

# **VOP 4&5 IJmuiden**

Een studie naar de  
voorspelkracht van  
Delft3D-RAM

**Ilka Tánczos, Maarten van Ormondt, Dano  
Roelvink, Rinze Bruinsma**

juni 2003

## Inhoud

### Begeleidend commentaar van Rijkswaterstaat, RIKZ

#### Eindoordeel kwaliteitswaarborger

|          |                                                           |            |
|----------|-----------------------------------------------------------|------------|
| <b>1</b> | <b>Inleiding .....</b>                                    | <b>1-1</b> |
| 1.1      | Achtergrond.....                                          | 1-1        |
| 1.2      | Doel van de studie .....                                  | 1-1        |
| 1.3      | Aanpak van de studie .....                                | 1-1        |
| 1.4      | Totstandkoming van dit rapport.....                       | 1-2        |
| 1.5      | Leeswijzer .....                                          | 1-3        |
| <b>2</b> | <b>Voorspelkracht, onzekerheden en bandbreedtes .....</b> | <b>2-1</b> |
| 2.1      | Inleiding.....                                            | 2-1        |
| 2.2      | Begrippen .....                                           | 2-1        |
| 2.2.1    | Algemeen .....                                            | 2-1        |
| 2.2.2    | Systematische afwijkingen .....                           | 2-2        |
| 2.2.3    | Toevallige fouten of onzekerheden en bandbreedtes .....   | 2-3        |
| 2.3      | 'Voorspelkracht' .....                                    | 2-4        |
| 2.4      | Samenvatting .....                                        | 2-4        |
| <b>3</b> | <b>De casus IJmuiden en Delft3D-RAM .....</b>             | <b>3-1</b> |
| 3.1      | Het Kennemerstrand.....                                   | 3-1        |
| 3.2      | Delft3D-RAM .....                                         | 3-1        |
| 3.2.1    | Inleiding .....                                           | 3-1        |
| 3.2.2    | De hoofdmodule.....                                       | 3-2        |
| 3.2.3    | De uniforme strandbenadering (USB).....                   | 3-3        |

|          |       |                                                                                             |            |
|----------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|          | 3.2.4 | Bagger- en suppletie-opties .....                                                           | 3-4        |
|          | 3.2.5 | De 'smoothing-routine' .....                                                                | 3-4        |
|          | 3.2.6 | Kwaliteit Delft3D-RAM resultaten .....                                                      | 3-4        |
| <b>4</b> |       | <b>Kalibratie en gevoeligheidsanalyse van het VOP-IJmuiden model.....</b>                   | <b>4-1</b> |
|          | 4.1   | Inleiding.....                                                                              | 4-1        |
|          | 4.1.1 | Samenvatting Fase 1 .....                                                                   | 4-1        |
|          | 4.1.2 | Resultaten Fase I.....                                                                      | 4-3        |
|          | 4.2   | Verbetering van het model .....                                                             | 4-4        |
|          | 4.3   | Aanpak.....                                                                                 | 4-5        |
|          | 4.4   | Resultaten .....                                                                            | 4-7        |
|          | 4.4.1 | Bodemveranderingen .....                                                                    | 4-7        |
|          | 4.4.2 | Volumeveranderingen .....                                                                   | 4-10       |
|          | 4.4.3 | Stranduitbouw .....                                                                         | 4-13       |
|          | 4.4.4 | Baggerhoeveelheden .....                                                                    | 4-16       |
|          | 4.5   | Samenvatting en conclusies .....                                                            | 4-17       |
| <b>5</b> |       | <b>Voorspelling van evenwichtsligging Kennemerstrand inclusief<br/>nauwkeurigheid .....</b> | <b>5-1</b> |
|          | 5.1   | Inleiding.....                                                                              | 5-1        |
|          | 5.2   | Resultaat .....                                                                             | 5-1        |
|          | 5.2.1 | Conclusie.....                                                                              | 5-4        |
|          | 5.3   | Kwaliteit van de uitkomsten .....                                                           | 5-5        |
|          | 5.3.1 | Systematische afwijkingen .....                                                             | 5-5        |
|          | 5.3.2 | Onzekerheid of bandbreedte .....                                                            | 5-5        |
|          | 5.4   | Conclusies aangaande voorspelkracht VOP-IJmuiden-model.....                                 | 5-6        |
| <b>6</b> |       | <b>'Voorspelkracht' Delft3D-RAM.....</b>                                                    | <b>6-1</b> |
|          | 6.1   | Algemeen.....                                                                               | 6-1        |
|          | 6.2   | Lessen .....                                                                                | 6-1        |

|          |                                                                                                           |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>7</b> | <b>Samenvatting en conclusies .....</b>                                                                   | <b>7-1</b> |
| 7.1      | Samenvatting .....                                                                                        | 7-1        |
| 7.2      | Conclusies .....                                                                                          | 7-2        |
| 7.3      | Hoe nu verder .....                                                                                       | 7-3        |
| <b>8</b> | <b>Referenties .....</b>                                                                                  | <b>8-1</b> |
| <b>A</b> | <b>De smoothing routine in Delft3D-RAM (uit Visser, 2003) .....</b>                                       | <b>A-1</b> |
| A.1      | Desription .....                                                                                          | A-1        |
| A.2      | Results .....                                                                                             | A-2        |
| <b>B</b> | <b>Beschrijving van de randvoorwaarden en kalibratie van de berekening<br/>van de waterbeweging .....</b> | <b>B-1</b> |
| B.1      | Getij .....                                                                                               | B-1        |
| B.2      | Golven .....                                                                                              | B-1        |
| B.3      | Wind .....                                                                                                | B-3        |
| B.4      | Afvoeren .....                                                                                            | B-3        |
| B.5      | Opzet van de morfologische berekeningen .....                                                             | B-3        |
| B.6      | Calibratie .....                                                                                          | B-4        |
| <b>C</b> | <b>Initiele erosie sedimentatie .....</b>                                                                 | <b>C-1</b> |

### **Begeleidend commentaar van Rijkswaterstaat, RIKZ**

In de voor u liggende rapportage staan resultaten van het zgn. VOP (Voortschrijdend Onderzoeks Programma) onderzoek beschreven rondom de casus IJmuiden. Het is een uitwerking van een samenwerkingsintentie tussen WL en RIKZ op het gebied van kustonderzoek. In het programma (2000-2004) worden bestaande morfologische voorspelinstrumenten (op verschillende tijd- en ruimteschalen) getest en geëvalueerd. Daar waar modellen gewogen en te licht bevonden worden, wordt een verbetervoorstel uitgewerkt.

Een onderdeel van dat programma betreft het vaststellen van de voorspelkracht van een vooraf gekozen morfologisch model voor de lange termijn (25 tot 100 jaar). Zoals toegelicht in dit rapport is een speciale versie van het Delft3D\*RAM model (inclusief USB) ingezet om de kustontwikkeling rondom de havenhoofden van IJmuiden te simuleren.

Uitdrukkelijk is gekozen om, op de in de ingenieurspraktijk gebruikelijke wijze, een voorspelling af te geven om daarna door middel van aanvullende gevoeligheidsberekeningen de voorspelkracht van dat model vast te stellen. Het werk zou zich moeten ontwikkelen van adviesproject tot onderzoeksproject. Het onderzoek moest resulteren in generieke lessen die sturend kunnen zijn voor eventuele verdere modelontwikkeling.

Het is lastig gebleken om deze filosofie te volgen in het project. De eerste modeluitkomsten werden nog te weinig begrepen en de voorspelkracht kon niet worden gekwantificeerd. Rijkswaterstaat concludeert dan ook dat Delft3D\*RAM met USB in de huidige vorm niet het geëigende model is om dergelijke kustontwikkelingen te simuleren.

Toch is Rijkswaterstaat van mening dat deze studie een belangrijke bijdrage heeft geleverd in het vooruitbrengen van kennis omtrent het gebruik van kustmorfologische modellen. Aanbeveling is om bij dit type modeltoepassingen, wellicht nog meer dan in de voorliggende rapportage, altijd te beschrijven wat goed en fout is gegaan. Ook is het belangrijk dat zo veel mogelijk gebruik gemaakt wordt van eerder verkregen resultaten. Zo verdient het aanbeveling het onderzoek naar bandbreedte in modelresultaten (een manier om de voorspelkracht te kwantificeren) aan te laten sluiten bij de verkregen resultaten uit de studie naar Maasvlakte II (Steijn et al., 2003). Dergelijke aanbevelingen zijn belangrijk bij de verdere inrichting van VOP-kustonderzoek.

In dit rapport is ook het finale oordeel van de externe kwaliteitsborger, dr.ir. H. Steetzel, opgenomen.

Den Haag, 24 juni 2003

### ***Eindoordeel kwaliteitswaarborger***

**In het volgende is, conform de eerder gemaakte afspraken, een extern oordeel gegeven over de uitgevoerde studie.**

### **“VOP IJmuiden - Een studie naar de voorspelkracht van DELFT3D-RAM”**

In bijgaand studierapport is verslag gedaan van een studie naar de voorspelkracht van DELFT3D-RAM. Deze studie is uitgevoerd in het zogenaamde VOP-kader, waarin onderzoek wordt uitgevoerd naar de bruikbaarheid van morfologische modellen.

Het doel van dit onderzoek was het in kaart brengen van de geschiktheid van een specifiek morfologisch model, te weten het DELFT3D-RAM model. Met de RAM-extensie van het standaard DELFT3D-model is het in principe mogelijk om ook langere termijn morfologische voorspellingen te doen.

Teneinde de kwaliteit van dergelijke voorspellingen te kwantificeren is in dit geval getracht de waargenomen ontwikkelingen rond de (verlengde) havendammen van IJmuiden te reproduceren en vervolgens een voorspellende doorstart te maken met het afgeregelde model. Dit zou naast nuttige specifieke informatie voor de beheerder (advies-aspect) ook inzicht moeten geven in de meer generieke voorspelkracht van het gehanteerde model en de hierbij optredende onzekerheden en bandbreedten (onderzoeks-aspect).

Achteraf gezien blijkt de oorspronkelijke insteek enigszins optimistisch geweest te zijn. De uiteindelijke resultaten van de studie sluiten niet aan bij het oorspronkelijke verwachtingspatroon; morfologie en modellen blijken toch weer weerbarstiger dan verwacht.

In de zogenaamde afregelingsfase werd reeds duidelijk dat het niet mogelijk bleek om, met *dezelfde* instelling van het modelinstrumentarium, simultaan verschillende morfologische ontwikkelingen als zijnde de ontwikkeling van het Kennemerstrand, de ontwikkeling van de benodigde baggerinspanning en de ontwikkeling van de ontgrondingskuil, in voldoende mate te reproduceren.

In overleg met de opdrachtgever werd (gegeven de directe link met het beheerdersprobleem) vervolgens besloten om de aandacht te concentreren op de ontwikkeling van het Kennemerstrand. De consequentie van deze keuze was echter ook dat de behandeling van de waterlijn van meer belang werd en dat het hiertoe gehanteerde conceptuele model, de zogenaamde USB-module (Uniforme Strand Benadering), een wel erg doorslaggevende rol ging spelen.

Een en ander legde daarmee dus ook reeds beperkingen op ten aanzien van de nagestreefde generieke conclusies aangaande de voorspelkracht van DELFT3D-RAM; zowel de toepassing (de lokale kustlijnontwikkeling), als het model (DELFT3D-RAM in combinatie met USB) zijn immers zeer specifiek.

Verder bleek ook het feit dat het in dit geval per definitie ging om een ontwikkelversie van het DELFT3D-RAM/USB model zijn weerslag te hebben op de resultaten. Met name de USB-module in combinatie met de relatief ingewikkelde geometrie rond de dammen maakte dat er soms onverwachte en onbegrepen resultaten werden gegenereerd.

Geconstateerd moet worden dat het USB-concept bij toepassing in gebieden met relatief snelle veranderingen nog de nodige aandacht behoeft en dat de voorliggende versie feitelijk nog niet geschikt is voor een dergelijke toepassing. Aanbevolen wordt overigens ook om meer aandacht te besteden aan het beheer en onderhoud van de RAM/USB-onderdelen binnen het DELFT3D-model.

Ten aanzien van het Kennemerstrand waren de vervolginspanningen met name gericht op de voorspelling van de evenwichtsligging van de kustlijn. Door variatie van relevante parameters zou vervolgens inzicht kunnen worden verkregen in de onzekerheid in de voorspelde evenwichtsligging en daarmee in de voorspelkracht van het DELFT3D-RAM/USB model. Bij de verdere uitwerking bleek dat het model grote moeite had met het voorspellen van een echte evenwichtssituatie. Een en ander betekende dus ook dat het niet mogelijk was om, in lijn met de oorspronkelijke basisfilosofie, in dit specifieke geval een goede uitspraak te doen over de voorspelkracht van het model.

Ondanks het feit dat de bereikte resultaten in het licht van de oorspronkelijke insteek enigszins tegenvallen, heeft de uitgevoerde studie en het daarbij doorlopen proces wel veel inzicht gegeven in de (on)mogelijkheden van de morfologische modellering voor dit specifieke geval. Zo kan de vraag worden gesteld of de gekozen aanpak, waarbij een onderzoeksversie van een rekenmodel wordt getoetst aan de hand van een echte case, in deze vorm optimaal is.

