

# Vooronderzoek naar het voorspellen van het onderhoudsbaggerwerk en het verbeteren van de stortstrategie in de Westerschelde

Deelovereenkomst 3 MER-fase Morfologie

I. Tánczos, T. van der Kaaij, Z.B. Wang, M. van  
Helvert, M. van Ormondt, R. Bruinsma en C.  
Jeuken



## Kwaliteitscontrole

|                                                                          |        |                                                   |        |
|--------------------------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------------|--------|
| Gezien door m.e.r.-coördinatoren<br>(M.G.S.M. van Dyck en P.A. Weijers): |        | Gezien door projectdirecteur<br>(H.B. van Essen): |        |
| Handtekening:                                                            | Datum: | Handtekening                                      | Datum: |
| <br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>                                 |        |                                                   |        |
| Handtekening:                                                            | Datum: |                                                   |        |

## Colofon

|                |                                                                                                                             |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Opdrachtgever  | ProSes                                                                                                                      |
| Opdrachtnemer  | Consortium Arcadis - Technum                                                                                                |
| Titel          | Vooronderzoek naar het voorspellen van het onderhoudsbaggerwerk en het verbeteren van de stortstrategie in de Westerschelde |
| Contactpersoon | Claire Jeuken                                                                                                               |
| Bestand        | L:\110651.000021 SMER\Archief\Deelprojecten\2. Morfologie\8. Producten\3-0.8.8 Vooronderzoek                                |
| Versie         |                                                                                                                             |
| Status         | Definitief                                                                                                                  |
| Datum          | 11 juni 2004                                                                                                                |
| Archief        | 3-0.8.8                                                                                                                     |

# Inhoudsopgave

---

|          |                                                                |           |
|----------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inleiding</b>                                               | <b>5</b>  |
| 1.1      | Achtergrond                                                    | 5         |
| 1.2      | De instandhouding van de fysieke systeemkenmerken              | 6         |
| 1.3      | Doelstelling en algemene aanpak van het morfologisch onderzoek | 8         |
| 1.4      | Leeswijzer                                                     | 8         |
| <b>2</b> | <b>Aanpak</b>                                                  | <b>9</b>  |
| 2.1      | Inleiding                                                      | 9         |
| 2.2      | Algemeen                                                       | 9         |
| 2.3      | Stortstrategieën                                               | 9         |
| 2.3.1    | Een verbeterde stortstrategie                                  | 9         |
| 2.3.2    | Het 'nulalternatief'                                           | 10        |
| 2.3.3    | Alternatieve strategieën                                       | 10        |
| 2.4      | SOBEK-model                                                    | 11        |
| 2.4.1    | Algemeen                                                       | 11        |
| 2.4.2    | Validatie                                                      | 12        |
| 2.5      | Het Cellenconcept                                              | 12        |
| 2.6      | Model voor onderhoudsbaggerwerk                                | 13        |
| 2.7      | DELFT3D-model                                                  | 14        |
| <b>3</b> | <b>SOBEK-model</b>                                             | <b>15</b> |
| 3.1      | Inleiding                                                      | 15        |
| 3.2      | Opzet van het model                                            | 15        |
| 3.3      | Kalibratie en validatie van de waterbeweging                   | 16        |
| 3.3.1    | Beschikbare data                                               | 17        |
| 3.3.2    | Het verticale getij                                            | 17        |
| 3.3.3    | Horizontaal getij                                              | 19        |
| 3.4      | Morfologische validatie                                        | 21        |
| 3.4.1    | Inleiding                                                      | 21        |
| 3.4.2    | Beschikbare data                                               | 21        |
| 3.4.3    | Sedimenttransport                                              | 22        |
| 3.4.4    | Volumeveranderingen                                            | 23        |
| 3.5      | Conclusies en discussies                                       | 27        |
| 3.5.1    | Conclusies                                                     | 27        |
| 3.5.2    | Onzekerheden                                                   | 28        |

|          |                                                             |           |
|----------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4</b> | <b>Het model voor onderhoudsbaggerwerk</b>                  | <b>30</b> |
| 4.1      | Inleiding                                                   | 30        |
| 4.2      | Modelconcept                                                | 30        |
| 4.3      | Kalibratie van het model                                    | 31        |
| 4.4      | Toepassing van het model                                    | 33        |
| 4.5      | Conclusies                                                  | 35        |
| <b>5</b> | <b>Modelresultaten voor de stortstrategieën</b>             | <b>36</b> |
| 5.1      | Inleiding                                                   | 36        |
| 5.2      | Nulalternatief                                              | 36        |
| 5.2.1    | Zandbalans                                                  | 38        |
| 5.2.2    | Diepteveranderingen en kantelen                             | 39        |
| 5.2.3    | De invloed van ingrepen                                     | 40        |
| 5.2.4    | Volumeveranderingen in de baggergebieden                    | 42        |
| 5.3      | Alternatieve strategieën                                    | 44        |
| 5.3.1    | Strategie 1 en 2: Alles storten in de vaargeul of nevengeul | 44        |
| 5.3.2    | Samenvatting                                                | 52        |
| 5.4      | Een 'verbeterde' strategie                                  | 53        |
| 5.4.1    | Verbetering stortstrategie                                  | 53        |
| 5.4.2    | Resultaten SOBEK berekening met verbeterde stortstrategie   | 54        |
| 5.4.3    | Samenvatting                                                | 56        |
| 5.5      | Verruiming                                                  | 57        |
| 5.5.1    | Inleiding                                                   | 57        |
| 5.5.2    | Resultaten                                                  | 58        |
| 5.6      | Samenvatting, conclusies en aanbevelingen                   | 59        |
| <b>6</b> | <b>DELFT3D resultaten</b>                                   | <b>61</b> |
| 6.1      | Inleiding                                                   | 61        |
| 6.2      | Model opzet en overzicht berekeningen                       | 63        |
| 6.3      | Autonome ontwikkeling                                       | 65        |
| 6.4      | Storten op de plaatpunt van Walsoorden                      | 68        |
| 6.5      | Verruiming van vaargeul                                     | 71        |
| 6.6      | Invloed stortstrategie                                      | 78        |
| 6.7      | Samenvatting en conclusies                                  | 86        |
| <b>7</b> | <b>Samenvatting, conclusies en aanbevelingen</b>            | <b>88</b> |
| 7.1      | Samenvatting en conclusies                                  | 88        |
| 7.2      | Aanbevelingen                                               | 90        |
|          | Literatuur                                                  | 92        |
|          | Tabellen                                                    | 94        |
|          | Figuren                                                     | 96        |

---

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

In 2000 is de langetermijnvisie voor het Schelde-estuarium verschenen. De Langetermijnvisie (LTV) geeft voor het Schelde estuarium een globaal omschreven Streefbeeld voor 2030: het estuarium is in 2030 een gezond en multifunctionele estuarien watersysteem dat op duurzame wijze wordt gebruikt voor menselijke behoeften. Dit Streefbeeld kent vijf kenmerken (RWS en MVG, 2001), waarvan de volgende vier van belang zijn voor de strategische milieueffectenrapportage (S-M.E.R.):

1. De instandhouding van de fysieke systeemkenmerken van het estuarium is uitgangspunt voor het beheer en beleid.
2. Maximale veiligheid is een belangrijke bestaansvoorwaarde voor beide landen (Veiligheid).
3. Als trekpaard voor de welvaart zijn de Scheldehavens optimaal toegankelijk (Toegankelijkheid).
4. Het estuarien ecosysteem is gezond en dynamisch (Natuurlijkheid).

Om het Streefbeeld 2030 te kunnen bereiken dient op middellange en lange termijn een reeks van maatregelen of ingrepen te worden gerealiseerd op het gebied van Toegankelijkheid, Veiligheid en Natuurlijkheid. De instandhouding van deze fysieke systeemkenmerken is een randvoorwaarde waaraan (alternatieve) maatregelen en projecten zondermeer moeten voldoen. Voldoen deze niet, dan worden de projecten en maatregelen verder niet in beschouwing genomen. Voor het nader specificeren van deze maatregelen en projecten worden een S-M.E.R. en een maatschappelijke kosten-batenanalyse uitgevoerd (MKBA). De resultaten van deze studies vormen de basis voor het opstellen van de zogenaamde Ontwikkelingsschets Schelde-estuarium 2010 (OS2010), een beleidsplan voor de middellange termijn, door de opdrachtgever ProSes.

Het doel van de S-M.E.R. bestaat uit bijdragen aan een verantwoorde en strategische keuze uit diverse maatregelen, zodat in de Ontwikkelingsschets Schelde-estuarium 2010 een samenhangend pakket op de thema's Veiligheid, Toegankelijkheid en Natuurlijkheid kan worden gepresenteerd.

De studie voor het strategische milieueffectenrapportage wordt uitgevoerd door een consortium onder leiding van ARCADIS en Technum (CAT). Binnen het project zijn vijf deelonderzoeken gedefinieerd die door verschillende partners van het consortium worden uitgevoerd (

---

Tabel 1-1). WLLdelft Hydraulics heeft het morfologisch onderzoek uitgevoerd in de rol van genomineerde onderaannemer.

**Tabel 1-1: Samenstelling van het consortium en bijdragen aan het S-MER**

| Partij               | Rol                                                                                                                                  |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CAT                  | Consortiumleider en trekker van de S-M.E.R.<br>trekker deelonderzoeken Overige disciplines, Sturing en Intergratie,<br>Bodem Overig. |
| Alkyon               | Trekker van het deelonderzoek Water                                                                                                  |
| HWE                  | Trekker van het deelonderzoek Ecologie                                                                                               |
| IMDC                 | partij in het deelonderzoek Water voor wat betreft de Veiligheid                                                                     |
| WLI delft Hydraulics | trekker van het deelonderzoek Morfologie (Bodem)                                                                                     |

## **1.2 De instandhouding van de fysieke systeemkenmerken**

In de langetermijnvisie voor het Schelde-estuarium worden de fysieke systeemkenmerken van het estuarium als volgt gespecificeerd (RWS en MVG, 2001): 1) een open en natuurlijk mondingsgebied, 2) een systeem van hoofd- en nevengeulen met tussenliggende en aangrenzende intergetijdengebieden en ondiepwatergebieden in de Westerschelde en de Beneden Zeeschelde, het zogenaamde meergeulensstelsel, 3) een riviersysteem met een meanderend karakter in de Zeeschelde, en 4) een grote diversiteit van schorren, slikken en platen in zout, brak en zoet gebied, gecombineerd met natuurvriendelijke oevers.

Het morfologisch onderzoek dat in het kader van de S-M.E.R. wordt uitgevoerd, richt zich op het toetsen van de randvoorwaarden waaronder het meergeulensysteem in de Westerschelde en de Beneden Zeeschelde (tot aan het Deurganckdok) in stand kan worden gehouden. De instandhouding van het meergeulensysteem is nodig om de Toegankelijk, Natuurlijkheid en Veiligheid in het estuarium in de toekomst te kunnen waarborgen. Hierbij zijn minimaal vier morfologische aspecten van belang:

### **I De zandhuishouding van het estuarium**

De morfologische ontwikkelingen van de geulen, de intergetijdengebieden en de ondiepwatergebieden in het meergeulensysteem hangen nauw met elkaar samen (zie ook Hoofdstuk 2). Deze ontwikkelingen van het meergeulensysteem kunnen tot uitdrukking komen in veranderingen van de zandhuishouding van het estuarium. Met de zandhuishouding wordt bedoeld het grootschalige patroon van de lange-termijn gemiddelde sedimenttransporten en grootschalige tendensen van erosie en sedimentatie. De lange termijn (decennia-eeuwen) import van sediment (van zee) kan leiden tot een verlanding van het estuarium, terwijl export van sediment (naar zee) kan leiden tot een erosie van het estuarium, waarbij intergetijdengebieden verdrinken.

### **II Het systeem van hoofd- en nevengeulen**

De morfologische ontwikkeling van het systeem van hoofd- en nevengeulen is ook van belang voor de Toegankelijkheid naast de Natuurlijkheid en Veiligheid van het estuarium. De estuariene dwarsdoorsnede in de Westerschelde en de Beneden Zeeschelde tot aan het Deurganckdok wordt gekenmerkt door (minimaal) twee geulen die van elkaar gescheiden worden platen en/of ondiepwatergebied. Een van deze geulen wordt gebruikt als hoofdvaargeul en wordt daarom aangeduid als hoofdgeul. De andere geul wordt gebruikt als nevenvaarwater door de kleinere scheepvaart en wordt vaak aangeduid als nevengeul. Het behoud deze twee typen geulen is daarmee van praktisch belang voor de scheepvaart.

---

Een systeem met slechts één geul is eveneens niet wenselijk omdat een dergelijk systeem veel kleinere afmetingen zal hebben dan een twee-geulensysteem en daarmee beperkingen oplegt aan de afmetingen en intensiteit van de scheepvaart.

Om de hoofdvaargeul te onderhouden wordt op de ondiepe en smalle plaatsen in de vaargeul gebaggerd (in de Westerschelde ongeveer  $8-11 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ ). Het in de Westerschelde gebaggerde sediment, veelal fijn zand, wordt in het estuarium teruggestort. Het baggeren en storten ten behoeve van het vaargeulonderhoud en het winnen van zand voor en door de markt, beïnvloedt in eerste instantie de morfologische ontwikkeling van de geulen. Uit eerdere studies (o.a. Winterwerp et al., 2000; Wang en Winterwerp, 2001) is gebleken dat vooral het storten van baggerspecie kritisch kan zijn voor de instandhouding van het twee geulensysteem, ook wel aangeduid als de stabiliteit van het geulsysteem. Het langdurig storten van sedimenthoeveelheden die groter zijn dan de stortcapaciteit van het geulsysteem, kan leiden tot een zichzelf versterkend proces van sedimentatie in de geul waar te veel gestort wordt waardoor deze geul kan verzanden.

### III De ontwikkeling van de intergetijdengebieden.

Intergetijdengebieden zijn de gebieden die gelegen zijn tussen gemiddeld hoogwater en gemiddeld laagwater en dus ieder getij droogvallen. De intergetijdengebieden worden op basis van hun geografische locatie onderverdeeld in platen, gelegen tussen de geulen, en het slik langs de randen van het estuarium. De platen en slikken zijn belangrijke foerageergebieden voor vogels en spelen daardoor een prominente rol in het ecologisch functioneren en de Natuurlijkheid van het estuarium. Voor de ecologie zijn vooral veranderingen in het areaal intergetijdengebieden van belang. Ook vanuit het oogpunt van Veiligheid zijn de intergetijdengebieden belangrijk omdat ze zorgen voor een dissipatie van de getijenergie en daarmee de sterkte van de getijdoordringing en de extreme hoogwaterstanden in het estuarium beïnvloeden.

### IV De ondiepwatergebieden

Naast het intergetijdengebied is de ontwikkeling van het areaal ondiepwatergebied van belang. Dit gebied wordt vaak gedefinieerd als het gebied tussen het niveau van NAP-2m en NAP-5m en kan daarmee worden geclassificeerd als een subgetijdengebied (permanent onder water). Deze ondiepwatergebieden vervullen een kinderkamerfunctie voor jonge vis en garnaal waardoor zij van groot ecologisch belang zijn.

In de voorgaande alinea's is op hoofdlijnen aangeven waarom het meergeulensysteem van belang is voor de Veiligheid, Toegankelijk en Natuurlijkheid in het estuarium en welke morfologische aspecten hierbij van belang zijn. Het evalueren van de instandhouding van het meergeulensysteem, als functie van genoemde projecten en maatregelen, moet zich minimaal richten op de volgende vragen:

1. Hoe ontwikkelt de zandhuishouding van het meergeulensysteem zich?
2. Hoe verandert de stabiliteit van het systeem van hoofd- en nevengeulen en hiermee samenhangend:
  - a. Wat is de invloed van het vaargeulonderhoud en de zandwinning op de stabiliteit van het geulsysteem?
  - b. Hoe groot zijn de onderhoudsbaggerhoeveelheden die vereist zijn om de vaargeul naar Antwerpen toegankelijk te houden, in de huidige situatie en na een verdere verdieping?
  - c. Waar kan de specie het beste worden gestort vanuit het oogpunt van de stabiliteit van het geulsysteem?
3. Op welke wijze verandert het intergetijdengebied, het areaal in het bijzonder?
4. Op welke wijze verandert het areaal ondiepwatergebied?

---

### 1.3 Doelstelling en algemene aanpak van het morfologisch onderzoek

Het morfologisch onderzoek richt zich op het bepalen van de morfologische veranderingen van het meergeulensysteem voor de volgende projecten en maatregelen:

- 1) Een voortzetting van het huidige en voorgenomen beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning, het referentie-/nulalternatief,
- 2) een verdere verruiming van de vaargeul waarbij de volgende drie toegankelijkheidsalternatieven worden onderzocht:
  - a) Een verdieping van de vaargeul waarmee een getijonafhankelijke vaart van schepen met een diepgang van 13,1 m wordt gerealiseerd (minimale waterdiepte van GLLWS-14,7m)?
  - b) Een verdieping van de vaargeul waarmee een getijonafhankelijke vaart van schepen met een diepgang van 12,8 m wordt gerealiseerd (minimale waterdiepte van GLLWS-14,4m)?
  - c) Een verdieping van de vaargeul waarmee een getijonafhankelijke vaart van schepen met een diepgang van 12,5 m wordt gerealiseerd (minimale waterdiepte van GLLWS-14,1m)?
- 3) uitpolderingen langs de Westerschelde als maatregel voor natuurontwikkeling. Concreet gaat het hierbij om de uitpoldering van: i) de Braakman en ii) een combinatie van vijf kleine uitpolderingen ('Hals van Zuid-Beveland').

Bij al deze alternatieven dient de hoofddoelstelling, zoals beschreven in paragraaf 1.2 en vertaald naar de onderzoeksvragen 1 t/m 4, gewaarborgd te worden.

Het voorliggende rapport is het rapport van het vooronderzoek. In het kader van het morfologisch onderzoek, zijn naast dit rapport nog een ander rapport verschenen, namelijk het hoofdrapport van het morfologische onderzoek naar het verbeteren van de stortstrategie en het voorspellen van het onderhoudsbaggerwerk in de Westerschelde (Jeuken et al., 2004).

Het vooronderzoek is uitgevoerd om de onderzoeksvragen 2b en 2c te beantwoorden. De resultaten van deze voorstudie worden als uitgangspunt in het hoofdrapport gebruikt.

### 1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt de gebruikte aanpak besproken. Hierin komen de gebruikte modellen en de wijze waarop een zogenaamde 'verbeterde' stortstrategie wordt bepaald, kort aan de orde. In de daarop volgende hoofdstukken worden de verschillende onderzoeksmethodologieën meer uitgebreid besproken. In Hoofdstuk 3 wordt het SOBEK model en de validatie van de waterbeweging en de morfologie behandeld. Het model voor het bepalen van het benodigde onderhoudsbaggerwerk komt aan de orde in Hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 geeft vervolgens de SOBEK modelresultaten. In Hoofdstuk 6 worden de resultaten van het DELFT3D onderzoek nader besproken. Het rapport eindigt met Hoofdstuk 7 waarin de resultaten worden samengevat en conclusies worden getrokken.

Tabellen en figuren zijn zoveel mogelijk in de tekst opgenomen. Grote tabellen en figuren echter, die de leesbaarheid verstoren staan achteraan in het rapport

---

## 2 Aanpak

### 2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de gebruikte aanpak op hoofdpunten weergegeven. Allereerst staat er in paragraaf 2.2 een kort overzicht van de gehele aanpak en welke instrumenten daarbij worden gebruikt. In paragraaf 2.3 wordt vervolgens nader ingegaan op de bagger en stortstrategieën. In de daarop volgende paragrafen worden de gebruikte instrumenten kort beschreven.

### 2.2 Algemeen

Het gaat in deze studie om het voorspellen van de ontwikkeling van het meergeulensysteem van het Schelde estuarium vanaf de Zeeschelde tot en met de monding over een periode van 30 tot 50 jaar. In het bijzonder gaat het om de invloed van het bagger- en stortbeleid op deze ontwikkeling en of er bij een eventuele verruiming van de vaargeul voldoende stortcapaciteit in het systeem is zonder dat het systeem instabiel wordt. Er worden hiervoor de volgende instrumenten ingezet:

1. Het 1-dimensionale (1-D) SOBEK model voor het berekenen van de waterbeweging en morfodynamica van, met name, de geulen (zie paragraaf 2.3),
2. Het 1-element model voor het voorspellen van het te verwachten benodigde onderhoud na een verdieping (zie paragraaf 2.5), en
3. Het DELFT3D model voor het beantwoorden van specifieke vragen rondom de stortstrategie en het voorspellen van onderhoudsbaggerwerk (zie paragraaf 2.6).

Daarnaast wordt gebruik gemaakt van het Cellenconcept voor het bepalen van de stortcapaciteit in de geulen (zie paragraaf 2.4),

Het moet worden benadrukt dat de studie zoals beschreven in dit rapport geen volledige morfologische studie is. Omdat er met een 1-dimensionaal model wordt gewerkt is het niet mogelijk iets te zeggen over zaken zoals de mogelijke versteiling van de vooroever. Ook legt de resolutie van het model beperkingen op. Het gaat in deze studie dan ook vooral om de gemiddelde erosiesedimentatie in de geulen.

### 2.3 Stortstrategieën

#### 2.3.1 Een verbeterde stortstrategie

Zoals vastgelegd in het streefbeeld voor de Westerschelde moet het meergeulensysteem behouden blijven (RWS & MVG, 2001). In deze studie wordt er getracht om een stortstrategie te bepalen die bijdraagt aan het behoud van het meergeulensysteem in elk van de macrocellen<sup>1</sup> zoals gedefinieerd in het Cellenconcept (zie Figuur 2-2). Een belangrijke randvoorwaarde is dat de vaargeul op diepte blijft en dat zo mogelijk geen van de geulen sterk ondieper worden als gevolg van storten. Een dergelijke strategie wordt een 'verbeterde stortstrategie' genoemd. Stortstrategieën kunnen van elkaar verschillen in de combinaties van stortlocaties en de hoeveelheid te storten materiaal per locatie.

Het is mogelijk dat de ene geul dieper wordt terwijl de andere juist ondieper wordt of dat de diepte van de ene geul sneller verandert dan de andere. Dit kan het gevolg zijn van een natuurlijk proces maar ook van baggeren en/of storten.

---

<sup>1</sup> Vanwege het beperkte modelgebied zullen alleen de cellen 1-7 van het Cellenconcept worden beschouwd in deze studie.

---

In beide gevallen zal de verhouding tussen de gemiddelde diepten van de geulen veranderen, het systeem kantelt. Deze verhouding wordt weergegeven door de zogenaamde ‘kantelingindex’.

Het kantelen van een geulensysteem kan in het extreme geval leiden tot het verdwijnen van een geul. Ook is het mogelijk dat door het kantelen de kleinere (kortsluit-) geulen in een cel zullen verdwijnen waardoor de lokale dynamiek vermindert. De kantelindex is dus een belangrijke indicator voor het beoordelen van de stabiliteit en het morfodynamische karakter van een cel. Het is mogelijk dat de kantelindex constant blijft omdat beide geulen even snel ondieper worden. Ook dit kan leiden tot degeneratie van het systeem. Daarom is niet alleen de verhouding van de gemiddelde diepte van belang maar ook de daadwerkelijke diepte van de geulen. Voor de toegankelijkheid van de Westerschelde is de lokale kleinste diepte bepalend. Daarom wordt er specifiek naar de erosie en sedimentatie op de drempels in de vaargeul gekeken. Echter, hierbij moet gelijk worden opgemerkt dat hier niet voor wordt gevalideerd waardoor de onzekerheden groot zullen zijn.

### **2.3.2 Het ‘nulalternatief’**

De effecten van de verschillende bagger- en stortstrategieën worden geëvalueerd aan de hand van een referentiesituatie, het zogenaamde ‘nulalternatief’. Dit is de morfologische ontwikkeling van het geulensysteem als het bagger- en stortbeleid uit 2001 wordt voortgezet. Dit betekent dat er net zoveel sediment wordt weggehaald en toegevoegd d.m.v. baggeren, storten en zandwinnen als in 2001 het geval was. Ook de locaties waar dat gebeurd zijn gelijk. Er wordt dus geen rekening gehouden met bijstellingen van het beleid als gevolg van de waargenomen morfologische dynamiek. Het moet dan ook worden benadrukt dat het ‘nulalternatief’ geenszins moet worden gezien als de morfologische ontwikkeling in de komende 30 jaar. Het is een mogelijk scenario met daarin de noodzakelijke ingrediënten van vaargeulonderhoud, storten en zandwinning. Het wordt vooral gebruikt als referentie om de effecten van de verschillende bagger- en stortstrategieën te kunnen evalueren.

### **2.3.3 Alternatieve strategieën**

Het doel van de milieu studie voor de Westerschelde is het beantwoorden van de vraag of een verruiming mogelijk is, gegeven de randvoorwaarden die volgen uit de opgestelde streefbeelden. Dit betekent onder andere dat verruimen alleen kan als het meergeulensysteem behouden blijft in de komende 30 jaar.

Zoals gezegd verschillen stortstrategieën van elkaar in de combinatie van stortlocatie en de hoeveelheid te storten materiaal. Er kunnen in principe dus oneindig veel verschillende strategieën worden bedacht en er moeten dus keuzes worden gemaakt. Om te beginnen worden er daarom eerst de volgende twee simulaties gedaan:

1. Al de specie als gevolg van onderhoudsbaggerwerk wordt gestort in het hoofdvaarwater, en
  2. Al de specie als gevolg van onderhoudsbaggerwerk wordt gestort in de nevengeulen.
- De eerste kan worden gezien als de meest ‘negatieve’ mogelijkheid vanuit het oogpunt van het op diepte houden van de vaargeul en de tweede als de meest ‘positieve’ optie. De twee simulaties geven enig inzicht in de bandbreedte waarbinnen naar de verbeterde strategie moet worden gezocht. Samen met de informatie uit het nulalternatief geeft het inzicht in hoe de ‘morfologisch’ verbeterde stort strategie eruit zou kunnen zien.

---

Met het model voor het onderhoudsbaggerwerk wordt berekend wat de te verwachten toename van de stortvolumina zijn bij verruiming van vaargeul tot 13,1 m. Met deze gegevens worden vervolgens nog drie simulaties uitgevoerd waarbij de bodem wordt aangepast volgens de beoogde verruiming tot 13,1 m getij ongebonden diepgang:

1. Alleen onderhoudsbaggerspecie wordt gestort volgens de bepaalde verbeterde stortstrategie. Hierbij wordt aangenomen dat alle aanlegspecie uit het estuarium is verwijderd,
2. Zowel de aanleg- als de onderhoudsbaggerspecie wordt gestort volgens de bepaalde verbeterde stortstrategie,
3. De aanlegbaggerspecie wordt gebruikt in het mondingsgebied van de Westerschelde t.b.v zandsuppleties. Alle onderhoudsbaggerspecie wordt gestort volgens de bepaalde verbeterde stortstrategie.

## **2.4 SOBEK-model**

### **2.4.1 Algemeen**

Voor het modelleren van de waterbeweging en de morfodynamica wordt het door WL I delft Hydraulics ontwikkelde SOBEK model gebruikt (zie <http://www.sobek.nl/>). Dit 1D model is ontworpen voor riviersystemen en estuaria welke worden geschematiseerd door 'takken'. Per tak wordt opgegeven hoe het profiel eruit ziet en hoe lang deze is.

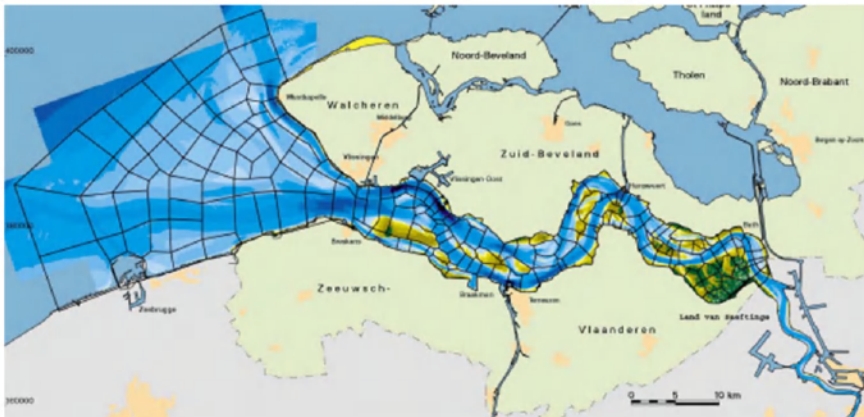
Er wordt gerekend met het SOBEK-river model, waarbij na elke stap van de stromingsberekening de morfologische veranderingen worden berekend (Wang et al, 2002). Om rekening te houden met het grote verschil tussen de morfologische en hydrodynamische tijdschalen en toch snel berekeningen te kunnen maken wordt het sedimenttransport met een factor N die (veel) groter is dan 1, vermenigvuldigd. Dit betekent dat na elke getijperiode de morfologische ontwikkeling van N getijperioden is berekend.

De gebruikte transportformulering is die van Van Rijn. Deze is o.a. gekozen omdat hij onafhankelijk is van de Chézy coëfficiënt. Dit is een belangrijke randvoorwaarde omdat in de schematisatie gebruik wordt gemaakt van een richtingsafhankelijke Chézy coëfficiënt om de reststroming goed te simuleren<sup>2</sup> (Wang et al, 2002).

In het model wordt het gebied geschematiseerd door het gebied op te delen in vakken of takken die aan elkaar zitten d.m.v. zogenaamde knopen. Er wordt gerekend met de bodem uit 2001. In Figuur 2-1 staat het gemodelleerde gebied aangegeven.

---

<sup>2</sup> Het gebruik van een richting afhankelijke Chézy-coëfficiënt wordt aanbevolen in Jeuken et al (2002) op basis van een analyse van de verschillende mechanismen die tot restcirculatie in de macrocel kunnen leiden.



**Figuur 2-1: Het gemodelleerde gebied in de Westerschelde.**

Baggeren, storten en zandwinning worden gesimuleerd in SOBEK door in vakken of takken over een op te geven lengte middels een constante flux sediment te onttrekken of toe te voegen. Er kan dus wel worden gekozen op welke geografische locatie er wordt ingegrepen maar niet op welke plaats in het profiel. Dit betekent dat in het model het baggeren van een geul en het storten van het gebaggerde materiaal op de geulwand op dezelfde locatie leidt tot een netto ingreep van nul.

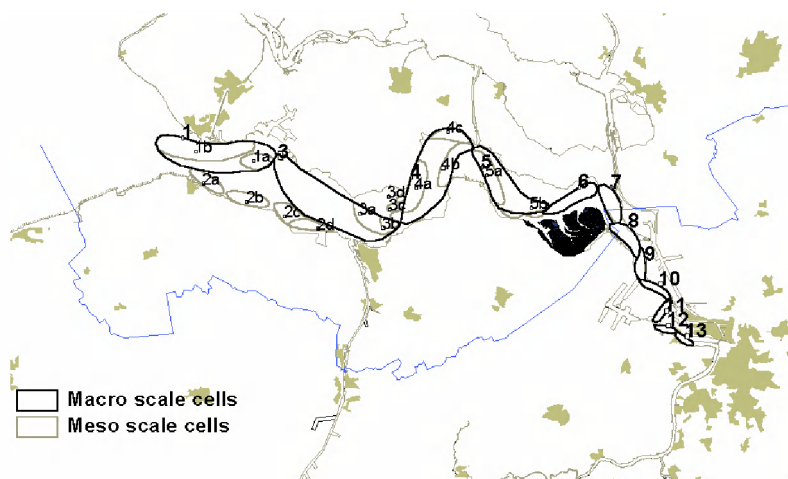
#### **2.4.2 Validatie**

In dit vooronderzoek is geen morfologische kalibratie c.q. validatie gedaan op basis van historische gegevens. Idealiter gebeurt dit wel maar vanwege de vele ingrepen in het systeem is dit een zeer tijdrovende procedure en is er, in overleg met de opdrachtgever, voor gekozen om dit niet te doen. De kalibratie-validatie voor de morfologie beperkt zich er toe te kijken of de voorspelde ontwikkelingen in lijn zijn met de meest recente waarnemingen. Er wordt hiervoor gebruik gemaakt van de veldwaarnemingen in de periode 1997-2002 zoals gerapporteerd in Jeuken et. al. (2003). Dit betreft de ontwikkeling van de hoofd- en nevengeulen in. Deze worden vergeleken met de resultaten van de eerste jaren van de simulatieperiode. Er wordt hierbij rekening gehouden met een zogenaamde 'inspeelperiode' van het model. Deze beperkte validatie draagt bij tot een grotere onzekerheid in de modelresultaten t.o.v. een 'normale' morfologische studie.

Voor de waterbeweging kan wel gebruik worden gemaakt van metingen. Hierbij wordt vooral gekeken naar de getij-asymmetrie, de amplificatie van het getij in het estuarium en de getij volumes. Het model wordt als gevalideerd beschouwd als de waterbeweging in 2001 'goed', d.w.z. binnen de foutenmarges, wordt gesimuleerd.

### **2.5 Het Cellenconcept**

In het Cellenconcept Westerschelde wordt het systeem van geulen en platen in het estuarium geschematiseerd als een 'ketting' van morfologische cellen (Winterwerp et al., 2000). Iedere cel bestaat uit twee naast elkaar gelegen geulen die al dan niet gescheiden worden door een plaat. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de grotere, zogenaamde macrocellen en de kleine mesocellen.



**Figuur 2-2: Het cellenconcept voor de Westerschelde**

Voor elke cel is uitgezocht hoeveel sediment er (ongeveer) in de geulen kan worden gestort zonder dat de geulen als gevolg van het storten op den duur verdwijnen. Dit is gedaan door middel van een stabiliteitsanalyse van het geulsysteem (zie bijvoorbeeld Jeuken et al 2003). De maximale hoeveelheid wordt het stortcriterium genoemd. Het gaat hierbij om het netto storten. Als er in dezelfde geul ook wordt gebaggerd dan moet deze hoeveelheid simpelweg bij de hoeveelheid gestort materiaal worden opgeteld (Jeuken, 2001).

Bij de ontwikkeling van het Cellenconcept is afgeleid dat de grootte van het stortcriterium in een geul gelijk is aan ongeveer 10% van de bruto transportcapaciteit van de gehele cel. De bruto transportcapaciteit is de som van het totale zandtransport in een cel tijdens één getijcyclus. In de verdere onderbouwing van het concept bleek echter dat het stortcriterium ook afhangt van de morfologische ontwikkeling van de cel al dan niet onder invloed van ingrepen. Er is daarom een nieuw stortcriterium ontwikkeld dat rekening houdt met de erosie en/of sedimentatie in de geulen en de uitwisseling tussen cellen (Jeuken et al., 2003).

Het is belangrijk te realiseren dat het stortcriterium uit het Cellenconcept continu verandert. De transportcapaciteit en de morfologie veranderen immers mede als gevolg van ingrepen. Het Cellenconcept is dan ook geen voorspellend model maar een stuk gereedschap dat helpt bij het bepalen van het bagger- en stortbeleid.

## **2.6 Model voor onderhoudsbaggerwerk**

Voor het voorspellen van het onderhoudsbaggerwerk na een verruiming van de vaargeul wordt een baggergebied als een element beschouwd waarvan wordt verondersteld dat het een 'evenwichtsdiepte' heeft die onvoldoende is voor scheepvaart. Het baggeren leidt daardoor tot een 'overdiepte' en dus een 'zandhonger'. Als gevolg hiervan treedt er sedimentatie op in het gebied. Het benodigde onderhoudsbaggerwerk wordt bepaald door de jaarlijkse sedimentatie. Deze is afhankelijk van de grootte van het gebied, de 'overdiepte' ofwel het verschil met de veronderstelde evenwichtsdiepte, de capaciteit van aanvoer van sediment uit de omgeving en de verticale uitwisselingsnelheid.

---

## **2.7 DELFT3D-model**

Het DELFT3D-model wordt ingezet voor het beantwoorden van specifieke vragen zoals: Wat is het effect van storten op een plaatrand? De opzet van het DELFT3D model wordt uitgebreid beschreven in Bijlage A.

---

## 3 SOBEK-model

### 3.1 Inleiding

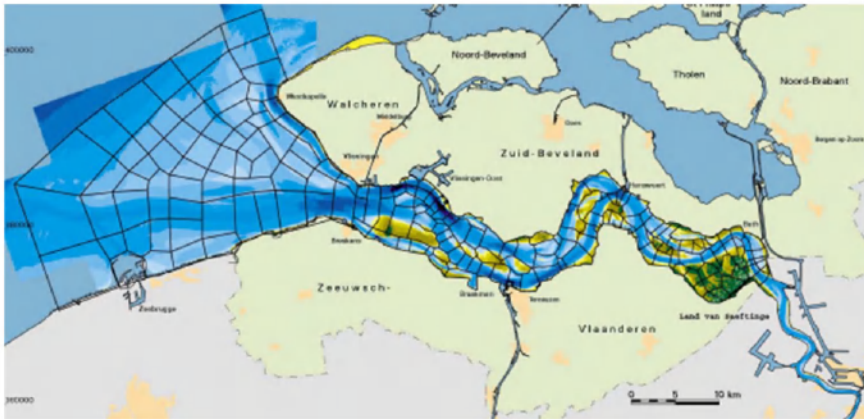
In dit hoofdstuk wordt de opzet en validatie van het 1D-model van de Westerschelde in SOBEK besproken. Dit model wordt gebruikt voor het berekenen van de morfologische ontwikkeling van het meergeulensysteem onder invloed van het baggeren en storten.

Voor de aanduiding van specifieke locaties in de tekst zal afwisselend gebruik worden gemaakt van de cellen zoals gedefinieerd in het cellenconcept en de geografische gebiedsnamen. In de tabellen en figuren zal over het algemeen alleen het nummer van de cel worden gegeven.

### 3.2 Opzet van het model

De gebruikte schematisatie voor de berekening van de waterbeweging en de morfologie staat aangegeven in figuur 3.1. Deze is gebaseerd op de schematisatie gemaakt voor het IMPLIC-model van Rijkswaterstaat, dat later is omgezet naar een SOBEK schematisatie en door het ESTMORF model wordt gebruikt. De dwarsprofielen in het oorspronkelijke model zijn gebaseerd op de bodemgegevens van 1968. In de huidige studie zijn de dwarsprofielen vervangen door gebruik te maken van bodemgegevens uit 2001. De andere modelinstellingen zoals de bodemruwheden zijn hetzelfde gehouden als in het oorspronkelijke model. Ook de randvoorwaarden voor de waterbeweging zijn hetzelfde gehouden. Verder zijn de volgende aanpassingen gedaan:

1. De waterbeweging wordt in het gehele gebied uitgerekend maar voor de morfologische berekeningen zijn de veranderingen ‘in het Verdrongen land van Saeftinghe’ en in de Zeeschelde vanaf de grens met België gelijk gesteld aan nul. Dit vastzetten van de bodem verkleint de kans dat het model instabiel wordt. Deze keuze wordt gerechtvaardigd omdat de uitwisseling van sediment met de Westerschelde klein is. Bovendien bestaat de bodem van de Zeeschelde vooral uit slib waardoor de transportformulering niet bruikbaar is. Het effect op de resultaten zal klein zijn omdat de invloed van deze twee gebieden op de Westerschelde gebeurt via de waterbeweging.
2. Voor een aantal cellen is de zogenaamde ‘dry-bed’ optie gebruikt. Deze maakt het mogelijk dat een tak bij laag water droog valt zonder dat de simulatie wordt afgebroken.
3. Net ten oosten van Terneuzen is een zogenaamde vaste laag in het model aangebracht op een diepte van 32.4 m. Deze representeert de daar aanwezige kleilaag. Dit betekent dat de bodem in het model op die locatie niet beneden het niveau van die laag kan eroderen. Het materiaal dat tijdens een simulatie er bij komt op een bepaalde locatie kan wel eroderen.



**Figuur 3-1: Een overzicht van het gemodelleerde gebied.**

De gebruikte instellingen van het model staan samengevat in Tabel 3-1. Belangrijk is op te merken dat het model zo is ingesteld dat erosie en sedimentatie van de bodem proportioneel met de diepte worden verdeeld over het profiel. Het diepste gedeelte van het profiel ondervindt dus de grootste veranderingen.

**Tabel 3-1: Modelinstellingen**

|                                                           |                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Randvoorwaarden                                           |                                                                                                                                       |
| - Zeewaartse rand (monding)                               | Periodieke tijdserie met waterstanden (per 10 min) opgebouwd uit 4 gemeten getijden uit 1971 ter grootte van een gemiddeld springtij. |
| - Landwaartse rand                                        | Constant debiet van 29 m <sup>3</sup> /s                                                                                              |
| Transportformulering                                      | Van Rijn                                                                                                                              |
| Begin bodem                                               | 2001                                                                                                                                  |
| Sedimenttransportbreedte                                  | Gelijk aan de breedte van de geulen                                                                                                   |
| Omzetten van volumeverandering naar een profielaanpassing | Proportioneel met de diepte                                                                                                           |
| Rekentijdstap                                             | 5 min                                                                                                                                 |
| Morfologische factor                                      | 119*                                                                                                                                  |
| 'Data-opslagfrequentie'                                   | Elke 885 tijdstappen (= 1 jaar)                                                                                                       |
| Simulatieperiode                                          | 50 jaar                                                                                                                               |
| Vaste lagen                                               | Bij Terneuzen (vak 38)                                                                                                                |

\* De morfologische factor bepaalt in feite de tijdstap van het morfologische rekenen. De gebruikte waarde is gekozen na een aantal numerieke experimenten zodanig dat een verdere verkleining geen significante invloed meer heeft op de resultaten.

### 3.3 Kalibratie en validatie van de waterbeweging

Voor de kalibratie en validatie van de waterbeweging wordt er gekeken naar de zogenaamde initiële of begin situatie waar morfologische veranderingen nog geen rol spelen. Voor de kalibratie van de waterbeweging is er naar de grootte en richting van de reststromen gekeken. Dit wordt besproken in paragraaf 3.3.3.

### 3.3.1 Beschikbare data

Voor de waterbeweging zijn de beschikbare gegevens:

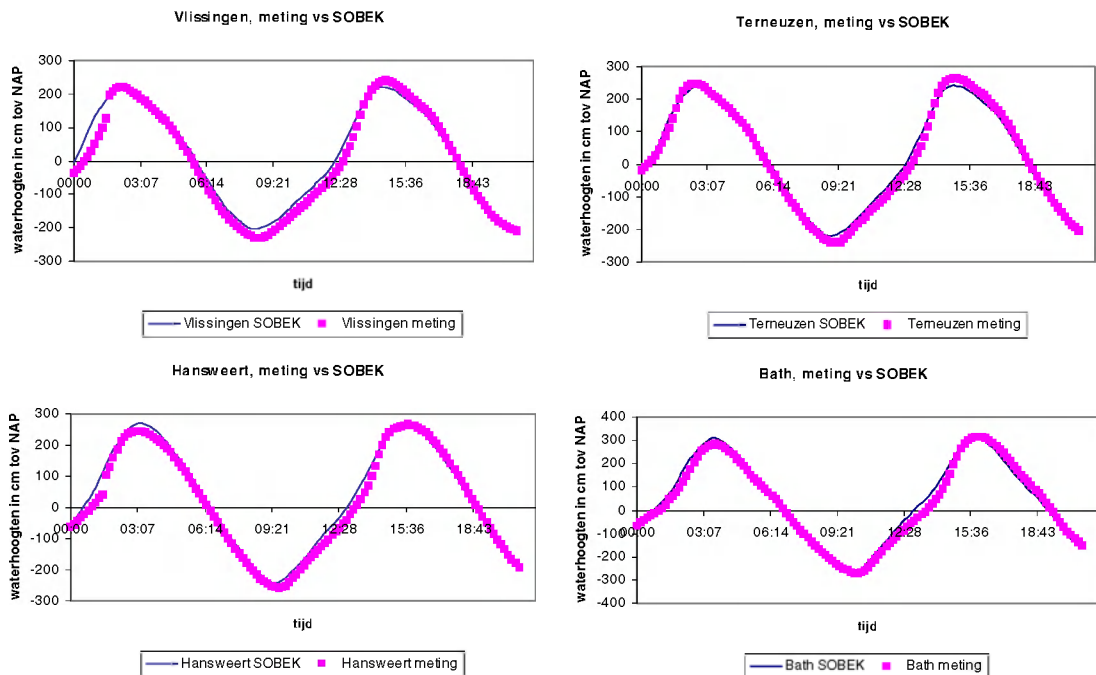
1. Tijdseries van de waterstanden per 10 minuten uit 2001 bij Cadzand, Westkapelle, Vlissingen, Terneuzen, Hansweert en Bath. Uit deze tijdseries zijn voor de periode mei 2001 door RWS de hoog- en laagwaterstanden en de tijdstippen waarop deze optreden, afgeleid d.m.v. interpolatie technieken. Er wordt aangenomen dat de onzekerheidsmarge in de gemeten hoog- en laagwaterstanden gelijk is aan 2 cm. De onzekerheid in het tijdstip waarop de hoog en laagwaterstanden zich voordoen is gelijk aan 5 minuten (K.Doekes, pers.com.).
2. Debietmetingen uit 1998, 2000 en 2001 over een aantal raaien. De locaties van de raaimetingen en de meetstations staan aangegeven in Tabel 3-2. Deze metingen zijn herleid tot de waarden behorend bij een gemiddeld getij. Er wordt aangenomen dat de hieruit afgeleide eb- en vloedvolumes een onnauwkeurigheidsmarge hebben van 10%.

