding moet in model net zoals in Westerschelde een noch staande noch lopende golf zijn
- 4 de orde van grootte van getijvolumina moet overeenkomen

Het model wordt gecalibreerd aan de hand van de volgende karakteristieken van het getij in het estuarium:

- Getijverschil in estuarium
- Richting van de asymmetrie van het verticale getij

De bodemwrijving is op voorhand niet zeker. Verschillen tussen modelresultaten en metingen kunnen dus het gevolg zijn van een niet juiste aanname voor de wrijvingsfactor (zie formule 2.1). Daarom wordt het model gecalibreerd door de wrijvingsfactor te variëren.

In het model wordt de bodemwrijving in eerste instantie gesteld op een Chezy-coëfficiënt van $60 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Deze waarde wordt zonder variatie in plaats toegepast in een model run en deze wordt cali1 genoemd. In Figuur 5.2 staat de helft van het tijverschil uitgezet tegen afstand tot de monding in een grafiek. Het maximum treedt in cali1 op bij 70 km vanaf de monding en is 2.47m. Het maximum voor de situatie van 1996 treedt op bij 90 km vanaf de monding en is 2.67m volgens Claessens en Meyvis(1994). Het getijverschil bij Gentbrugge (160 km vanaf de monding) is in cali1 2,23 m. Het getijverschil in Gentbrugge is 2,14 m. volgens Claessens en Meyvis(1994). De metingen staan niet in Figuur 5.2 geplote, hiervoor wordt verwezen naar figuur C2, boven.



Figuur 5.2 Calibratie op getijverschil

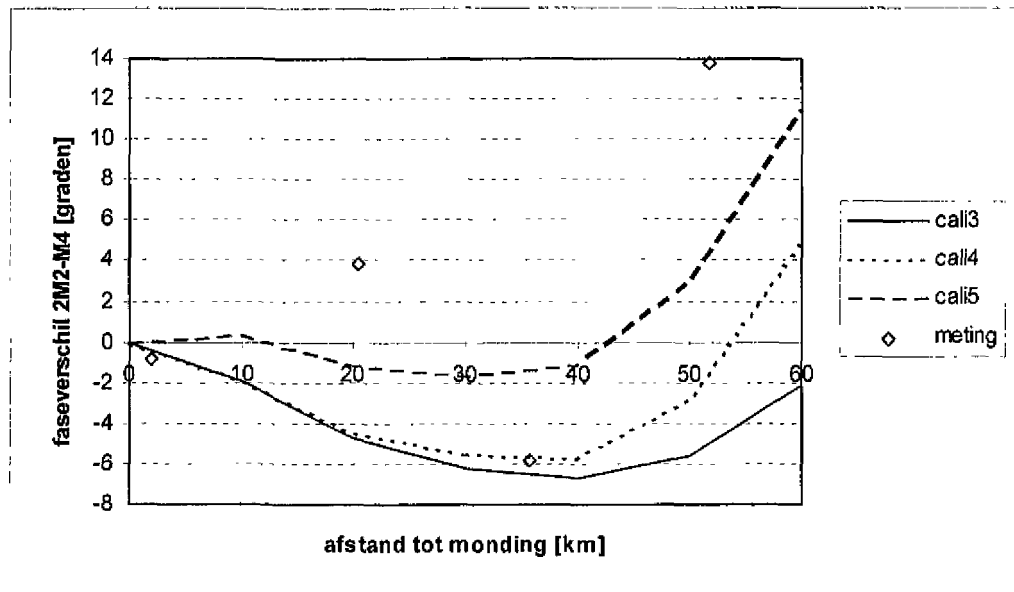
Het getijverschil in Gentbrugge is in het model te groot en daarom wordt nu meer bodemwrijving toegepast in het gedeelte van 91 tot 160 km. Van 91 tot 160 wordt een Chezy-coëfficiënt van $45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ toegepast en deze model run wordt cali2 genoemd. De resultaten in Figuur 5.2 laten zien dat het getijverschil in Gentbrugge in de model run cali 2 is afgenomen t.o.v. cali 1. Een tweede verschil is dat het maximale getijverschil is toegenomen t.o.v. model run cali1. De helft van het getijverschil is nu 2,50 m. Het maximum treedt op op dezelfde afstand tot de monding als in de model run cali1.

Nu wordt getracht het maximale getijverschil te laten toenemen en op de goede lokatie te laten optreden door de bodemwrijving te verminderen voor het gedeelte van 60 tot 90 km. Er wordt nu van 61 tot 90 km een Chezy-coëfficiënt van $65 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ toegepast en deze model run wordt cali3 genoemd. De resultaten in Figuur 5.2 laten zien dat het maximale getijverschil in model run cali 3 is toegenomen (helft getijverschil is nu 2,55 m.) t.o.v. model run cali 2 en dit maximum in model run cali 3 treedt op op 90 km vanaf de monding.

Het maximale getijverschil treedt nu op op dezelfde afstand van de monding als in de situatie voor 1996. Het maximale getijverschil is kleiner dan in de situatie voor 1996.

Aan eis nr.1 is nu voldaan en nu wordt door variatie van de Chezy-coëfficiënt in de Westerschelde de asymmetrie van het verticale getij gecalibreerd op de metingen om aan eis nr.2 te voldoen.

Het verloop van de asymmetrie van het verticale getij van model run cali3 is voor de Westerschelde (0 tot 60 km vanaf de monding) geplot in Figuur 5.3. Hierin is de gehele Westerschelde ebdominant. Volgens de metingen in 1996 (Gerritsen e.a. 1998) is de asymmetrie van het verticale getij vanaf de monding gezien voor de lokaties Vlissingen, Terneuzen, Hansweert en Bath in Figuur 5.3 opgenomen. In de situatie voor 1996 is het getij niet overall ebdominant in de Westerschelde, maar is het getij vloeddominant bij Terneuzen, op grotere afstand vanaf de monding is het getij bij Hansweert ebdominant en bij Bath opnieuw vloeddominant.



Figuur 5.3 Calibratie op richting asymmetrie van het verticale getij

Nu wordt getracht om voor de lokatie Bath vloeddominantie te bewerkstelligen door meer bodemwrijving in te voeren van 30 tot 60 km vanaf de monding. Op 60 km vanaf de monding wordt de Chezy-coëfficiënt op $40 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ gezet en op 30 km vanaf de monding wordt de Chezy-coëfficiënt op $60 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ gehouden. Hiertussen wordt dan lineair geïnterpoleerd. De model run wordt cali4 genoemd en de resultaten zijn te zien in Figuur 5.3

De resultaten voor cali4 in Figuur 5.3 laten zien dat de lokatie Bath nu is veranderd richting vloeddominantie, maar nog niet vloeddominant is. De lokatie Hansweert wordt nu goed gesimuleerd, maar bij Terneuzen is het getij ebdominant waar het vloeddominant behoort te zijn.

Om op de lokatie Terneuzen vloeddominantie te bewerkstelligen, wordt in het gedeelte van 0 tot 30 km meer bodemwrijving toegepast door de Chezy-coëfficiënt bij de monding op $56 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en op 30 km vanaf de monding op $52 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. De model run wordt cali5 genoemd en de resultaten staan in Figuur 5.3.

Ten gevolge van meer bodemwrijving in het gedeelte van 0 tot 30 km vanaf de monding is het gedeelte van 0 tot 60 km vanaf de monding richting vloeddominantie veranderd (Figuur 5.3).

De resultaten voor cali5 in Figuur 5.3 laten zien dat ten opzichte van cali4 de asymmetrie bij Terneuzen richting vloeddominantie veranderd is. Het getij bij Terneuzen is in de goede richting veranderd, maar is nog juist ebdominant. De lokatie Hansweert wordt nu minder goed gesimuleerd en Bath beter (ten opzichte van cali4).

Opmerkelijk in 1996 is dat er bij Hansweert ebdominantie bestaat en bij Bath vloeddominantie. Het faseverschil $2M_2-M_4$ verandert volgens de metingen over een afstand van 16 km van -5 graden naar 14 graden. In het model verandert de asymmetrie van het

vertikale getij over deze afstand van -3 graden naar 5 graden. De verandering van ebdominantie naar vloeddominantie wordt door het model weergegeven. Echter, de verandering in het model is minder sterk. Alhoewel niet volledig aan eis nr.2 is voldaan, laat het model een vergelijkbare trend in de asymmetrie van het vertikale getij zien. Er bestaat in de model run cali5 vanaf de monding gezien eerst een verandering richting vloeddominantie tot 10 km, dan een verandering richting ebdominantie tot 40 km, en verder stroomopwaarts een ten opzichte van de veranderingen tot 40 km een relatief sterke verandering richting vloeddominantie. In de meting is deze trend ook waarneembaar: verandering richting vloeddominantie gaat echter minimaal tot Terneuzen (20 km), dan een verandering richting ebdominantie tot Hansweert (36 km) en vervolgens van Hansweert tot Bath een relatief sterke verandering richting vloeddominantie. Ondanks het niet geheel voldoen aan eis nr.2 wordt de model run cali5 als beste gekozen voor het basismodel, omdat deze een vergelijkbare trend van verloop van getijasymmetrie (in afstand tot monding) vertoont. Na calibratie op richting van asymmetrie van het vertikale getij voldoet het model nog steeds aan de eis dat het maximale getijverschil op 90 km vanaf de monding optreedt, dit is te zien in figuur C2,boven.

Het faseverschil tussen vertikaal en horizontaal getij in de Westerschelde is volgens Jeuken(2000) 2,5 tot 3,0 uur. In figuur C1(figuur in Appendix C) staan plots van de waterstanden en stroomsnelheden voor 6 afstanden tot monding(in m. boven iedere plot) in model run cali5. Het faseverschil tussen vertikaal en horizontaal getij is de tijdsduur tussen twee opeenvolgende nuldoorgangen. Uit figuur C1 is op te maken dat het faseverschil in het model tussen de 2,5 en 3,0 uur ligt. Tevens laat analyse van het horizontale getij (zowel debiet als stroomsnelheid) in Jeuken(2000) zien dat de faseverschillen en amplitudeverhoudingen tussen harmonische componenten (M_2 , M_4 en M_6) van debiet en stroomsnelheid in het model een orde van grootte overeenkomst vertonen met metingen in 1996.

Het horizontale getij in het model is tot nu toe getoetst op faseverschil met het vertikale getij en onderlinge faseverschillen en amplitudeverhoudingen van harmonische componenten van het horizontale getij. Om het verloop van het horizontale getij in langsrichting van het estuarium te toetsen wordt gekeken naar getijvolumina. De doorstroomprofielen in de Westerschelde zijn niet uniform en daarom verschillen de getijvolumina in langsrichting van het estuarium. De getijvolumina op verschillende afstand van de monding geven dan een maat aan voor de convergentie van de doorstroomprofielen samen met het verloop in plaats van het horizontale getij. In Jeuken(2000) is informatie beschikbaar over de getijvolumina aan de monding en ter hoogte van Bath.. In Tabel 5.1 uit Jeuken(2000) wordt het model 1996 met de meting van het afgelopen decennium vergeleken. In de metingen in Tabel 5.1 bestaat een onnauwkeurigheid van $\pm 10\%$.

Tabel 5.1 Vergelijking getijvolumina Westerschelde en model

	meting	Model 1996
getijvolume monding	$1 \cdot 10^9 \text{ m}^3$	$1 \cdot 10^9 \text{ m}^3$
getijvolume Bath	$0,15 \cdot 10^9 \text{ m}^3$	$0,16 \cdot 10^9 \text{ m}^3$

Bij vergelijking van de waarden van model en meting in Tabel 5.1 blijkt dat het getijvolume bij de monding overeenkomt met de Westerschelde. Bij Bath komt het getijvolume ook

goed overeen met de Westerschelde. De convergentie van doorstroomprofielen samen met het verloop in plaats van het horizontale getij wordt dus door het model goed gesimuleerd.

Het model is nu gecalibreerd aan de hand van de karakteristieke getijverschil en richting asymmetrie van het verticale getij. De conclusie na calibratie is:

Met de beschreven calibratie in deze paragraaf komt de richting van de asymmetrie van het verticale getij (uitgedrukt in het faseverschil $2M_2-M_4$ in graden) niet voor elke meetlokatie overeen met de metingen. Het teken (vloeddominantie of ebdominantie) is voor de lokaties Hansweert en Bath goed. De bodemwrijving blijkt van sterke invloed te zijn op de richting van de asymmetrie van het verticale getij. Omdat het verloop van de asymmetrie van het verticale getij in afstand tot de monding (toename, dan afname en vervolgens weer toename van het faseverschil) wel overeenkomt met de situatie voor 1996, wordt model run cali5 als beste gekozen. De prestaties van het model voldoen verder aan de eisen voor het karakter van de getijgolf en voor getijvolumina, dus wordt nu met het model met de wrijvingsfactoren zoals in genoemde cali5 verder de geldigheid van het model bepaald.

5.4 Historische situatie

Tot nu toe zijn de modelresultaten voor 1996 vergeleken met de metingen in 1996. Het model is gecalibreerd op 1996 en nu wordt bekeken of deze calibratie voldoet voor het jaar 1955 en of de veranderingen in modelresultaten voor het model 1996 (model run cali5 uit vorige paragraaf) en het model 1955 vergelijkbaar zijn met de veranderingen in de Westerschelde in het tijdvak 1955 tot 1996. De schematisatie voor het jaar 1955 is te zien in Figuur 5.1. Voor een exacte beschrijving wordt verwezen naar Appendix C. Voor het jaar 1955 zijn de randvoorwaarden hetzelfde als voor 1996.

De modelresultaten en metingen (uit Claessens en Meyvis, 1994) van het verticale getij voor 1955 staan in figuur C2, midden (figuur in Appendix C). De plaats van optreden van de maximale amplitude is voor het model 1955 en de situatie in 1955 gelijk.

Het verschil in getijvoortplanting tussen de modelresultaten voor 1955 en 1996 is goed vergelijkbaar met de verandering in het gemiddeld getij in het estuarium. Het getij dringt in het model 1996 verder door dan in het model 1955. Eenzelfde verandering in getijvoortplanting komt in het estuarium ook voor tussen de jaren 1955 en 1996. In figuur C2, onder worden de twee jaren en de twee modellen met elkaar vergeleken.

De modelresultaten en metingen van de asymmetrie van het verticale getij staan in figuur C3, midden. Informatie over de asymmetrie van het verticale getij in 1955 is slechts beschikbaar op de lokaties Vlissingen, Terneuzen en Hansweert. Voor de lokatie Bath is het vroegst bekende faseverschil $2M_2-M_4$ bekend in 1971: 25 graden met $aM_4/aM_2=0.065$ [-].

Het model voor 1955 geeft op 20 km van de monding een te hoge waarde voor $2M_2-M_4$. De lokatie Hansweert wordt wel goed gesimuleerd.

In figuur C3, onder worden de twee jaren en de twee modellen met elkaar vergeleken. Het verschil in asymmetrie van het verticale getij tussen de jaren 1955 en 1996 wordt door het model goed weergegeven op de lokatie Hansweert. Het getij in Hansweert is van 1955 tot

1996 minder ebdominant geworden, het model laat deze verandering voor de twee jaren ook zien.

De verandering van het getij op de lokatie Bath is in de modelresultaten een kleine verandering richting ebdominantie terwijl in de metingen een verandering richting vloeddominantie te zien is. Van 1955 tot 1996 is de verandering van het faseverschil van Hansweert tot Bath groter geworden. Het model laat ook een sterkere verandering ten opzichte van 1996 van het faseverschil zien (anders geformuleerd: de lijn tussen het faseverschil in Hansweert en het faseverschil in Bath voor 1955 is steiler geworden) op 50 km vanaf de monding.

De intensiteit van de asymmetrie van het verticale getij wordt getoond in figuur C4. Hierin is te zien dat voor beide jaren 1955 en 1996 de afname van de intensiteit in de eerste 20 km vanaf de monding goed wordt weergegeven. Op grotere afstand tot de monding geeft het model hogere waarden voor de intensiteit dan de metingen.

5.5 Conclusie geldigheid model

De gebruikte schematisatie geeft het getij in de Westerschelde goed weer. De plaats van maximale amplitude van het verticale getij wordt goed gesimuleerd, het faseverschil tussen vertikaal en horizontaal getij in het model 1996 is vergelijkbaar met het faseverschil tussen vertikaal en horizontaal getij in de Westerschelde en de asymmetrie van het verticale getij wordt redelijk benaderd.

Hoewel er verschillen bestaan tussen de modelresultaten en de metingen ten aanzien van de asymmetrie van het verticale getij, is het model geschikt om de invloed van variaties in de morfologie op de asymmetrie van het verticale getij te onderzoeken.

Het gecalibreerde model cali5 wordt nu het basismodel waarop veranderingen aangebracht gaan worden. Deze veranderingen staan beschreven in hoofdstuk 6.

6 Resultaten complex model

6.1 Inleiding

Veranderingen in de morfologie van de Westerschelde kunnen ontstaan door menselijk ingrijpen en natuurlijke ontwikkeling en voor het beheer van de Westerschelde is het interessant om te weten wat de invloed is van ingrepen (bijvoorbeeld verdiepingen) op de getiasymmetrie. De getiasymmetrie is van belang omdat dit mede een oorzaak kan zijn van residuele transporten. In hoofdstuk 5 is een basismodel afgeleid dat het horizontale en verticale getij in de Westerschelde simuleert. In dit basismodel kunnen dan veranderingen aangebracht worden om de invloed van ingrepen in de morfologie op de asymmetrie van het verticale getij te onderzoeken.

Van 1955 tot 1996 is met name in de vakken 1,2 en 3 de gemiddelde diepte van de Westerschelde veranderd. Uit Tabel 3.1 blijkt dat er vier van de zes vakken veranderd zijn. In dit hoofdstuk worden in het model de veranderde vakken uit 1955 apart geplaatst om te onderzoeken welke verandering in de morfologie voor welke verandering in de asymmetrie van het verticale getij zorgt (6.2). Om de invloed van de verdieping van juli'97 tot september'98 op de asymmetrie van het verticale getij te bepalen wordt deze verandering in het model aangebracht(6.3). Na de invloed van de genoemde veranderingen in de morfologie op de asymmetrie van het verticale getij bepaald te hebben wordt een algemene conclusie over de invloed van de morfologie op de asymmetrie van het verticale getij voor de Westerschelde gegeven(6.4).

6.2 Vakken 1955 in basismodel

Van 1955 tot 1996 heeft de morfologie van de Westerschelde een aantal veranderingen ondergaan. De historische situaties uit 1955 van vak1, vak 2, vak 3 en vak 5 worden nu in het basismodel per vak aangebracht. Tevens worden vak 1 en 2 samen in het basismodel geplaatst. Dit zijn 5 model runs:

1. Vak 1 uit 1955 wordt geplaatst en de overige vakken blijven ongewijzigd.
2. Vak 2 uit 1955 wordt geplaatst en de overige vakken blijven ongewijzigd.
3. Vak 3 uit 1955 wordt geplaatst en de overige vakken blijven ongewijzigd.
4. Vak 5 uit 1955 wordt geplaatst en de overige vakken blijven ongewijzigd.
5. Vak 1 en 2 uit 1955 worden geplaatst en de overige vakken blijven ongewijzigd.