Vermoedelijk is het beter om een meer hybride aanpak te volgen waarbij naast de specifieke beheersvraag (de kustontwikkeling direct ten zuiden van de Zuidelijke Havendam bij IJmuiden) in eerste instantie het meer algemene beheersprobleem (de morfologische ontwikkeling bij een lange dam) centraal te stellen. In dit specifieke geval zouden dan uitwerkingen voor een eenvoudig geval met een rechte kustlijn en een lange dam inzicht moeten geven in de werking van het DELFT3D-RAM/USB model. Na deze meer fundamentele uitwerking zou vervolgens met meer vertrouwen de echte case kunnen worden aangepakt.

Daarnaast wordt aanbevolen voor een dergelijke uitwerking ook gebruik te maken van andere LT-morfologische modellen, teneinde een uitspraak te kunnen doen over de *relatieve* toepasbaarheid van specifieke LT-concepten voor specifieke morfologische problemen.

Bij de opzet van de studie is gekozen voor een grote procesbetrokkenheid van de opdrachtgever, waarbij er op zeer regelmatige basis overleg plaatsvond over de bereikte tussenresultaten. Door deze 'kijk in de keuken' werd ook de opdrachtgever deelgenoot van alles wat er goed, maar met name fout ging in het project. De indruk bestaat dat dit voor dit project door alle partijen als nuttig werd ervaren. Wel bleek het door de wisselende personeelsbezetting bij zowel de opdrachtnemer als de opdrachtgever soms lastig de procesgang vast te houden.

Samenvattend kan worden teruggekeken op zowel een nuttig studieproces als studieresultaat. Bij de inrichting van vervolgonderzoek zal dankbaar gebruik kunnen worden gemaakt van de verschillende bevindingen.

H.J. Steetzel (Alkyon)  
Marknesse, 25 juni 2003

# I Inleiding

## I.1 Achtergrond

Het Voorschrijdend Onderzoeks Programma VOP, is een samenwerkingsintentie tussen het RIKZ en het WL, waarbinnen onderzoek wordt gedaan naar het verbeteren van de voorspelmogelijkheden van korte en lange termijneffecten van ingrepen in het kuststelsel. Het doel is de vormgeving van het ontwerp te beïnvloeden, positieve en negatieve effecten in kaart te brengen en reële schattingen te kunnen maken van economische, ecologisch en maatschappelijke kosten (Van Rijn en Dunsbergen, 2002).

Het VOP kent zijn motivatie in de waargenomen grootschalige en deels niet voorziene morfologische reacties op grote infrastructurele werken in de kustzone zoals de Deltawerken, de afsluiting van het IJsselmeer, de havendammen bij IJmuiden en de Maasvlakte, alsmede in de toenemende belangstelling voor het toekomstige gebruik van de natte kustzone en de Noordzee als bouwlocatie voor, bijvoorbeeld, een vliegveld in zee, Maasvlakte-2 en een windmolenpark. Een veel gebruikte methode voor het 'hindcasten' en voorspellen van morfologische veranderingen is het gebruik van morfologische modellen (2D en 3D procesmodellen in combinatie met daarmee samenhangende lange-termijn gedragsmodellen). Het inzicht hebben in de voorspelkracht van dit instrumentarium en het kennen van de onzekerheden (bandbreedtes) in de voorspellingen met dit instrumentarium is daarbij vereist.

## I.2 Doel van de studie

Het doel is het vaststellen van de voorspelkracht / nauwkeurigheid van het model Delft3D\*RAM bij het doen van voorspellingen van de morfologische kustontwikkelingen voor de lange termijn (25 tot 100 jaar) in het algemeen en rondom IJmuiden in het bijzonder.

De case 'IJmuiden' is gerelateerd aan de morfologische ontwikkelingen nabij IJmuiden en de aanliggende kust ten gevolge van de uitbreiding van de havenhoofden in 1968. De gehanteerde Delft3D\*RAM versie is de versie zoals beschreven en toegepast in MARE (2001).

## I.3 Aanpak van de studie

Bij aanvang van dit project is de studie opgedeeld in twee fasen:

- I. In de eerste fase is er een 'business as usual-studie' gedaan om een antwoord te vinden op vragen van beheerders: Is er een evenwichtsligging van het Kennemerstrand en zo ja waar ligt deze, wanneer wordt deze bereikt en wat zijn de bijbehorende baggerhoeveelheden?

II. In de tweede fase wordt bekeken wat de kwaliteit en betrouwbaarheid is van de in Fase I verkregen antwoorden. Het gaat nu om het antwoord op de vraag of het Delft3D-RAM model geschikt is voor deze case, en zo ja wat de bandbreedtes rond de voorspellingen zijn en hoe kunnen deze eventueel worden verkleind. Dit kan worden gezien als het 'kwantificeren van de voorspelkracht van het model'.

Een 'business as usual-studie' omvat het opzetten en kalibreren van het numerieke model om daarmee de gewenste voorspelling te kunnen maken. Echter, het bleek dat met het gekalibreerde model de gemeten morfologische veranderingen niet goed genoeg werden gesimuleerd. Bovendien, werd het model na verloop van tijd 'instabiel' wat betekent dat de uitkomsten niet meer betrouwbaar zijn.

Daarom is in deze tweede fase van de studie verder gegaan met het kalibreren cq. afregelen van het model. Een voordeel is dat er nu meer data beschikbaar is dan toen de studie begon zodat de kalibratie op een meer kwantitatieve en daardoor meer objectieve wijze kan gebeuren. In het rapport van Fase I is een plan van aanpak voor deze tweede fase opgenomen.

## **I.4 Totstandkoming van dit rapport**

In de studie waarvan de resultaten in dit rapport zijn opgeschreven vormde het overleg tussen de opdrachtgever RIKZ en de uitvoerende WL | Delft Hydraulics een belangrijk onderdeel. De inrichting van de tweede fase van het project was ook een van de uitkomsten van de eerste fase.

Door allerlei omstandigheden is er zowel aan de uitvoerende als begeleidende kant met wisselende bezetting gewerkt. Voor WL|Delft Hydraulics is de eerste fase grotendeels uitgevoerd door Gerben Ruessink en Claire Jeuken met ondersteuning van Theo van der Kaaij, Dano Roelvink en Rinze Bruinsma. Gerben Ruessink was de projectleider. Per 1 december heeft Ilka Tanczos het projectleiderschap van hem overgenomen. Zij heeft ook de afronding van het rapport van de eerste fase gedaan. De tweede fase is voornamelijk door Ilka Tanczos getrokken met ondersteuning van Maarten van Ormondt, Dano Roelvink en Rinze Bruinsma.

De begeleiding vanuit RIKZ was in eerste instantie in handen van Hanneke de Keijer, Arno de Kruif en Daan Dunsbergen. Bij aanvang van het project heeft Jan Mulder Daan Dunsbergen tijdelijke vervangen. Per 1 november 2002 is Hanneke de Keijer weggegaan bij RIKZ en is Arno het eerste aanspreekpunt geworden.

De externe kwaliteitswaarborging was in het begin in handen van Rob Steijn van Alkyon maar deze rol is later overgenomen door Henk Steetzel van Alkyon.

Het project heeft een totale doorlooptijd gehad van 9 maanden wat lang is voor een project van deze omvang (ongeveer 11 mensweken). Dit is veroorzaakt door problemen met het model, vertragingen bij het opleveren van data, vertragingen door de personeelswisselingen en door het intensieve overleg. Deze lange doorlooptijd in combinatie met de wisselende personele bezetting heeft ervoor gezorgd dat de scope van de studie niet altijd even goed is vastgehouden.

## **I.5 Leeswijzer**

Zoals boven genoemd is de studie in twee fasen opgedeeld. Van de eerste fase is een rapport geschreven waarin de model opzet en de kalibratie van de waterbeweging uitgebreid worden beschreven. Hier naar zal in dit rapport veelvuldig worden verwezen. In Appendix B zijn de meest relevante delen van dit rapport weergegeven.

In hoofdstuk 2 wordt allereerst wat nader ingegaan op de begrippen 'voorspelkracht' en 'bandbreedte' waarna in hoofdstuk 3 de casus bij IJmuiden en het Delft3D-RAM model kort wordt beschreven. Hoofdstuk 4 gaat over de kalibratie en gevoeligheidsanalyse van het VOP IJmuiden-model. Hierin worden de uitkomsten van de eerste fase van deze studie ook meegenomen. De evenwichtstligging met bijbehorende bandbreedte wordt besproken in hoofdstuk 5 waarna in hoofdstuk 6 de generieke lessen die volgen uit deze studie betreffende de 'voorspelkracht' van Delft3D-RAM. In hoofdstuk 7 wordt alles nog een samengevat en vooruit gekeken.

## 2 Voorspelkracht, onzekerheden en bandbreedtes

### 2.1 Inleiding

De begrippen 'voorspelkracht', 'bandbreedte', 'onzekerheid', etc. betekenen niet voor iedereen hetzelfde. In dit hoofdstuk zullen de begrippen zoals ze worden gebruikt in dit rapport nader worden toegelicht. Er zal ook nader worden ingegaan op de rol van de kalibratie van een mathematisch model.

### 2.2 Begrippen

#### 2.2.1 Algemeen

Om de gebruikte begrippen te introduceren volgt hier eerst een voorbeeld:

*De dichtheid of het soortelijke gewicht van een materiaal kan worden bepaald door het gewicht van een bepaald volume van dit materiaal te meten. Door dit een aantal malen te herhalen kan de nauwkeurigheid van de meting worden bepaald. Per keer zal de uitkomst iets verschillen door bijvoorbeeld, de beperkte meetnauwkeurigheid van de weegschaal of afleesfouten. Dit zijn in principe toevallige fouten, soms zal je wat meer dan het gemiddelde meten en soms wat minder. Daarnaast heb je ook nog te maken met mogelijke systematische afwijkingen bij de bepaling van een gewicht. Deze kunnen worden verkleind door de weegschaal te ijken. De uiteindelijke kwaliteit van de meting wordt bepaald door de grootte van de toevallige en systematische fouten. De toevallige fouten alleen bepalen de bandbreedte of onzekerheid in een meting.*

De uitkomsten van een op processen gebaseerd, complex morfologisch model, zoals Delft3D-MOR, zijn natuurlijk niet hetzelfde als metingen. Toch zou men, analoog aan bovenstaand voorbeeld, kunnen spreken van systematische en willekeurige fouten. Het niet meenemen van alle processen en de gebruikte numerieke methoden, bijvoorbeeld, kunnen een bron zijn van systematische 'fouten' of afwijkingen. Toevallige fouten of onzekerheden kunnen worden veroorzaakt door onzekerheden in de invoerparameters. Samen bepalen zij de kwaliteit van de resultaten of de voorspelkracht van het model.

De grootte van systematische afwijkingen en onzekerheden in de uitkomsten zijn niet zo eenvoudig vast te stellen als bij het bepalen van een dichtheid omdat:

1. In een model bewust en onbewust een aantal aspecten wordt weggelaten omdat het proces niet voldoende wordt begrepen, de 'rekenkracht' niet voldoende is, het proces niet op de juiste manier wordt berekend etc.,
2. Zelfs al zouden alle processen op de juiste wijze in het model zitten dan is het nog heel moeilijk om op basis van de onzekerheden in de invoerparameters de onzekerheden in

de modeluitkomsten vast te stellen omdat de relatie tussen de invoerparameters en de uitkomst niet eenduidig is, en

3. Het aantal parameters dat gevarieerd kan worden is groot. Samen met de rekentijd per berekening zorgt dit ervoor dat het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse tijdrovend, zonet is.
4. In de volgende paragrafen wordt besproken hoe, ondanks bovengenoemde problemen, toch een uitspraak kan worden gedaan over de voorspelkracht van het model.

## **2.2.2 Systematische afwijkingen**

Morfologische modellen zijn een versimpelde weergave van de werkelijkheid. Het gaat erom dat de belangrijkste aspecten van een systeem goed worden weergegeven. Vaak wordt bewust een aantal zaken weggelaten waarmee bij de interpretatie van de uitkomsten dan ook rekening wordt gehouden. In het onderhavige project is, bijvoorbeeld, bekend dat de dwarssnelheden niet adequaat worden weergegeven omdat er is gekozen voor een 2DH-aanpak (zie rapport Fase I).

Niet alle tekortkomingen van een model kunnen van te voren worden ingeschat. Daarom is men voor een inschatting van de grootte van systematische afwijkingen aangewezen op een vergelijking met metingen en waarnemingen. Hierbij wordt dan vaak duidelijk dat systematische afwijkingen niet altijd goed zijn te kwantificeren. De snelheid waarmee het Kennemerstrand uitbouwt kan, bijvoorbeeld, redelijk worden gekwantificeerd terwijl de vorm van de kustlijn sterk afwijkt van de werkelijke vorm of, het ontstaan van een geul wordt goed voorspeld maar de locatie ervan komt niet overeen met de werkelijke locatie. Dit zorgt ervoor dat de 'waardering' van systematische afwijkingen vaak kwalitatief van aard zal zijn.

### **Oorzaken van systematische afwijkingen**

Er moet onderscheid worden gemaakt tussen de afwijkingen veroorzaakt door:

- 1) de rekenmodule, Delft3D-FLOW, WAVE, TRAN en RAM in dit project, en
- 2) de gebruikte roosters en randvoorwaarden.

De eerste oorzaken zijn meer generiek van aard terwijl het tweede vooral afhangt van de specifieke toepassing.