**Tabel 3-2: Locaties van meetraaien en meetstations.**

| Macrocel | Locatie                      | Raai nummer en jaar van opname |
|----------|------------------------------|--------------------------------|
| 1        | Vlissingen (N)               | 10(2002), 9(2001)              |
| 3        | Terneuzen (Z)                | 7 (2002)                       |
| 4        | Hansweert (N)                | 6 (2001)                       |
| 5        | Valkenisse/Baalhoek (Z)      | 3 (2001), 5a(2002)             |
| 6        | (Nauw van) Bath (N)          | 2 (1998)                       |
| 7        | Vaarweg landwaarts Bath (ZW) | 1 (2000)                       |
|          |                              | 11 en 12 (1996)                |

### 3.3.2 Het verticale getij

De modelberekeningen zijn uitgevoerd met een gemiddeld springtij uit 1971. Idealiter moet voor de vergelijking tussen metingen en berekening worden uitgegaan van een zelfde getij uit 2001 omdat in het model de bodem van 2001 is geïmplementeerd. Maar de modelrandvoorwaarden voor een getij uit 2001 zijn niet beschikbaar. Vergelijkingen tussen metingen uit 1971 en berekeningen zijn eerder al uitgevoerd bij de kalibratie van het model met de bodem van 1968. Voor de validatie is daarom uit de metingen een periode in 2001 gekozen waarin de getijslag bij Vlissingen ongeveer gelijk is aan een gemiddeld springtij (=  $3.8 \text{ m} * 1.15 = 4.37$ ) zoals door het model is gesimuleerd. Om de invloed van eventuele stormen uit te sluiten is alleen gezocht in de meteorologische rustige meimaand. Uiteindelijk zijn de berekeningen vergeleken met de hoog- en laagwaterstanden zoals gemeten op 6 en 7 mei 2001. De getijslag bij Vlissingen was op dat moment  $4.47 \pm 0.04\text{m}$ . Dit is dus iets aan de hoge kant.

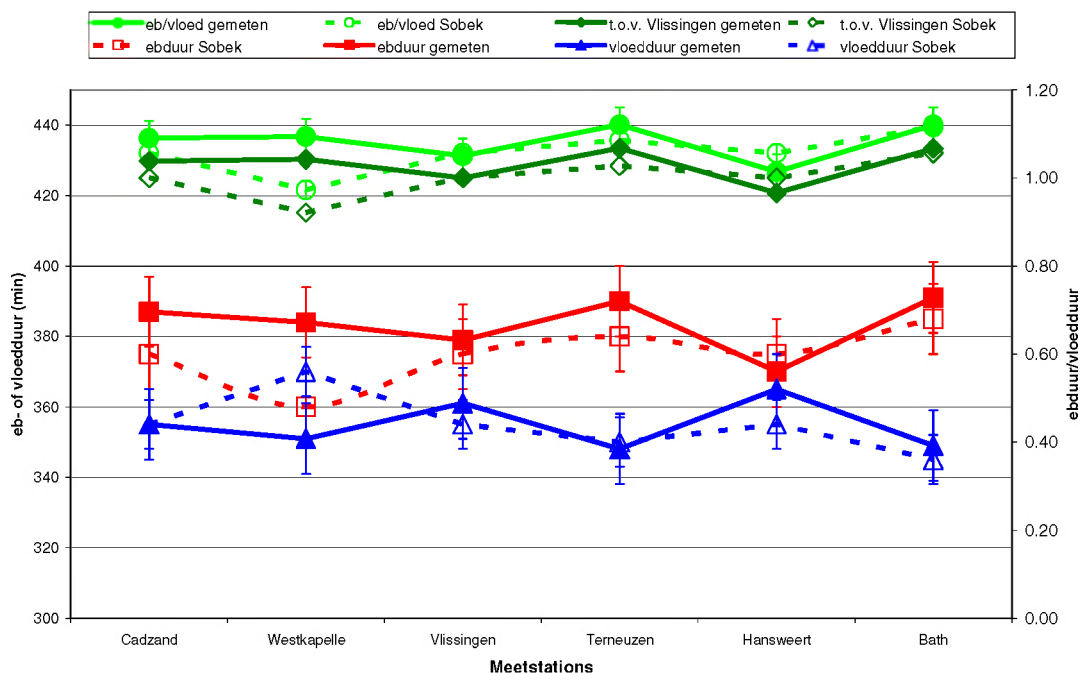


**Figuur 3-2: De berekende en gemeten waterstanden bij verschillende stations langs de Westerschelde. De doorgetrokken lijnen geven de modelresultaten (met randvoorwaarden uit 1971) en de gestippelde de gemeten waarden in mei 2001.**

Figuur 3-2 laat de berekende en gemeten waterstanden in de gekozen periode bij verschillende stations in het estuarium zien. Het is duidelijk dat het model bij Vlissingen een kleinere getijslag heeft dan de metingen in de gekozen periode. Dit verschil is ook bij de andere stations terug te zien. Wel neemt het verschil van het westen naar het oosten af. Dit betekent dat de door het model berekende amplificatie van het getij in het estuarium iets groter is dan in de werkelijkheid. Overall gezien is de overeenkomst tussen de modelresultaten en de metingen vergelijkbaar als de resultaten van de kalibratie van het oorspronkelijke stromingsmodel t.b.v. het ESTMORF model (Wang en Helvert, 2001).

### **Eb- en vloedduur**

De eb- en vloedduur in het model wordt vergeleken met die gemeten op de 6 stations (zie Tabel 3-2). Uit de onzekerheidsmarge van 5 minuten in het tijdstip van hoog- en laag water, volgt een marge van 10 minuten voor de gemeten eb- en vloedduur. Voor de berekende waarden wordt een zelfde marge aangehouden omdat de berekeningen zijn uitgevoerd met een tijdstap van 5 minuten. Figuur 3-3 laat de berekende en gemeten waarden zien. Gegeven deze onzekerheidsmarges komen de waarden uit het model voor de verschillende meetstations goed overeen met de metingen. Alleen bij Westkapelle wijkt het model significant af van de gemeten waarden. Dit heeft te maken met de bagger rondom het hoogwater die hier optreedt waardoor er een grotere onzekerheid ontstaat bij het bepalen van het tijdstip van hoogwater zowel in de modelresultaten als in de metingen.



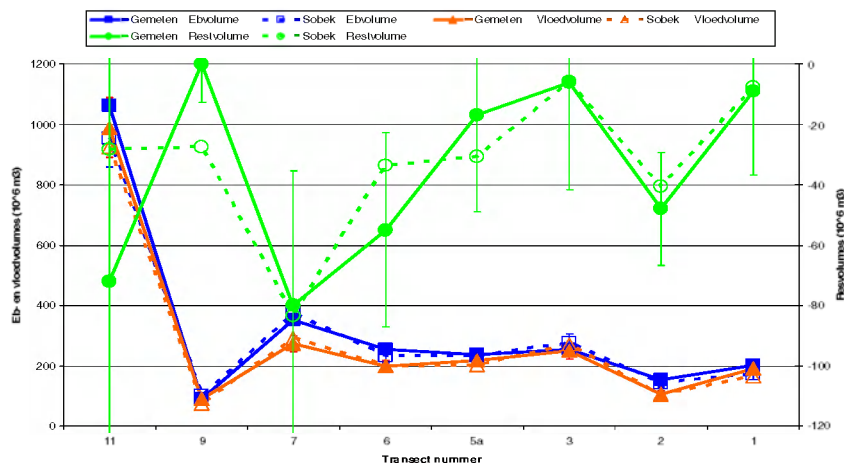
**Figuur 3-3: De eb- (■) ,vloedduur (▲) en de verhouding (●) bij de 6 meetstations. De doorgetrokken lijnen geven de gemeten waarden en de gestippelde de met SOBEK berekende waarden. De ♦ geeft de verhouding tussen de eb- en vloedduur t.o.v. van Vlissingen.**

### 3.3.3 Horizontaal getij

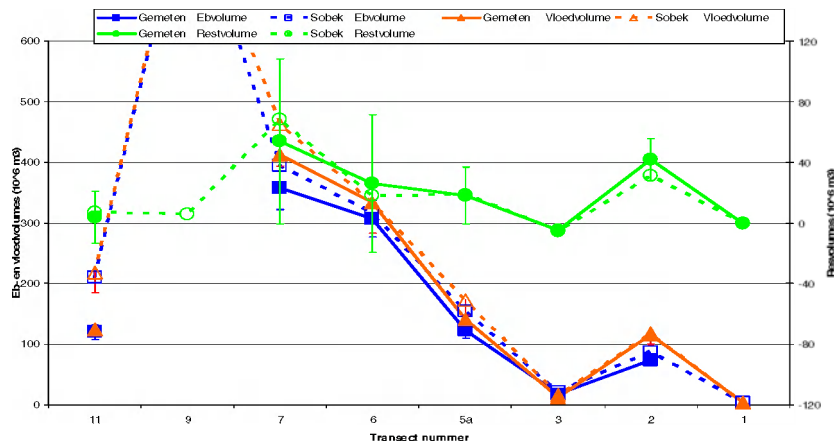
Voor de validatie van het horizontale getij gaat het in bijzonder om de correcte weergave van de restcirculatie in de macrocellen. Deze wordt bepaald door de eb- en vloedvolumes en het daaruit volgende restvolume. de restcirculatie is gebruikt om het model te kalibreren. Om deze grootheid met het model goed te kunnen simuleren wordt een richting afhankelijke Chézy coëfficiënt gebruikt (Jeuken et al., 2002; Wang et al., 2002). De waarden van deze coëfficiënt worden zodanig ingesteld dat voor de ebgeulen er in ebrichting er een gladdere bodem is en dus grotere Chézy waarde is gekozen. Voor de vloedgeulen is er juist voor de vloedrichting een grotere Chézy waarde gekozen. De resultaten die hieronder worden getoond zijn na kalibratie.

### Eb- en vloedvolumes

Bij het vergelijken van de gemeten met de berekende getijvolumes moet rekening worden gehouden met het feit dat SOBEK rekent met een gemiddeld springtij terwijl alle gemeten waarden 'zijn herleid' tot een gemiddeld getij. Om toch te kunnen vergelijken worden de door het model berekende eb- en vloedvolumes hiervoor gecorrigeerd (zie paragraaf 3.3.2).



**Figuur 3-4 a:** De eb- (■), vloed- (▲) en restvolumes (●), zoals gemeten en berekend in de ebgeul op de locaties van de verschillende raaien. De doorgetrokken lijnen geven de gemeten waarden en de gestippelde de met het model berekende waarden. De volgorde van de raaien is zodanig dat de ligging van west naar oost is. Waar een symbool ontbreekt, is geen meetwaarde beschikbaar.



**Figuur 3-4 b:** De eb- (■), vloed- (▲) en restvolumes (●), zoals gemeten en berekend in de vloedgeul op de locaties van de verschillende raaien. De doorgetrokken lijnen geven de gemeten waarden en de gestippelde de met het model berekende waarden. De volgorde van de raaien is zodanig dat de ligging van west naar oost is. Waar een symbool ontbreekt, is geen meetwaarde beschikbaar.

Figuren 3-4 a en 3-4 b laten de berekende en gemeten getijvolumes zien voor de eb- en vloedgeulen op de locaties van de meetraaien. De in de figuren aangegeven onzekerheidsmarges in het restvolume  $= \sqrt{\Delta EV^2 + \Delta FV^2}$  ofwel de wortel van de som van de kwadraten van de onzekerheidsmarges in de eb- en vloedvolumes. Omdat de getijvolumes in de ebgeul groot zijn geeft dit een relatief grote onzekerheid in de gemeten restvolumes.

De figuren laten zien dat de gemeten eb-, vloed en restvolumes door het model goed worden weergegeven. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat er idealiter met een langere tijdsreeks zou moeten worden vergeleken. Dit geldt voor zowel de absolute grootte als de trend. Alleen in de Sardijnegeul in de monding van de Westerschelde, de vloedgeul van raai 11, is het verschil tussen de berekende en gemeten eb- en vloedvolumes groter dan de foutenmarges.

---

### 3.4 Morfologische validatie

#### 3.4.1 Inleiding

Zoals al genoemd in Hoofdstuk 2 wordt het model niet, zoals in morfologische studies gewoon is, gekalibreerd en vervolgens gevalideerd aan de hand van historische gegevens. Dit kost simpelweg te veel tijd en er is daarom gekozen om dit in dit stadium van het onderzoek niet te doen. De 'validatie' in dit vooronderzoek beperkt zich daarom tot een vergelijking van de resultaten van het model in de eerste 5 jaar, uitgaande van de situatie in 2001, met de meest recente metingen van de morfologische ontwikkelingen. Twee berekeningen zijn hiervoor uitgevoerd, één zonder ingreep en één met ingrepen gebaseerd op gemiddelde waarden in de periode 1999 tot met 2001. Deze werkwijze zal de onzekerheden in de modeluitkomsten vergroten in vergelijking met een 'normale' validatie procedure. Echter het geeft wel de mogelijkheid om vast te stellen of de voorspelde morfologische veranderingen reëel zijn.

Voor de validatie van de morfologische uitkomsten van het model wordt er naar een aantal aspecten gekeken:

1. De berekende bruto transportcapaciteit welke gelijk is aan de som van het getransporteerde volume zand bij eb en vloed wordt vergeleken met de waarden die zijn bepaald voor de studie naar een Lange Termijn Visie voor het Schelde estuarium (RWS & MVG, 2001).
2. Naast de bruto transportcapaciteit is het netto- of resttransport van belang. Klopt de richting en grootte van de berekende resttransporten in de geulen?
3. De volumeverandering in de geulen. Hiervoor wordt een simulatie uitgevoerd met en zonder ingrepen. Er wordt gekeken naar de 'natuurlijke ontwikkeling' welke op twee manieren kan worden bepaald: 1) aan de hand van de simulatie zonder ingrepen en 2) door de uitkomsten van de simulatie met ingrepen te corrigeren voor de weggebaggerde of gestorte hoeveelheden materiaal.

#### 3.4.2 Beschikbare data

Voor de morfologie wordt gebruik gemaakt van profielmetingen uit de periode 1997-2002. Deze zijn door Jeuken et al (2003) geanalyseerd om de volumeverandering of erosie/sedimentatie in iedere geul beneden NAP + 3.5 m als functie van tijd te bepalen. Er worden drie verschillende volumeveranderingen onderscheiden:

1. Het waargenomen totale geërodeerde ( $\Delta V_{\text{tot}} < 0$ ) of gesedimenteerde volume, ( $\Delta V_{\text{tot}} > 0$ ),
2. De netto hoeveelheid gebaggerd ( $V_i < 0$ ) of gestort materiaal ( $V_i > 0$ ), en
3. Het verschil tussen bovengenoemde twee volumes wordt de natuurlijke erosie ( $\Delta V_{\text{nat}} < 0$ ) of sedimentatie genoemd ( $\Delta V_{\text{nat}} > 0$ ).

### 3.4.3 Sedimenttransport

Het bruto transport is de som van de momentane transporten ongeacht het teken of richting van het transport. Om dit te bepalen is er een berekening gemaakt met 8 getijden en de vermenigvuldigingsfactor N gelijk aan 1. Hierdoor is de morfologische situatie gedurende de gehele periode min of meer constant. Om de bruto transporten te bepalen is er gemiddeld over de laatste 4 getijden. De uitkomsten zijn omgerekend tot jaarlijkse transporten. In Tabel 3-3 staan de aldus met SOBEK berekende bruto transporten. Deze worden vergeleken met die verzameld door Storm (1996) uit verschillende bronnen en die bepaald met het DELFT3D model (Bijlage A). Zoals beschreven in Hoofdstuk 6 zijn de Delft3D berekeningen uitgevoerd voor een springtij-doodtij cyclus. De in Tabel 3-3 opgenomen waarden zijn afgeleid van een getijperiode waarvan de getijamplitude overeenkomt met het gemiddelde springtij. De onzekerheden in de gemeten waarden zijn onbekend.

**Tabel 3-3:** De berekende en gemeten gemiddelde jaarlijkse bruto transporten.

|                                 | cel 1 | cel 3 | cel 4 | cel 5 | cel 6 | cel 7 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SOBEK<br>(Mm <sup>3</sup> /j)   | 23    | 30    | 19    | 14    | 7     | 11    |
| Gemeten<br>Mm <sup>3</sup> /j   | 24-30 | 75    | 24    | 9-51  | 6     | 3     |
| DELFT3D<br>(Mm <sup>3</sup> /j) | 24.1  | 14.1  | 13.3  | 6.9   | 5.9   | 2.4   |

Tabel 3-3 laat zien dat de transporten zoals berekend door SOBEK redelijk overeenkomen met die bepaald uit de metingen. Alleen in macrocel 3 geven metingen een veel grotere waarde dan die berekend door SOBEK. In de meest oostelijk gelegen cel 7 daartegen is het juist andersom en is het berekende transport met SOBEK ruim 3 keer zo groot. Opgemerkt moet worden dat de in Tabel 3-3 gegeven meetdata, gezien het grillige verloop langs het estuarium en gezien het feit dat de data uit verschillende bronnen zijn verzameld (Storm, 1996,) alleen gebruikt worden als een indicatie van de orde van grootte van het bruto transport.

In vergelijking met de resultaten van het DELFT3D-model geeft het SOBEK model in bijna het gehele gebied grotere transporten. Het grote verschil in macrocel 7 komt doordat de morfologie van deze cel in de SOBEK schematisatie anders is dan die in het DELFT3D model. De leidam bij de grens is niet in het DELFT3D model meegenomen maar wel in het SOBEK model. Het gevolg is dat in het SOBEK model de vloedgeul Appelzak een doodlopende tak is en al het water door de ebgeul gaat waardoor de transportcapaciteit groter is. Een ander verschil is dat in het DELFT3D model het sediment een constante korrel diameter heeft terwijl in SOBEK deze afneemt van west naar oost. Verder laat ook het DELFT3D-model een afnemende bruto transport zien van west naar oost.

In

---

Tabel 3-4 staat de grootte en richting van het resttransport in de geulen. Dit is gelijk aan de som van de momentane transporten rekening houdend met de richting (teken) ervan. Zeewaarts heeft hierbij een negatief teken. Het laat zien dat de ebgeulen in de berekening inderdaad eb-gedomineerd zijn en de vloedgeulen vloed gedomineerd. Het laat ook zien dat de resttransporten met name in het westelijk deel van de Westerschelde groot zijn. Hierbij moet wel worden aangetekend dat er een sterke locatie afhankelijkheid is voor deze grootte en dat de in

---

Tabel 3-4 gepresenteerde waarde op één raai is.

**Tabel 3-4: De berekende jaarlijkse resttransporten per geul en per cel op basis van één raai per geul.**

|                                | cel 1 | cel 3 | cel 4 | cel 5 | cel 6 | cel 7 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ebgeul (Mm <sup>3</sup> /j)    | -0.5  | -6.2  | -1.6  | -1.1  | -1.6  | -0.4  |
| Vloedgeul (Mm <sup>3</sup> /j) | 2.7   | 5.3   | 3.4   | 1.2   | 2.8   | 0     |
| Totaal (Mm <sup>3</sup> /j)    | 2.2   | -1.0  | 1.8   | 0.1   | 1.2   | -0.4  |

#### 3.4.4 Volumeveranderingen

De berekende volumeveranderingen, erosie of sedimentatie in de geulen worden vergeleken met de gemeten veranderingen in de periode na de tweede verdieping 1997-2002. Daarnaast wordt er vergeleken met de uitkomsten van de simulatie gedaan met het DELFT3D-model over de periode 2001-2002. Er worden twee simulaties gedaan:

1. Een simulatie zonder ingrepen op basis van de bodem uit 2001, en
2. Een simulatie met ingrepen welke gelijk zijn genomen aan de gemiddelde hoeveelheden gebaggerd, inclusief zandwinning, en gestort materiaal in de periode 1999-2001. In Tabel 3-5 staan de gemiddelde jaarlijkse netto volumeveranderingen als gevolg van ingrepen in deze periode. Dit is gelijk aan het volume gestort materiaal minus het volume wat is verwijderd door baggeren en zandwinning.

Er moet worden opgemerkt dat in 1999 net na de tweede verdieping er meer is gestort, en gebaggerd, dan in de twee navolgende jaren waarin een kleine 10.5 miljoen kubieke meter is gestort. Daarnaast wordt er jaarlijks ook nog 2.6 miljoen kubieke meters zand gewonnen uit het gebied.

**Tabel 3-5: De gemiddelde jaarlijkse netto ingrepen in profielkuubs per geul in de periode 1999-2002.**

|                                | cel 1 | cel 3 | cel 4 | cel 5 | cel 6 | cel 7 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ebgeul (Mm <sup>3</sup> /j)    | 0.1   | -1.7  | 2.3   | -5.3  | -1.3  | -0.7  |
| Vloedgeul (Mm <sup>3</sup> /j) | 1.7   | 2.3   | 0.0   | 0.1   | 0.0   | 0.0   |

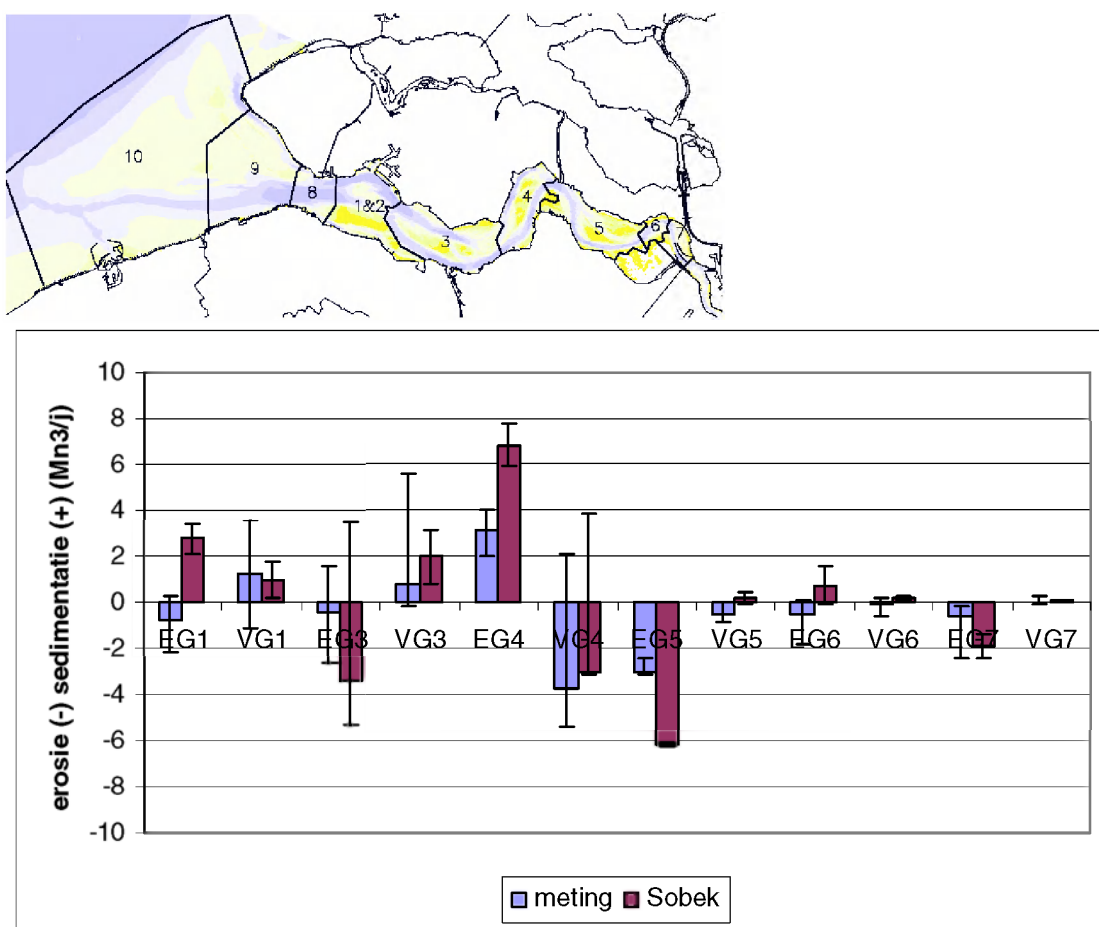
Bij het vergelijken van de modelresultaten met de metingen maken wij onderscheid tussen de totale volumeverandering en de natuurlijke volumeverandering. De totale volumeverandering is de sedimentatie in een gebied t.g.v. ingrepen en sedimenttransport door waterbeweging samen. De natuurlijke volumeverandering bevat alleen het deel dat wordt veroorzaakt door sedimenttransport. Voor uitgebreider uitleg zie Jeuken et al. (2004). In het geval dat de ingrepen niet zijn meegenomen in de berekening zijn de totale en de natuurlijke volumeveranderingen dus gelijk.

#### Totale volumeverandering (inclusief ingrepen)

In Tabel 3-6, zie achteraan in dit rapport, worden de 'gemeten' gemiddelde jaarlijkse volumeveranderingen over de periode 1997-2002, vergeleken met de berekende waarden door het SOBEK model over de periode 2002-2006. Om inspeleeffecten te vermijden zijn de resultaten over het eerste jaar de 2001-2002 niet meegenomen.

De resultaten zijn grafisch weergegeven in Figuur 3-3. Voor de meeste geulen klopt het teken en de orde van grootte van de berekende volumeverandering met die gemeten. Dit is zeker zo als de minimale en maximale waarden voor de berekende en gemeten volumeveranderingen mee in betrekking worden genomen. In Figuur 3-5 zijn deze weergegeven door de zwarte lijntjes. Twee opvallende punten die nog vermeld kunnen worden zijn:

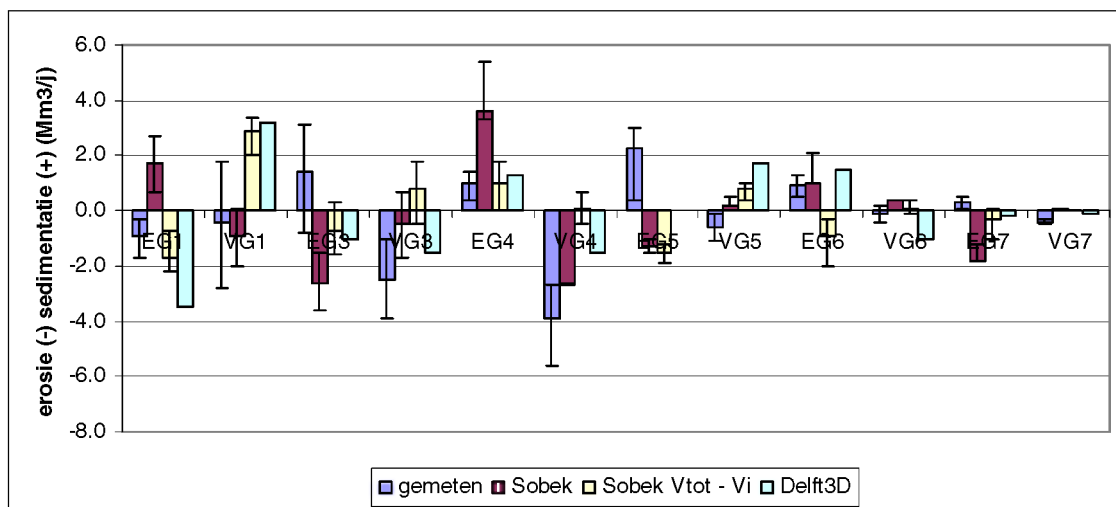
1. Het SOBEK model geeft met name in ebgeulen voor de periode 2002-2006 grotere jaarlijkse volumeveranderingen dan die gemeten in de periode 1997-2002 (orde factor 2). Dit is weer terug te voeren op de gebruikte randvoorwaarden bij het model.
2. Volgens de metingen is er in de periode 1997-2002, en in de jaren daarvoor ook, in de ebgeul van macrocel 1 gemiddeld sprake van erosie. Alleen in het laatste jaar is dit omgeslagen in (lichte) sedimentatie. Het SOBEK model voorspelt in de gehele periode 2002-2006 sedimentatie. Dit is dus in lijn met de waarneming in het laatste jaar.



**Figuur 3-5: Een grafische vergelijking van de berekende en gemeten jaarlijkse volumeveranderingen in de eb- en vloedgeulen van de macrocellen. De foutenmarges, weergegeven door de zwarte lijntjes, geven de minimale en maximale waarden in de periode van de metingen, 1997-2002 en berekeningen, 2002-2006.**

#### Natuurlijke volumeverandering

Figuur 3-6 laat de zogenaamde 'natuurlijke volumeverandering' zien (zie Hoofdstuk 2). Zowel de resultaten van een simulatie zonder ingrepen, als die afgeleid uit de berekende verandering met ingrepen ( $V_{\text{tot}} - V_i$ ) zijn in de figuur opgenomen. Ter vergelijking staan ook de resultaten van de berekening met het DELFT3D-model in de figuur. Bijbehorende Tabel 3-7 staat achteraan in dit rapport.

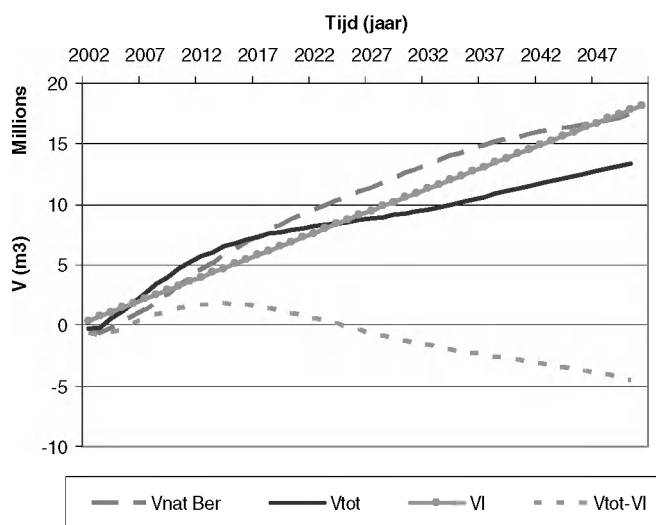


**Figuur 3-6: Een grafische vergelijking van de op verschillende manieren berekende natuurlijke jaarlijkse volumeveranderingen in de eb- en vloedgeulen van de macrocellen. De paarse balkjes geven de gemeten veranderingen in de periode 1997-2002. De foutenmarges, weergegeven door de zwarte lijntjes, geven de minimale en maximale waarden in de periode van de metingen, 1997-2002. en berekeningen, 2002-2006.**

De resultaten laten twee dingen zien:

1. De twee manieren waarop de 'natuurlijke' jaarlijkse volumeverandering bepaald wordt kan op de lange termijn tot significant verschillende resultaten leiden. Ter illustratie hiervan laat Figuur 3-7 de natuurlijke volumeverandering zien in de vloedgeul van macrocel 5 bepaald op de twee manieren. Het is duidelijk dat in de eerste jaren het verloop ongeveer gelijk is maar dat na 5 jaar er een duidelijk verschil is.
2. De overeenkomst tussen de berekende 'natuurlijke' erosie/sedimentatie (Figuur 3-6) en de metingen is minder goed dan die bij de totale volumeveranderingen (Figuur 3-5). Dit is niet verassend omdat er twee afgeleide grootheden met elkaar vergeleken worden. Opvallend hierbij is het verschil voor de ebgeul van macrocel 5, een locatie waar veel wordt gebaggerd en zandwinning plaats heeft. Volgens het model, echter, erodeert dit gebied van nature.

Figuur 3-6 laat ook zien dat de resultaten van het DELFT3D model over het algemeen redelijk overeenkomen met die van het SOBEK model. Er is echter ook een aantal verschillen. Het meest opvallend is dat voor de ebgeul van macrocel 1 het DELFT3D model erosie voorspelt terwijl er volgens het SOBEK model sprake is van sedimentatie. De verschillen worden voor een klein deel veroorzaakt door de verschillen in de begrenzing van de vakken wat direct te maken heeft met de manier waarop het estuarium is geschematiseerd in beide modellen. Voor het grootste deel worden de verschillen (DELFT3D over het algemeen kleinere veranderingen berekent) echter verklaard door de verschillende randvoorwaarden: het SOBEK model rekent met een constant gemiddeld springtij terwijl het DELFT3D model een doottij springtij cyclus doorrekent (zie ook Tabel 3-3).

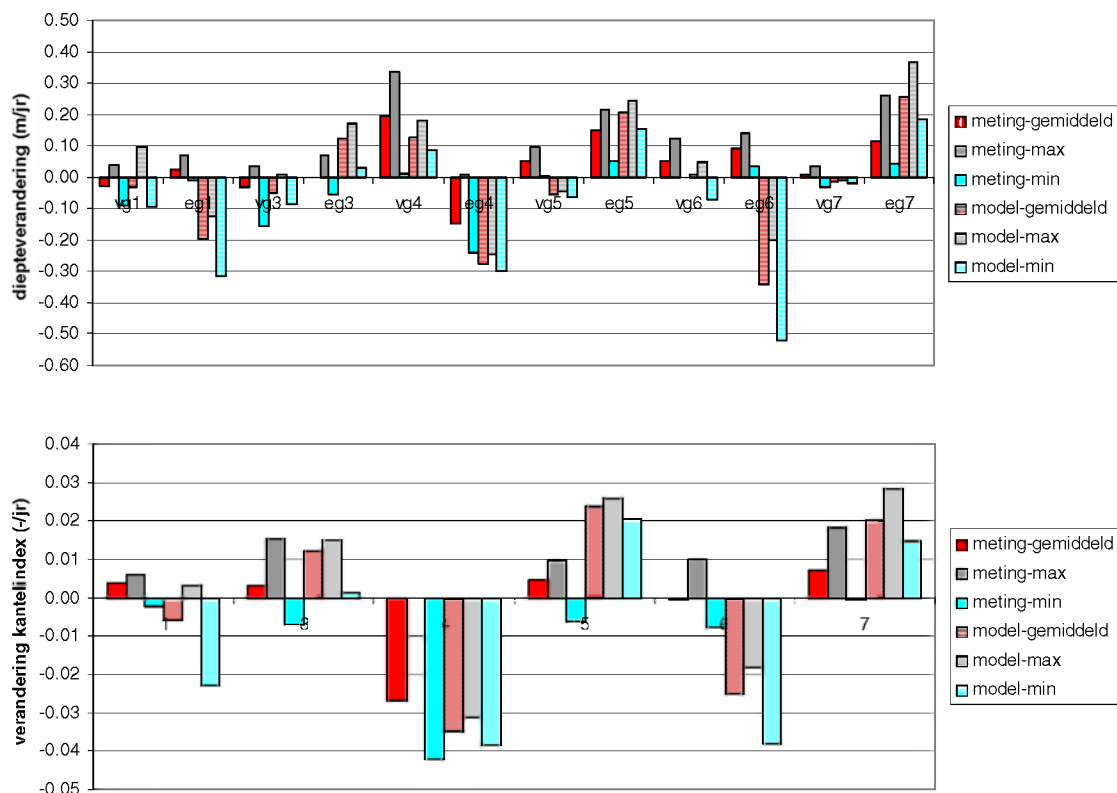


**Figuur 3-7: Vergelijking van verschillende manieren om de ‘natuurlijke’ volumeverandering in de vloedgeul van macrocel 5 te berekenen. De donkere gestreepte lijn is geeft de cumulatieve volumeverandering volgens een simulatie zonder ingrepen. De lichte gestippelde lijn is verkregen door de uitkomst van een simulatie met ingrepen, de zwarte lijn, te corrigeren voor de ingrepen weergegeven door de rechte lijn.**

Figuur 3-8 toont de gemeten en berekende diepteveranderingen en verandering van de kantelindex (zie Jeuken et al. 2004 voor de definitie) van de geulen in de macrocellen. Hieruit blijkt dat:

- De voorspelde en gemeten diepteveranderingen komen qua teken gedeeltelijk overeen (50-50%):
  - In de macrocellen 1 en 3 voorspelt het model een verondieping van de vloedgeulen die vergelijkbaar is met de waarnemingen. In de ebgeulen voorspelt het model een veel grotere verandering (macrocel 3) of een verandering die tegengesteld is aan de waarneming (macrocel 1, voorspelde sedimentatie versus waargenomen erosie/toename van de diepte). De oorzaak van deze verschillen is nog niet duidelijk. Bij de verschillen in de ebgeul van macrocel 3, de Pas van Terneuzen, spelen moeilijk erodeerbare lage net ten oosten van Terneuzen een rol in de te groot berekende erosie. De aanwezigheid van dergelijke lagen kan echter niet het hele verschil tussen meting en berekening verklaren.
  - In macrocel 4, nabij Hansweert, voorspelt het model een verondieping van de ebgeul en een verdieping van vloedgeul die vergelijkbaar is met de waargenomen veranderingen gedurende de periode 1997-2002.
  - In het oostelijk deel is de overeenkomst tussen berekende en gemeten diepteverandering vrij slecht. Alleen in de ebgeulen van macrocel 5 en macrocel 6 komen de meting en berekening qua teken en orde van grootte overeen.
- De voorspelde en gemeten verandering in de kanteling van het geulsysteem komen redelijk tot goed overeen. Alleen in macrocel 1, nabij Vlissingen, zijn de tekens echt tegengesteld. In macrocel 6, nabij Bath, is het teken nog wel hetzelfde maar verschilt de orde van grootte van de verandering tussen de meting en de berekening fors.
- Zowel de gemeten als de berekende diepteveranderingen en veranderingen in de kantelindex worden gekenmerkt door een vrij grote variatie in de tijd.

Deze uitkomsten betekenen dat de onzekerheden in de uitkomsten van de voorspelde kanteling kleiner zijn dan de onzekerheden in de voorspelde diepteveranderingen van de geulen. De onzekerheden zijn voor macrocel 4 het kleinst en het grootst voor macrocellen 6 en 1. Bij de toepassing van het model en de interpretatie van de modelresultaten moet hiermee rekening worden gehouden.



**Figuur 3-8: Gemeten (1997-2002) en berekende (2002-2006) diepteverandering (boven) en kanteling (onder) van het geulsysteem in de macrocellen.**

### 3.5 Conclusies en discussies

#### 3.5.1 Conclusies

Het horizontale en verticale getij zoals berekend door het model komen over het algemeen goed overeen met de beschikbare gemeten waarden. Het meest opvallend is het verschil in de toename van de getijslag van Terneuzen naar Hansweert; deze is volgens het SOBEK model groter dan de metingen aangeven. Belangrijk voor het morfologische modelleren is dat de overeenkomst voor het horizontale getij, uitgedrukt in termen van vloed-, eb- en restvolumes, goed is.

Met betrekking tot morfologie wordt geconcludeerd dat de met het SOBEK model berekende morfologische ontwikkeling redelijk in lijn is met de meest recente metingen. Hetzelfde kan worden gezegd wanneer de resultaten worden vergeleken met de uitkomsten van het DELFT3D model zoals is gedaan in Tabel 3-7. Het meest opvallende verschil zit in de ebgeul van macrocel 1 waar er volgens het SOBEK model sprake is van sedimentatie terwijl zowel de metingen als het DELFT3D model erosie laten zien. Daarnaast geeft het model in het algemeen grotere volumeveranderingen in de ebgeulen dan er zijn gemeten in de afgelopen periode. Dit valt terug te voeren op de meer 'extremere' randvoorwaarden in het SOBEK model waardoor de veranderingen sneller gaan dan in de werkelijkheid.

De voorspelde en gemeten verandering in de kanteling van het geulsysteem komen redelijk tot goed overeen. Alleen in macrocel 1, nabij Vlissingen, zijn de tekens echt tegengesteld.

---

In macrocel 6, nabij Bath, is het teken nog wel hetzelfde maar verschilt de orde van grootte van de verandering tussen de meting en de berekening fors.

### **3.5.2 Onzekerheden**

In paragraaf 3.4 is bij de validatie van de waterbeweging al aandacht gegeven aan de onzekerheden in de resultaten. Voor morfologische ontwikkelingen is dat moeilijker. Zoals al herhaaldelijk genoemd is het huidige model niet op de 'normale' wijze gekalibreerd en gevalideerd met een zogenaamde hindcast. Dit heeft zeker in de absolute uitkomsten een grote onzekerheidsmarge tot gevolg. Echter, zoals gezegd in Hoofdstuk 2 worden de resultaten van de verschillende berekeningen alleen relatief beschouwd t.o.v. het zogenaamde nulalternatief. De onzekerheden in de uitkomsten van de voorspelde kanteling zijn acceptabel. De onzekerheden zijn voor macrocel 4 het kleinst en het grootst voor macrocellen 6 en 1. Bij de toepassing van het model en de interpretatie van de modelresultaten moet hiermee rekening worden gehouden.

Hieronder wordt nog een aantal andere potentiële bronnen van onzekerheid besproken.

#### **Transportformulering**

Er zijn vele formules om het sedimenttransport te bepalen met elk zijn voor en nadelen. Het gebruik van verschillende formuleringen kan heel verschillende uitkomsten geven. Echter, er wordt eerst een, zij het beperkte, kalibratie uitgevoerd waardoor er geen sprake kan zijn van verschillen van orde van groottes. Ook wordt er vooral relatief t.o.v. het nulalternatief naar de resultaten gekeken. Bovendien is er heel bewust voor de transportformulering van Van Rijn gekozen omdat deze onafhankelijk is van de Chézy coëfficiënt. Dit is belangrijk omdat er een richtingsafhankelijke coëfficiënt wordt gebruikt in het model (zie hiervoor Wang et al., 2002).

De manier waarop het sediment zich verdeelt op een splitsingspunt wordt bepaald door de K-waarde (Wang & Winterwerp, 2000). In Wang et al (2002) is afgeleid dat bij gebruik van de transport formulering van Van Rijn de waarde 1.8 moet zijn. Om de gevoeligheid voor deze waarde te testen zijn twee sommen gedaan waarbij de grootte 10% is veranderd. Hieruit blijkt dat de invloed daarvan op de resultaten verwaarloosbaar is en de stabiliteit van het geulsysteem verandert dan ook niet.

#### **Schematisatie**

De manier waarop het te modelleren gebied wordt geschematiseerd heeft invloed op de uitkomsten. Een van de problemen bij de schematisatie is dat het 'statisch' is terwijl de geulen zich kunnen verplaatsen. Dit is een bron van onzekerheid voor berekeningen over een langere periode waarvan de impact moeilijk is in te schatten. Voor de grotere eb- en vloedgeulen die worden onderhouden door baggeren zal de impact beperkt zijn omdat de locatie vast ligt. Het zal met name een grote rol spelen voor de kleine kortsluitgeulen. De dynamiek hierin is van belang geweest voor de sedimentuitwisseling tussen cellen. Uit de historie is gebleken dat dit met name zo is geweest voor de macrocellen 3 en 4. Dit niet meenemen hiervan heeft dus invloed op de resultaten.

---

### **Zeespiegelstijging**

Zeespiegelstijging wordt niet expliciet meegenomen in het model. Dit gebeurt vooral omdat alle uitkomsten relatief t.o.v. het nulalternatief wordt bekeken. Daarnaast zijn er nog twee redenen:

1. In Jeuken et al (2003) is kwalitatief afgeleid dat de zeespiegelstijging overeenkomt met extra baggeren in het gebied. De impact op de stabiliteit van het geulensysteem daarvan is gering.
2. Uitgaande van het middenscenario voor de zeespiegelstijging, zoals gebruikt door Rijkswaterstaat, is de stijging in 50 jaar 30 cm, ofwel 18 cm in 30 jaar. Dit is dus een extra onzekerheid in de volumeverandering van de geulen die gering is t.o.v. de al bestaande onzekerheden.

---

## 4 Het model voor onderhoudsbaggerwerk

### 4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een eenvoudig model besproken waarmee het onderhoudsbaggerwerk op een drempel kan worden voorspeld bij een verruiming of verdieping van de vaargeul. Nadat er in paragraaf 4.2 een afleiding van het model is gegeven wordt dit in paragraaf 4.3 gekalibreerd. De toepassing voor het voorspellen van het onderhoudsbaggerwerk na een verruiming wordt besproken in paragraaf 4.4.

### 4.2 Modelconcept

Voor het voorspellen van het onderhoudsbaggerwerk wordt een baggergebied beschouwd als één element. Van het gebied wordt verondersteld dat er een evenwichtsdiepte is die te klein is voor scheepvaart zodat er door baggeren een 'overdiepte' wordt gecreëerd. Deze 'overdiepte' heeft tot gevolg dat er een zandhonger ontstaat en er sedimentatie optreedt in het gebied. Het onderhoudsbaggerwerk wordt bepaald door de snelheid waarmee dit gebeurt. Het gebruikte modelprincipe is gelijk aan dat van het ESTMORF- model dat wordt gebruikt om de ontwikkeling van het plaat-geul systeem te voorspellen (Jeuken et al. 2004).