Het doel van toepassing van verandering per vak is het verkrijgen van meer inzicht in de verandering van de asymmetrie van het verticale getij bij gewijzigde morfologie. Vier vakken zijn van 1955 tot 1996 veranderd en nu is de vraag welke verandering (verandering van een vak tussen de twee jaren) verantwoordelijk is voor de verandering van de asymmetrie van het verticale getij. Zo kan de invloed van verdiepingen en verondiepingen in de Westerschelde op de asymmetrie van het verticale getij geanalyseerd worden.

De verschillen tussen de gemiddelde profielen van de vakken uit de jaren 1955 en 1996 worden beschouwd door de verhouding d/α (gemiddelde diepte) te bekijken. In Tabel 6.1 wordt de gemiddelde diepte uitgedrukt in d/α voor de jaren 1955 en 1996 bekeken.

Tabel 6.1 Veranderingen d/α tussen 1955 en 1996

Vak	d/α 1996 [m.]	d/α 1955 [m.]	verschil [m.]
1	10.3	7.4	-2.9
2	9.3	7.8	-1.5
3	11.2	12.1	0.9
5	11.3	12.5	1.2

Ten opzichte van 1996 geldt:

1. Vak 1 uit 1955 is ondieper
2. Vak 2 uit 1955 is ondieper
3. Vak 3 uit 1955 is dieper
4. Vak 5 uit 1955 is dieper

De vakken in het basismodel worden gewijzigd door i.p.v. het gemiddelde profiel per vak van de vakken uit 1996 de gemiddelde profielen per vak uit 1955 in het midden van het betreffende vak te plaatsen. Tussen de geplaatste gemiddelde profielen wordt geïnterpoleerd. De afstand tot de monding van de middens van elk vak staan in Tabel 6.2.

Tabel 6.2 Afstanden van middens van vakken tot monding

midden van vak:	km vanaf monding:
6	5
5	15
4	24
3	32
2	40
1	50

Een verandering richting ebdominantie houdt in dat het faseverschil $2M_2-M_4$ minder positief of meer negatief wordt. Een verandering richting vloeddominantie houdt in dat het faseverschil $2M_2-M_4$ minder negatief of meer positief wordt. De veranderingen in richting van de asymmetrie van het verticale getij worden bekeken t.o.v. het basismodel.

De veranderingen zoals in werkelijkheid voorgekomen tussen 1955 en 1996 worden beschouwd. De veranderingen worden beschouwd van 1996 naar 1955, omdat de vakken van 1955 worden geplaatst in het basismodel en de veranderingen in de asymmetrie van het verticale getij van het basismodel worden geanalyseerd. De vakken uit 1955 worden zogenaamd toegepast als een mogelijke verandering in de morfologie van de Westerschelde. Het voordeel hiervan is natuurlijk dat bij toepassing van alle vakken uit 1955 het gevolg al bekend is: de asymmetrie van het verticale getij in 1955. De veranderingen in asymmetrie van het verticale getij:

1. Op lokatie Hansweert (36 km vanaf monding) is er een verandering in de richting van ebdominantie: van -5 naar -10 graden
2. Op lokatie Bath (52 km vanaf monding) is er een verandering in de richting van vloeddominantie: van 14 naar 24 graden (hier is 24 graden gebruikt uit 1971, gegevens 1955 niet voorhanden)

De resultaten van de 5 model runs staan geplott in Figuur D1 (figuur in Appendix D). Van boven naar beneden staan de model runs in volgorde 1 t/m 5.

De verondieping van vak 1 zorgt voor een verandering richting ebdominantie in het deel van het estuarium van ong. 20 tot 40 km en een verandering richting vloeddominantie op de lokatie 55 km.

De verondieping van vak 2 zorgt voor een verandering richting ebdominantie in het middendeel van het estuarium (ong. 20 tot 40 km) en een verandering richting vloeddominantie op lokatie 50 km en 55 km.

Het gevolg van de verondieping in vak 1 en in vak 2 (het gemiddelde profiel voor deze twee vakken is in 1955 ondieper) heeft een ander effect. De verondieping heeft voor vak 1 in het midden van vak 1 een tegenovergesteld effect (verandering richting ebdominantie) ten opzichte van vak 2 in het midden van vak 2 (verandering richting vloeddominantie).

Het gevolg van de verondieping in vak 1 en vak 2 heeft voor 55 km vanaf de monding een effect dat vergelijkbaar is met de meting: méér vloeddominantie vanaf 50 km.

De model run waarbij vak 3 uit 1955 is gebruikt geeft op de beschouwde lokaties zeer kleine veranderingen.

De model run waarbij vak 5 uit 1955 is gebruikt geeft voor vak 5 zelf nauwelijks verandering in de asymmetrie van het verticale getij (minder dan één graad). Bij het midden van vak 3, vak 2 en vak 1 is er wel een verschil ontstaan: meer ebdominantie ten opzichte van model voor 1996.

Vergelijking met metingen:

Volgens de metingen moet bij plaatsing van de vakken 1, 2, 3 en 5 (=situatie 1955) op 36 km vanaf de monding meer ebdominantie ontstaan en op lokatie 52 km vanaf de monding meer vloeddominantie. Dit houdt dus in dat het verschil in faseverschil $2M_2 - M_4$ tussen de lokaties 36 km en 52 km groter wordt. Het grotere verschil in faseverschil is ook zichtbaar tussen de lokaties 40 km en 55 km bij de model run waarin zowel vak 1 als vak 2 uit 1955 geplaatst is. Er treedt dus wel een verandering op in de richting van vloeddominantie, zij het dat deze verandering op grotere afstand van de monding plaatsvindt.

Conclusie:

Na het modelleren van de wijzigingen in de Westerschelde per vak is duidelijk welke verdieping of verondieping in een bepaald vak de wijzigingen in het faseverschil $2M_2 - M_4$ veroorzaakt heeft. De plaatsing van de ondiepere vakken 1 en 2 uit 1955 zorgen voor meer vloeddominantie vanaf ± 50 km én voor meer ebdominantie in het middendeel (± 20 tot 40

km) van de Westerschelde. De plaatsing van de diepere vakken 3 en 5 uit 1955 hebben t.o.v. de vakken 1 en 2 eigenlijk nauwelijks invloed op de asymmetrie van het verticale getij. De vakken 3 en 5 hebben tussen 1955 en 1996 ook minder verandering in gemiddelde diepte ondergaan dan de vakken 1 en 2 (zie fig. 5.1).

6.3 Verdieping '97/'98

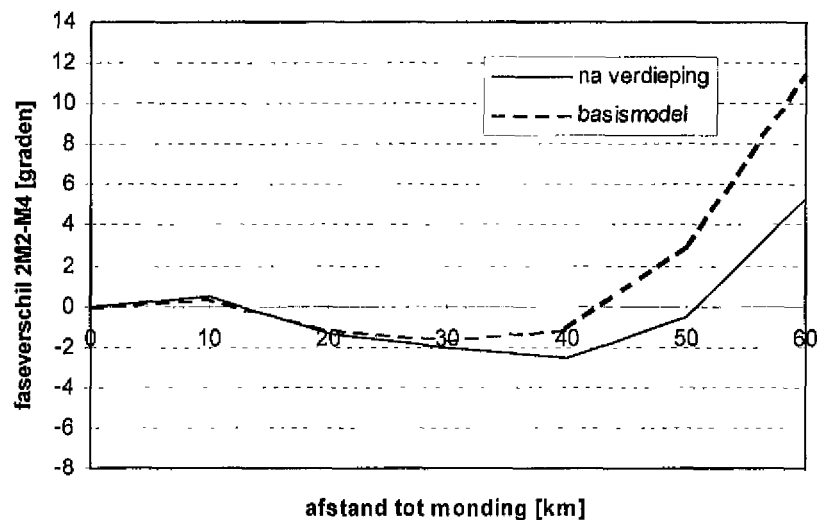
In de periode juli '97 t/m september '98 is de Westerschelde op een aantal lokaties verdiept door middel van baggeren. De vraag is nu wat de invloed is van een dergelijke baggeractiviteit op de asymmetrie van het verticale getij. De gegevens over baggervolumes (beunhoeveelheden) in Van Helvert(2000) worden gebruikt om de verdieping in de genoemde periode te interpreteren naar het basismodel. Een baggervolume op een bepaalde lokatie (in-situ-volume is een factor 1,1 kleiner dan het beunvolume) wordt vertaald naar een volumetoename in één van de zes vakken in de Westerschelde. Zo ontstaat voor elk vak een volumetoename als gevolg van één of meerdere baggerlokaties in dat vak (Tabel 6.3, vak 1 ligt meest stroomopwaarts). In vak 6 is in de genoemde periode niet gebaggerd. Als de stortingshoeveelheden worden meegenomen in de volumeveranderingen zouden er per vak geringe netto-veranderingen optreden en daarom wordt het storten buiten beschouwing gelaten. De volumetoename per vak betekent in het model dat het gemiddelde profiel per vak een profielverruiming onder LW-niveau ondergaat. Dit is dan in feite een toename van de gemiddelde diepte per vak. De verdiepingen zijn op bepaalde lokaties in een vak uitgevoerd en als nu deze verdiepingen vertaald worden naar een gemiddelde verdieping in het hele vak ontstaat er een klein verschil in het gemiddelde profiel per vak. Het gebaggerde volume (in-situ-volume in Tabel 6.3) per vak is nl. klein ten opzichte van het totale volume in een vak(volume onder N.A.P. in Tabel 6.3). Om nu de verdieping per vak in het model significant (eenzelfde orde van grootte verandering als tussen de jaren 1955 en 1996) te maken wordt de volumeverandering per vak met een factor 5 vergroot en met deze vergrote volumeverandering (5x-in-situ-volume in Tabel 6.3)wordt een veranderd gemiddeld profiel per vak bepaald. De vergroting met factor 5 van de volumeverandering in een vak is enigszins reëel te noemen omdat er na baggeren een natuurlijke verdere verdieping van de geul ontstaat.

Tabel 6.3 Volumetoename per vak (in Mm³) als gevolg van baggeren van juli '97 t/m september '98

Verruiming in vak:	beunvolume	in-situ-volume	5x-in-situ-volume	volume onder N.A.P in 1996
5	1,83	1,66	8,32	691.3
4	1,13	1,03	5,14	441.3
3	7,54	6,86	34,3	472.8
2	4,36	3,96	19,8	270.0
1	3,21	2,91	14,6	182.5

De verruimde gemiddelde profielen van elk vak worden in het basismodel geplaatst. De afstanden van de middens van elk vak tot de monding staan in Tabel 6.2. De vergelijking tussen het basismodel en de situatie na verdieping is te zien in Figuur 6.1. Tot op 30 km vanaf de monding is er nauwelijks een verandering in het faseverschil tussen de twee situaties. Op 40 km vanaf de monding en verder stroomopwaarts is het faseverschil in de situatie na verdieping afgenomen ten opzichte van het basismodel. Hier is dus een

verandering richting ebdominantie opgetreden. De verandering van het faseverschil tussen het basismodel en de situatie na verdieping neemt toe met de afstand tot de monding. Op grotere afstand vanaf de monding zijn de volumeveranderingen relatief ook groter (zie Tabel 6.3) en daarom is daar ook een toename van de verandering van het faseverschil op grotere afstand van de monding te verwachten. De verdieping leidt dus tot een verandering richting ebdominantie in het oostelijk deel van de Westerschelde. Verder heeft de verdieping slechts invloed in stroomopwaartse richting.



Figuur 6.1 Invloed verdieping op asymmetrie van het verticale getij

6.4 Conclusies voor complex model

Het doel van dit hoofdstuk was meer inzicht te verkrijgen in de gevolgen van veranderingen in de morfologie op de asymmetrie van het verticale getij in de Westerschelde. Hiervoor zijn in dit hoofdstuk veranderingen aangebracht in een model voor de Westerschelde voor de situatie van 1996.

- De aangebrachte verondieping in het oostelijk deel van de Westerschelde die de situatie van 1955 in dat deel weergeeft leidt tot een verandering richting ebdominantie ter hoogte van Hansweert en een verandering richting vloeddominantie stroomopwaarts van Bath.
- Een verdieping in de Westerschelde wat een weergave is van de verdieping ten gevolge van baggeren in de periode juli '97 t/m september '98 leidt tot een verandering richting ebdominantie in het oostelijk deel van de Westerschelde.
- Lokaal aangebrachte veranderingen in de gemiddelde diepte kunnen zorgen voor een verandering van de getiasymmetrie in het gehele estuarium.

7 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

7.1 Samenvatting en conclusies

Het doel van de studie is inzicht te verkrijgen in de relatie tussen geometrische eigenschappen van de Westerschelde en de getijasymmetrie in dit estuarium. Deze relatie is van belang, omdat getijasymmetrie een residueel sedimenttransport kan veroorzaken. Getijasymmetrie is de vervorming van de getijkromme in het estuarium. Door de vervorming van de aan de monding nagenoeg symmetrische getijkromme is er een verschil tussen de duur van de periodes van stijgend en dalend waterniveau (asymmetrie van het verticale getij) en een verschil tussen de maximale eb- en vloedsnelheden (asymmetrie van het horizontale getij).

Om de relatie tussen geometrische eigenschappen en getijasymmetrie te onderzoeken zijn twee ééndimensionale modellen gebouwd waarin het systeem is geschematiseerd tot een één-geul systeem:

- een simpel prismatisch model met uniforme geometrie in langsrichting en
- een complex model dat een schematisatie is van het gehele Schelde estuarium, waarbij de geometrie wél varieert in langsrichting.

In het simpel prismatisch model wordt het gedeelte van de Nederlands-Belgische grens tot aan Gentbrugge verwaarloosd, in het complex model maakt dit gedeelte wél deel uit van het model. Met het prismatisch model zijn de volgende inzichten verkregen in de asymmetrie van het verticale en horizontale getij op een bepaalde lokatie in het estuarium.

- De getijasymmetrie neemt toe op grotere afstand van de monding.
- Een grotere amplitude van de dominante getijcomponent (M_2) zorgt voor meer vloeddominantie van het verticale getij.
- De amplitude en fase van aan de monding opgelegde hogere harmonische getijcomponenten zijn van invloed op de getijasymmetrie landinwaarts. Een opgelegde getijasymmetrie werkt door in landwaartse richting en een grotere amplitude van de opgelegde viermaal daagse getijcomponent zorgt voor minder vloeddominantie van het verticale getij.
- De lengte van het estuarium is van invloed op de getijasymmetrie, een korter estuarium zorgt voor meer vloeddominantie voor het verticale getij.
- De verschillen tussen maximaal optredende eb- en vloedsnelheden hebben een koppeling hebben met verschillen tussen de tijdsduren van stijgend en dalend waterniveau. Een dieper estuarium leidt tot meer ebdominantie van het horizontale getij en een ondieper estuarium leidt tot meer vloeddominantie van het horizontale getij.

Het complex model is gecalibreerd (door variatie van de wrijvingsfactor) voor het jaar 1996 voor plaats van optreden van maximale getijslag en asymmetrie van het verticale getij. Geverifieerd voor 1996 is of het faseverschil tussen vertikaal en horizontaal getij, de asymmetrie van het horizontale getij en de getijvolumina overeenkomen met de metingen. Het model blijkt het getij in de Westerschelde in 1996 goed te reproduceren. Daarna is voor de situatie van 1955 geverifieerd of het getij in dat jaar goed gereproduceerd wordt én of de

veranderingen in getijslag en asymmetrie van het verticale getij van 1955 tot 1996 gereproduceerd worden. De vergelijking tussen modelresultaten en metingen voor het getij in 1955 en de veranderingen in modelresultaten tussen de twee jaren geven vertrouwen in de geldigheid van het model.

Door veranderingen aan te brengen in het complex model voor de situatie van 1996 moet duidelijk worden wat de gevolgen zijn van lokale veranderingen in de morfologie op de getiasymmetrie. Dit leidt tot het inzicht dat er zowel lokaal als in het gehele estuarium veranderingen in de getiasymmetrie kunnen ontstaan. Wanneer bijvoorbeeld lokaal een verondieping wordt aangebracht, kan dit leiden tot méér vloeddominantie voor het verticale getij stroomopwaarts van de verondieping en stroomafwaarts van de verdieping kan dan méér ebdominantie voor het verticale getij optreden. De verdieping in de periode juli 1997 t/m september 1998 is een verdieping die in het oostelijk deel van de Westerschelde relatief groter is. De verdieping veroorzaakt volgens het complex model minder vloeddominantie voor het verticale getij in het oostelijk deel van het estuarium.. De verdieping heeft slechts invloed in stroomopwaartse richting.

7.2 Aanbevelingen

In dit onderzoek is de relatie tussen morfologie en getiasymmetrie voor systemen als de Westerschelde duidelijker geworden. Voor een beter inzicht in de invloed van lokale morfologische veranderingen in het estuarium op de getiasymmetrie in het gehele estuarium is het nodig dat er meerdere veranderingen in het complex model worden aangebracht. Tevens verdient het aanbeveling na meerdere veranderingen aangebracht te hebben, ook de invloed van veranderingen op de asymmetrie van het horizontale getij te onderzoeken.

De getijcomponent M_6 is van belang voor het getij in de Westerschelde. In dit onderzoek is de generatie van de getijcomponent M_6 in het complex model niet behandeld. Voor vervolgonderzoek wordt aanbevolen om ook de invloed van veranderingen in de morfologie op het ontstaan van de getijcomponent M_6 te bepalen, omdat deze van belang is voor het horizontale getij.

Het ontstaan van minder vloeddominantie voor het verticale getij na de verdieping in de periode juli 1997 t/m september 1998 dient geverifieerd te worden met metingen.

Een beperking van een ééndimensionaal systeem met één geul is dat stroomcirculaties niet tot uitdrukking kunnen komen. Stroomcirculaties zijn van invloed op residuele transporten in het estuarium. Om de stroomcirculaties in een model tot uitdrukking te brengen is een netwerk- of 2DH-model nodig.

Het werk van Dronkers(1998) behandelt de morfologische stabiliteit voor Nederlandse estuaria. Met de door Dronkers(1998) afgeleide relatie kan een uitdrukking worden afgeleid voor het verschil tussen eb- en vloedperiodes(zie hiervoor Wang e.a.1999). Vergelijking van de conclusies in Dronkers(1998) en Wang e.a.(1999) en de resultaten van het onderzoek in dit rapport kan meer inzicht opleveren in de morfologische stabiliteit van estuaria.