Een generieke bron van een systematische onzekerheid is het gebruik van een uniforme bodemruwheid en dezelfde transportformulering voor het gehele gebied terwijl die feitelijk plaatsafhankelijk zouden moeten zijn. In Fase I is geconcludeerd dat voor de casus IJmuiden de transportformulering van Bijker het meest geschikt is terwijl de formulering van Soulsby-van Rijn betere resultaten geeft op dieper water.

Een meer casus specifieke bron vormen de gebruikte randvoorwaarden die afhankelijk zijn van de beschikbare data. Ook de gekozen tijdstappen en roosterafmetingen hebben invloed op de uitkomsten.

Om deze en andere parameterinstellingen zo optimaal mogelijk te kiezen wordt een model gekalibreerd.

## Rol van de kalibratie

Een berekening met een morfologisch model wordt altijd voorafgegaan door een kalibratie. Een aantal invoerparameters van het model, bijvoorbeeld de bodemruwheid, wordt dan zo afgesteld dat de uitkomsten het beste overeenkomen met metingen. De waarden van deze parameters blijven na de kalibratie ongewijzigd en spelen daarna geen rol meer in de vaststelling van de onzekerheid van de uitkomsten. (Men gaat immers ook niet de ijking van een weegschaal veranderen om de onzekerheidsmarge vast te stellen.)

Een probleem bij de vergelijking tussen metingen en berekeningen is het vaak 'kwalitatieve' karakter van de systematische afwijkingen, zoals erosie of sedimentatie die volgens het model op de verkeerde plaats optreedt. Hier moet rekening mee worden gehouden bij het kwantificeren van de prestaties van het model.

### 2.2.3 Toevallige fouten of onzekerheden en bandbreedtes

Bij het vergelijken van modeluitkomsten met gemeten waarden (de 'waarheid') speelt de onzekerheidsmarge of bandbreedte op de uitkomsten ook een rol. Hoe dicht moet een berekende waarde bij de gemeten waarde liggen om de kwalificatie 'goed' te krijgen<sup>1</sup>? Hoe goed kan het model überhaupt presteren gegeven de onzekerheden in de invoerparameters? Zoals boven genoemd is het vaststellen van de marges behorende bij de uitkomsten niet triviaal.

Een veel gebruikte methode om toch een beeld te krijgen van de onzekerheden, is het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse. Echter, zoals al eerder genoemd is dit een tijdrovende methode zeker als het gaat om grote modellen met veel rekentijd. Dit maakt dat slechts voor een beperkt aantal parameters een dergelijke analyse kan worden gedaan. Dit maakt het moeilijk om voldoende informatie te krijgen voor een betrouwbare inschatting van de onzekerheidsmarges. Vaak biedt 'expert-judgement' hier uitkomst. Het is verder ook niet zo dat de uiteindelijke totale onzekerheid per definitie gelijk is aan de som van de afzonderlijke onzekerheden. Ook hier speelt expert-judgement een belangrijke rol.

### Oorzaken van toevallige fouten

Toevallige fouten worden veroorzaakt door de onzekerheidsmarges in niet stochastische parameters die zijn verkregen uit metingen. Dit geldt bijvoorbeeld voor de bodem en eigenschappen van het sediment. Daarnaast zijn er ook gaat stochastische invoervariabelen zoals de golven waar het uitmaakt of je voor een gemiddeld of meer extreem klimaat kiest als invoer.

---

<sup>1</sup> Hierbij moeten overigens ook de onzekerheden in metingen zelf worden meegenomen.

### **Intermezzo: Bronnen van onzekerheden**

In de eerste Fase van dit project is gesteld dat er een onderscheid gemaakt kan worden tussen onzekerheden die voortkomen uit 1) onzekerheden in modelparameters, 2) het stochastische karakter van de forcering, zoals golfaanval, en 3) onbekendheid met fysische processen. De eerste bron kan zowel systematische als toevallige fouten veroorzaken. Een aantal modelparameters wordt ingesteld tijdens de kalibratie. Een typisch voorbeeld hiervan is de bodemruwheid. De derde bron, onbekendheid met de fysische processen veroorzaakt systematische afwijkingen, zoals besproken in paragraaf 2.2.2.

## **2.3 'Voorspelkracht'**

De grootte van systematische afwijking van het gekalibreerde model en de onzekerheidsmarge om de modeluitkomsten bepalen samen de uiteindelijke kwaliteit van de modeluitkomsten en daarmee de voorspelkracht. Hierbij is de grootste van de twee bepalend; de uitkomsten kunnen niet nauwkeuriger worden dan dat.

Het is goed om te bedenken dat het interpreteren en verwerken van systematische afwijkingen relatief eenvoudig is, immers, als je weet dat een weegschaal altijd 1 kilo te weinig aangeeft dan kun je daar voor corrigeren, terwijl een onzekerheidsmarge van 1 kilo betekent dat je er dus 1 kilo naast kan zitten! De mate waarin de voorspelkracht kwantificeerbaar is hangt dus af van de mate waarin de systematische afwijkingen inzichtelijk zijn te maken.

## **2.4 Samenvatting**

De voorspelkracht of kwaliteit van een op processen gebaseerd morfologisch model wordt bepaald door 1) de grootte van de systematische afwijkingen t.o.v. metingen of waarnemingen en 2) de grootte van toevallige fouten of onzekerheidsmarges. Voor de interpretaties van de modeluitkomsten moet de bron van systematische afwijkingen goed worden begrepen. Daarnaast wordt getracht de afwijking d.m.v. een kalibratieprocedure zo klein mogelijk te maken. Hierbij worden bepaalde parameters op een vaste waarde gesteld (welke in de rest van de studie niet meer veranderd).

Toevallige fouten of onzekerheden worden veroorzaakt door onzekerheden in de invoerparameters en het stochastische karakter van de forcering. De grootte hiervan kan worden afgeschat d.m.v. een gevoeligheidsanalyse en waar nodig met 'expert-judgement'. Deze kan alleen worden verkleind door de onzekerheden in de invoer te verkleinen.

De kwaliteit van een voorspelling wordt bepaald door de combinatie van systematische en toevallige fouten. In hoofdstuk 3 en 4 zullen de parameters die een rol spelen bij de kalibratie en bij de onzekerheidsmarge in de uitkomst van het VOP-IJmuiden-model nader worden besproken.

## 3 De casus IJmuiden en Delft3D-RAM

### 3.1 Het Kennemerstrand

In de jaren zestig van de twintigste eeuw zijn de havendammen van IJmuiden verlengd. Dit heeft tot op de dag van vandaag gevolgen voor de morfologische ontwikkeling van het gebied rond de dammen. Het Kennemerstrand ten zuiden van de dammen is enkele honderden meters zeewaarts uitgebreid en aan het einde van de zuidelijke dam is een ontgrondingskuil ontstaan. Voor de (buitendijkse) ontwikkelingen op het strand, zoals de aangelegde Marina maar ook voor het onderhouden van de IJgeul is het belangrijk om te weten hoe de toekomst eruit ziet voor dit gebied.

De zeewaartse uitbouw van het Kennemerstrand zal niet blijven voortduren omdat de dammen niet oneindig lang zijn. De hypothese is dat er een situatie ontstaat waarbij het sediment dat tot dan aan weerszijden van de havenhoofden opgevangen werd, de havenhoofden voorbij gaat en deels in de IJgeul en Buitenhaven terecht komt. Door het ontstaan van meer 'sand-by-passing' zal het aanzandingspatroon in de geul wijzigen waardoor er mogelijk meer gebaggerd moet worden (De Kruif en Keijer, 2003). De kustlijn is dan min of meer stabiel en heeft de zogenaamde 'evenwichtsligging' bereikt.

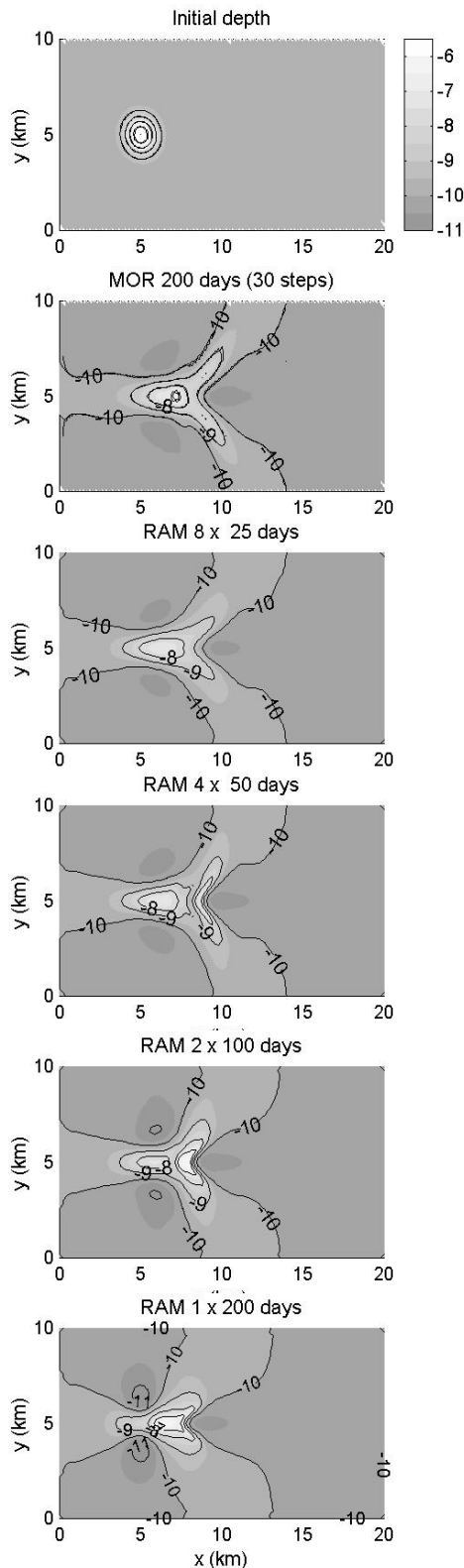
Er zijn in dit gebied uitgebreide bodemmetingen gedaan zodat de erosie en sedimentatie patronen goed bekend zijn. Ook de ontwikkeling van de strandprofielen is bekend.

### 3.2 Delft3D-RAM

#### 3.2.1 Inleiding

De Delft3D-module 'Rapid Assessment of Morphology' (RAM) maakt het mogelijk om een beeld te krijgen van de morfologische ontwikkeling van een gebied zonder een volledige complexe morfologische berekening. Dit wordt bereikt door het effect van kleine veranderingen in de bodemligging op het sedimenttransport te benaderen met een eenvoudige vergelijking i.p.v. volledig uit te rekenen.

In de Delft3D-RAM module zitten verder speciale opties om 1) de ontwikkelingen in de surfzone en het droge strand te bepalen, (de Uniforme Strand Benadering, USB), 2) het effect van het Nederlandse kustbeleid van 'dynamisch handhaven' mee te nemen, (de suppletie-optie), en 3) een vaargeul of haven op diepte te houden, (de bagger-optie). Daarnaast is het mogelijk om gebruik te maken van een 'smoothing-routine'. Hieronder wordt de werking van de Delft3D-RAM module en deze opties kort beschreven. Meer informatie over RAM kan worden gevonden in Roelvink et al. (2001).



Figuur 3-1 Het effect van verschillende tijdstappen in delft3D-RAM (Roelvink et al, 2001)

### 3.2.2 De hoofdmodule

In een 'standaard' morfologische berekening met Delft3D-MOR worden alle belangrijke processen voor de water- en sedimentbeweging uitgerekend. Vanwege de 'rekeninspanning' die daarvoor nodig is kan men op deze manier 'slechts' een aantal jaren doorrekenen. Voor berekeningen op langere termijn zijn semi-empirische gedragsgeoriënteerde modellen nodig. Delft3D-RAM geeft de mogelijkheid om, met een op processen gebaseerd model toch een langere termijn berekening te doen.

Een fundamentele aanname in RAM is dat kleine veranderingen in de bodemligging geen significante invloed hebben op de stromings- en golfpatronen. Onder deze aanname is het lokale getijde gemiddelde transport een functie van de lokale waterbeweging (snelheid) en de waterdiepte. Omdat de eerste constant is op de tijdschalen die van belang zijn voor morfologische veranderingen, betekent dit dat het transport alleen afhankelijk is van de waterdiepte.

In de meeste benaderingen is de sedimenttransport afhankelijk van de stroomsnelheid tot een zekere macht. Omdat de stroomsnelheid bepaald wordt door het debiet  $q$  en de diepte geldt dat het sedimenttransport  $S$  gelijk is:

$$|S| = A(x, y)h^{-b(x, y)}$$

Als we aannemen dat de macht  $b$  constant is voor het hele gebied dan kan het sedimenttransport worden berekend aan de hand van het initiële transport en de waterdiepte  $h$ . De resulterende veranderingen in de bodem volgen dan uit de sedimentbalans.