Om de sedimentatie snelheid  $S$  te bepalen stellen we eerst een massa balans voor de waterfase in het gebied op:

$$\delta(c_E - c) = w_s A(c - c_e), \quad 4.1$$

met

|          |   |                                                                           |
|----------|---|---------------------------------------------------------------------------|
| $\delta$ | = | horizontale uitwisselingscoëfficiënt ( $\text{m}^3/\text{s}$ )            |
| $c_E$    | = | sediment concentratie in de omgeving<br>= volume bodem / volume water (-) |
| $c$      | = | sediment concentratie in het gebied (-)                                   |
| $w_s$    | = | verticale uitwisselingssnelheid ( $\text{m/s}$ )                          |
| $A$      | = | oppervlakte van het baggergebied ( $\text{m}^2$ )                         |
| $c_e$    | = | lokale evenwichtsconcentratie (-)                                         |

Het rechter lid van deze vergelijking is gelijk aan de sedimentatie snelheid  $S$ , ofwel het onderhoudsbaggerwerk. Fysisch betekent het dat er sedimentatie optreedt omdat er meer sediment wordt aangevoerd dan de sediment transport capaciteit in het baggergebied. De lokale evenwichtsconcentratie is dus een mate van de lokale sediment transport capaciteit die is gerelateerd aan de verhouding tussen de evenwichtsdiepte en de onderhouden diepte (zie vergelijking 4.2 hieronder).

Links van het gelijkteken staat de aanvoer van sediment vanuit de omgeving door intergetijde dispersie<sup>3</sup>. Dit beschrijft de gemiddelde sedimentuitwisseling over een getijperiode, of met andere woorden de netto resultaten van de eb- en vloedfase. De formulering van deze term kan het men best begrijpen door de eb- en vloedperiode apart te beschouwen. Voor beide perioden wordt de aanvoer van sediment beschreven door advectie, zoals in het geval van een zandvang.

---

<sup>3</sup> In de Westerschelde is suspensietransport de dominante manier van zandtransport. Het is verantwoordelijk voor ongeveer 80% van het totale zandtransport.

Het netto resultaat van de twee perioden is een dispersie relatie omdat de eb- en vloedstroming omgekeerde richtingen hebben en het netto debiet in het estuarium relatief klein is.

Omdat de sediment concentratie  $c$  in het baggergebied minimaal gelijk is aan nul, is volgens 4.1 het maximale theoretische onderhoudsbaggerwerk gelijk aan  $\delta c_E$ .

De evenwichtsconcentratie  $c_e$  in het gebied wordt bepaald door de verhouding tussen de te onderhouden diepte  $h$  en de evenwichtsdiepte  $h_e$ :

$$c_e = c_E \left( \frac{h_e}{h} \right)^n \quad 4.2$$

met  $n$  een constante. De verhouding tussen de evenwichtsdiepte en de onderhouden diepte is eigenlijk een maat van de stroomsnelheid in het baggergebied t.o.v. de niet verstoorde evenwichtsituatie. Deze formulering voor de lokale evenwichtsconcentratie zegt dus dat de evenwichtsconcentratie evenredig is met een macht van de stroomsnelheid.

Deze relatie impliceert dat als er geen overdiepte is en  $h$  dus gelijk is aan  $h_e$  de evenwichtsconcentratie gelijk is aan de concentratie  $c_E$  in de omgeving. Er zal dan geen sedimentatie op de drempel plaats vinden.

Uit 4.1 en 4.2 volgt dat de sedimentatie snelheid  $S$  en dus het onderhoudsbaggerwerk in het gebied gelijk is aan

$$S = w_s A (c - c_e) = \frac{w_s A \delta}{w_s A + \delta} (c_E - c_e) = \frac{w_s A \delta c_E}{w_s A + \delta} \left( 1 - \left( \frac{h_e}{h} \right)^n \right) \quad 4.3$$

Hiermee is afgeleid hoe het onderhoudsbaggerwerk afhangt van kenmerken van het gebied, kenmerken van de omgeving, en parameters die sedimenttransport processen beschrijven.

### 4.3 Kalibratie van het model

Voor de Westerschelde is er al een gekalibreerd ESTMORF model beschikbaar. De waarden van de parameters  $c_E (=0.00005)$  en  $n (=4)$  zijn direct van het ESTMORF model overgenomen. De parameters  $\delta$  en  $h_e$ , zijn de aangewezen kalibratieparameters omdat ze beide gebied specifiek zijn. Echter, uit een nadere analyse blijkt  $\delta$  niet gevoelig te zijn voor de baggerhoeveelheid. Het blijkt ook dat de oppervlakte  $A$  van een gebied vaak voor vele jaren achter elkaar constant blijft. Dit komt door het feit dat niet het oppervlak van het daadwerkelijk gebaggerde gebied wordt opgegeven, maar het oppervlak van het baggergebied volgens de vergunning. Dit betekent dus een grote onzekerheid in de parameter  $A$ . Deze kan gedeeltelijk worden opgevangen door  $w_s$  als kalibratie parameter<sup>4</sup> te beschouwen, hoewel de waarde van  $w_s$  ook uit het ESTMORF model kon worden overgenomen, omdat  $w_s$  en  $A$  alleen als combinatie voorkomt in het model. De aanpassing van deze coëfficiënt compenseert dus voor de onzekerheid in de gegeven oppervlakte van het onderhouden gebied. Er wordt dus impliciet aangenomen dat de verhouding tussen de oppervlakte van het werkelijk onderhouden gebied en die van het opgegeven (totale) gebied voor een bepaald baggergebied constant blijft in de tijd.

<sup>4</sup>Men kan dit ook interpreteren als een extra coëfficiënt voor het product  $w_s A$ .

Voor 14 baggergebieden zijn de benodigde gegevens verzameld om het model te kalibreren. Voor de kalibratie zijn de waarden van  $w_s$  en van  $h_e$  gevarieerd. De resultaten van de kalibratie worden gepresenteerd in de figuren 4-3 – 4-17 waarin de berekende baggerhoeveelheid uit het model worden vergeleken met de verzamelde gegevens. In Tabel 4-1 zijn de waarden van de parameters per gebied voor een specifieke periode gegeven. De gehanteerde perioden zijn bepaald aan de hand van de variatie van de kenmerken van het baggergebied in de tijd, rekening houdend dat in sommige perioden het gebied is verdiept.

De drempelgebieden waar de nadruk is gelegd in de huidige studie zijn in **vet** aangegeven in de tabel. In sommige figuren is ook de periode gemiddelde waarde van de gegevens gepresenteerd.

De figuren laten zien dat het model redelijk tot goed in staat is om de gemeten baggerhoeveelheden te simuleren.

**Tabel 4-1: Parameters na kalibratie. De waarde van  $\delta$  is gelijk aan 117810 m<sup>3</sup>/s, cE = 0.00005 en n=4.**

| gebied                                     | periode          | $w_s$<br>(m/s) | $h_{e-\text{begin}}$<br>(m) | $h_{e-\text{end}}$<br>(m) |
|--------------------------------------------|------------------|----------------|-----------------------------|---------------------------|
| 1 grens                                    | 1967-1977        | 0.001          | 13.2                        | 13.2                      |
| 2 Vaarwater boven Bath naast leidam        | 1960-1984        | 0.0014         | 13                          | 13                        |
| <b>3 Drempel van Bath</b>                  | <b>1955-2001</b> | <b>0.002</b>   | <b>6</b>                    | <b>14</b>                 |
| <b>4 Drempel van Valkenisse</b>            | <b>1955-2001</b> | <b>0.0014</b>  | <b>8</b>                    | <b>8</b>                  |
| 5 Overloop van Valkenisse (rechteroever)   | 1976-2001        | 0.0014         | 8                           | 8                         |
| 6 Overloop van Valkenisse (rechteroever)   | 1962-2001        | 0.0012         | 10                          | 10                        |
| 7 Bocht van Walsoorden                     | 1955-2001        | 0.0014         | 8                           | 8                         |
| 8 Drempel Hansweert                        | 1955-2001        | 0.001          | 8                           | 8                         |
| 9 Overloop van Hansweert                   | 1960-2001        | 0.0014         | 10                          | 10                        |
| 10 Overloop van Hansweert/ Gat van Ossenis | 1982-2001        | 0.001          | 10                          | 10                        |
| 11 Gat van Ossenis                         | 1969-2001        | 0.0014         | 8                           | 8                         |
| 12 Pas van Terneuzen                       | 1980-2001        | 0.001          | 12                          | 12                        |
| <b>13 Drempel van Borssele</b>             | <b>1973-2001</b> | <b>0.001</b>   | <b>10</b>                   | <b>10</b>                 |
| <b>14 Drempel van Vlissingen</b>           | <b>1976-2001</b> | <b>0.0014</b>  | <b>14</b>                   | <b>14</b>                 |

De volgende punten zijn verder nog van belang:

1. Alleen bij de Drempel van Bath, gebied 3, is het nodig gebleken de waarde van  $h_e$  in de tijd te laten variëren. Tot en met 1990 is dit gelijk gesteld aan 6 m, In de periode 1991-1996 is dit 12 m en 14 m in de laatste periode. Het is natuurlijk niet te rechtvaardigen om de waarde van een dergelijke parameter per jaar te laten veranderen. Het feit dat het alleen voor dit gebied nodig is, wordt mogelijk verklaard doordat alleen in het oostelijk deel de grootschalige morfologische ontwikkelingen tot gevolg hebben dat de natuurlijke drempelhoogte is veranderd.

- 
2. Het grensgebied en het vaarwater boven Bath, respectievelijk gebied 1 en 2, zijn voor de voorspelling van baggerbehoefte in de toekomst niet in beschouwing genomen omdat er al langere tijd niet meer wordt gebaggerd. Ook het Gat van Ossensisse, gebied 11, wordt niet gebruikt voor de voorspelling van de baggerbehoefte. Er heeft hier namelijk een functiewisseling plaatsgevonden tussen de twee geulen in dit gebied, waardoor de vaarroute is verlegd.
  3. Bij de drempel van Bath, gebied 3, is in midden jaren 80 opeens veel gebaggerd (meer dan 5 miljoen m<sup>3</sup> zand in een jaar). Dit komt door de verbreding van het Vaarwater boven Bath in 1986.
  4. Voor de drempel van Vlissingen, gebied 14, is er slechts weinig data beschikbaar. Dat er eerder niet gebaggerd hoefde te worden, impliceert dat de evenwichtsdiepte van het gebied boven de te onderhouden diepte lag.

#### **4.4 Toepassing van het model**

Met het model kan in principe het benodigde onderhoudsbaggerwerk worden voorspeld voor twee scenario's voor de verdieping cq. verruiming van de vaargeul:

1. Een verdieping tot 12,5 m, oftewel 0,6 m t.o.v. van de bestaande situatie, en
2. Een verdieping tot 13,1 m, 1,2 m t.o.v. van de bestaande situatie.

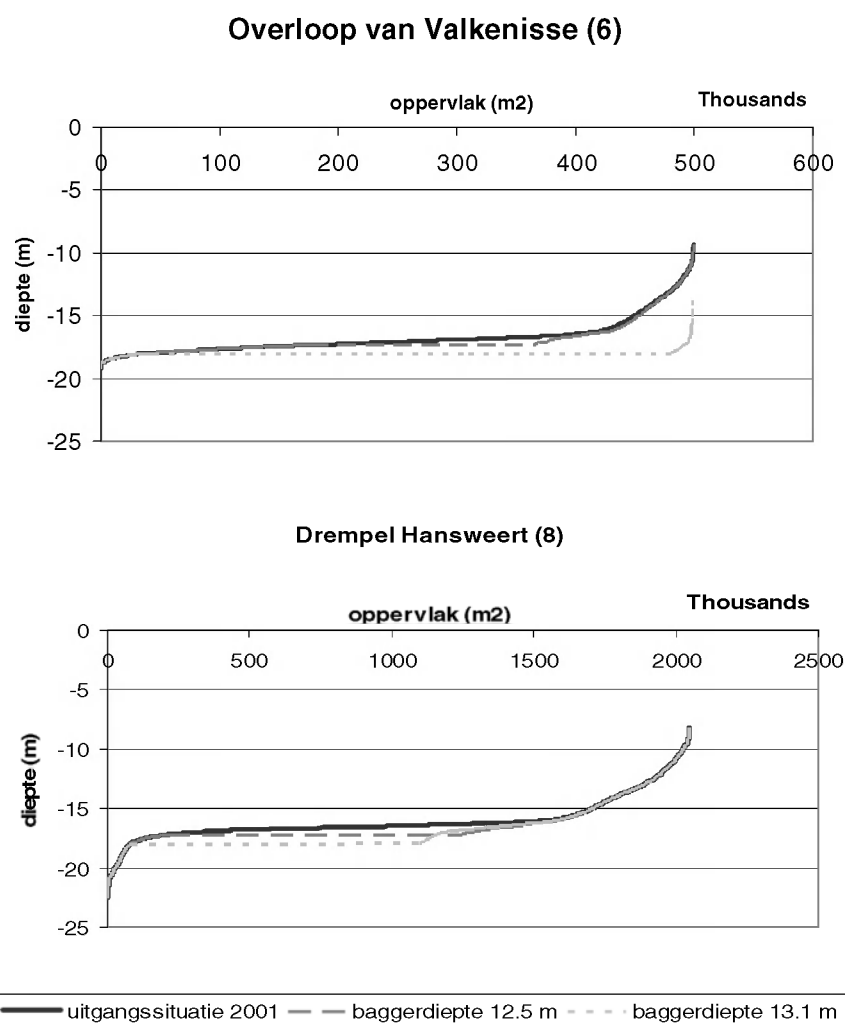
Een verdieping van de vaargeul leidt behalve tot een vergroting van de overdiepte ook tot een toename van de oppervlakte van het te onderhouden gebied. Zoals duidelijk is geworden in 4.2 zijn beide parameters belangrijk voor de omvang van het onderhoudsbaggerwerk. Echter, omdat de opgegeven waarden de waarden zijn zoals opgenomen in de vergunning van 2001, blijven de oppervlakten van alle baggergebieden ook na de verdiepingen hetzelfde. Omdat deze niet gelijk hoeven te zijn aan het werkelijk te onderhouden gebied, betekent dit dat het niet mogelijk is het model op een normale manier toe te passen met de beschikbare data.

Om toch een schatting te kunnen maken van het te verwachten onderhoudsbaggerwerk wordt gebruik gemaakt van de hypsometrie van de baggergebieden. Een hypsometrische curve geeft de grootte van het wateroppervlak als functie van diepte. Een voorbeeld hiervan wordt gegeven in Figuur 4-18 voor de Overloop van Valkenisse en de Drempel van Hansweert, gebied 6 en 8, respectievelijk. Alle hypsometrische curven vertonen hetzelfde beeld als die in Figuur 4-18.

In de figuur staan voor beide gebieden de hypsometrie van 2001 en die van na de twee mogelijke verdiepingen. De duidelijke knik naar boven aan de rechterzijde van de curven laat zien dat niet het hele gebied wordt onderhouden; er is immers oppervlak bij een diepte van minder dan de te onderhouden diepte van NAP -16 m. Aan de andere kant van de curve laat de knik naar beneden zien dat een deel van het gebied dieper is dan de NAP -16 m. Waarschijnlijk is dit deel van nature al diep genoeg en is baggeren hier niet nodig. Het is dus niet onwaarschijnlijk dat baggeren alleen gebeurt in het vlak deel van de curve rondom de onderhouden diepte. Met deze aanname is het mogelijk een schatting te maken van de fractie van de opgegeven oppervlakte die werkelijk met behulp van baggeren op diepte wordt gehouden.

Het moet benadrukt worden dat het hier om een schatting gaat. Bovendien is het zeer tijdrovend om van alle gebieden en voor alle jaren een hypsometrische curve te maken. Het is daarom niet zinvol om het model met deze methode opnieuw te kalibreren.

Het is echter wel mogelijk om aan de hand van de hypsometrische curven horende bij de verdiepingsscenario's een schatting te maken van de relatieve toename van de oppervlakte van het werkelijk gebaggerde gebied. Samen met de toegenomen vaargeuldiepte kan met het model dan worden berekend wat de relatieve toename van de baggerbehoefte zal zijn voor de verdiepingsscenario's. Uitgaande van de huidige baggerbehoefte kan dan de baggerbehoefte voor de twee verdiepingsscenario's worden bepaald.



**Figuur 4-18: De hypsometrische curven voor de Overloop van Valkenisse en de Drempel van Hansweert, gebied 6 en 8, respectievelijk.**

De hiermee gemaakte voorspellingen voor de twee scenario's zijn gepresenteerd in Tabel 4-2, achter in dit rapport. Voor ieder scenario is er een voorspelling gemaakt op basis van het gemiddelde baggervolume in de periode 1999-2001 en één met het gemiddelde van de periode 2000 - 2001. Het onderhoudsbaggerwerk in 1999 is duidelijk hoger dan in 2000 en 2001. Dit is de reden waarom niet één maar twee voorspellingen zijn gemaakt.

---

### **Onzekerheden**

In principe kunnen de verschillen tussen de twee voorspellingen worden beschouwd als een marge van de voorspelling. Echter, hierbij moet wel een aantal opmerkingen worden gemaakt:

1. In de baggergebieden 6, 7, 13 en 14 zijn de baggerhoeveelheden in 1999 aanzienlijk hoger dan die in 2000 en 2001. Het is mogelijk dat deze baggerwerkzaamheden nog te maken hadden met de tweede verruiming van de vaargeul die formeel uitgevoerd is in 1997 en 1998. Omdat er ook indicaties zijn dat de baggerhoeveelheden in 2002 en 2003 verder zijn afgenomen, worden de voorspellingen op basis van de gegevens uit 2000-2001 als het meest betrouwbaar beschouwd.
2. Bij de kalibratie van het model is geconstateerd dat de evenwichtsdiepte van de Drempel van Bath, gebied 3, sterk is toegenomen in de tijd. Het is mogelijk dat deze toename doorzet na een verdere verdieping maar hier is bij de voorspelling geen rekening gehouden. Dit kan betekenen dat de voorspelling voor dit gebied een overschatting is van de werkelijke baggerbehoefte. De recent waargenomen afname van het onderhoud kan niet zonder aanvullende gegevens over de oppervlakten van de baggergebieden worden 'voorspeld'.
3. Er blijkt dat in de Overloop van Hansweert en het Gat van Ossensisse, gebied, 10 niet meer is gebaggerd in 2002 en 2003. Met deze informatie is er geen rekening gehouden in de voorspellingen.

### **4.5 Conclusies**

Het model voor het voorspellen van het onderhoudsbaggerwerk bij een verruiming of verdieping van de vaargeul blijkt na kalibratie redelijk tot goed in staat te zijn de baggervolumes uit het verleden te simuleren. Echter, door de grote onzekerheden in de opgegeven oppervlaktes van de baggergebieden is het niet mogelijk om het model in absolute zin direct toe te passen. Wel is het mogelijk gebleken om op basis van deze gegevens met het model een schatting te maken van de verandering t.o.v. de huidige baggerbehoefte. Hieruit blijkt dat er bij een verdieping tot 13,1 m rekening moet worden gehouden met een onderhoudsbaggerwerk van ongeveer 12.3 Mm<sup>3</sup> (beun). Hiervoor moest een aanname voor het huidige onderhoud worden gemaakt.

---

## 5 Modelresultaten voor de stortstrategieën

### 5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de invloed van de verschillende stortstrategieën beschouwd met behulp van het SOBEK model. Als eerste wordt in paragraaf 5.2 de referentie situatie besproken waarmee alle andere strategieën zullen worden vergeleken. Om een idee te krijgen van de marges waarbinnen de resultaten vallen, zijn twee simulaties gedaan waarbij alles in de vaar- of nevengeulen is gestort. De uitkomsten hiervan worden besproken in paragraaf 5.3. Op basis van deze uitkomsten zal ook een 'verbeterde' stortstrategie worden bepaald en getest die in paragraaf 5.4 nader wordt toegelicht. Daarna zal met deze verbeterde strategie de ontwikkeling van het geulsysteem na een verdieping tot 13,1 m worden berekend voor een aantal scenario's. Deze simulaties worden besproken in paragraaf 5.5. Het hoofdstuk wordt afgesloten met conclusies in paragraaf 5.5.

### 5.2 Nulalternatief

Voor het vaststellen van het nulalternatief, worden de huidige bagger- en storthoeveelheden gebruikt. In beunkuubs wordt er totaal  $10.5 \text{ Mm}^3$  gebaggerd en gestort. Dit is gelijk aan  $9.55 \text{ Mm}^3$  profielkuubs bij een uitlevering van 10%. Daarnaast wordt er ook nog  $2.6 \text{ Mm}^3$  zand gewonnen. Tabel en figuur 5.1 geven een overzicht van de hoeveelheden die op de verschillende locaties worden gebaggerd, gestort en gewonnen.

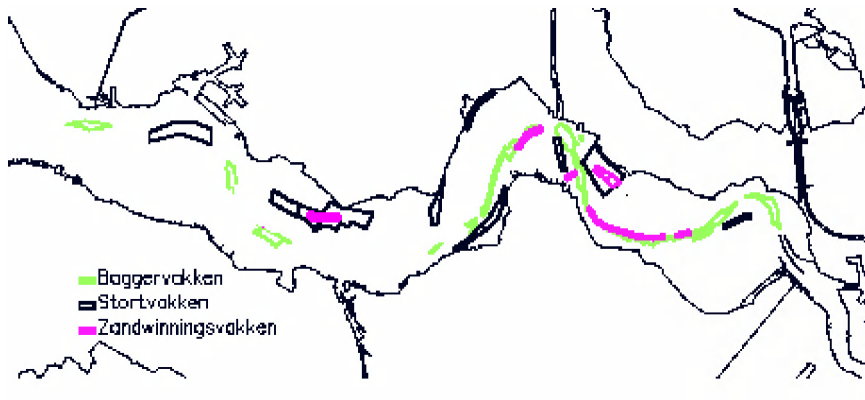
**Tabel 5-1: Jaarlijks vaargeulonderhoud en zandwinning in het nulalternatief.**

| Locatie                                       |                          | Hoeveelheid                   |                                               |
|-----------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
| Plaatsnaam                                    | Macrocel<br>(Eb / Vloed) | beun<br>(Mm <sup>3</sup> /jr) | profiel <sup>1</sup><br>(Mm <sup>3</sup> /jr) |
| <b>Storten, vaargeulonderhoud</b>             |                          |                               |                                               |
| Schaar van Waarde                             | 5 V                      | 1,0                           | 0,91                                          |
| Middelgat                                     | 4 E                      | 0,7                           | 0,64                                          |
| Gat van Ossenissee                            | 4 V                      | 4                             | 3,64                                          |
| Ebschaar Everingen                            | 3 V                      | 0,3                           | 0,27                                          |
| Everingen                                     | 3 V                      | 3                             | 2,73                                          |
| Ebschaar Spijkerplaat <sup>3</sup>            | 1 V                      | 1,5                           | 1,36                                          |
| Totaal storten                                |                          | 10,5                          | 9,55                                          |
| <b>Baggeren, vaargeulonderhoud</b>            |                          |                               |                                               |
| Drempel van Vlissingen                        | 1 E                      | 0.37                          | 0.33                                          |
| Drempel van Borssele                          | 3 E                      | 1.05                          | 0.96                                          |
| Pas van Terneuzen                             | 3 E                      | 0.56                          | 0.51                                          |
| Gat van Ossenissee                            | 4 V                      | 0.63                          | 0.57                                          |
| Overloop van Hansweert                        | 4 V                      | 0.51                          | 0.46                                          |
| Drempel van Hansweert                         | 5 E                      | 2.46                          | 2.24                                          |
| Overloop van Valkenisse                       | 5 E                      | 2.20                          | 2.00                                          |
| Drempel van Valkenisse                        | 6 E                      | 1.83                          | 1.66                                          |
| Nauw van Bath                                 | 6 E                      | 0.06                          | 0.05                                          |
| Drempel van Bath                              | 7 E                      | 0.83                          | 0.75                                          |
| Totaal baggeren                               |                          | 10,5                          | 9,55                                          |
| <b>Zandwinning</b>                            |                          |                               |                                               |
| Plaatzijde Overloop van Valkenisse            | 5 E                      | 1,0                           | 0,91                                          |
| Schaar van Waarde                             | 5 V                      | 0,6                           | 0,55                                          |
| Overloop van Hansweert / Plaat van Ossenissee | 4 V                      | 0,4                           | 0,36                                          |
| Everingen <sup>2</sup>                        | 3 V                      | 0,6                           | 0,55                                          |
| Totaal zandwinning                            |                          | 2,6                           | 2,36                                          |

<sup>1</sup> Voor de invoer van het model zijn de gebaggerde en gestorte hoeveelheden zand in het profiel nodig, de zogenaamde profielkuubs. De hoeveelheden worden echter in het beun gemeten, als beunkuubs (Westerschelde) of als tonnen droge stof (monding). Voor wat betreft de onderhoudsspecie wordt voor de vertaling van beunhoeveelheden naar profielhoeveelheden uitgegaan van een uitlevering ('bulking factor') van 10%. Voor aanlegsspecie zal een bulking factor van 20% worden gehanteerd.

<sup>2</sup> In de twee westelijk gelegen stortvakken.

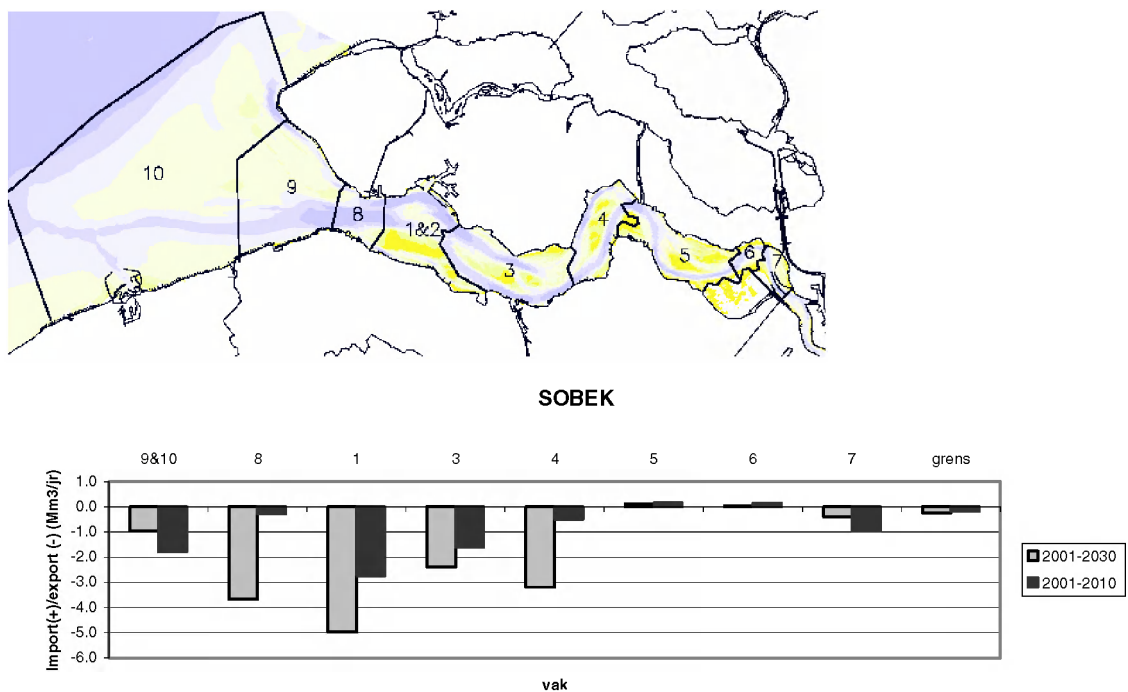
<sup>3</sup> In de voormalige ebschaar Spijkerplaat. De geul is sinds 1999 praktisch verdwenen.



**Figuur 5-1: De bagger- en stort locaties als mede de ligging van de zandwingebieden in de Westerschelde.**

### 5.2.1 Zandbalans

Een eerste indruk van de ontwikkeling van de Westerschelde wordt verkregen uit de grootschalige zandbalans. Deze geeft aan hoeveel zand er wordt uitgewisseld tussen de cellen onderling en wat de import en export van sediment van het totale systeem is aan de monding en aan de Zeeschelde. Figuur 5.2 laat de zandbalans zien voor de komende 10 en 30 jaar. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen de natuurlijke en 'totale' balans, ofwel zonder en met ingrepen.



**Figuur 5-2: De grootschalige (natuurlijke) zandtransporten op de zeewaartse rand van de vakken volgens de SOBEK berekening van het nulalternatief. Een negatief teken betekent een zeewaarts gericht transport.**

---

De figuur laat zien dat er volgens het model ondanks het morfologisch 'deactiveren' van de Zeeschelde toch een klein netto sediment transport naar de Westerschelde is. Dit komt doordat er een geleidelijke overgang is aangebracht van de Zeeschelde naar de Westerschelde om geen ongewenste randeffecten te introduceren.

Figuur 5-2 geeft aan dat er volgens het model bijna alle cellen een zeewaarts gericht transport hebben. Alleen in de macrocellen 5 en 6 is er sprake van een licht landwaarts gericht transport.

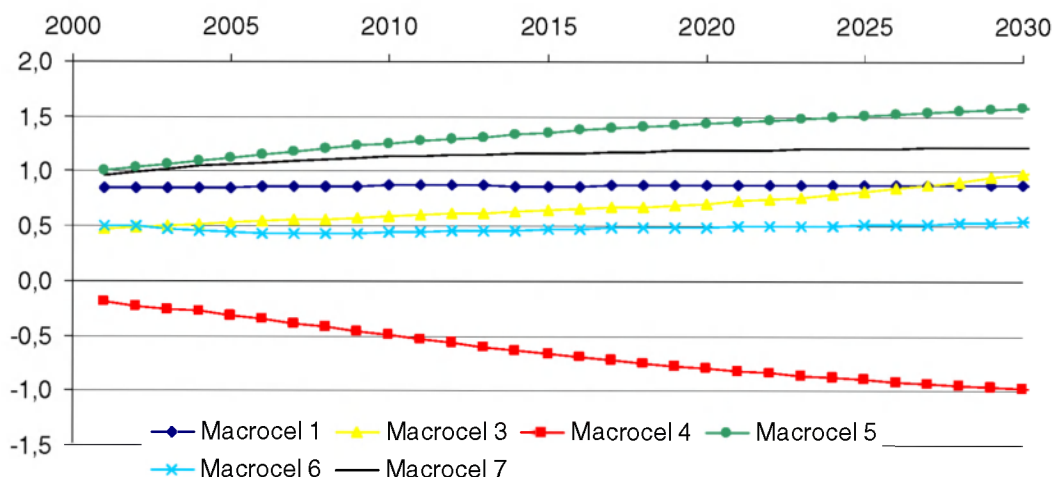
### **5.2.2 Diepteveranderingen en kantelen**

Een belangrijk kenmerk voor de ontwikkeling van het geulensysteem is de verhouding tussen de gemiddelde dieptes van de twee geulen voor de verschillende macrocellen. Deze wordt weergegeven door de kantelindex, zoals gedefinieerd door Jeuken et al (2004). Het is de natuurlijke logaritme van de verhouding tussen de gemiddelde diepte van de ebgeul en die van de vloedgeul. Een positieve waarde van de kantelindex wil zeggen dat de ebgeul dieper is dan de vloedgeul. Als de waarde van de kantelindex toeneemt zal de ebgeul dieper worden t.o.v. de vloedgeul. Dit kan zijn door erosie van de ebgeul zelf of juist door sedimentatie van de vloedgeul. Een combinatie van beide is ook mogelijk.

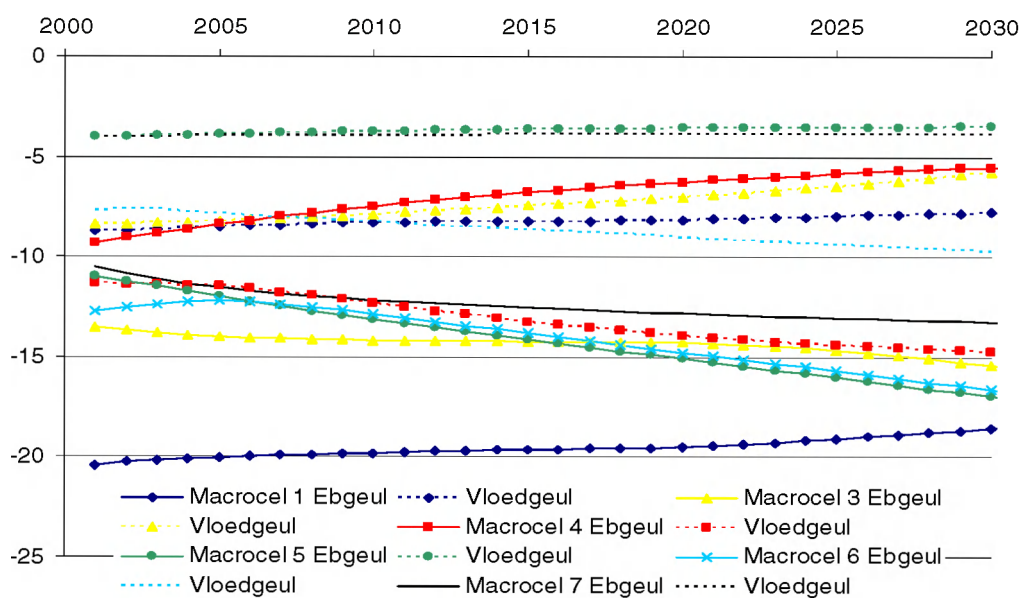
De ontwikkeling van de kantelindex voor de 6 macrocellen in het model gebied, zie Figuur 2-2, in de komende 50 jaar bij het nulalternatief is weergegeven in Figuur 5-3 a. Deze laat zien dat met name het middengebied, de macrocellen 3 en 4 bij Terneuzen en Hansweert, en het oostelijk deel, macrocel 5 bij Valkenisse, verandert. In zowel cel 3 als 5 wordt de ebgeul dieper t.o.v. de vloedgeul waarbij met name in macrocel 3, de Pas van Terneuzen en de Everingen, de onderlinge verhouding sterk verandert. De Pas van Terneuzen, de ebgeul, wordt dieper terwijl de Everingen steeds ondieper wordt (zie Figuur 5-3 b). Deze laatste gaat in 50 jaar van een diepte van 10 naar zo'n 5 meter.

Het gevaar van deze ontwikkeling is dat door de sterke verandering van het verhang tussen de geulen, de kortsluitgeulen over de plaat verdwijnen, zoals al is gebeurd verder naar het oosten in de macrocellen 4 en 5, bij Ossensisse en Valkenisse. Dit zou een vermindering van de bestaande morfologische dynamiek van het systeem kunnen betekenen.

In Figuur 5-3 b is te zien dat de gemiddelde diepte van het Middelgat, de ebgeul van Macrocel 4, snel afneemt. Na ruim 35 jaar is de drempel van Baarland, aan het begin van de geul zelfs minder dan 2 meter beneden NAP wat effectief betekent dat de geul is verzand. Dit betekent dat de stortlocatie in het Middelgat een duidelijk probleem is vanuit het oogpunt van behoud van het meergeulensysteem. Hierbij moet wel worden gezegd dat het storten hierbij de natuurlijke tendens alleen maar versterkt (zie verder in paragraaf 5.2.3). Hetzelfde geldt in mindere mate voor de stortlocatie in de Everingen.



**Figuur 5-3 a: De verandering van de kantelindex voor de 6 macrocellen bij het nulalternatief. Een positieve waarde betekent dat de ebgeul dieper is dan de vloedgeul.**



**Figuur 5-3 b De gemiddelde diepte van de geulen t.o.v. NAP -2 m, in de 6 macrocellen bij het nulalternatief.**

Ook nu weer moet bij de interpretatie van de resultaten de gebruikte randvoorwaarden in het SOBEK-model mee worden genomen. De sterke erosie die wordt voorspeld in de vaargeulen van de macrocellen 3 tot 7 zal dus wat genuanceerder liggen. Hier zal ook rekening mee worden gehouden bij het bepalen van de stortcapaciteit van de geulen.

### 5.2.3 De invloed van ingrepen

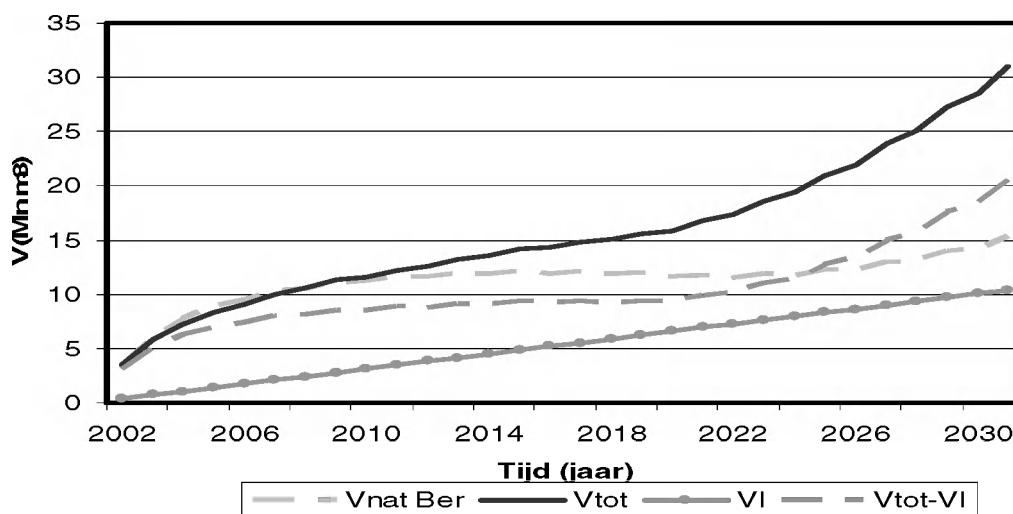
De ontwikkeling van de kantelindex, zoals besproken in de vorige paragraaf, laat zien dat in het midden- en oostelijk deel van de Westerschelde van Terneuzen tot Valkenisse, de macrocellen 3, 4 en 5, het geulensysteem sterk verandert.

De ontwikkeling in de Everingen en het Middelgat is zelfs zorgwekkend te noemen. Een belangrijke vraag is in hoeverre de netto ingrepen hierbij een sturende rol spelen.

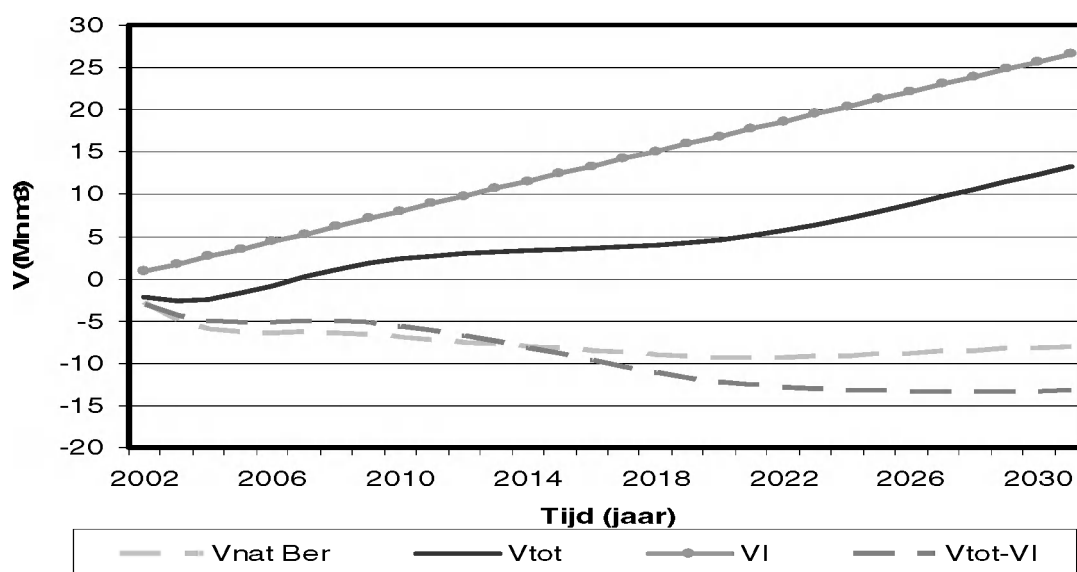
In Jeuken et al (2003) wordt de sturende invloed van de ingrepen afgeleid uit het verloop van de totale (t.g.v. sedimenttransport door waterbeweging en ingrepen (baggeren en storten) samen) en de natuurlijke (t.g.v. alleen sedimenttransport door waterbeweging) volumeverandering in de tijd. Als de totale volumeverandering een tegengesteld verloop heeft dan de natuurlijke dan wordt de ingreep als sturend gekwalificeerd. In de huidige studie is het ook mogelijk om verschillende scenario's met elkaar te vergelijken. Of, en in welke mate de ingrepen sturend zijn geweest zal daarom ook nog aan de orde komen in de volgende paragrafen waar de effecten van andere stortstrategieën worden besproken. In deze paragraaf wordt het al dan niet sturend zijn van de netto ingrepen bepaald aan de hand van de volumeveranderingen in de tijd.

De figuren 5-4a en b geven de berekende volumeveranderingen in de eb- en vloedgeul van macrocel 1. In de ebgeul, de Honte, is het verloop van de totale volumeverandering gelijk van teken als de 'natuurlijke' veranderingen, weergegeven door de zwarte lijn en gestippelde lijn, respectievelijk. Dit geeft aan dat de netto stortingen in deze geulen geen kritische invloed hebben gehad. In de Schaar van de Spijkerplaat, de vloedgeul, daarentegen is het verloop van de totale volumeveranderingen heel anders dan de natuurlijke. In deze van nature eroderende geul sedimenteert er nu materiaal. De netto stortingen lijken nu wel een sturende invloed op de ontwikkeling van deze geul te hebben.

Op deze wijze kan er voor elke geul worden vastgesteld of de netto ingrepen al dan niet sturend zijn geweest. Het resultaat staat in Tabel 5-2.



**Figuur 5-4 a: De cumulatieve volumeveranderingen in de ebgeul van macrocel 1, de Honte. De zwarte lijn geeft de totale verandering,  $V_{tot}$ , de donkere gestreepte lijn  $V_{tot-VI}$ , de lichte gestreepte lijn de berekende natuurlijke veranderingen,  $V_{nat Ber}$ , en de grijze lijn de netto ingrepen  $VI$ .**



**Figuur 5-4 b:** De cumulatieve volumeveranderingen in de vloedgeul van macrocel 1, de Schaar van de Spijkerplaat. De zwarte lijn geeft de totale verandering,  $V_{tot}$ , de donkere gestreepte lijn  $V_{tot-VI}$ , de lichte gestreepte lijn de berekende natuurlijke veranderingen,  $V_{nat\ Ber}$ , en de grijze lijn de netto ingrepen  $VI$ .

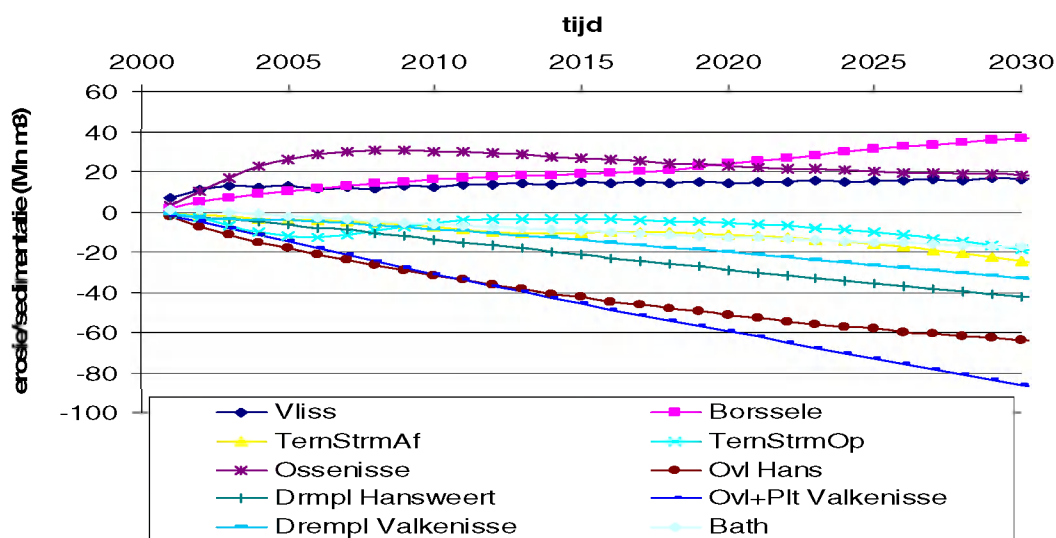
**Tabel 5-2:** Overzicht van de invloed van de netto ingrepen op de ontwikkeling van de macrocellen in het nulalternatief. Per geul staat de grootte van de netto jaarlijkse ingreep (positief is storten). Het plus- of minteken geeft aan of de ingrepen sturend zijn geweest (+ is wel sturend, een — is niet sturend).

|     | Ebgeul                  |   | Vloedgeul                |   |
|-----|-------------------------|---|--------------------------|---|
| MC1 | 0.3 Mm <sup>3</sup> /j  | — | 0.9 Mm <sup>3</sup> /j   | + |
| MC3 | -1.0 Mm <sup>3</sup> /j | — | 2.0 Mm <sup>3</sup> /j   | — |
| MC4 | 0.7 Mm <sup>3</sup> /j  | — | 2.0 Mm <sup>3</sup> /j   | — |
| MC5 | -6.0 Mm <sup>3</sup> /j | — | 0.4 Mm <sup>3</sup> /j   | + |
| MC6 | -1.0 Mm <sup>3</sup> /j | + | 0 Mm <sup>3</sup> /j     | — |
| MC7 | -0.6 Mm <sup>3</sup> /j | + | -0.01 Mm <sup>3</sup> /j | — |

Een opvallende uitkomst is dat de ingrepen niet sturend zijn geweest in de ebgeul van macrocel 5. Dit komt omdat deze geul volgens het model van 'nature' erodeert. Het verwijderen van sediment door baggeren en zandwinning versterkt dit alleen maar. Dit betekent dat men niet te veel waarde aan deze uitkomst van het model moet hechten, omdat de berekende natuurlijke erosie niet realistisch is (gezien het feit dat er onderhoudsbaggerwerk in dit gebied nodig is).