Literatuur

- Battjes, J.A., 1997, *Stroming in Waterlopen*, collegediktaat van Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft
- Claessens, J. en L. Meyvis (1994). *Het overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeeschelde bekken gedurende het decennium 1981-1990*. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap. Antwerpse Zeehavendiensten.
- Dronkers, J.J., 1964, *Tidal computations in rivers and coastal waters*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam
- Dronkers, J., 1988, *morphodynamics of the Dutch Delta*, In Dronkers, J. & M. Scheffers (1998), *Physics of Estuaries and Coastal Seas*. A.A.Balkema, Rotterdam.
- Friedrichs, C.T. & D.G. Aubrey, (1988), *Non-linear distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis*, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 27. P.521-545
- Gerritsen, H., Wang, Z.B. & A. van der Weck, 1999. *Morfologische interpretatie van de veranderingen in het getij van de Westerschelde*, WL | Delft Hydraulics, rapport Z2671.
- Helvert, M. van (2000), *LTV Schelde Estuarium*, CD-ROM
- Jeuken, M.C.J.L. (2000), *On the morphological behaviour of tidal channels in the Westerschelde estuary*, Ph.D. thesis, Utrecht University.
- Le Provost, C. en M. Fornerino (1985). *Tidal spectroscopy of the English Channel with a numerical model*. J. of Phys. Oceanography, 15: 1009-1031
- Male, K. van der (1996), *De morfologische veranderingen op de Zeeschelde 1961-1992*, RIKZ/ABD 96.837x
- Rijksinstituut voor Kust en Zee(RIKZ) (2000), *Getijtafels voor Nederland 2001*, Sdu Uitgevers-Den Haag
- Speer, P.E. & D.G. Aubrey (1985) *A study of non-linear tidal propagation in shallow tidal inlet/estuarine systems*, Part II: Theory, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 21, P.207-224
- Wang, Z.B., C. Jeuken and H.J. De Vriend (1999), *Tidal asymmetry and residual sediment transport in estuaries. A literature study and application to the Western Scheldt*. Delft, WL | Delft Hydraulics, report Z2749.

A Input naar Output

A.1 Algemeen

In SOBEK van WL|Delft Hydraulics wordt een estuarium gemodelleerd. De dwarsprofielen worden gemaakt met de relatie voor de hypsometrie (parameters d , α en C). Randvoorwaarde hierbij is dat het volume van het totale estuarium gelijk is aan dat van de 6 vakken in de Westerschelde in 1996. De opzet van het model met bijbehorende rand- en beginvoorwaarden wordt beschreven in Hoofdstuk 3.

SOBEK berekent vervolgens de waterbewegingen gedurende 4 getijcycli. De laatste cyclus wordt de output. De output is bij elke tijdstap en bij elke lokatie (ingesteld punt waarop informatie gevraagd wordt, elke 10 km) van één cyclus:

- Waterniveau
- Totale doorstroomoppervlak
- Totale debiet

Van de tijdreeks van het waterniveau wordt bepaald wat de amplitude en fase is van de getijcomponenten (M_2 , M_4) op elke lokatie in het estuarium. Dit gebeurt met een Fourier-analyse (softwarepakket GETIJSYS van WL|Delft Hydraulics).

Vervolgens wordt van de cyclus de amplitude op elke lokatie bepaald door: het gemiddelde te nemen van de maximum- en minimumwaarde in de reeks:

$$a = \frac{\eta_{HW} + \eta_{LW}}{2}$$

waarin η is de absolute uitwijking t.o.v. N.A.P. voor hoog en laag water.

In een symmetrisch getij zullen η_{HW} en η_{LW} gelijk zijn, hier is dit niet het geval en daarom wordt het gemiddelde genomen.

A.2 Bepalen van asymmetrie parameters

A.2.1 Vertikaal

De asymmetrie van het verticale getij van de tijdreeks wordt uitgedrukt in twee parameters: faseverschil en intensiteit.

$$\text{faseverschil: } 2\varphi_{M_2} - \varphi_{M_4} \quad [\text{graden}]$$

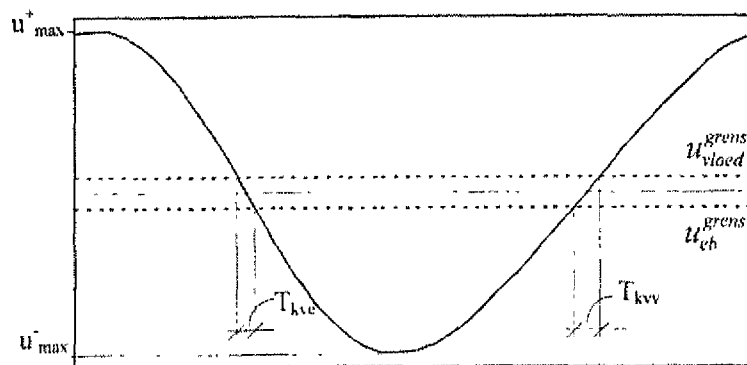
intensiteit: $\frac{a_{M_1}}{a_{M_2}}$ [-]

Nu bestaat er op elke lokatie informatie over de asymmetrie van het verticale getij.

A.2.2 Horizontaal

De horizontale getiasymmetrie wordt bepaald met het verschil tussen maximale vloed- en ebsnelheden: resp. $u_{\max}^+$ en $u_{\max}^-$.

In onderstaand figuur wordt dit gevisualiseerd:



A.3 Bepalen van geometrie-parameters

Speer&Aubrey

V_s , V_e en a/h zijn te bepalen met α, d en a via de relatie voor de hypsometrie (hoofdstuk 3).

Alternatieve parameters

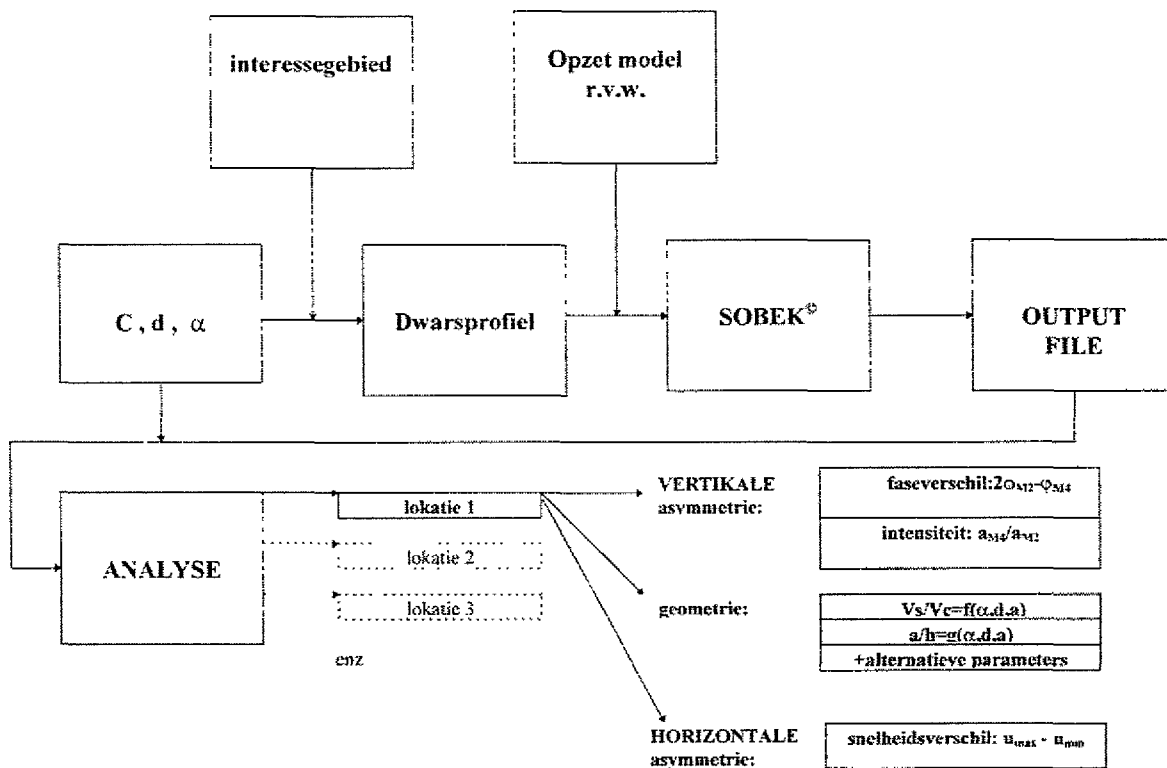
A_f en A zijn te bepalen met α, d en a via de relatie voor de hypsometrie (hoofdstuk 3). De overige gebruikte alternatieve parameters kunnen ook met α , d en a bepaald worden.

Flow chart

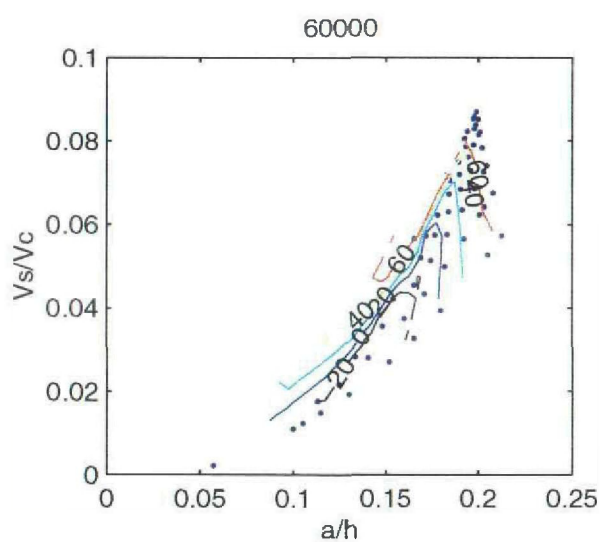
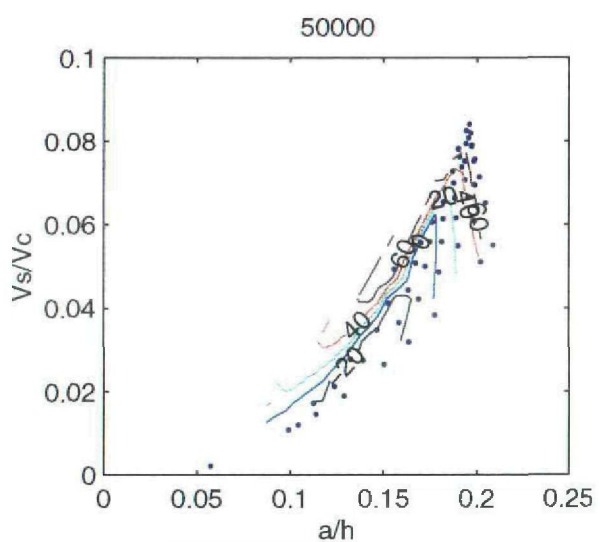
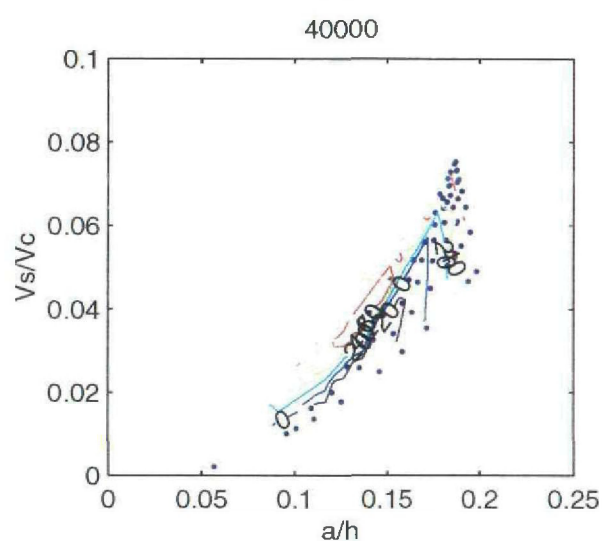
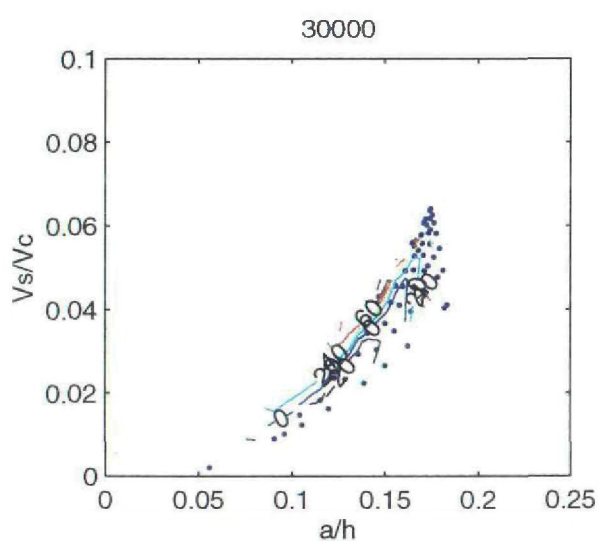
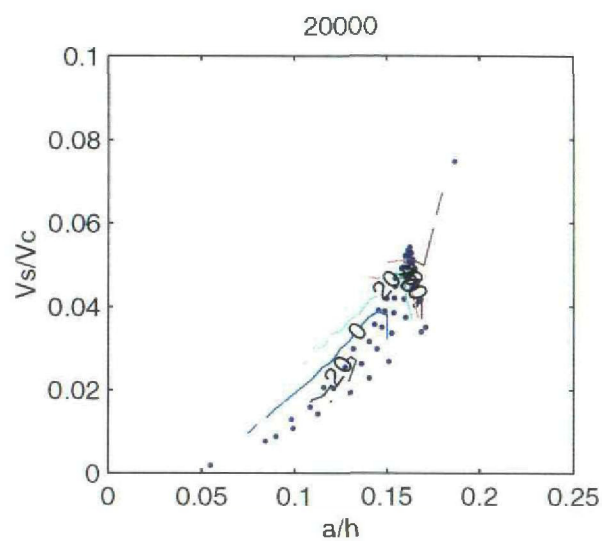
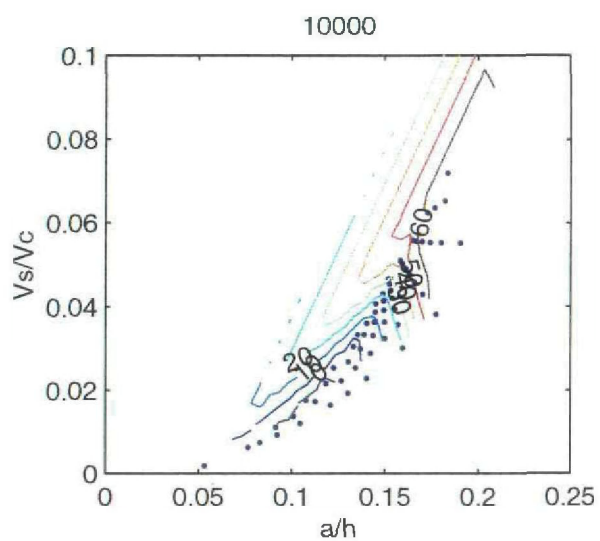
Op pagina A-4 wordt schematisch en overzichtelijk weergegeven hoe de data voor het 1D model (situatie: uniforme geometrie in langsrichting) gegenereerd wordt. Dit is in feite een weergave van de tekst van deze appendix.

FLOW-CHART

ASYMMETRIE/GEOMETRIE



B Figuren hoofdstuk 4



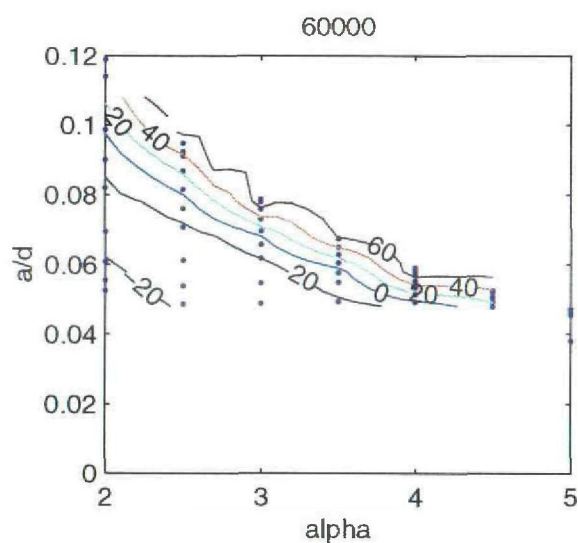
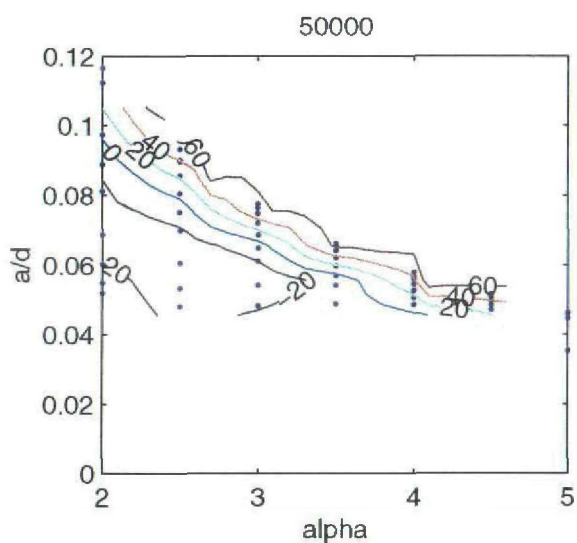
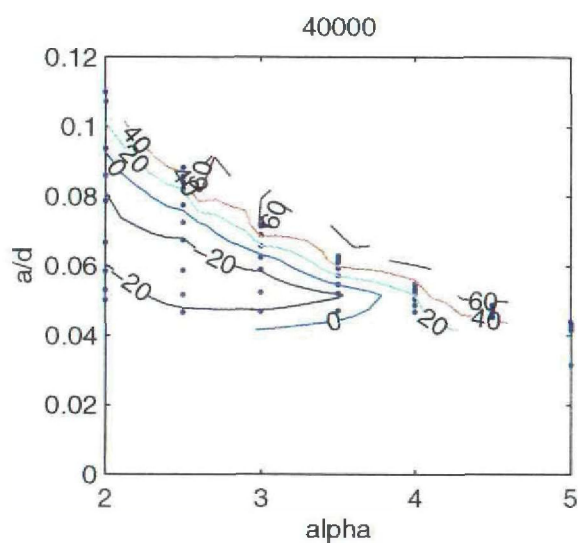
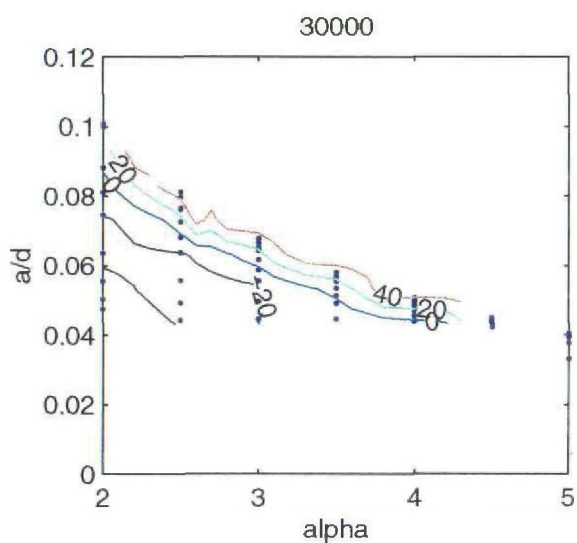
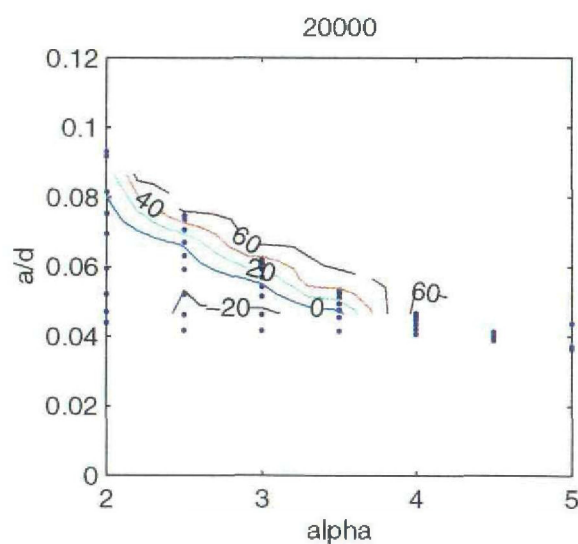
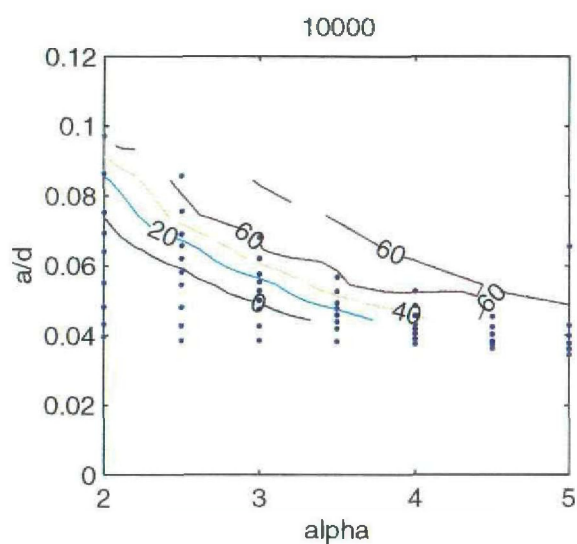
Speer & Aubrey diagram
voor 6 afstanden vanaf monding