Omdat de aldus berekende transporten bij zeer kleine waterdieptes tot zeer grote waarden leidt is het voor de stabiliteit van de berekening gewenst deze transporten op een eenvoudige manier tot nul terug te brengen op de plaats waar het bodemprofiel boven water uitkomt. Hiervoor wordt de transportcurve 'ergens hoog in het profiel' afgebogen en boven een bepaalde diepte abrupt tot nul gereduceerd. Met een parameter  $h_{minc}$  kan worden aangegeven op welke diepte dit gebeurt. De wijze waarop deze afbuiging gebeurt is zodanig dat bij grotere waterdieptes de transporten gelijk zijn aan de niet-afgebogen curve. Als de afbuiging pas relatief hoog in de curve gebeurt dan zijn de transporten net voordat het punt droog valt nog vrij groot. Hierdoor kan er nog een relatief grote hoeveelheid zand op de plaat worden gedeponeerd waardoor deze kan uitgroeien tot boven NAP.

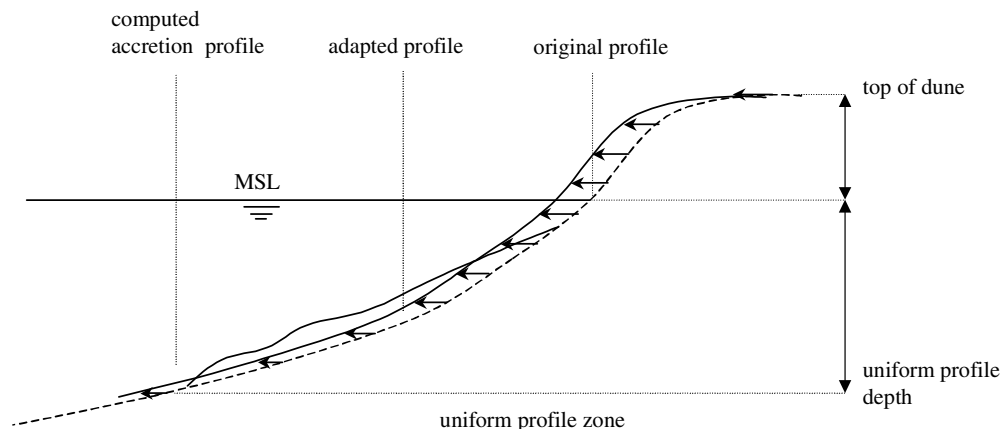
Een uitgebreidere beschrijving met voorbeelden staat in Steijn et al. (2001).

Met bovenstaande benadering van het sedimenttransport kunnen de morfologische veranderingen in een gebied snel worden berekend. Echter, op een bepaald moment worden deze zo groot dat de invloed op de waterbeweging niet meer kan worden verwaarloosd waardoor deze opnieuw moet worden berekend met Delft3d-MOR. Deze 'terugkoppelingstijdstap' wordt door de gebruiker opgegeven en is een belangrijke variabele voor het uiteindelijke resultaat. Een typische terugkoppelingstijdstap is een aantal maanden tot een jaar.

Figuur 3-1 illustreert de werking van RAM en de invloed van de terugkoppelingstijdstap op de uitkomst van een theoretisch geval.

### 3.2.3 De uniforme strandbenadering (USB)

Delft3D-MOR berekent sedimenttransporten en morfologische veranderingen in gebieden die onder water komen gedurende een getij. Hoger gelegen gedeelten van het strand zullen niet veranderen omdat zandtransport door de wind geen onderdeel is van de berekening. Daar komt bij dat in het ondiepe gedeelte de berekende transporten niet voldoende robuust zijn. Om toch de ontwikkeling van een strandprofiel te kunnen simuleren wordt gebruik gemaakt van de Uniforme StrandBenadering (USB). Deze methode is geïllustreerd in figuur 3-2.



Figuur 3-2 De Uniforme Strandbenadering

De USB maakt gebruik van het principe van een evenwichtsprofiel met een constante vorm. In de zogenaamde Uniforme Profielzone<sup>2</sup> wordt het zand dat daar sedimenteert zodanig over het profiel verdeeld dat het gehele profiel naar voren komt. Deze zone wordt gedefinieerd door een 'referentie diepte' en een 'actieve profiel hoogte'. Deze laatste hoeft niet overeen te komen met het niveau van de daadwerkelijke duintop.

Binnen Delft3D-RAM wordt de USB toegepast in een door de gebruiker te definiëren gebied.

<sup>2</sup> In het rapport van de eerste fase van dit project wordt gesproken over de 'actieve profiel hoogte'. Omdat de term Uniforme Profielzone duidelijker is zal er in dit rapport steeds over UniForme Profielzone worden gesproken.

### 3.2.4 Bagger- en suppletie-opties

In het model kunnen gebieden worden aangegeven waar de diepte niet minder mag worden dan een door de gebruiker opgegeven waarde. Het materiaal wat daarvoor moet worden weggebaggerd wordt op een aangegeven plek 'gestort'. Deze locatie mag buiten het modelgebied liggen. Op deze manier kan de vaargeul tussen de havendammen en de IJgeul tot 1986 op een diepte van 16,5 m gehouden, daarna op 19,5 m.

In geval van erosie van de kustlijn wordt in het huidige model de kust 'gesuppleerd'. Dit betekent dat bij erosie er een hoeveelheid zand wordt toegevoegd. Binnen Delft3D-RAM wordt gesuppleerd in het zelfde gebied als waar de USB wordt toegepast.

### 3.2.5 De 'smoothing-routine'

Voor het toepassen van grotere tijdstappen kan het nodig zijn om te snelle morfologische veranderingen enigszins te 'temperen'. Bij een volledige Delft3D-MOR berekening is er een meer directe terugkoppeling tussen waterbeweging en veranderingen van de bodem waardoor dit 'temperen' vanzelf gebeurt. In Delft3D-RAM is deze directe terugkoppeling er niet en daarom wordt gebruik gemaakt van een additionele 'smoothing-routine'.

In de smoothing-routine wordt een correctie toegepast op de veranderingen in de bodem welke afhangt van een op te geven 'smoothing factor' (SF) en de gradiënt in de snelheid van de veranderingen van de bodem. De SF heeft de dimensie  $m^2$  en is gerelateerd aan de grootte van het gebied waarover het sediment wordt 'herverdeeld'. Het aantal malen per tijdstap waarop dit gebeurt kan worden opgegeven. Dus de mate waarmee de smoothing routine de morfologische veranderingen 'glad strijkt' wordt bepaald door de smoothing-factor en het aantal malen dat dit per tijdstap gebeurt. Beide parameters kunnen door de gebruiker worden opgegeven. In Appendix A is een meer uitgebreide (engels talige) beschrijving van de smoothing routine opgenomen uit Visser (2003).

### 3.2.6 Kwaliteit Delft3D-RAM resultaten

Men moet zich goed realiseren dat Delft3D-RAM een *benadering* is van Delft3D-MOR. Dit betekent dat het 'best haalbare' resultaat van een berekening met Delft3D-RAM gelijk is aan het resultaat van een Delft3D-MOR berekening.

Bij een morfologisch model kan onderscheid worden gemaakt tussen het modelleren van 1) de waterbeweging en 2) de sedimenttransporten die bepalend zijn voor de morfologie.

Voor Delft3D geldt dat de waterbeweging in het algemeen redelijk tot goed wordt weergegeven. In Roelvink et al (2001) worden de berekende en gemeten restromen bij Noordwijk vergeleken. Hieruit blijkt data deze binnen een marge van 0,01 m/s met elkaar overeenkomen. De grootste onzekerheid komt voort uit de opgegeven randvoorwaarden.

De berekende zandtransporten zijn omgeven door veel grotere onzekerheden dan dat bij de waterbeweging het geval is. Dit komt door de grote verscheidenheid in transportformules, de machten die daarin voorkomen en hun beperkte toepassingsgebieden. Bovendien wordt voor de berekening van de kustlijn in Delft3D-RAM gebruik gemaakt van de USB met bijbehorende parameters en onzekerheden.

Uit eerdere studies, zie rapport Fase I, zijn een aantal parameters naar voren gekomen die de uitkomsten van Delft3D-RAM beïnvloeden:

- De transportformulering,
- De terugkoppelingstijdstap,
- De gridgrootte in combinatie met het toepassen van de Large Eddy Simulation,
- De golven, en
- De valsnelheid van het sediment.

In Jeuken et al. (2000) is vastgesteld dat het gebruik van een terugkoppelingstijdstap van 6 maanden en de transportformulering van Bijker het beste resultaat geeft. Liek (2000) heeft berekeningen gedaan met een fijn en grof grid en met en zonder Large Horizontal Eddy Simulation (HLES). Hieruit bleek dat een fijner grid met HLES betere resultaten geeft dan het groffere grid zonder HLES. Echter, door de toename van de rekentijd is dit voor langere termijn berekeningen geen reële optie. Een belangrijke uitkomst van de studie van Steijn et al (2002) voor de uitbreiding van de Maasvlakte was de gevoeligheid voor de valsnelheid van het sediment. Een variatie van 10% bleek te leiden tot een verandering van een factor 2 in de berekende (netto) transporten.

De eerste drie parameters van bovenstaand lijstje dragen bij aan de systematische fouten en waarvan de waarde in de kalibratieprocedure wordt vastgesteld. De valsnelheid van het sediment en het golfklimaat dragen bij aan de toevallige fout in de modeluitkomsten. Uit Fase 1 van deze huidige studie kwam ook nog naar voren dat bij gebruik van de USB ook de hoogte van de uniforme profielzone een belangrijke bron is van onzekerheid.

Om een beeld te krijgen van de kwaliteit van de uitkomsten wordt het model eerst gekalibreerd en moet er een gevoeligheidsanalyse worden gedaan. Dit wordt besproken in hoofdstuk 4.

## **4 Kalibratie en gevoeligheidsanalyse van het VOP-IJmuiden model**

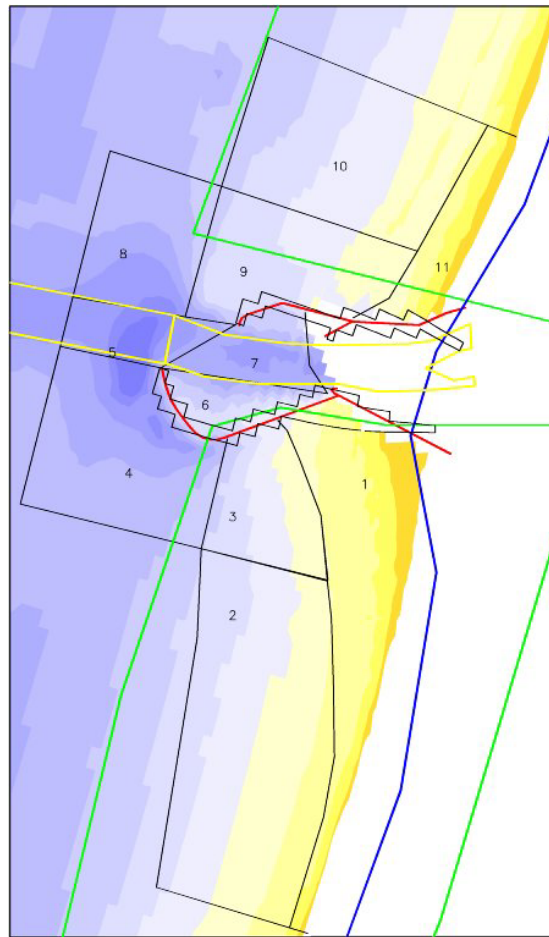
### **4.1 Inleiding**

In dit hoofdstuk worden eerst kort de resultaten van de in Fase I uitgevoerde kalibratie en gevoeligheidsanalyse samengevat. De bevindingen vormen de basis voor het vervolg waarin wordt geprobeerd om de kwaliteit van de uitkomsten te verbeteren door de systematische fouten te verkleinen. Voor een meer uitgebreidere beschrijving van Fase I wordt verwezen naar het rapport van Fase I.

#### **4.1.1 Samenvatting Fase I**

In figuur 4-1 is het interessegebied weergegeven met daarin de gebieden aangegeven waarin de 1) de USB word toegepast, 2) waarin wordt gebaggerd, 3) waarin wordt gesuppleerd en 4) waar eventueel de 'smoothing-routine' wordt toegepast. Daarnaast staan er ook een aantal vakken ingetekend waarin actieve dieptemetingen zijn gedaan in de afgelopen jaren.

In de figuur is ook aangegeven hoe de gebogen vormen van de havendammen zijn weergegeven door middel van 'schotten' of 'thin dams' langs de roosterlijnen in het model. Binnen deze schotten wordt geen stroming maar alleen de variatie in de waterstand berekend door het model. Er worden dus wel golfkrachten berekend wat kan betekenen dat er ook transporten zijn en dus bodemveranderingen. De RAM-module 'ziet' deze schotten niet waardoor het mogelijk is dat er ook bodemveranderingen kunnen optreden in dat gebied door, bijvoorbeeld het gebruik van de USB of de smoothing-routine.



Figuur 4-1 Model situatie rond de dammen. De groene lijnen geven het gebied aan waarin de USB wordt toegepast. De USB is van toepassing in het groen omlijnde gebied. De gele lijnen geven aan waar in het model de baggeroptie wordt toegepast. De 'smoothing-routine' indien gebruikt worden toegepast op het gehele gebied. De zwart omlijnde vakken met nummers erin geven de gebieden aan waarin de volumeveranderingen zijn gemeten.

Het gebruikte getij, golfcondities en afvoeren staan uitgebreid beschreven in het rapport van de eerste fase van dit project en samengevat in bijlage B.