#### 5.2.4 Volumeveranderingen in de baggergebieden

Het doel van het baggeren is het op diepte houden van de vaargeul. Er wordt daarom gebaggerd op die locaties waar er sprake is van sedimentatie. Dit is met name aan het begin- of einde van geulen waar drempels bestaan. Bij een efficiënt baggerbeleid zou de totale volumeverandering op de drempels ongeveer gelijk aan nul moeten zijn.



**Figuur 5-5: De totale volumeveranderingen in de baggergebieden in het nulalternatief volgens het SOBEK model.**

Figuur 5-5 laat de berekende totale volumeveranderingen in het nulalternatief zien op de plaatsen waar nu wordt gebaggerd. Volgens het model is er in het oostelijk deel van de Westerschelde netto erosie op deze locaties terwijl in het westen, bij Vlissingen en Borssele, er netto materiaal sedimenteert. Opvallend is de zeer sterke netto erosie in de Overloop en plaat van Valkenisse in het oostelijk deel van het estuarium. Dit is een verrassende uitkomst en is in tegenspraak met de meest recente metingen die aangeven dat op de baggerlocaties de (totale) volumeveranderingen minimaal zijn wat aangeeft dat er wel degelijk onderhoud nodig is. Hierbij moet wel worden aangetekend dat het SOBEK-model niet aangeeft waar er in het profiel erosie is en waar sedimentatie. De uitkomsten van het DELFT3D model laten zien dat het midden van ebgeul van macrocel 5 erodeert maar dat er sedimentatie is aan de randen. Dit is ook de plek waar zand wordt gewonnen. De uitkomsten van het DELFT3D-model komen verder aan de orde in Hoofdstuk 6.

Tijdens de validatie van het model (zie Hoofdstuk 3) is alleen gekeken naar de totale volumeverandering per geul en niet naar specifieke locaties in de geulen. Hierbij is geconstateerd dat de resultaten redelijk tot goed overeenkwamen met de meest recente metingen (zie Jeuken et al 2003). Het blijkt echter dat volgens de simulatie zonder ingrepen de baggergebieden netto eroderen of min of meer gelijk blijven. Alleen bij Vlissingen en Borssele is er wel sprake van netto aanzanding. Op een aantal locaties is dit in overeenstemming met de meest recente waarnemingen, zoals bijvoorbeeld in Ossenisse en het Zuidergat, echter voor andere zeker niet. Omdat het om een voorspellend model gaat, is het niet mogelijk om dit zondermeer als een foute voorspelling af te doen. Echter, zowel in vergelijking met metingen als met de overige twee modellen, ESTMORF en DELFT3D, geeft het SOBEK-model veel extremere volumeveranderingen in met name de vaargeul, als gevolg van de extremere randvoorwaarden. Ook nu weer geldt dat de gevolgen van de verschillende strategieën op de drempels zullen daarom relatief, t.o.v. het nulalternatief worden beschouwd.

### 5.3 Alternatieve strategieën

#### 5.3.1 Strategie 1 en 2: Alles storten in de vaargeul of nevengeul

##### Algemeen

Het storten in de vaargeul lijkt een vreemde strategie omdat het doel van het baggeren juist het op diepte houden is van de vaargeul. Toch is er wel degelijk ruimte om te storten in de vaargeul en dat wordt ook nu al gedaan, er wordt immers alleen op die plekken gebaggerd waar er sprake is van sedimentatie. Bij het invullen van deze strategie wordt er alleen gestort op plekken waar nu niet wordt gebaggerd.

De tweede strategie waarbij alles wordt gestort in de nevengeulen lijkt vanuit het oogpunt van het op diepte houden van de vaargeul ideaal. Echter, het is op voorhand duidelijk dat dit moeilijk te verenigen zal zijn met het behouden van het meergeulensysteem. Toch is het een interessante strategie om door te rekenen omdat het in combinatie met de eerste strategie een beeld geeft van de meest extreme mogelijkheden.

Zoals eerder genoemd wordt er in de alternatieve strategieën niet gestort op plekken waar nu wordt gebaggerd. Dit legt beperkingen op en betekent soms dat de netto ingreep per cel anders is dan bij het nulalternatief. Echter, het totale volume van de ingrepen in het systeem is gelijk voor alle drie de strategieën. Tabel 5-2 geeft een overzicht van de grootte van de ingrepen in de verschillende alternatieven. Zoals de tabel laat zien zijn de gebaggerde en gewonnen volumes in alle drie de alternatieven gelijk.

**Tabel 5-3: De grootte van de ingrepen in miljoenen (profiel) kubieke meters per jaar voor de simulaties van het nulalternatief, vaargeul- en nevengeul strategie.**

|        |    | BAGGEREN | ZAND<br>WINNING | STORTEN |          |           |
|--------|----|----------|-----------------|---------|----------|-----------|
|        |    |          |                 | Nul     | Vaargeul | Nevengeul |
| MC1    | EG | -0.13    | -               | 0.48    | 0.48     | -         |
|        | VG | -        | -               | 0.89    | -        | 1.36      |
| MC3    | EG | -1.33    | -               | -       | 3.61     | -         |
|        | VG |          | -0.55           | 2.95    | -        | 4.00      |
| MC4    | EG | -        | -               | 0.68    | -        | 3.00      |
|        | VG | -1.03    | -0.36           | 3.64    | 3.95     | -         |
| MC5    | EG | -4.64    | -0.91           | -       | 1.05     | -         |
|        | VG | -        | -0.55           | 0.91    | -        | 1.05      |
| MC6    | EG | -1.27    | -               | -       | -        | -         |
|        | VG | -        | -               | -       | -        | 0.14      |
| MC7    | EG | -0.62    | -               | -       | 0.14     | -         |
|        | VG | -0.01    | -               | -       | -        | -         |
| Overig |    | -0.4     |                 |         | 0.33     |           |
| Totaal |    | -9.55    | -2.36           | 9.55    | 9.55     | 9.55      |

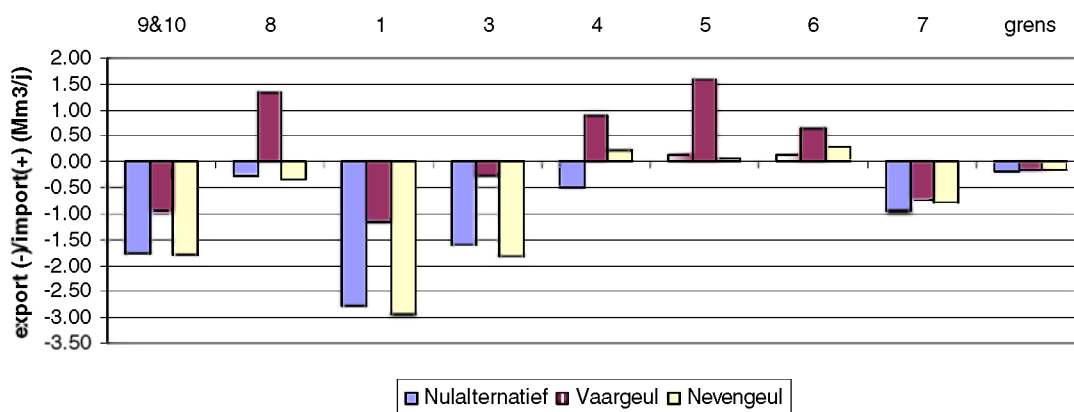
De berekening met strategie 2, alles storten in de nevengeulen, breekt al na 18 jaar af omdat het Middelgat, de ebgeul van cel 4, te ondiep wordt. Dit is nogmaals een aanwijzing dat het niet mogelijk is om al de baggerspecie te storten in de nevengeulen. Het betekent ook dat het vergelijken van de uitkomsten van het nulalternatief met beide stortstrategieën alleen mogelijk is in de eerste 18 jaar.

## Zandbalans

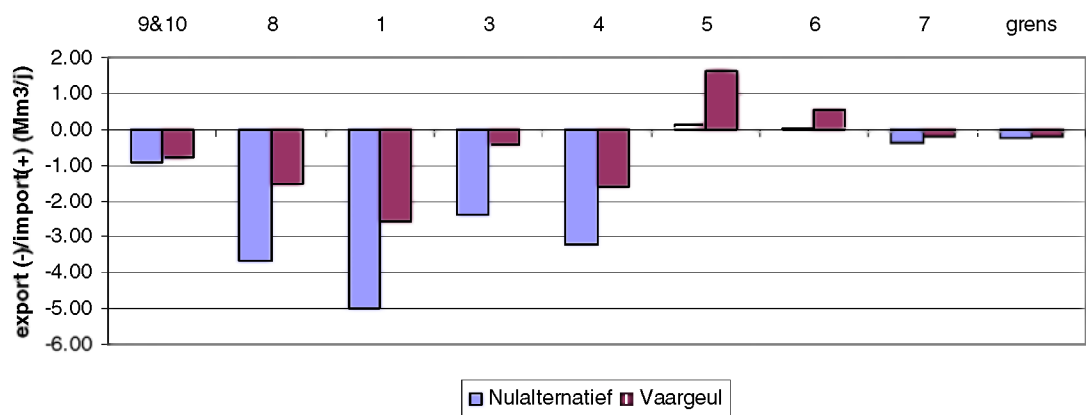
In Figuur 5-6 worden de berekende zandtransporten op de zeewaartse randen van de deelgebieden (zie **Figuur 5-2**) de twee extreme stortstrategieën vergeleken met die bij het nulalternatief. De vergelijking is gedaan voor zowel de eerste 10 jaar (Figuur 5-6 a) als voor de hele periode van 30 jaar (Figuur 5-6 b, alleen voor het storten in de vaargeulen omdat de som van het alleen storten in de nevengeulen na 18 jaar is afgebroken).

Gemiddeld over de eerste periode van 10 jaar is het verschil tussen alleen storten in nevengeulen en het nulalternatief klein. Het transport bij alle vakken hebben dezelfde richting behalve bij vak 4. De overgang van zeewaarts gericht transport naar landwaarts gericht transport is dus iets naar het westen geschoven. In het westelijke deel van de Westerschelde en in de monding veroorzaakt het alleen storten in de nevengeulen een iets kleiner zeewaarts transport. In het midden deel en het oostelijke deel van het estuarium is het effect van het alleen storten in de nevengeulen een groter landwaarts transport / kleiner zeewaarts transport t.o.v. het nulalternatief. Voor de Westerschelde als geheel betekent dit een kleine verruiming t.o.v. het nulalternatief. Over het algemeen is het effect van het alleen storten in de nevengeulen op de grootschalige zandbalans klein t.o.v. het nulalternatief.

Het alleen storten in de vaargeul heeft veel groter effect op de zandbalans. T.o.v. het nulalternatief is de export van sediment bij de monding (zeewaartse rand gebied 1) meer dan gehalveerd, zowel in de eerste 10 jaar als over de hele periode van 30 jaar. Dit betekent dat de Westerschelde als geheel minder zal verruimen bij deze stortstrategie t.o.v. het nulalternatief. In het hele modelgebied is het verschil in transport t.o.v. het nulalternatief een landwaarts gericht transport (i.e. een kleiner zeewaarts gericht transport of een groter landwaarts gericht transport). Voor de eerste 10 jaar periode heeft dit zelfs geleid tot een omslag van de transportrichting van zeewaarts naar landwaarts bij deelgebied 8 en deelgebied 4.



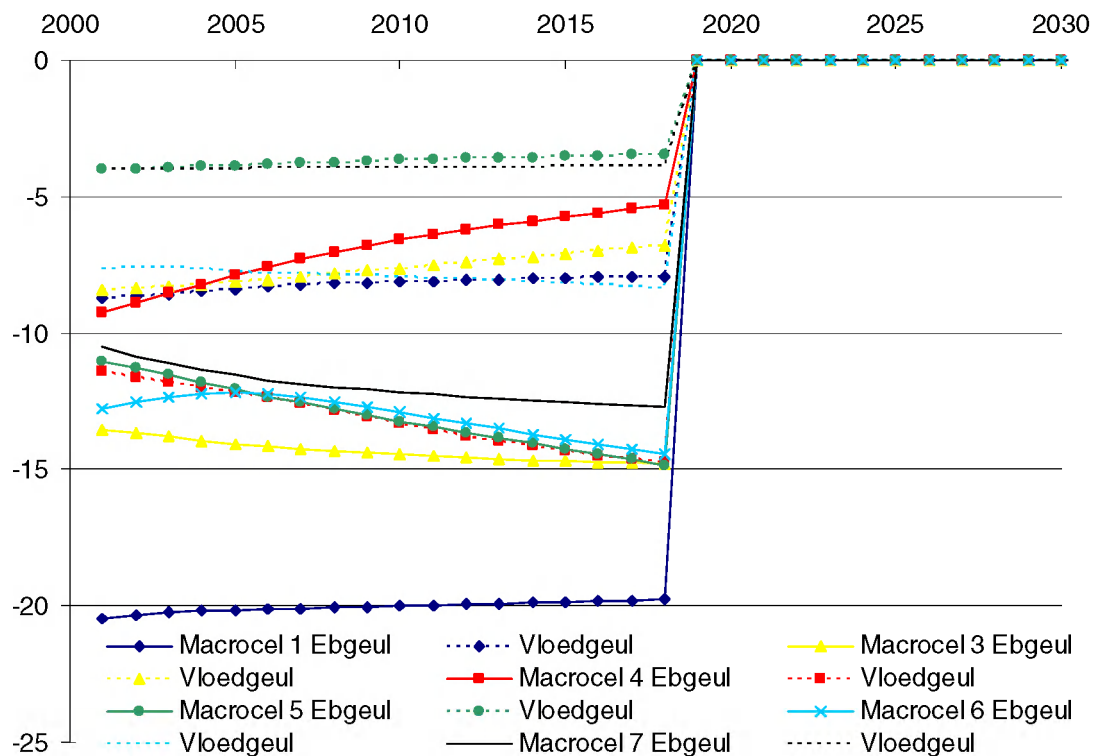
**Figuur 5-6 a:** De grootschalige zandtransporten op de zeewaartse rand van de deelgebieden volgens de SOBEK berekening bij het nulalternatief, alleen storten in de vaargeul en alleen storten in de nevengeulen over de periode 2001-2010. Een negatief teken betekent een zeewaarts gericht transport.



**Figuur 5-6 b** De grootschalige zandtransporten op de zeewaartse rand van de deelgebieden volgens de SOBEK berekening bij het nulalternatief en bij alleen storten in de vaargeul over de periode 2001-2030. Een negatief teken betekent een zeewaarts gericht transport.

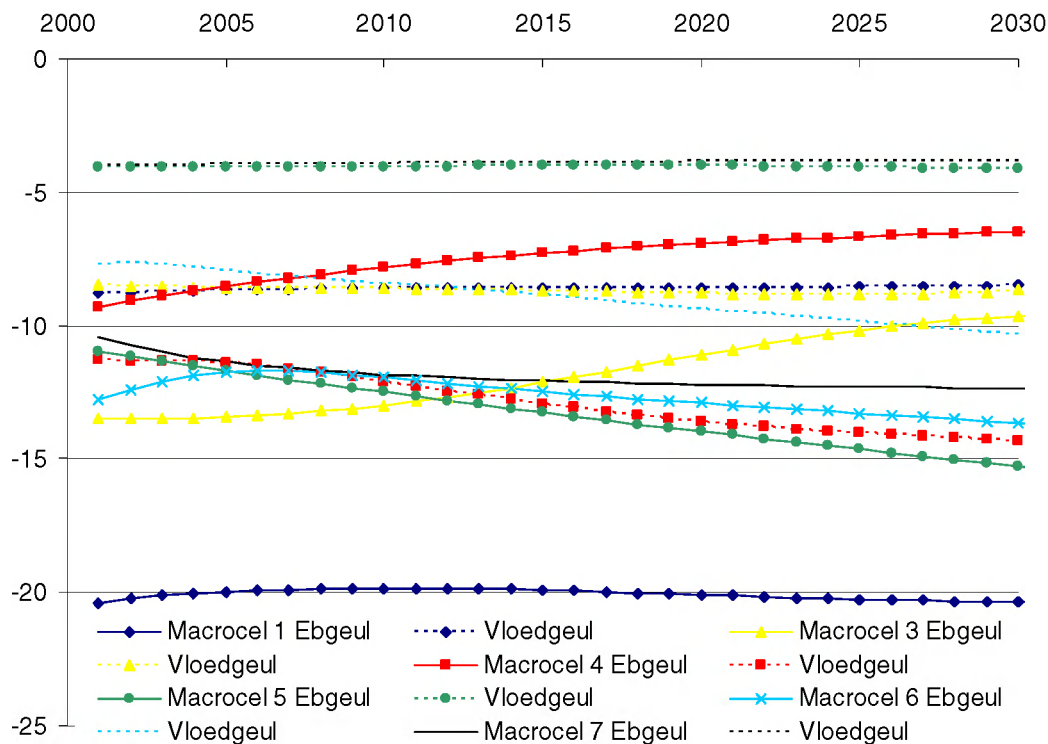
#### Diepteverandering en kantelindex

Figuur 5-7 laat de ontwikkeling zien van de gemiddelde diepte van de geulen als er alleen maar in de nevengeulen van de macrocellen wordt gestort.

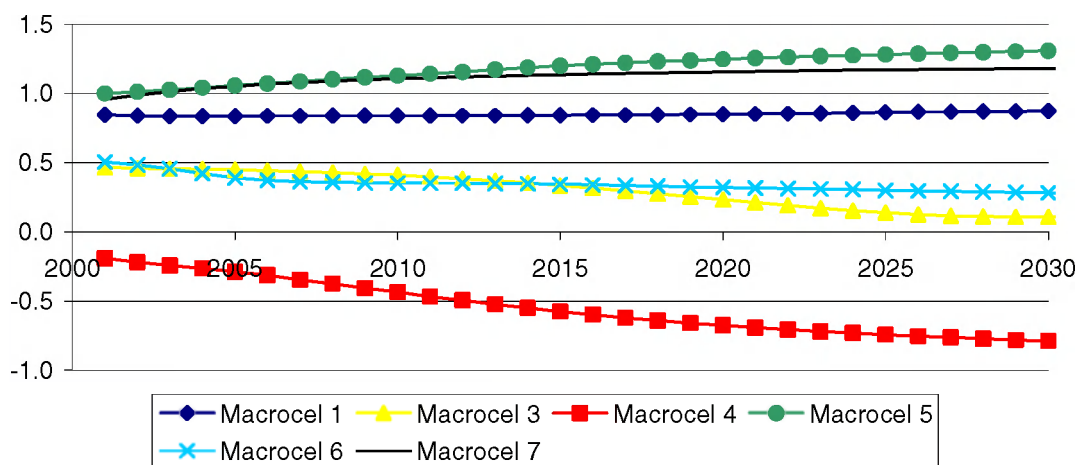


**Figuur 5-7:** De gemiddelde diepte van de geulen t.o.v. NAP -2m in de 6 macrocellen bij het enkel storten in de nevengeulen.

In het Middelgat ofwel de ebgeul van macrocel 4, is de drempel van Baarland, na 18 jaar zo ondiep dat de berekening wordt gestopt. Echter, de figuur laat ook zien dat het effect in de overige cellen in deze periode niet heel groot is. Dit geeft aan dat er wel degelijk ruimte is in de nevengeulen voor storten.



**Figuur 5-8 a: De gemiddelde diepte van de geulen t.o.v. NAP -2m in de 6 macrocellen bij storten in de vaargeul.**



**Figuur 5-8 b De verandering van de kantelindex voor de 6 macrocellen bij alleen storten in de vaargeul. Een positieve waarde betekent dat de ebgeul dieper is dan de vloedgeul.**

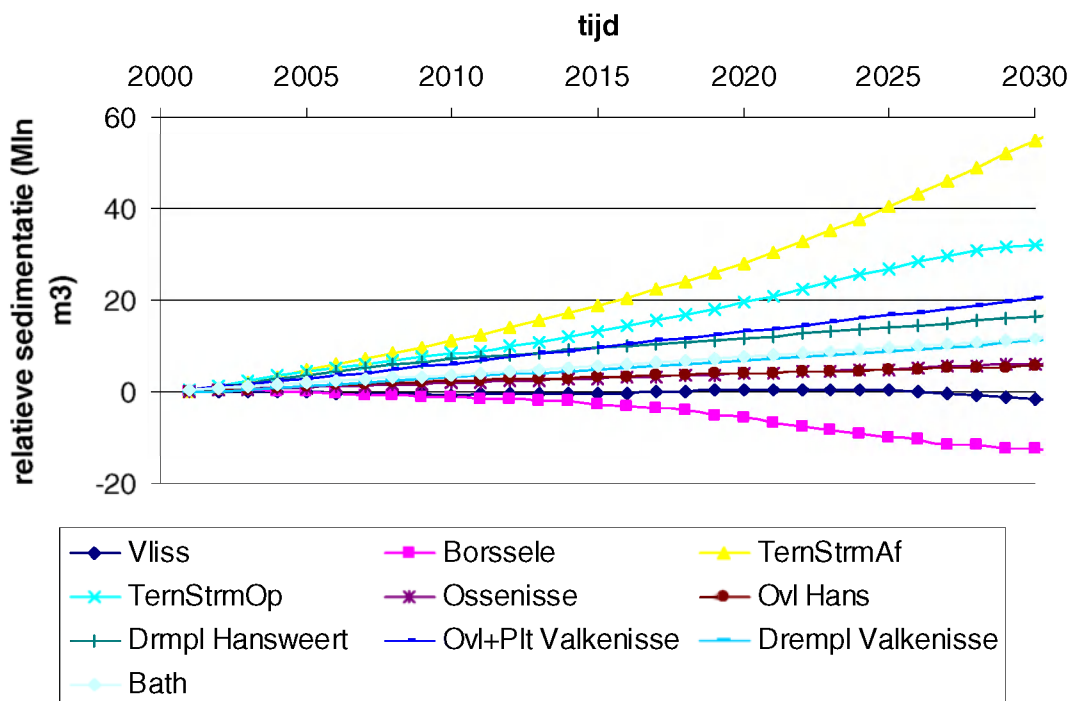
De Figuren 5-8 a en 5-8 b laten de gemiddelde diepte van de geulen zien en bijbehorende kantelindex als er wordt gestort in de vaargeul. Dit heeft op een termijn van 30 jaar een aantal positieve effecten t.o.v. het nulalternatief:

1. De ebgeul van macrocel 4, het Middelgat, wordt minder snel ondiep.
2. De vloedgeul van macrocel 5, de Schaar van Valkenisse/Waarde, blijft op diepte terwijl de ebgeul minder snel dan in het nulalternatief dieper wordt.
3. De vloedgeul van macrocel 3, de Everingen, blijft op diepte, dit gaat wel ten koste van het ondieper worden van de ebgeul van 13 tot zo'n 10 meter.
4. De ebgeul van macrocel 1, de Honte, blijft op diepte.

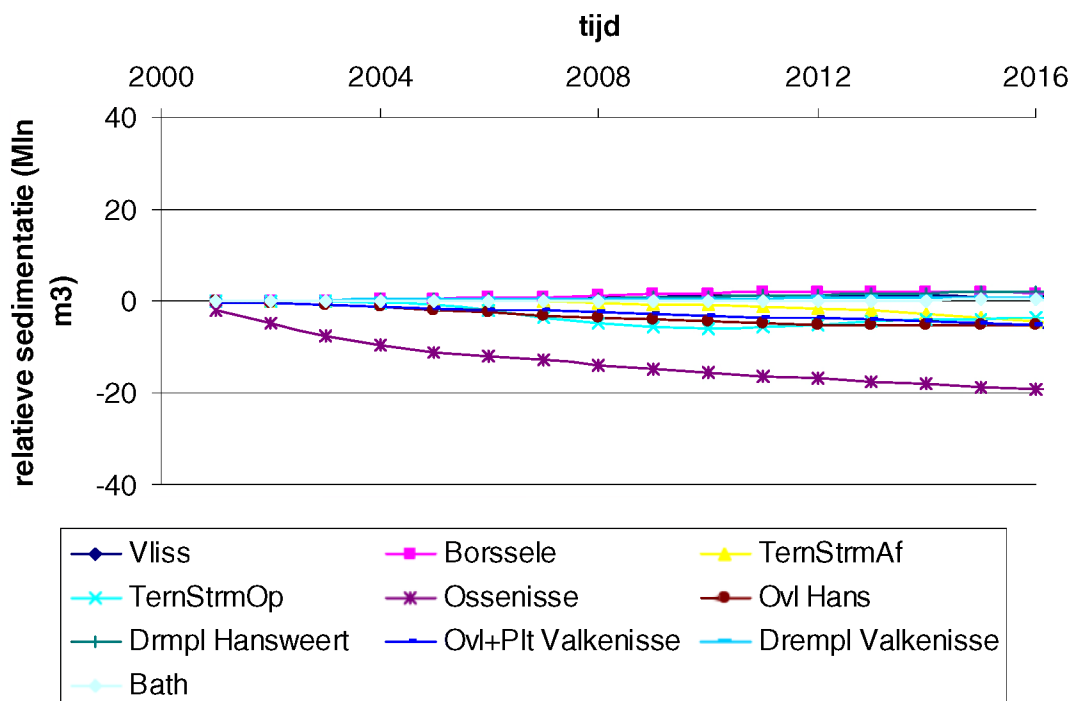
Na 30 jaar, echter, ontstaat er een probleem bij het Middelgat, de ebgeul van macrocel 4. De drempel van Baarland aan de zeezijde van deze geul, daar waar hij aansluit op de Pas van Terneuzen, wordt minder dan 2 meter diep en komt dus droog te liggen bij laag water. Daarnaast wordt de vaargeul in de Pas van Terneuzen enkele meters minder diep (macrocel 3). Dit wordt niet alleen veroorzaakt door stortingen in de geul zelf maar ook die in het Gat van Ossensisse. Door een sterk zeewaarts gericht transport daar wordt dit naar de Pas van Terneuzen getransporteerd.

### Volumeveranderingen in de baggergebieden

Zoals besproken in paragraaf 5.2 is er volgens het SOBEK model in de meeste huidige baggerlocaties sprake van netto erosie. Om de effecten van het enkel storten in de vaar- of nevengeulen te bekijken wordt er gekeken naar het verschil in sedimentatie en/of erosie t.o.v. het nulalternatief. Dit wordt relatieve sedimentatie genoemd. Figuur 5-9 a en 5-9 b laat de relatieve sedimentatie, of erosie, zien op de baggerlocaties voor strategie 1, storten in de vaargeul, en strategie 2, storten in de nevengeulen.



**Figuur 5-9 a: Relatieve netto erosie/sedimentatie in de baggergebieden bij storten in de vaargeul. Een minteken duidt op meer erosie of minder sedimentatie.**

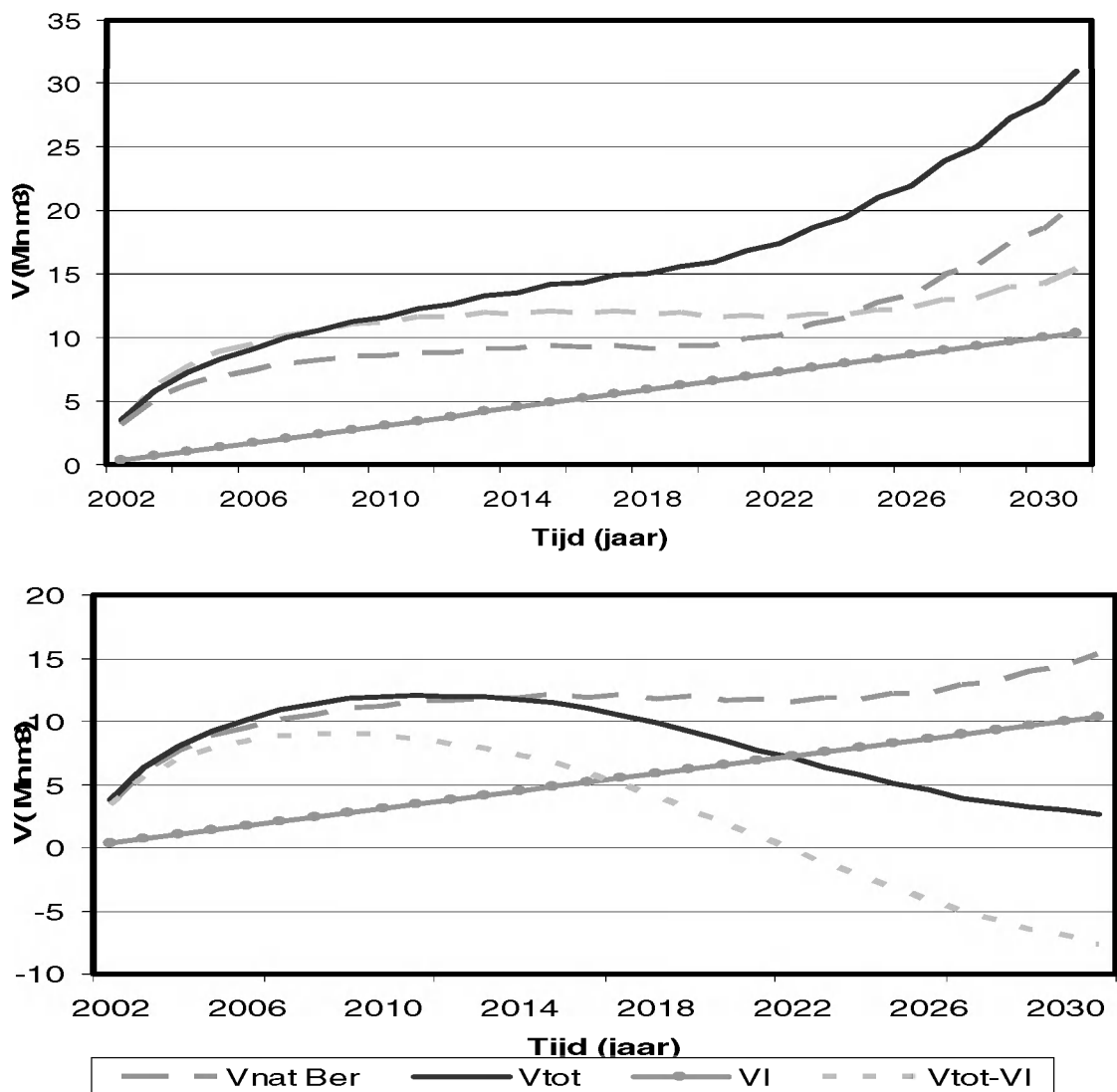


**Figuur 5-9 b Relatieve erosie/sedimentatie in de baggergebieden bij storten in de nevengeulen. Een minteken duidt op meer erosie of minder sedimentatie.**

In vergelijking met het nulalternatief heeft het storten in de vaargeul een negatief effect op alle baggerlocaties met uitzondering van die bij Vlissingen en Borssele, waar de sedimentatie is afgenomen. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat voor Vlissingen dit effect pas na een jaar of 25 significant wordt. In totaal is er ruim 4 miljoen kubieke meter per jaar relatieve sedimentatie. Op de drempels alleen gaat het om ongeveer 1 miljoen kubieke meter per jaar. Het storten in de nevengeulen heeft een positief effect op vrijwel alle baggerlocaties en met name op de locatie bij Ossenisse.

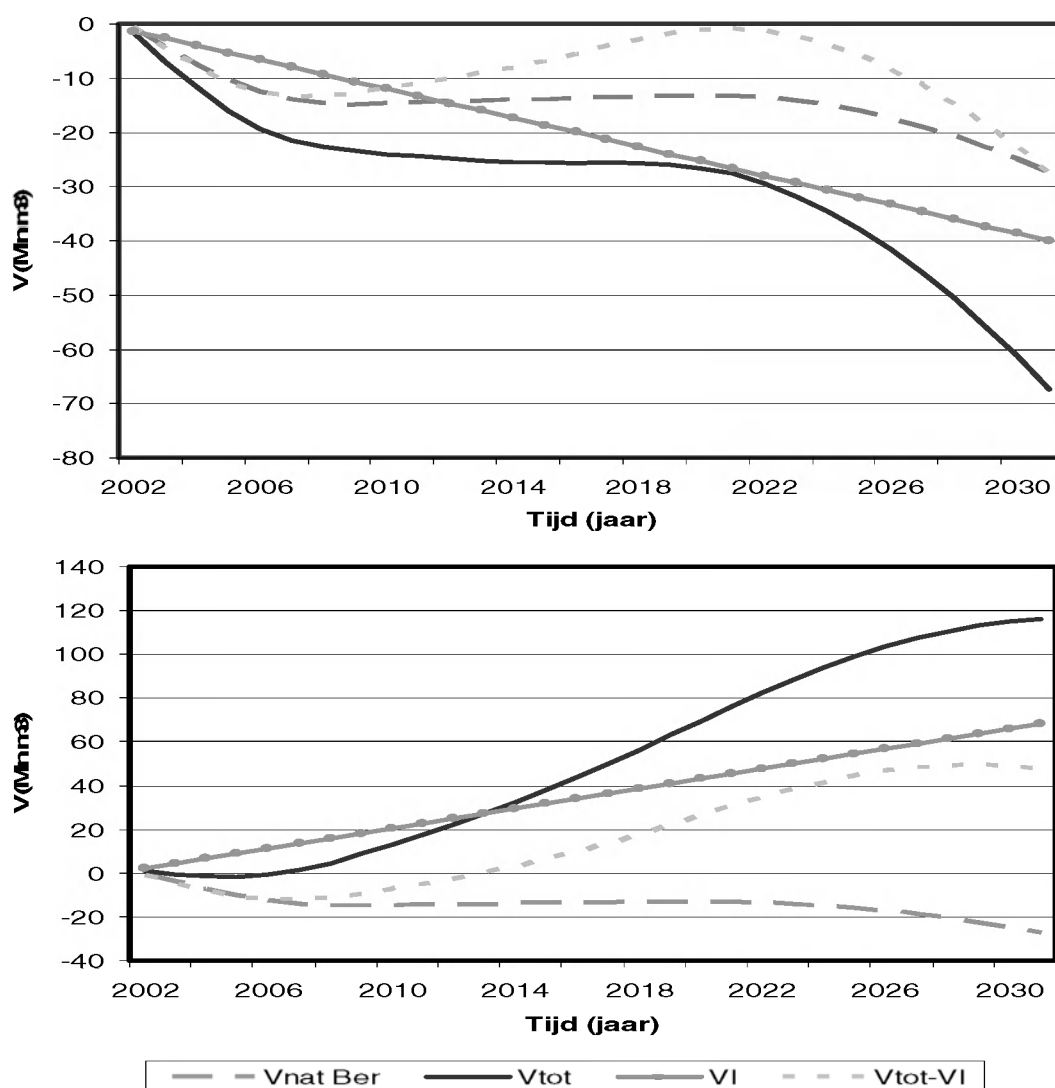
#### **Invloed van de ingrepen**

Aan de hand van de volumeveranderingen welke zijn bepaald door het model voor de drie stortstrategieën, kan worden vastgesteld in hoeverre de ingrepen sturend zijn geweest bij de ontwikkelingen. Hiervoor worden de totale volume veranderingen van de drie berekeningen met elkaar vergeleken.



**Figuur 5-10: De cumulatieve volumeveranderingen in de Honte volgens het nulalternatief (boven) en bij alleen storten in de vaargeul (onder). De zwarte lijn geeft de (totale) volumeveranderingen aan, de gestreepte de berekende en afgeleide 'natuurlijke' erosie/sedimentatie en de grijze lijn de ingrepen.**

In Figuur 5-10 staan de volumeveranderingen in de Honte, de ebgeul van MC 1, zoals die zijn berekend door het SOBEK model voor 2 verschillende strategieën. In de eerste 10 jaar is het verloop ongeveer gelijk, de geul sedimenteert. Daarna is er een duidelijk verschil tussen het nulalternatief en die waarbij alleen in de vaargeul wordt gestort: bij het nulalternatief blijft de geul sedimenteren terwijl het alleen storten in de vaargeul resulteert in erosie. Dit is vooral interessant omdat in beide gevallen de storthoeveelheden in de geul zelf gelijk zijn. Het verschil zit hem in de storthoeveelheden in de vloedgeul van de cel zelf, de ebschaar van de Spijkerplaat, en die in de aangrenzende macrocel 3. Dit resultaat geeft aan dat in macrocel 1 de ingrepen inderdaad sturend zijn geweest, echter wel op schaal groter dan die van de geul en cel alleen.



**Figuur 5-11: De cumulatieve volumeveranderingen in de Pas van Terneuzen volgens het nulalternatief (boven) en bij alleen storten in de vaargeul (onder). De zwarte lijn geeft de (totale) volumeveranderingen aan, de gestreepte de berekende en afgeleide 'natuurlijke' erosie/sedimentatie en de grijze lijn de ingrepen.**

In het geulsysteem van de Pas van Terneuzen en Everingen, macrocel 3, is de invloed van ingrepen evident zoals duidelijk wordt uit Figuur 5-11. Of er sprake is van erosie of sedimentatie lijkt volledig te worden bepaald door de netto ingrepen. Dit in tegenstelling tot de situatie in macrocel 4, het geulsysteem van Middelgat en het gat van Ossensisse/de overloop van Hansweert, waar de sedimentatie in de ebgeul gewoon doorgaat, onafhankelijk van de netto ingreep. In de schaar van Valkenisse en Waarde, de vloedgeul van macrocel 5, zijn de ingrepen ook bepalend voor het teken van de volumeveranderingen. De Schaar van Noord in macrocel 6, erodeert onafhankelijk of de netto ingreep positief of negatief is wat betekent dat de ingrepen geen sturende invloed hebben.

Voor de meest oostelijk gelegen cel 7, bij Bath, en in de ebgeul van cel 5 en 6, zijn de volumeveranderingen min of meer gelijk in de drie strategieën. Echter, omdat de netto ingrepen alleen in grootte van elkaar verschillen is het niet mogelijk om een uitspraak te doen over het al dan niet sturend zijn van de ingrepen.

Uit het vergelijken van de verschillende strategieën blijkt dat de ingrepen sturend zijn in beide geulen van de macrocellen 1 en 3. Volgens de methode van Jeuken et al. (2003), het vergelijken van het verloop van de totale en natuurlijke volumeverandering, was dit alleen het geval in de vloedgeul van macrocel 1. De resultaten van beide methoden worden met elkaar worden vergeleken in Tabel 5-4 Deze laat zien dat voor de overige geulen beide methoden hetzelfde beeld geven.

**Tabel 5-4: Een vergelijking van de twee methoden voor het bepalen van de invloed van de ingrepen op de ontwikkeling van de geulen. Een + betekent dat de netto ingrepen sturend zijn en een — van niet. Een vraagteken geeft aan dat er geen uitspraak kan worden gedaan. In de kolom Vtot/Vnat is de uitspraak gedaan op basis van vergelijking tussen de totale en de natuurlijke volumeveranderingen. In de kolom strat is de uitspraak gedaan door de resultaten van de verschillende stortstrategieën met elkaar te vergelijken.**

|     | Ebgeul    |       | Vloedgeul |       |
|-----|-----------|-------|-----------|-------|
|     | Vtot/Vnat | strat | Vtot/Vnat | strat |
| MC1 | —         | +     | +         | +     |
| MC3 | —         | +     | —         | +     |
| MC4 | —         | —     | —         | —     |
| MC5 | —         | ?     | +         | +     |
| MC6 | +         | ?     | —         | —     |
| MC7 | +         | ?     | —         | ?     |

### 5.3.2 Samenvatting

De simulaties door het SOBEK-model van het nulalternatief en de twee extreme stortstrategieën, storten in de vaargeul en storten in de nevengeul, laten het volgende zien:

1. In het westelijk en middengebied van het estuarium, vormen de macrocellen 3 en 4 een probleem als het gaat om het behoud van het meergeulensysteem. Vooral het systeem Middelgat en Gat van Ossensisse/Overloop van Hansweert, zal bij voortzetting van het huidige stortbeleid sterk kantelen, waarbij het Middelgat snel ondieper wordt. Dit beeld klopt met de waarnemingen sinds 1900. Echter, de mate waarin dit volgens het model gebeurt, wordt mogelijk beïnvloed door de netwerk structuur waarmee het gebied is geschematiseerd. Ook in het systeem van de Pas van Terneuzen en Everingen wordt de nevengeul, de Everingen, bij voortzetting van het huidige stortbeleid snel ondieper volgens het model. Ook als deze situatie uiteindelijk zal stabiliseren zal het karakter van het meergeulensysteem wezenlijk anders worden door de veranderingen in het verhang.
2. Alleen storten in de nevengeulen is geen optie omdat het binnen 20 jaar leidt tot het verzanden van het Middelgat. De resultaten laten echter wel zien dat er in de andere cellen wel ruimte is.
3. Alleen storten in de vaargeul leidt tot relatieve netto sedimentatie in de huidige baggergebieden, met uitzondering van Vlissingen en Borssele. Dit kan een toename van het onderhoud betekenen t.o.v. het nulalternatief.
4. Het enkel storten in de vaargeul heeft een positief effect op het geulsysteem bij Terneuzen (macrocel 3) en Valkenisse (macrocel 5). Echter, de Pas van Terneuzen wordt minder dan 10 meter diep.
5. De drempel van Baarland aan de zeezijde van het Middelgat, macrocel 4, is een probleem; In alle drie de strategieën verzandt deze na verloop van tijd. Dit is een natuurlijk proces wat wel kan worden versterkt door ingrepen.

---

Het gebruik van de extremere randvoorwaarden in het SOBEK- model leidt tot extremere volumeveranderingen. Hier moet rekening mee worden gehouden bij het vaststellen van een verbeterde strategie.

## **5.4 Een ‘verbeterde’ strategie**

### **5.4.1 Verbetering stortstrategie**

Kan met behulp van deze resultaten een andere strategie worden ontworpen die beter is vanuit het oogpunt van behoud van het meergeulensysteem? En zo ja, hoe ziet deze verbeterde strategie voor het behoud van het meergeulensysteem er dan uit?

Om een idee te krijgen waar er ruimte is in het systeem om te storten worden de stortcriteria van het Cellenconcept gebruikt zoals beschreven in Jeuken et al (2003). Het belangrijkste verschil met de oorspronkelijke criteria is dat er rekening wordt gehouden met de morfologische ontwikkeling, d.w.z. erosie en sedimentatie, van de geulen.

Met behulp het Cellenconcept wordt de voorlopig verbeterde stortstrategie voorgesteld. Aan de hand van de modelresultaten tot nu toe en rekening houdend met de onzekerheden erin is eerst gekomen tot de volgende verbeteringsrichtingen:

- De probleemgebieden met betrekking tot de stabiliteit van het geulstelsel, geconstateerd aan de hand van de modelresultaten voor het nulalternatief, worden ontzien van storten.
- Er wordt meer gebruik gemaakt van ruimte tot storten in de vaargeulen.
- Ook de ruimte tot storten in het oostelijke deel van de Westerschelde wordt benut.

Concreet heeft het geleid tot de volgende veranderingen in de stortstrategie t.o.v. het nulalternatief:

1. Er wordt niet meer gestort in het Middelgat en minder in de Everingen dan in 2001. Ook de vloedgeul van macrocel 5, de Schaar van Valkenisse en Waarde, wordt ontzien.
2. Er wordt meer gestort in het gat van Ossensisse, de vloedgeul van macrocel 4 en bij Bath in de ebgeul van macrocel 7. In de Pas van Terneuzen en het Zuidergat zal wel worden gestort.
3. De drempel van Baarland wordt gebaggerd.

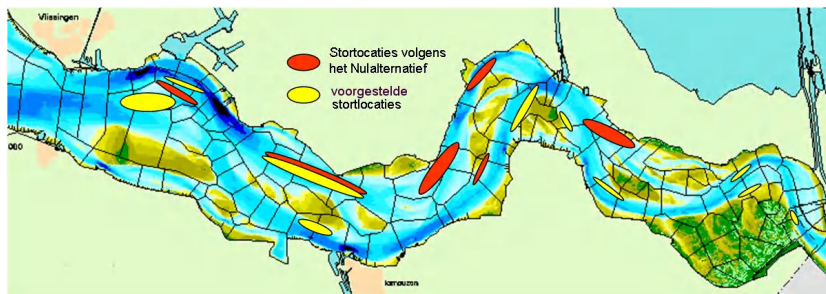
In Tabel 5.5 staan de ‘verbeterde’ storthoeveelheden per geul aangegeven. De volumes die worden gebaggerd of door zandwinning uit het systeem worden gehaald zijn gelijk aan die in het nulalternatief. De in de tabel gegeven hoeveelheden zijn bepaald naar een aantal testruns met het SOBEK model. Daarbij is vooral gekeken naar het behouden van het meergeulensysteem.

