

Opdrachtgever:

RWS, Rijksinstituut voor Kust en Zee

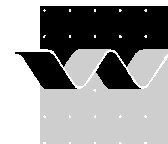
## ESTMORF berekeningen naar de invloed van ingrepen en natuurlijke forceringen op de zandhuishouding van Westerschelde en monding

Fase 2

C. Jeuken, Z.B. Wang, M. van Helvert.

Verslag

oktober 2002



OPDRACHTGEVER:	Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee Postbus 8093 4330 EA Middelburg						
TITEL:	Estmorf berekeningen naar de invloed van ingrepen en natuurlijke forceringen op de zandhuishouding van de Westerschelde en monding.						
<b>SAMENVATTING:</b> Integraal zandbeheer vereist een goed inzicht in de morfologische ontwikkelingen en de zandhuishouding van de Westerschelde en monding onder invloed van menselijke ingrepen (baggeren en storten) en natuurlijke processen en forceringen op verschillende ruimte- en tijdschalen. Naast andere onderzoeksinspanningen is voor het Schelde estuarium het ESTMORF-model ontwikkeld om de kennis op dit gebied te vergroten. Het algemene doel van de voorliggende studie bestaat uit het vergroten van de kennis over de zandhuishouding van de Westerschelde en de monding onder invloed van: a) de uitgevoerde (tweede verdieping) en een door Vlaanderen gewenste derde vaargeulverdieping, en b) de natuurlijke forceringen zeespiegelstijging en 18,6-jarige cyclus. Hiervoor zijn modelberekeningen uitgevoerd met het Estmorf model van de Westerschelde met mondingsgebied. Uit het onderzoek komen de volgende conclusies naar voren: <ul style="list-style-type: none"><li>• De tweede verdieping gaat gepaard met 1) het ontstaan van een zandexport vanuit de Westerschelde als gevolg van de veranderingen in het stort- en zandwinbeleid, 2) een toename van het zandtransport van het middendeel naar het oostelijk deel van de Westerschelde en 3) de afbraak van het intergetijdegebied in het oostelijk deel en een opbouw van deze gebieden in het midden en westelijk deel. De monding wordt gekenmerkt door sedimentatie.</li><li>• Een derde verdieping waarbij er volgens het stortcriterium wordt gestort gaat gepaard met kleinere sedimentuitwisseling tussen de deelgebieden in de Westerschelde (oostelijk, midden, westelijk deel) en de Westerschelde en monding. De resultaten geven aan dat de beheerder vooral met het stortbeleid invloed kan uitoefenen op de zandhuishouding.</li><li>• Zeespiegelstijging heeft een geringe invloed op de zandhuishouding. De stijging leidt tot een relatief verlies van het intergetijdegebied en versterkte zandexport van de Westerschelde naar het mondingsgebied.</li><li>• De 18,6-jarige cyclus in de getijbeweging veroorzaakt fluctuaties in de (water)inhoud en de import/export van de Westerschelde. De amplitude van de fluctuaties in de inhoud bedraagt ca 6-7 Mm<sup>3</sup>. Het faseverschil tussen de getijbeweging en deze inhoudsveranderingen is slechts 1 jaar. Deze modelresultaten komen, zeker qua orde van grootte, overeen met de veldwaarnemingen. Dit betekent dat de waargenomen fluctuaties in de zandbalans van de Westerschelde zeer waarschijnlijk het gevolg zijn van de 18,6-jarige cyclus. Voor het mondingsgebied is deze conclusie niet zo duidelijk te trekken doordat de modelresultaten en waarnemingen niet goed met elkaar te vergelijken zijn (verschillende gebiedsgrootte). De modelresultaten duiden op een fluctuatie in de zandbalans van het mondingsgebied van orde 60Mm<sup>3</sup>, waarbij de morfologie ongeveer 4 jaar naijlt op de waterbeweging (forcering).</li></ul>							
<b>REFERENTIES:</b>							
VER.	AUTEUR		DATUM	OPMERK.	REVIEW		GOEDKEURING
1.0	Jeuken e.a.		2 /10/02	fase 2	Z.B. Wang		
2.0	Jeuken e.a.		4 /10/02		Z.B. Wang		T. Schilperoort
PROJECTNUMMER		Z3246					
TREFWOORDEN:		zandbalans , morfologie Westerschelde, Estmorf, ingrepen, natuurlijke forceringen					
AANTAL BLADZIJDEN		36					
VERTROUWELIJK		<input type="checkbox"/> JA, tot (datum)			<input checked="" type="checkbox"/> NEE		
STATUS:		<input type="checkbox"/> VOORLOPIG		<input type="checkbox"/> CONCEPT		<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF	

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1</b>
1.1	Achtergrond .....	1
1.2	Probleem- en vraagstelling .....	1
1.3	Doel en aanpak .....	4
<b>2</b>	<b>Opzet modelberekeningen.....</b>	<b>6</b>
2.1	Inleiding .....	6
2.2	Berekeningen - invloed van menselijke ingrepen.....	6
2.3	Berekeningen natuurlijke forceringen .....	8
<b>3</b>	<b>Modelresultaten .....</b>	<b>10</b>
3.1	Inleiding .....	10
3.2	Berekeningen - invloed menselijke ingrepen.....	11
3.2.1	Tweede verdieping .....	11
3.2.2	Derde verdieping .....	15
3.3	Modelresultaten autonome ontwikkeling .....	21
3.3.1	Zeespiegelstijging .....	21
3.3.2	18,6-jarige getijcyclus .....	24
<b>4</b>	<b>Samenvatting, conclusies en aanbevelingen .....</b>	<b>31</b>
4.1	Samenvatting en conclusies .....	31
4.2	Aanbevelingen .....	35

## Bijlagen

<b>A</b>	<b>ESTMORF vakken .....</b>	<b>A-1</b>
----------	-----------------------------	------------

<b>B</b>	<b>Bagger en stortlocaties .....</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Aggregatie van resultaten .....</b>	<b>C-1</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

De voorliggende studie is uitgevoerd in het kader van de RWS-projecten ZEEKENNIS en KUST2005\*WSMOND. Deze projecten zijn onderdeel van de Raamovereenkomst tussen Directie Zeeland en het RIKZ. De projecten richten zich op de kennisontwikkeling op het gebied van hydrodynamica, morfologie, biologie en de samenhang daartussen ten behoeve van de ondersteuning van beleid en beheer.

Een belangrijk doel van beide projecten bestaat uit het genereren van kennis en middelen waarmee de zandinhoud en -verdeling, de zandhuishouding, van de Westerschelde en het mondingsgebied, onder invloed van natuurlijke processen en menselijke ingrepen, kan worden bepaald/voorspeld en gestuurd en/of gewaarborgd zodat de gebruiksfuncties veiligheid, toegankelijkheid en natuurlijkheid optimaal op elkaar kunnen worden afgestemd. Deze doelstelling hangt samen met het streven van Directie Zeeland naar een integraal zandbeheer. Integraal zandbeheer betekent dat getracht wordt alle kunstmatige zandverplaatsingen en/of onttrekkingen dusdanig uit te voeren dat, samen met de natuurlijke zandverplaatsingen, een zo optimaal mogelijke zandhuishouding kan worden verkregen in relatie tot de gebruiksfuncties en beleidsdoelstellingen.

De verdiepings- en onderhoudsvergunningen (stortvergunningen) ten behoeve van het vaargeulonderhoud en het zandwinbeleid zijn de belangrijkste stuurknoppen voor een integraal zandbeheer door Directie Zeeland. Voor het vaargeulonderhoud en de -verruiming moet in de vergunningen voor Vlaanderen worden aangegeven waar en hoeveel specie in de Westerschelde en het mondingsgebied kan worden gebaggerd en gestort. Daarnaast wordt in de Westerschelde zand gewonnen door de zandhandel en de overheid. Voor een periode van 5 tot 10 jaar wordt steeds een afweging gemaakt hoe zandwinning past in het beheer en de ontwikkeling van het estuarium op de lange termijn. Voor de keuze van zandwinlocaties en hoeveelheden wordt gezocht naar optimalisatie met het overige beheer en dan met name het vaargeulonderhoud.

## 1.2 Probleem- en vraagstelling

Integraal zandbeheer vereist een goed inzicht in de morfologische ontwikkelingen en de zandhuishouding van de Westerschelde en monding onder invloed van menselijke ingrepen (baggeren en storten) en natuurlijke processen en forceringen op verschillende ruimte- en tijdschalen. Naast andere onderzoeksinspanningen is voor het Schelde estuarium het ESTMORF-model ontwikkeld en opgezet om de kennis op dit gebied te vergroten.

## Menselijke ingrepen - baggeren en storten

In de Westerschelde en monding wordt sinds het begin van de vorige eeuw in toenemende mate gebaggerd en gestort ten behoeve van het onderhouden en verdiepen van de vaargeul naar Antwerpen. Na de eerste verruiming van de vaargeul in de periode 1971-1974, is tussen 1997 en 2000 een tweede verruiming van de vaargeul gerealiseerd. Naast deze reeds uitgevoerde ingrepen ten behoeve van de scheepvaart, zijn er plannen voor nieuwe ingrepen in de Westerschelde en monding voor de nabije toekomst:

- *Een derde vaargeulverruiming.* In Vlaanderen leeft de wens voor een derde vaargeulverruiming waarbij de vaargeul naar Antwerpen tot minimaal 12.2m getijonafhankelijk wordt verdiept (vergroting van de toegankelijkheid).
- *Verruimen van geulen in het mondingsgebied.* Het verdiepen van de geulen Scheur-Wielingen en de Walvischstaart in het mondingsgebied zodat de geul Oostgat onder de ZW-kust van Walcheren kan worden ontzien bij het vervoer van gevaarlijke stoffen (verhoging van de veiligheid).
- *Morfologisch baggeren in het mondingsgebied.* Morfologisch baggeren in de geul Oostgat waarbij langs de westelijke geulwand, langs het Bankje van Zoutelande, wordt gebaggerd en gestort/gesuppleerd langs de oostelijke geulwand.

Inzicht in de effecten van deze ingrepen op de zandhuishouding van de Westerschelde en de monding is nodig om integraal zandbeheer te kunnen vormgeven.

Diverse studies naar de *opgetreden* morfologische veranderingen als gevolg van de eerste verdieping en het daarop volgende onderhoudsbaggerwerk, laten zien dat baggeren en storten een grote invloed kunnen hebben op de zandhuishouding van het estuarium (zie bijvoorbeeld, Vroon e.a., 1997). Uit de meer recentere studie voor de Lange-termijn Visie voor het Schelde-estuarium, en het daarin ontwikkelde cellenconcept Westerschelde, blijkt bovendien dat met name het stortbeleid cruciaal is (RWS, 2001; Winterwerp e.a, 2000; Jeuken, 2001): voor een duurzaam behoud van het meergeulenstelsel in de Westerschelde kan niet meer dan orde 5-10% van de totale sedimenttransportcapaciteit in een individuele geul van een macro-cel worden gestort. Een langdurige overschrijding van deze capaciteit kan leiden tot een zichzelf versterkend sedimentatieproces in de geul waar gestort wordt, waardoor de instandhouding van het meergeulenstelsel wordt bedreigd.

In het kader van het MOVE-project van RWS is een ESTMORF-studie uitgevoerd (Van Helvert, 1999) naar de *verwachte* veranderingen in de zandhuishouding van de Westerschelde als gevolg van veranderingen in het stortbeleid (meer in het westen) en de tweede verdieping. De uitkomsten geven aan dat zowel de wijziging in de stortstrategie als het realiseren van de tweede verdieping gepaard zullen gaan met een omslag in de sedimenthuishouding, waarbij de Westerschelde, na decennia van beperkte zand-import, zand gaat exporeren. Het destijds gebruikte ESTMORF-model omvatte echter nog niet het mondingsgebied. Bovendien is er gebruik gemaakt van een verwacht vaargeulonderhoud van 14Mm<sup>3</sup>/jr. Uit de waarnemingen van de afgelopen jaren blijkt echter dat dit onderhoud beduidend lager is namelijk 10-11Mm<sup>3</sup>/jr. De vraag is in hoeverre de uitkomsten van het modelonderzoek van Van Helvert (1999) wijzigen wanneer gebruik wordt gemaakt van het gekalibreerde ESTMORF-model (Wang en Van Helevert, 2001; zie ook bijlage A) met het mondingsgebied en het werkelijk uitgevoerde onderhoudsbaggerwerk.

Voorgaande bevindingen zijn belangrijk vanuit het oogpunt van integraal zandbeheer en geven aanleiding tot meer specifieke vragen op het gebied van: de invloed van 1) de tweede verdieping, 2) de derde verdieping en 3) de voorgenomen ingrepen in het mondingsgebied op de zandhuishouding in de Westerschelde en het mondingsgebied. Concreet gaat het hierbij om de volgende vragen:

1. Wat zijn de gevolgen van de tweede verdieping en het veranderde stortbeleid voor de zandhuishouding van de Westerschelde en monding, wanneer wordt uitgegaan van het gerealiseerde vaargeulonderhoud en het ESTMORF-model van de Westerschelde inclusief de monding? In hoeverre verschillen de resultaten met het eerdere MOVE onderzoek (Van Helvert, 1999)?:
  - In hoeverre en op welke termijn verandert de zandinhoud en -uitwisseling in het oostelijk, midden en westelijk deel van de Westerschelde?
  - In hoeverre en op welke termijn verandert de zandinhoud en -uitwisseling tussen de Westerschelde en het mondingsgebied? Ontstaat er export van zand van de Westerschelde naar het mondingsgebied?
  - Zo ja, wordt dit sediment dan opgeslagen in het mondingsgebied of verdwijnt het naar de Noordzee?
2. Wat zijn de gevolgen van een derde verdieping, waarbij het stortcriterium volgens het cellenconcept wordt gehanteerd, voor de zandhuishouding van de Westerschelde en monding?
  - In hoeverre en op welke termijn verandert de zandinhoud en -uitwisseling in het oostelijk, midden en westelijk deel van de Westerschelde?
  - In hoeverre en op welke termijn verandert de zandinhoud en -uitwisseling tussen de Westerschelde en het mondingsgebied en tussen het mondingsgebied en de Noordzee?
3. Wat zijn de effecten van de voorgenomen ingrepen in het mondingsgebied (geulverdiepingen en morfologisch baggeren) op de zandhuishouding van het mondingsgebied en de Westerschelde?
  - In hoeverre verandert de debietverdeling door de geulen
  - Hoe lang blijft het doorstroomoppervlak van de geulen Oostgat, Walvischstaart en Wielingen-Scheur stabiel?
  - Hoe ontwikkelen zich de onderwateroevers van zuidwest Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen, in termen van erosie en sedimentatie?

### Natuurlijke processen en forceringen

Naast het baggeren en storten ten behoeve van de toegankelijkheid en de zandwinning worden de morfologische ontwikkelingen en de zandhuishouding van het estuarium ook beïnvloed door natuurlijke processen en forceringen. Met name de zeespiegelstijging en de 18.6-jarige cyclus in het getij worden van belang geacht.

Zeespiegelstijging veroorzaakt waarschijnlijk een zandbehoefte in het estuarium en het mondingsgebied. De consequenties voor de zandhuishouding en de morfologie van de geulen en platen zijn afhankelijk van de beschikbaarheid van sediment, de vorm van het

bekken en de mate van zeespiegelstijging. De potentiële effecten van zeespiegelstijging kunnen met ESTMORF worden bestudeerd. Dit is in voorgaande studies echter nog niet gebeurd.

Een tweede natuurlijke forcering is de 18,6-jarige cyclus in de getijbeweging. De resultaten van recente zandbalansstudies (De Jong, 1999) tonen een fluctuatie van  $20\text{Mm}^3$  (amplitude  $10\text{Mm}^3$ ) in de zand- en waterinhoud van de Westerschelde met een periode in de orde van 19 jaar. De vraag is in hoeverre deze fluctuatie het gevolg is van de 18,6-jarige cyclus. Ook de effecten van deze natuurlijke forcering kunnen met ESTMORF worden onderzocht.

Om integraal zandbeheer beter vorm te kunnen geven is een antwoord nodig op de volgende vragen:

4. Hoe en in welke mate beïnvloedt een zeespiegelstijging van 60cm/eeuw de zandhuishouding in de Westerschelde en monding?
  - In hoeverre en op welke termijn verandert de zandinhoud en -uitwisseling in het oostelijk, midden en westelijk deel van de Westerschelde?
  - In hoeverre en op welke termijn verandert de zandinhoud en -uitwisseling tussen de Westerschelde en het mondingsgebied en tussen het mondingsgebied en de Noordzee?
5. Hoe en in welke mate beïnvloedt de 18,6-jarige cyclus de zandhuishouding van de Westerschelde en monding?:
  - In hoeverre verandert de trend in de inhoudsveranderingen van Westerschelde en monding als gevolg van de 18,6-jarige cyclus?
  - In hoeverre en op welke wijze verandert de sedimentuitwisseling in de Westerschelde en tussen de Westerschelde en monding als gevolg van de 18,6-jarige cyclus?
  - Hoe groot zijn de amplitude en faseverschuiving in de inhoudsveranderingen als gevolg van de 18,6-jarige cyclus? Komen deze overeen met de waarnemingen?
6. Hoe groot (in relatieve zin) is de invloed van de zeespiegelstijging en de 18,6 jarige cyclus op de zandhuishouding van de Westerschelde in vergelijking tot het effect van de ingrepen?