De morfologische kalibratie is gedaan aan de hand van twee zogenaamde 'Coastal State Indicators' (CSI's): de ligging van de NAP 0m lijn en de baggerhoeveelheden in het gebied tussen de havendammen en de IJgeul. Daarnaast is er gekeken of het 'algemene beeld' van de morfodynamiek realistisch was. De ontwikkeling van de erosiekuil ten zuidwesten van de havendammen vormde hierbij een belangrijk onderdeel. Voor de kalibratie van het model is gekeken naar de periode 1968-1986. De periode 1986-1994 is ter verificatie van de resultaten gebruikt.

De tweede van de bovengenoemde CSI's heeft als nadeel dat de beschikbare gegevens over de baggerhoeveelheden niet plaatsspecifiek zijn en dat niet bekend is hoe groot de zandfractie is. Hierdoor is het alleen mogelijk om een vergelijking te maken van ordes van grootte.

De volgende 'parameters' zijn gevarieerd voor de kalibratie:

1. De transportformulering: Bijker of Soulsby-vanRijn,
2. De uniforme-profielzone d.m.v. de duintophoogte, en
3. De korrelgrootte

## 4.1.2 Resultaten Fase I

De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

1. De door het model berekende waterstanden en stroomsnelheden komen redelijk tot goed overeen met gemeten waarden. De amplitude van de belangrijkste getijcomponent is binnen 5% van de metingen in het horizontale getij en binnen 10% van de metingen in het verticale getij.
2. Het model geeft de waargenomen veranderingen kwalitatief redelijk goed weer, het Kennemerstrand bouwt uit, er sedimenteert zand ten noorden van de dam, de baggerhoeveelheden nemen toe etc. Zie hiervoor ook appendix C waarin een plaatje uit het rapport van Fase I is opgenomen met de berekende erosie-sedimentatiepatronen. Echter, in meer detail bekeken wordt geen enkele van deze aspecten echt goed berekend. De vorm van het strand komt niet met de werkelijke vorm, de sedimentatie gebeurt te ver naar het westen en de erosiekuil verschuift niet in de juiste richting.
3. Met het model is het niet mogelijk om de ontwikkeling van de erosiekuil, de baggerhoeveelheden en de stranduitbouw tegelijkertijd juist te simuleren. Hierbij moet worden opgemerkt dat er alleen met een constante 'uniformprofiel' van het strand is gerekend (zie onder punt 6). In de rest van het project gaat het vooral om de ligging van de NAP 0 lijn van het Kennemerstrand.
4. De transportformulering van Soulsby-vanRijn (SvR) geeft betere resultaten voor de ontwikkeling van de erosiekuil terwijl die van Bijker de uitbouw van het strand beter weergeeft. Daarnaast is de sedimentatiesnelheid ten noordwesten van de dammen bij SvR zo groot dat er binnen korte tijd sprake is van een eiland voor de kust. Er is daarom voor gekozen om verder te gaan met de transportformulering van Bijker.
5. Er is inzicht verkregen in de gevoeligheid van de uitkomsten voor variaties in de korrelgrootte en de uniforme-profielzone; als deze groter worden dan is snelheid waarmee het strand naar voren komt lager en vice-versa.

### Korrelgrootte

Er is vastgesteld dat de baggerhoeveelheden in de IJgeul bij het verkleinen van de korrelgrootte van 190 naar 180  $\mu\text{m}$  toenemen van 0,24 naar 0,34  $\text{Mm}^3$  ofwel met 42%. Een toename van de korrelgrootte naar 200  $\mu\text{m}$  betekent een afname naar 0,17  $\text{Mm}^3$  ofwel met 33%.

### Uniforme profielzone

De totale oppervlak van de kust welke naar voren moet komen is gelijk aan de duinhoogte maal de lengte van de kust. Stel dat het actieve profiel 1,5 m hoger of lager is dan betekend dit dat het oppervlak ongeveer 9% groter of kleiner kan worden waardoor stranduitbouw 9% langzamer of sneller zal gaan.

6. Na langere tijd (meer dan 30 jaar) wordt het model instabiel in een gebied ten noorden van de dam. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door de te grote terugkoppelingstijdstap van 1 jaar. Het is mede hierdoor niet gelukt om een evenwichtsligging van de kustlijn te berekenen.
7. De Uniforme Profielzone is een belangrijke parameter voor de snelheid van stranduitbouw. Deze wordt bepaald door de referentiediepte en de duintophoogte. In de eerste fase van deze studie is de laatste ten onrechte als calibratie parameter gebruikt. In de volgende fase zal deze als input parameter worden opgegeven waarbij deze zal variëren per raai; net ten zuiden van de havendammen waar het strand het snelst naar voren komt zal deze kleiner zijn dan verder naar het zuiden.
8. De berekende baggerhoeveelheden lijken niet realistisch, hier moet naar gekeken worden.

Voor het beantwoorden van de vragen van de beheerders en het vaststellen van de onzekerheden in de modeluitkomst is het noodzakelijk dat er een model ligt waarmee over een langere periode de morfodynamiek kan worden berekend. Hiervoor moeten de problemen met het model die naar voren zijn gekomen in Fase 1, worden opgelost. Deze oplossingen en aanpassingen in het model worden besproken in de volgende paragraaf.

## 4.2 Verbetering van het model

De resultaten uit Fase I maar ook die uit eerdere studies geven geen aanleiding voor het aanpassen van de berekening van de waterbeweging. Dit wil niet zeggen dat deze perfect is maar dat, gegeven het doel van de studie en de onzekerheden in de morfologische berekeningen, meer dan voldoende wordt weergegeven

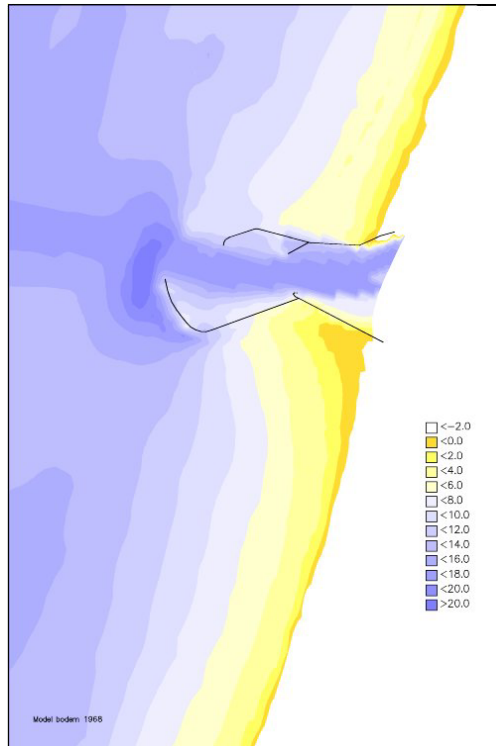
Naar aanleiding van de bevindingen in de eerste Fase is er een aantal aanpassingen gedaan aan het model:

Het bleek dat de baggervolumes niet goed werden berekend door een 'bug' in de Delft3D-RAM module. Deze is er nu uitgehaald.

Een tweede verbetering van het model is het aanpassen van de Uniforme Profielzone door de duinhoogte, op het Kennemerstrand aan te passen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van door RWS gedane profielmetingen zoals vermeld in De Kruif en Keijer (2003). De hoogte van de uniforme profielzone is bepaald door te kijken tot op welke hoogte de profielen veranderen in de tijd. Er wordt aangenomen dat de onzekerheidsmarge gelijk is aan 1,5 meter. Het is waarschijnlijk dat deze hoogte in de loop der tijd zal toenemen. Echter, het wordt aangenomen dat de gekozen marge groter is dan de toename in de tijd. De gebruikte hoogtes per raai staan in tabel 4.1. Samen met de referentie diepte bepalen zij de 'Uniforme Profielzone'. De resulterende beginbodem staat weergegeven in figuur 4.1. De referentiediepte, de diepte waarop de USB begint, is bepaald door de minimale waterdiepte waarop banken voorkomen. Deze is in alle gevallen NAP -6 m.

Tabel 4.1 Bovengrens van de uniforme profielzone voor verschillende raaien op het Kennemerstrand. De onzekerheidsmarge is  $\pm 1,5$ m. De referentiediepte is in alle gevallen NAP -6 m.

| Raai                  | 56.0 | 56.5 | 57.0 | 57.5 | 58.0 | 58.5 | 59.0 | 61.0 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Hoogte (m t.o.v. NAP) | 2    | 3    | 3    | 5    | 8    | 10   | 10   | 18   |



Figuur 4-2 Aangepaste bodem van 1968.

### 4.3 Aanpak

Met het aangepaste model is een aantal sommen worden gemaakt met als doel vast te stellen welke instellingen de systematische afwijkingen van de modelresultaten t.o.v. de metingen zo klein mogelijk te maken. De kalibratie in Fase I is uitgevoerd op basis van de positie van de NAP 0m-lijn op het Kennemerstrand, de baggervolumes tussen de havendammen en de IJgeul en het algemene erosie en sedimentatiepatroon, met de nadruk op de ontwikkeling van de erosiekuil. Zoals al is opgemerkt kon er bij de baggervolumes alleen worden gekeken naar ordes van grootte.

Naast de bovengenoemde parameters wordt er nu ook gekeken naar de volumeveranderingen. De verandering van de positie van de NAP 0 m-lijn wordt immers bepaald door de volume toename in het gebied in combinatie met de uniforme profielzone. Er wordt hierbij gebruik gemaakt van de gemeten volumetoename in het gebied zoals gerapporteerd in De Kruif en Keijer (2003).

Om bovenstaand doel te bereiken wordt getracht de gemeten volumetoeenames en het complete sedimentatie-erosie patroon zo goed mogelijk te simuleren. Daarnaast zal er worden gekeken naar de positie van de NAP 0 m-lijn. Zoals geconcludeerd in Fase I van dit project zal er vooral worden gekeken naar het gebied ten zuiden van de dam. Toch zal de ontwikkeling van het gebied ten noorden van de dam wel in 'de gaten gehouden moeten worden'.

Voor de tweede fase geldt:

- In Fase I is geconcludeerd dat de hydrodynamica redelijk tot goed wordt weergegeven. Er zal geen aanpassing worden gedaan waarbij de waterbeweging opnieuw moet worden gekalibreerd, zoals het aanpassen van de bodemruwheid.
- De initiële bodem van 1968 is voor alle sommen hetzelfde en is getoond in figuur 4.1. Deze is opgebouwd uit de gemeten RWS-bodem aangevuld met metingen van TNO-NITG voor het diepere water. De duintophoogte is aangepast zoals eerder vermeld.
- In de eerste fase is voor de kalibratie de periode 1968-1986 gebruikt. Echter, omdat de instabiliteit pas ontstaat na een periode groter dan dat en in de doelstelling van dit project een tijdshorizon van 25-100 jaar is genoemd zal er worden gerekend van 1968-2000. Er kan dan ook worden gekeken hoe het optreden van de instabiliteit kan worden voorkomen.
- Zoals is besloten in Fase I zal er niet worden doorgerekend tot er een evenwicht is maar zal er een periode van 30 jaar vooruit worden gerekend, te beginnen in het heden.
- Mogelijkheden voor het verbeteren van de modelresultaten zijn het verkleinen van de tijdstap van terugkoppeling en/of het gebruiken van 'smoothing-routine' waardoor de bodemverandering wordt uitgesmeerd over een groter gebied.

Van de volgende berekeningen worden de resultaten getoond:

1. Som met een aangepaste bodem voor de USB, een terugkoppelingstijdstap van 1 jaar en de transportformulering van Bijker.
2. De zelfde som als hierboven is nu uitgevoerd met gebruik van de 'smoothing-routine'. De smoothing-factor (SF) staat op 100 m<sup>2</sup> er wordt 5 maal per tijdstap 'gesmoothed'.
3. In deze run is de terugkoppelingstijdstap tussen RAM en MOR verkleind van 1 jaar tot 4 maanden.
4. Dezelfde run al bij 3 maar nu met een terugkoppelingstijdstap van 6 maanden.

Tabel 4.2 geeft een overzicht van de berekeningen.

Tabel 4.2 Overzicht van de gemaakte sommen.