Z2644

okt. 2000

WL | DELFT HYDRAULICS

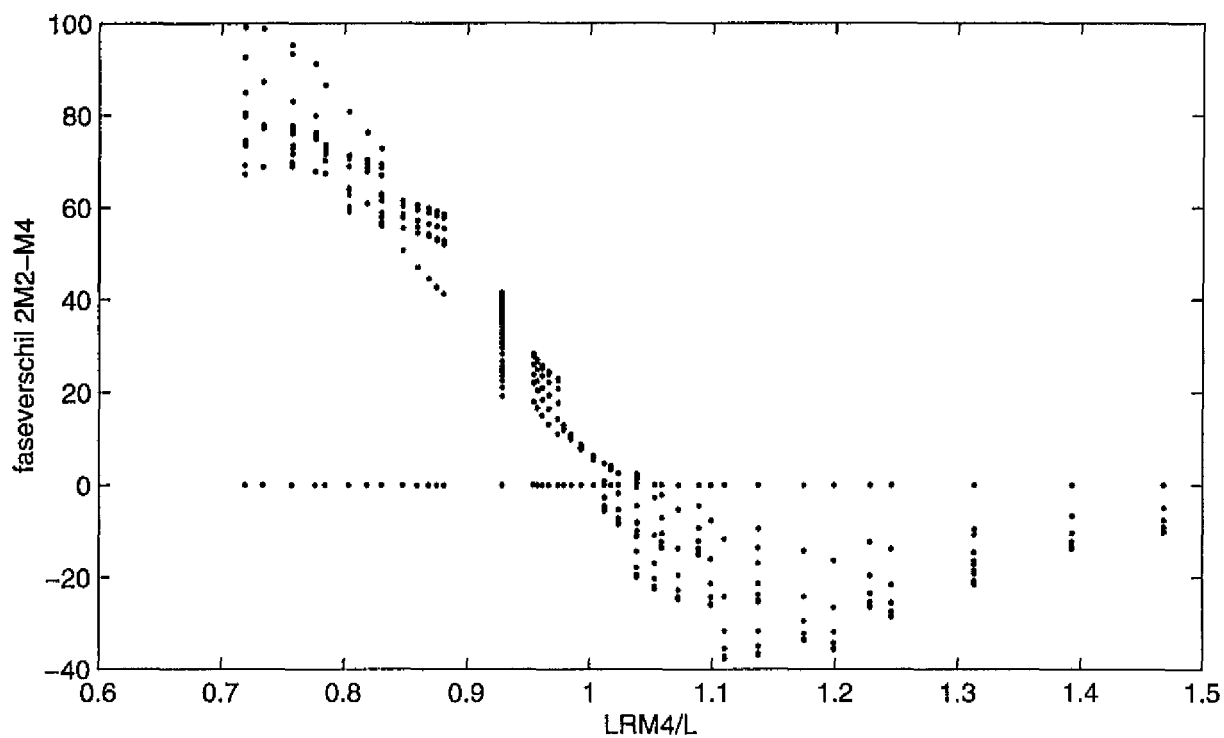
figuur B1



alpha - a/d diagram
voor 6 afstanden vanaf monding

Z2644

okt. 2000



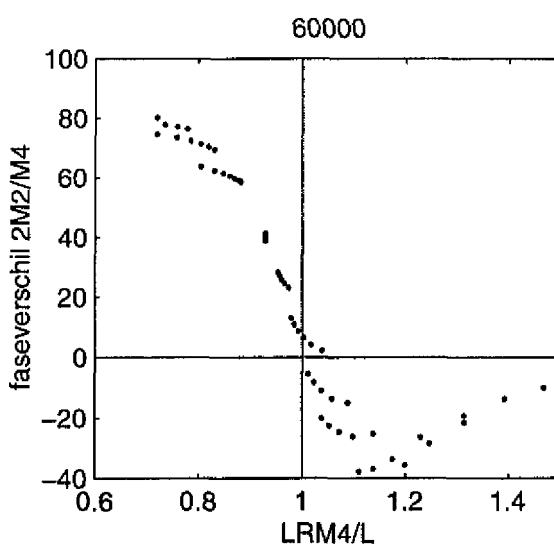
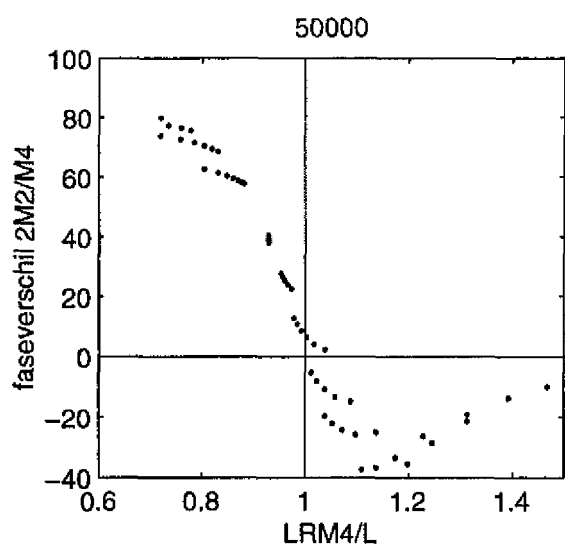
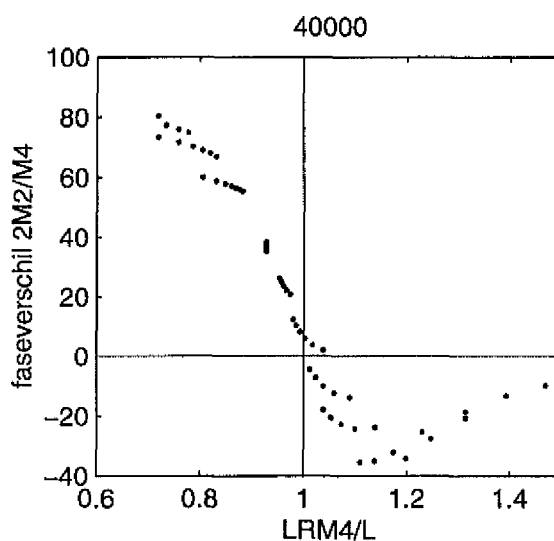
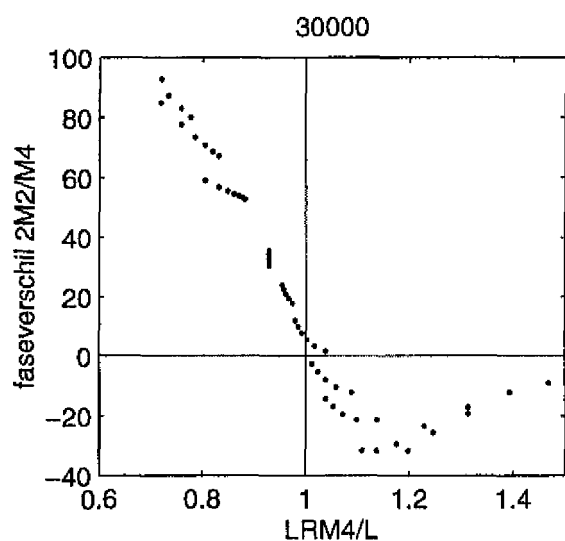
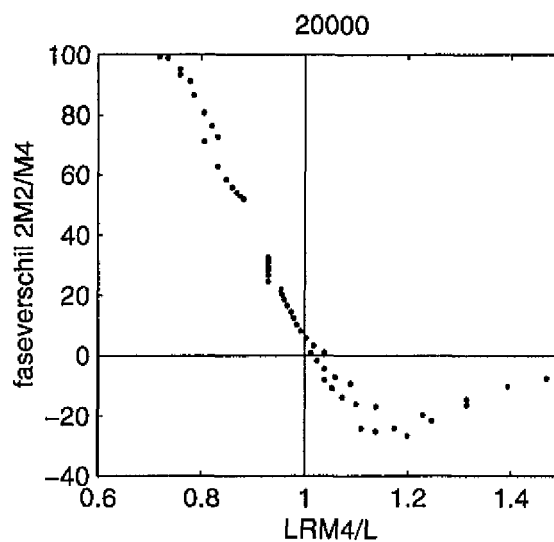
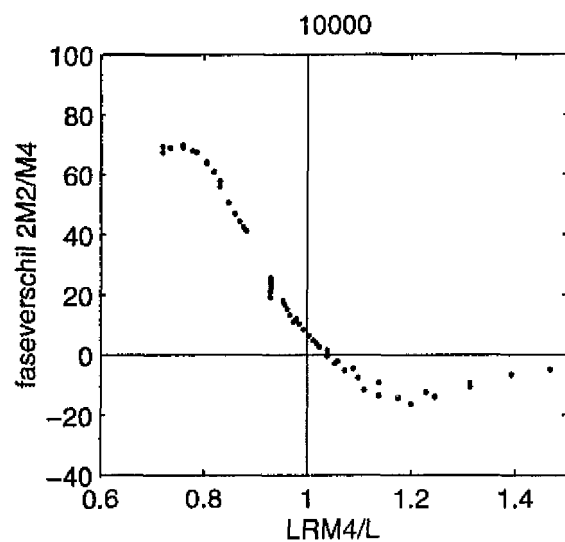
faseverschil 2M2-M4
in 55 model runs

Z2644

okt.2000

WL | DELFT HYDRAULICS

figuur B3



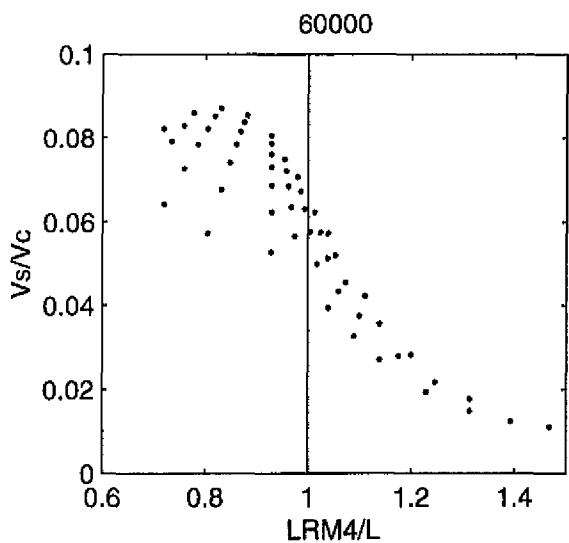
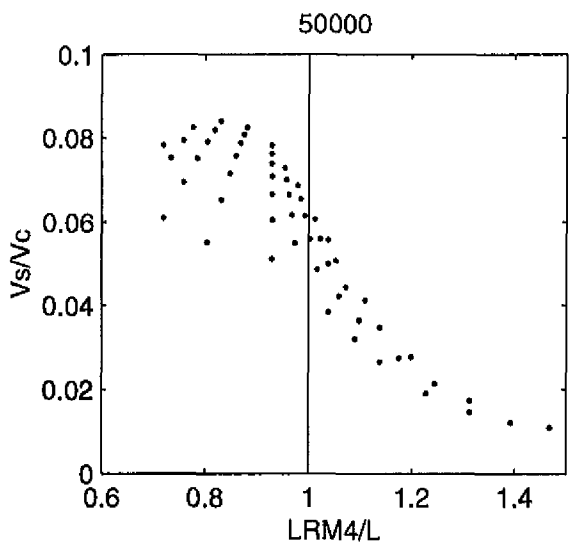
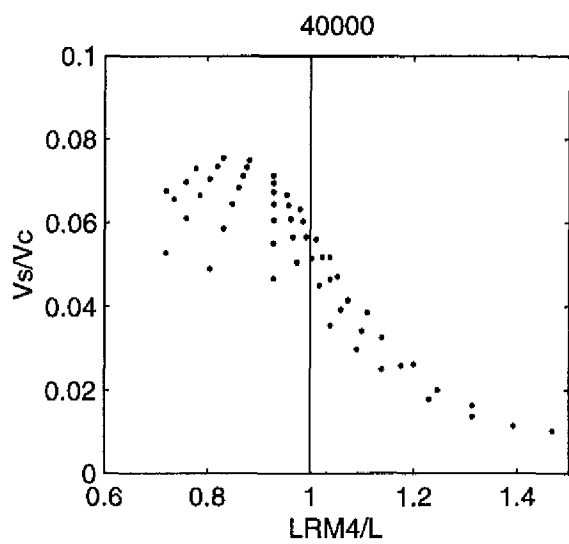
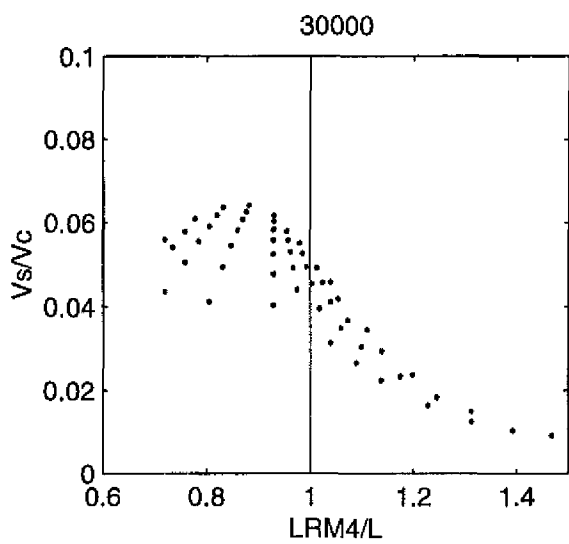
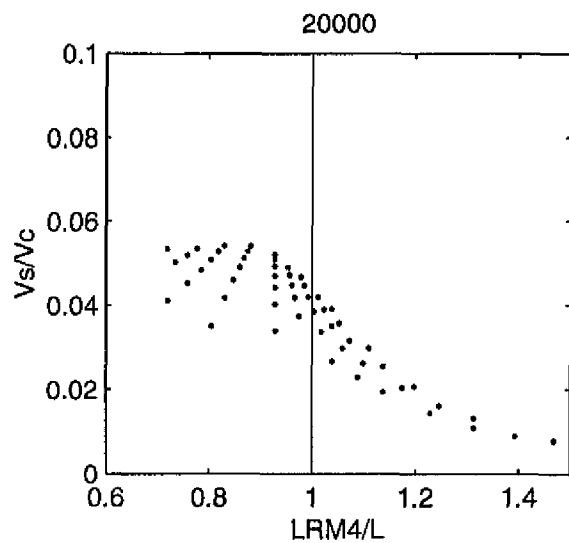
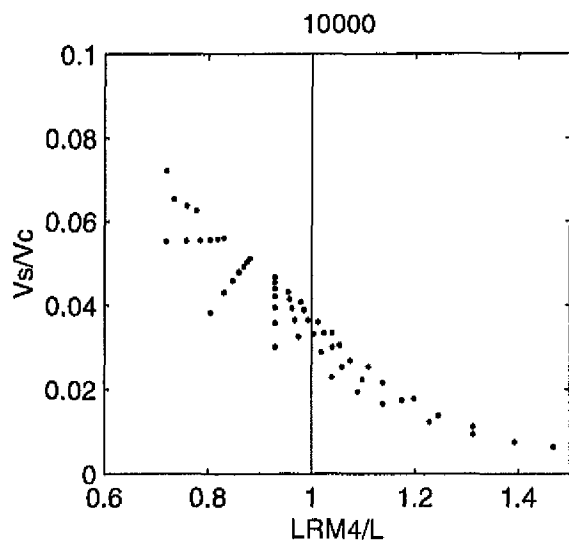
faseverschil 2M2-M4
in 55 model runs op 6 afstanden vanaf monding