**Tabel 5-5: De ‘verbeterde’ storthoeveelheden in miljoenen profielkuubs per jaar per geul in vergelijking met de stortvolumes in het nulalternatief. Het percentage van het totale stortvolume staat ook aangegeven.**

|            | EbGeul    |     |     |    | Vloedgeul |     |     |     |
|------------|-----------|-----|-----|----|-----------|-----|-----|-----|
|            | verbeterd |     | nul |    | verbeterd |     | nul |     |
| <b>MC1</b> | 1.2       | 13% | 0.5 | 5% | 0.8       | 8%  | 0.9 | 9%  |
| <b>MC3</b> | 0.6       | 6%  | 0   | 0% | 0.8       | 8%  | 3   | 31% |
| <b>MC4</b> | 0         | 0%  | 0.7 | 7% | 4.5       | 47% | 3.6 | 38% |
| <b>MC5</b> | 1.1       | 11% | 0   | 0% | 0         | 0%  | 0.9 | 9%  |
| <b>MC6</b> | 0.3       | 3%  | 0   | 0% | 0.2       | 2%  | 0   | 0%  |
| <b>MC7</b> | 0.1       | 1%  | 0   | 0% | 0         | 0%  | 0   | 0%  |

De stortlocaties kunnen niet exact worden bepaald aan de hand van het 1D SOBEK model. De locaties zijn globaal aangegeven in Figuur 5-12. De belangrijkste aanpassing t.o.v. de locaties gebruikt in het nulalternatief is dat de stortlocatie in het Gat van Ossensisse meer naar de oostelijke richting is verplaatst. Deze aanpassing is gedaan omdat het netto transport daar in het SOBEK-model naar het oosten is waardoor het materiaal niet de pas van Terneuzen in gaat.

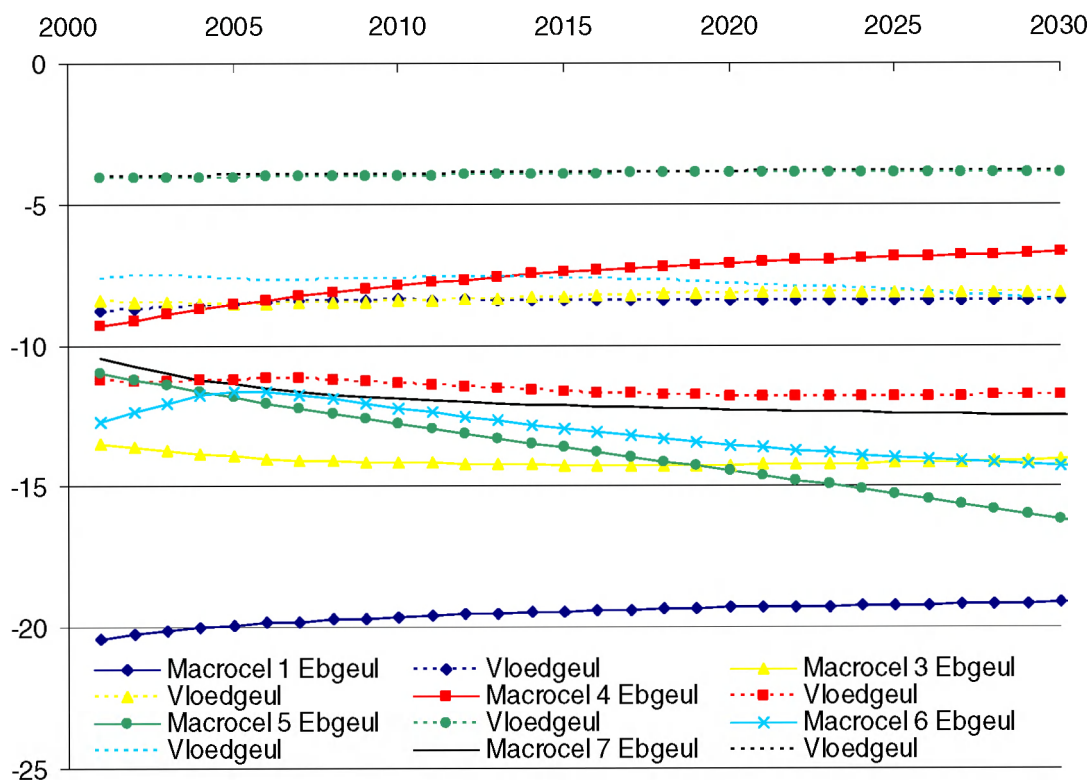
In werkelijkheid is het netto transport verder in het westen waarschijnlijk ook in de oostelijke richting, wat betekent dat de stortlocatie westelijker (verder van de baggerlocatie) dan de figuur aangeeft kan worden. Voor de interpretatie gaat het hier om een storting in de vloedgeul van macrocel 4 en wel op een zodanige locatie dat het gestorte materiaal niet gelijk wordt afgevoerd om problemen te veroorzaken in een meer naar het westen gelegen gebied.



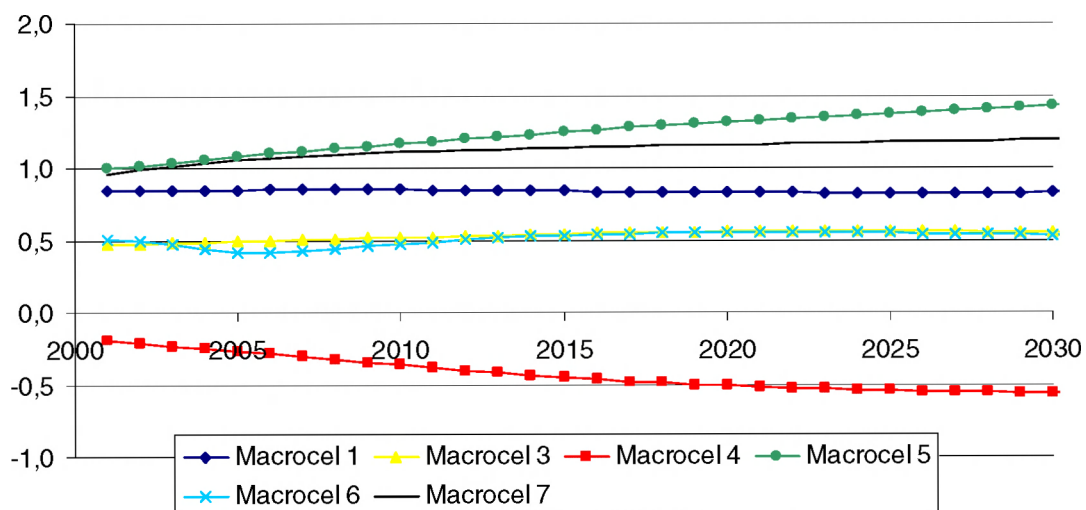
**Figuur 5-12: De stortlocaties in de ‘verbeterde’ strategie.**

#### **5.4.2 Resultaten SOBEK berekening met verbeterde stortstrategie**

Figuur 5-13 geeft de berekende ontwikkeling van de geulen bij gebruik van de ‘verbeterde’ stortstrategie aan. Het laat zien dat alle geulen min of meer stabiel blijven over de berekende periode. Alleen het gat van Ossensisse wordt na een jaar of 25 ondieper. Een nadere inspectie leert dat dit dan vooral om het stortgebied zelf gaat wat betekent dat hier niet oneindig veel gestort kan worden. Het Zuidergat/Overloop van Valkenisse, de ebgeul van cel 5, wordt net als in het nulalternatief snel dieper.



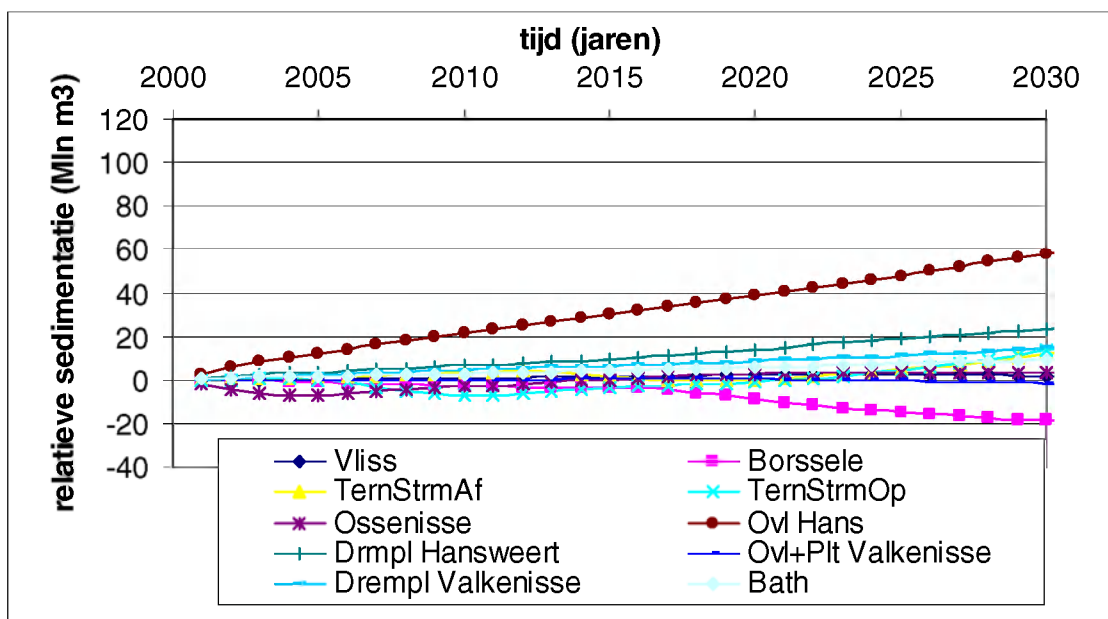
**Figuur 5-13 a: De gemiddelde diepte van de geulen t.o.v. laag water, NAP -2 m, in de 6 macrocellen bij storten volgens de 'verbeterde' strategie.**



**Figuur 5-13 b De verandering van de kantelindex voor de 6 macrocellen bij storten volgens de verbeterde strategie. Een positieve waarde betekent dat de ebgeul dieper is dan de vloedgeul.**

Uit de eerdere simulatie was al duidelijk dat het storten in de vaargeul een negatief effect heeft op de drempelgebieden en overige baggerlocaties. Figuur 5-14 laat de gevolgen van de verbeterde stortstrategie voor de huidige baggerlocaties zien. Een negatief getal betekent een positief effect ofwel minder onderhoud.

De figuur laat zien dat t.o.v. het nulalternatief er sprake is van een relatief netto sedimentatie. Alleen op de locatie bij Borssele zal de netto sedimentatie die er is volgens het nulalternatief afnemen. De grootste relatieve sedimentatie is op de drempel en Overloop van Hansweert en bij Ossenissee waar het model bij het nulalternatief een forse erosie geeft. Op de drempels alleen is de jaarlijkse relatieve sedimentatie gemiddeld zo'n 1 miljoen kubieke meters. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de drempels van Valkenisse en Hansweert. Als alle baggergebieden in 2001 (inclusief de overloop van Hansweert) in beschouwing worden genomen is de toename ongeveer 4 miljoen kubieke meters. Dit wordt voor het grootste deel veroorzaakt doordat er in het Overloop van Hansweert / Gat van Ossenissee nu effectief wordt gestort i.p.v. van gebaggerd. Hieruit moet worden geconcludeerd dat de voorgestelde stortstrategie een toename van het onderhoudsbaggerwerk veroorzaakt. Dit betekent dat een deel van de beoogde verbetering wordt weer geëlimineerd. Immers, meer baggeren betekent ook meer storten. Ook moet worden opgemerkt dat de berekende  $4 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$  relatieve sedimentatie niet als de exacte mate van de toename van het onderhoudsbaggerwerk worden geïnterpreteerd. Het hiervoor gebruikte model is niet geschikt voor de bepaling van de exacte mate van de toename.



**Figuur 5-14: Het verschil t.o.v. het nulalternatief in volumeverandering in de baggergebieden bij storten volgens de verbeterde strategie. Een minteken duidt op meer erosie of minder sedimentatie en is dus een positief effect.**

#### 5.4.3 Samenvatting

Op basis van de berekeningen met het SOBEK model en met behulp van het Cellenconcept is er een 'verbeterde' stortstrategie bepaald. Deze strategie is er op gericht om het meergeulensysteem te behouden. Bij voortzetting van het stortbeleid van 2001 worden de Everingen en het Middelgat sterk ondieper wat kan leiden tot het verdwijnen van het dynamische karakter van het systeem. Voor het Middelgat is dit overigens een natuurlijk proces dat door het storten alleen maar wordt versterkt. In de verbeterde strategie wordt er t.o.v. het nulalternatief meer in de vaargeul en in het oostelijk deel van de Westerschelde gestort.

---

Bovendien wordt de drempel van Baarland gebaggerd zodat het Middelgat niet verzandt. Het resultaat is stabiele geulen maar ook relatieve netto sedimentatie t.o.v. het nulalternatief. De verbeterde stortstrategie leidt wel tot een toename van onderhoudsbaggerwerk omdat er relatief meer in de vaargeul wordt gestort. Volgens de SOBEK resultaten is de toename orde 4 miljoen m<sup>3</sup> per jaar, wat veel meer is dan de voorspelling door de resultaten van DELFT3D (zie Hoofdstuk 6). Het SOBEK model is natuurlijk niet bedoeld om voorspellingen van het benodigde onderhoudsbaggerwerk te doen, maar de berekende tendens van toename is wel geloofwaardig. Opgemerkt wordt dat door de toename van het onderhoudsbaggerwerk een deel van het verbeteringseffect van de voorgestelde stortstrategie teniet wordt gedaan. Immers, meer baggeren betekent ook meer storten. Nadere studie zal dus nodig zijn om de verbeterde stortstrategie te verfijnen en om de effecten ervan op de morfologische ontwikkelingen te evalueren.

De stortlocaties zoals deze zijn gekozen in de verbeterde strategie moeten niet te strikt worden gezien. Dit geldt met name in het middengebiet van de Westerschelde bij de Macrocellen 3 en 4. Het gaat hier om een morfologisch zeer complex gebied waar de schematisatie mogelijk een grotere rol speelt dan op andere locaties. Nader studie met b.v. een gevalideerde DELFT3D model zal nodig zijn om de exacte stortlocaties te bepalen. In de praktijk zal het ook betekenen dat men het beleid met betrekking tot stortlocaties flexibel houden om goed te anticiperen op de opgetreden morfologische ontwikkelingen in het estuarium.

## **5.5 Verruiming**

### **5.5.1 Inleiding**

In het voorgaande deel van dit hoofdstuk is er op basis van modelberekeningen en het Cellenconcept een 'verbeterde' stortstrategie bepaald. In deze paragraaf zal worden gekeken of met deze strategie het materiaal van het voorspelde toegenomen onderhoudsbaggerwerk, zie Hoofdstuk 4, ook in het estuarium kan worden gestort. Hiervoor worden drie simulaties uitgevoerd, op basis van een bodem van na een verdieping tot 13,1 m:

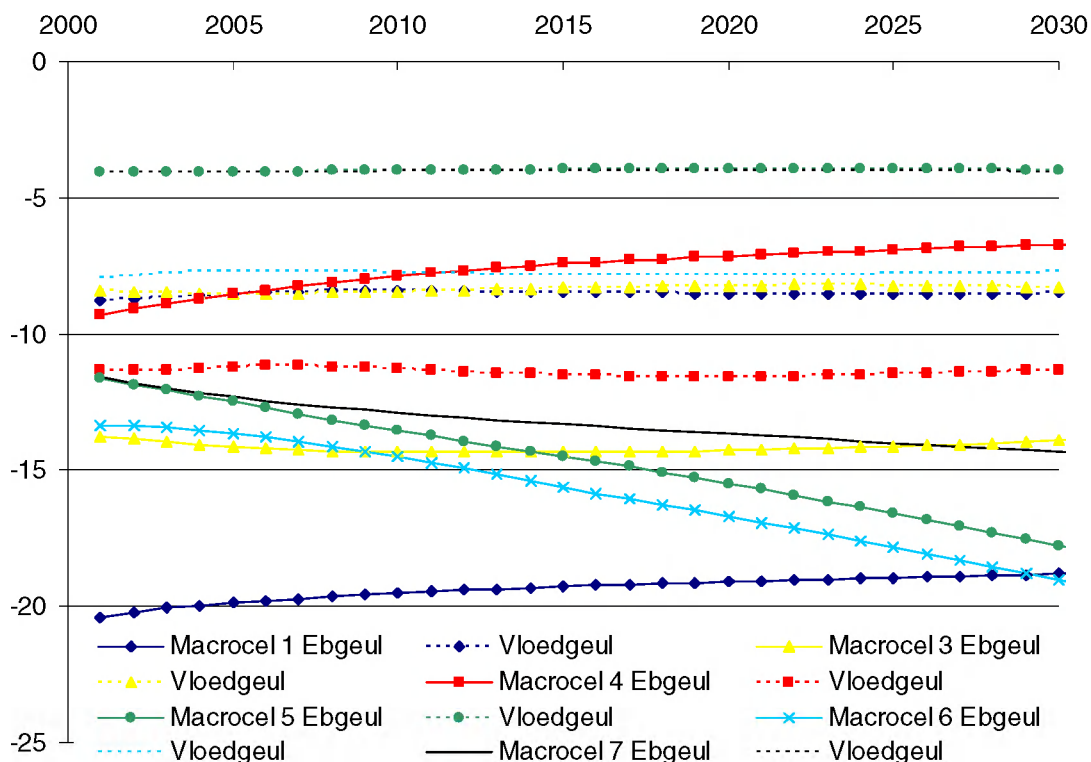
1. Al het materiaal dat weg is gehaald voor de verdieping wordt afgevoerd en het voorspelde onderhoudsvolume van 12.3 Mm<sup>3</sup> (zie Tabel 4-2) wordt gestort volgens de verbeterde strategie.
2. Al het materiaal dat verwijderd voor de verdieping wordt gestort in de monding als onderdeel van een vooroeversuppletie voor de kust van Zeeuws Vlaanderen. Het voorspelde onderhoudsvolume van 12.3 Mm<sup>3</sup> wordt gestort volgens de verbeterde strategie.
3. Al het materiaal, aanleg plus het voorspelde onderhoudsvolume, wordt gestort in het estuarium volgens de verbeterde strategie.

Om deze sommen te kunnen maken worden de volgende aannames gedaan:

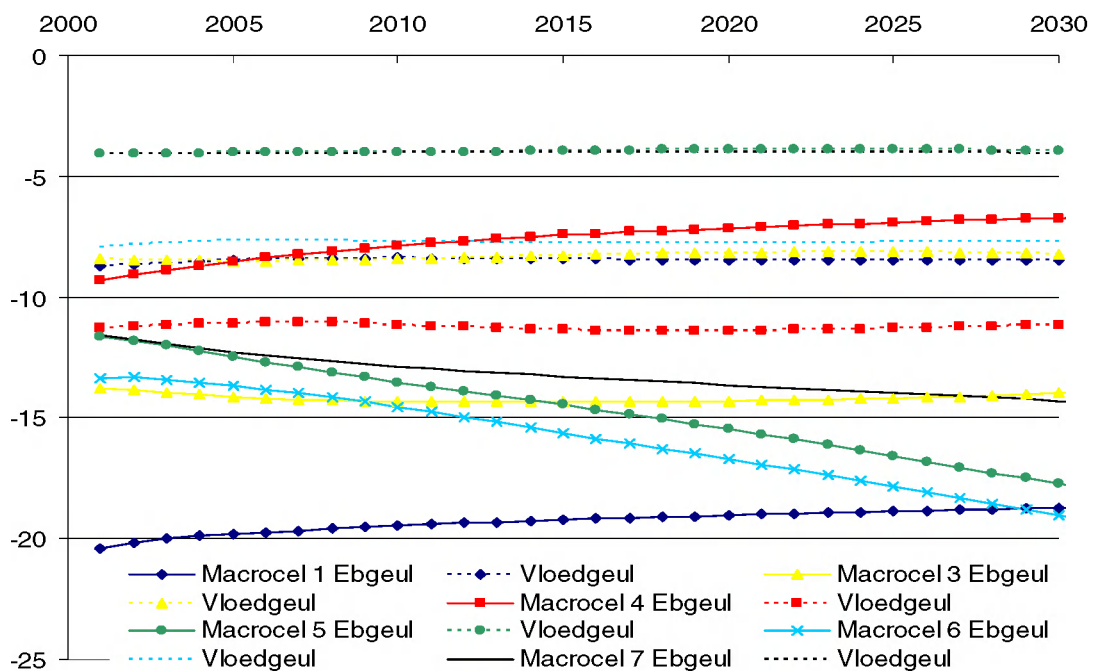
1. Voor de verdieping tot 13,1 meter, inclusief een overdiepte van 70 cm, moet er effectief 6.6 Mm<sup>3</sup> worden weggebaggerd (ProSes, steekkaart verruiming, versie 08-05-03).
2. De aanlegspecie wordt in een periode van 2 jaar gestort met een gelijkmatige verdeling over de tijd.
3. Het (voorspelde) onderhoudsbaggerwerk is constant over de gehele simulatieperiode.
4. Het storten volgens de verbeterde strategie betekent dat de te storten hoeveelheid wordt verdeeld over de diverse locaties conform de verbeterde strategie.

## 5.5.2 Resultaten

De figuren 5-15 en 5-16 laten de ontwikkeling van de gemiddelde geuldieptes zien in 50 jaar volgens de bovengenoemde 3 scenario's. Er is geen onderscheid tussen het scenario waarbij de aanleg specie wordt afgevoerd en die waarbij deze wordt gestort in de monding. Deze laatste resultaten worden ook niet apart getoond. De onderlinge verschillen zijn dermate klein dat het nauwelijks is te zien. Het verloop in de tijd geeft hetzelfde beeld als die bij de verbeterde strategie met de huidige bodem. Het grote verschil is wel dat de stortlocatie, het Gat van Ossensisse, uiteindelijk te ondiep wordt.



**Figuur 5-15: Ontwikkeling van de geulen bij een verdieping tot 13,1 m als alle aanlegspecie wordt afgevoerd en de voorspelde onderhoudsspecie wordt gestort volgens de 'verbeterde' strategie.**



**Figuur 5-16: Ontwikkeling van de geulen bij een verdieping tot 13,1 m als alle aanlegspecie en de voorspelde onderhoudsspecie wordt gestort volgens de ‘verbeterde’ strategie.**

## 5.6 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

Het SOBEK model wordt gebruikt om de invloeden van de stortstrategie op de morfologische ontwikkelingen van het estuarium te evalueren. Eerst zijn de huidige strategie en tweetal extreme strategieën (alles in de nevengeulen en alles in de hoofdgeulen) gesimuleerd met het model. Aan de hand van de resultaten van deze modelberekeningen kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De stortstrategie heeft belangrijke invloeden op de morfologische ontwikkelingen van het estuarium. Door de stortstrategie aan te passen kan men de stabiliteit van het meergeulensysteem beïnvloeden.
- Alle berekeningen zijn uitgevoerd met een niet in de tijd variërende stortstrategie. De resultaten van bijna alle berekeningen geven aan dat er op den duur ergens een probleem ontstaat. Dit betekent dat een flexibele stortstrategie die meer rekening houdt met de morfologische ontwikkelingen nodig is. In de praktijk gebeurt dit ook tot op zekere hoogte.
- De modelresultaten suggereren wel dat er in het systeem voldoende ruimte voor het storten van baggerspecie aanwezig is.
- Als de huidige stortstrategie wordt voortgezet kunnen er problemen ontstaan in het westelijke (macrocel 3) en het middendeel (macrocel 4) van het estuarium.

Op basis van deze modelresultaten is de ‘verbeterde stortstrategie’ voorgesteld, die de volgende veranderingen t.o.v. de huidige stortstrategie inhoudt:

- niet meer storten in het Middelgat (ebgeul van macrocel 4);
- minder storten in de Everingen (vloedgeul van macrocel 3);
- meer storten in de hoofdgeulen, met name het Gat van Ossensisse;
- benutten van de ruimte tot storten in het oostelijke deel van de Westerschelde.

---

Met deze verbeterde stortstrategie zijn berekeningen uitgevoerd voor zowel de huidige vaargeuldiepte (met het bijbehorende onderhoudsbaggerwerk) als voor het 13,1 verdiepingsscenario (met toegenomen onderhoudsbaggerwerk) waarbij verschillende opties van het afhandelen van de aanlegbaggerspecie zijn beschouwd. Uit de resultaten van deze berekeningen zijn de volgende conclusies getrokken:

- De verbeterde stortstrategie heeft een positief effect op de stabiliteit van het meergeulensysteem. De modelresultaten suggereren dat ook bij een verdieping van de vaargeul tot 13,1 m het waarschijnlijk mogelijk is het storten (van toegenomen hoeveelheid baggermateriaal) zodanig in te richten dat het meergeulensysteem wordt behouden. Wel moet de stortstrategie flexibel worden gehouden aangezien er na lange periode ergens anders dan volgens het nulalternatief probleem kan ontstaan volgens het model.
- De verbeterde stortstrategie heeft een negatieve invloed op het benodigde onderhoudsbaggerwerk, hoewel de exacte mate van toename niet met het model kan worden voorspeld. Dit betekent dat een deel van de verbetering weer teniet wordt gedaan. Dit effect is niet meegenomen in het vooronderzoek.

Met het SOBEK model is het niet mogelijk de exacte stortlocaties aan te wijzen. Daarom moet de verbeterde stortstrategie alleen op groot schaalniveau worden geïnterpreteerd. Exacte locaties moet men nader bepalen aan de hand van velddata over de morfologische veranderingen en / of aan de hand van een goed gevalideerd 2D/3D morfodynamisch model. Hierbij kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

- De morfologische ontwikkeling van het estuarium, met name de stabiliteit van de geulen, goed monitoren. Hierbij kan men gebruik maken van de indicatoren zoals gebruikt in de huidige studie.
- Het vaargeulbeleid moet zo flexibel mogelijk zijn zodat goed geanticipeerd kan worden op de gemeten morfologische veranderingen van het estuarium.
- Nadere studie uitvoeren aan de hand van een goed gevalideerd 2D/3D morfodynamisch model om de nieuwe stortlocaties te bepalen. Daarbij moet ook het effect van de veranderde stortstrategie op het benodigde onderhoudsbaggerwerk in rekening worden gebracht.
- Het SOBEK model voor de Westerschelde beter kalibreren en valideren om tot een beter gereedschap te komen voor het in de toekomst verder verbeteren van stortstrategieën.

---

## 6 DELFT3D resultaten

### 6.1 Inleiding

Baggeren en storten ten behoeve van verruimen (verdieping en/of verbreding) en onderhouden van de vaargeul zijn ingrepen die belangrijke invloeden op de morfologische ontwikkelingen in het estuarium hebben. De omvang van de benodigde baggerhoeveelheid voor het vaargeulonderhoud bepaalt in belangrijke mate de invloed van baggeren en storten op de morfologische ontwikkelingen van het estuarium. Temeer omdat alle gebaggerde specie uit de Westerschelde ook weer in de Westerschelde moet worden teruggestort. Het storten kan weer van invloed zijn op de stabiliteit van het dynamische meergeulensysteem. Daarom is het belangrijk om de benodigde baggerhoeveelheid onder invloed van verschillende maatregelen zo nauwkeurig als mogelijk te kunnen voorspellen<sup>5</sup>. Voorspelling van de benodigde baggerhoeveelheid voor het vaargeulonderhoud vormt een sleutelement in de huidige studie.

Door het procesgebaseerde karakter en de relatief hoge resolutie van het rekenrooster is het DELFT3D model voor het Schelde estuarium, zoals beschreven in Bijlage A, potentieel een goed instrument voor de voorspelling van de benodigde baggerhoeveelheid voor het vaargeulonderhoud. Het in de huidige studie gebruikte DELFT3D model is echter nog niet voldoende morfologisch gekalibreerd. Het model is daardoor nog niet geschikt om de sedimentatiesnelheid in de baggergebieden binnen het estuarium in absolute zin te berekenen. De resultaten van de uitgevoerde DELFT3D berekeningen worden daarom op relatieve manier gebruikt om de invloed van verschillende maatregelen op de benodigde baggerhoeveelheid te bepalen. Dit betekent dat de resultaten van de verschillende berekeningen met elkaar worden vergeleken, en met de resultaten van het nulalternatief in het bijzonder. Op deze wijze kan de relatieve verandering van de baggerhoeveelheid onder invloed van een bepaalde maatregel worden onderzocht. De resultaten van het DELFT3D model worden verder ook gebruikt om de fysische mechanismen voor de verandering van sedimentatiesnelheid op de baggergebieden te identificeren en daarmee de aannames / hypothesen in het 1 element model te toetsen.

De volgende typen maatregelen worden in dit hoofdstuk aan de hand van verschillende DELFT3D berekeningen onderzocht:

1. Storting op de plaatpunt van Walsoorden
2. Verruiming van de vaargeul
3. Verbetering stortstrategie

Storting op de plaatpunt van Walsoorden is bedoeld om extra bergruimte voor baggerspecie te creëren en om de stromingsconditie rondom de drempel van Hansweert te verbeteren. Voor deze maatregel wordt één berekening uitgevoerd. De resultaten hiervan worden gebruikt om te evalueren hoe het gestorte materiaal zich gedraagt en hoe de storting de sedimentatie op de drempel van Hansweert beïnvloedt.

---

<sup>5</sup> Voor het voorspellen van het volume onderhoudsbaggerwerk is een goed inzicht in de historie van baggeren en storten in het estuarium onontbeerlijk.

Volgens veldwaarnemingen en het 1-element model voor het voorspellen van onderhoudsbaggerwerk, neemt het onderhoudsbaggerwerk bij een verruiming vooral toe doordat het te onderhouden oppervlak groter wordt en niet zo zeer omdat het overdiepte (verschil tussen te onderhouden diepte en evenwichtsdiepte) toeneemt. Om dit mechanisme te toetsen worden twee berekeningen m.b.t. verruiming van de vaargeul uitgevoerd: één alleen met een verdieping (naar 13,1 m) van de vaargeul en de andere met naast dezelfde verdieping ook een verbreding van 25% voor de vaargeul.

In het vooronderzoek wordt een voorlopig verbeterde stortstrategie voorgesteld op basis van voorspellingen met behulp van het SOBEK model (zie Hoofdstuk 5). In deze strategie wordt beduidend meer gestort in de vaargeul en meer in het oostelijke deel van de Westerschelde. Een belangrijke vraag is of meer storten in de vaargeulen leidt tot een toename van de sedimentatie in de baggergebieden. Meer algemeen is de vraag hoe belangrijk de stortstrategie is voor de grootte van het onderhoudsbaggerwerk. Naar aanleiding van de OOSTWEST studie is indertijd voorgesteld om meer in het westelijke deel van de Westerschelde te storten dan in het oostelijke deel. Dit is na de tweede verdieping ook gebeurd. De vraag is of dit tot de gewenste effecten heeft geleid (o.a. vermindering van het onderhoudsbaggerwerk in het oostelijk deel). Om na te gaan hoe groot de invloed van de stortstrategie is op de sedimentatie in de baggergebieden worden drie berekeningen uitgevoerd, met respectievelijk de stortstrategie volgens (1) het nulalternatief, (2) de verbeterde stortstrategie en (3) de oude stortstrategie (1995).

Voor de evaluatie van het onderhoudsbaggerwerk met behulp van het 1-element model zijn de volgende baggergebieden beschouwd (vaknummer en naamgeving):

|           |                               |                   |
|-----------|-------------------------------|-------------------|
| <b>3</b>  | <b>Drempel van Bath</b>       | <b>Macrocel 7</b> |
| <b>4</b>  | <b>Drempel van Valkenisse</b> | <b>Macrocel 6</b> |
| 5         | Ov. Valkenisse, boei 56       | <b>Macrocel 5</b> |
| 6         | Ov. Valkenisse, boei 52       | <b>Macrocel 5</b> |
| 7         | ten zuiden drempel Hansweer   | <b>Macrocel 5</b> |
| <b>8</b>  | <b>Drempel van Hansweert</b>  | <b>Macrocel 5</b> |
| 9         | Overloop van Hansweert        | <b>Macrocel 4</b> |
| 10        | Gat van Ossenis, boei 32      | <b>Macrocel 4</b> |
| 11        | Gebied 11                     | <b>Macrocel 4</b> |
| 12        | Pas van Terneuzen             | <b>Macrocel 3</b> |
| <b>13</b> | <b>Drempel van Borssele</b>   | <b>Macrocel 3</b> |
| 14        | Drempel van Vlissingen        | <b>Macrocel 1</b> |

Van deze gebieden zijn gebieden 3, 4, 8 en 13 echt drempelgebieden, die verantwoordelijk zijn voor een groot deel van het onderhoudsbaggerwerk. Daarom zal de analyse van de DELFT3D modelresultaten vooral op deze drempelgebieden worden toegespitst. Voor een uitvoerige beschrijving van de kenmerken van deze baggergebieden en het baggeren in de Westerschelde wordt verwezen naar Claessens (1999).

Naast de berekeningen met de maatregelen erin is er ook een berekening uitgevoerd waarin helemaal geen ingreep is meegenomen. Deze berekening fungeert vooral als referentie bij de beschouwing van de resultaten van de andere berekeningen. Een overzicht van alle 7 beschouwde berekeningen in dit hoofdstuk wordt gegeven in paragraaf 6.2 samen met een beschrijving van de opzet van de berekeningen. De resultaten van de referentie berekening voor de autonome ontwikkeling worden beschreven in paragraaf 6.3. Daarna worden de resultaten van de drie typen maatregelen in de paragrafen 6.4, 6.5 en 6.6 behandeld. De conclusies van de beschouwingen worden samengevat in paragraaf 6.7.

---

## 6.2 Model opzet en overzicht berekeningen

De opzet van het gebruikte DELFT3D model is beschreven in Bijlage A. Het rekenrooster bevat 9017 actieve cellen. In dwarsrichting varieert de roosterafstand van ongeveer 90 m tot 150 m, in langsrichting van 300 m tot 750 m. Er wordt gerekend met 10 verticale lagen, waarbij iedere laag 10 procent van de waterdiepte beslaat. Voor hydrodynamische ruwheid wordt een ruimtelijk variabele Manning-waarde gebruikt. De ruimtelijke variatie is overgenomen van het SCALWEST model. De rekentijdstap van het model bedraagt 1 minuut. Er is steeds gerekend met een representatieve doottij-springtijcyclus. In het model worden het bodemtransport en het suspensie transport apart beschouwd. De transportformule van Van Rijn is gebruikt om het bodemtransport en de evenwichtsconcentratie van het suspensie transport uit te rekenen. De morfologische factor is zodanig gekozen dat een doottij-springtijcyclus van de waterbeweging een jaar betekent voor de morfologische ontwikkeling.

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van in totaal 7 berekeningen (zie

---

Tabel 6-1) beschouwd. Deze 7 berekeningen kunnen in twee groepen worden verdeeld<sup>6</sup>. In de eerste groep berekeningen (X19, X22, X23, X24) wordt geen baggeren en storten ten behoeve van het vaargeulonderhoud gepleegd. De baggergebieden worden dus niet op de vereiste vaardiepte onderhouden en er wordt ook niet gestort in het model. Deze groep berekeningen zijn bedoeld om de effecten van een verdieping / verruiming van de vaargeul en van het storten op de plaatpunt van Walsoorden te onderzoeken. De genoemde maatregelen zijn via de initiële bathymetrie geïmplementeerd. De berekening X19 is bedoeld om de morfologische veranderingen volgens het nulalternatief te simuleren. Maar de berekening simuleert eigenlijk de natuurlijke morfologische verandering waarbij er in het estuarium vanaf 2001 geen menselijke ingrepen meer worden uitgevoerd. Daarom wordt deze berekening aangeduid als Autonome Ontwikkeling. Deze berekening wordt voor een periode van 2 jaar uitgevoerd, waarvan het eerste jaar als inspeelperiode wordt beschouwd. De 1 jaar inspeelperiode wordt voldoende geschat om de kleinschalige verstoringen, die tijdens de schematisatie van de initiële bodem worden geïntroduceerd, uit te dempen. Alleen de resultaten van het tweede jaar worden gebruikt als referentie bij de beschouwingen van de andere simulaties. Om de berekeningen binnen deze groep goed met elkaar te kunnen vergelijken voor het evalueren van de beschouwde maatregelen, worden de maatregelen bij de berekeningen X22, X23 en X24 geïmplementeerd in de bodem brekend na 1 jaar volgens X19. Met de zo ontstane initiële bodems worden de berekeningen voor een periode van 1 jaar uitgevoerd. Met andere woorden, de berekeningen X22, X23 en X24 zijn zogenaamd doorstart berekeningen van X19 na 1 jaar, maar dan met storten of verruiming van de vaargeul verwerkt in de initiële bodem. De relatieve korte simulatie perioden van deze groep berekeningen maken het gerechtvaardigd dat ingrepen niet tijdens de berekeningen worden meegenomen, dus alleen de initiële effecten worden beschouwd. Bovendien worden de resultaten voornamelijk op een relatieve manier beschouwd.

---

<sup>6</sup>Het meenemen van baggeren en storten in een simulatie met DELFT3D-Online-SED kan sinds februari 2004. Tijdens de uitvoering van de eerste groep berekeningen, in het najaar van 2004, was dit nog niet mogelijk. Door een met de opdrachtgever afgesproken wijziging in de invulling van de DELFT3D-berekeningen was het mogelijk om de tweede groep berekeningen met baggeren en storten uit te voeren.

**Tabel 6-1: Overzicht beschouwde simulaties**

| Run nr. | Beschrijving                           | Storten                                         | Baggeren                                                                                                      | Simulatie<br>-periode | Initiële bodem                                |
|---------|----------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|
| X19     | autonome<br>ontwikkeling               | geen                                            | niet meegenomen<br>tijdens de<br>berekeningen                                                                 | 2 jaar                | 2001                                          |
| X22     | storten<br>Walsoorden                  |                                                 | baggerhoeveelheden<br>bepaald aan de hand<br>van sedimentatie op<br>baggergebieden in 1<br>jaar               | 1 jaar                | ingespeelde bodem +<br>Walsoorden verhoogd    |
| X23     | verdieping131                          |                                                 |                                                                                                               | 1 jaar                | ingespeelde bodem +<br>verdieping             |
| X24     | verdieping131<br>+ verbreding          |                                                 |                                                                                                               | 1 jaar                | ingespeelde bodem +<br>verdieping& verbreding |
| X25     | Nulalternatief<br>baggeren-<br>storten | 9.6 Mm3, volgens<br>nulalternatief              | baggergebieden op<br>vereiste diepte<br>onderhouden                                                           | 2 jaar                | 2001                                          |
| X26     | verbeterde<br>stortstrategie           | 9.6 Mm3 volgens<br>verbeterde<br>stortstrategie | Baggerhoeveelheden<br>bepaald als som van<br>geregistreerd<br>baggeren &<br>sedimentatie op<br>baggergebieden |                       |                                               |
| X27     | oude<br>stortstrategie<br>(1995)       | 9.6 Mm3 volgens<br>oude<br>stortstrategie       |                                                                                                               |                       |                                               |

Om de invloed van de drie verschillende stortstrategieën op het onderhoudsbaggerwerk te evalueren worden de berekeningen X25 (de stortstrategie uit het nulalternatief), X26 (de verbeterde strategie) en X27 (de oude strategie) uitgevoerd. In deze tweede groep berekeningen (X25, X26, X27) wordt vaargeulonderhoud wel gesimuleerd. In de baggergebieden wordt de minimum gegarandeerde diepte onderhouden. De in het model gebaggerde specie wordt buiten het estuarium gestort. In alle drie berekeningen wordt er in de Westerschelde in totaal 9.6 miljoen kubieke meter sediment (in situ) per jaar gestort. Deze hoeveelheid is conform het nulalternatief, maar is niet in overeenstemming met de hoeveelheid baggeren zoals door het model wordt bepaald. Het gevolg hiervan is dat er netto sediment in het systeem wordt gebracht. Deze inconsistentie tussen het baggeren en storten beïnvloedt de resultaten niet omdat de simulatieperiode van de berekeningen relatief kort is, en omdat de resultaten van de berekeningen op een relatieve manier worden gebruikt. In de berekeningen wordt het storten meegenomen door per rekentijdstap een bodemniveauperhoging van gelijke dikte per stortgebied aan te brengen. De totale hoeveelheid storten is dus gelijkmatig over de tijd verdeeld. Alle drie berekeningen binnen deze groep worden voor een periode van 2 jaar uitgevoerd, met de 2001 bodem als initiële voorwaarde. De stortstrategie, i.e. de verdeling van het storten over de verschillende stortgebieden binnen het estuarium is verschillend.

De manier waarop de baggerhoeveelheid per baggergebied wordt bepaald verschilt per groep van berekeningen. Bij de eerste groep berekeningen, waarin het baggeren tijdens de simulatie niet is meegenomen, wordt de vereiste baggerhoeveelheid bepaald als de totale hoeveelheid sedimentatie in 1 jaar binnen het baggergebied. Bij de tweede groep berekeningen worden de baggergebieden op de vereiste diepten onderhouden en de benodigde hoeveelheid baggeren per gebied bijgehouden. Deze geregistreerde baggerhoeveelheid in zo'n gebied en de overige sedimentatie in het baggergebied worden gesommeerd over 1 jaar.

---

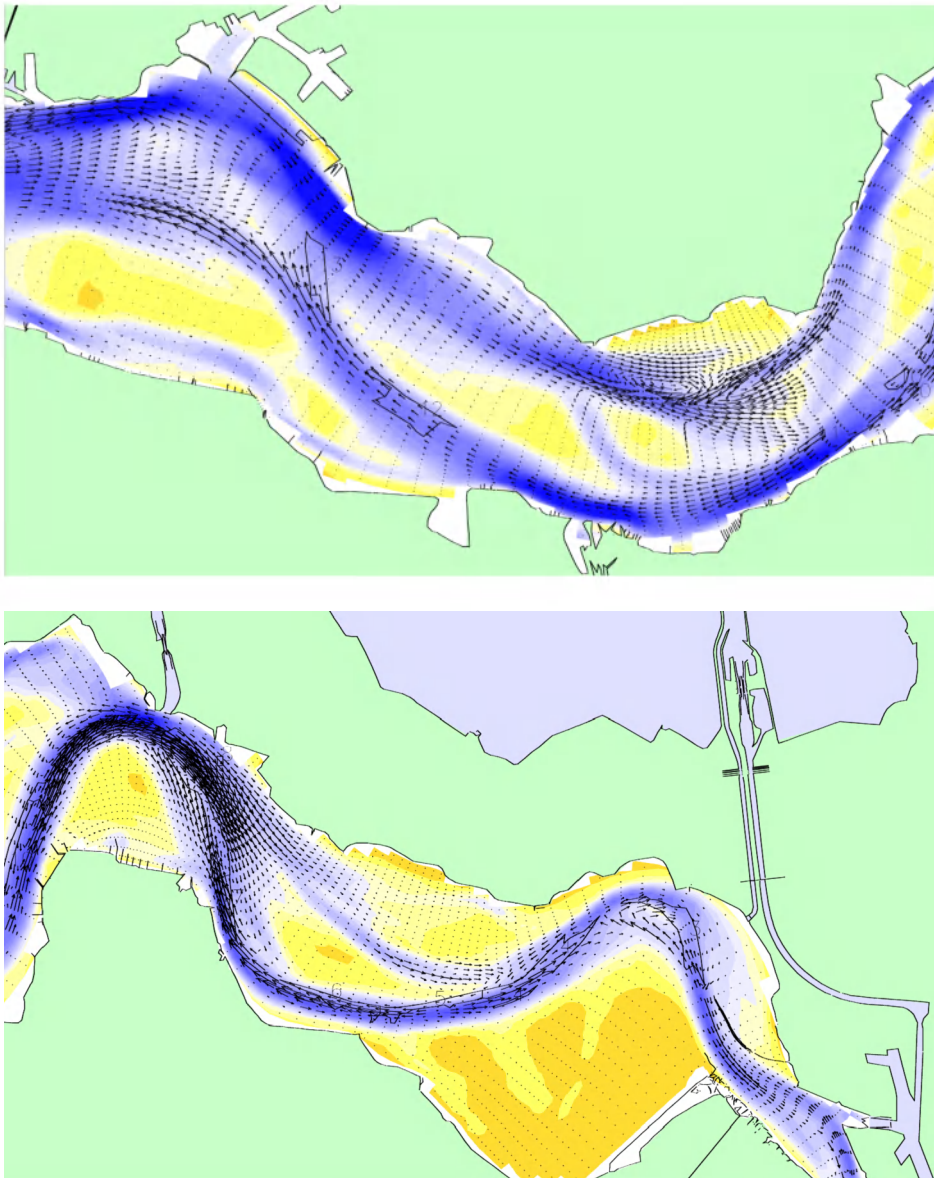
Deze som is gelijk aan het benodigde baggervolume. De aanvulling van de opgetreden sedimentatie is nodig omdat in de meeste baggergebieden een overdiepte (van meer dan 0,5m) in de initiële bodem aanwezig is en omdat de simulatie periode van de berekeningen relatief kort is. Zonder deze aanvulling zouden de baggerhoeveelheden ernstig worden onderschat.