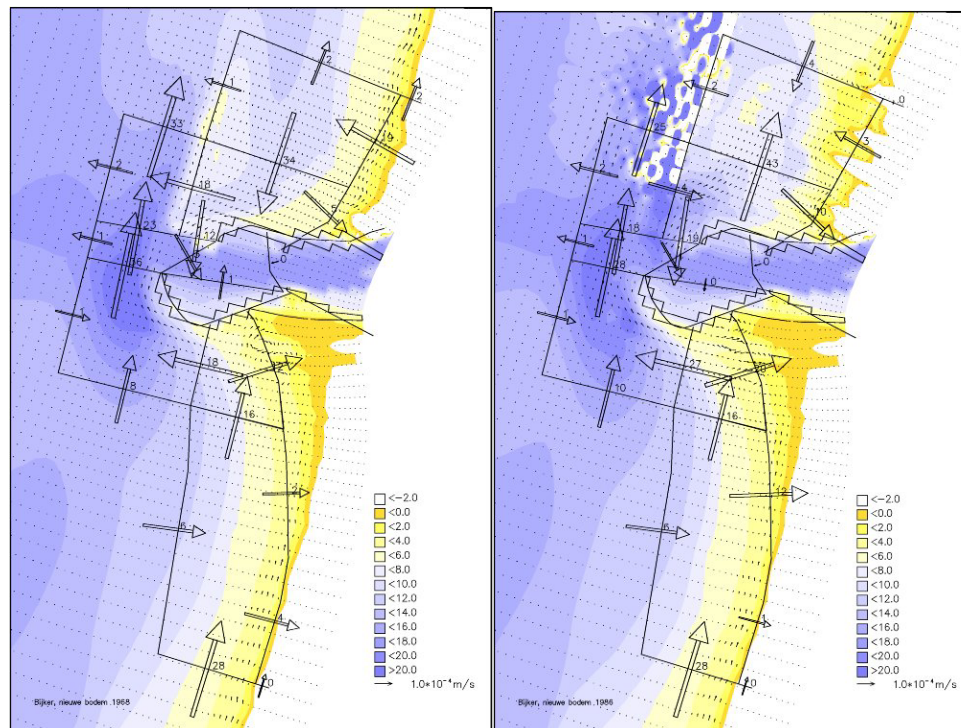
| Naam       | Transportformulering | Terugkoppelings tijdstap | Periode   | Opties        |
|------------|----------------------|--------------------------|-----------|---------------|
| 1 Bijk1    | Bijker               | 1 jaar                   | 1968-2002 |               |
| 2 Bijk 1 s | Bijker               | 1 jaar                   | 1968-2002 | met smoothing |
| 3 Bijk 0.3 | Bijker               | 4 maanden                | 1968-1986 |               |
| 4 Bijk 0.5 | Bijker               | 6 maanden                | 1968-1986 |               |

In de volgende paragrafen staan de resultaten beschreven aan de hand van de sommen, weergegeven in tabel 4.2. Dit zijn niet de enige sommen zijn die zijn gemaakt. De resultaten zoals hier gepresenteerd zijn in zekere zin het resultaat van een 'trial and error' procedure. De sommen die hier worden besproken vormen hiervan een samenvatting en proberen een goed beeld te geven van de bewandelde weg. De resultaten worden besproken aan de hand van de kentallen zoals besproken in 4.2: de berekende bodemveranderingen, de veranderingen in de volumes per in figuur 4.1 aangegeven secties, de ligging van de NAP 0 m-lijn en de baggervolumes.

## 4.4 Resultaten

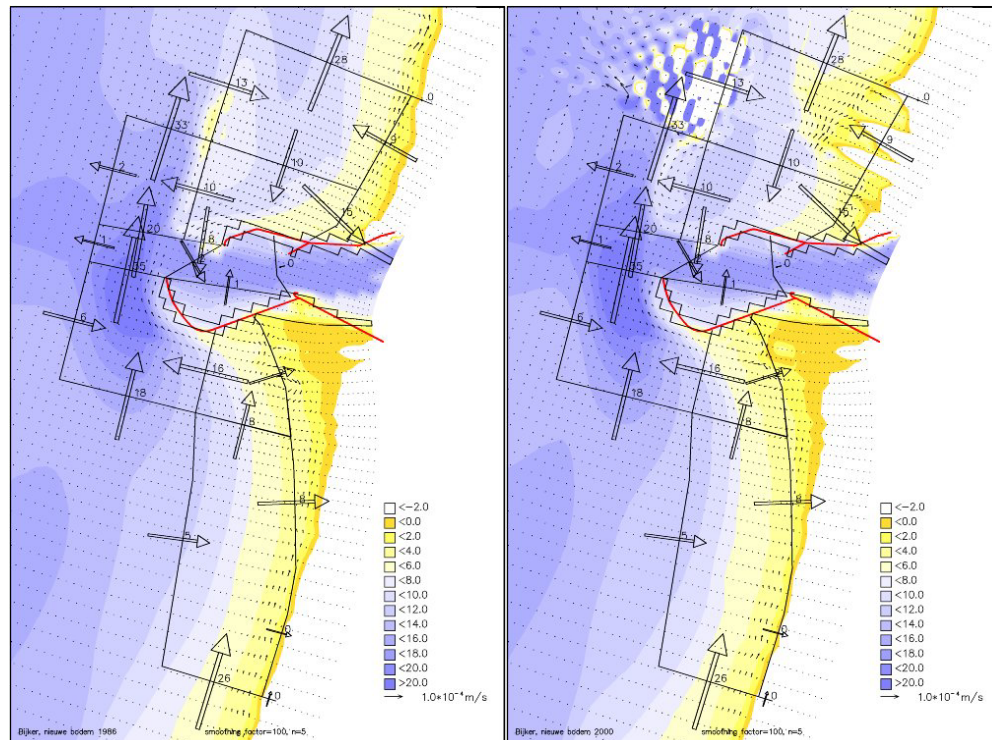
### 4.4.1 Bodemveranderingen

Om een goed beeld te krijgen van de morfologische veranderingen is een filmpje het beste middel. Op de CD met de digitale versie van het eindrapport staat daarom een aantal filmpjes met de resultaten van de runs.



Figuur 4-3 De berekende transporten en bodem in 1986 en 2000 met de transport formulering van Bijker, de aangepaste beginbodem uit 1968 en een terugkoppelingstijdstap van 1 jaar. De grote pijlen geven het netto transport over de desbetreffende lijn aan [ $10^4 \text{ m}^3/\text{jaar}$ ] terwijl de kleine pijltjes een beeld geven van het transportpatroon [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ].

Het beeld dat naar voren komt uit de berekeningen is min of meer hetzelfde en wordt weergegeven door de Figuren 4-3 tot 4-6. Aan de zuidkant komt het strand naar voren en ontstaat er na verloop van tijd een 'zandtong' die tot ongeveer halverwege de zuidelijke havendam reikt. Langs de noordelijke havendam komt er zand het havenbasin binnen.

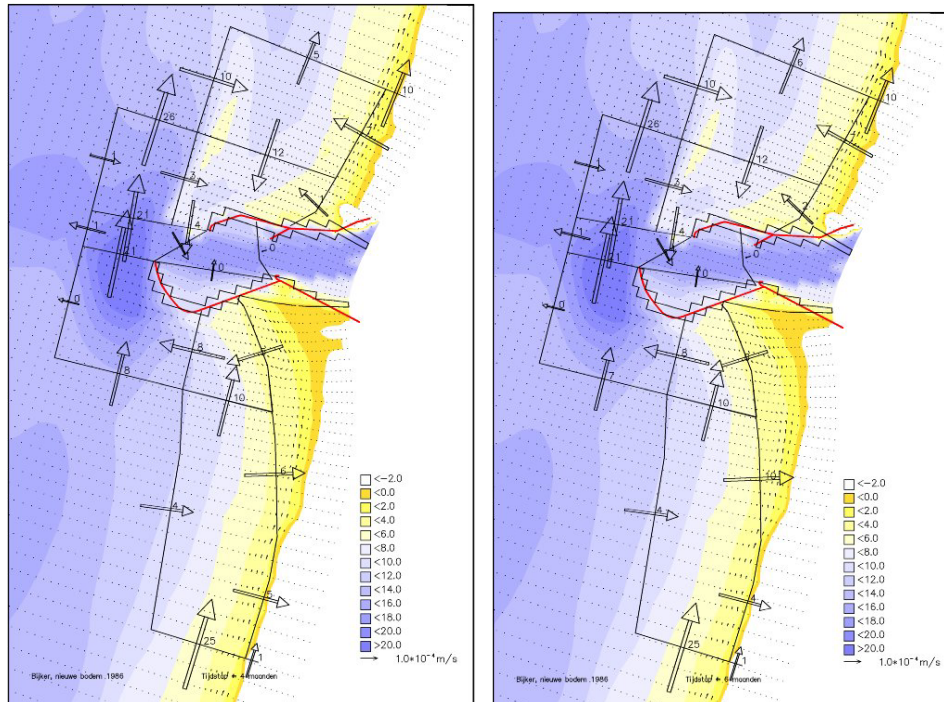


Figuur 4-4 Berekende bodem en transporten in 1986 (links) en 2000 (rechts) met de transportformulering van Bijker, een terugkoppelingstijdstap van een jaar en met gebruik van de smoothing-routine met een  $SF=100$  en  $n=5$ . De grote pijlen geven het netto transport over de desbetreffende lijn aan [ $10^4 \text{ m}^3/\text{jaar}$ ] terwijl de kleine pijltjes een beeld geven van het transportpatroon [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ].

De berekende kustlijn ten zuiden van de dammen vertoont een grillig verloop. Dit wordt enigszins verminderd door het gebruik van de smoothing-routine en nog meer door een kleinere tijdstap zoals duidelijk wordt uit figuur 4-4. Vooral in het gebied het dichtst bij de dammen ontstaan rare vormen die de verdere morfodynamiek beïnvloeden. De oorzaak is niet eenduidig en is waarschijnlijk een combinatie van de neer in de waterbeweging als gevolg van de dam, de vorm van het rekenrooster en de snelle veranderingen die er in dit gebied plaatsvinden. Ook duiden bevindingen van Visser (2003) er op dat verstoringen ook kunnen ontstaan bij een perfect rechte beginkustlijn.

De vorm van de berekende kustlijnen wordt nader besproken in 4.4.3 waar de uitbouw van het Kennemerstrand aan de orde komt.

Ten noordwesten van de dam is een gebied waar zeer snelle sedimentatie optreedt. Ook in de werkelijkheid wordt deze sedimentatie waargenomen, echter de snelheid is geringer en het gebeurt dicht bij de kust. Na verloop van tijd ontstaat op de ondiepte een instabiliteit in het model. Het gebruik van de 'smoothing-routine' lijkt het ontstaan van de instabiliteit nauwelijks te vertragen. De invloed van het instabiele gebied op de kustlijn ten noorden van de dammen is duidelijk zichtbaar. In het bijgeleverde filmpje wordt dit nog duidelijker. Deze instabiliteit zal verderop nader worden besproken.



Figuur 4-5a Berekende bodem en transporten in 1986 met een aangepaste beginbodem van 1968, de transportformulering van Bijker en een terugkoppelingstijdstap van 4 maanden. De grote pijlen geven het netto transport over de desbetreffende lijn aan [ $10^4 \text{ m}^3/\text{jaar}$ ] terwijl de kleine pijltjes een beeld geven van het transportpatroon [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ].

Figuur 4-5b Berekende bodem en transporten in 1986 met de transportformulering van Bijker en een terugkoppelingstijdstap van 6 maanden. De grote pijlen geven het netto transport over de desbetreffende lijn aan [ $10^4 \text{ m}^3/\text{jaar}$ ] terwijl de kleine pijltjes een beeld geven van het transportpatroon [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ].

De berekende netto transporten in de vakken, weergegeven door de grote pijlen, laten ook een vrij constant beeld zien qua grootte en richting. Opvallend is het grote kustlängs gerichte transport ten noord westen van de dam. Interessant is dat het verkleinen van de terugkoppelingstijdstap een kleine verandering betekent. Er is nu een netto transport van vak 1 naar vak 3 ten zuiden van de dam terwijl dat bij de grotere tijdstappen andersom is.

Ondanks het ontstaan van de ondiepte heeft het verkleinen van de terugkoppelingstijdstap een positief effect op de bodemveranderingen ten noorden van de dam. De ondiepte ligt iets verder naar de kust toe en de bodem komt iets beter overeen met de waarnemingen.

## Instabiliteit

De sedimentatie ten noordwesten van de dam lijkt de oorzaak van het instabiel worden van het model na verloop van tijd, zoals goed is te zien in figuur 4-3. Het toepassen van 'smoothing' heeft hierop nauwelijks een effect. Ook de run met een tijdstap van 4 maanden laat al de ondiepte zien die zal resulteren in de instabiliteit. figuur 4-1 laat zien dat het toepassingsgebied van de USB, aangegeven door de groene lijnen, zo groot is dat de ontstane ondiepte er net binnen ligt. De animaties van de modelberekeningen laten zien dat

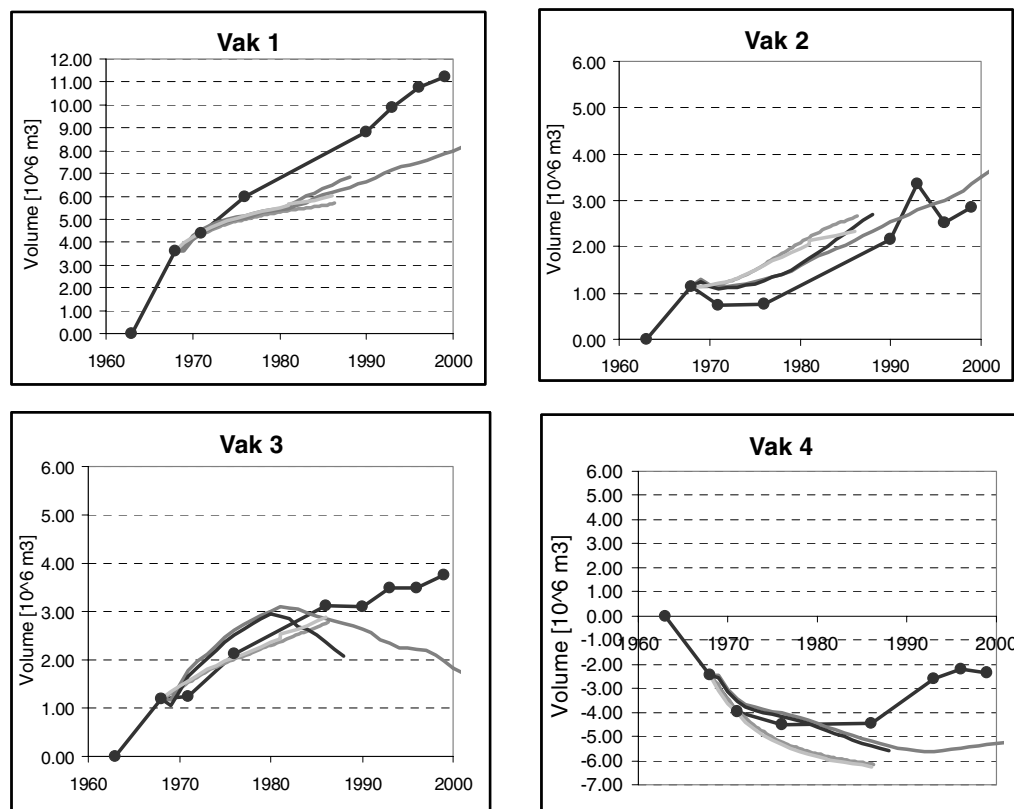
de ondergrens voor de USB wordt overschreden wat betekent dat deze toegepast gaat worden. Dit leidt mogelijk tot het instabiele gedrag.