Z2644

okt. 2000

WL | DELFT HYDRAULICS

figuur B4



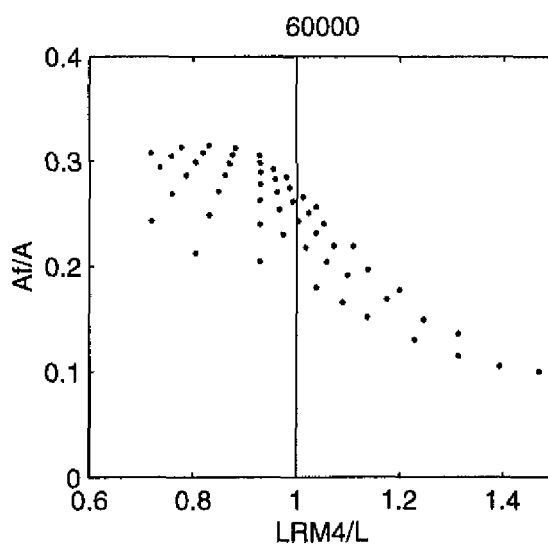
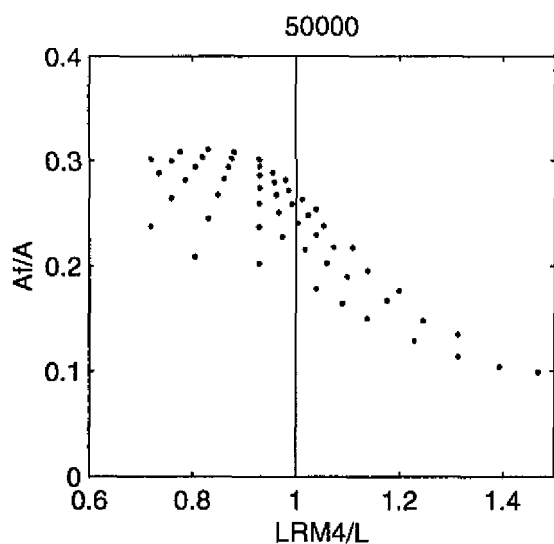
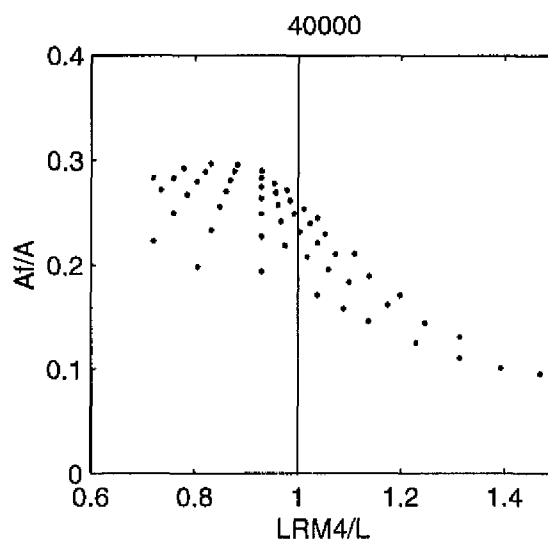
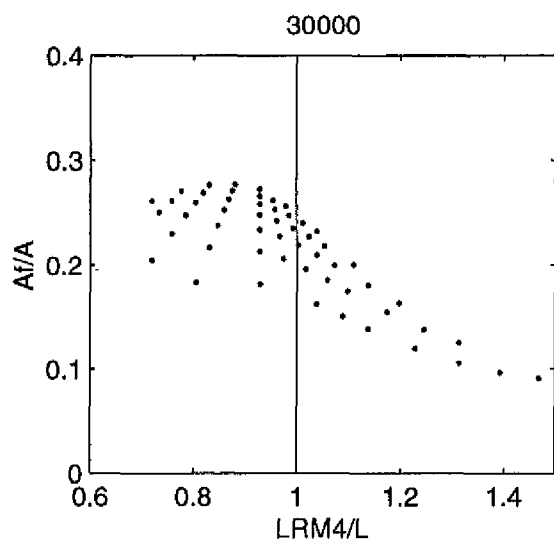
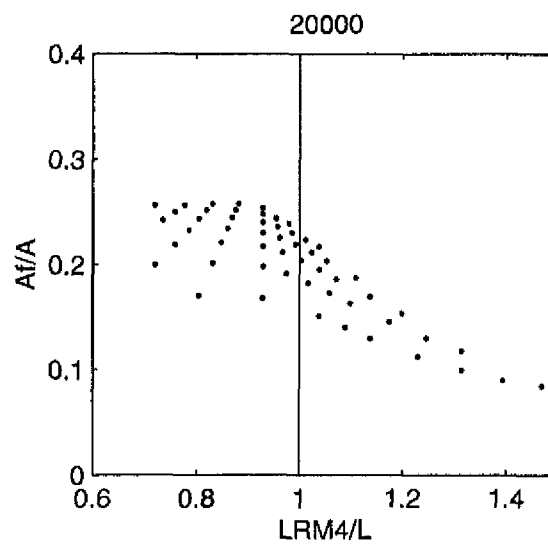
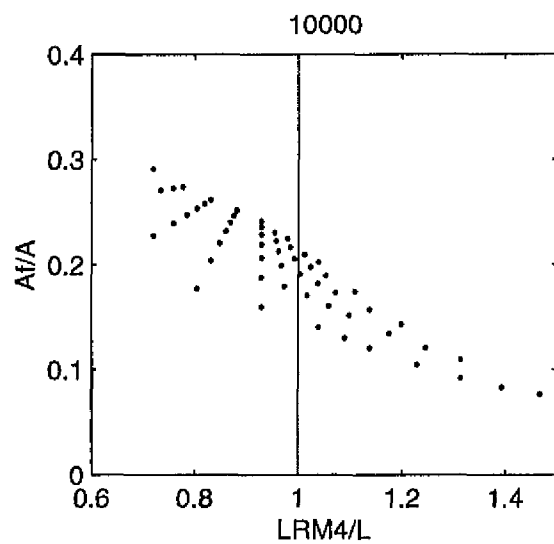
afhankelijkheid $LRM4/L$ en V_s/V_c
in 55 model runs op 6 afstanden vanaf monding

Z2644

okt. 2000

WL | DELFT HYDRAULICS

figuur B5



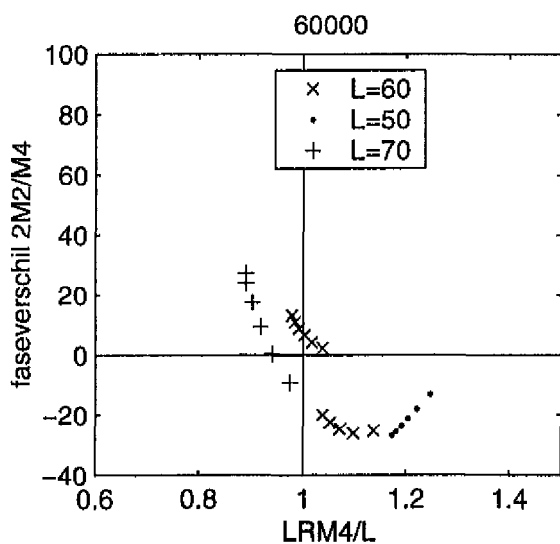
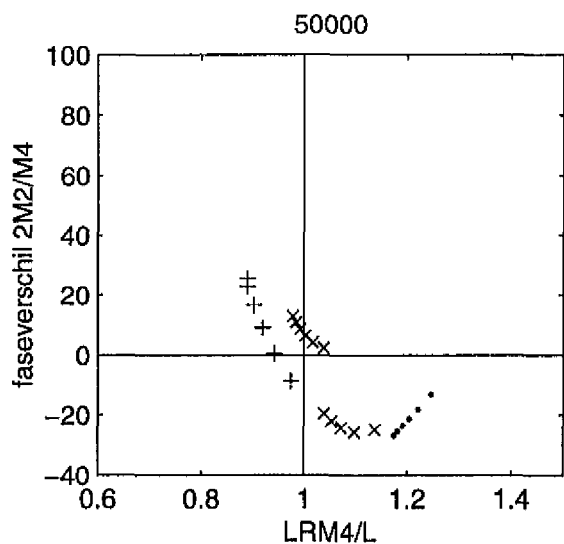
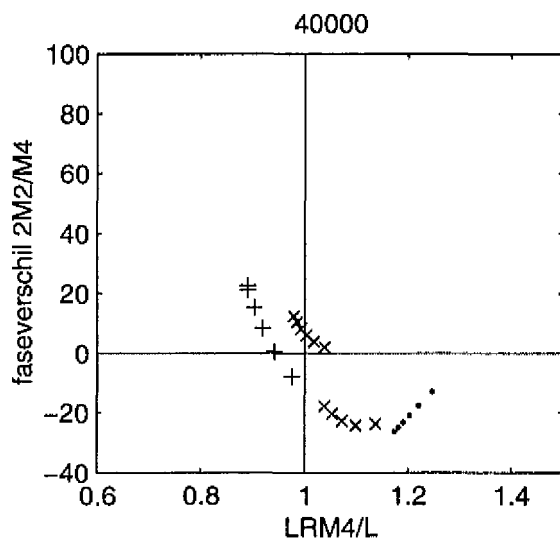
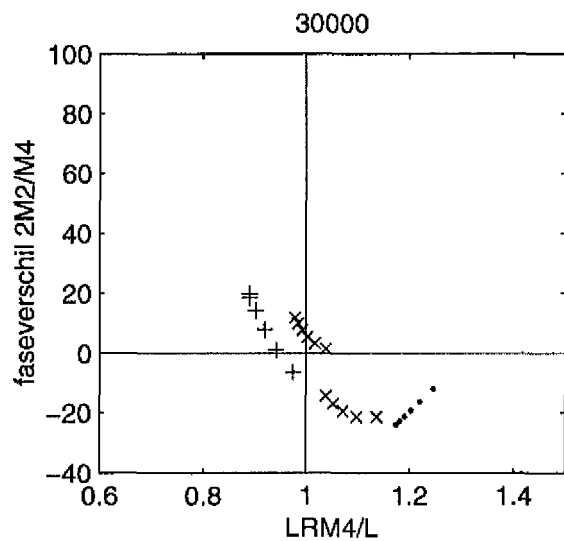
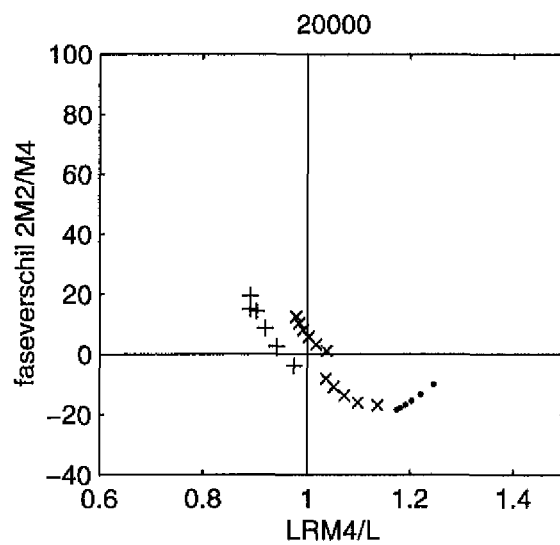
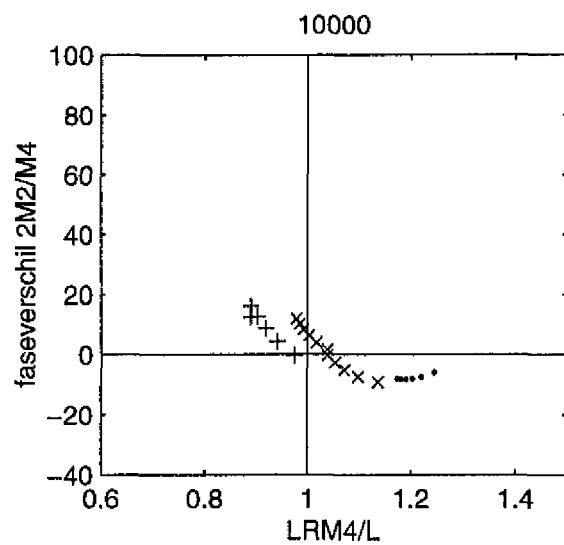
afhankelijkheid LRM4/L en Af/A
in 55 model runs op 6 afstanden vanaf monding

Z2644

okt. 2000

WL | DELFT HYDRAULICS

figuur B6



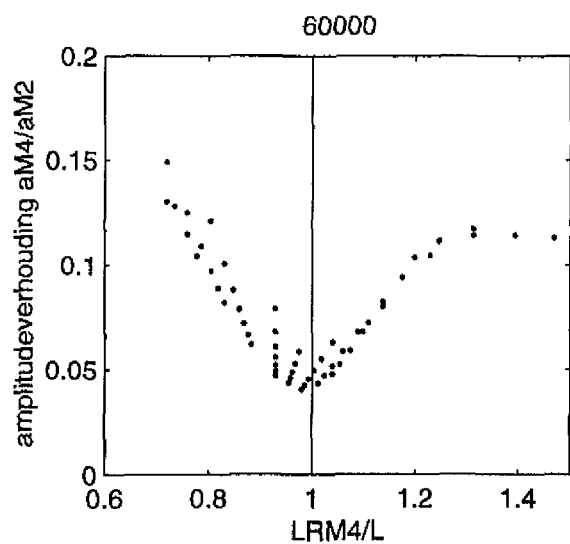
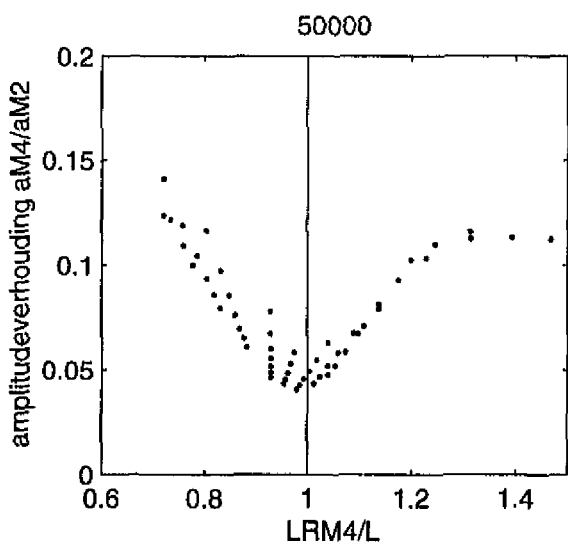
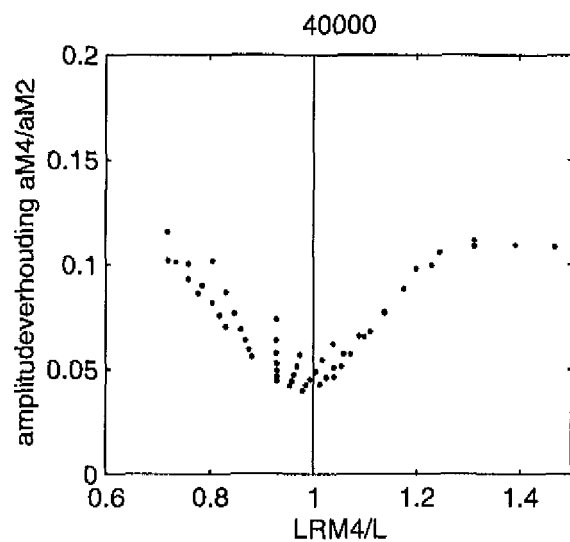
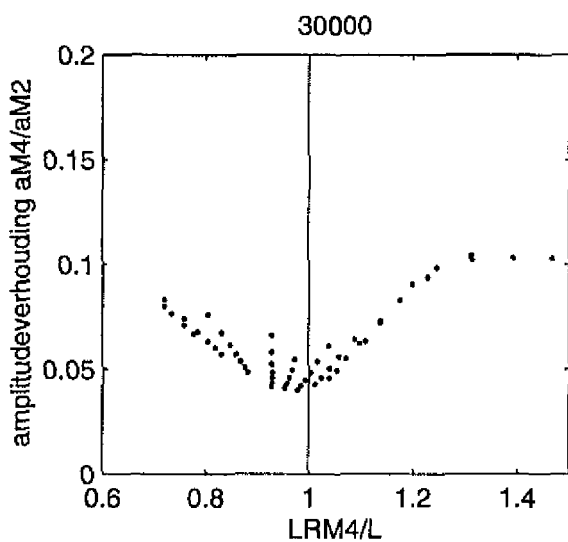
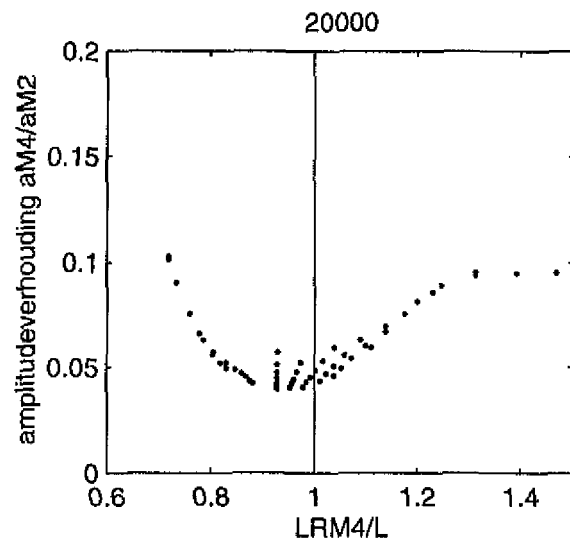
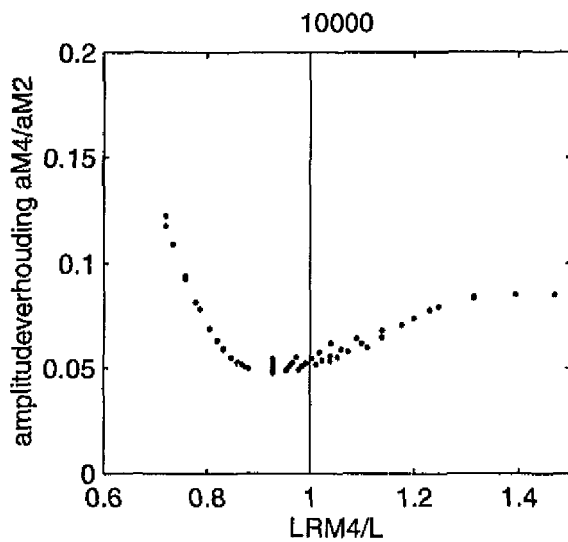
invloed Lengte estuarium (L) op faseverschil 2M2-M4
op 6 afstanden vanaf monding