### 6.3 Autonome ontwikkeling

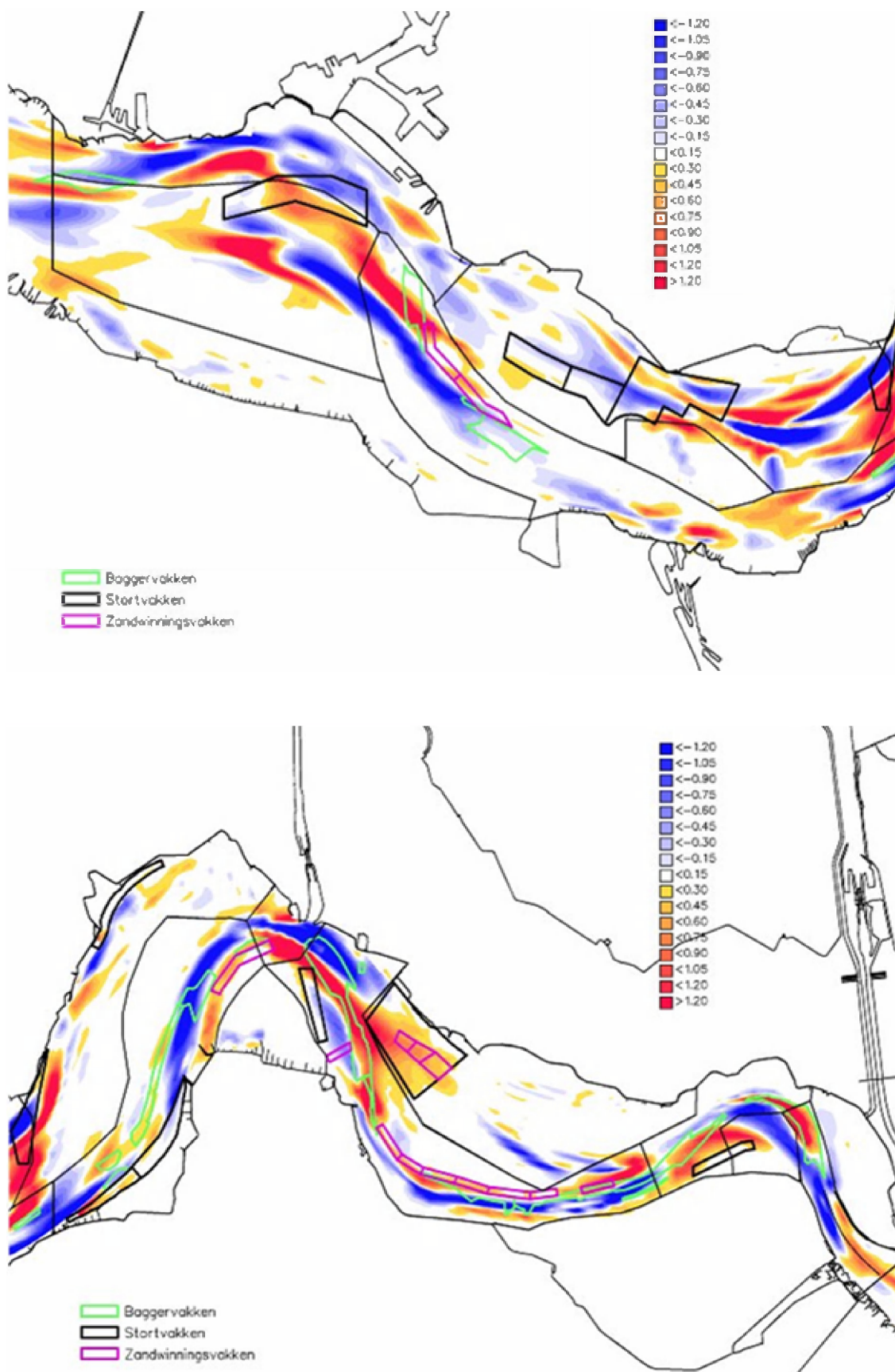
Voordat de effecten van de verschillende maatregelen worden geëvalueerd worden eerst de resultaten van de berekening zonder ingrepen (X19) beschouwd. Deze berekening start met de 2001 bodem en neemt helemaal geen ingrepen mee tijdens de simulatie. De berekening is vooral bedoeld als referentie voor de andere berekeningen. Omdat er geen echte kalibratie van het model is uitgevoerd m.b.t. de morfologie is het belangrijk om na te gaan of de resultaten van het model realistisch zijn.

Figuur 6.1 toont het berekende resttransport veld. In dit patroon zijn duidelijke vloed en eb-circulaties waar te nemen die overeen komen met de algemene verwachtingen over de verdeling tussen eb- en vloeddominante gebieden binnen het estuarium (zie bijv. Jeuken, 2000). Eén detail valt wel op: in macrocel 4, nabij Hansweert, is het resttransport door beide geulen (dus zowel de vloed geul als de ebgeul) landwaarts gericht, d.w.z. vloedgedomineerd.

De ruimtelijke resolutie van het DELFT3D-model maakt het mogelijk heel specifiek naar de erosie en sedimentatiepatronen in de huidige bagger- en stortgebieden te kijken, zie Figuur 6.2. In deze figuur zijn ook de baggergebieden aangegeven (de groen omlijnde gebieden). Men kan verwachten dat in deze gebieden in werkelijkheid sedimentatie optreedt. Zoals de figuur laat zien treedt er op de meeste baggergebieden inderdaad sedimentatie op volgens de modelresultaten. Dit is een aanwijzing dat het model het in ieder geval kwalitatief goed doet. Uit de figuur valt ook af te lezen dat er baggergebieden zijn, die volgens het DELFT3D- model gedeeltelijk eroderen. Dit is het geval in de Pas van Terneuzen (12), de Overloop van Hansweert (9) en de Overloop van Valkenisse (5) respectievelijk in de macrocellen 3, 4 en 5. Maar op de belangrijke baggergebieden 3, 4, 8 en 13 berekent het model sedimentatie.



**Figuur 6-1: Patroon van resttransport uit berekening zonder ingreep (X19)**



**Figuur 6-2: De door het DELFT3D-model berekende erosie en sedimentatie in 2001. De groen en paarse vakken zijn de huidige bagger- en zandwinlocaties. De zwart omlinjende vakken geven de stortlocaties weer.**

De berekende sedimentatiesnelheden in de verschillende baggergebieden zijn gegeven in Tabel 6-2. De voorspelde hoeveelheden sedimentatie in een jaar kan men interpreteren als het benodigde onderhoudsbaggerwerk. In de tabel zijn ook de werkelijke baggerhoeveelheden gemiddeld over de periode 2000-2001 gegeven, waarmee de modelresultaten kunnen worden vergeleken. Uit een vergelijking valt meteen op dat het voorspelde totale onderhoud in de Westerschelde ongeveer een factor 2 kleiner dan opgetreden gedurende de periode 2000-2001<sup>7</sup>. Dit is niet vreemd omdat dat het model niet morfologisch is gekalibreerd. Voor de vier belangrijke drempelgebieden (vet weergegeven in de tabel) is de overeenkomst tussen de modelresultaten en data redelijk goed. Alleen bij de drempel van Valkenisse is de berekende hoeveelheid veel te laag. Dit kan alleen goed komen na kalibratie van het model. Desalniettemin geeft het model een goed basis voor onderhevige vergelijking.

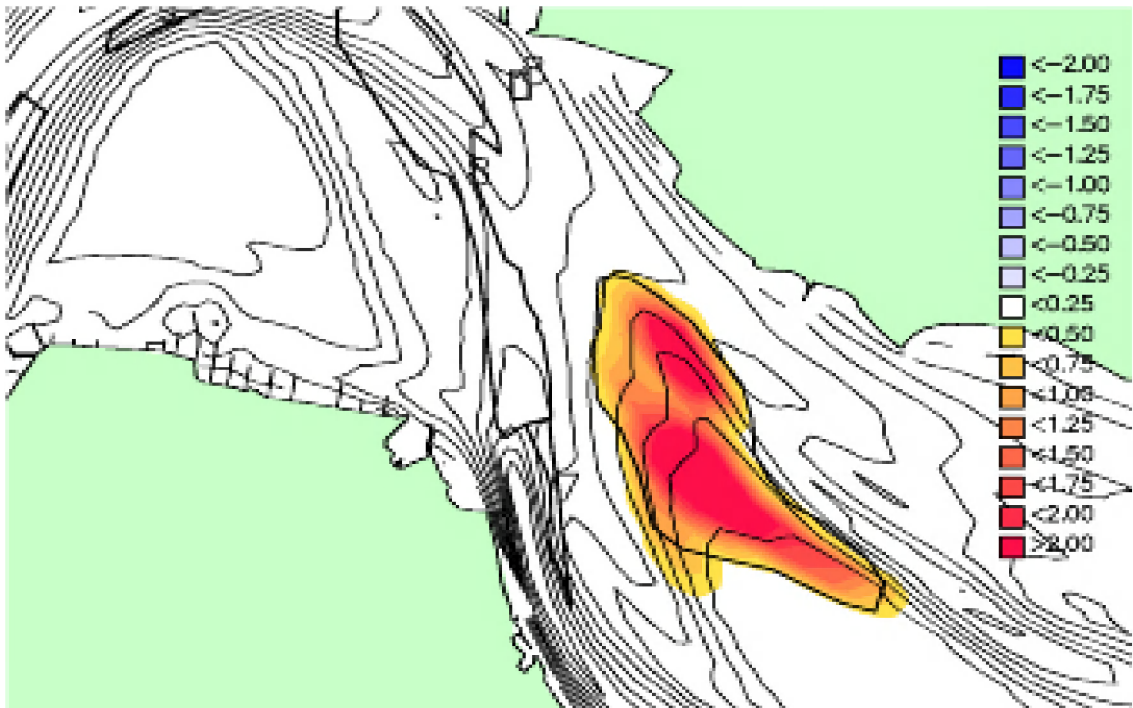
**Tabel 6-2: Berekende sedimentatiesnelheid en waargenomen baggerhoeveelheden in de baggergebieden**

| Nr.       | Gebied                        | Model (Mm <sup>3</sup> /jaar) | Data 2000-2001 (Mm <sup>3</sup> /jaar) |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|
| <b>3</b>  | <b>Drempel van Bath</b>       | <b>1.40</b>                   | <b>0.89</b>                            |
| <b>4</b>  | <b>Drempel van Valkenisse</b> | <b>0.31</b>                   | <b>1.83</b>                            |
| <b>8</b>  | <b>Drempel van Hansweert</b>  | <b>2.12</b>                   | <b>2.31</b>                            |
| <b>13</b> | <b>Drempel van Borssele</b>   | <b>0.56</b>                   | <b>1.08</b>                            |
| 14        | Drempel van Vlissingen        | 0.02                          | 0.37                                   |
| Totaal    |                               | 5.2                           | 10.5                                   |

#### 6.4 Storten op de plaatpunt van Walsoorden

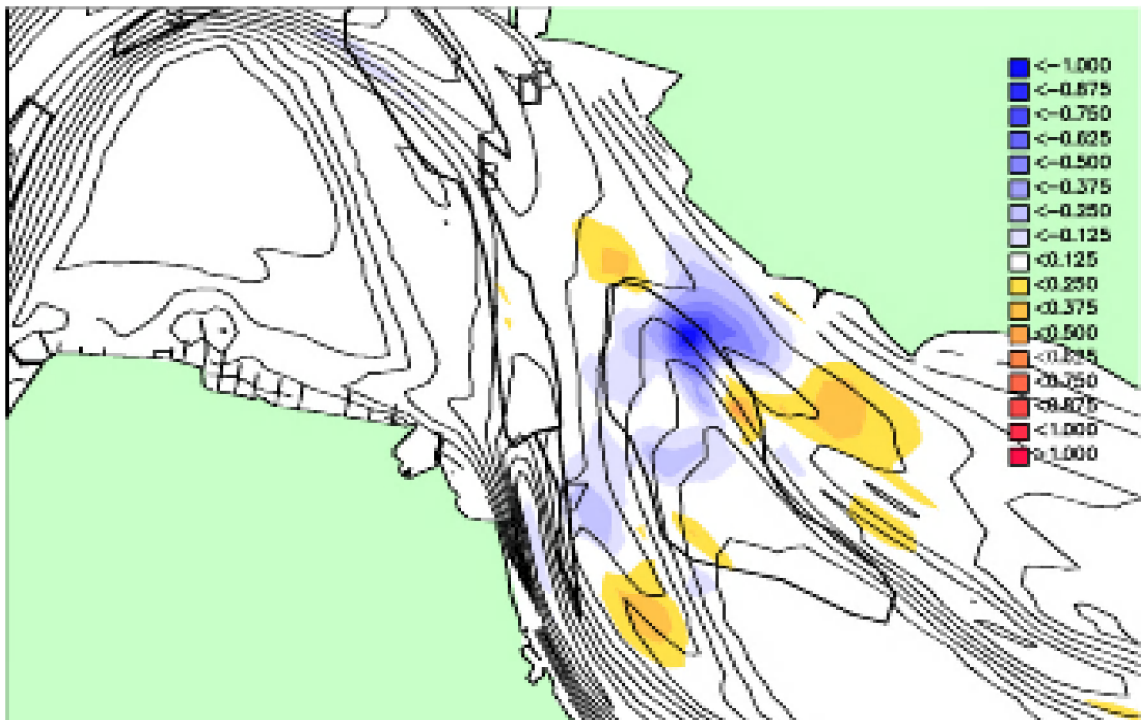
Bij deze berekening (X22) is de plaatpunt van Walsoorden (Figuur 6-3) met ongeveer drie meter verondiept. Deze verondieping is aangebracht op de bodem na 1 jaar uit de berekening zonder ingreep (X19). De zo ontstane bodem is als initiële bathymetrie gebruikt voor de berekening die inzicht moet geven in de gevolgen van storten op deze plaat.

<sup>7</sup> Tussen 2000-2001 en 2004 is het totale onderhoudsvolume in de Westerschelde afgenomen van 10,5 Mm<sup>3</sup> / jr (in het beun) naar 7,1 Mm<sup>3</sup> / jr (Bollebaker, pers. Com.).



**Figuur 6-3: De storting op de plaatpunt van Walsoorden**

In Figuur 6-4 staan de verschillen in bodemverandering tussen de berekening zonder ingreep (X19) en de huidige berekening. Deze verschillen kunnen worden geïnterpreteerd als de initiële gevolgen van het storten op de plaatpunt van Walsoorden. De blauwe tinten geven aan dat een relatieve bodemdaling heeft plaatsgevonden. De gele / oranje tinten duiden op een bodemverhoging ten opzichte van de berekening zonder ingreep.



**Figuur 6-4: De relatieve erosie/sedimentatie na 1 jaar als gevolg van de storting op de plaatpunt van Walsoorden.**

---

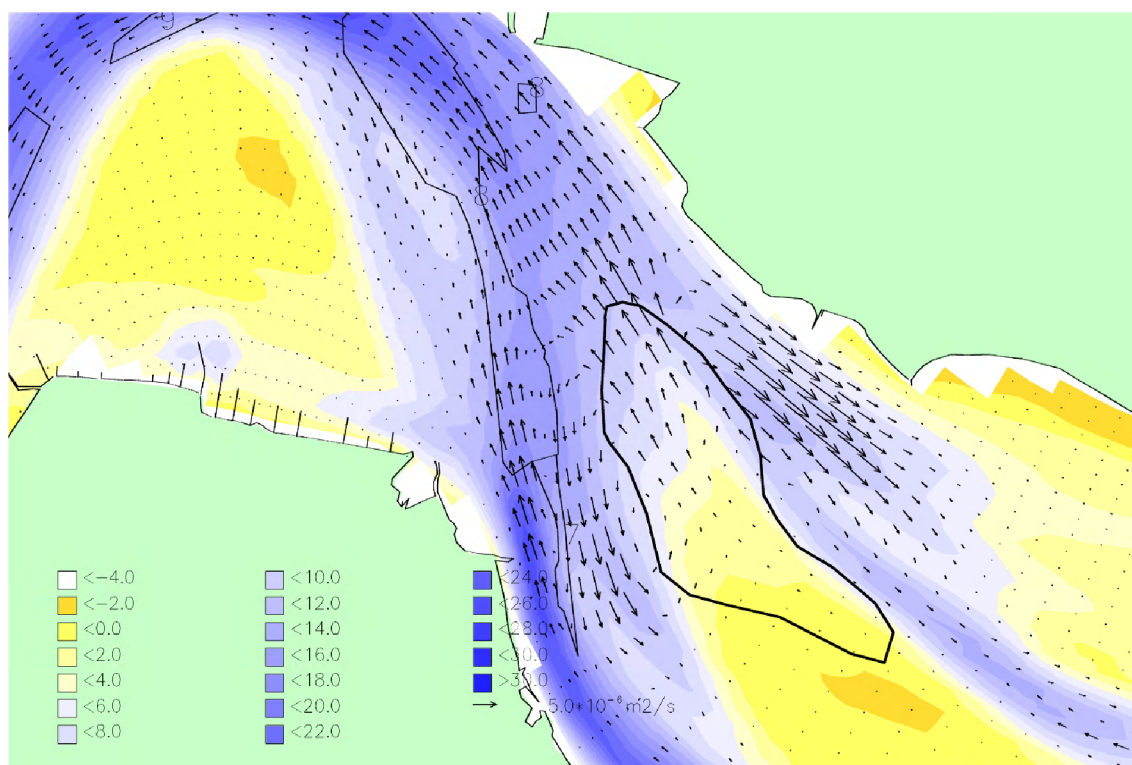
De beschouwde storting betreft een relatief kleine storting voor het estuarium. Het is daarom te verwachten dat de invloed van de storting op het hele systeem beperkt zal zijn. Uit de figuur blijkt ook dat de grootste verschillen zich voordoen rondom de stortlocatie. In een groot deel van het gebied, waarin een initiële verhoging is aangebracht, treedt relatieve erosie op. Het lijkt waarschijnlijk dat deze extra erosie er op de lange termijn voor zal zorgen dat de storting niet blijft liggen. Van het in totaal ongeveer 3.4 miljoen m<sup>3</sup> gestort materiaal wordt in het eerste jaar ongeveer 0.28 miljoen m<sup>3</sup> geërodeerd. Dit betekent dat herhalingen van de storting na 15 tot 20 jaar weer mogelijk zijn, rekening houdend met het feit dat de erosiesnelheid na verloop van tijd afneemt. Geërodeerd materiaal uit het verhoogde gebied verspreidt zich in de omliggende vloedgeulen zowel ten noorden als ten zuiden van de plaatpunt. Een deel van de sedimentatie in de uitloop van de vloedgeul Schaar van Waarde/Valkenisse vindt echter zijn oorsprong in geërodeerd sediment in de diepere delen van de Schaar van Waarde. Dit betekent dat als de storting herhaaldelijk wordt toegepast het ook de stabiliteit van het meergeulensysteem kan beïnvloeden. Daarbij is zowel de erosie als de sedimentatie in de vloedgeul Schaar van Waarde / Valkenisse van belang.

Opmerkelijk is dat op de naastliggende baggergebieden het effect van de storting nauwelijks is te zien. Uit de resultaten van sedimentatiesnelheden op de baggergebieden (zie Figuur 6-10 in paragraaf 6.6) blijkt ook dat de verschillen met de resultaten uit de berekening zonder ingrepen erg klein zijn. In gebied 8 (Drempel van Hansweert) is er een verhoging van onderhoudsbaggerwerk en in gebied 7 ernaast is er een verlaging, maar de relatieve verschillen zijn niet meer dan enkele procenten. Dat de invloed op de naastliggende baggergebieden zo klein is komt waarschijnlijk doordat het verhoogde gebied ligt ingeklemd tussen de grote vloedgeul Schaar van Valkenisse en de kleine vloed-schaar van Walsoorden. Ook het verhoogde gebied zelf is het vloeddominant (Figuur 6-1).

De storting op de plaatpunt van Waalsoord is ook bestudeerd door WLB (2003) aan de hand van een schaalmodel. Het model heeft een vaste bodem. Op de locatie van de storting werd modelzand gelegd om te bekijken of de modelzandkorrels eroderen en zo ja waar ze naar toe worden getransporteerd door de getijstrooming. Het gevonden verspreidingspatroon van het gestorte materiaal komt globaal overeen met de huidige numerieke resultaten (Figuur 6-4).

Ten gevolge van de verondieping is het totale doorstroomoppervlak lokaal verminderd. Hierdoor versnelt de stroom door de geulen aan weerszijden van de plaatpunt. De gevolgen hiervan op de verandering van de resttransporten t.o.v. de berekening zonder ingreep (X19) zijn te zien in Figuur 6-5. Op het verhoogde gebied zelf veroorzaakt de storting een in ebrichting gericht transport(verschil). Dit heeft als gevolg dat een deel van het geërodeerde materiaal uit het verhoogde gebied zeewaarts terechtkomt, waar relatieve sedimentatie te zien is in Figuur 6-4. Zeewaarts van de storting, praktisch over de hele breedte van het estuarium, is het verschil in resttransport ebgedomineerd. De verhoging van de plaat heeft de strooming zeewaarts meer ebdominant gemaakt wat overeenstemt met de algemene theorie over de relatie tussen morfologie en getijasymmetrie. De storting heeft als gevolg dat het plaatareaal en dus ook de komberging boven de platen worden vergroot. Relatief meer komberging boven de platen t.o.v. het volume van de geulen veroorzaakt ebdominantie in de getijasymmetrie (Friedrichs en Aubrey, 1988, Wang e.a., 2002). Naast het verhoogde gebied is de oorspronkelijke eb- vloedcirculatie versterkt: in de vloedgeul ten oosten en in de kleine vloed-schaar ten westen (zie Figuur 6-1) van het gebied is het verschil in resttransport in de vloedrichting gericht.

In de naastliggende ebgeul (exclusief de kleine vloedschaar) is het verschil in resttransport in de eb-richting gericht. De eb-vloedcirculatie rondom de plaatpunt wordt lokaal versterkt door de storting.

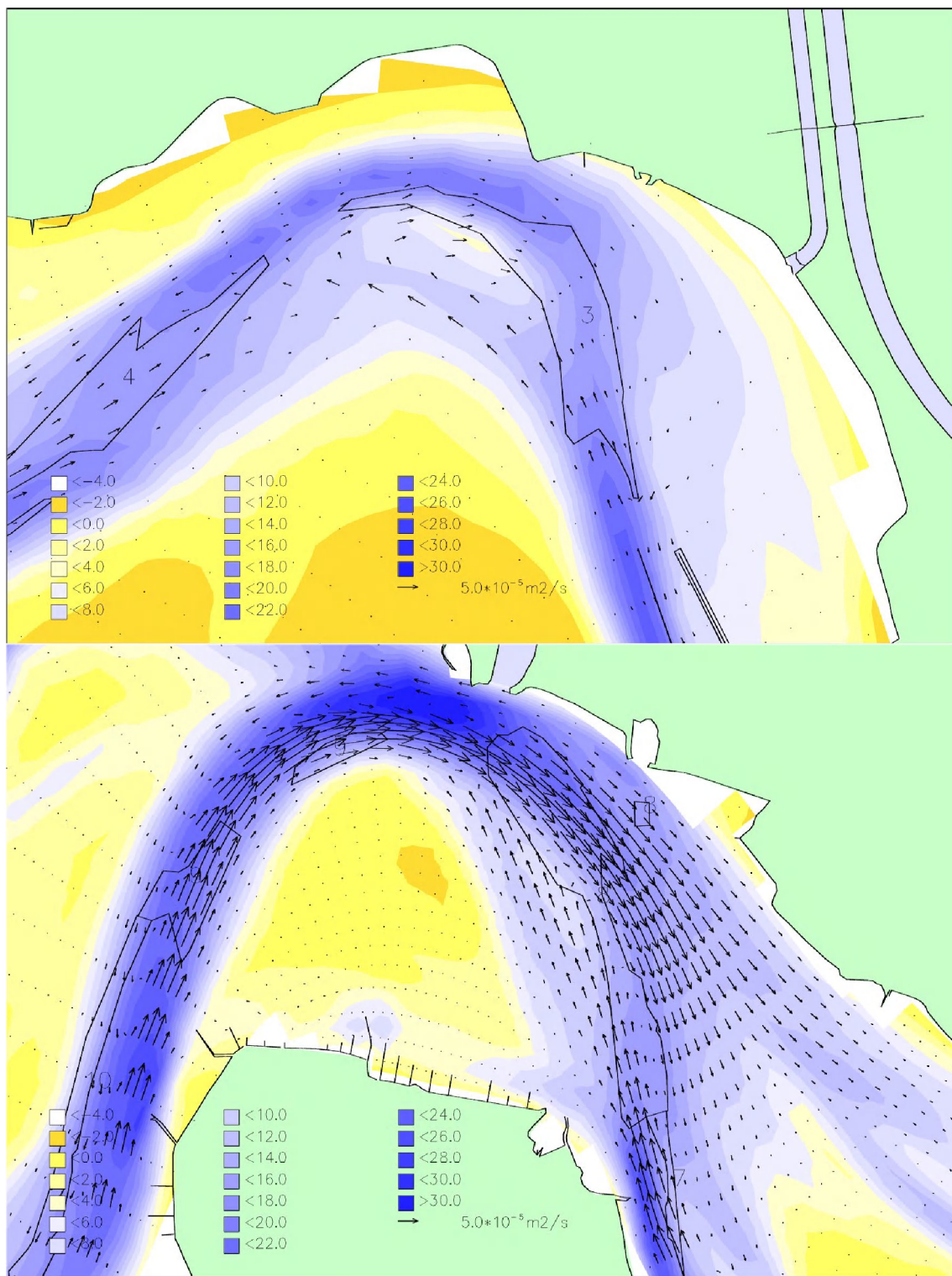


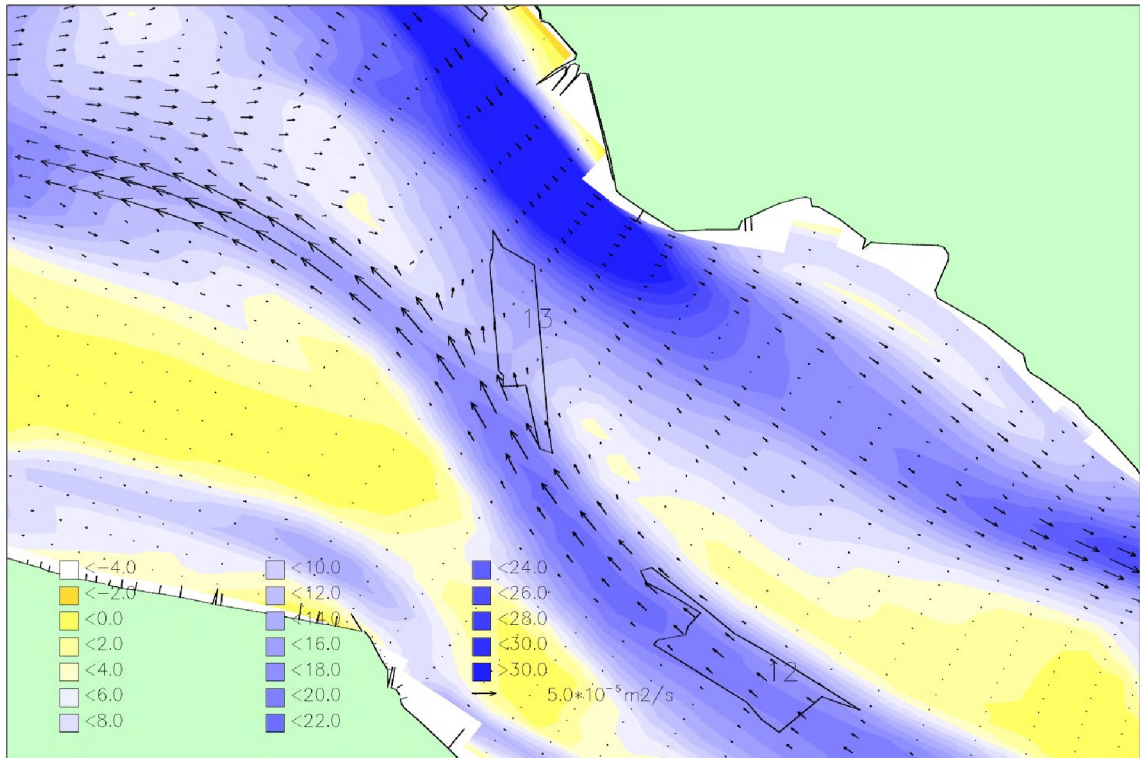
**Figuur 6-5: De veranderingen in het resttransportveld t.o.v. het nulalternatief bij storten op de plaatpunt van Walsoorden.**

## 6.5 Verruiming van vaargeul

Met verruiming wordt bedoeld verdieping en/of verbreding van de vaargeul. Volgens veldwaarnemingen en het 1-element model voor het voorspellen van onderhoudsbaggerwerk neemt het onderhoudsbaggerwerk bij een verruiming vooral toe doordat het te onderhouden oppervlak groter wordt en niet zo zeer omdat de overdiepte toeneemt. Twee scenario's van verruiming worden gesimuleerd om de effecten van verruiming van de vaargeul te onderzoeken. Het eerste scenario is een verdieping van de vaargeul tot een minimale vaardiepte van 13,1 meter. Bij het tweede scenario van verruiming is de vaargeul verdiept tot 13,1 meter en tevens verbreed met 25%. De oorspronkelijk voorgenomen verbreding van 370 meter naar 410 meter bleek niet haalbaar in het model, doordat de roosterresolutie hiervoor niet toereikend was. Het berekende scenario van verbreding met 25% is dus louter illustratief en impliceert een verbreding van de vaargeul met circa 100 m (de geulen zijn 700-1500 m breed). De verruiming hebben voornamelijk betrekking op het gedeelte ten oosten van Hansweert, waar de verdieping / verbreding over vrijwel de gehele lengte van de vaargeul is toegepast. Ten westen van Walsoorden is de verdieping / verbreding slechts op enkele plaatsen nodig, omdat de vereiste vaardiepte en -breedte daar vrijwel overal al aanwezig is.

De verdieping en verbreding van de vaargeul is toegepast op de bodem na 1 jaar berekening zonder ingrepen (X19) om tot de initiële bodem voor de twee simulaties te komen. De twee simulaties (X23 en X24) zijn uitgevoerd voor 1 jaar, op dezelfde manier zoals bij X19, i.e. zonder ingrepen tijdens de berekeningen. De resultaten van deze simulaties moeten dus met die van X19 in het tweede jaar worden vergeleken om de effecten van de beschouwde verruiming te bekijken.

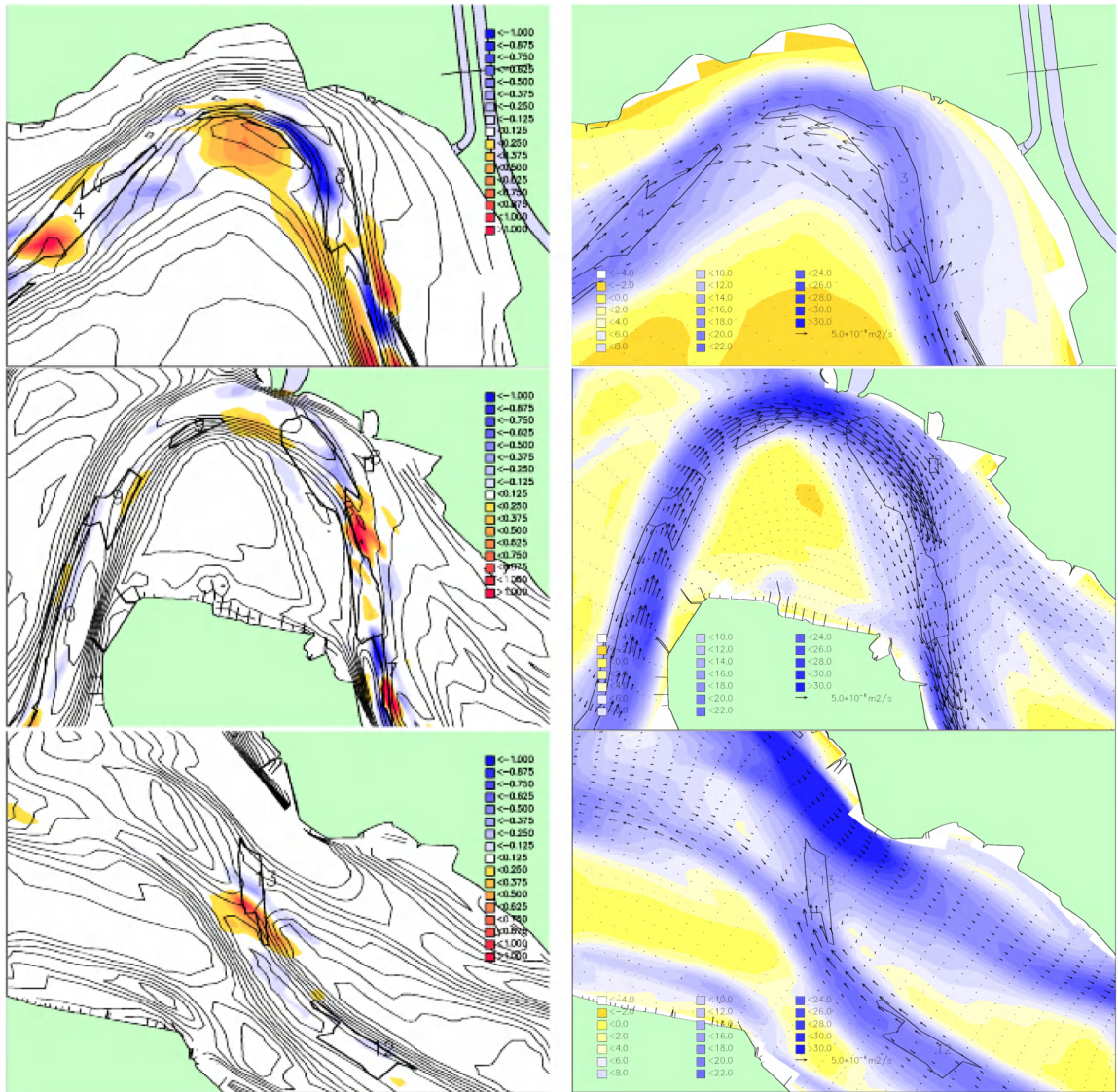




**Figuur 6-6: Resttransportveld uit de berekening zonder ingreep (X19) rondom de drempelgebieden. Boven: drempel van Bath en drempel van Valkenisse, midden: Drempel van Hansweert, onder: Drempel Van Borssele**

Bij de beschouwing van de resultaten wordt de nadruk vooral gelegd op de drempelgebieden. In Figuur 6-6 is het resttransport patroon rondom de drempelgebieden uit de simulaties zonder ingreep (X19) weergegeven. De figuren laten zien dat de baggergebieden bij de drempels de overgangsbieden tussen vloed- en ebdominante resttransporten zijn.

Figuur 6-7 presenteert de effecten van alleen de verdieping van de vaargeul door de verschillen tussen de resultaten van de simulatie met de verdieping en die uit de berekening zonder ingrepen weer te geven. Hierbij zijn de relatieve veranderingen in het erosie- en sedimentatiepatroon en de resttransporten weergegeven (let op dat de schaal is nu 10 keer kleiner dan in Figuur 6-6). De bovenste twee figuren omvatten het gebied van de drempel van Bath en de drempel van Valkenisse. Bij de drempel van Bath kan men zien dat de verdieping een afname van de sedimentatie in het baggergebied tot gevolg heeft. Met betrekking tot het resttransport is het opvallend dat de ebdominantie in de kortsluitgeul (Figuur 6-6) is afgenomen (Figuur 6-7). Waarschijnlijk zorgt de verdieping van de drempel ervoor dat er meer water over de drempel stroomt ten koste van met name de ebstroom door de kortsluitgeul. Bij de drempel van Valkenisse is de sedimentatie in het baggergebied toegenomen. In dit baggergebied heerst een landwaarts gericht transport (Figuur 6-6), dat als gevolg van de verdieping aan de zeewaartse zijde van het baggergebied toeneemt en aan de landwaartse zijde afneemt (Figuur 6-7).



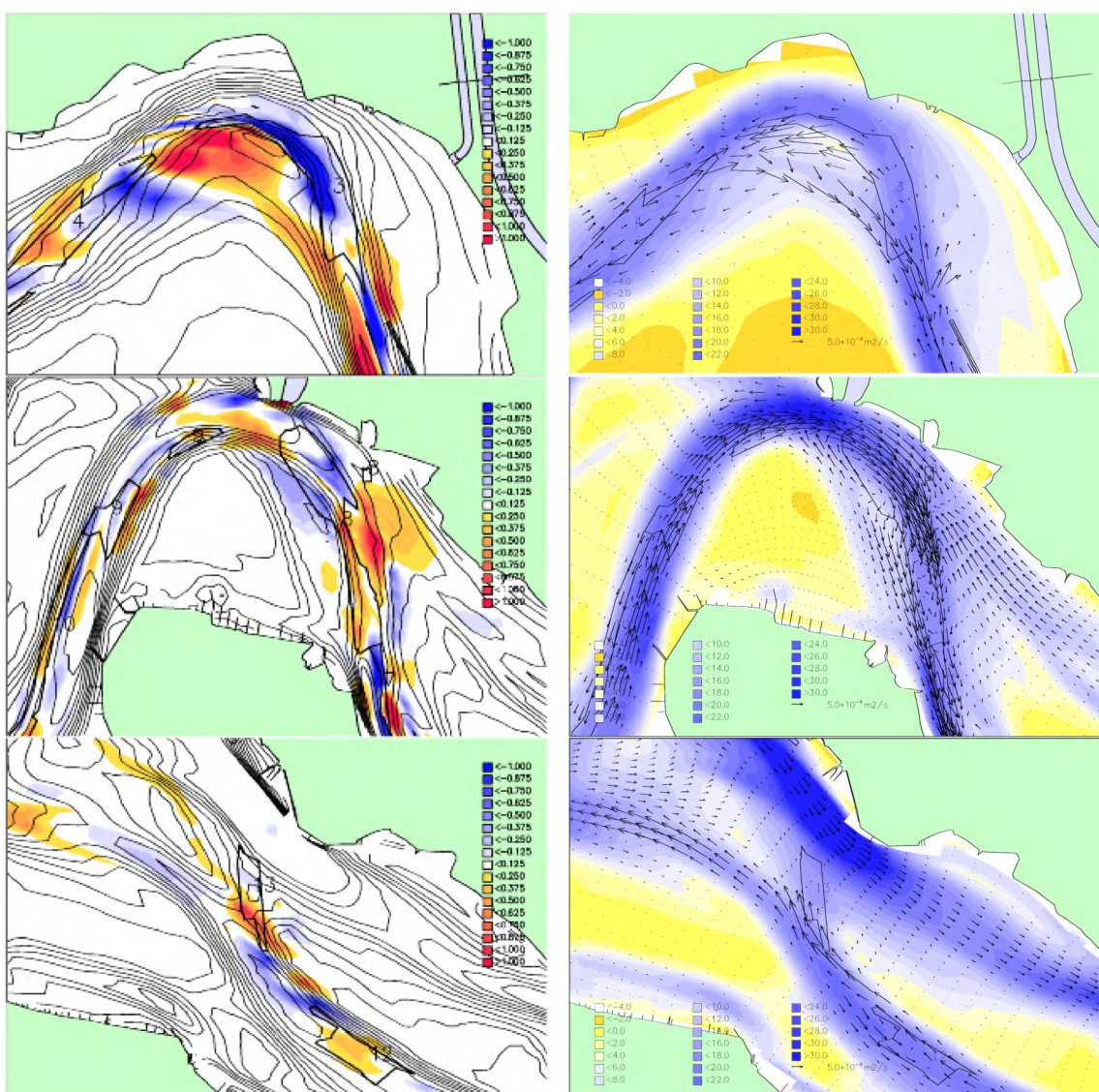
**Figuur 6-7: Effect van verdieping (X23) op sedimentatie-erosie (links) en op resttransport (rechts). Afgebeeld zijn verschillen tussen de resultaten van berekening X23 en die van berekening X19.**

Landwaarts van de drempel van Hansweert is het verschil in resttransport in de vloedgeul ebgedomineerd en in de ebgeul vloedgedomineerd (middelste figuren in Figuur 6-7). Dit betekent dat de vloed-eb circulatie in de macrocel 5 verzwakt door de verdieping. Zeewaarts van de drempel is het verschil vooral in de vloedgeul te merken waar het vloedgedomineerde resttransport toeneemt. Binnen het baggergebied op de drempel vindt er afwisselend toe- en afname van sedimentatie plaats. Merk wel op dat net naast het omlijnde baggergebied er wel een grote toename van sedimentatie is. Ook in het baggergebied op de drempel van Borsselle (onderste panelen Figuur 6-7) treden er zowel een toename als een afname van de sedimentatie op. De toename van de sedimentatie in het zuidelijke deel van het gebied wordt veroorzaakt door een toename van het ebgedomineerde transport in de Pas van Terneuzen.

De resultaten van de simulatie voor het scenario van een verdieping met een verbreding (X24) worden in Figuur 6-8 op een zelfde manier vergeleken met de resultaten van de berekening zonder ingreep (X19).

Het beeld rondom de drempel van Bath en de drempel van Valkennisse is hetzelfde als bij het scenario met alleen verdieping. De grootte van de effecten is wel toegenomen. Ook in het gebied rondom de drempel van Hansweert vertoont het verschil in resttransport en in de sedimentatie hetzelfde patroon als in het geval van alleen verdieping.

Belangrijk is wel om te realiseren dat de sedimentatie net buiten het omliggende (oorspronkelijke) baggergebied nu wel in het te onderhouden gebied valt wegens verbreding van de vaargeul (nieuwe baggergebieden zijn niet in de figuren aangegeven). In het gebied rondom de drempel van Borssele is het globale beeld wel hetzelfde als in het geval van alleen een verdieping, maar er is een belangrijk detail verschil. Tussen de baggergebieden 12 en 13 is er nu een omslag in de richting van het verschil in het resttransport. Dit heeft als gevolg dat in het baggergebied 12 de sedimentatie veel meer is toegenomen.



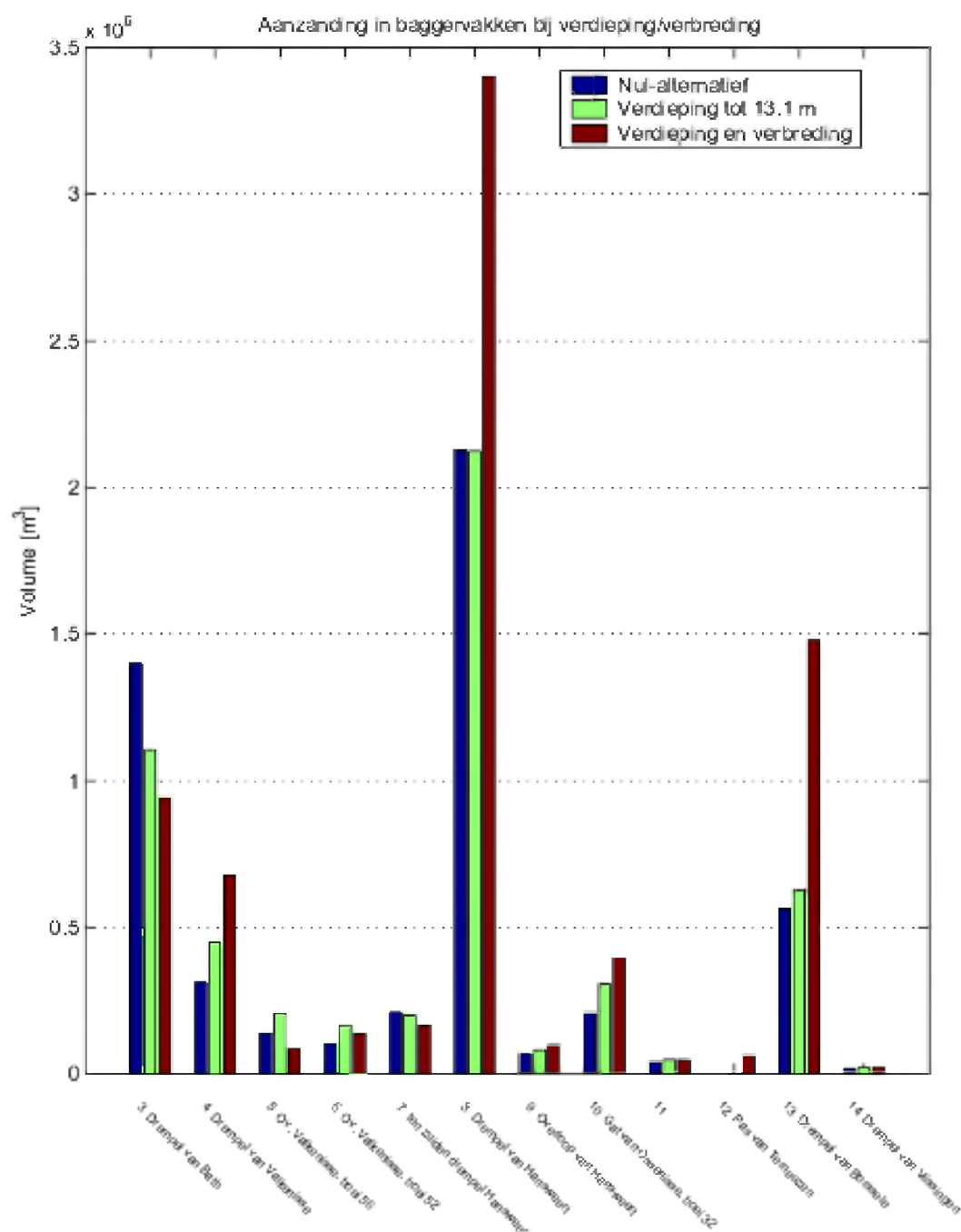
**Figuur 6-8: Effect van verdieping en verbreding (X24) op sedimentatie-erosie (links) en op resttransport (rechts). Afgebeeld zijn verschillen tussen de resultaten van berekening X23 en die van berekening X19.**

---

De berekende sedimentaties over één jaar (tweede jaar) uit de drie simulaties in alle baggergebieden zijn weergegeven in Figuur 6-9. Zoals hierboven al is beschreven is op het baggergebied Drempel van Bath de sedimentatie afgenomen in beide verruimingsscenario's t.o.v. de situatie zonder ingreep. Volgens de modelresultaten zal in dit gebied het onderhoudsbaggerwerk dus afnemen als de vaargeul verder wordt verruimd. De afname is bij een verdieping met een verbreding zelfs groter dan bij alleen een verdieping, ondanks het feit dat de oppervlakte van het te onderhouden gebied groter is geworden. Opvallend is dat een afname van het onderhoud op de drempel van Bath ook is waargenomen na de tweede verdieping (Kornman en Liek, 2003).