Middels Overeenkomst RKZ-1141 heeft RIKZ WL | Delft Hydraulics gevraagd om een ESTMORF-model studie uit te voeren waarbij de bovengenoemde onderzoeksvragen worden beantwoord.

### 1.3 Doel en aanpak

Het algemene doel van de studie bestaat uit het vergroten van de kennis over de zandhuishouding van de Westerschelde en de monding onder invloed van:

- 1) de uitgevoerde (tweede verdieping) en voorgenomen ingrepen (derde vaargeulverdieping en verdieping geulen mondingsgebied), en;
- 2) de natuurlijke forceringen zeespiegelstijging en 18,6-jarige cyclus.

Concreet gaat het hierbij om het beantwoorden van de in paragraaf 1.2 genoemde zes onderzoeksvragen.

Voor het beantwoorden van de vragen wordt gebruik gemaakt van het gekalibreerde ESTMORF-model waarin de Westerschelde inclusief het mondingsgebied worden gemodelleerd (versie 3.0, Wang en van Helvert, 2001, bijlage A).

Het project is om praktische redenen in twee fasen opgedeeld:

- fase 1 richt zich op het beantwoorden van vraag 3.
- fase 2 richt zich op de overige 5 vragen.

De voorliggende studie is de rapportage van fase 2. De resultaten van fase 1 worden beschreven door Van Helvert en Wang (2002).

## 2 Opzet modelberekeningen

### 2.1 Inleiding

Het gekalibreerde ESTMORF model van de Westerschelde en monding (versie 3) is gebruikt voor het beantwoorden van de beheersvragen omtrent de invloed van menselijke ingrepen (verdiepingen) en natuurlijke forceringen (zeespiegelstijging en 18,6 jarige cyclus) op de zandhuishouding in de Westerschelde en monding. Om deze vragen te beantwoorden (zie paragraaf 1.2) worden in hoofdstuk 3 de resultaten van een zestal modelberekeningen gepresenteerd en bediscussieerd.

Dit hoofdstuk geeft een beknopt overzicht van de opzet van deze berekeningen. Aspecten die hierbij aan de orde komen zijn:

- de periode(n) waarover gerekend is;
- de bodemschematisatie die aan het begin van de berekening is gebruikt;
- de gebruikte bagger- en stortengegevens;
- de wijze van storten.

Alle modelberekeningen zijn gebaseerd op de hydrodynamische randvoorwaarden en parameterinstellingen zoals toegepast in de calibratie-studie van het ESTMORF model van de Westerschelde met monding (Wang en Van Helvert, 2001).

### 2.2 Berekeningen - invloed van menselijke ingrepen

#### Algemene opzet

Zoals aangegeven in hoofdstuk 1 richten de berekeningen naar de invloed van menselijk ingrepen zich op het bepalen van de veranderingen in de zandhuishouding van de Westerschelde en monding als gevolg van:

1. het vaargeulonderhoud na de tweede verdieping, en;
2. een mogelijke toekomstige derde vaargeulverdieping waarbij:
  - de *gehele* vaargeul wordt verdiept tot het niveau GLLWS-13.1m, en;
  - er gestort wordt volgens het stortcriterium zoals dat volgt uit het cellenconcept.

De belangrijkste algemene aspecten met betrekking tot de invoer en opzet van de berekeningen zijn samengevat in tabel 2.1.

Tabel 2.1 Invoer en opzet van de berekeningen 'tweede verdieping' en 'derde verdieping'.

<i>Aspect</i>	<i>tweede verdieping</i>	<i>derde verdieping</i>
Berekeningsperiode	1999-2030	1999-2030, verdeeld in 2 berekeningsperiodes: 1. 2004-2005, aanbrengen van de verdieping 2. 2006-2030, onderhouden van de verdieping
Begin bodem	Berekende 1998-bodem uit het voor de periode 1968-1998 gekalibreerde model.	conform tweede verdieping
Bagger- en stortgegevens	Voor de periode <sup>1, 2</sup> : <ul style="list-style-type: none"> <li>1999-2001 gemeten baggerhoeveelheden</li> <li>2002-2030 per locatie de gemiddelde gemeten waarde uit de periode 1999-2001.</li> </ul>	Voor de periode <sup>1, 2</sup> : <ul style="list-style-type: none"> <li>1999-2001 gemeten baggerhoeveelheden</li> <li>2002-2003, 2006-2030 per locatie de gemiddelde gemeten waarde uit de periode 1999-2001.</li> <li>2004-2005: 7 Mm<sup>3</sup>/jr <i>extra</i> (conform RWS-verwachting)</li> </ul>
Bagger- en stortlocaties	Bijlage B	Bijlage B en tabel 2.2
Wijze van baggeren en storten	Opgelegd volgens waarnemingen	Drie varianten zie tekst
Uitleveringspercentage Zandwinnen	10% ja, opgelegd volgens waarnemingen, vergl. met bagger- en stortgegevens.	10% ja, conform berekening tweede verdieping

<sup>1</sup> Voor het baggerbezwaar in het Belgische deel van de monding zijn geen gemeten waarden over de periode 1999 t/m 2001 bekend. Daarom is gebruik gemaakt van het waargenomen gemiddelde baggerbezwaar (per locatie) gedurende de periode 1990 t/m 1997.

<sup>2</sup> Uit de waargenomen bagger-, stort- en zandwinhoeveelheden blijkt dat in 1999 niet al het gebaggerde sediment is teruggestort in de Westerschelde. Het verschil van 1,07 Mln m<sup>3</sup> (13.333.779 – 12.262.027, afkomstig van de drempel van Vlissingen) is mogelijk gebruikt voor kustsuppletie langs het Nederlandse deel van de kust van Zeeuws Vlaanderen. In 2000 en 2001 is alles teruggestort.

Uit tabel 2.1 blijkt dat het grootste verschil in de opzet en invoer van de twee berekeningen betrekking heeft op: 1) het aanbrengen van de derde verdieping in de periode 2004/2005 en 2) de wijze van baggeren en storten tijdens de derde verdieping en het onderhoud daarna. Concreet worden drie derde verdiepingsvarianten doorgerekend:

- *Variant a*: in de periode 1999-2000 onderhoudsbaggerwerk zoals de berekening tweede verdieping, d.w.z. gebaseerd op de gemiddelde waarnemingen over de periode 1999-2001. al het zand uit het initiële verdiepingswerk (14Mm<sup>3</sup> extra in twee jaar tijd) wordt

gelijkelijk (extra) gestort op *alle* 13 stortlocaties in de Westerschelde, inclusief de nu niet in gebruik zijnde locaties in het oostelijk deel. Op iedere stortlocatie wordt per jaar  $0.54\text{Mm}^3$  extra gestort. Het initiële baggerwerk in de monding wordt gelijkelijk verdeeld over de zes stortlocaties in de monding ( $0.12\text{Mm}^3/\text{jaar}$  per locatie extra). Het onderhoudsbaggerwerk en het storten in de periode 2006-2030 is hetzelfde als in de berekening voor de tweede verdieping.

- *Variant b:* tot en met het verdiepen het zelfde als variant a. Echter, het onderhoudsbaggerwerk in de periode 2006-2030 is  $1\text{Mm}^3/\text{jaar}$  hoger. Dit extra te storten materiaal wordt gelijkelijk verdeeld over alle stortlocaties in de Westerschelde en monding.
- *Variant c:* tot aan het verdiepen (in 2004) gelijk aan varianten a en b. De baggerspecie die bij de verdieping vrij komt wordt in het kustvak Zeeuws-Vlaanderen gestort. Het onderhoudsbaggerwerk van ca  $10\text{Mm}^3/\text{jr}$  zoals waargenomen in de periode 1999-2001 wordt conform het stortcriterium uit het cellenconcept op de in gebruik zijnde 10 locaties gestort (zie tabel 2.2).

Tabel 2.2: Maximale stortcapaciteiten Westerschelde bij gegeven stortlocaties op basis van het cellenconcept (waarden ontleend aan Jeuken en Wang, 2001).

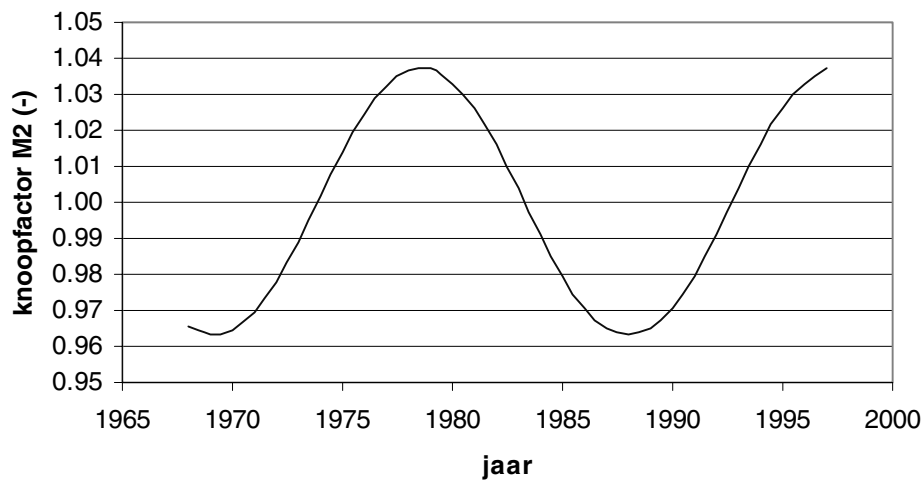
Stortlocatie		Code	Stortcapaciteit in [ $\text{m}^3/\text{jaar}$ ]	
oosten	Schaar van Waarde Eb & Vloed	Ss4	1.550.000	
	Plaat van Ossenis	Ss5	250.000	
	Totaal oosten			1.800.00
midden	Biezelingse Ham Eb & Vloed	Ss6	500.000	
	Gat van Ossenis Eb	Ss7	2.350.000	
	Gat van Ossenis Vloed	Ss8	2.350.000	
	Ebschaar Everingen	Ss9	900.000	
	Totaal midden			6.100.000
westen	Ellewoutsdijk Eb & Vloed	Ss10	625.000	
	Vloedschaar Everingen Eb	Ss11	312.500	
	Vloedschaar Everingen Vloed	Ss12	312.500	
	Schaar van de Spijkerplaat	Ss13	1.950.000	
	Totaal westen			3.200.000
Totaal Westerschelde				11.100.000

## 2.3 Berekeningen natuurlijke forceringen

In deze studie wordt gekeken naar de invloed van twee natuurlijke forceringen op de zandhuishouding van Westerschelde en monding (zie paragraaf 1.2): 1) zeespiegelstijging en 2) de 18,6-jarige cyclus in de getijbeweging.

Voor kwantificeren van de invloed van zeespiegelstijging wordt de berekening 'tweede verdieping' (zie tabel 2.1) herhaald maar dan met een zeespiegelstijging van 60 cm/eeuw. De berekening wordt over een periode van 38 jaar uitgevoerd. Dit betekent dat aan het eind de middenstand met 23 cm is gestegen.

Om de invloed van de 18,6-jarige cyclus te kwantifieren wordt de kalibratieberekening 1968-1998 van het ESTMORF 3.0 model (voor details zie Wang en Van Helvert, 2001) nog een keer uitgevoerd. In deze berekening worden de zeewaartse randvoorwaarden aangepast door de knoopfactoren voor de amplitudevariatie in de  $M_2$ -component ten gevolge van de 18,6-jarige cyclus, cyclisch op te leggen (zie Fig. 2.1).



Figuur 2.1: Tijdreeks van de opgelegde knoopfactoren (-) voor het beschrijven van de 18.6-jarige getijcyclus, zoals afgeleid uit waarnemingen over 1968-1980.

## 3 Modelresultaten

### 3.1 Inleiding

Ingrepen en natuurlijke forceringen beïnvloeden de zandhuishouding van de Westerschelde en monding. Om de beheersvragen op dit gebied (vragen 1, 2, 4, 5 en 6, zie paragraaf 1.2) te kunnen beantwoorden zijn berekeningen met het ESTMORF-model opgezet (zie hoofdstuk 2) en uitgevoerd. In dit hoofdstuk worden de resultaten van een zestal modelberekeningen gepresenteerd en bediscussieerd:

- Berekeningen met betrekking tot de invloed van ingrepen (paragraaf 3.2):
  1. Berekening van de tweede verdieping.
  2. Berekening met een derde verdieping; drie varianten a, b en c.
- Berekeningen met betrekking tot natuurlijke forceringen (paragraaf 3.3):
  3. Berekening naar het effect van zeespiegelstijging, waarbij de herberekening van de tweede verdieping als referentie wordt gebruikt.
  4. Berekening naar het effect van de 18,6-jarige cyclus in het getij, waarbij de kalibratieberekening over de periode 1968-1998, zoals beschreven in Wang en Van Helvert (2001) als referentie wordt gebruikt.

De beheersvragen richten zich op de veranderingen in de zandhuishouding in de Westerschelde en monding onder invloed van ingrepen en natuurlijke forceringen. Daarom worden de modelresultaten op drie elkaar aanvullende wijzen gepresenteerd:

- 1) Door middel van *tijdreeksen met de cumulatieve erosie- en sedimentatie* ten opzichte van NAP+2m in vier deelgebieden (Bijlage C): i) Mondingsgebied, ii) het westelijk deel van de Westerschelde, iii) het middendeel van de Westerschelde en iv) het oostelijk deel van de Westerschelde.
- 2) *Zandbalansen* ten opzichte van NAP+2m over de totale simulatieperioden, waarbij dezelfde vier deelgebieden als onder 1 worden onderscheiden. Onder zandbalans wordt verstaan de verandering in de *waterinhoud* van de diverse deelgebieden inclusief de daarmee gepaard gaande *zanduitwisseling* tussen deelgebieden. Bij het opstellen van de zandbalans wordt aangenomen dat er geen sedimentuitwisseling tussen de Westerschelde en Schelde optreedt.
- 3) *Overzichtstabellen* voor de gehele simulatieperiode met de totale hoeveelheden geërodeerd en gesedimenteerd zand in:
  - mondingsgebied
  - Westerschelde
  - westelijk, midden, en oostelijk deel Westerschelde
  - het kombergingsgebied tussen NAP-2m en NAP+2m in de monding, Westerschelde, westelijk, midden en oostelijk deel van de Westerschelde.
  - gebied van de i) vaargeul en de ii) overige deel in: de monding, Westerschelde, westelijk, midden en oostelijk deel van de Westerschelde.

- de import / export op de zeewaartse rand van ieder deelgebied (ook terug te vinden in de zandbalansen).

Met *totale* zandbalans (onder 2) en *totale* erosie en sedimentatie (onder 3) wordt bedoeld het verschil in waterinhoud tussen het laatste jaar van de berekening en het beginjaar, waarbij een negatief getal duidt op een afname van de waterinhoud door sedimentatie van zand in een vak. Een positief getal duidt op een toename van waterinhoud door erosie. Verder wordt er bij de zandbalansen en de overzichtstabellen, waar mogelijk, een onderscheid gemaakt tussen:

- De totale erosie (+) / sedimentatie (-)  $V_{tot,E}$  zoals berekend door ESTMORF.
- De erosie / sedimentatie ten gevolge van ingrepen,  $V_i$ .
- De zogenaamde natuurlijke erosie / sedimentatie,  $V_{nat} = V_{tot,E} - V_i$ . Dit is het door de waterbeweging aan (-) of afgevoerde (+) sediment.

De waarden voor  $V_{tot}$  en  $V_{nat}$  kunnen worden gebruikt voor het beoordelen/classificeren van de invloed van ingrepen op de zandhuishouding (zie bijv. Jeuken, 2001, Jeuken e.a., 2002).

## 3.2 Berekeningen - invloed menselijke ingrepen

### 3.2.1 Tweede verdieping

#### Resultaten

Figuur 3.1 toont de tijdreeksen met daarin de cumulatieve veranderingen in de waterinhoud ten gevolge van ingrepen,  $V_i$ , en de door ESTMORF berekende cumulatieve veranderingen in de totale waterinhoud  $V_{tot,E}$  voor de vier deelgebieden, monding, westelijk deel, midden deel en oostelijk deel. Figuur 3.2 toont de zand / waterbalans over de *totale* periode ten opzichte van NAP+2m. De belangrijkste kentallen over de totale periode zijn samengevat in tabel 3.1.

Beschouwen we de berekende erosie en sedimentatietendensen van groot naar klein dan kan het volgende worden geconstateerd met betrekking tot de veranderingen in de zandhuishouding (vraag 1, paragraaf 1.2):

Het mondingsgebied wordt gekenmerkt door een totale sedimentatie van  $30 \text{ Mm}^3$  (Fig. 3.1, 3.2). Deze hangt samen met de depositie van geërodeerd zand afkomstig uit de Westerschelde (zie hierna) en een import van zand vanuit de Noordzee (tabel 3.1 en Fig. 3.2). Aanvankelijk is de monding nog een sediment exporterend systeem (zie fig. 3.1). Echter vanaf 2000 verandert dit in een sediment import die eerst groot wordt (ca  $6 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ , Fig. 3.2), dan gedurende 10 jaar afvlakt om vervolgens in de laatste 15 jaar weer toe te nemen. De oorzaak van deze temporele variatie is niet helemaal duidelijk.