Z2644

okt. 2000

WL | DELFT HYDRAULICS

figuur B7



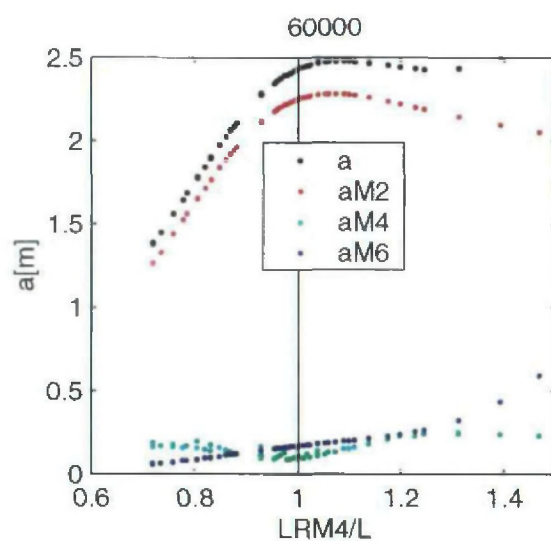
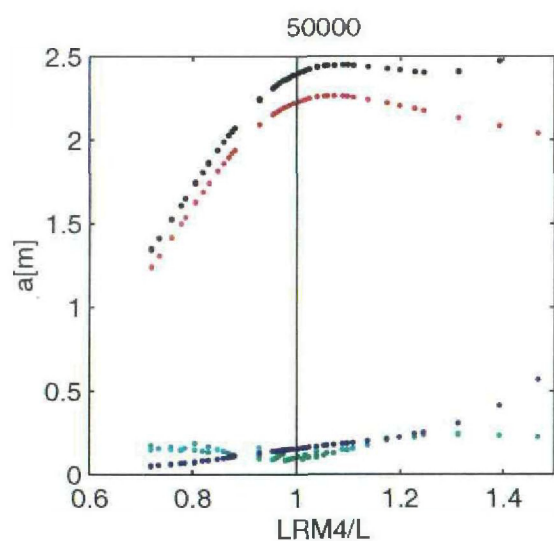
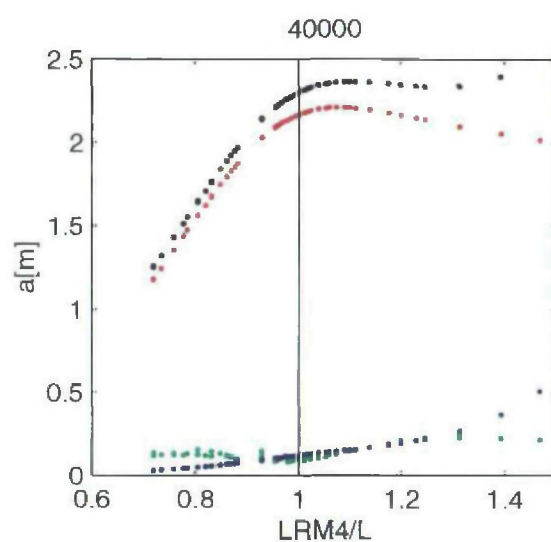
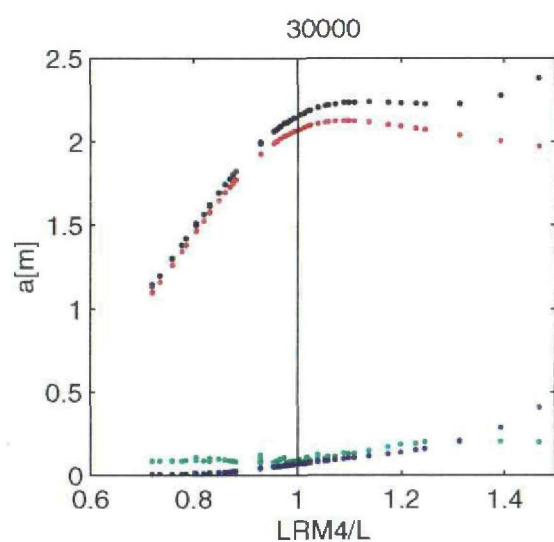
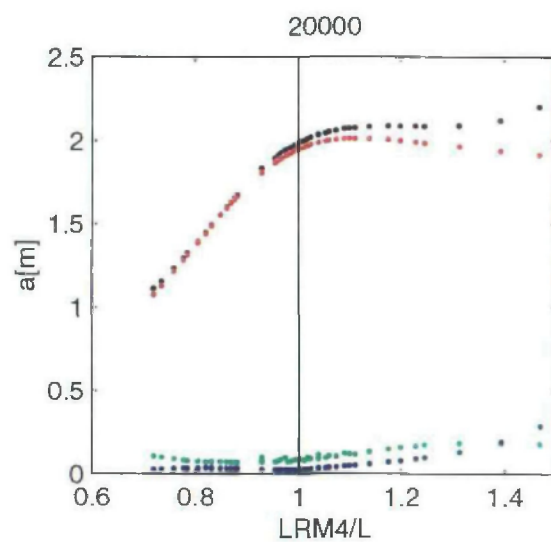
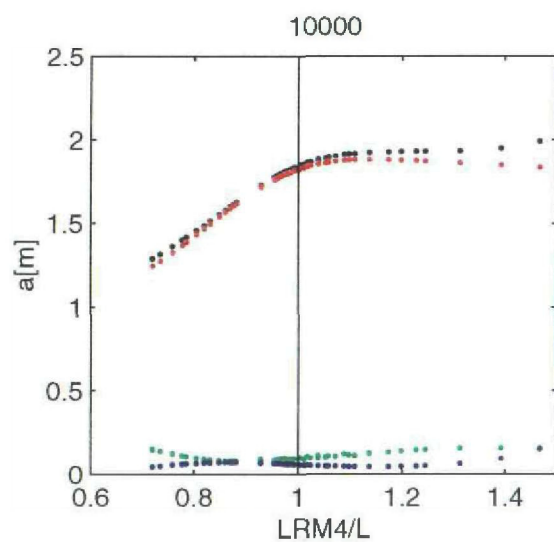
amplitudeverhouding $aM4/aM2$
in 55 model runs op 6 afstanden vanaf monding

Z2644

okt. 2000

WL | DELFT HYDRAULICS

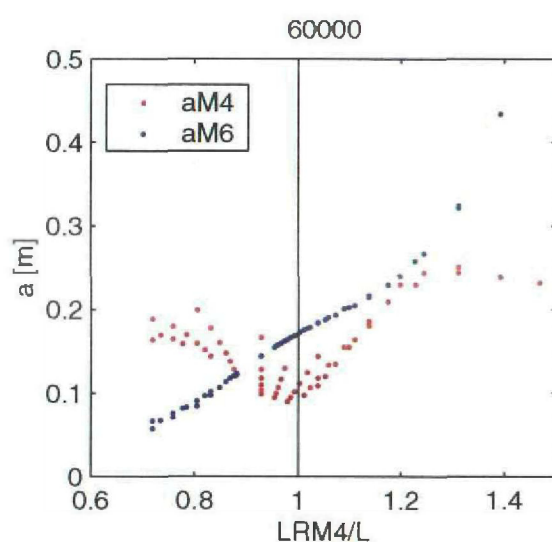
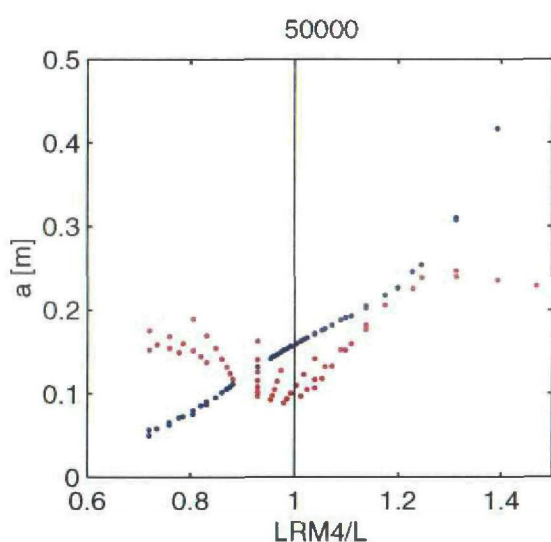
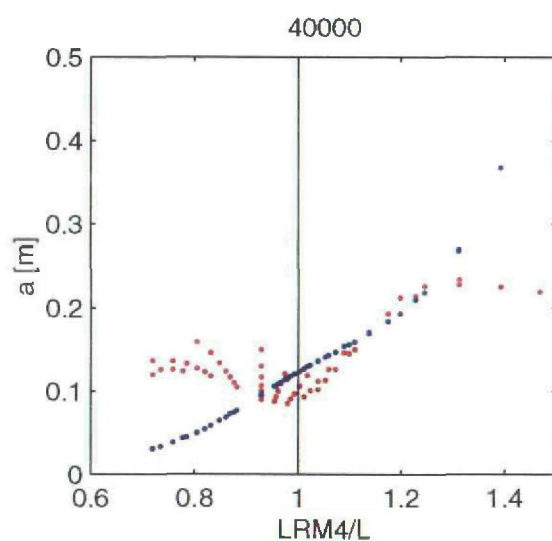
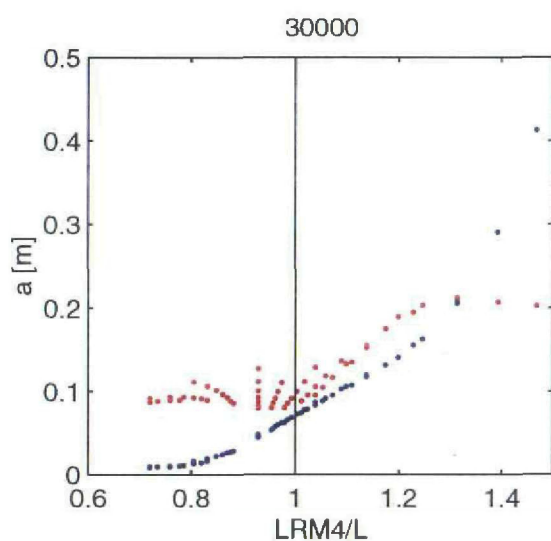
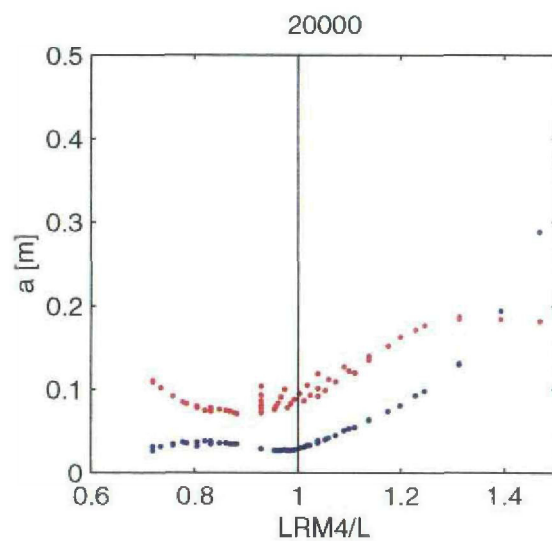
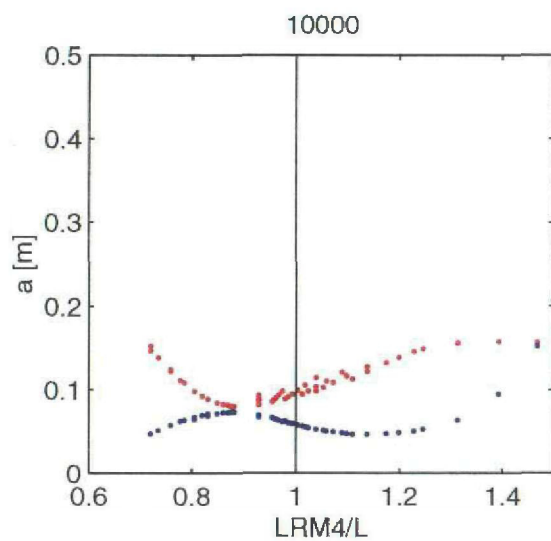
figuur B8



absolute amplitudes
in 55 model runs op 6 afstanden vanaf monding

Z2644

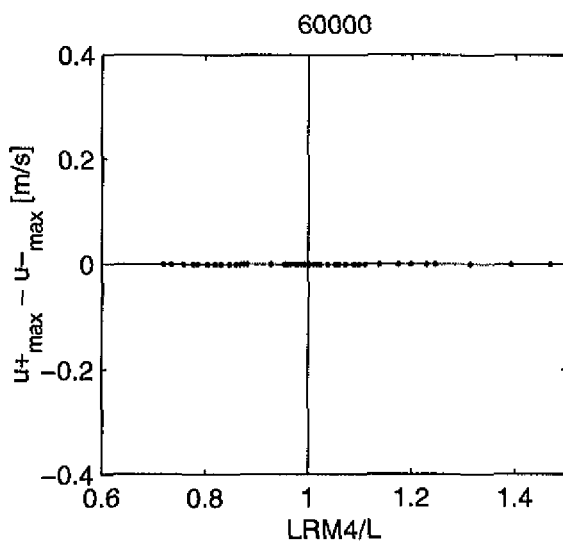
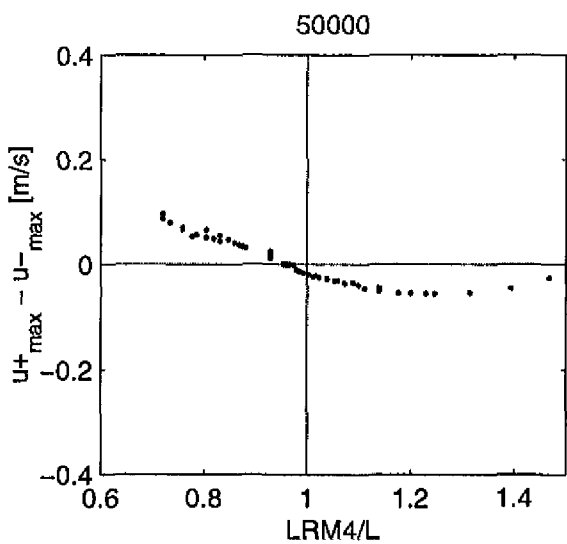
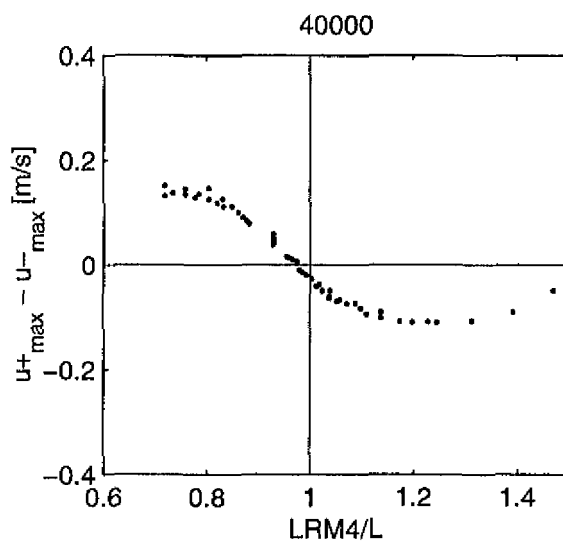
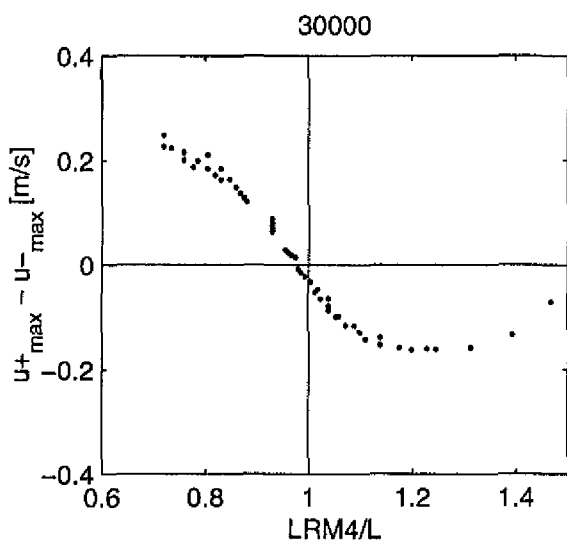
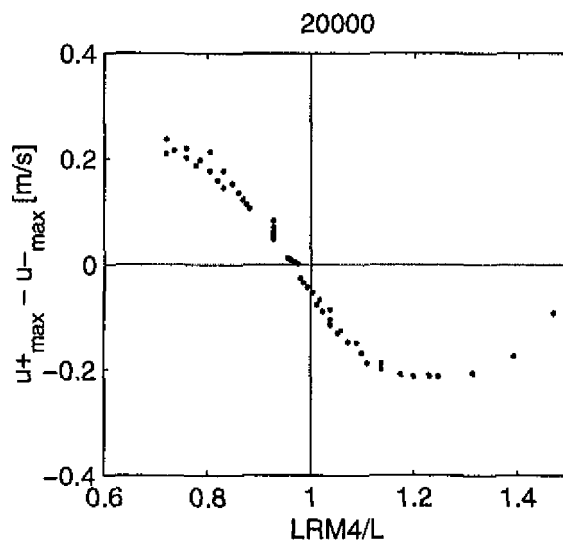
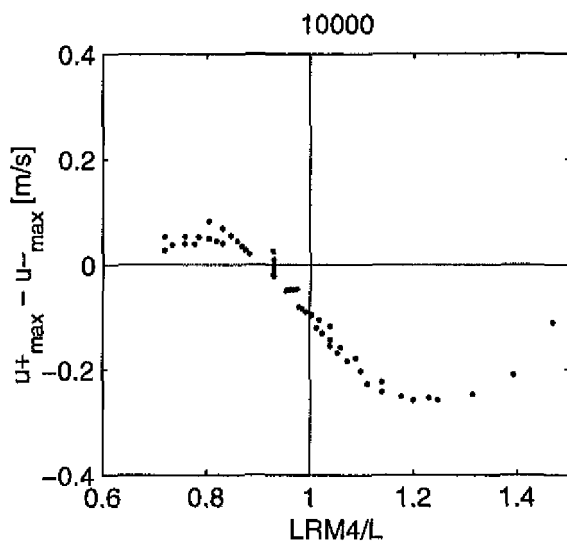
okt. 2000



absolute amplitudes M4 en M6
in 55 model runs op 6 afstanden vanaf monding

Z2644

okt. 2000



verschil tussen maximale vloed en maximale eb
in 55 model runs op 6 afstanden vanaf monding

Z2644

okt. 2000

C Schematisatie complex model en figuren

hoofdstuk 5

In deze Appendix wordt de schematisatie van het Schelde estuarium toegelicht. De benamingen voor de delen van het estuarium worden in tabel C.1 gegeven:

tabel C.1 Delen van het Schelde estuarium, afstanden vanaf monding in km

benaming	van:	tot:
Westerschelde	0	60
Zeeschelde	60	90
Schelde	90	160

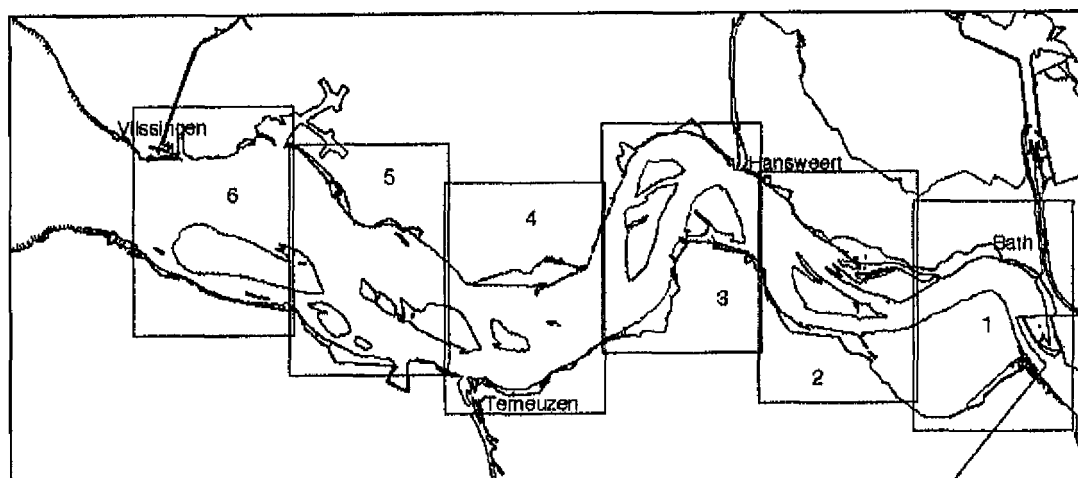
Schematisatie Westerschelde

Met de gegevens over de Westerschelde uit Wang e.a. (1999) kan voor elk vak in de Westerschelde (zie figuur C.1) een geschematiseerd gemiddeld dwarsprofiel gemaakt worden. De breedtevariatie binnen een vak wordt verwaarloosd. Met de bepaalde lengte langs de rivieras van elk vak kan met formule C.1 en met de coëfficiënten in tabel C.2 voor elk vak de breedte op een bepaald niveau worden berekend.