Een andere mogelijkheid is dat de instabiliteit ontstaat in de MOR-berekening. Een nadere inspectie leert inderdaad dat de tijdstap in FLOW van 2 minuten groot is voor de gebruikte celgrootte. Echter, een run met een gehalveerde FLOW-tijdstap geeft geen betere resultaten.

De precieze oorzaak van de instabiliteit is echter nog niet bekend. Binnen het huidige project ontbreekt de tijd om dit goed uit te zoeken. Het betekent niet dat de uitkomst van het VOPIJmuiden-model geen waarde meer heeft. Echter, op het moment dat de instabiliteit er is zijn de berekeningen niet meer betrouwbaar door de potentiële invloed ervan op de rest van het gebied.

#### 4.4.2 Volumeveranderingen

In Figuur 4.6a-c staat per vak, zoals aangegeven in figuur 4.1, aangegeven wat de gemeten en de berekende volume veranderingen zijn voor de verschillende runs. Hiervoor is de netto import of export van sediment per vak bepaald.



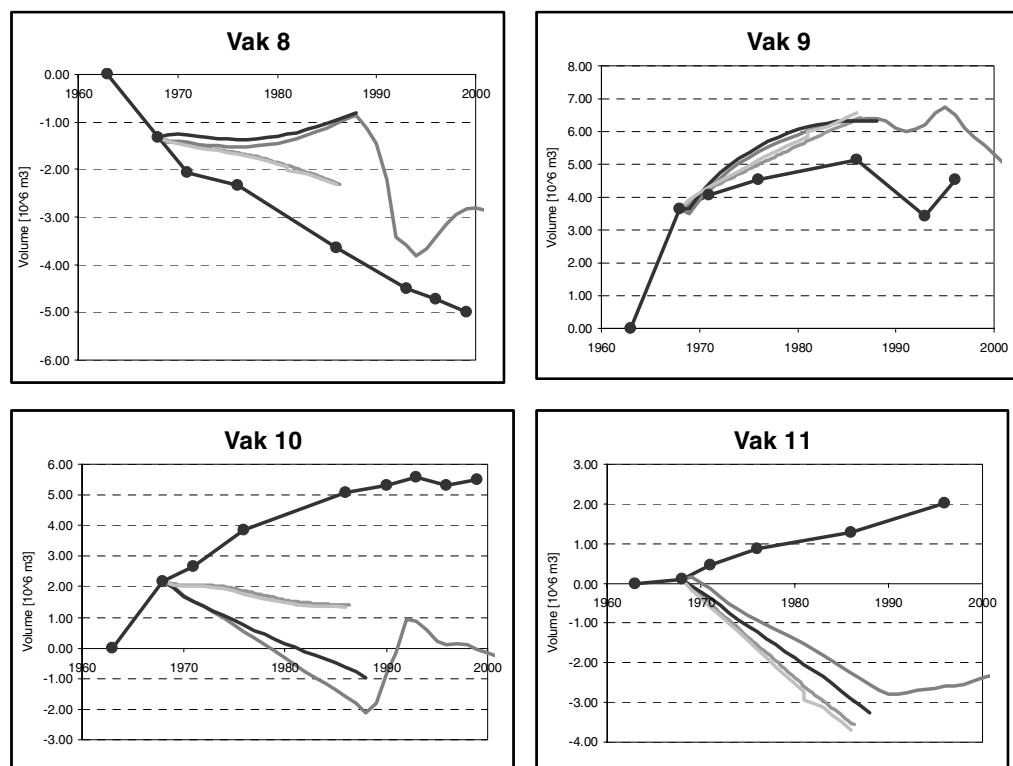
Figuur 4-6a Gemeten en berekende volumeveranderingen in het gebied ten zuiden van de havendammen, in de vakken 1-4. De donkere lijn met stippen geeft de gemeten waarden, de zwarte lijn de berekende waarden met alleen een aangepaste bodem en terugkoppelingstijdstap  $\Delta t=1$  jaar, de donkergrijze met met gebruik van de smoothing routine met  $SF=100$  en  $n=5$ , de grijze met een terugkoppelingstijdstap  $\Delta t=4$  maanden en de lichtgrijze lijn met een terugkoppelingstijdstap  $\Delta t=6$  maanden.

De berekende volumeveranderingen ten zuiden van de dam in de vakken 1 t/m 3 komen redelijk tot goed overeen met de metingen, zie figuur 4-6a. In het gebied, waar de ontgrondingkuil zich bevindt, ten zuidwesten van de dam in vak 4, lijken de berekende

volumeveranderingen de gemeten veranderingen redelijk te volgen tot ongeveer 1980. Daarna vindt er sedimentatie plaats in het gebied terwijl de berekeningen een doorgaande erosie laten zien.

Het verkleinen van de terugkoppelingstijdstap heeft met name een positief effect op vak 3. Het verloop van de volumeverandering in vak 4 lijkt minder goed overeen te komen met de metingen.

Het feit dat de transporten soms boven en soms onder de gemeten waarden liggen betekent ook dat het niet mogelijk is dat door het toepassen van een factor op de berekende transporten de transporten kunnen worden gekalibreerd. Dit is bijvoorbeeld duidelijk voor vak 1 en 2; om de afwijkingen tussen de berekende en gemeten volumeveranderingen in vak 1 te verkleinen zouden de jaarlijkse transporten groter moeten worden. Dit zou ook tot een toename van de transporten in vak 2 leiden waardoor de afwijkingen daar juist toenemen.

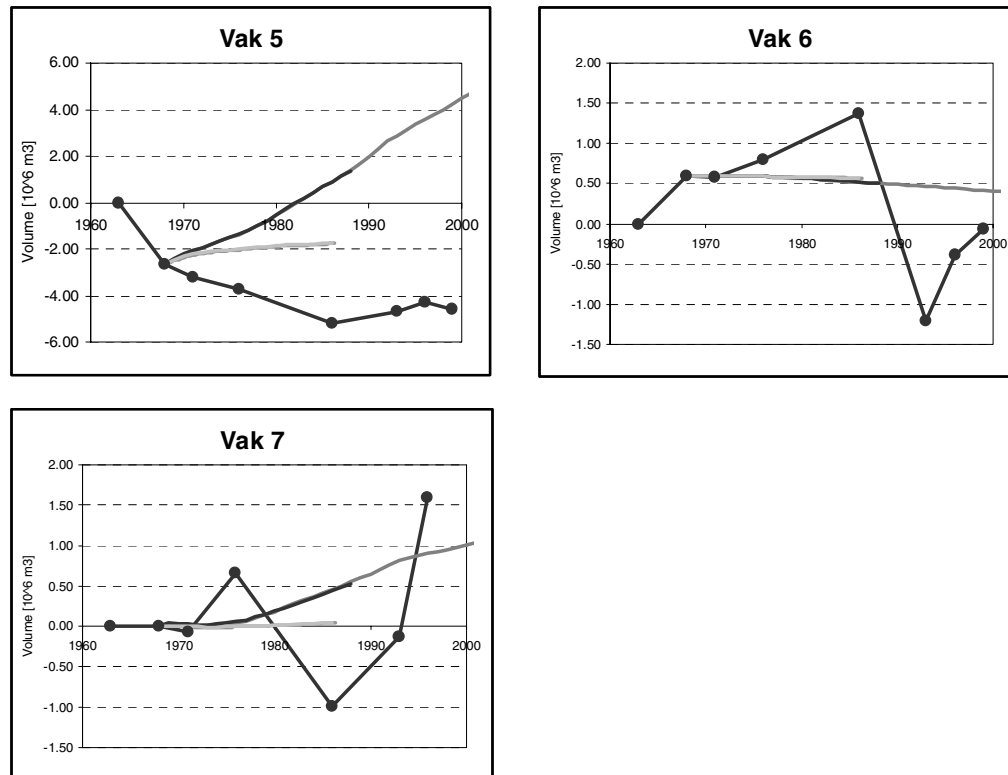


Figuur 4-6b Gemeten en berekende volumeveranderingen in het gebied ten noorden van de havendammen, in de vakken 8-11. De donkere lijn met stippen geeft de gemeten waarden, de zwarte lijn de berekende waarden met alleen een aangepaste bodem en terugkoppelingstijdstap  $\Delta t = 1$  jaar, de donkergrijze met met gebruik van de smoothing routine met  $SF = 100$  en  $n = 5$ , de grijze met een terugkoppelingstijdstap  $\Delta t = 4$  maanden en de lichtgrijze lijn met een terugkoppelingstijdstap  $\Delta t = 6$  maanden.

Met uitzondering van het gebied net ten noorden van de dam, in vak 9 en in mindere mate vak 8, is er geen overeenkomst tussen de gemeten en de berekende volume veranderingen. Waar de metingen aangeven dat het volume toeneemt, berekent het model erosie. Dit gebied ligt kustwaarts van de in het model berekende ondiepte. Zoals al eerder opgemerkt ligt deze ondiepte in werkelijkheid dichter op de kust waardoor er sedimentatie wordt gemeten daar waar het model erosie geeft. Dit betekent dat ondanks de slechte overeenkomst tussen

modeluitkomsten en metingen niet betekent dat de uitkomsten helemaal 'fout' zijn. Het is wel een belangrijke systematische afwijking.

In het gebied tussen de havendammen (vakken 6 en 7) is er volgens het model niet of nauwelijks sprake van volume veranderingen omdat een eventuele toename wordt 'weggebaggerd'. Omdat niet het gehele gebied binnen de aangegeven 'baggergebieden' valt is er toch wel enige volume toename op den duur. Het heeft echter geen zin om de berekende met de gemeten waarden te vergelijken.



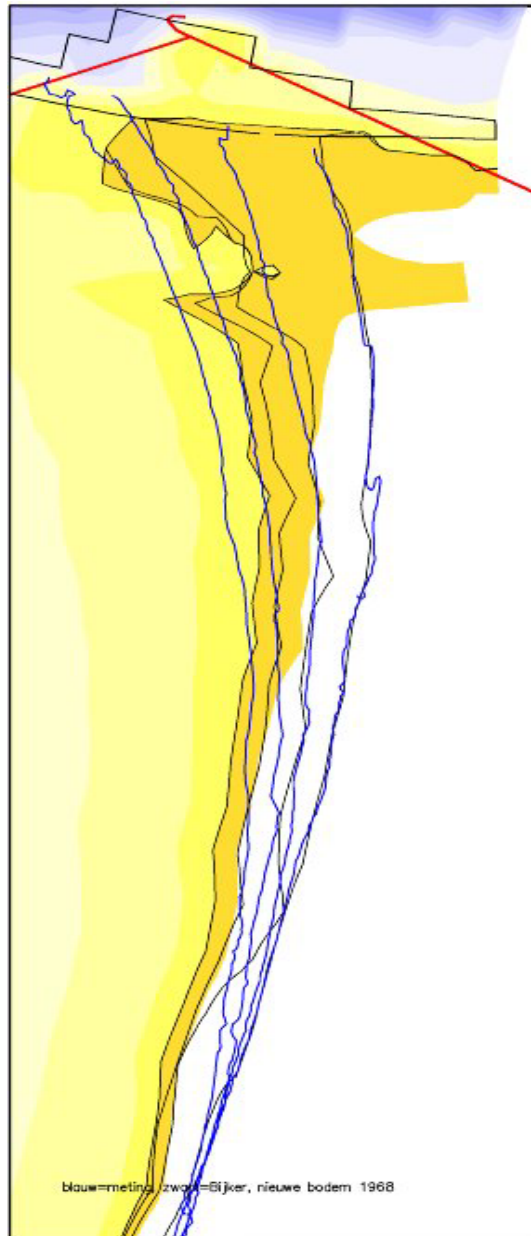
Figuur 4-6c Gemeten en berekende volumeveranderingen in die vakken waar wordt gebaggerd, vak 5-7. . De donkere lijn met stippen geeft de gemeten waarden, de zwarte lijn de berekende waarden met alleen een aangepaste bodem en terugkoppelingstijdstap  $\Delta t=1$  jaar, de donkergrijze met met gebruik van de smoothing routine met  $SF=100$  en  $n=5$ , de grijze met een terugkoppelingstijdstap  $\Delta t=4$  maanden en de lichtgrijze lijn met een terugkoppelingstijdstap  $\Delta t=6$  maanden.