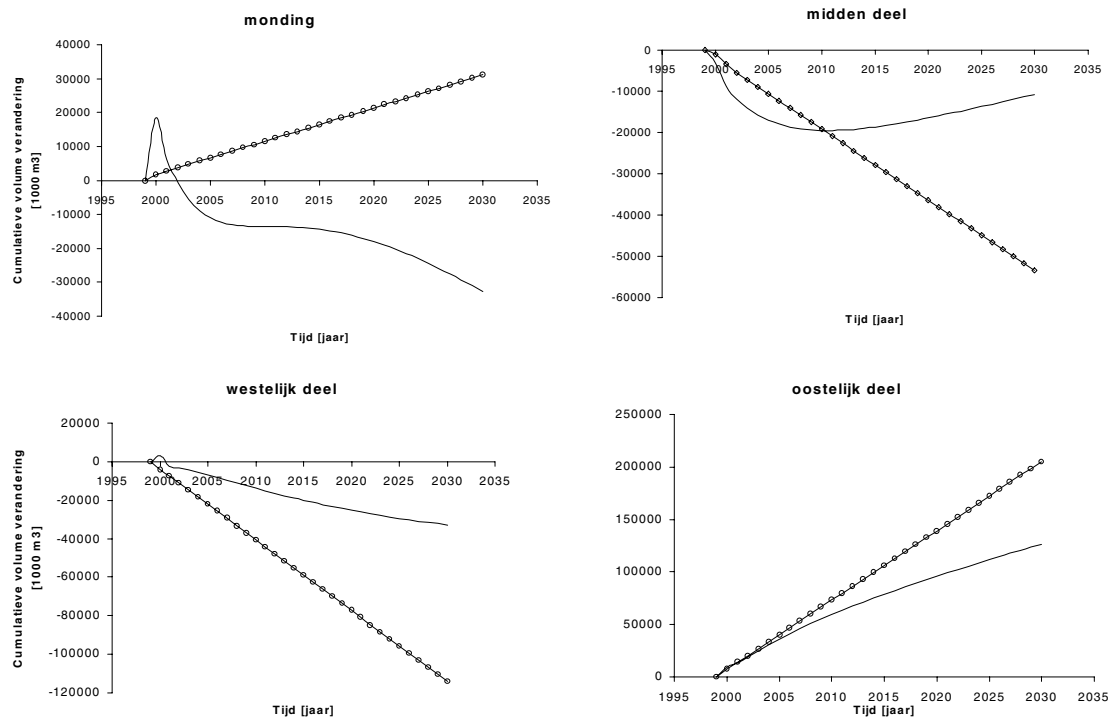


Fig. 3.1 Tijdreeksen van de cumulatieve totale inhoudsveranderingen  $V_{tot}$  (—) en de netto ingrepen  $V_i$  (-o-) als gevolg van de *tweede verdieping*.

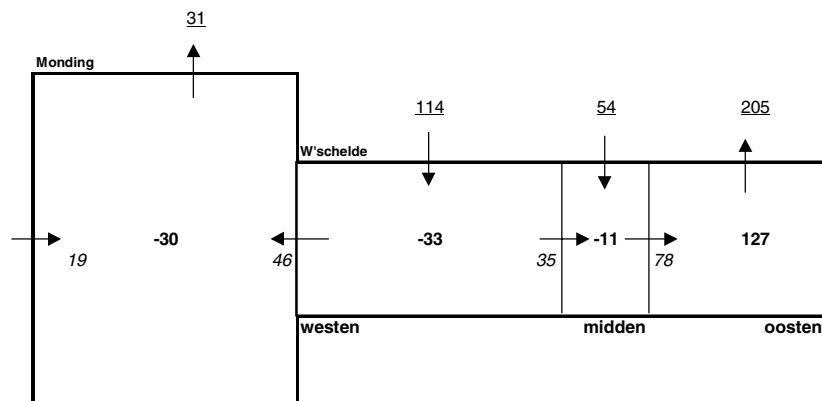


Fig. 3.2 Zand/waterbalans t.o.v. NAP+2m over de totale periode 1999-2030 na *tweede verdieping*.  $V_{tot,E}$  = vet, totale inhoudsverandering berekend door ESTMORF,  $V_i$  = onderstreept, totale netto ingreep. I/E = cursief, import/ export van zanduit tussen deelgebieden.

Tabel 3.1 Overzichtstabel berekening tweede verdieping. Totale verandering in waterinhoud (in  $\text{Mm}^3$ ) voor de periode 1999-2030.  $V_{\text{tot},E}$  = totale inhoudsverandering zoals berekend met ESTMORF, - = sedimentatie (afname waterinhoud), + = erosie (toename waterinhoud).  $V_i$  = totaal aan ingrepen, - = storten (afname waterinhoud), + = baggeren.  $V_{\text{nat}}$  = natuurlijke verandering in waterinhoud ( $V_{\text{tot},E} - V_i$ ), + = erosie, - = sedimentatie. I/E = import (-) of export (+) op de zeewaartse rand van het beschouwde gebied. Komberging = verandering in het watervolume tussen NAP+2m en NAP-2m, - = afname komberging / opbouw van platen, + = toename komberging / erosie van plaatvolume.

	Nap+2m			Nap-2m		
	$V_{\text{tot},E}$	$V_i$	$V_{\text{nat}}$	I/E	$V_{\text{tot},E}$	komberging
				zeerand		
<b>monding</b>	<b>-30</b>	<b>31</b>	<b>-61</b>	<b>-15</b>	<b>-29</b>	<b>-1</b>
<i>vaargeul</i>	3	221	-218		4	
<i>overig</i>	-33	-190	157		-33	
<b>Westerschelde</b>	<b>83</b>	<b>37</b>	<b>46</b>	<b>46</b>	<b>81</b>	<b>2</b>
<i>vaargeul</i>	120	276	-156		120	
<i>overig</i>	-37	-237	200		-39	
<b>west</b>	<b>-33</b>	<b>-114</b>	<b>81</b>	<b>46</b>	<b>-31</b>	<b>-2</b>
<i>vaargeul</i>	-4	51	-55		-3	
<i>overig</i>	-29	-165	136		-28	
<b>midden</b>	<b>-11</b>	<b>-54</b>	<b>43</b>	<b>-35</b>	<b>-8</b>	<b>-3</b>
<i>vaargeul</i>	21	19	2		22	
<i>overig</i>	-32	-73	41		-30	
<b>oost</b>	<b>127</b>	<b>205</b>	<b>-78</b>	<b>-78</b>	<b>120</b>	<b>7</b>
<i>vaargeul</i>	103	206	-103		101	
<i>overig</i>	24	1	23		19	

De Westerschelde wordt gekenmerkt door een totale erosie van  $83 \text{ Mm}^3$  (tabel 3.1). Deze erosie is het gevolg van enerzijds het netto winnen van  $37 \text{ Mm}^3$  zand en anderzijds het ontstaan van een export van  $46 \text{ Mm}^3$  zand naar het mondingsgebied (Fig. 3.2 en Tabel 3.1). Het geëxporteerde zand is voornamelijk afkomstig uit de geulen, hoewel ook de intergetijde gebieden tussen NAP+2m en NAP-2m een kleine  $2 \text{ Mm}^3$  zand leveren. Kijken we meer in detail naar de Westerschelde dan blijken er grote ruimtelijke verschillen op te treden (voor hoeveelheden zie tabel 3.1):

Het westelijk deel wordt gekenmerkt door een sedimentatie. De grootste sedimentatie vindt plaats in het nevengeulengebied (overig in tabel 3.1) onder invloed van storten. Een substantieel deel van het gestorte zand erodeert weer en verdwijnt direct of indirect richting middendeel en mondingsgebied. Het storten heeft wel een sturende invloed op de ontwikkeling van het nevengeulengebied ( $V_{\text{tot}}$  en  $V_{\text{nat}}$  zijn tegengesteld). De vaargeul wordt gekenmerkt door een geringe totale sedimentatie ( $V_{\text{tot},E}$ ) ondanks het baggerwerk. Het licht afvlakken van het algehele sedimentatieproces in het westelijk deel na ca. 20 jaar (fig. 3.2) suggereert het ontstaan van een nieuwe evenwichtssituatie.

Ook het midden deel sedimenteert in de beschouwde periode, waarschijnlijk als gevolg van het continue en omvangrijke storten. Vooral in de ebgeul Middelgat is sprake van een sturende invloed ('overig' in tabel 3.1). Een groot deel van het gestorte materiaal wordt waarschijnlijk weer door de getijstroom geërodeerd en richting het oostelijk deel getransporteerd. Figuur 3.1 toont echter een trendbreuk in het sedimentatieproces: tot ongeveer 2010 is er sprake van een netto sedimentatie in het middendeel tot maximaal

20Mm<sup>3</sup> in totaal. Tussen 2010 en 2030 neemt de waterinhoud van het middendeel weer toe (=erosie) met ongeveer 9Mm<sup>3</sup>. Waar deze erosie precies plaatsvindt is op basis van de huidige resultaten niet te zeggen. De intergetijdegebieden bouwen licht op (tabel 3.1).

Het oostelijk deel erodeert onder invloed van het netto baggeren (zie Fig. 3.1). De erosiesnelheid vlak na ca 15 jaar iets af. Met name het gebied van de vaargeul verruimt. De totale erosie in het oostelijk deel is echter beduidend kleiner is dan de netto baggerinspanning (tabel 3.1). Er is sprake van een aanzienlijke natuurlijke sedimentatie (tabel 3.1) waarbij er zand van het middendeel naar het oostelijk deel wordt getransporteerd (Fig. 3.2). Opvallend zijn verder: i) de toename van de komberging tussen NAP+2m en NAP-2m (tabel 3.1) wat duidt op een erosie van het intergetijdegebied en ii) de erosie in het nevengeulen gebied (overig in tabel 3.1).

## Discussie

Zoals aangegeven in paragraaf 1.2 is de tweede verdieping al een keer eerder met ESTMORF doorerekend in het kader van het RWS MOVE-project (Van Helvert, 1999). De modelopzet van de huidige en destijds uitgevoerde berekening verschilt echter op drie punten: i) het ESTMORF model zoals gebruikt in de huidige studie omvat het mondingsgebied, ii) de berekening voor de huidige studie start met de berekende modelbodem van 1998 en niet met die van 1993 (hangt samen met punt i), en iii) het baggerbezwaar voor het vaargeulonderhoud is gebaseerd op waarnemingen over de periode 1999-2001 in plaats van het destijds verwachte baggerbezwaar van 14 Mm<sup>3</sup>/jr (RWS, 1997) wat zo'n 3-4 Mm<sup>3</sup>/jr hoger is dan de waargenomen baggerhoeveelheden. Vraag is dan ook in hoeverre de bevindingen van de huidige studie met betrekking tot veranderingen in de zandhuishouding verschillen met de resultaten uit de eerdere MOVE-studie. Om deze vraag te kunnen beantwoorden zijn de, in beide studies opgestelde, zandbalansen met elkaar vergeleken. De vergelijking is samengevat in Tabel 3.2. Omdat de simulatie periode van beide berekeningen verschillend is (1994-2050 en 1999-2030) zijn de inhoudsveranderingen en sediment-uitwisselingen tussen de diverse deelgebieden uitgedrukt in Mm<sup>3</sup>/jr.

Tabel 3.2 Vergelijking van de resultaten van deze studie (vet gedrukte getallen) en de MOVE-studie (Van Helvert, 1999) met betrekking tot de veranderingen in de zandhuishouding van de Westerschelde volgend op de tweede verdieping. Voor verklaring van symbolen zie tabel 3.2. Hoeveelheden in Mm<sup>3</sup>/jr.

	Nap+2m V <sub>tot, E</sub>	V <sub>i</sub>	V <sub>nat</sub>	I/E zeerand	Nap-2m V <sub>tot, E</sub>	kom-berging
Westerschelde	6.3	4.3	1.9	1.9	6.2	0.02
	<b>2.8</b>	<b>1.2</b>	<b>1.5</b>	<b>1.5</b>	<b>2.7</b>	<b>0.07</b>
westelijk deel	0.2	-3.8	4.0	1.9	0.3	-0.04
	<b>-1.1</b>	<b>-3.8</b>	<b>2.7</b>	<b>1.5</b>	<b>-1.0</b>	<b>-0.07</b>
midden deel	0.9	-1.5	2.5	-2.1	1.0	-0.02
	<b>-0.4</b>	<b>-1.8</b>	<b>1.4</b>	<b>-1.2</b>	<b>-0.3</b>	<b>-0.10</b>
oostelijk deel	5.1	9.6	-4.5	-4.5	5.0	0.07
	<b>4.2</b>	<b>6.8</b>	<b>-2.6</b>	<b>-2.6</b>	<b>4.0</b>	<b>0.23</b>

Op basis van tabel 3.2 kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De richting van de sedimentuitwisseling tussen de verschillende deelgebieden is in beide studies hetzelfde. De absolute grootte van deze uitwisseling is in de huidige studie kleiner dan in de Move-studie (Van Helvert, 1999). De verschillen nemen in zeewaartse richting af (van een factor 1.7 naar een factor 1.3). Deze verschillen worden waarschijnlijk veroorzaakt door de grotere opgelegde netto onttrekking van zand ( $V_i$ ) in met name het oostelijk deel van de Westerschelde in de MOVE-studie. Opgemerkt wordt dat opgelegde  $V_i$  voor de Westerschelde als geheel in de MOVE-studie wel opvallend groot is:  $4.3 \text{ Mm}^3/\text{jr}$  netto onttrekken (zandwinnen).
- Ook de ontwikkeling van de komberging (intergetijdegebieden) tussen NAP-2m en NAP+2m komt kwalitatief overeen. De berekende afbraak in het oosten en de opbouw in het midden en westelijk deel is volgens de huidige studie wel een factor 2-5 groter.
- Het teken van de in deze studie berekende totale inhoudsverandering  $V_{tot,E}$  in het midden en westelijk deel van de Westerschelde is tegen gesteld aan de resultaten uit de MOVE-studie: in deze studie vindt in deze gebieden sedimentatie plaats, terwijl in de resultaten van de MOVE-studie erosie is berekend.

Dus de belangrijkste conclusies met betrekking tot: 1) de export van zand vanuit de Westerschelde naar de monding, 2) het eroderen van de platen in het oosten en 3) de sedimentuitwisseling van het midden deel naar het oostelijk deel, zijn in beide studies hetzelfde.

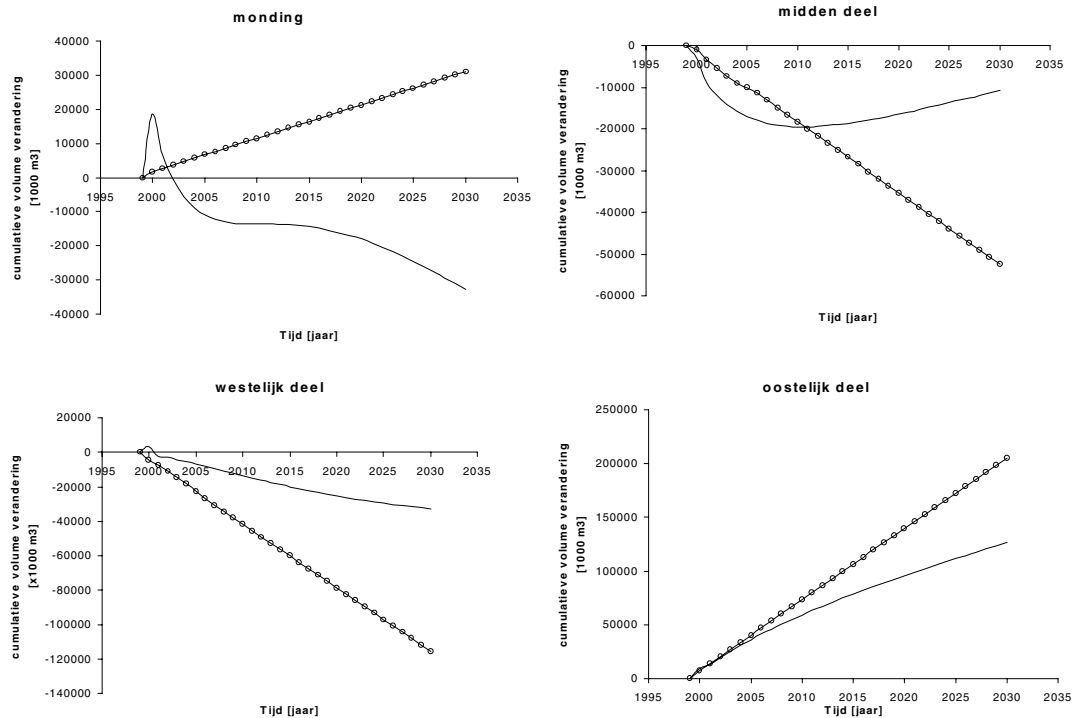
### 3.2.2 Derde verdieping

Zoals aangegeven in hoofdstuk 2 zijn er drie varianten van de derde verdieping doorgerekend, waarbij in alle drie de gevallen de verdieping is aangebracht in de periode 2004-2005 (tabel 3.3 zie ook hoofdstuk 2):

Tabel 3.3 Bagger- en stortkenmerken van de drie verdieppingsvarianten.

	variant a	variant b	variant c
het storten van de initiële baggerhoeveelheden verdieping	op alle 13 stortlocaties in de Westerschelde gelijkmatig verdeeld	conform a	gestort in kustvak Zeeuws Vlaanderen
baggerbezwaar onderhoud 2006-2030	conform som tweede verdieping	$1 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ extra t.o.v. variant a, gelijkmatig verdeeld over de 10 reguliere stortlocaties	baggerhoeveelheden conform tweede verdieping (en variant a). Storten volgens stortcriterium cellenconcept

De resultaten van de drie berekeningen zijn samengevat in de figuren 3.3 t/m 3.8 en tabel 3.4. Deze worden in de navolgende alinea integraal besproken. Hierbij worden ook de resultaten van de berekening 'tweede verdieping' betrokken (vorige paragraaf).