De resultaten van het model zijn dus waarschijnlijk realistisch. Bij de drempel van Valkenisse neemt het onderhoudsbaggerwerk wel toe bij beide typen verruiming van de vaargeul. De toename is ook duidelijk groter in het geval van verdieping met verruiming. Bij het geval met verbreding is de toename toe te schrijven aan de vergroting van het te onderhouden oppervlak. Binnen het bestaande baggergebied is de sedimentatiehoeveelheid zelfs licht afgenomen. Bij de drempel van Hansweert is er volgens het model nauwelijks verandering van het onderhoudsbaggerwerk bij alleen een verdieping. Maar bij een verdieping met een verbreding neemt het onderhoudsbaggerwerk wel enorm toe, met ongeveer 50%. Deze toename is bijna geheel toe te schrijven aan het feit dat de te onderhouden gebied groter is geworden. Binnen het bestaande baggergebied neemt de sedimentatie hoeveelheid nauwelijks toe. Bij de drempel van Borssele is er sprake van een licht toename van het onderhoudsbaggerwerk bij verdieping alleen. De toename bij verdieping met verbreding leidt daartegen tot bijna een verdrievoudiging van het onderhoudsbaggerwerk. Ook hier geldt dat deze grote toename een gevolg is van de toename van het te onderhouden oppervlak.

Behalve op de drempel van Bath suggereren deze resultaten dus dat een toename van het te onderhouden oppervlak een belangrijke oorzaak is voor de toename van het onderhoudsbaggerwerk. Om dit aspect beter te bekijken worden in Tabel 6-2 de twee verruimingsscenario's met elkaar vergeleken voor de 4 drempel gebieden. In de tabel zijn per drempelgebied de verhouding van het te onderhouden oppervlak en de verhouding van het berekende sedimentatievolume gegeven. Er is duidelijk een correlatie tussen de twee verhoudingen. De verhoudingen in kolom 2 van de tabel zouden ook ongeveer de verhouding van het berekende onderhoudsbaggerwerk tussen de twee verruimingsscenario's zijn volgens het 1-element model, omdat de overdieptes in de twee scenario's niet veel verschillen.



**Figuur 6-9: Sedimentatie in de baggervakken volgens de vier verschillende stortstrategieën.**

**Tabel 6-3: Vergelijking tussen twee verruimingsscenario's (X23 en X24)**

| Gebied                 | Verhouding oppervlak na en vóór verbreding | Verhouding berekende onderhoudsbaggerwerk voor twee verruimingsscenario's |
|------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Drempel van Bath       | 2.7                                        | 0.9                                                                       |
| Drempel van Valkenisse | 2.3                                        | 1.5                                                                       |
| Drempel van Hansweert  | 1.7                                        | 1.6                                                                       |
| Drempel van Borssele   | 2.5                                        | 2.4                                                                       |

De afname van sedimentatie zoals bij de Drempel van Bath bij verdieping en/of verbreding kan vermoedelijk verklaard worden door het feit dat een verdiepte/verbrede geul extra water aantrekt. Nader onderzoek wordt aanbevolen om dit goed te begrijpen.

Tabel 6-3 toont de gesommeerde sedimentatie over alle baggervakken voor de drie simulaties. Verdieping alleen heeft bijna geen invloed op het totale onderhoudsbaggerwerk volgens de berekeningen. Dit resultaat wordt wel in belangrijke mate bepaald door de afname op de Drempel van Bath. Als dit baggergebied niet wordt meegenomen is er sprake van een toename van zo'n 12%. Dit is een toename van dezelfde orde van grootte als de voorspelling op basis van het 1-element model waarbij ook geen verbreding van de vaargeul is meegenomen. Volgens de berekeningen zal een verbreding van de vaargeul van 25% leiden tot een toename van het onderhoudsbaggerwerk van ongeveer 50%. Deze toename is volledig toe te schrijven aan de toegenomen oppervlakten van de te onderhouden drempelgebieden. In de oorspronkelijke baggergebieden is het totale onderhoudsbaggerwerk zelfs iets afgenomen (getallen tussen haakjes in Tabel 6-3). Wel moet worden opgemerkt dat een verbreding van 25% procent erg veel is. Daartegenover staat echter wel dat voor de overige gebieden de baggerpolygonen niet zijn aangepast (verbreed) voor de bepaling van de sedimentatie (o.a. vanwege de beperkte roosterresolutie i.r.t. de smalle baggerpolygonen), wat leidt tot een onderschatting van de toename van het onderhoudsbaggerwerk in de Westerschelde. Aan de hand van de modelresultaten kan men wel concluderen dat verbreding van de vaargeul veel meer effect op het onderhoudsbaggerwerk zal hebben dan verdieping van de vaargeul.

**Tabel 6-4: De totale sedimentatie in de Westerschelde**

|                                      | Totaal sedimentatievolume<br>(Mm <sup>3</sup> /jaar) | Vershil t.o.v. alternatief<br>zonder ingreep (%) |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| zonder ingreep                       | 5.2                                                  | -                                                |
| Verdieping tot 13,1                  | 5.3                                                  | +2                                               |
| Verdieping tot 13,1 en<br>verbreding | 7.5 (5.0)                                            | +50 (-4)                                         |
| Storting Walsoorden                  | 5.4                                                  | +3                                               |

Verder is de simulatie voor storting op Walsoorden (paragraaf 6.4) ook opgenomen in de tabel. Zoals in paragraaf 6.4 is al beschreven, is er nauwelijks invloed op het onderhoudsbaggerwerk.

## 6.6 Invloed stortstrategie

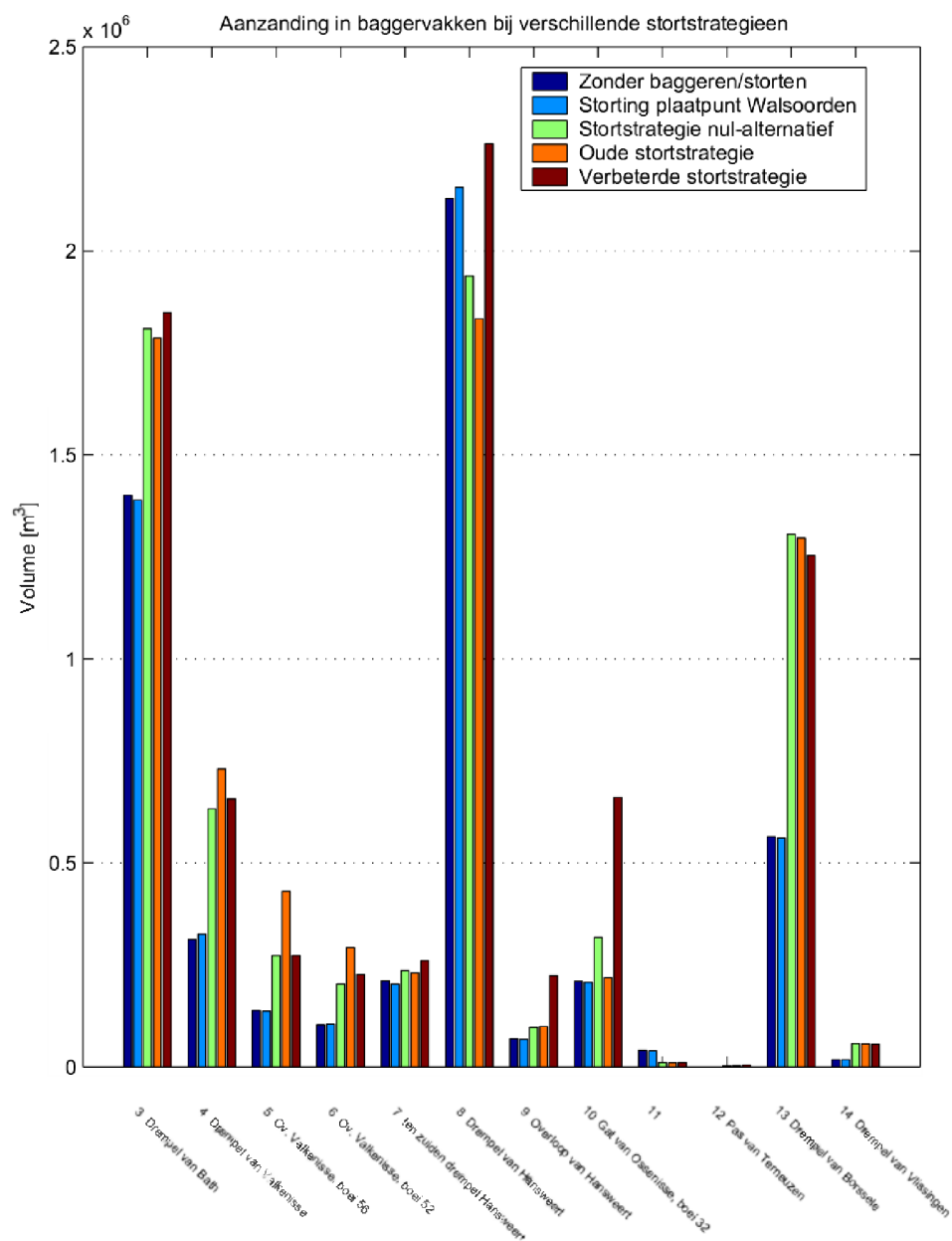
Drie simulaties (X25, X26 X27) zijn uitgevoerd om de effecten van de verschillende stortstrategieën te evalueren bij de huidige diepte. De drie strategieën zijn: het nulalternatief (X25), de Verbeterde Strategie (X26) en de Oude Strategie (X27). Bij het nulalternatief wordt de huidige stortstrategie voortgezet, en met de oude strategie wordt bedoeld de stortstrategie van 1995. De voorlopig verbeterde strategie is ontwikkeld in de huidige studie, waarbij de verbetering vooral slaat op het minimaliseren van negatief effect op de stabiliteit van het geulsysteem (van macro- en mesocellen), gegeven een vast totale hoeveelheid storten, gebruikmakend van de totale stortcapaciteit van de Westerschelde.

In tegenstelling tot de hiervoor beschreven berekeningen zijn in deze drie berekeningen het baggeren en storten voor het vaargeulonderhoud wel meegenomen tijdens de berekeningen (zie paragraaf 6.2 voor de opzet van de berekeningen).

---

Het belangrijkste doel van deze berekeningen bestaat uit het verkennen van de invloed van de stortstrategie op de grootte van het onderhoudsbaggerwerk. In Figuur 6-10 zijn de berekende totale sedimentatiehoeveelheden per baggergebied weergegeven. Dit figuur toont, ter vergelijking, tevens de resultaten van de berekeningen 'autonome ontwikkeling' en het storten op de plaatpunt van Walsoorden (de alternatieve stortstrategie). Zoals in paragraaf 6.4 is aangegeven is er weinig verschil tussen deze twee berekeningen. Er is wel een groot verschil tussen de berekeningen met en zonder ingrepen.

In bijna alle baggergebieden geldt dat de berekeningen met meenemen van vaargeulonderhoud een groter onderhoudsbaggerwerk voorspellen, onafhankelijk van de gehanteerde stortstrategie. Er zijn twee uitzonderingen: op de drempel van Hansweert (8) maakt het relatief weinig uit of de ingrepen wel of niet worden meegenomen en voor het baggergebied 11 (een heel klein incidenteel gebruikt baggergebied ter hoogte van de drempel van Baarland) is er zelfs sprake van een afname van het onderhoudsbaggerwerk als de ingrepen worden meegenomen in de berekeningen. Over het algemeen komen de resultaten van de berekeningen dus overeen met de verwachtingen. Als een baggergebied niet wordt onderhouden zal door sedimentatie de overdiepte op den duur afnemen, wat tot een afname van de sedimentatiesnelheid kan.



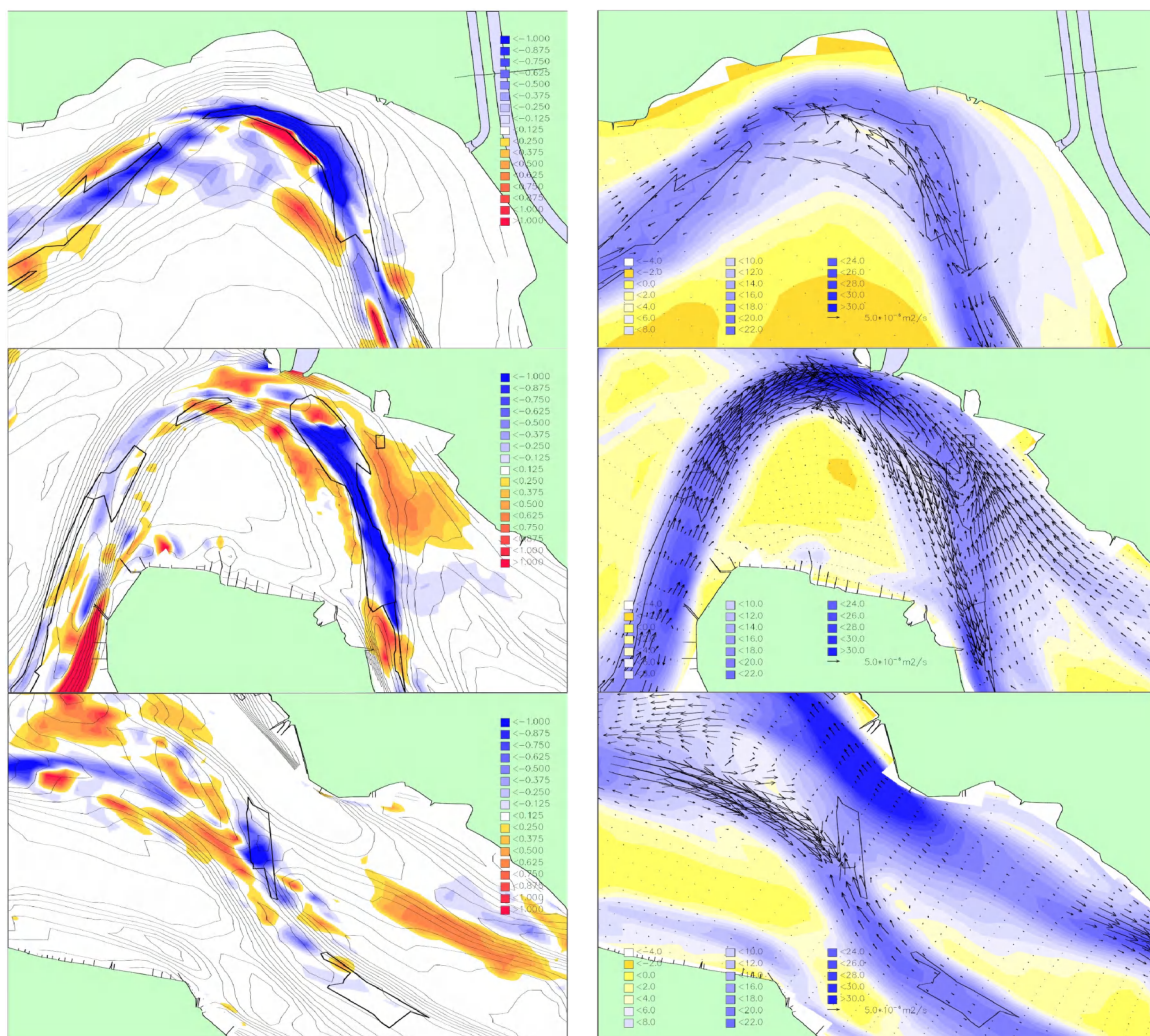
**Figuur 6-10: Berekende onderhoudsbaggerwerk**

---

Als de verschillende stortstrategieën onderling met elkaar worden vergeleken dan zijn voor de meest gevallen de verschillen klein (kleiner dan de verschillen met de berekening zonder ingreep). Twee verschillen vallen op:

- Op de drempel van Hansweert (gebied 8) en in de twee baggergebieden ten westen ervan (9 en 10) veroorzaakt de verbeterde stortstrategie een significante toename van het onderhoudsbaggerwerk. Dit omdat in de vaargeul ten westen van Hansweert (macrocel 4) er volgens de verbeterde stortstrategie veel meer wordt gestort, bovendien erg dichtbij de baggergebieden.
- In de drie baggergebieden rondom Valkenisse (4, 5, en 6) wordt een groter onderhoudsbaggerwerk berekend in de simulatie met de oude stortstrategie. De verandering van de stortstrategie eind vorige eeuw heeft volgens het model (en de verwachting) in deze gebieden geleid tot een vermindering van baggerhoeveelheid.

Voor het totale onderhoudsbaggerwerk is er weinig verschil tussen de huidige (nulalternatief) en de oude stortstrategieën (6.9 versus 7 miljoen m<sup>3</sup> per jaar). De verbetering van de stortstrategie t.b.v. de stabiliteit van het merengeulen systeem veroorzaakt een toename van het totale onderhoudsbaggerwerk (7.7 miljoen m<sup>3</sup> per jaar) van ongeveer 10%. Dit betekent dat een deel van de verbetering weer teniet zal worden gedaan en dat een verdere verfijning van de stortstrategie nodig is (zie paragraaf 7.2). Immers, meer baggeren betekent ook meer storten in de praktijk. Wel wordt opgemerkt dat de berekeningen mogelijk de invloed van de stortstrategieën overschatten omdat er tijdens de berekeningen meer is gestort dan gebaggerd (i.e. voor het totale estuarium is er sprake van een extra sedimentbron, zie paragraaf 6.2).



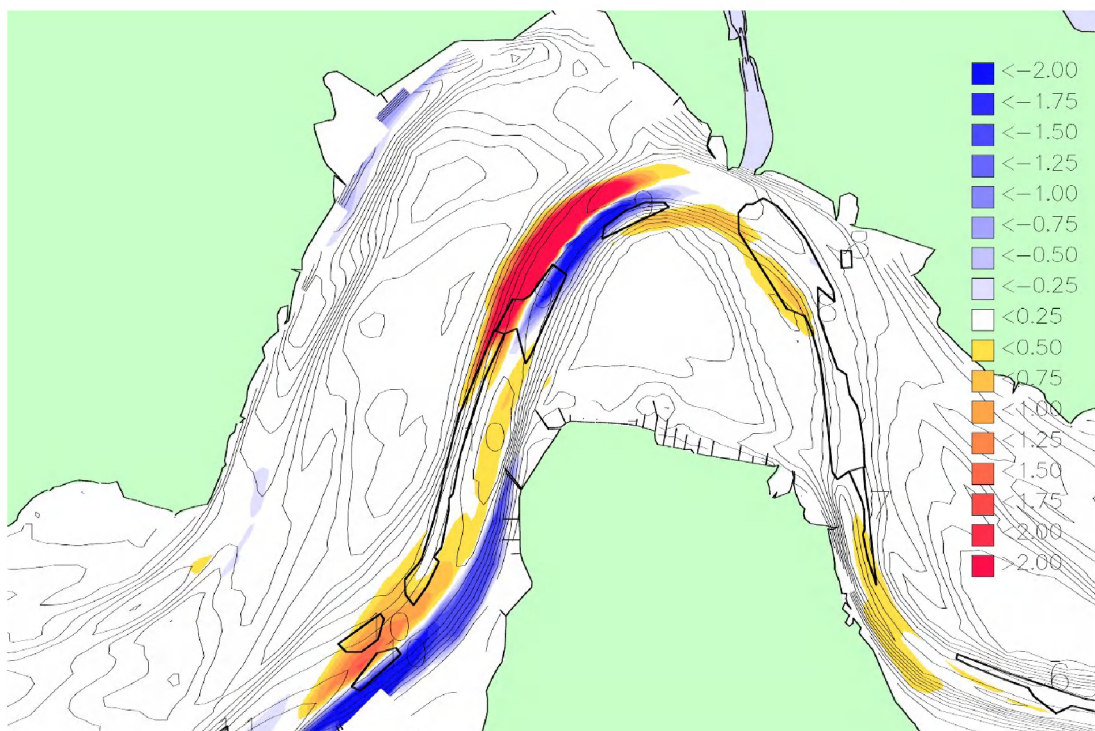
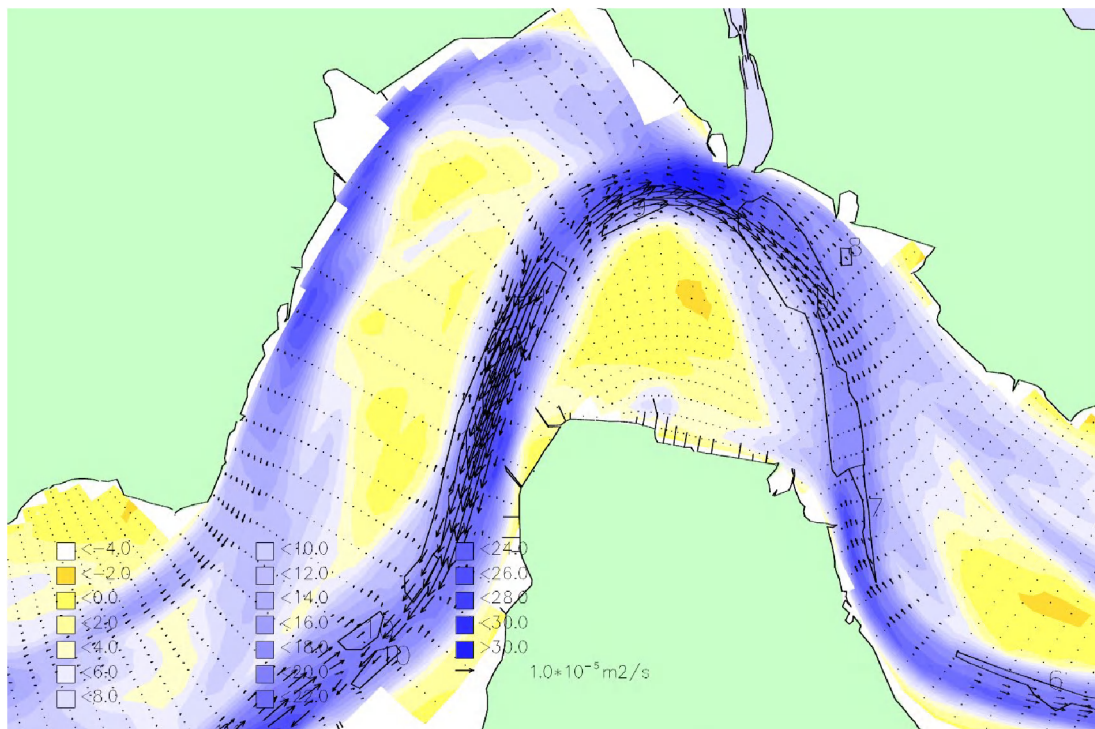
**Figuur 6-11: Effect van baggeren en storten (X25) op sedimentatie-erosie (links) en op resttransport (rechts). Afgebeeld zijn verschillen tussen de resultaten van berekening X25 en die van berekening X19.**

In Figuur 6-11 worden de resultaten rondom de drempelgebieden van de berekening voor het nulalternatief (X25) vergeleken met die van de berekening zonder ingreep (X19). Men kan zien dat in alle baggergebieden er sprake is van een relatieve erosie in de resultaten voor het nulalternatief. Dit komt doordat in deze berekening onderhoudsbaggerwerk is meegenomen tijdens de simulatie om de baggergebieden op diepte te houden. Het verschil in het resttransport duidt aan dat bij de Drempel van Bath en de Drempel van Valkenisse de toename van het berekende onderhoudsbaggerwerk een gevolg is van extra sediment toevoer van alle kanten. Bij de Drempel van Borsselle lijkt de extra toevoer van sediment vooral uit het zuiden te komen. Op de drempel van Hansweert berekent het model een vermindering van onderhoudsbaggerwerk in het nulalternatief t.o.v. de berekening zonder ingreep. Het verschil in resttransport in dit gebied is vrij complex. Zeewaarts van de drempel wordt het vloedtransport in de vloedgeul versterkt als de ingrepen worden meegenomen. Het baggergebied 8 ligt tussen een vergroot vloedtransport aan de ene kant en een vergroot ebtransport aan de andere kant.

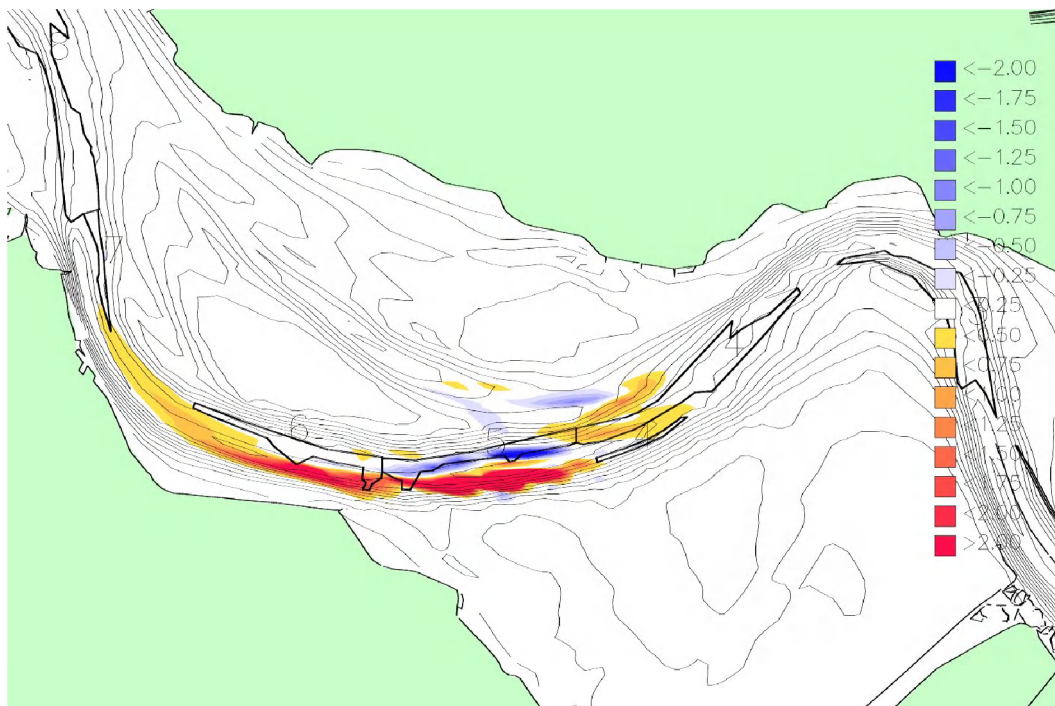
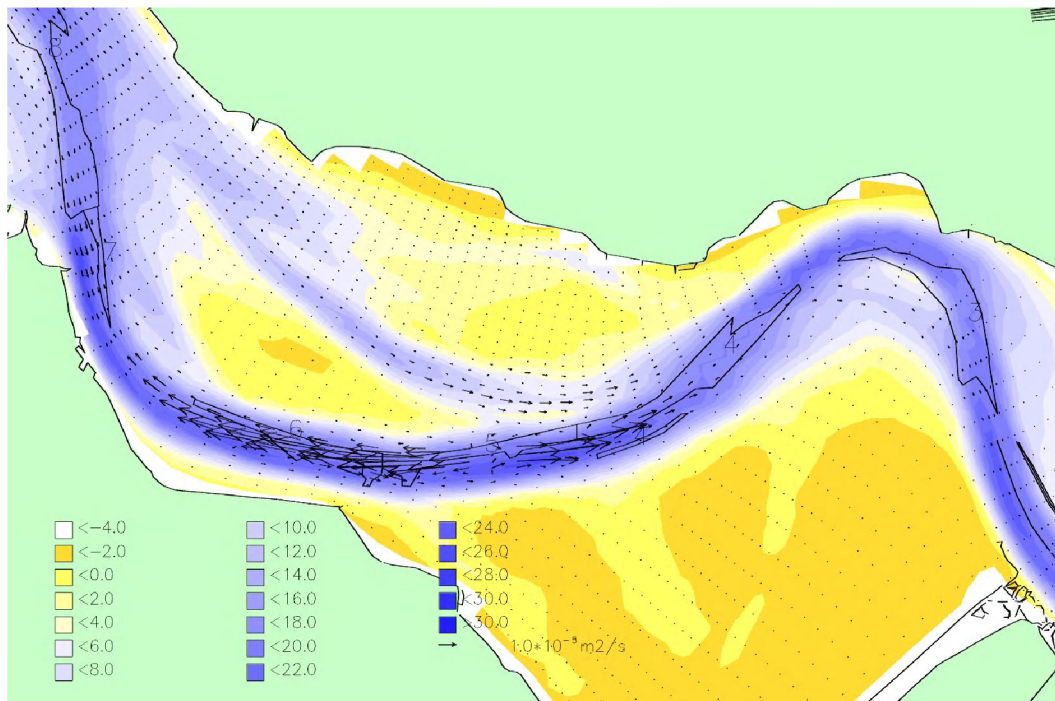
---

De verbeterde stortstrategie en de huidige stortstrategie verschillen vooral in het onderhoudsbaggerwerk in de baggergebieden 8 (Drempel van Hansweert), 9, en 10 (Gat van Ossenisse en Overloop van Hansweert). Daarom worden de modelresultaten in dit gebied voor deze twee stortstrategieën nader met elkaar vergeleken in Figuur 6-12. In de vloedgeul in macrocel 4 zijn er twee gebieden met extra sedimentatie volgens de berekening voor de verbeterde stortstrategie t.o.v. die voor de huidige strategie. Dit zijn gebieden waar extra wordt gestort volgens de verbeterde stortstrategie. Opvallend is dat er in beide gebieden ook een gebied met extra erosie aanwezig is. Blijkbaar heeft het storten in een bepaald gebied, naast verhoging van het gebied zelf en eventueel de directe omgeving, ook tot gevolg dat in een naast liggend gebied extra erosie optreedt. De erosie van dit naastliggende gebied leidt weer tot sedimentatie ter hoogte van Hansweert, wat o.a. tot extra onderhoudsbaggerwerk in baggergebied 8 leidt. Het verschil tussen de resttransporten uit de twee berekeningen suggereert dat het extra gestorte sediment in zowel de vloed- als de ebrichting wordt getransporteerd. Een verfijning van de stortstrategie, waarbij ook meer gebruik wordt gemaakt van de bestaande stortlocaties kan soelaas bieden. De praktijk wijst uit dat de vloedgeul nog steeds erodeert en sinds 2002 zichzelf aardig op diepte houdt. In 2003 werd in er in november pas voor het eerst gedurende dat jaar gebaggerd (Bollebakker, pers.com.).

Tussen de huidige stortstrategie en de oude stortstrategie is er vooral verschil in het onderhoudsbaggerwerk in het oostelijke deel (baggergebieden 4, 5, en 6). Daarom worden de modelresultaten in dit gebied voor deze twee stortstrategieën met elkaar vergeleken in Figuur 6-13. Men kan in deze figuur dezelfde verschijnselen waarnemen als hierboven beschreven bij de beschouwing van Figuur 6-12. Ook hier zijn de gebieden met extra storten goed te zien. De erosie ernaast is iets minder duidelijk te zien omdat er baggervakken liggen. Ook hier ziet men dat het extra gestorte sediment volgens de oude stortstrategie aan de rand van Land van Saeftinge in alle richtingen wordt getransporteerd volgens het verschil in de berekende resttransporten.



**Figuur 6-12: Verschil X26 en X25 (verbeterd en nul-alt) rondom baggervakken 8, 9 en 10.**



**Figuur 6-13: Verschil X27 en X25 (oude en nul-alt) rondom baggervakken 4, 5 en 6.**

---

## 6.7 Samenvatting en conclusies

Met het DELFT3D model zijn de effecten, op vooral de sedimentatie op baggergebieden, van verschillende ingrepen onderzocht.

Met betrekking tot het storten op de plaatpunt van Walsoorden zijn de volgende conclusies getrokken:

- De invloed van de storting beperkt zich tot de directe omgeving van het verhoogde gebied zelf. De invloed op de sedimentatie in de baggergebieden, inclusief de gebieden dichtbij het verhoogde gebied, is klein.
- In het verhoogde gebied treedt erosie op, wat betekent dat het gestorte sediment niet blijft liggen. Dit houdt in dat herhaling van de storting na verloop van tijd mogelijk is.
- Sediment geërodeerd uit het verhoogde gebied komt grotendeels terecht in de naast liggende vloedgeulen. Dit betekent dat als de storting herhaaldelijk wordt toegepast ook de stabiliteit van het meergeulensysteem in beschouwing moet worden genomen. Daarbij is ook de opgetreden erosie in de vloedgeul Schaar van Waarde naast het stortgebied van belang.
- Zeewaarts van het gebied veroorzaakt de storting een ebdominant verschil in het resttransport. Het vloedtransport in de naastliggende vloedgeulen wordt door de storting versterkt.

Met betrekking tot de verruiming van de vaargeul zijn de volgende conclusies getrokken:

- De drempel van Bath vertoont een afwijkend gedrag: verdere verruiming van de vaargeul zal volgens het model leiden tot een afname van het onderhoudsbaggerwerk in dit gebied. Dit afwijkende gedrag is nog niet geheel te begrijpen, maar het gaat hier waarschijnlijk niet om een modelartefact. Ook bij het kalibreren van het 1-element model voor het onderhoudsbaggerwerk is gebleken dat de drempel van Bath zich afwijkend gedraagt t.o.v. de andere baggergebieden. Alleen voor deze drempel is er een in de tijd toenemende evenwichtsdiepte vereist bij de kalibratie. Verder zijn er inmiddels aanwijzingen uit de gegevens dat het onderhoudsbaggerwerk bij deze drempel na de tweede verdieping is afgenomen (Kornman et al., 2002).
- Verdieping alleen (13,1 scenario) heeft relatief weinig invloed op het onderhoudsbaggerwerk. Voor het totale onderhoudsbaggerwerk in het estuarium is er volgens de berekeningen praktisch geen verandering t.g.v. de verdieping. Als de drempel van Bath, die zich afwijkend gedraagt t.o.v. andere drempelgebieden, niet wordt meegerekend dan zal de verdieping volgens het model een toename van ongeveer 12% voor het onderhoudsbaggerwerk veroorzaken, wat vrij goed overeenkomt met de voorspelling met het 1-element model.
- Een theoretische verbreding van de vaargeul van 25% heeft een groot gevolg voor het onderhoudsbaggerwerk doordat er grotere gebieden moeten worden onderhouden door te baggeren. Voor de Westerschelde als geheel bedraagt de toename ongeveer 50%. Er is een sterk verband tussen de te onderhouden oppervlakken en de berekende sedimentatie. Verbreding van de vaargeul wordt momenteel echter niet overwogen.
- De twee verruimingsscenario's, verdieping 13,1 met of zonder verbreding, hebben een soortgelijk effect op het resttransport patroon en het sedimentatie-erosie patroon. De orde van grootte van het verschil in het resttransport is 10%.
- Voor de verdieping 12,5 is er geen berekening op basis van DELFT3D uitgevoerd in dit vooronderzoek. Verwacht wordt dat de 12,5 verdieping (zonder verbreding) nog kleinere invloed heeft dan de 13,1 verdieping.

---

Om de effecten van de verschillende stortstrategieën te simuleren zijn berekeningen uitgevoerd waarin baggeren en storten zijn meegenomen tijdens de berekening. De volgende conclusies zijn getrokken uit de resultaten:

- Onderhouden van de vaardiepte in de baggergebieden tijdens de berekening veroorzaakt een wezenlijke toename (orde 40%) van het berekende onderhoudsbaggerwerk. Dit is dus mogelijk één van de verklaringen waarom de berekeningen zonder ingreep een te klein totaal onderhoudsbaggerwerk voorspellen.
- Over het algemeen is het verschil tussen de verschillende stortstrategieën relatief klein. Voor het totale onderhoudsbaggerwerk berekent het model praktisch geen verschil tussen de huidige stortstrategie en de oude stortstrategie (van 1995). De verbeterde strategie zoals voorgesteld in de huidige studie veroorzaakt een toename van ongeveer 10% in het totale onderhoudsbaggerwerk. Deze toename treedt praktisch geheel op in de drie baggergebieden 8 (drempel van Hansweert), 9 en 10 (Gat van Ossensisse en Overloop van Hansweert (macrocel 4) waar volgens deze strategie veel meer in de (eroderende) vaargeul wordt gestort.
- De verandering van de stortstrategie sinds de tweede verdieping (meer storten in het westen) gaat volgens het model gepaard met een afname van de sedimentatie in de baggergebieden in de Overloop van Valkenisse (5 en 6) en de drempel van Valkenisse. Of dit overeenkomt met de werkelijkheid is niet geheel te achterhalen omdat sindsdien niet alleen de stortstrategie is veranderd maar de vaargeul ook is verdiept. Wel is bekend dat de toename van het onderhoudsbaggerwerk t.g.v. de verdieping kleiner is dan volgens eerdere schattingen / voorspellingen.

Tenslotte wordt opgemerkt dat de simulatieperioden van de uitgevoerde berekeningen relatief kort zijn t.o.v. de morfologische tijdschaal. De geconstateerde effecten van de verschillende ingrepen moeten daarom als initiële reacties van het estuarium worden beschouwd.

---

## 7 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

### 7.1 Samenvatting en conclusies

De voorliggende rapportage van het vooronderzoek naar het voorspellen van het onderhoudsbaggerwerk en het verbeteren van de stortstrategie in de Westerschelde, is onderdeel van de strategische milieueffectenrapportage waarin de gevolgen van een verdere verruiming van de vaargeul naar Antwerpen worden onderzocht. In dit vooronderzoek stonden de volgende twee vragen centraal:

1. Waar kan de specie voor de aanleg en het onderhoud van de verdiepte vaargeul worden gestort zonder dat de instandhouding van het dynamische meergeulenstelsel in gevaar komt en wat zijn de effecten van dit baggeren en storten?
2. Wat is de te verwachten volume van het onderhoudsbaggerwerk bij een verdere verdieping naar een getij-onafhankelijk diepgang van 12,5m, 12,8m en 13,1m?

De antwoorden op deze twee vragen worden gebruikt bij de verdere uitwerking van het verdiepingsalternatief (zie Jeuken et al., 2004). Gelet op het kleine verschil tussen een getij-onafhankelijk diepgang van 12,8m en 13,1m werd eveneens een diepgang van 12,5m onderzocht waarna de diepgang van 12,8m geïnterpoleerd werd tussen een diepgang van 12,5m en 13,1m.

Om de vragen te kunnen beantwoorden is gebruik gemaakt van historische gegevens en kennis over het baggeren en storten in de Westerschelde (Allersma, 1991, Pieters, 1991, Vroon et al, 1997; Claessens, 1999, Kornman en Liek, 2003) en een modelinstrumentarium, bestaande uit:

- Een 1-dimensionaal morfologisch netwerkmodel gebaseerd op SOBEK, voor het evalueren van de stabiliteit van het geulsysteem in de Westerschelde onder invloed van baggeren en storten. Dit model is binnen de huidige studie opgezet en op hoofdlijnen gekalibreerd (zie hoofdstuk 3). Een gedetailleerde kalibratie op basis van de historische morfologische gegevens en een verificatie/validatie van het model waren binnen de krappe tijd- en geldrandvoorwaarde van de gehele strategische milieustudie niet mogelijk. Het model is toegepast om een stortstrategie te bepalen waarbij het meergeulenstelsel bij voortzetting van het huidige beleid en bij een verdere verruiming in stand kan worden gehouden.
- Een semi-empirisch 1-element model voor het voorspellen van het volume onderhoudsbaggerwerk. De basis van het model bestond al (Wang et al, 2003). In de huidige studie is het model gekalibreerd met historische gegevens en toegepast om de te verwachten volume onderhoudsbaggerwerk in de Westerschelde te bepalen. Het model is niet gevalideerd/geverifieerd omdat de tijdreeks met waarnemingen van het onderhoudsbaggerwerk daarvoor te kort is.
- Een 3-dimensionaal morfologisch model gebaseerd op DELFT3D, waarmee verkennende morfologische berekeningen van 1 à 2 jaar kunnen worden gemaakt. Gezien de tijdschaal van het morfologische systeem kunnen deze berekeningen als initiële morfologische berekeningen worden beschouwd. Ook dit model is binnen de huidige studie opgezet, maar nog niet echt gekalibreerd en gevalideerd (zie Bijlage A). Het model is gebruikt voor het beantwoorden van specifieke vragen rondom de stortstrategie en het voorspellen van het onderhoudsbaggerwerk.

Het Cellenconcept Westerschelde (Winterwerp et al, 2001 en Jeuken et al, 2003) is gebruikt voor het aggregeren en interpreteren van de modelresultaten.

---

Voor wat betreft het beantwoorden van vraag 1 zijn de volgende conclusies getrokken:

1. Volgens het SOBEK-model zal voortzetting van het stortbeleid van het nulalternatief leiden tot problemen in het middengebied en in het westelijke deel van de Westerschelde. Met name de ebgeul Middelgat en de vloedgeul Everingen zullen snel ondieper worden. Voor het Middelgat is dit een natuurlijk proces wat door het storten wordt versterkt. Hierbij moet worden aangetekend dat het hier om een morfologisch zeer complex deel van de Westerschelde gaat waar het niet mee kunnen nemen van bijvoorbeeld de dynamiek van de kortsluitgeulen invloed kan hebben.
2. De simulatie van het nulalternatief geeft aan dat er volgens het SOBEK-model sprake is van netto erosie in de vaargeulen in macrocel 4, bij Hansweert, en macrocel 5, het Valkenisse-gebied. Dit wordt ondersteund door de uitkomsten van het DELFT3D-model. Door het gebruik van redelijk extreme randvoorwaarden (springtij) is de volumeverandering volgens SOBEK wel extremer dan volgens het DELFT3D-model.
3. Door de stortlocaties en de hoeveelheid te storten materiaal per locatie aan te passen is het mogelijk om het meergeulensysteem te behouden voor de komende 30 jaar. Hierbij wordt er t.o.v. het nulalternatief relatief meer in de vaargeul en het oosten van de Westerschelde gestort. Ook bij het verdiepen tot 13,1 m blijft dit mogelijk. De verhouding van de gemiddelde diepte tussen de ebgeul en vloedgeul in een macrocel verandert zo min mogelijk met de voorlopig verbeterde stortstrategie. Met het huidige SOBEK model is het alleen mogelijk om een stortstrategie op hoofdlijnen uit te werken. Het model laat zien hoeveel gestort kan worden en in welke geulen. Het is niet mogelijk om te zeggen waar precies in het profiel dit het beste kan. Dit kan alleen worden onderzocht met een gevalideerd DELFT3D model voor het estuarium waarvan de voorspelkracht bekend is en aanvullend inzicht in de historische ontwikkelingen van het baggeren en storten in het estuarium (zie ook paragraaf 7.2).

Een verkenning naar de initiële invloed van de stortstrategie op het onderhoudsbaggerwerk levert volgende bevindingen op:

4. Het storten volgens de 'verbeterde strategie' leidt tot een relatieve netto sedimentatie in de huidige baggerlocaties t.o.v. het nulalternatief. De gevolgen van de stortstrategie op het volume onderhoudsbaggerwerk kunnen niet met SOBEK model worden onderzocht. Volgens een verkenning met het DELFT3D-model gaat de verbeterde stortstrategie gepaard met een toename van het onderhoudsbaggerwerk van 10%. Deze toename treedt praktisch geheel op in de eroderende vloedgeul van macrocel 4 (Gat van Ossensse – Overloop van Hansweert).
5. Voor het totale onderhoudsvolume in de Westerschelde berekent het model praktisch geen verschil tussen de huidige stortstrategie (nulalternatief) en de oude stortstrategie (1995) van voor de laatste verdieping.
6. De invloed van het storten op de plaatpunt van Walsoorden (de alternatieve stortstrategie van PAET) beperkt zich tot de directe omgeving van de plaatpunt. Het storten heeft praktisch geen invloed op het onderhoudsbaggerwerk. Verder lijkt het erop dat de storting op de lange termijn niet blijft liggen. Erosie van het gestorte materiaal gaat gepaard met sedimentatie in de omliggende vloedgeulen.