$$b(z) = \frac{\alpha C}{L} (d + z)^{\alpha-1} \quad (C.1)$$

waarin: $b(z)$ is de breedte op een bepaald niveau
 L is de lengte van het betreffende vak
 α , C en d zijn coëfficiënten van het betreffende vak

Het dwarsprofiel wat hiermee ontstaat wordt het gemiddelde profiel van het vak genoemd. In het estuarium wordt dan in het midden van elk vak het gemiddelde profiel van dat vak geplaatst. Aan de monding (de rand van vak 6) wordt nogmaals het gemiddelde profiel van vak 6 geplaatst. Aan de Nederlands Belgische grens (stroomopwaartse zijde van vak 1) wordt nogmaals het gemiddelde profiel van vak 1 geplaatst. Tussen de geplaatste gemiddelde profielen wordt geïnterpoleerd.



figuur C.1 Westerschelde en de 6 peilvakken

tabel C.2 Vakken in 1955 en 1996

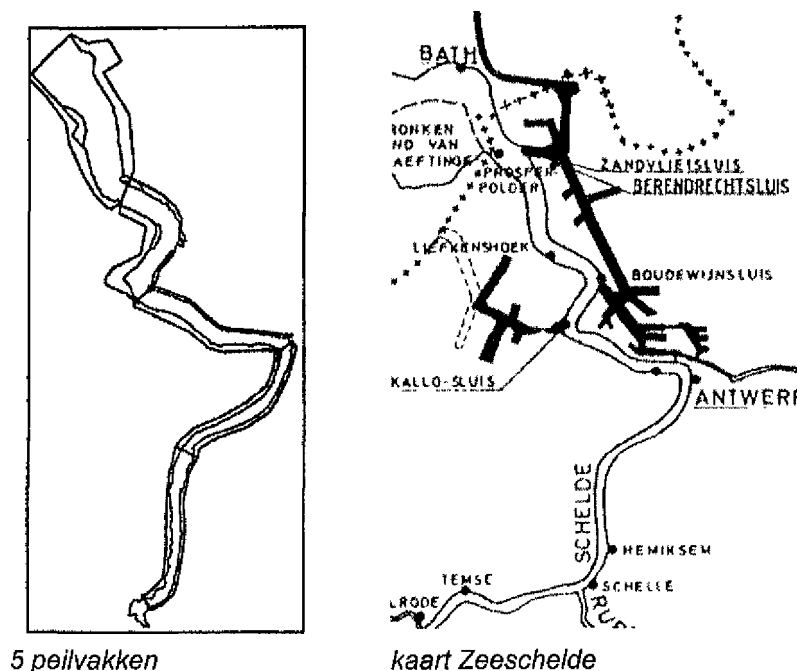
Vak		1955			1996			
	d(m)	α	Cd^a	d(m)	α	Cd^a	C_{1955}	C_{1996}
1	20	2.7	131.9	20	1.94	182.5	0.040501	0.546091
2	20	2.57	254.8	20	2.16	270	0.115492	0.417964
3	30	2.47	503	30	2.67	472.8	0.113	0.053798
4	40	3.59	441.3	40	3.59	441.3	0.000782	0.000782
5	50	3.99	670.7	50	4.42	691.3	0.000112	2.14E-05
6	40	3.43	631.2	40	3.43	631.2	0.002019	0.002019

tabel C.3 Lengte vakken

vak:	Lengte vak in km
6	10
5	10
4	8
3	8
2	8
1	12

Schematisatie Zeeschelde en Schelde

De schematisatie van de Zeeschelde en Schelde van de Nederlands Belgische grens tot aan Gentbrugge: voor de Zeeschelde is informatie beschikbaar in het document "De morfologische veranderingen op de Zeeschelde 1961-1992" van Kees van der Male (1996). Hierin wordt de Zeeschelde opgedeeld in 5 peilvakken, zie figuur C.2. Vak 1 ligt meest stroomafwaarts.



5 peilvakken
kaart Zeeschelde

figuur C.2 Zeeschelde en de 5 peilvakken

Voor elk van de 5 vakken geeft Van der Male(1996) op een aantal niveau's t.o.v. N.A.P. de horizontale wateroppervlakte. Voor elk vak wordt nu de breedtevariatie over de lengte van het vak verwaarloosd. Tevens wordt de lengte van het vak langs de rivieras bepaald. Op elk gegeven niveau in tabel C.3 kan nu de breedte bepaald worden met formule (C.2).

$$b(z) = \frac{A(z)}{L} \quad (C.2)$$

waarin:

$b(z)$ is de breedte op een bepaald niveau

$A(z)$ is horizontaal oppervlak op een bepaald niveau

L is de lengte van het betreffende vak

In tabel C.3 staan de afmetingen van de geschematiseerde dwarsprofielen voor elk van de 5 vakken van de Zeeschelde. Het geschematiseerde profiel wordt het gemiddelde profiel van het vak genoemd. De dwarsprofielen uit tabel C.3 worden gebruikt om de Zeeschelde te schematiseren. In vak 1, vak 2, vak 3 en vak 4 wordt in het midden van het vak het gemiddelde profiel geplaatst. Aan stroomopwaartse einde van vak 5 wordt het gemiddelde profiel van vak 5 geplaatst.

In Gentbrugge valt het bed van de Schelde gedeeltelijk droog bij laag water (Claessens e.a. 1994). Met de gegevens over het laag water in Gent kan dan bepaald worden dat het rivierbed in Gentbrugge op een niveau van N.A.P.+0,77m ligt. De afmetingen van het geschematiseerde dwarsprofiel in Gent staan in tabel C.3.

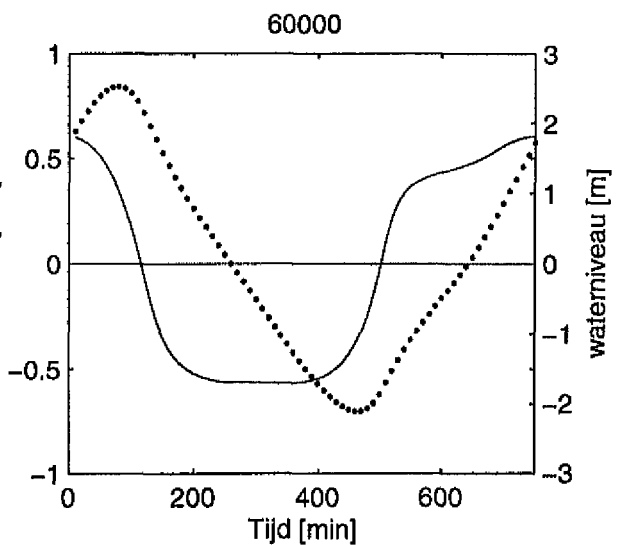
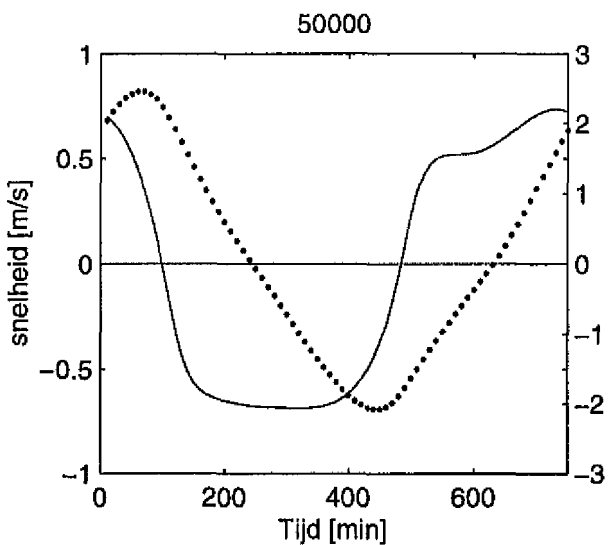
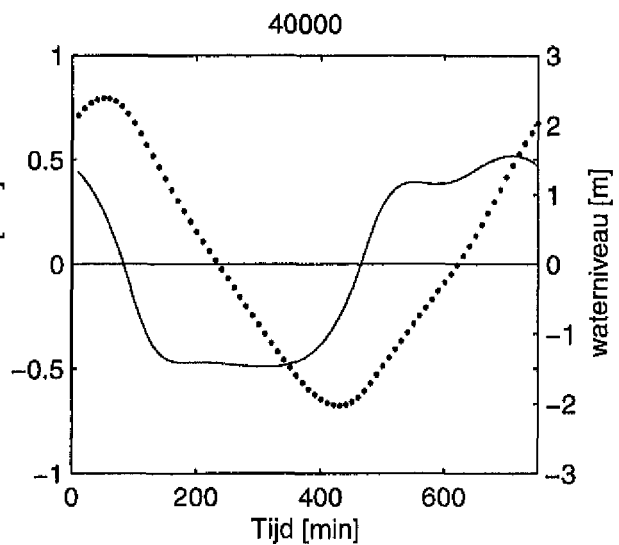
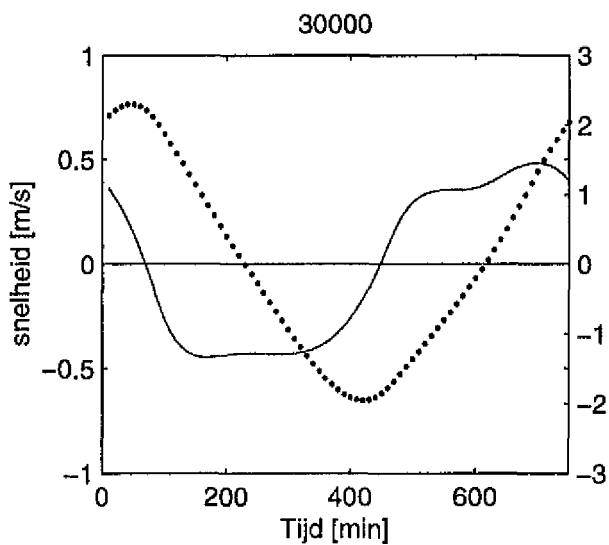
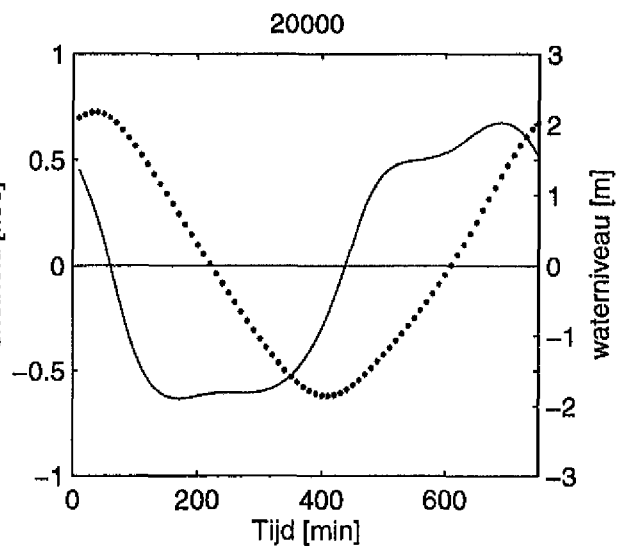
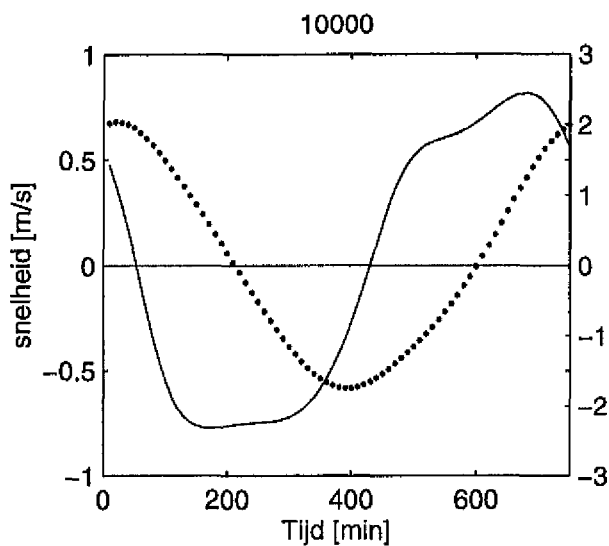
Tussen de in de Westerschelde, Zeeschelde en Schelde geplaatste profielen wordt lineair geïnterpoleerd; de interpolatie tussen Monding Rupel en Gentbrugge is een grove

schematisatie. Dit wordt gedaan, omdat er voor het gedeelte Monding Rupel tot aan Gent geen gedetailleerde informatie beschikbaar is.

Tabel C.3 Gemiddelde profielen Zeeschelde en Schelde in 1961 en 1992

vak nr.->	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5		Gent
diepte t.o.v. N.A.P. in m	A 1961	B 1961	A 1961	B 1961	A 1961	B 1961	A 1961	B 1961	A 1961	B 1961	diepte t.o.v. N.A.P.	B 1961
2	10694	1492	5121	788	4428	554	2954	416	2856	402	>0.77	150
1.5	10135	1427	5014	771	4340	543	2090	294	2805	395	0.77	150
1	9769	1376	4912	756	4273	534	2865	404	2776	391	0	4.95
0.5	9478	1335	4816	741	4182	523	2815	396	2699	380	-2	0.05
0	9221	1299	4741	729	4111	514	2775	391	2670	376	-5	0
-0.5	8934	1258	4675	719	4007	501	2719	383	2631	371		
-1	8681	1223	4589	706	3924	491	2668	376	2599	366		
-1.5	8372	1179	4500	692	3813	477	2603	367	2559	360		
-2	8067	1136	4409	678	3746	468	2564	361	2533	357		
-2.5	7630	1075	4193	645	3566	446	2469	348	2386	336		
-5	5766	812	3603	554	3202	400	2163	305	2101	296		
-7.5	3839	541	2989	460	2603	325	2083	293	1558	219		
-10	2669	376	2216	341	1680	210	1284	181	744	105		
-15	404	57	641	99	208	26	119	17	1	0		
-20	6	1	2	0	1	0	22	3				

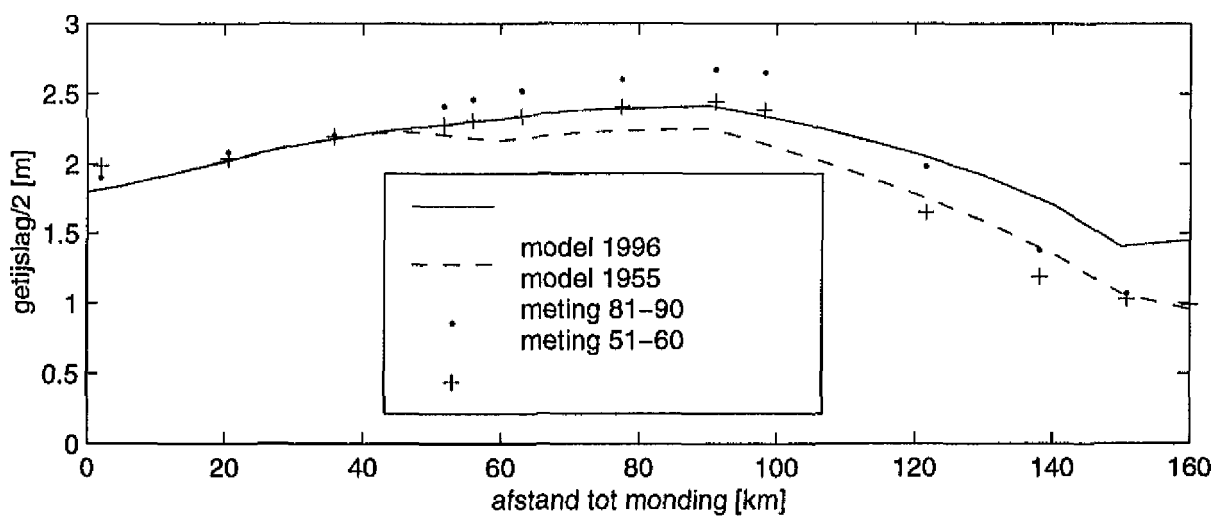
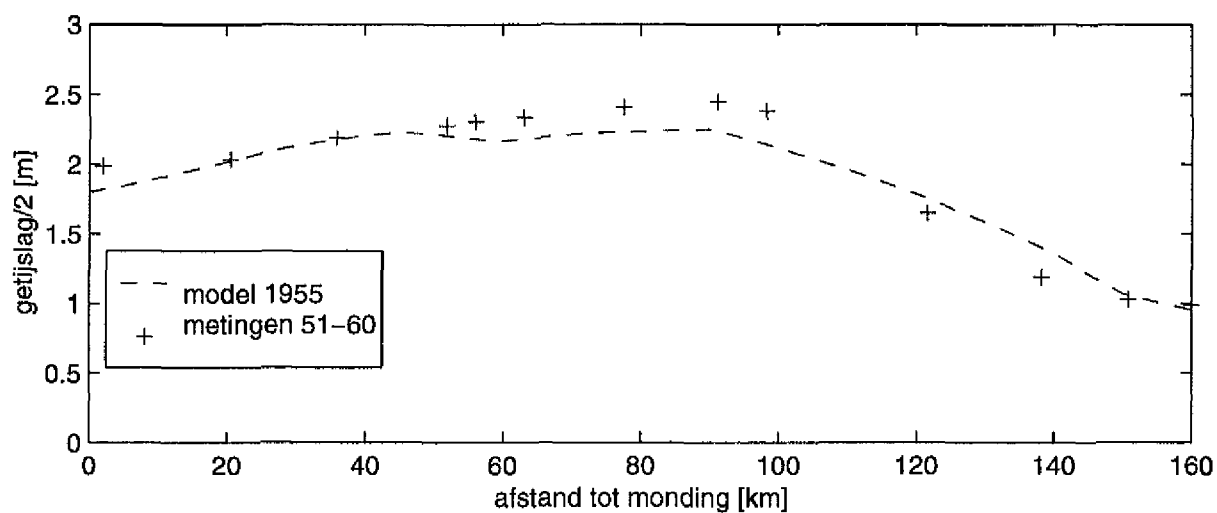
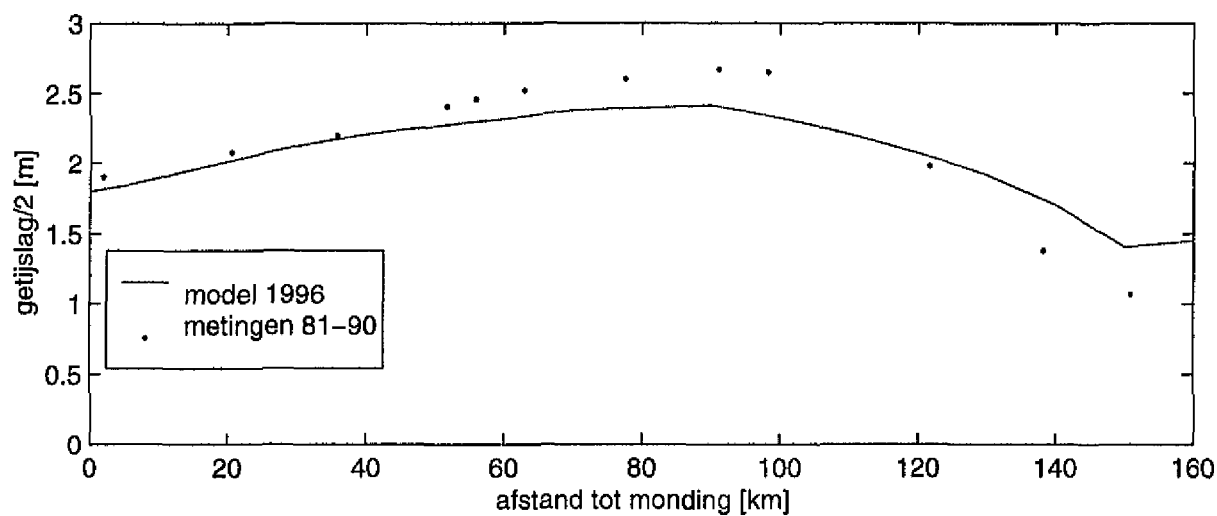
vak nr.->	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5		Gent
diepte t.o.v. N.A.P. in m	A 1992	B 1992	A 1992	B 1992	A 1992	B 1992	A 1992	B 1992	A 1992	B 1992	diepte t.o.v. N.A.P. in m	B 1992
2	10333	1455	5447	838	4502	563	2979	420	2957	416	>0.77	150
1.5	10064	1417	5334	821	4409	551	2921	411	2894	408	0.77	150
1	9811	1382	5226	804	4320	540	2881	406	2847	401	0	4.95
0.5	9531	1342	5106	786	4210	526	2822	397	2771	390	-2	0.05
0	9272	1306	5013	771	4136	517	2792	393	2740	386	-5	0
-0.5	9049	1275	4907	755	4049	506	2741	386	2681	378		
-1	8844	1246	4798	738	3981	498	2704	381	2641	372		
-1.5	8632	1216	4674	719	3899	487	2657	374	2599	366		
-2	8412	1185	4550	700	3774	472	2610	368	2562	361		
-2.5	8142	1147	4429	681	3680	460	2539	358	2438	343		
-5	6664	939	3844	591	3064	383	2227	314	2196	309		
-7.5	5592	788	3339	514	2599	325	1920	270	1874	264		
-10	4924	694	2884	444	2218	277	1594	225	1419	200		
-15	1994	281	1006	155	460	58	211	30	26	4		
-20	12	2	111	17	12	2	34	5				