Figuur 3.3 Tijdreeksen van de cumulatieve totale inhoudsveranderingen  $V_{tot}$  (—) en de netto ingrepen  $V_i$  (o) als gevolg van de derde verdieping, variant a.

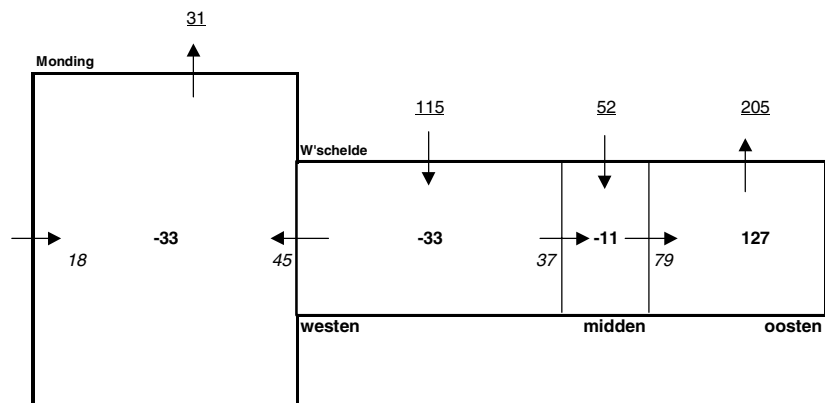
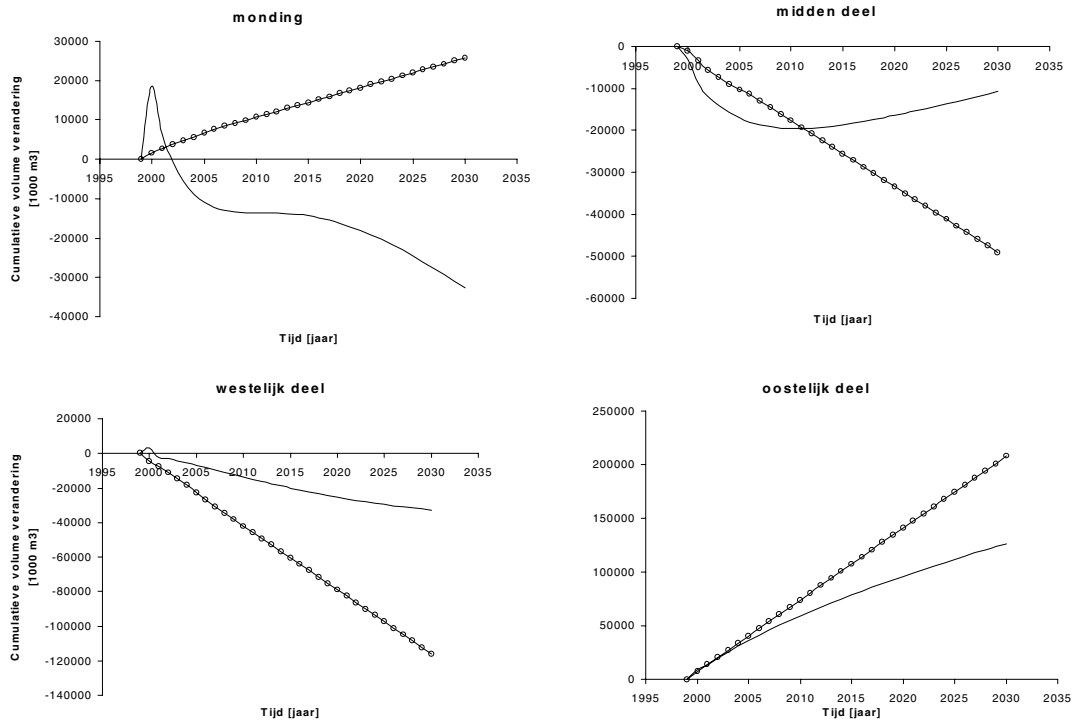


Fig. 3.4 Zand/waterbalans t.o.v. NAP+2m over de totale periode 1999-2030 na derde verdieping, variant a.  $V_{tot,E}$  = vet, totale inhoudsverandering berekend door ESTMORF,  $V_i$  = onderstreept, totale netto ingreep. I/E = cursief, import/ export van zanduit tussen deelgebieden.



Figuur 3.5 Tijdreeksen van de cumulatieve totale inhoudsveranderingen  $V_{\text{tot}}$  (—) en de netto ingrepen  $V_i$  (-o-) als gevolg van de derde verdieping, variant b.

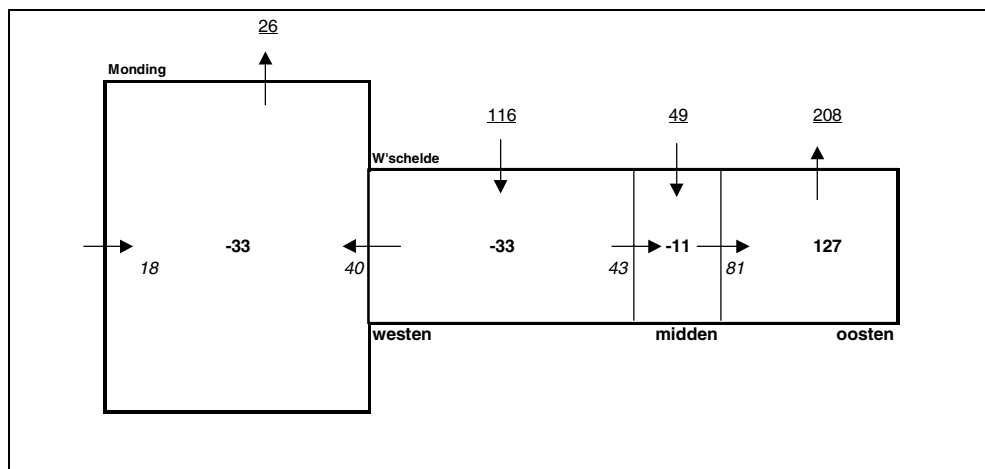
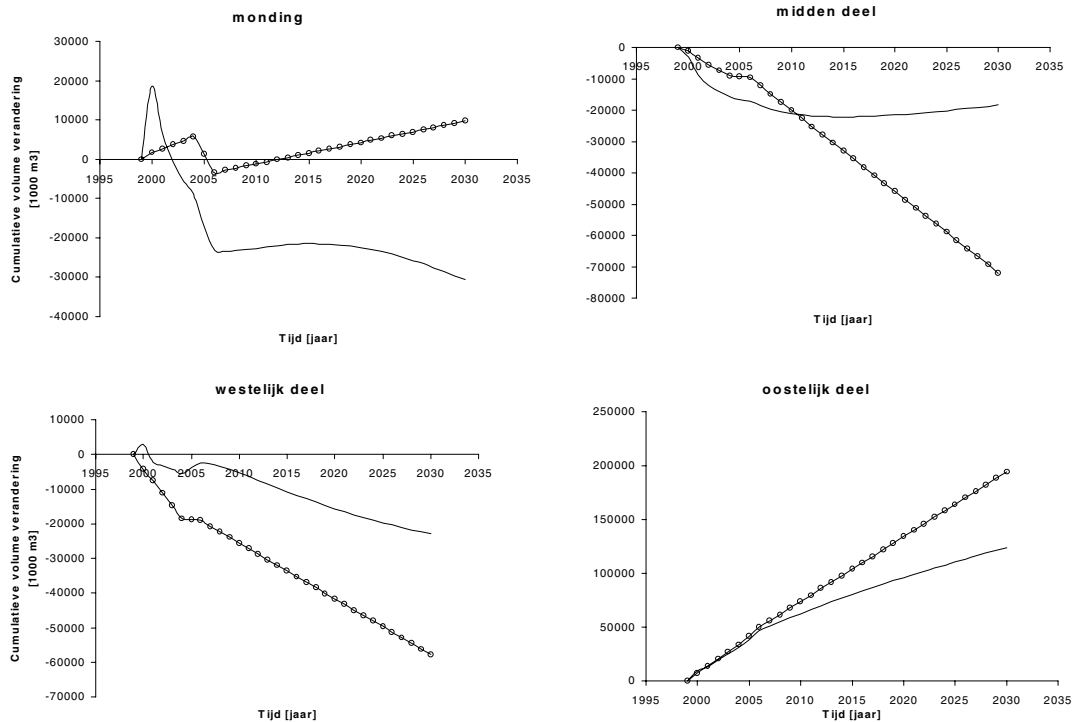


Fig. 3.6 Zand/waterbalans t.o.v. NAP+2m over de totale periode 1999-2030 na derde verdieping, variant b.  $V_{\text{tot,E}}$  = vet, totale inhoudsverandering berekend door ESTMORF,  $V_i$  = onderstreept, totale netto ingreep. I/E = cursief, import/ export van zanduit tussen deelgebieden.



Figuur 3.7 Tijdreeksen van de cumulatieve totale inhoudsveranderingen  $V_{\text{tot}}$  (—) en de netto ingrepen  $V_i$  (---) als gevolg van de derde verdieping, variant c.

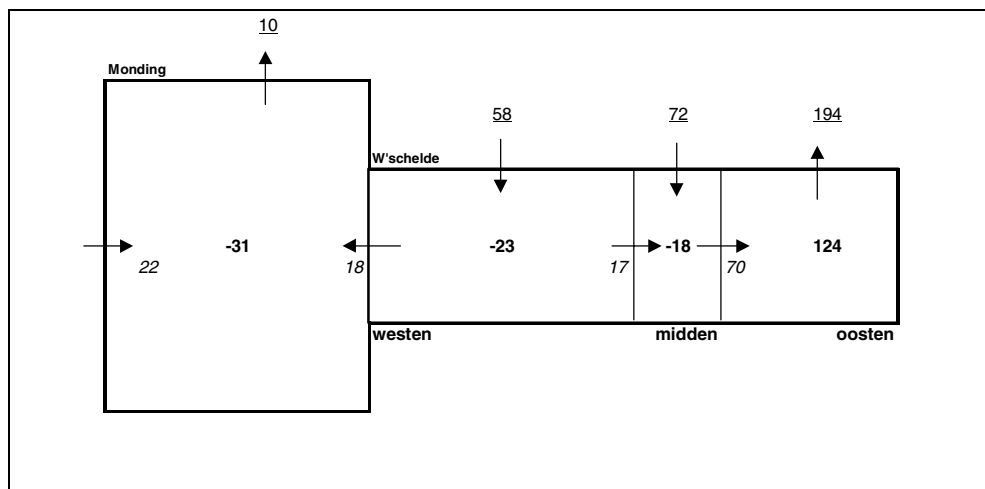


Fig. 3.8 Zand/waterbalans t.o.v. NAP+2m over de totale periode 1999-2030 na derde verdieping, variant c.  $V_{\text{tot,E}}$  = vet, totale inhoudsverandering berekend door ESTMORF,  $V_i$  = onderstreept, totale netto ingreep. I/E = cursief, import/ export van zanduit tussen deelgebieden.

Tabel 3.4 Overzichtstabel berekening varianten derde verdieping. Totale verandering in waterinhoud (in Mm<sup>3</sup>) voor de periode 1999-2030. Voor verklaring symbolen zie tabel 3.1.

	Nap+2m Vtot, E	Vi	Vnat	NAP-2m I	Vtot, E	komberging
<b>Variant a</b>						
<b>monding</b>	<b>-33</b>	<b>31</b>	<b>-64</b>	<b>-18</b>	<b>-33</b>	<b>-0.1</b>
vaargeul	3	221	-218			
overig	-33	-190	157			
<b>Westerschelde</b>	<b>83</b>	<b>38</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>80</b>	<b>3.3</b>
vaargeul	120	289	-169			
overig	-37	-247	211			
<b>west</b>	<b>-33</b>	<b>-116</b>	<b>83</b>	<b>45</b>	<b>-32</b>	<b>-1.2</b>
vaargeul	-4	53	-57			
overig	-29	-169	140			
<b>midden</b>	<b>-11</b>	<b>-52</b>	<b>42</b>	<b>-37</b>	<b>-9</b>	<b>-1.9</b>
vaargeul	21	24	-4			
overig	-32	-73	41			
<b>oost</b>	<b>127</b>	<b>206</b>	<b>-79</b>	<b>-79</b>	<b>120</b>	<b>6.4</b>
vaargeul	103	211	-108			
overig	24	-5	29			
<b>Variant b</b>						
<b>monding</b>	<b>-33</b>	<b>26</b>	<b>-59</b>	<b>-19</b>	<b>-33</b>	<b>-0.1</b>
vaargeul	3	221	-218			
overig	-33	-190	157			
<b>Westerschelde</b>	<b>83</b>	<b>43</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>80</b>	<b>3.3</b>
vaargeul	120	311	-191			
overig	-37	-258	222			
<b>west</b>	<b>-33</b>	<b>-116</b>	<b>83</b>	<b>40</b>	<b>-32</b>	<b>-1.2</b>
vaargeul	-4	59	-63			
overig	-29	-175	146			
<b>midden</b>	<b>-11</b>	<b>-49</b>	<b>38</b>	<b>-43</b>	<b>-9</b>	<b>-1.9</b>
vaargeul	21	33	-12			
overig	-32	-73	41			
<b>oost</b>	<b>127</b>	<b>208</b>	<b>-81</b>	<b>-81</b>	<b>120</b>	<b>6.4</b>
vaargeul	103	219	-116			
overig	24	-11	35			
<b>variant c</b>						
<b>monding</b>	<b>-31</b>	<b>10</b>	<b>-40</b>	<b>-22</b>	<b>-31</b>	<b>-0.1</b>
vaargeul	3	205	-202			
overig	-33	-190	157			
<b>Westerschelde</b>	<b>83</b>	<b>65</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>80</b>	<b>2.7</b>
vaargeul	109	228	-119			
overig	-26	-163	137			
<b>west</b>	<b>-23</b>	<b>-58</b>	<b>35</b>	<b>18</b>	<b>-22</b>	<b>-1.0</b>
vaargeul	-3	59	-62			
overig	-20	-117	97			
<b>midden</b>	<b>-18</b>	<b>-72</b>	<b>54</b>	<b>-17</b>	<b>-16</b>	<b>-2.4</b>
vaargeul	10	-47	57			
overig	-28	-25	-4			
<b>oost</b>	<b>124</b>	<b>194</b>	<b>-70</b>	<b>-70</b>	<b>118</b>	<b>6.2</b>
vaargeul	102	216	-114			
overig	22	-22	44			

Beschouwen we de resultaten van groot naar klein, dan vallen de volgende zaken op:

De verschillen tussen de verdiepingsvarianten a en b en de tweede verdieping zijn klein. Afgezien van een kleine 'wiebel' tijdens de initiële verdieping vertonen de tijdreeksen met de cumulatieve inhoudsveranderingen hetzelfde beeld als de resultaten voor de tweede verdieping. Dit beeld wordt bevestigd door de zandbalansen over de totale periode 1999-2030: de berekende sedimentuitwisseling tussen de diverse deelgebieden verschilt maximaal  $8\text{Mm}^3$  (~20%). De verschillen in de totale inhoudsveranderingen  $V_{\text{tot,E}}$  zijn nog kleiner. Ook op de kleinere schaal van de hoofd en nevengeulen verandert het beeld niet duidelijk (Tabel 3.4): vooral de netto ingrepen  $V_i$  per geul zijn iets groter.

Variant c veroorzaakt de grootste veranderingen op de schaal van de vier deelgebieden wanneer een vergelijking wordt gemaakt met de tweede verdieping (en de varianten a en b):

- de 'natuurlijke' export vanuit de Westerschelde is beduidend lager  $18\text{Mm}^3$  tegen  $40\text{--}46\text{Mm}^3$  in de andere berekeningen (vergl. Fig. 3.2,3.3, 3.5,3.7; tabel 3.4). Hierbij moet echter worden opgemerkt dat er in variant c een artificiële export van  $14\text{Mm}^3$  is omdat alle baggerspecie uit de initiële verdieping van de vaargeul in de Westerschelde in het mondingsgebied is gestort (zie ook fig. 3.7). Maar dan nog is de totale export ( $32\text{Mm}^3$ ) duidelijk kleiner (20-30%) dan in de andere varianten.
- De totale sedimentatie is in het westelijk deel is kleiner (35%) en in het midden deel groter (60%). Het zandtransport van west naar midden is meer dan gehalveerd. Ook het transport van midden naar oost is iets kleiner geworden (zie zandbalansfiguren en tabel 3.4).
- De ontwikkelingen in de komberging zijn kwalitatief hetzelfde als in de andere verdiepingsberekeningen.
- Tot slot nog twee bevindingen op het niveau van de nevengeulen: 1) in het middendeel wordt in variant c evenwichtiger gestort en gebaggerd;  $V_{\text{tot,E}}$  en  $V_{\text{nat}}$  hebben in zowel de vaargeul als de neven/overige geul hetzelfde teken. 2) De veranderingen in het nevengeulengebied (overig) in het oostelijk deel laat zien dat de totale erosie van dit gebied nauwelijks verandert wanneer de netto storthoeveelheden worden opgevoerd van praktisch geen ingreep (tweede verdieping) tot  $22\text{Mm}^3$  netto storten. Dit betekent een kritische netto storthoeveelheid van ca.  $0.7\text{Mm}^3/\text{jr}$ . Dit getal komt aardig overeen met het theoretische stortcriterium uit het cellenconcept en de veldwaarnemingen ( $0.8\text{--}0.9\text{Mm}^3$ , Jeuken, 2001).