Bij deze conclusies dient te worden opgemerkt dat het gaat om initiële morfologische effecten. Het is goed mogelijk dat de morfologische effecten van stortstrategieën op langere termijn (jaren tot decennia) anders zijn dan de effecten op korte termijn (1-2 jaar).

---

Voor wat betreft de beantwoording van de vraag 2 is het volgende geconcludeerd:

7. Het 1-element model voor de voorspelling van het onderhoudsbaggerwerk geeft aan dat de verwachte toename in het onderhoudsbaggerwerk bij een verdieping naar 13,1m ongeveer dan 17% zal zijn. Bij een verdieping naar 12,5 m wordt de toename op ongeveer 4% voorspeld. Op basis van een lineaire interpolatie wordt de toename bij een verdieping naar 12,8 m geschat op 10%. De onzekerheidsmarges bij deze waarden is echter groot omdat de oppervlakte van het te onderhouden baggergebied moest worden geschat (bij de verdiepingen naar 12,5 m en 13,1 m) en omdat lineaire interpolatie (bij een verdieping naar 12,8 m) eigenlijk niet de goede methode is.
8. Ook het DELFT3D-model geeft aan dat er weinig verandering (slechts een paar procent) in het onderhoudsbaggerwerk na een verdieping (zonder verbreding) van de vaargeul is. Dit komt mede door een sterke afname van de sedimentatie op de Drempel van Bath. Als dit gebied niet wordt meegenomen is er sprake van een toename van orde 10%. Verbreding veroorzaakt wel een significante toename van het onderhoudsbaggerwerk doordat grotere gebieden moeten worden onderhouden door baggeren. Afgezien van de drempel van Bath, die zich afwijkend gedraagt, is de toename van het onderhoudsbaggerwerk op de drempelgebieden vrijwel evenredig met de toename van het te onderhouden oppervlak.

## 7.2 Aanbevelingen

De resultaten van de huidige studie geven aanleiding tot verschillende aanbevelingen op het gebied van het vergroten van de systeemkennis en het ontwikkelen van morfologische modelinstrumenten:

1. Om meer inzicht in de betrouwbaarheid van de voorspelling met het SOBEK model te krijgen is het doen van een volledige kalibratie en validatie noodzakelijk. Het gebruik van een dergelijk model blijft voorlopig noodzakelijk omdat veranderingen in de stabiliteit van het geulsysteem zich manifesteren op een tijdschaal van jaren tot decennia.
2. Om een beter beeld te krijgen van de gevolgen voor de drempelgebieden van verschillende stortstrategieën is nader onderzoek met het DELFT3D-model nodig. Maar hiervoor moet het model wel eerst worden gekalibreerd en gevalideerd.
3. Qua opzet kan het DELFT3D model op een aantal punten worden verbeterd, o.a.:
  - a) Een hogere resolutie van de rekenrooster is nodig om de overige kleinere baggergebieden bestuderen, en om kleinere verbreding van de vaargeul te kunnen weergeven in het model.
  - b) Koppeling tussen baggeren en storten qua totale hoeveelheden bij het meenemen van ingrepen tijdens de berekening.
  - c) Simulaties langer dan 2 jaar zijn nodig om bijvoorbeeld de effecten van verschillende stortstrategieën beter te analyseren.
  - d) Onderzoeken of het mogelijk is om gebruik te maken van een zogenaamd morfologisch getij in plaats van een doortij-springtijcyclus. Het gebruik van een morfologisch getij biedt twee voordelen: de rekentijd kan worden verkort en er kunnen meer resultaten binnen een getij worden weggeschreven ten behoeve van analyse en interpretatie. Met de modelopzet zoals gebruikt in de huidige studie kon slechts eens per drie uur een stroomveld worden weggeschreven. Deze opzet resulteerde in uitvoerbestanden ter grootte van 2GB.

- 
4. Met behulp van de modellen kunnen nadere analyses van de historische waarnemingen worden gemaakt. Deze analyses zouden zich in eerste instantie moeten richten op:
    - a) Nader onderzoek naar het afwijkende gedrag van de drempel van Bath. Nagegaan moet worden of de berekende afname van onderhoudsbaggerwerk bij verdere verruiming van de vaargeul realistisch is. Zo ja, dan moet het verantwoordelijke mechanisme hiervoor worden vastgesteld. Aan de hand van het verkregen inzicht moet vervolgens worden nagegaan of hetzelfde verschijnsel ook kan optreden in andere gebieden. Hierbij moet ook worden nagegaan wat de rol van stortstrategie en zandwinning is.
    - b) Een verdere kwantitatieve analyse van de bagger- en stortcijfers in relatie tot de morfologische ontwikkelingen (Pieters, 2004). Het volume onderhoudsbaggerwerk kent een grillig verloop in de tijd. Naast de vereiste vaargeulafmetingen zijn stortstrategie, locale (cyclisch gedrag van kortsluitgeulen, plaat geul interacties) en meer globale morfologische veranderingen (bochtafsnijdingen, langdurige sedimentonttrekkingen) allemaal van invloed op het aanzandingproces in een baggergebied. De invloed van de verschillende factoren zal per drempelgebied anders zijn. Bij deze analyse moet ook meer aandacht worden besteed aan de overige baggergebieden (plaatranden en geulwanden, anders dan de drempelgebieden), omdat deze een steeds grotere rol gaan spelen in het onderhoudsbaggerwerk bij een verdere verruiming van de vaargeul.
    - c) De oorzaken van het uitruimen van het stuk vaargeul, Zuidergat-Overloop van Valkenisse tussen 1970 en 1986. Naast het verdiepen van de drempels is het waarschijnlijk dat ook andere meer natuurlijke processen een belangrijke rol hebben gespeeld in het eroderen van deze geul (zie Jeuken et al., 2003).
    - d) Nagaan wat precies de rol van het storten (en baggeren) is geweest in de versterkte kanteling van het geulsysteem Middelgat –Overloop van Hansweert, in macrocel 4. Hierbij kan ook worden nagegaan of deze recente ontwikkelingen met morfologisch baggeren en storten kunnen worden verzwakt of gestagneerd.
  5. Verfijning van de verbeterde stortstrategie op basis van de resultaten uit de aanbevelingen 1 t/m 4. Deze verfijning zou zich kunnen richten het aanpassen van de stortstrategie, zodanig dat het onderhoudsbaggerwerk niet toeneemt en eventueel zelfs gereduceerd kan worden. Dit kan wellicht worden bereikt door een minder strenge eis aan de morfologische effecten van de stortstrategie op te leggen: niet uitgaan van 'minimale kanteling van het huidige geulsysteem', maar van 'geen onomkeerbare kanteling tengevolge van storten'. Hierbij moeten dan wel de consequenties voor de instandhouding van de mesocellen (kortsluitgeulen) kwantitatief in kaart worden gebracht. Daarnaast is een verfijning van de voorlopig verbeterde stortstrategie nodig waarbij meer in detail wordt gekeken naar de verdeling van het storten binnen een geul. Bij deze twee typen aanpassingen van de stort- en baggerstrategie moet de Vlaamse en Nederlandse kennis zoveel als mogelijk worden gebundeld.

---

## Literatuur

Claessens, J. 1999, De sturing van de baggerwerken in de Westerschelde, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur, Administratie Waterwegen en Zeewezen, Afdeling Maritieme Schelde.

Friedrichs, C.T. & D.G. Aubrey, (1988), Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 27, P.521-545.

Jeuken, M.C.J.L., 2000, On the morphodynamic behaviour of tidal channels in de Westerschelde estuary, Proefschrift Rijksuniversiteit Utrecht.

Jeuken, M.C.J.L., 2001, Verificatie van het Cellenconcept op basis van historische gegevens, WLdelft Hydraulics rapport Z3078.

Jeuken, M.C.J.L., Tanczos I.C., Thoolen, P., Van Helvert, M.A.G., Rozemeijer, M. en Wang, Z.B. 2002. Onderbouwing van het cellenconcept als instrument voor beheer en beleid, WL I delft Hydraulics, Rapportnr. Z2838/Z3288.

Jeuken, M.C.J.L., Tanczos I.C. en Wang, Z.B. 2003. Evaluatie van het beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning sinds de tweede vaargeulverdieping op basis van veldwaarnemingen en het verbeterde Cellenconcept Westerschelde, WL I delft Hydraulics, Rapportnr. Z3467

Jeuken et al, 2004, Hoofdrapport morfologisch onderzoek Milieueffectenrapport (voorlopige titel), in prep.

Kornman, B., Liek, G.J. en H. Schippers, 2002, Baggeren en storten in de Westerschelde, een nieuwe kijk op het onderhoudsbaggerwerk, Werkdocument RIKZ/AB/2002.840x.

ProSes, 2003, 'Verslag vergadering van 09-09-2003', opgemaakt door ir. J. Claessens

RWS& MVG, 2001, Langetermijnvisie Schelde Estuarium, RWS Directie Zeeland en het ministerie van de Vlaamse Gemeenschap

Storm, C., 1996, Residuele zandtransporten in de Westerschelde, RIKZ Werkdocument OS-96.837X, RIKZ, Rijkswaterstaat.

Wang, Z.B., Thoolen, P. en Tanczos I.C. 2002. Onderbouwing van het cellenconcept, WL I delft Hydraulics, Rapport Z3325

Wang Z.B., P.C.M. Thoolen en R.J. Fokkink, Studie naar morfologische effecten van baggeren in de Westerschelde, Ten behoeve van MER storten gebaggerd materiaal, Juli 1997, Z2310

Wang Z.B., C. Jeuken, H. Gerritsen, H.J. de Vriend, B.A. Kornman, 2002, Morphology and asymmetry of vertical tide in the Westerschelde Estuary, *Continental Shelf Research*, Volume/Issue 22/17 pp. 2599-2609.

---

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 (2 delen), WlIdelft Hydraulics

WLB, 2003, Alternative dumping strategy Walsoorden, Results physical and numerical modelling, Waterbouwkundig Laboratorium, Report MOD 678/1.

**Tabel 3-6: De gemiddelde, minimale en maximale jaarlijkse volumeverandering (Vtot) van de ebgeul (EG) en vloedgeul (VG) in de macrocellen bepaald aan de hand van metingen in de periode 1997-2002 volgens Jeuken et al (2003) en volgens het SOBEK model voor de periode 2002-2006. De volumeverandering zoals gemeten over de periode 2001-2002 en berekend over 2002-2003 zijn ook aangegeven.**

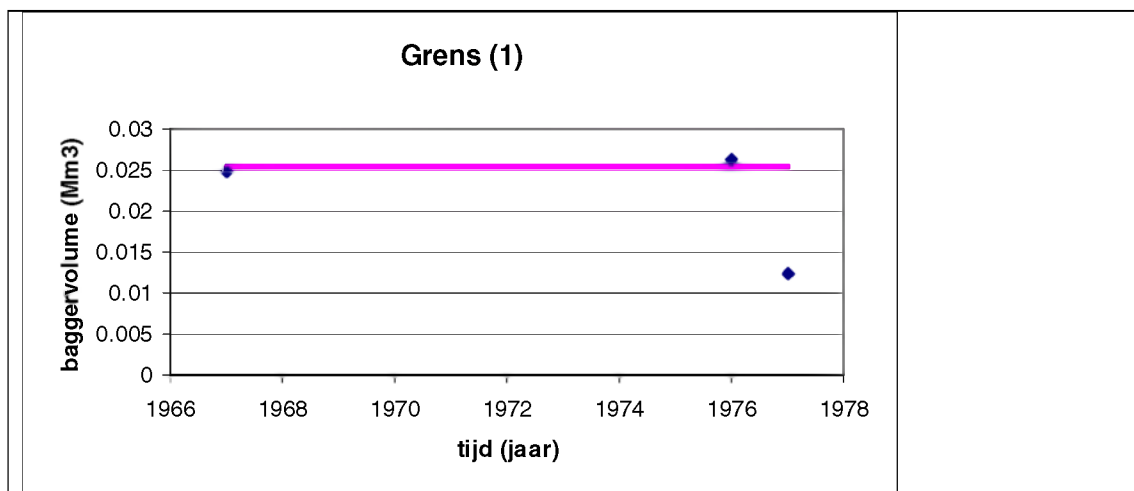
|      | Metingen 1997-2002<br>(Mm <sup>3</sup> /jr) |             |           | SOBEK 2002-2006<br>(Mm <sup>3</sup> /jr) |             |           |
|------|---------------------------------------------|-------------|-----------|------------------------------------------|-------------|-----------|
|      | gem                                         | min – max   | 2001-2003 | gem                                      | min-max     | 2002-2003 |
| EG 1 | -0.8                                        | -2.2 – 0.3  | 0.3       | 2.8                                      | 2.1 – 3.4   | 3.4       |
| VG 1 | 1.2                                         | -1.1 – 3.6  | 2.6       | 1.0                                      | 0.2 – 1.7   | 0.2       |
| EG 3 | -0.4                                        | -2.6 – 1.6  | 0.8       | -3.4                                     | -5.3 – 3.5  | -5.3      |
| VG 3 | 0.8                                         | 1.8 – 5.6   | 1.3       | 2.0                                      | 0.8 – 3.1   | 0.8       |
| EG 4 | 3.1                                         | 2.0 – 4.0   | 3.2       | 6.8                                      | 5.9 – 7.7   | 7.7       |
| VG 4 | -3.7                                        | -5.4 – -2.1 | -5.4      | -3.0                                     | -3.1 – 3.8  | -3.8      |
| EG 5 | -3.0                                        | -3.1 – -2.4 | -3.1      | -6.2                                     | -6.3 – -6.1 | -6.3      |
| VG 5 | -0.5                                        | -0.9 – 0.0  | -0.9      | 0.2                                      | -0.1 – 0.4  | -0.1      |
| EG 6 | -0.5                                        | -0.8 – 0.1  | -0.8      | 0.7                                      | -0.1 – 1.6  | 1.6       |
| VG 6 | -0.1                                        | -0.4 – 0.2  | -0.4      | 0.2                                      | 0.1 – 0.3   | 0.3       |
| EG 7 | -0.6                                        | -1.2 – -0.2 | -0.4      | -1.9                                     | -2.4 – -1.4 | -2.4      |
| VG 7 | 0.0                                         | -0.1 – 0.3  | 0.0       | 0.1                                      | 0.1 – 0.1   | 0.1       |

**Tabel 3-7: De gemiddelde, minimale en maximale jaarlijkse ‘natuurlijke’ volumeverandering van de ebgeul (EG) en vloedgeul (VG) in de macrocellen bepaald aan de hand van metingen in de periode 1997-2002 volgens Jeuken et al (2003) en volgens het SOBEK model. De laatste kolom geeft de resultaten van het DELFT3D model (zonder ingrepen).**

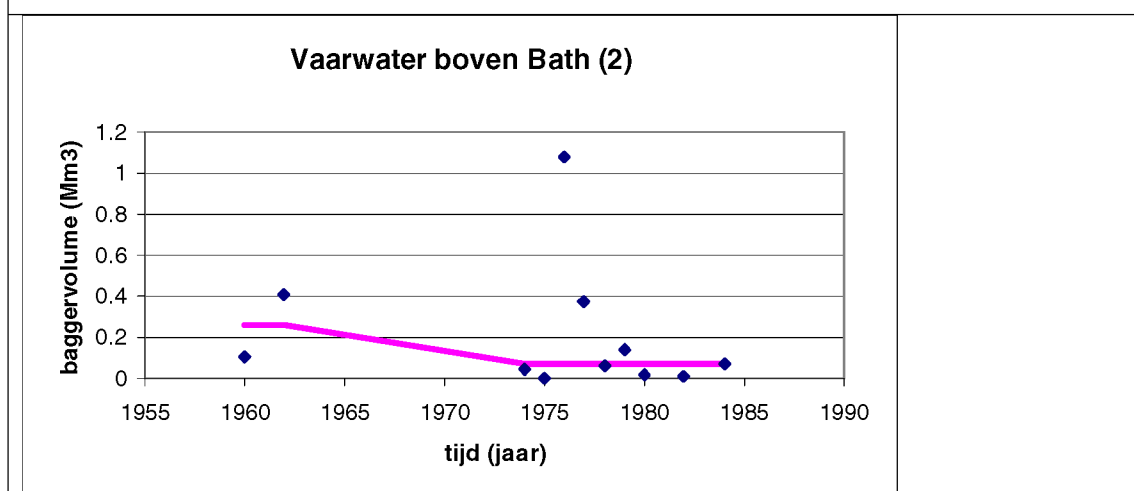
|      | Delta V <sub>nat</sub><br>1997-2002<br>(Mm <sup>3</sup> /jr) |             | SOBEK<br>2002-2006<br>(Mm <sup>3</sup> /jr) |             |         |             | D3D<br>2001<br>(Mm <sup>3</sup> /jr) |
|------|--------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------|-------------|---------|-------------|--------------------------------------|
|      |                                                              |             | Berekend                                    |             | Vtot-VI |             |                                      |
|      | gem                                                          | min – max   | gem                                         | min-max     | gem     | min-max     | gem                                  |
| EG 1 | -0.9                                                         | -1.7 – -0.3 | 1.7                                         | 0.7 – 2.7   | -1.7    | -2.2 – -0.7 | -3.5                                 |
| VG 1 | -0.4                                                         | -2.8 – 1.8  | -0.9                                        | -2.0 – 0.1  | 2.9     | 2.0 – 3.4   | 3.2                                  |
| EG 3 | 1.4                                                          | -0.8 – 3.1  | -2.6                                        | -3.6 – -1.5 | -0.7    | -1.6 – 0.3  | -1.0                                 |
| VG 3 | -2.5                                                         | -3.9 – -1.0 | -0.5                                        | -1.7 – 0.7  | 0.8     | -0.5 – 1.8  | -1.5                                 |
| EG 4 | 1.0                                                          | 0.4 – 1.4   | 3.6                                         | 3.9 – 5.4   | 1.0     | 0.0 – 1.8   | 1.3                                  |
| VG 4 | -3.9                                                         | -5.6 – -2.7 | -2.7                                        | -2.7 – -2.6 | 0.1     | -0.5 – 0.7  | -1.5                                 |
| EG 5 | 2.3                                                          | 0.4 – 3.0   | -1.3                                        | -1.5 – -1.0 | -1.5    | -1.9 – -1.2 | 0.0                                  |
| VG 5 | -0.6                                                         | -1.1 – -0.1 | 0.2                                         | -0.1 – 0.5  | 0.8     | 0.4 – 1.0   | 1.7                                  |
| EG 6 | 0.9                                                          | 0.5 – 1.3   | 1.0                                         | -0.1 – 2.1  | -0.9    | -2.0 – -0.3 | 1.5                                  |
| VG 6 | -0.1                                                         | -0.4 – 0.2  | 0.4                                         | 0.4 – 0.4   | 0.1     | -0.1 – 0.4  | -1.0                                 |
| EG 7 | 0.3                                                          | 0.1 – 0.5   | -1.8                                        | -2.3 – -1.2 | -0.3    | -1.0 – 0.1  | -0.2                                 |
| VG 7 | -0.4                                                         | -0.5 – -0.3 | 0.1                                         | 0.1 – 0.1   | 0.0     | 0.0 – 0.0   | -0.1                                 |

**Tabel 4-2: Voorspelling van het onderhoudsbaggerwerk voor de twee verruiming scenario's op basis van de toename in de oppervlaktes van de baggergebieden bepaald aan de hand van de hypsometrische curven.**

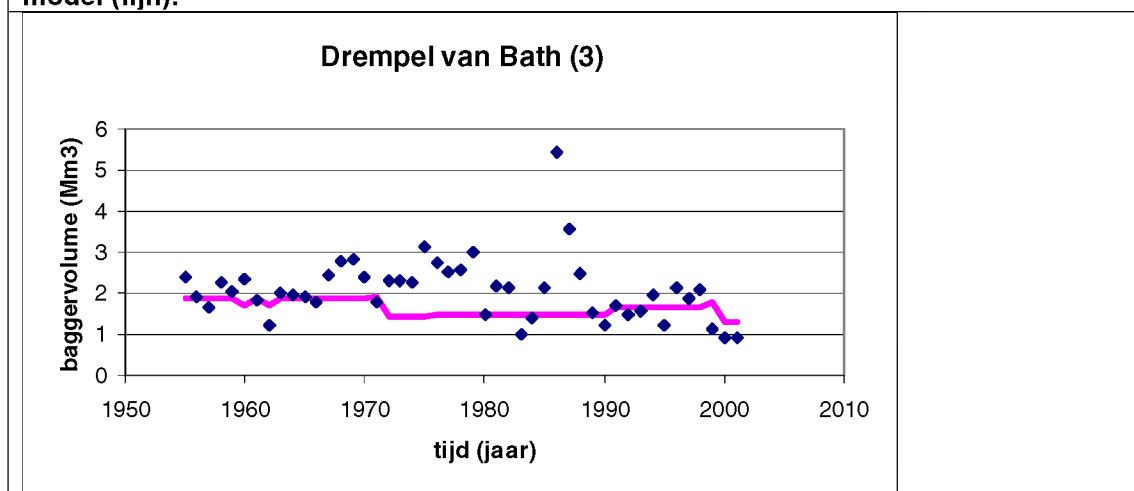
| gebied | Bestaande situatie, na tweede verdieping in 2001 |                                                         |      |      |        |        | verdieping-12,5         |                   |                                                       |             | verdieping-13,1         |               |                                                       |             |
|--------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------|------|--------|--------|-------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------|-------------|-------------------------|---------------|-------------------------------------------------------|-------------|
|        | bagger diepte (m)                                | data baggerhoeveelheden (miljoen m <sup>3</sup> / jaar) |      |      |        |        | Relatieve toename A (%) | Bagger diepte (m) | Voorspellingen (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jaar) |             | Relatieve toename A (%) | Bagger diepte | Voorspellingen (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jaar) |             |
|        |                                                  | 1999                                                    | 2000 | 2001 | Gem. 1 | Gem. 2 |                         |                   | 1                                                     | 2           |                         |               | 1                                                     | 2           |
| 3      | 16                                               | 1.12                                                    | 0.90 | 0.89 | 0.97   | 0.89   | 1                       | 16.6              | 1.17                                                  | 1.08        | 5                       | 17.2          | 1.38                                                  | 1.27        |
| 4      | 16                                               | 1.39                                                    | 1.42 | 2.24 | 1.68   | 1.83   | 1                       | 16.6              | 1.71                                                  | 1.87        | 5                       | 17.2          | 1.79                                                  | 1.95        |
| 5      | 15.9                                             | 0                                                       | 2.20 | 1.75 | 1.32   | 1.97   | 0                       | 16.5              | 1.33                                                  | 1.99        | 27                      | 17.1          | 1.70                                                  | 2.54        |
| 6      | 15.9                                             | 1.28                                                    | 0.08 | 0.25 | 0.54   | 0.16   | 0                       | 16.5              | 0.55                                                  | 0.17        | 14                      | 17.1          | 0.64                                                  | 0.20        |
| 7      | 15.9                                             | 0.62                                                    | 0.19 | 0.24 | 0.35   | 0.22   | 0                       | 16.5              | 0.35                                                  | 0.22        | 67                      | 17.1          | 0.59                                                  | 0.37        |
| 8      | 16                                               | 3.19                                                    | 2.56 | 2.06 | 2.60   | 2.31   | 0                       | 16.6              | 2.63                                                  | 2.33        | 6                       | 17.2          | 2.80                                                  | 2.49        |
| 9      | 15.9                                             | 1.66                                                    | 1.20 | 0.27 | 1.04   | 0.73   | 0                       | 16.5              | 1.07                                                  | 0.75        | 2                       | 17.1          | 1.11                                                  | 0.78        |
| 10     | 16.1                                             | 0.76                                                    | 0    | 1.01 | 0.59   | 0.50   | 3                       | 16.7              | 0.62                                                  | 0.53        | 10                      | 17.3          | 0.68                                                  | 0.58        |
| 12     | 16.8                                             | 0.82                                                    | 0.44 | 0.37 | 0.54   | 0.40   | 25                      | 17.4              | 0.68                                                  | 0.50        | 32                      | 18            | 0.76                                                  | 0.56        |
| 13     | 16.3                                             | 1.43                                                    | 1.10 | 1.06 | 1.20   | 1.08   | 0                       | 16.9              | 1.22                                                  | 1.10        | 7                       | 17.5          | 1.33                                                  | 1.20        |
| 14     | 16                                               | 1.07                                                    | 0.34 | 0.40 | 0.60   | 0.37   | 0                       | 16.6              | 0.60                                                  | 0.37        | 0                       | 17.2          | 0.60                                                  | 0.37        |
| totaal |                                                  | 13.3                                                    | 10.4 | 10.5 | 11.4   | 10.5   |                         |                   | 11.9                                                  | <b>10.9</b> |                         |               | 13.4                                                  | <b>12.3</b> |



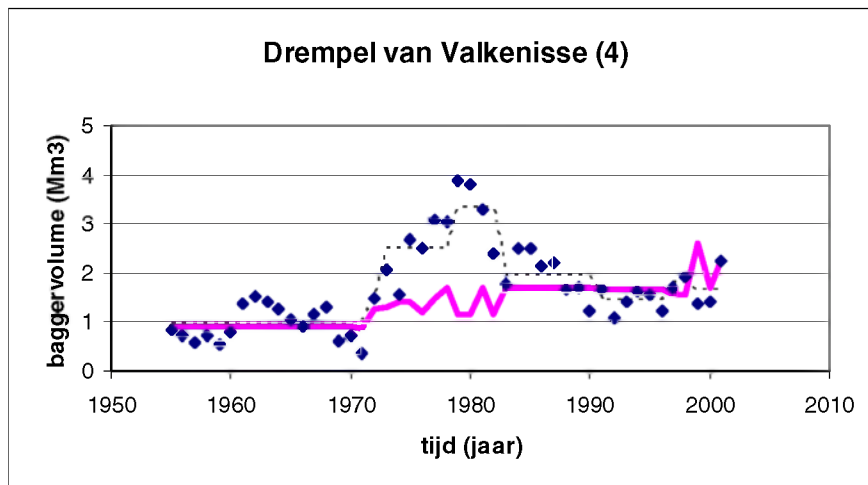
**Figuur 4-3: Het onderhoudsbaggerwerk zoals gemeten (symbolen) en volgens het model (lijn).**



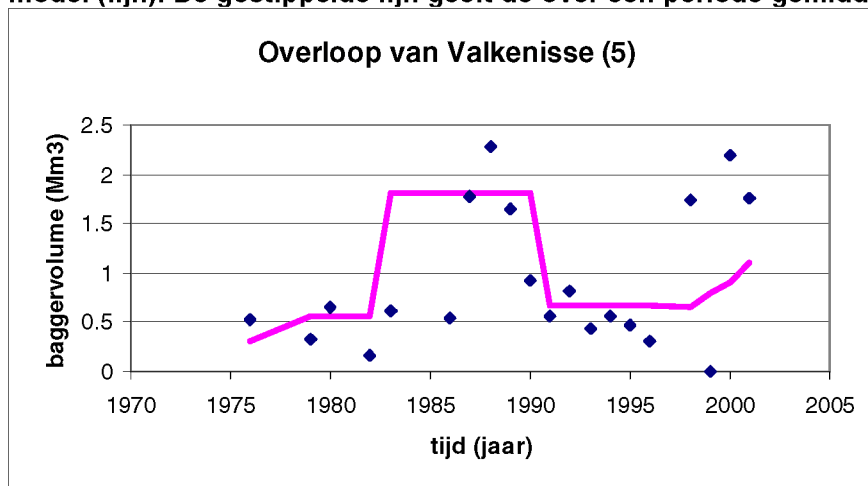
**Figuur 4-4: Het onderhoudsbaggerwerk zoals gemeten (symbolen) en volgens het model (lijn).**



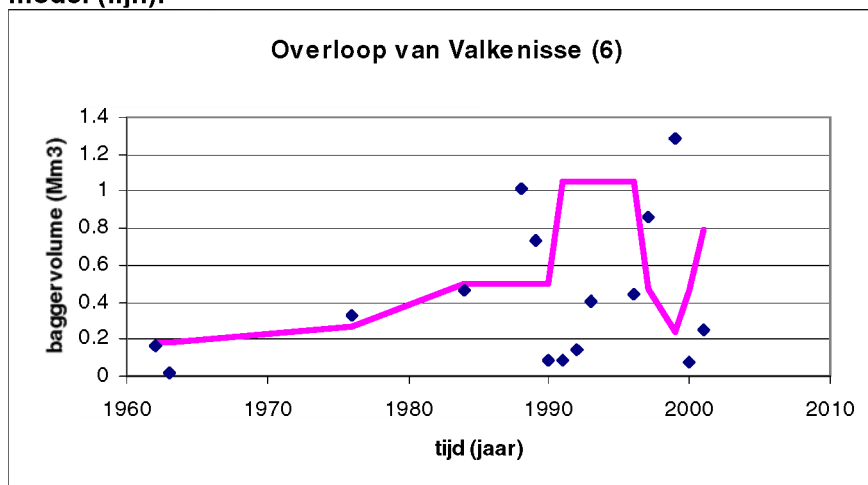
**Figuur 4-5: Het onderhoudsbaggerwerk zoals gemeten (symbolen) en volgens het model (lijn).**



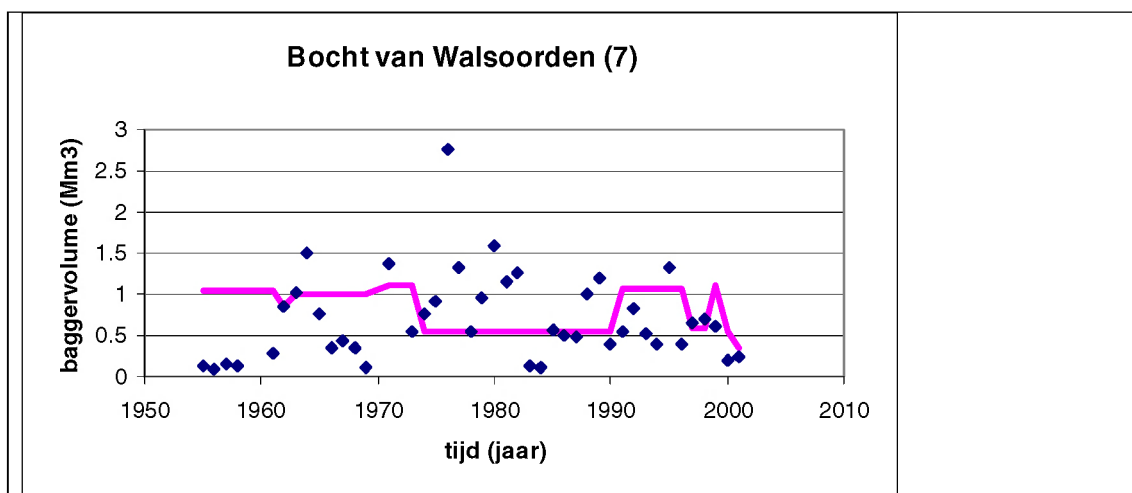
**Figuur 4-6:** Het onderhoudsbaggerwerk zoals gemeten (symbolen) en volgens het model (lijn). De gestippelde lijn geeft de over een periode gemiddelde waarde.



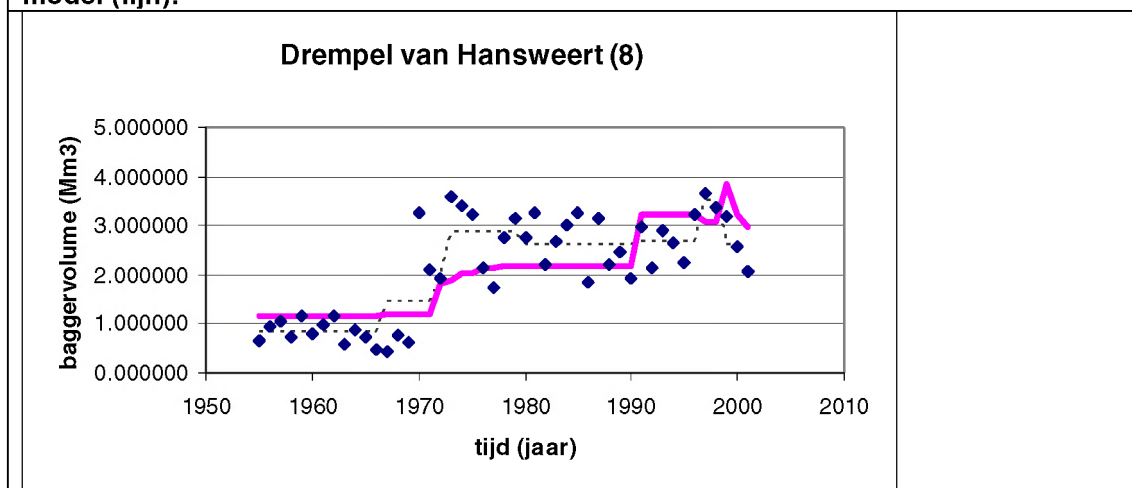
**Figuur 4.7:** Het onderhoudsbaggerwerk zoals gemeten (symbolen) en volgens het model (lijn).



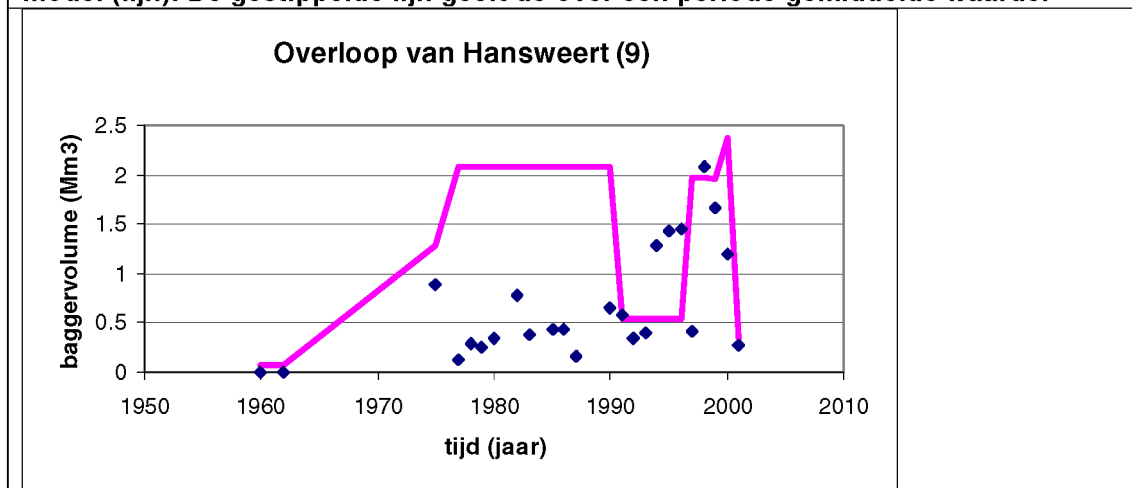
**Figuur 4-8:** Het onderhoudsbaggerwerk zoals gemeten (symbolen) en volgens het model (lijn).



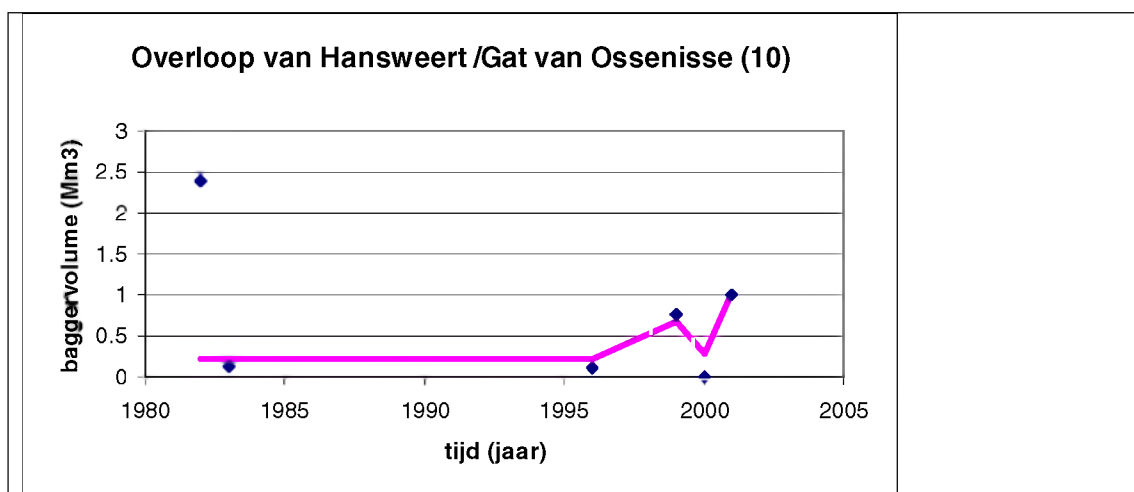
**Figuur 4-9: Het onderhoudsbaggerwerk zoals gemeten (symbolen) en volgens het model (lijn).**



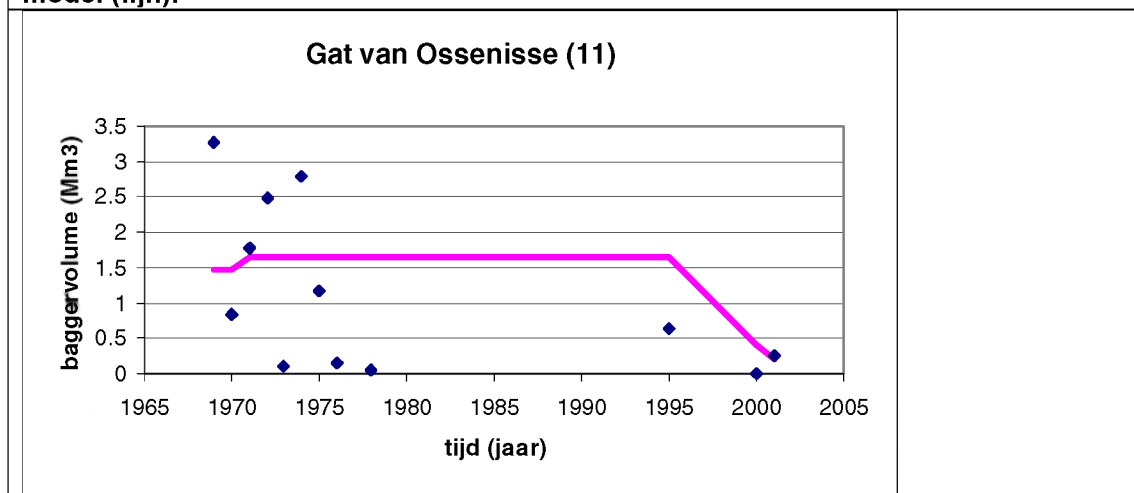
**Figuur 4-10: Het onderhoudsbaggerwerk zoals gemeten (symbolen) en volgens het model (lijn). De gestippelde lijn geeft de over een periode gemiddelde waarde.**



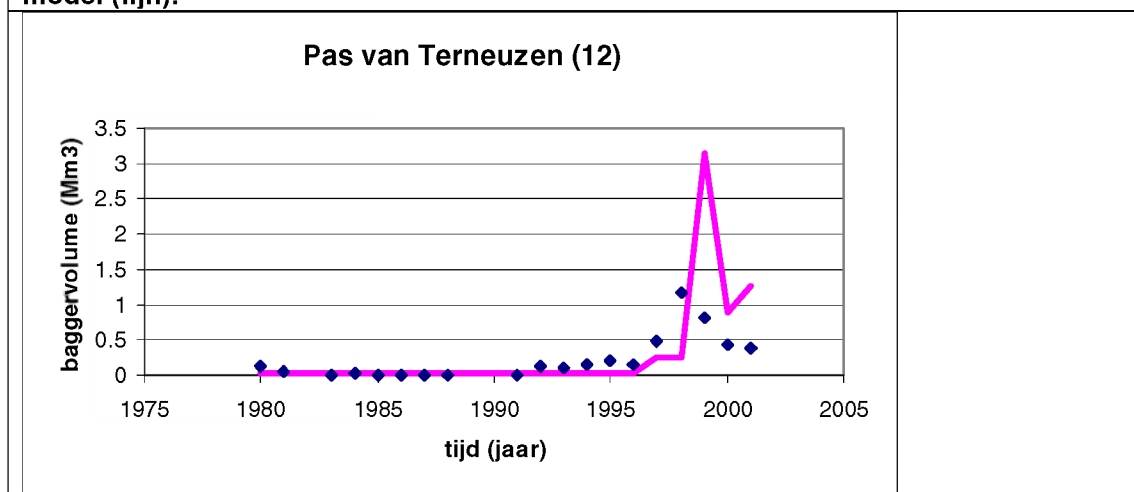
**Figuur 4-11: Het onderhoudsbaggerwerk zoals gemeten (symbolen) en volgens het model (lijn).**



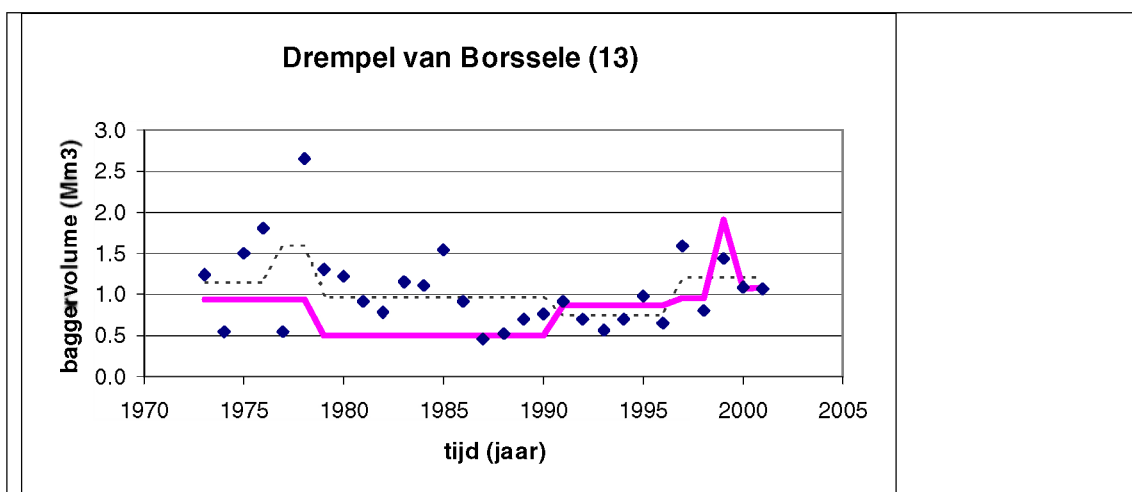
**Figuur 4-12: Het onderhoudsbaggerwerk zoals gemeten (symbolen) en volgens het model (lijn).**



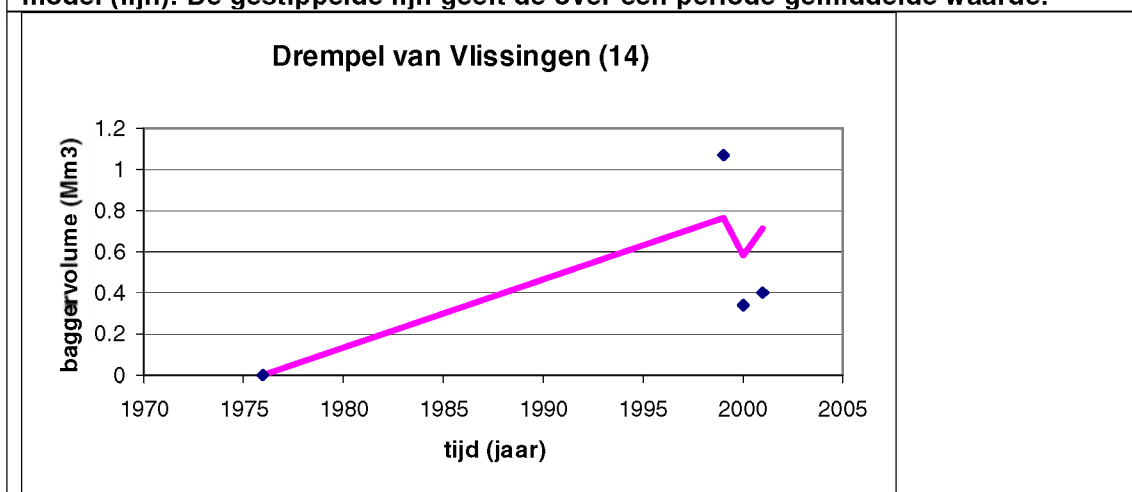
**Figuur 4-13: Het onderhoudsbaggerwerk zoals gemeten (symbolen) en volgens het model (lijn).**



**Figuur 4-14: Het onderhoudsbaggerwerk zoals gemeten (symbolen) en volgens het model (lijn).**



**Figuur 4-16: Het onderhoudsbaggerwerk zoals gemeten (symbolen) en volgens het model (lijn). De gestippelde lijn geeft de over een periode gemiddelde waarde.**



**Figuur 4-17: Het onderhoudsbaggerwerk zoals gemeten (symbolen) en volgens het model (lijn).**