Vertikaal en horizontaal getij voor
6 afstanden vanaf monding in model run cali5
waterniveau(stippellijn) en snelheid(getrokken lijn)

Z2644

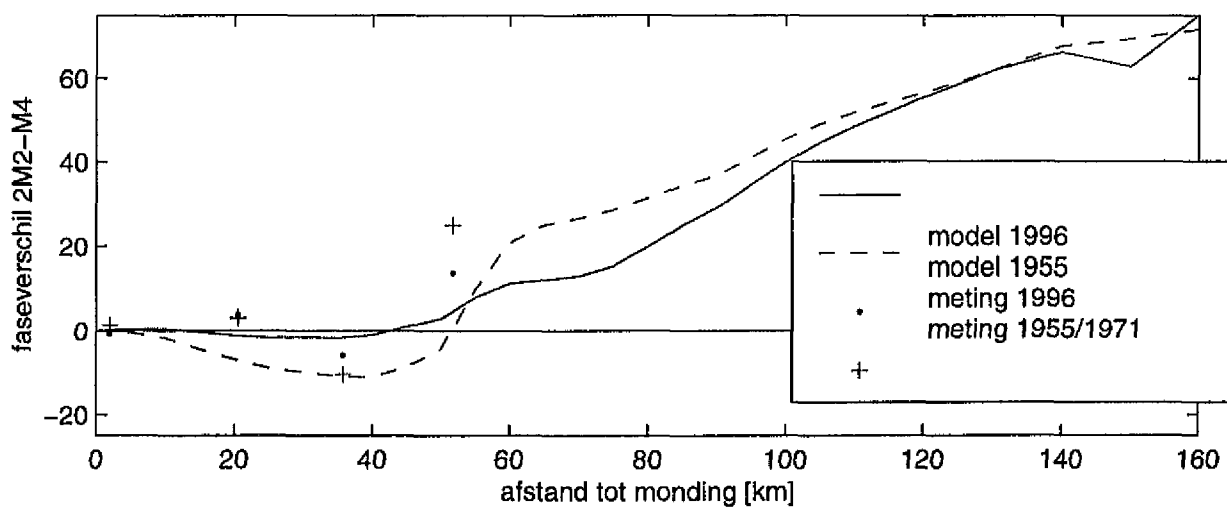
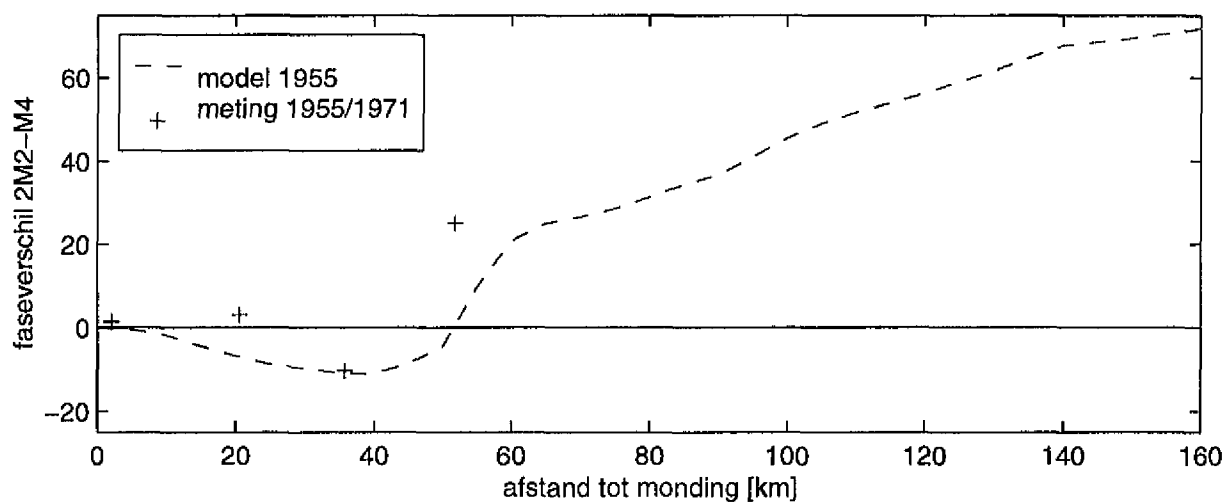
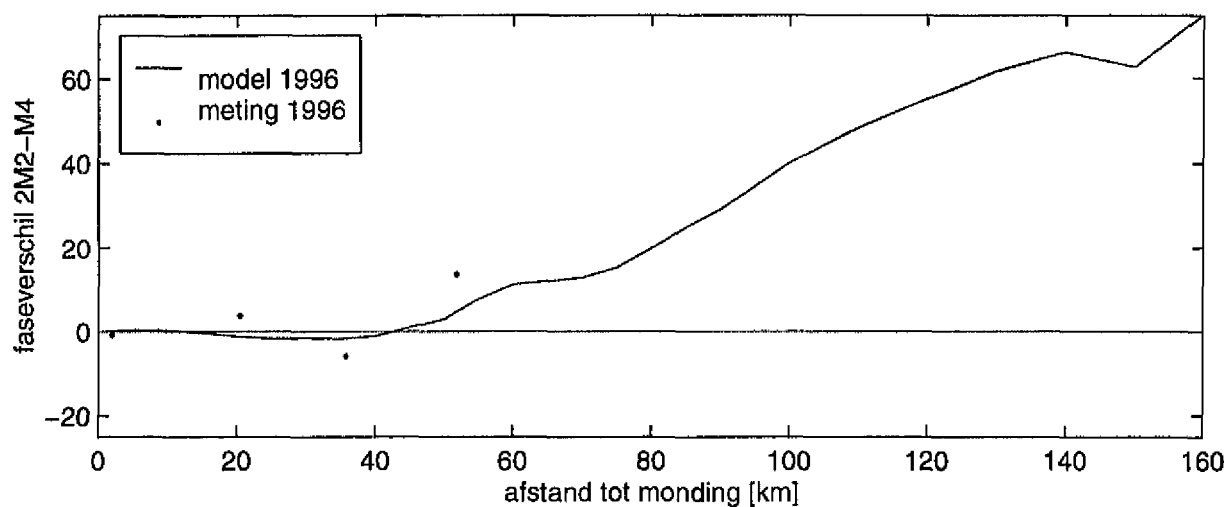
okt. 2000



vertikale getij
voor 1996 en 1955

Z2644

okt. 2000



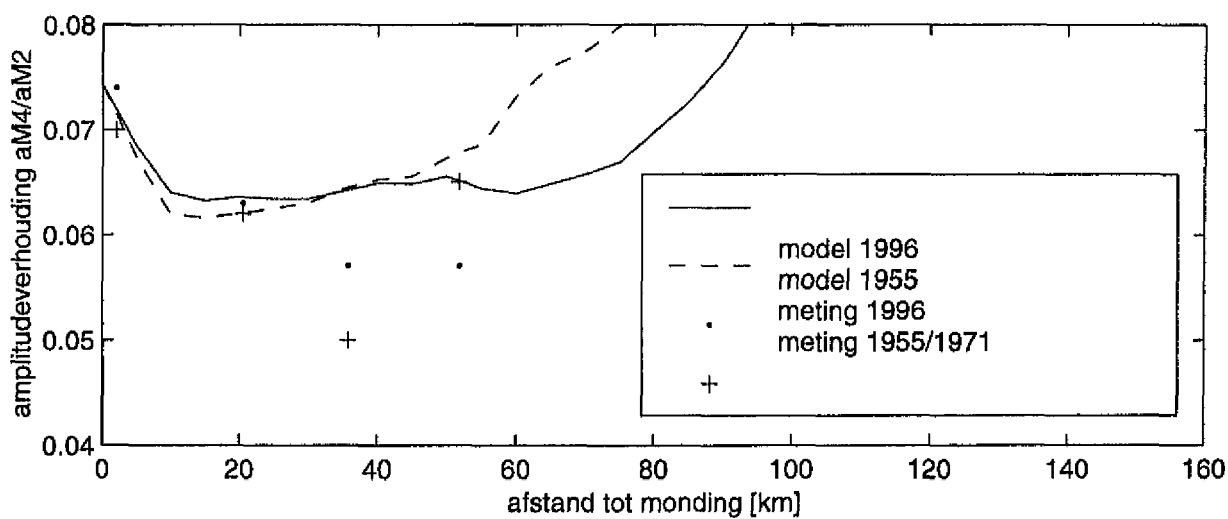
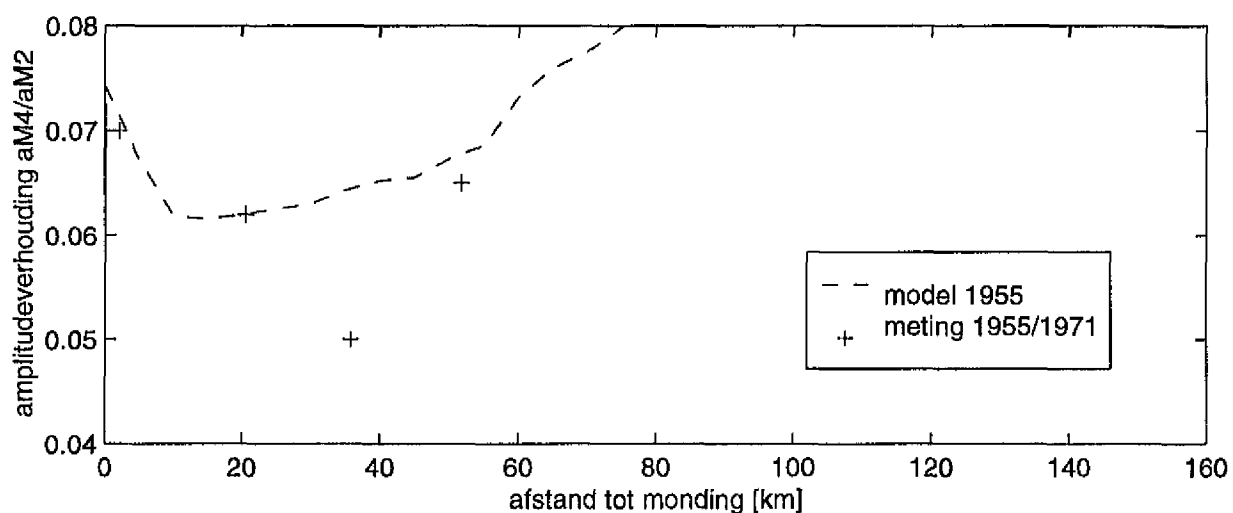
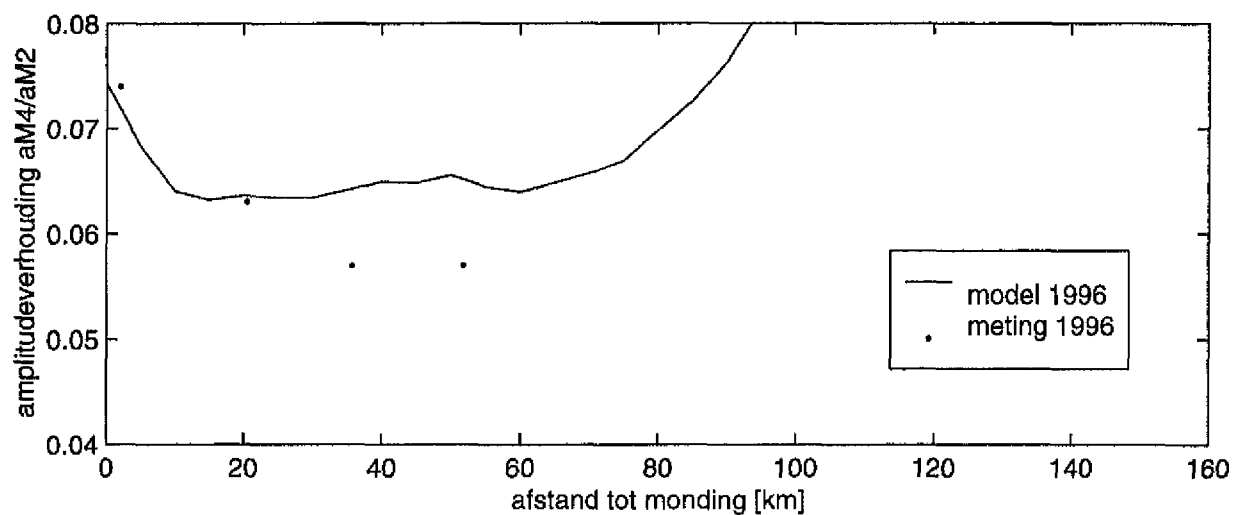
richting van verticale getijasymmetrie
voor 1996 en 1955

Z2644

okt. 2000

WL | DELFT HYDRAULICS

figuur C3



intensiteit van verticale getijasymmetrie
voor 1996 en 1955

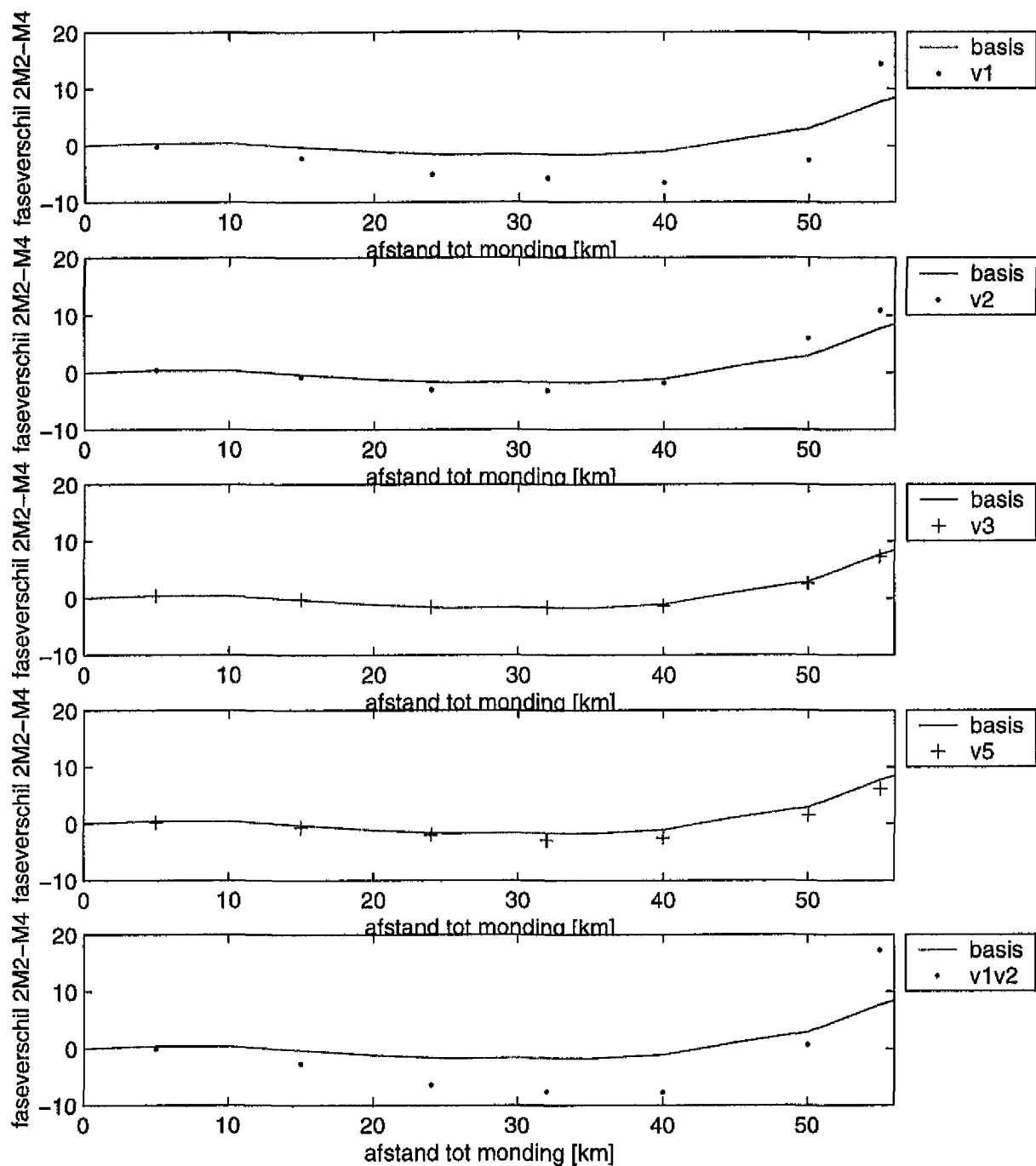
Z2644

okt. 2000

WL | DELFT HYDRAULICS

figuur C4

D Figuren hoofdstuk 6



vakken 1955 per vak
in basismodel geplaatst
v1: vak1 1955 geplaatst enz.

Z2644

okt. 2000

WL | DELFT HYDRAULICS

figuur D1