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat op de beschouwde ruimteschalen de verdiepingsvarianten a en b weinig veranderingen in de zandhuishouding veroorzaken ten opzichte van de tweede verdieping. Variant c, waarbij er volgens het stortcriterium wordt gestort, gaat gepaard met de grootste veranderingen in de zandhuishouding. Vooral de zanduitwisseling tussen de diverse deelgebieden wordt kleiner. Verder wordt er met het storten volgens het stortcriterium meer op de ontwikkeling van de geulen ingespeeld; de totale ( $V_{\text{tot}}$ ) en 'natuurlijke' inhoudsveranderingen ( $V_{\text{nat}}$ ) liggen dicht bij elkaar. Deze resultaten geven aan dat de beheerder met vooral het stortbeleid invloed kan uitoefenen op de veranderingen in de zandhuishouding.

### 3.3 Modelresultaten autonome ontwikkeling

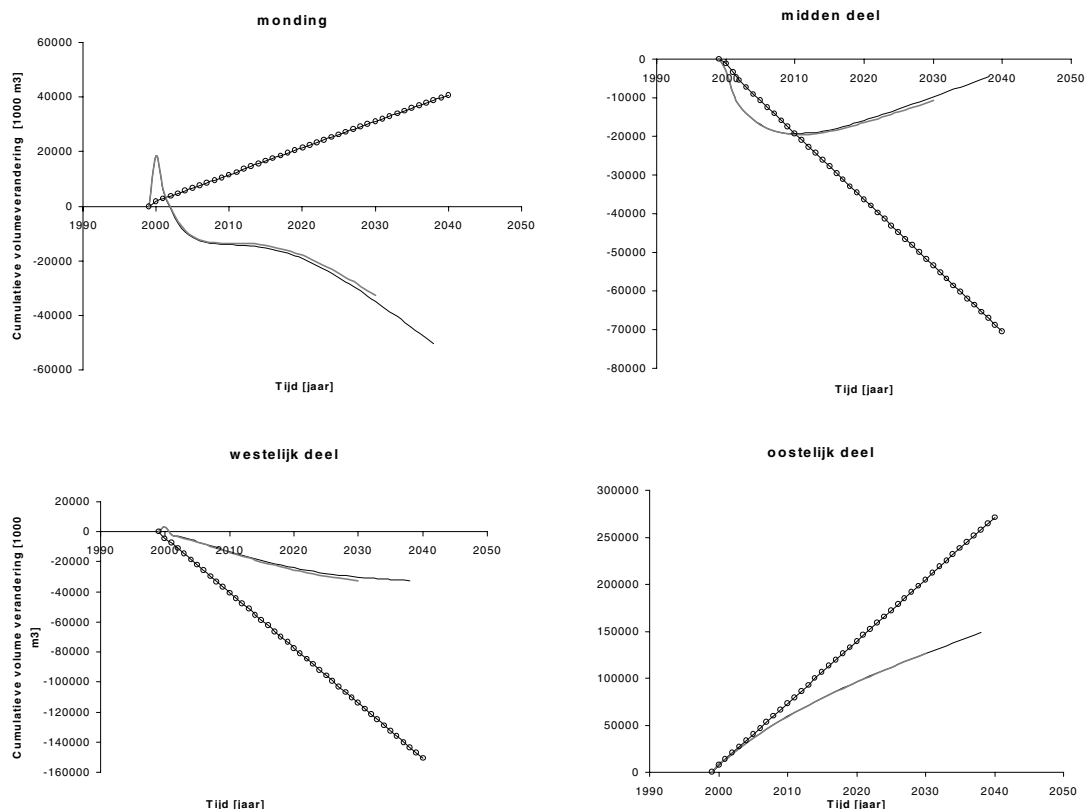
#### 3.3.1 Zeespiegelstijging

Om de invloed van een zeespiegelstijging op de zandhuishouding te kunnen beoordelen is de berekening van de tweede verdieping nog een keer uitgevoerd, maar dan met een zeespiegelstijging van 60 cm per eeuw. De simulatieperiode is 38 jaar.

Figuur 3.9 toont de tijdreeksen met daarin de cumulatieve veranderingen in de waterinhoud ten gevolge van ingrepen,  $V_i$ , en de door ESTMORF berekende cumulatieve veranderingen in de totale waterinhoud  $V_{tot,E}$  voor de vier deelgebieden, monding, westelijk deel, midden deel en oostelijk deel. In dit figuur zijn de resultaten van de berekening zonder zeespiegelstijging eveneens weergegeven. Figuur 3.10 toont de zand / waterbalans over de totale periode ten opzichte van NAP+2m. De belangrijkste kentallen over de totale periode zijn samengevat in tabel 3.4. De expliciete vergelijking van de zandbalans met de berekening zonder zeespiegelstijging is samengevat in tabel 3.5.

Wanneer de tijdreeksen in Figuur 3.9 worden bekeken valt op dat de verschillen in berekende tendensen van erosie en sedimentatie tussen de simulatie met en zonder zeespiegelstijging klein zijn. Dit beeld wordt bevestigd door de zandbalans (zie Fig. 3.10, tabel 3.4, 3.9):

- Het teken van de sedimentuitwisseling tussen de vier deelgebieden verandert niet als gevolg van zeespiegelstijging. De stijging leidt wel tot een iets sterkere sedimentuitwisseling tussen de deelgebieden: 6% meer uitwisseling op de grens west-midden tot maximaal 16% op de zeewaarts gelegen grens van het mondingsgebied.
- De zeespiegelstijging gaat gepaard met een iets kleinere erosie in het oostelijk deel en een kleinere totale sedimentatie in het midden en westelijk deel. De sedimentatie in het mondingsgebied neemt ca 30% toe, voornamelijk als gevolg van een grotere sedimentaanvoer vanaf de Noordzee.
- De kleine verschillen in de verandering van de komberging tussen NAP+2m en NAP-2m duiden op een relatieve afbraak van de intergetijdegebieden als gevolg van de zeespiegelstijging.



Figuur 3.9 Tijdreeksen van de cumulatieve totale inhoudsveranderingen  $V_{tot}$  (—) en de netto ingrepen  $V_i$  (-o-) als gevolg van de zeespiegelstijging. Grijze lijn is  $V_{tot}$  zonder zeespiegelstijging (Fig.3.1).

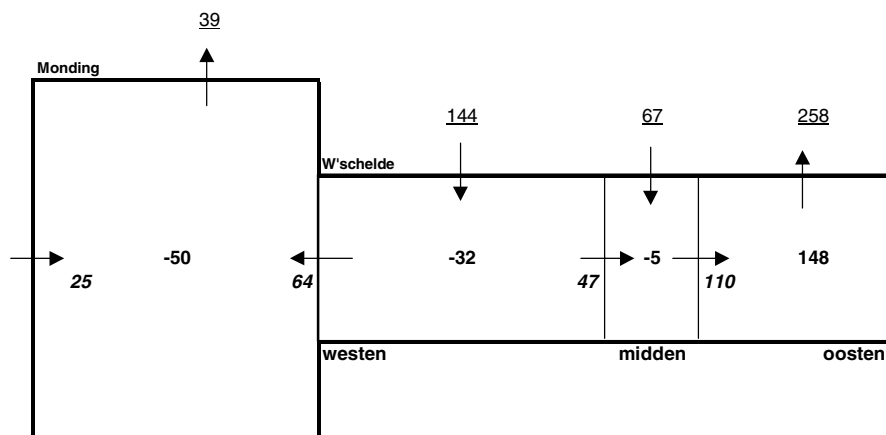


Fig. 3.8 Zand/waterbalans t.o.v. NAP+2m over de totale periode 1999-2038 met zeespiegelstijging.  $V_{tot,E}$  = vet, totale inhoudsverandering berekend door ESTMORF,  $V_i$  = onderstreept, totale netto ingreep. I/E = cursief, import/ export van zand uit tussen deelgebieden.

Dus zeespiegelstijging leidt tot een versterking van de sedimentuitwisseling tussen de diverse deelgebieden en een verminderde erosie (= relatieve sedimentatie) in het oostelijk deel, een verminderde sedimentatie in het midden en westelijk deel (= relatieve erosie) en een versterkte sedimentatie in de monding. Dit geeft aan dat de zandbehoefte het sterkst is

in het mondingsgebied en het oostelijk deel. Het middendeel, het westelijk deel en de Noordzee leveren het zand; er ontstaat een versterkte zandexport vanuit de Westerschelde naar de monding als gevolg van de zeespiegelstijging. Hierbij spelen twee tegengestelde effecten een rol: in de eerste plaats leidt een zeespiegelstijging tot een toename van het watervolume en een zandbehoefte in de Westerschelde en monding. Echter, de stijging resulteert ook in een toename van het kombergend oppervlak en de komberging. Dit laatste gaat gepaard met een groter getijvolume en een erosie van de geulen waardoor de zandexport van de Westerschelde naar de monding toeneemt. De resultaten van de berekening geven aan dat vooral het laatste effect domineert.

Op basis van bovenstaande observaties kan worden geconcludeerd dat een zeespiegelstijging een geringe invloed heeft op de zandhuishouding in de Westerschelde en monding. De veranderingen in de zandbalans ten opzichte van NAP+2m zijn dermate klein dat ze waarschijnlijk niet meetbaar zijn (of slechts op lange termijn). De resultaten geven wel aan dat zeespiegelstijging gepaard kan gaan met een relatief verlies (verminderde opbouw of snellere afbraak) van het intergetijdegebied tussen NAP-2m en NAP+2m en een versterkte zandexport vanuit de Westerschelde naar het mondingsgebied.

Tabel 3.4 Overzichtstabel berekening tweede verdieping met zeespiegelstijging. Totale verandering in waterinhoud (in  $\text{Mm}^3$ ) voor de periode 1999-2037.  $V_{\text{tot},E}$  = totale inhoudsverandering zoals berekend met ESTMORF, - = sedimentatie (afname waterinhoud), + = erosie (toename waterinhoud).  $V_i$  = totaal aan ingrepen, - = storten (afname waterinhoud), + = baggeren.  $V_{\text{nat}}$  = natuurlijke verandering in waterinhoud ( $V_{\text{tot},E} - V_i$ ), + = erosie, - = sedimentatie. I/E = import (-) of export (+) op de zeewaartse rand van het beschouwde gebied. Komberging = verandering in het watervolume tussen NAP+2m en NAP-2m, - = afname komberging / opbouw van platen, + = toename komberging / erosie van plaatvolume.

	Nap+2 m			NAP- 2m		
	Vtot, E	Vi	Vnat	I/E	Vtot, E	komberging
	zeerand					
<b>monding</b>	<b>-48</b>	<b>39</b>	<b>-87</b>	<b>-22</b>	<b>-47</b>	<b>-1</b>
vaargeul	-1	278	-279		1	
overig	-48	-239	191		-48	
<b>Westerschelde</b>	<b>112</b>	<b>47</b>	<b>65</b>	<b>65</b>	<b>108</b>	<b>4</b>
vaargeul	145	347	-202		146	
overig	-33	117	-150		-38	
<b>west</b>	<b>-32</b>	<b>-144</b>	<b>112</b>	<b>65</b>	<b>-30</b>	<b>-2</b>
vaargeul	0	64	-64		1	
overig	-32	207	-239		-31	
<b>midden</b>	<b>-4</b>	<b>-67</b>	<b>63</b>	<b>-47</b>	<b>-2</b>	<b>-2</b>
vaargeul	25	24	1		26	
overig	-29	-91	62		-28	
<b>oost</b>	<b>148</b>	<b>258</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>140</b>	<b>8</b>
vaargeul	120	259	-139		119	
overig	28	1	27		21	

Tabel 3.5 Vergelijking van de zandbalans met (vet gedrukt) en zonder zeespiegelstijging. Voor verklaring van symbolen zie tabel 3.4. Hoeveelheden in  $\text{Mm}^3/\text{jr}$ .

	Nap+2m Vtot, E	Vi	Vnat	I/E zeerand	NAP-2m Vtot, E	komberging
monding	-1.0 <b>-1.3</b>	1.0 <b>1.0</b>	-2.0 <b>-2.3</b>	-0.5 <b>-0.6</b>	-1.0 <b>-1.2</b>	-0.03 <b>-0.03</b>
Westerschelde	2.8 <b>2.9</b>	1.2 <b>1.2</b>	1.5 <b>1.7</b>	1.5 <b>1.7</b>	2.7 <b>2.8</b>	0.1 <b>0.11</b>
westelijk deel	-1.1 <b>-0.8</b>	-3.8 <b>-3.8</b>	2.7 <b>2.9</b>	1.5 <b>1.7</b>	-1.0 <b>-0.8</b>	-0.1 <b>-0.05</b>
midden deel	-0.4 <b>-0.1</b>	-1.8 <b>-1.8</b>	1.4 <b>1.7</b>	-1.2 <b>-1.2</b>	-0.3 <b>-0.1</b>	-0.1 <b>-0.05</b>
oostelijk deel	4.2 <b>3.9</b>	6.8 <b>6.8</b>	-2.6 <b>-2.9</b>	-2.6 <b>-2.9</b>	4.0 <b>3.7</b>	0.2 <b>0.21</b>

### 3.3.2 18,6-jarige getijcyclus

De kalibratieberekening over de periode 1968-1998 (Wang en Van Helvert, 1998) is in deze studie nogmaals uitgevoerd maar dan met de 18,6-jarige cyclus in de getijbeweging. Deze simulatieperiode is gekozen omdat de berekende fluctuaties en faseverschillen tussen waterbeweiging en morfologie (inhoud) kunnen worden vergeleken met de waarnemingen in de Westerschelde zoals beschreven door De Jong (2000).

Figuur 3.11 toont de tijdreeksen met: 1) de cumulatieve erosie en sedimentatie in de verschillende deelgebieden zoals berekend in deze studie, 2) de waarden uit de kalibratieberekening (referentie situatie, Wang en Van Helvert, 2001) en 3) de veldwaarnemingen (gebaseerd op De Jong, 2000).

De 18,6-jarige cyclus veroorzaakt een fluctuatie op de berekende erosie-sedimentatie trends (Fig. 3.11): een grotere getijslag (bijv. rond 1980) gaat gepaard met een inhoudstoename en relatieve zandexport vanuit de Westerschelde, een kleinere getijslag (1988) resulteert in een inhoudsafname en een relatieve zandimport. Deze fluctuaties zijn het duidelijkst zichtbaar in de monding en de Westerschelde en in iets mindere mate in het westelijk en het oostelijk deel van de Westerschelde. Voor alle deelgebieden (ruimteschalen) geldt echter dat in de beschouwde periode 1968-1998 de trend groter is dan de fluctuatie. Om de amplitude van de variaties en het faseverschil ten opzichte van de waterbeweging beter te kunnen bepalen toont figuur 3.12 het verschil van beide berekeningen. Tabel 3.6 geeft een samenvatting van de belangrijkste kentallen die uit dit figuur zijn af te leiden. De volgende aspecten kunnen worden waargenomen:

Het berekende *faseverschil* tussen de 18,6-jarige cyclus in de getijbeweging en de morfologie is klein: in de Westerschelde en de drie deelgebieden in het estuarium is het

faseverschil slechts 1 jaar. In het grote mondingsgebied is de berekende naijling iets groter ongeveer 4 jaar.

De berekende *amplitude* van de fluctuaties varieert tussen de 1 en ongeveer 4 Mm<sup>3</sup> in de drie deelgebieden van de Westerschelde. Voor de Westerschelde in haar totaliteit veroorzaakt de 18.6-jarige cyclus een variatie in de zandhuishouding met een amplitude van 6-7 Mm<sup>3</sup>. Voor het gehele mondingsgebied is deze amplitude een orde groter, ongeveer 60 Mm<sup>3</sup>.

Tabel 3.6 Kentallen met betrekking tot de fluctuaties in de waterbeweging en de zandbalans als gevolg van de 18.6-jarige cyclus in het getij.

	dal (jaar)	top (jaar)	dal (jaar)	faseverschil (jaren)	amplitude	amplitude observatie
<i>waterbeweging</i>	1969	1979	1988	n.v.t.	4%	
<i>morfologie:</i>						
Westerschelde	1969	1980	1989	1	6-7 Mm <sup>3</sup>	5-6 Mm <sup>3</sup>
westelijk deel	1970	1980	1989	1	3.7-4.3 Mm <sup>3</sup>	4-5 Mm <sup>3</sup>
midden deel	1969	1980	1989	1	0.9-1.5 Mm <sup>3</sup>	2-3 Mm <sup>3</sup>
oostelijk deel	1969	1979	1987	0-1	1.3-1.5 Mm <sup>3</sup>	~2 Mm <sup>3</sup>
monding	1973	1983	1992	4	60-64 Mm <sup>3</sup>	15 -20 Mm <sup>3</sup>

Opmerking: De amplitudes gegeven in de laatste kolom zijn grof geschat op basis van de waarnemingen. Voor de monding hebben de waarnemingen betrekking op een kleiner gebied dan het modelgebied.

Vergelijken we deze modelresultaten met de waarnemingen (Fig. 3.11), dan kan het volgende worden geconstateerd:

- De berekende amplituden en faseverschillen van de fluctuaties in de (water)inhoud van de Westerschelde als geheel zijn van dezelfde orde als de waarnemingen (Fig. 3.11). Voor het westelijk deel en het oostelijk deel lijken de waargenomen amplituden wat groter dan die van de berekening. Voor het midden deel is er weinig overeenkomst.
- Voor het mondingsgebied zijn de verschillen tussen berekening en waarneming waarschijnlijk groter. De waarnemingen duiden op een faseverschil tussen waterbeweging en morfologie van ongeveer 7 jaar in plaats van de berekende 4 jaar. Opgemerkt wordt dat deze vergelijking lastig is en wel om twee redenen. Ten eerste is het modeldomein groter dan dat van de waarnemingen beschreven door De Jong (2000): laatstgenoemde beschouwt alleen de inhoudsveranderingen van de lodingsvakken 17, 18a en 19. Hierdoor is de berekende amplitude groter dan de gemeten waarde. Ten tweede is de nauwkeurigheid van de waargenomen inhoudsveranderingen van het mondingsgebied om verschillende redenen lager dan bijvoorbeeld in de Westerschelde.

#### Opmerkingen:

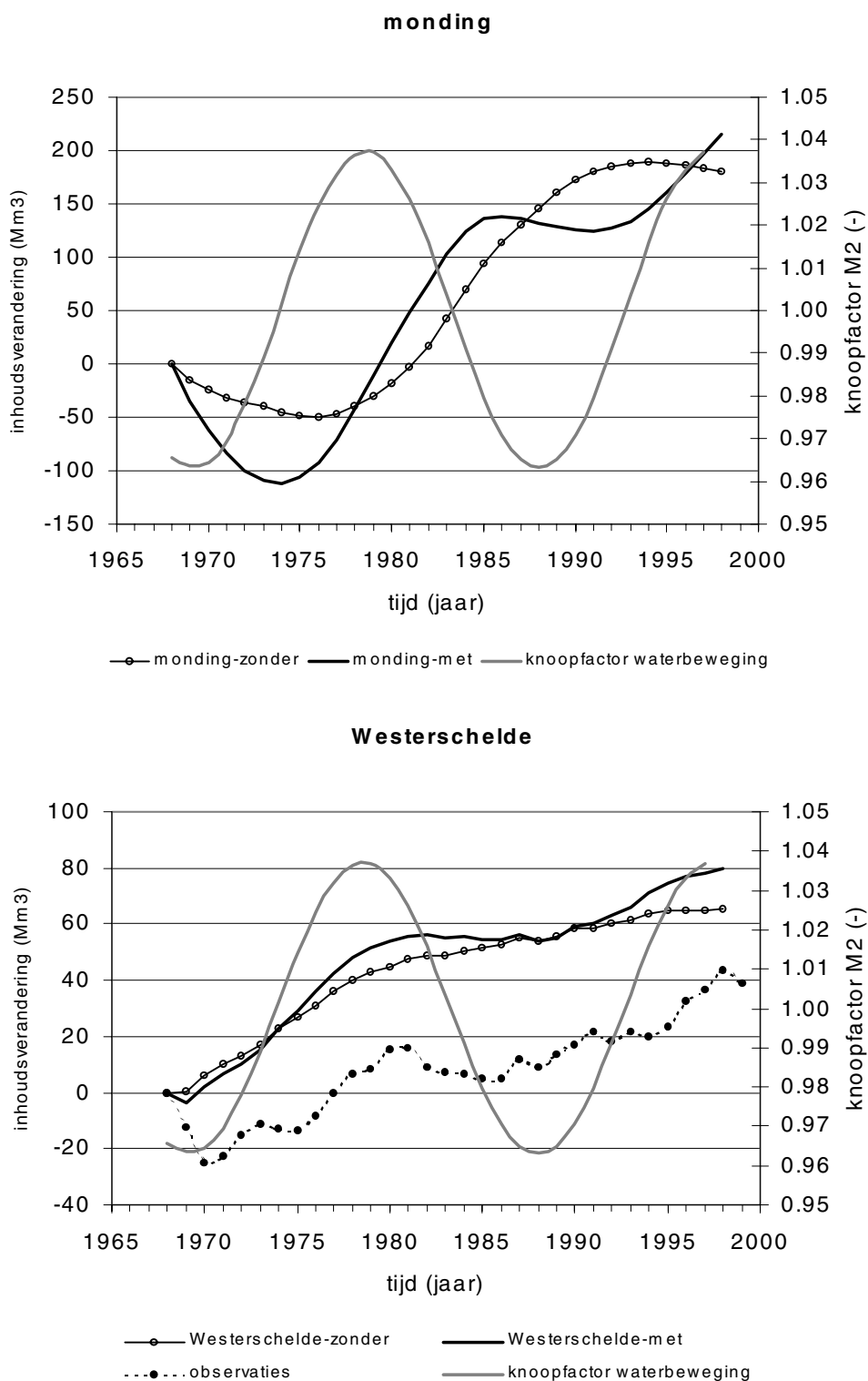
- De waarnemingen (Fig.3.11) laten zien dat de amplitude van de fluctuatie lijkt af te nemen in de tijd. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de morfologische tijdschaal van het systeem is groter geworden door de verruiming van het estuarium. Theoretisch wordt verwacht dat de amplitude van de fluctuatie kleiner wordt naarmate de verhouding tussen de 18.6 jaar periode en de morfologische tijdschaal kleiner wordt.

- Het waargenomen faseverschil van ongeveer 7 jaar kan mogelijk duiden dat de monding meer als een buitendelta functioneert dan als geulen (zoals nu in het model zit). Dan zal immers het zandvolume ongeveer in fase zijn t.o.v. de waterbeweging, wat inhoudt dat het watervolume ongeveer in tegen fase is t.o.v. de waterbeweging zoals de waarnemingen in feite suggereren.

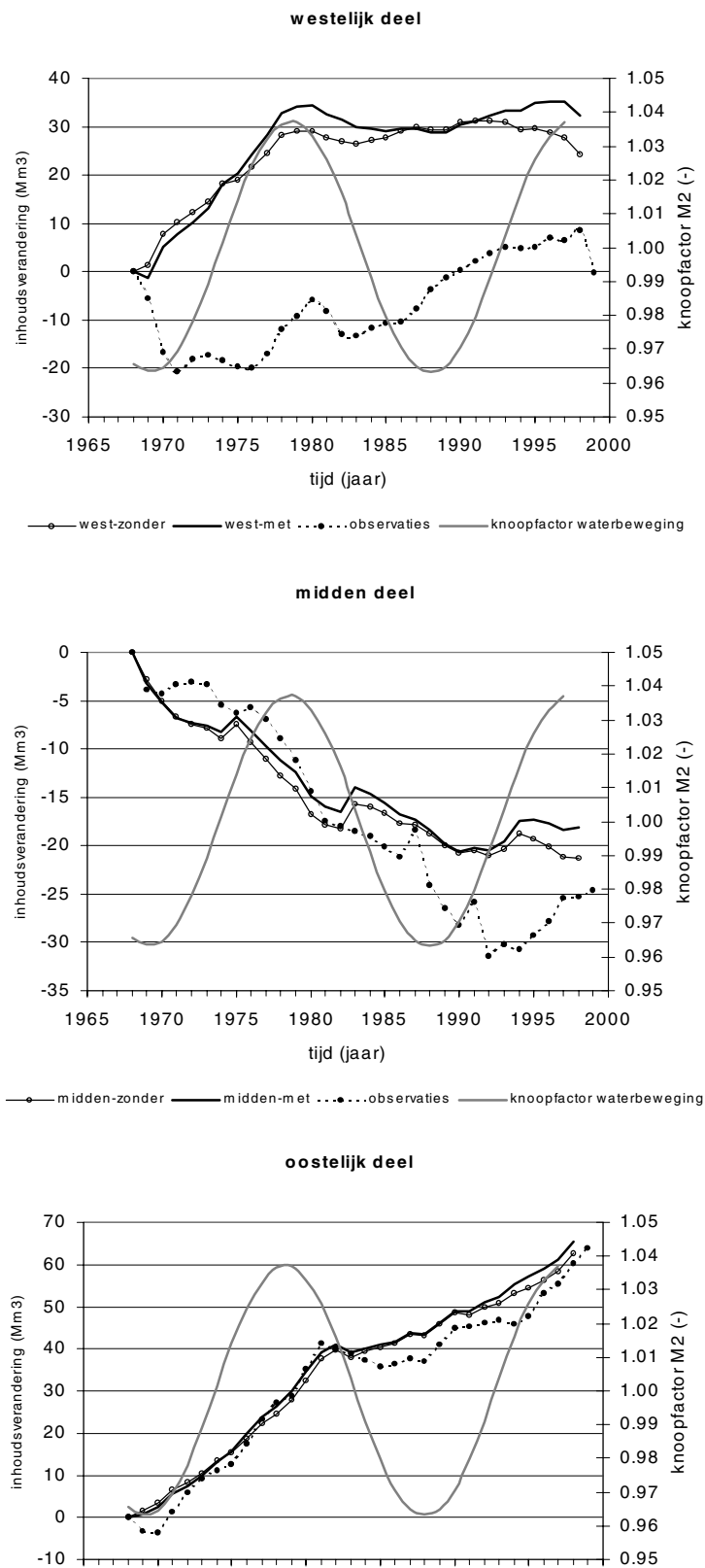
Opvallend is tot slot de *erosieve trend* in de verschilreeks (Fig.3.12). De 18.6-jarige cyclus veroorzaakt een netto erosie in de Westerschelde. Uit nadere analyses blijkt dat het hier gaat om een artefact, veroorzaakt door de wijze van schematiseren van de geul in het dwarsprofiel. Het laagste punt in het profiel vertegenwoordigt de geulbodem zodanig dat het doorstroomoppervlak ten opzichte van laag water juist wordt weergegeven. Door deze definitie wordt de helling van de geul niet op de juiste wijze weergegeven. Wanneer , bijvoorbeeld in het geval van de 18.6-jarige cyclus, de laag water stand fluctueert, verschuift het punt dat de lage plaathoogte vertegenwoordigt naar rechts (Fig. 3.13); het plaatareaal en -volume nemen af. Deze verandering is in beginsel massabehoudend. Echter, de artificiele afbraak van de platen veroorzaakt een toename van de komberging en een groter evenwichtsgetijvolume in de geulen, wat uiteindelijk leidt tot erosieve trends zoals in Fig. 3.12.

De zandbalans over de totale periode 1968-1998 is niet opgesteld vanwege bovengenoemd artefact. Bovendien is de keuze van de periode waarover de balans wordt opgesteld van invloed op het beoordelen van de verschillen als gevolg van de 18.6-jarige cyclus: een balans van de Westerschelde over bijvoorbeeld de periode 1974-1990 zal minimale verschillen ten gevolge van de 18.6-jarige cyclus laten zien, terwijl eenzelfde exercitie over de periode 1968-1998 maximale verschillen zal laten zien. Het is in dit geval beter om tijdreeksen van de zanduitwisseling te maken. Dan is het echter wel van belang dat eerst de schematisatie van het dwarsprofiel in de software wordt verbeterd.

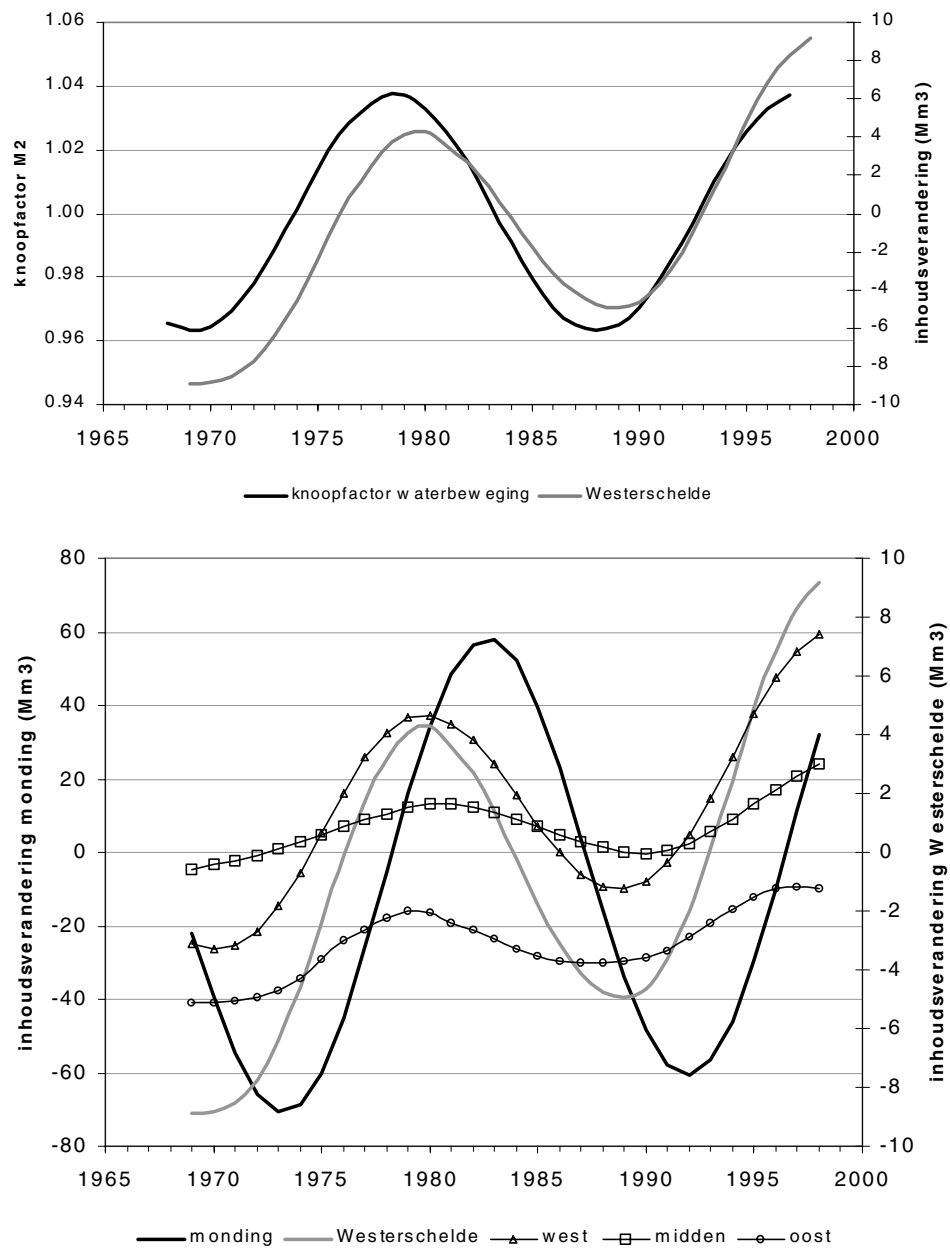
Samenvattend kan worden geconcludeerd dat de 18.6-jarige cyclus in de getijbeweging fluctuaties veroorzaakt in de (water)inhoud en de import/export van de Westerschelde met een amplitude van ca 6-7 Mm<sup>3</sup>. Het faseverschil tussen de getijbeweging en deze inhoudsveranderingen is slechts 1 jaar. Deze modelresultaten komen, zeker qua orde van grootte, overeen met de veldwaarnemingen. Dit betekent dat de waargenomen fluctuaties in de zandbalans van de Westerschelde zeer waarschijnlijk het gevolg zijn van de 18.6-jarige cyclus. Voor het mondingsgebied is deze conclusie niet zo duidelijk te trekken doordat de modelresultaten en waarnemingen niet goed met elkaar te vergelijken zijn (verschillende gebiedsgrootte). De modelresultaten duiden op een fluctuatie in de zandbalans van het mondingsgebied van orde 60Mm<sup>3</sup>, waarbij de morfologie ongeveer 4 jaar naijlt op de waterbeweging (forcering).



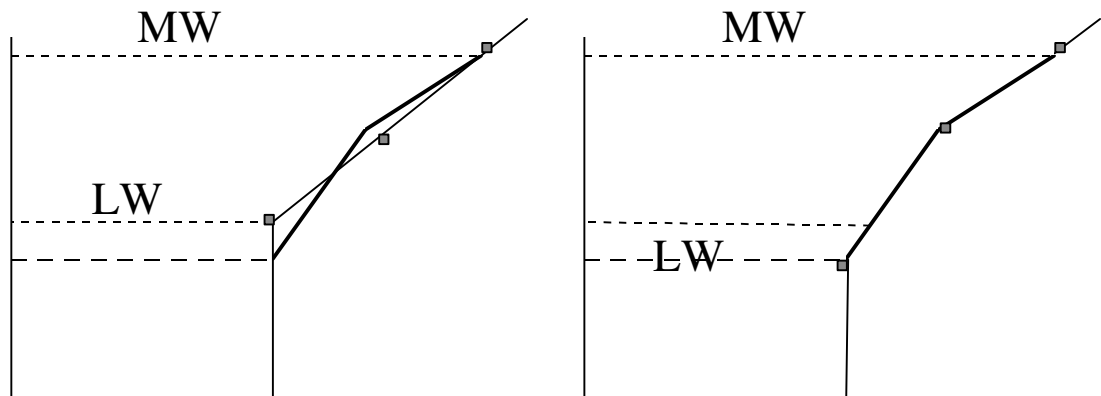
Figuur 3.11 Cumulatieve erosie en sedimentatie in mondingsgebied, Westerschelde en de drie deelgebieden in de Westerschelde met en zonder de 18.6-jarige cyclus in het getij. Positieve inhoudsverandering duidt op erosie een negatieve verandering impliceert sedimentatie (een kleinere waterinhoud).



Figuur 3.11 vervolgd.



Figuur 3.12 Verschilreeks (met-zonder) waardoor de berekende invloed van alleen de 18.6-jarige cyclus op de inhoudsverandering zichtbaar wordt. Positieve inhoudsverandering is erosie, negatieve verandering is sedimentatie.



Figuur 3.13 Schematische weergave van het ontstaan van de artificiele erosieve trend in de berekende inhoudsverandering.

## 4 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

### 4.1 Samenvatting en conclusies

#### Doel- en vraagstelling

De voorliggende studie is uitgevoerd in het kader van de RWS-projecten ZEEKENNIS en KUST2005\*WSMOND. Deze projecten richten zich op de kennisontwikkeling op het gebied van hydrodynamica, morfologie, biologie en de samenhang daartussen ten behoeve van de ondersteuning van beleid en beheer. Een belangrijk doel van beide RWS-projecten bestaat uit het genereren van kennis en middelen waarmee integraal zandbeheer in de Westerschelde en het mondingsgebied kan worden vormgegeven. Integraal zandbeheer betekent dat getracht wordt alle kunstmatige zandverplaatsingen en/of onttrekkingen dusdanig uit te voeren dat, samen met de natuurlijke zandverplaatsingen, een zo optimaal mogelijke zandhuishouding kan worden verkregen in relatie tot de gebruiksfuncties en beleidsdoelstellingen.

Integraal zandbeheer vereist een goed inzicht in de morfologische ontwikkelingen en de zandhuishouding van de Westerschelde en monding onder invloed van menselijke ingrepen (baggeren en storten) en natuurlijke processen en forceringen op verschillende ruimte- en tijdschalen. Naast andere onderzoeksinspanningen is voor het Schelde estuarium het ESTMORF-model ontwikkeld en opgezet om de kennis op dit gebied te vergroten.

Het algemene doel van de voorliggende studie bestaat uit het vergroten van de kennis over de zandhuishouding van de Westerschelde en de monding onder invloed van:

- 1) de uitgevoerde (tweede verdieping) en een door Vlaanderen gewenste derde vaargeulverdieping, en;
- 2) de natuurlijke forceringen zeespiegelstijging en 18,6-jarige cyclus.

Concreet gaat het hierbij om de volgende vragen:

#### *Invloed van ingrepen:*

- Wat zijn de gevolgen van de tweede verdieping en het veranderde stortbeleid voor de zandhuishouding van de Westerschelde en monding, wanneer wordt uitgegaan van het gerealiseerde vaargeulonderhoud en het ESTMORF-model van de Westerschelde inclusief de monding? In hoeverre verschillen de resultaten met de eerdere berekeningen in het kader van het RWS MOVE-project (Van Helvert, 1999)?
- Wat zijn de gevolgen van een derde verdieping, waarbij het stortcriterium volgens het cellenconcept wordt gehanteerd, voor de zandhuishouding van de Westerschelde en monding?

*Invloed van natuurlijke forceringen:*

- Hoe en in welke mate beïnvloedt een zeespiegelstijging van 60cm/eeuw de zandhuishouding in de Westerschelde en monding?
- Hoe en in welke mate beïnvloedt de 18,6-jarige cyclus de zandhuishouding van de Westerschelde en monding?:
- Hoe groot (in relatieve zin) is de invloed van de zeespiegelstijging en de 18.6 jarige cyclus op de zandhuishouding van de Westerschelde in vergelijking tot het effect van de ingrepen?

Om deze vragen te beantwoorden is een viertal modelberekeningen opgezet en uitgevoerd (zie hoofdstuk 2 voor details) met het gekalibreerde ESTMORF model (versie 3). In de navolgende alinea's worden per categorie vragen de belangrijkste conclusies samengevat.

## De invloed van vaargeulverdiepingen

*Effecten van de tweede verdieping*

De effecten van de tweede verdieping zijn in het verleden al een keer eerder met ESTMORF doorerekend in het kader van het RWS MOVE-project (Van Helvert, 1999). De modelopzet van de huidige en destijds uitgevoerde berekening verschilt echter: i) het ESTMORF model zoals gebruikt in de huidige studie omvat het mondingsgebied, ii) de berekening voor de huidige studie start met de berekende modelbodem van 1998 (Wang en Van Helvert, 2001) en niet met die van 1993 (hangt samen met punt i), en iii) het baggerbezwaar voor het vaargeulonderhoud is gebaseerd op waarnemingen over de periode 1999-2001 in plaats van het destijds verwachte baggerbezwaar van 14 Mm<sup>3</sup>/jr (RWS, 1997), wat zo'n 3-4 Mm<sup>3</sup>/jr hoger is dan de waargenomen baggerhoeveelheden. Vraag is dan ook in hoeverre de bevindingen van de huidige studie met betrekking tot veranderingen in de zandhuishouding verschillen met de resultaten uit de eerdere MOVE-studie.

De belangrijkste bevindingen uit de MOVE studie zijn: 1) het ontstaan van een zandexport vanuit de Westerschelde als gevolg van de veranderingen in het stortbeleid, 2) een toename van het zandtransport van het middendeel naar het oostelijk deel van de Westerschelde en 3) de afbraak van het intergetijdegebied in het oostelijk deel en een opbouw van deze gebieden in het midden en westelijk deel. De huidige studie bevestigt deze resultaten in kwalitatieve zin. Kwantitatief zijn er wel een paar verschillen:

- De absolute grootte van deze zanduitwisseling tussen de verschillende deelgebieden in de Westerschelde is in de huidige studie kleiner dan in de Move-studie (Van Helvert, 1999). De verschillen nemen in zeewaartse richting af (van een factor 1.7 naar een factor 1.3). Deze verschillen worden waarschijnlijk veroorzaakt door de grotere opgelegde netto onttrekking van zand ( $V_i$ ) in met name het oostelijk deel van de Westerschelde in de MOVE-studie. Opgemerkt wordt dat opgelegde  $V_i$  voor de Westerschelde in de MOVE-studie wel opvallend groot is: 4.3 Mm<sup>3</sup>/jr netto onttrekken (zandwinnen).
- Ook de ontwikkeling van de komberging (intergetijdegebieden) tussen NAP-2m en NAP+2m komt kwalitatief overeen. De berekende afbraak in het oosten en de opbouw in het midden en westelijk deel is volgens de huidige studie wel een factor 2-5 groter.

De studies verschillen met betrekking de berekende totale inhoudsverandering  $V_{tot,E}$  in het midden en westelijk deel van de Westerschelde: in deze studie vindt in deze gebieden sedimentatie plaats, terwijl in de resultaten van de MOVE-studie erosie is berekend.

Daarnaast is met het huidige ESTMORF-model ook inzicht verkregen in de berekende inhoudsveranderingen van het mondingsgebied. Het blijkt dat dit zeewaarts gelegen deel van het estuarium sedimenteert, wat een trendbreuk is omdat het mondingsgebied tot nu toe eroderend is. De sedimentatie is het gevolg van de zandexport vanuit de Westerschelde en de Noordzee. De totale sedimentatie bedraagt ongeveer de helft van de totale import van sediment in het mondingsgebied. De andere helft wordt netto door de mens onttrokken. Dit betekent dat een deel van het uit de Westerschelde geëxporteerde zand in het mondingsgebied blijft liggen.

#### *Effecten van een derde verdieping*

Voor de derde verdieping in de periode 2003/2004 zijn drie verschillende varianten bekeken. De varianten verschillen onderling in: 1) waar de vrijgekomen specie van de verdieping ( $14\text{Mm}^3$  in 2 jaar) van de vaargeul in de Westerschelde wordt gestort, 2) hoe het onderhoudsbaggerwerk wordt gestort. Bij varianten a en b wordt alles in de Westerschelde gestort op alle stortlocaties (inclusief in het oostelijk deel). Het onderhoud is conform de berekening tweede verdieping, met in variant b  $1\text{Mm}^3$  extra baggerbezwaar. In variant c wordt de baggerspecie van de initiële verdieping voor de kust van Zeeuwsch Vlaanderen gestort. Bij het onderhoudsbaggerwerk van  $10\text{Mm}^3$  wordt gestort volgens het stortcriterium van het cellenconcept (Jeuken en Wang, 2001).

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat op de beschouwde schalen de verdiepingsvarianten a en b weinig veranderingen in de zandhuishouding veroorzaken ten opzichte van de tweede verdieping. Variant c, waarbij er volgens het stortcriterium wordt gestort, gaat gepaard met de grootste veranderingen in de zandhuishouding. Vooral de zanduitwisseling tussen de diverse deelgebieden wordt kleiner (30-60%). Verder wordt er met het storten volgens het stortcriterium meer op de ontwikkeling van de geulen ingespeeld; de totale ( $V_{\text{tot}}$ ) en 'natuurlijke' inhoudsveranderingen ( $V_{\text{nat}}$ ) liggen dicht bij elkaar. Deze resultaten geven aan dat de beheerder met vooral het stortbeleid invloed kan uitoefenen op de veranderingen in de zandhuishouding.

### **De invloed van natuurlijke forceringen**

#### *De invloed van zeespiegelstijging*

Om de invloed van een zeespiegelstijging van 60cm/eeuw te kunnen kwantificeren is de berekening van de tweede verdieping nogmaals uitgevoerd maar dan met zeespiegelstijging. Uit een vergelijking van de resultaten met de berekening zonder deze forcering kan het volgende worden geconcludeerd:

Zeespiegelstijging leidt tot een versterking (6-16%) van de sedimentuitwisseling tussen de diverse deelgebieden, een verminderde erosie (= relatieve sedimentatie) in het oostelijk deel, een verminderde sedimentatie in het midden en westelijk deel (= relatieve erosie) en een versterkte sedimentatie in de monding. Dit geeft aan dat de zandbehoefte het sterkst is in het mondingsgebied en het oostelijk deel. Het middendeel, het westelijk deel en de Noordzee leveren het zand. De zeespiegelstijging veroorzaakt een versterkte zandexport vanuit de Westerschelde naar de monding. Door de toename van het kombergend oppervlak en de komberging, als direct gevolg van de zeespiegelstijging, neemt het evenwichts

getijvolume in de geulene toe. De geulen eroderen wat de toename van de zandexport verklaart. Dit mechanisme domineert over de toename van het watervolume en de daarmee gepaard gaande zandbehoefte in de Westerschelde.

Zeespiegelstijging heeft een geringe invloed heeft op de zandhuishouding in de Westerschelde en monding. De veranderingen in de zandbalans ten opzichte van NAP+2m zijn dermate klein dat ze waarschijnlijk niet meetbaar zijn (of slechts op lange termijn). De resultaten geven wel aan dat zeespiegelstijging gepaard kan gaan met een relatief verlies (verminderde opbouw of snellere afbraak) van het intergetijdegebied tussen NAP-2m en NAP+2m en versterkte zandexport vanuit de Westerschelde naar het mondingsgebied.

#### *De invloed van de 18.6-jarige cyclus*

Om de invloed van de 18.6-jarige cyclus in de getijbeweging te kunnen kwantificeren is de calibratieberekening (Wang en Van Helvert, 2001) over de periode 1968-1998 nogmaals uitgevoerd, maar dan met deze cyclus in de hydrodynamische randvoorwaarden. Een vergelijking van de twee berekeningen brengt de volgende conclusies naar voren:

De 18.6-jarige cyclus in de getijbeweging veroorzaakt fluctuaties in de (water)inhoud en de import/export van de Westerschelde. De amplitude van de fluctuaties in de inhoud bedraagt ca 6-7 Mm<sup>3</sup>. Dus rondom een 'top' in de 18.6-jarige cyclus is de waterinhoud van de Westerschelde 6-7 Mm<sup>3</sup> groter (en de import kleiner of export groter). Tijdens een 'dal' is de inhoud juist 6-7 Mm<sup>3</sup> kleiner. Het faseverschil tussen de getijbeweging en deze inhoudsveranderingen is slechts 1 jaar. Deze modelresultaten komen, zeker qua orde van grootte, overeen met de veldwaarnemingen. Dit betekent dat de waargenomen fluctuaties in de zandbalans van de Westerschelde zeer waarschijnlijk het gevolg zijn van de 18.6-jarige cyclus. Voor het mondingsgebied is deze conclusie niet zo duidelijk te trekken doordat de modelresultaten en waarnemingen niet goed met elkaar te vergelijken zijn (verschillende gebiedsgrootte). De modelresultaten duiden op een fluctuatie in de zandbalans van het mondingsgebied van orde 60Mm<sup>3</sup>, waarbij de morfologie ongeveer 4 jaar naijlt op de waterbeweging (forcing).

Opgemerkt wordt dat de analyse van de invloed van de 18.6-jarige cyclus een artefact in ESTMORF naar voren heeft gebracht. Door een beperkte schematisatie van het geulprofiel beneden laagwater erodeert het intergetijde gebied bij een fluctuerende laagwaterstand. Hierdoor nemen de komberging en het evenwichtsgetijvolume in geulen toe, wat leidt tot artificiele erosieve trends als gevolg van de 18.6-jarige cyclus.

#### *De relatieve invloed van natuurlijke forceringen*

Als we kijken naar het relatieve belang van de natuurlijke forceringen, dan blijkt dat de lange-termijn (30-40 jaar) trends in de inhoudsveranderingen niet wezenlijk veranderen als gevolg van zeespiegelstijging en de 18.6-jarige cyclus. De invloed van de 18.6-jarige cyclus op de zandhuishouding is duidelijk groter dan de invloed van de zeespiegelstijging. De berekende invloed van de zeespiegelstijging is zelfs zo klein dat deze waarschijnlijk niet met veldobservaties is te onderbouwen. Voor de 18.6-jarige cyclus lijkt dit wel het geval te zijn. Om het belang van de 18.6-jarige cyclus ten opzichte van ingrepen goed te kunnen kwantificeren op verschillende ruimte- en tijdschalen, is het wenselijk om eerst de software met betrekking tot de schematisatie van het dwarsprofiel te verbeteren.

## 4.2 Aanbevelingen

### Aanbevelingen voor het beheer

De resultaten van de voorliggende studie leiden tot een aantal aanbevelingen voor het beheer:

- Met name het stortbeleid (in samenhang met het zandwinbeleid) biedt mogelijkheden om een integraal zandbeheer vorm te geven. Uit de diverse verdiepingberekeningen blijkt dat met name het stortbeleid invloed heeft op de berekende veranderingen in de zandhuishouding.
- In vergelijking tot de invloed van ingrepen en de 18.6-jarige cyclus kunnen de effecten van een zeespiegelstijging van 60cm/eeuw worden verwaarloosd bij het beschouwen van veranderingen in de zandhuishouding op de schaal van oostelijk, midden en westelijk deel en groter. Wel kan het zijn dat zeespiegelstijging gepaard gaat met een versterkte afbraak of verminderde opbouw van de platen. Het is de vraag hoe wenselijk dit is.
- Bij het monitoren en evalueren van de effecten van de verdieping moet men, zeker op de schaal van de gehele Westerschelde, rekening houden met fluctuaties in de waterinhoud van 6-7 Mm<sup>3</sup> ten gevolge van de 18.6 jarige cyclus in de getijbeweging. Met name voor evaluaties op de korte termijn (<10 jaar) is dit belangrijk.

### Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

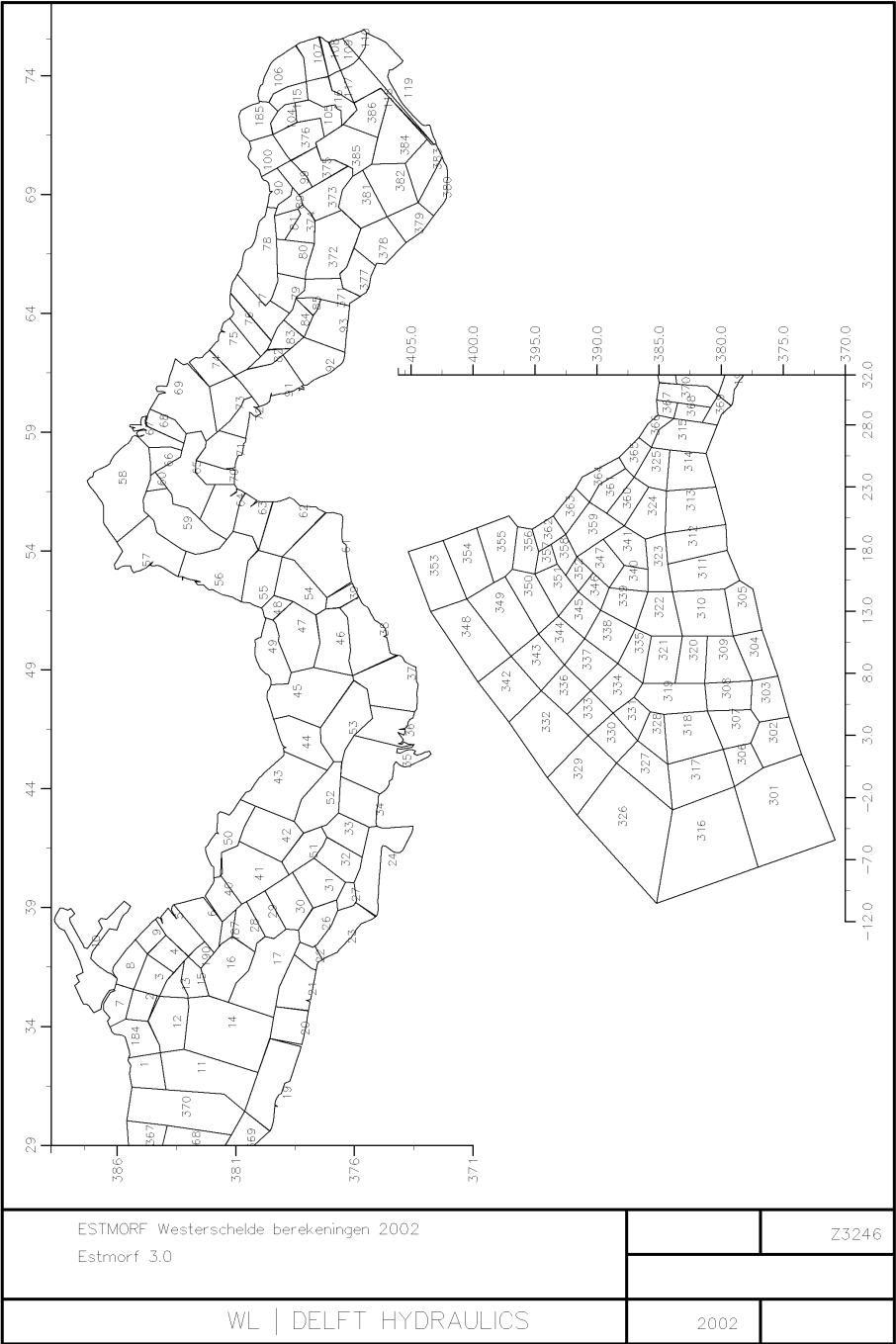
Voor vervolg onderzoek met het ESTMORF model zijn de volgende aanbevelingen naar voren gekomen:

- Verbeteren van de software met betrekking tot de schematisatie van het geulprofiel: het artefact in de modelresultaten, bij een fluctuerende getijslag, kan worden verholpen door een extra punt in de beschrijving van het geulprofiel toe te voegen.
- Maken van een nieuwe recente bodemschematisatie. De berekeningen in de huidige studie zijn uitgevoerd met een berekende modelbodem van 1998 (afkomstig uit de calibratierun 1968-1998, Wang en Van Helvert, 2001). Het zou beter zijn om gebruik te maken van een nieuwe bodem die gebaseerd op veldwaarnemingen.
- Wanneer de eerste twee punten worden gerealiseerd kan het te overwegen zijn om de berekeningen met de 18.6-jarige cyclus en één of twee verdiepingsvarianten opnieuw te maken.

## Referenties

- Rijkswaterstaat, Directie Zeeland 1997;  
Milieu Aspecten Studie (MAS)Baggerspeciéstort Westerschelde, Studie naar de effecten van het storten van specie, vrijkomend bij de 43/48 voet verruiming van de vaarweg in de Westerschelde, RWS Directie Zeeland.
- Helvert, M.A.G. van, juli 1999;  
Onderzoek naar de effecten van baggeren, storten en zandwinning in de Westerschelde m.b.v. het ESTMORF-model in het kader van MOVE, RIKZ Rijkswaterstaat, werkdocument RIKZ/OS-99.817x
- Jeuken, 2001 Verificatie van het cellenconcept op basis van historische waarnemingen. WL/Delft Hydraulics. Z3078.
- Jeuken, M.C.J.L en Wang, Z.B. juli 2001;  
Advies aangaande de maximaal verantwoorde stortingen in de Westerschelde, memo.
- Jong, J.E.A., de, augustus 2000;  
Zandbalans Westerschelde en monding periode 1955-1999, Rijkswaterstaat, Directie Zeeland augustus 2000.
- Vroon, J., C. Storm en J. Coossen, 1997. Westerschelde, stram of struis? Eindrapport van het project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium. Rijkswaterstaat, report RIKZ-97.023.
- Wang, Z.B. en Helvert, M.A.G. van, september 2001;  
ESTMORF-model voor de Westerschelde inclusief de monding; Verbeteringen software en uitbreiding/kalibratiemodel, WL/Delft Hydraulics, Z3105.
- Wang, Z.B. en Helvert, M.A.G. van, november 2001;  
ESTMORF, a model for long term morphological development of estuaries and tidal lagoons, WL/Delft Hydraulics, Z3105.
- Winterwerp, J.C., M.C.J.L. Jeuken, M.A.G. van Helvert, C. Kuyper, A. van der Spek, M.J.F. Stive, P.M.C. Thoolen en Z.B. Wang, 2000. Lange Termijnvisie Schelde-estuarium cluster morfologie. WL/Delft Hydraulics.

A EST MORF vakken

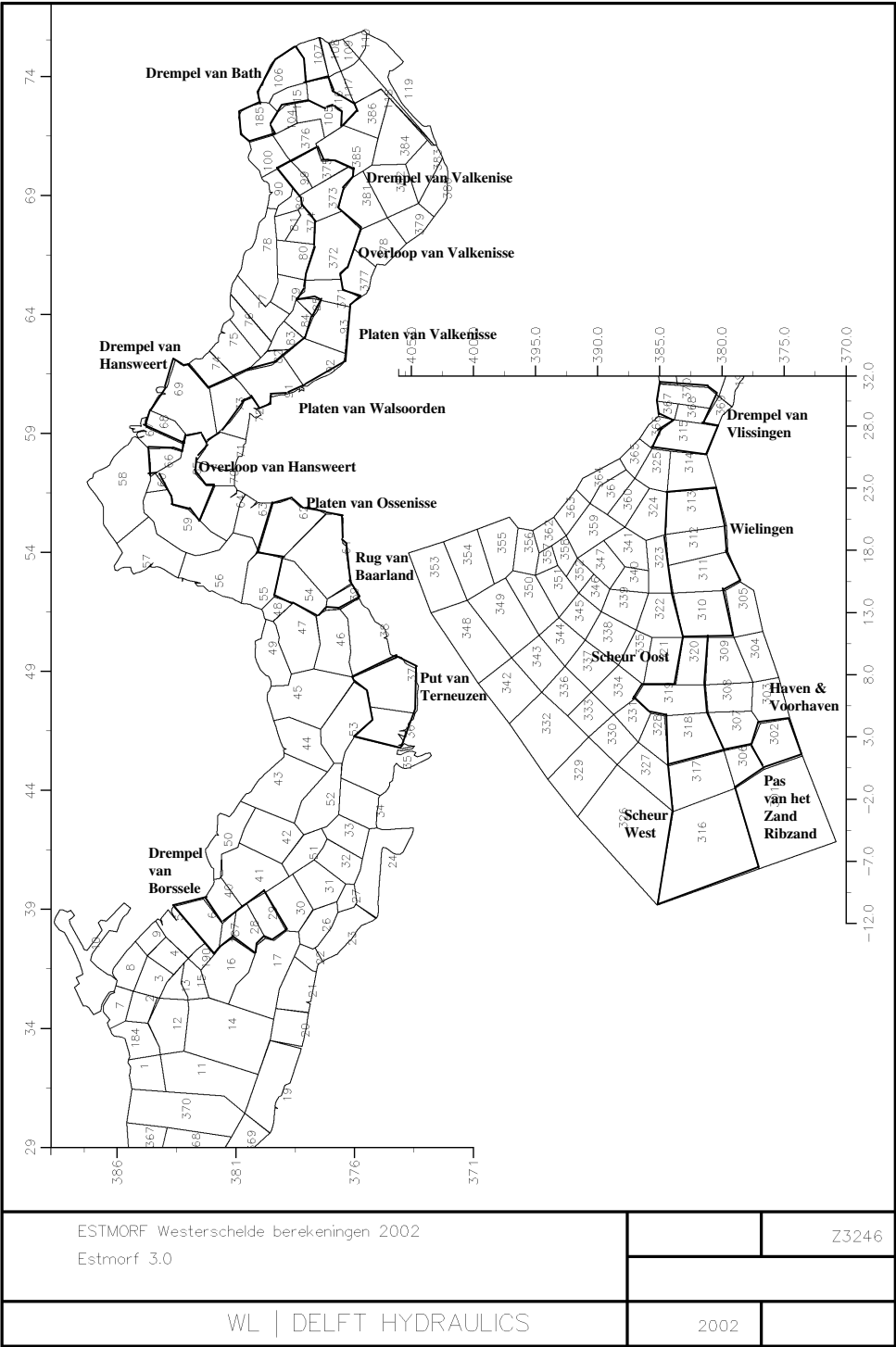


## B Bagger en stortlocaties

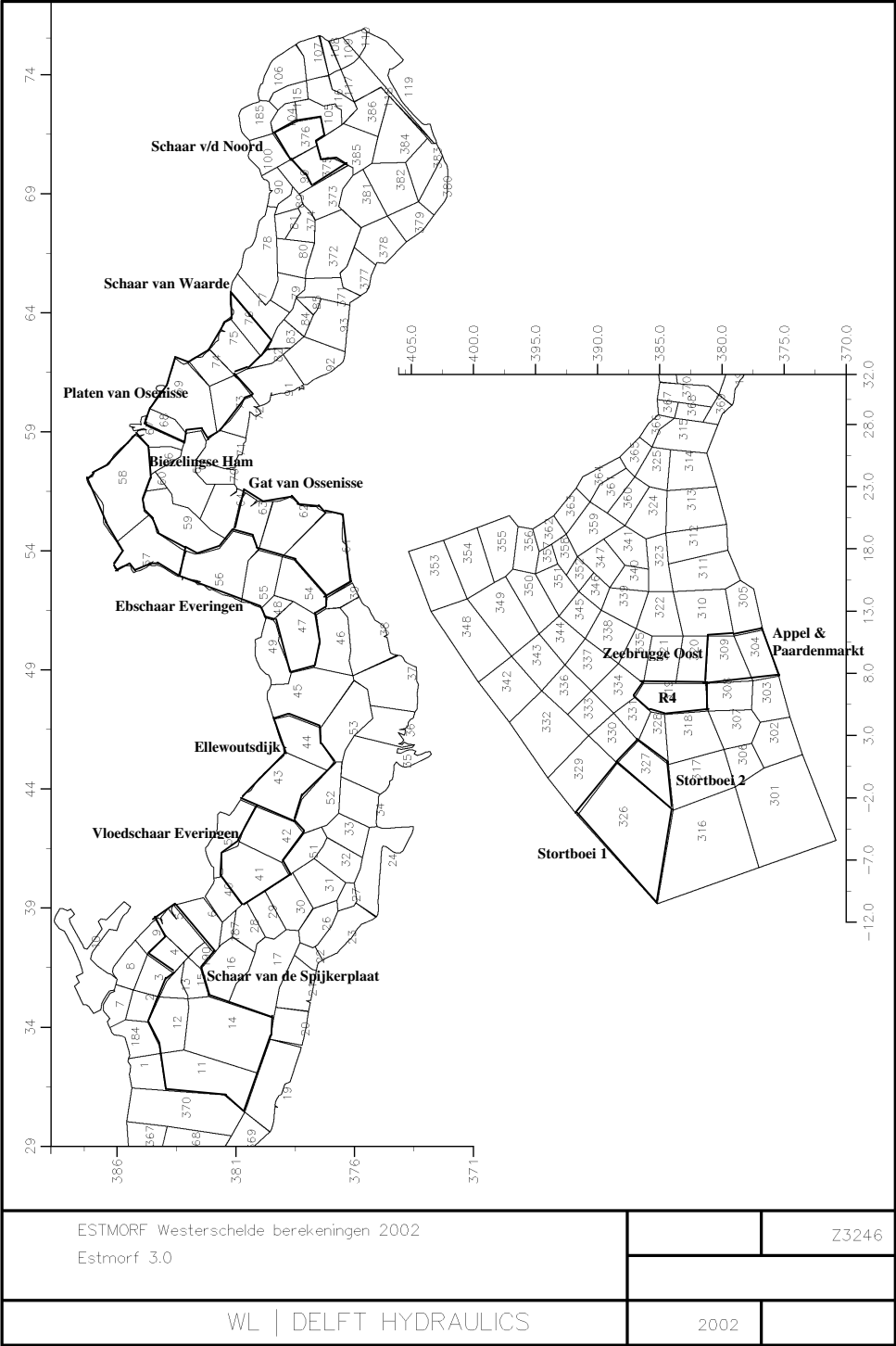
Bagger locaties in ESTMORF 3.0

Stortlocaties in ESTMORF 3.0

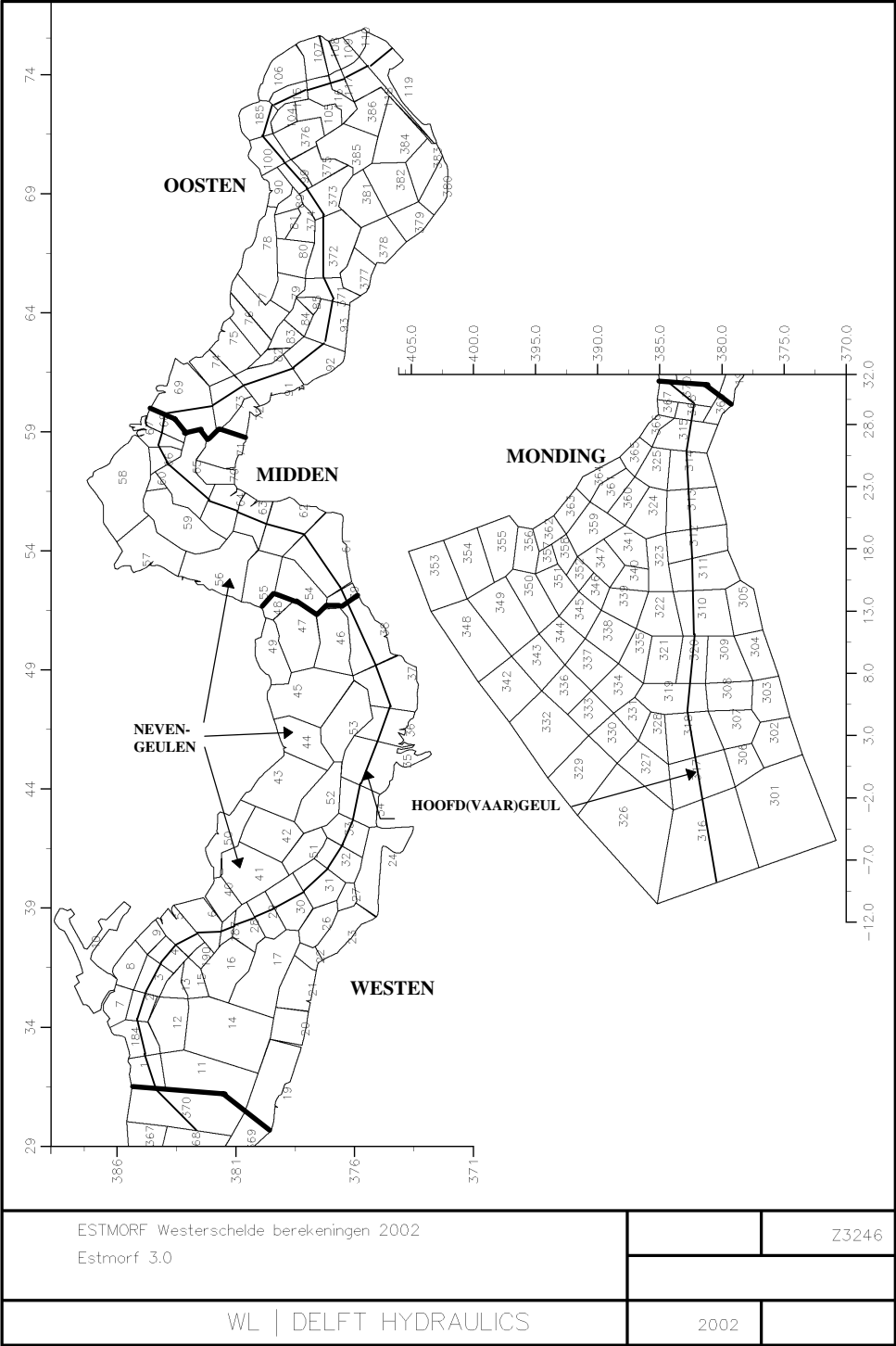
## C Aggregatie van resultaten



Bijlage B: Baggerlocaties



Bijlage B: Stortlocaties



Bijlage C: Aggregatie van resultaten