In vak 5 net ten westen van de havendammen en in de IJgeul voorspelt het model een toename van het volume ofwel een netto import van sediment. Omdat in dit gebied de baggeroptie werkzaam is betekent dit dat dit gebeurt op een diepte die groter is dan de opgegeven waarde. Volgens de metingen is er sprake van een afname van het volume mogelijk veroorzaakt door baggeren.

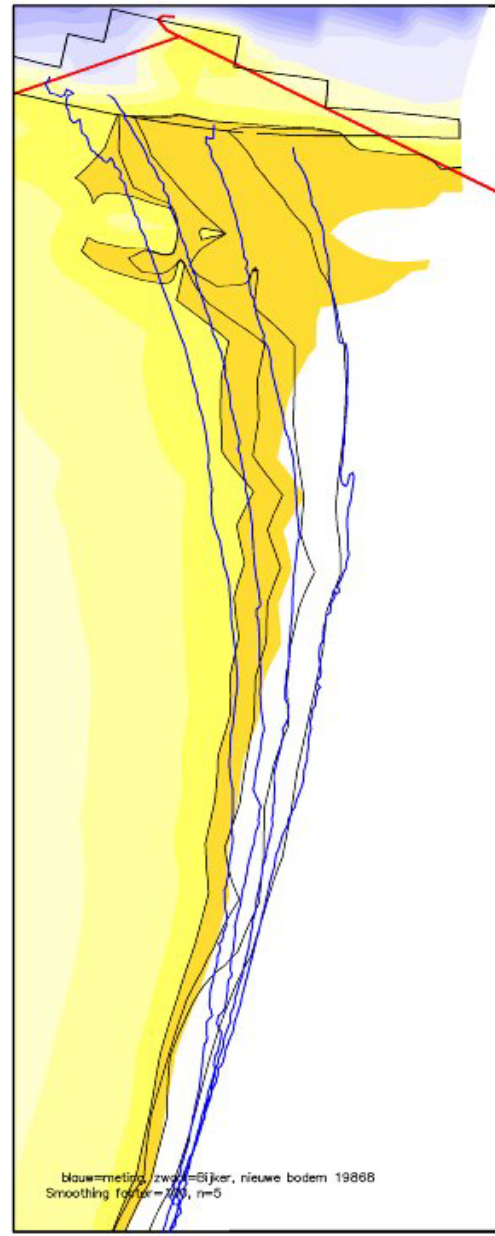
De figuren 4.6a-c laten zien dat het toepassen van een smoothing routine geen significant effect heeft. Het gebruik van een kleinere tijdstap heeft een positief effect op de berekende volumeveranderingen. Dit geldt vooral voor de vakken 3, 5 en 8. Het algemene beeld blijft echter onveranderd.

#### 4.4.3 Stranduitbouw

Figuur 4-7 laat zien dat door het aanpassen van de uniforme profielhoogte, de uitbouwsnelheid van het Kennemerstrand nu redelijk overeenkomt met de metingen.



Figuur 4-7 Berekende (zwart) en gemeten (blauw) NAP 0 m-lijnen in 1968, 1978, 1988 en 1998 met een aangepaste bodem en een terugkoppelingstijdstap van 1 jaar.



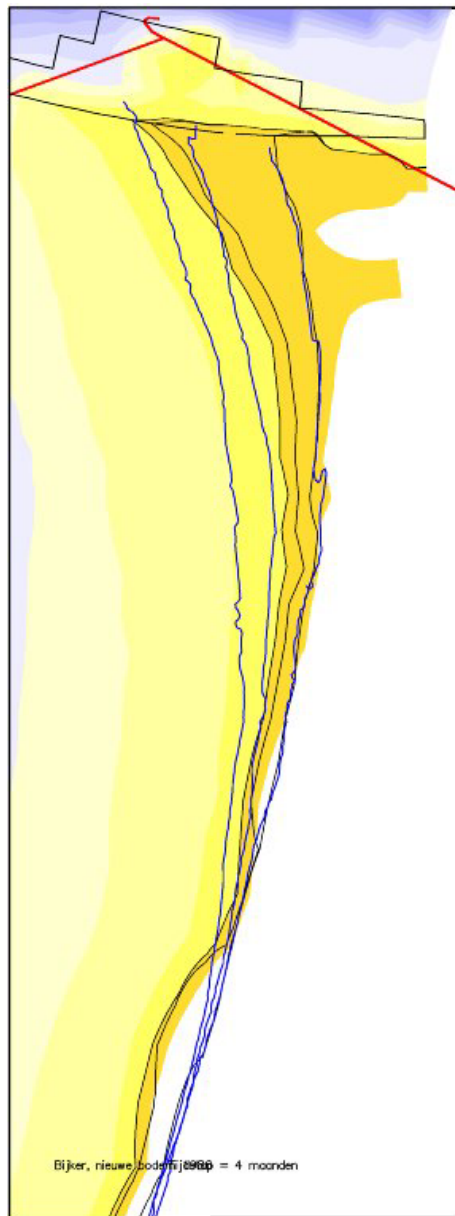
Figuur 4-8 Berekende (zwart) en gemeten (blauw) NAP 0 m lijnen voor 1968, 1978, 1988 en 1998 bij gebruik van de smoothing routine en een tijdstap van 1 jaar

Echter, de onregelmatige vorm van de berekende kustlijn, vooral net ten zuiden van de dam, maakt het moeilijk om de berekende ligging goed met de metingen te vergelijken. Er ontstaat een soort van inham op het strand waardoor de uitbouw van de kust wordt verstoord. Deze inham ontstaat ondanks een op het oog gladde beginbodem. Ook in de resultaten met de 'originele' duinhoogte waarmee is gerekend in Fase I, is de kustlijn op

deze locatie onregelmatig. De lagere duintophoogte versterkt het effect. Door deze verstoring komt na 1986 het strand in het gebied net ten zuiden van de dammen niet of nauwelijks meer naar voren komt. Verder naar het zuiden, waar de berekende kustlijn een gladder verloop kent, komt het strand wel weer goed naar voren.

Nog verder naar het zuiden komt het berekende strand juist sneller naar voren dan de metingen aangeven. Op deze plek lijkt er al in 1968 sprake te zijn van een lichte 'uitstulping'. Dit is mogelijk de reden van de zeer snelle en grote berekende uitbouw in de eerste 10 jaar. In de jaren daarna lijkt de mate van uitbouw wel redelijk overeen te komen met de metingen.

Het gebruik van de smoothing routine geeft niet een significant ander beeld zoals figuur 4-8 laat zien. Toch zijn er, ten opzichte van de berekeningen zonder smoothing wel enkele verbeteringen op het Kennemerstrand. De 'inham' op het strand net ten zuiden van de dammen is kleiner geworden en lijkt nu geen barrière te vormen zoals dat wel het geval is bij de sommen met alleen een aangepaste beginbodem. Verder naar het zuiden lijkt de ligging van de berekende NAP 0 m lijnen iets beter overeen te stemmen met de gemeten ligging.



Figuur 4-9 Berekende (zwart) en gemeten (blauw) NAP 0 m-lijnen in 1968, 1978 en 1986 met een aangepaste bodem en een terugkoppelingstijdstap 4 maanden.



Figuur 4-10 Berekende (zwart) en gemeten (blauw) NAP 0 m lijnen voor 1968, 1978 en 1986 een terugkoppelingstijdstap van 6 maanden. Deze berekening is met de oude bodem gedaan wat betekent dat de duinhoogte hoger is waardoor de snelheid waarmee het strand naar voren komt lager is.

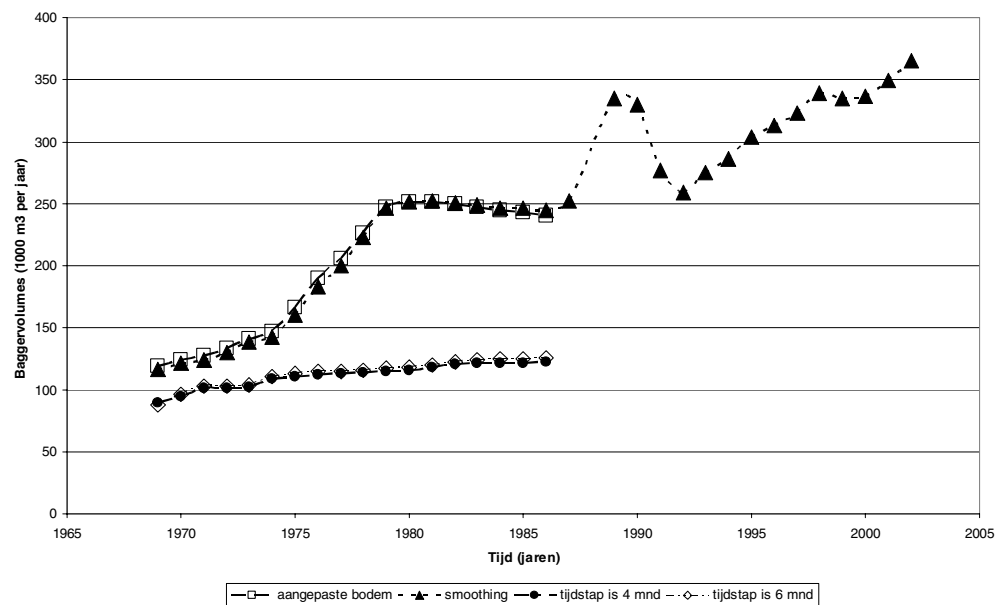
Het verkleinen van de tijdstap zorgt voor een gladdere kustlijn in het zuiden. Echter de uitbouw van de kust gaat nu langzamer dan met een terugkoppelingstijdstap van een jaar. Ook is de buiging in de kustlijn groter dan bij een tijdstap van een jaar. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat het binnenkomende zand nu over een grotere lengte van de kust wordt verdeeld door het ontbreken van de storende inham. Het kan erop duiden dat gekozen duintop-hoogtes nog te groot zijn voor de tijdschaal van 12 jaar waarvoor de berekening is

uitgevoerd. Daarnaast laat figuur 4-6a zien dat er meer sediment binnenkomt op dieper water in vak 2 en iets minder op de kust in vak 1.

Het verschil tussen de uitbouwsnelheid met 4 en 6 maanden blijkt terug te voeren op een verschil in de beginbodem en daardoor in de uniforme profielzone. Gegeven de vrijwel identieke volumeveranderingen en vorm van de kustlijn is er geen sprake van significante verschillen. Het is in feite een illustratie van de invloed van de uniforme profielzone op de uitbouwsnelheid.

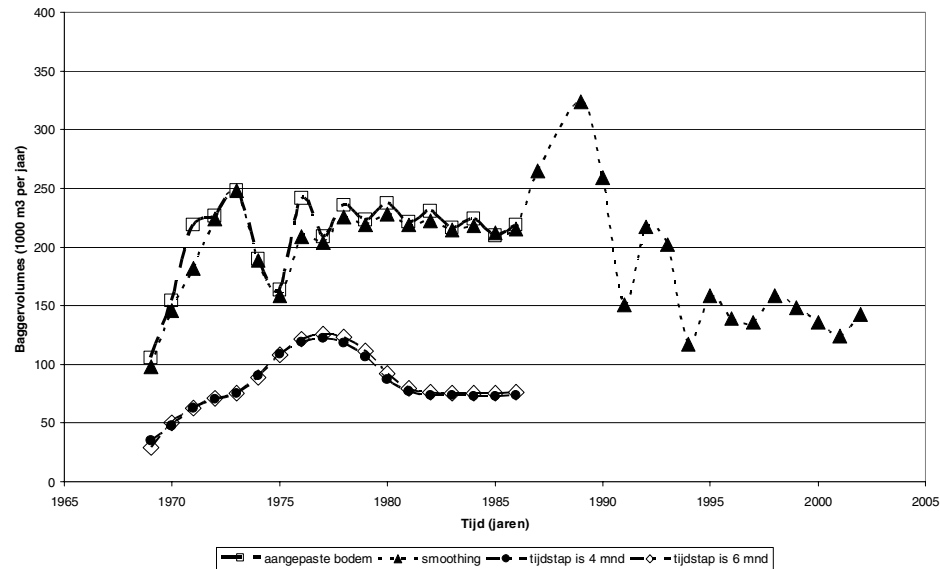
#### 4.4.4 Baggerhoeveelheden

Bij de berekende baggerhoeveelheden laten we het eerste jaar, 1968, buiten beschouwing. Doordat de beginbodem tussen de havendammen boven de opgegeven baggerdiepte van 16.5 ligt wordt er in de eerste tijdstap een onrealistisch grote hoeveelheid weggehaald



Figuur 4-11a Berekende jaarlijkse baggerhoeveelheden uit het havengebied voor de verschillende berekeningen

Figuur 4-11 laat de berekende jaarlijkse baggervolumes zien voor de verschillende runs. Bij die runs waarin is doorgerekend na 1986 moet rekening worden gehouden met het ontstaan van de instabiliteit. Ook nu blijkt dat de grootte van de terugkoppelingstijdstap de meeste invloed heeft op de uitkomsten. Bij gebruik van een terugkoppelingstijdstap van 4 en 6 maanden zijn de baggervolumes ongeveer de helft kleiner in de zelfde periode dan bij een terugkoppelingstijdstap van een jaar. Dit is in overeenstemming met de kleinere berekende volumetoename in vak 5, zichtbaar in figuur 4-6c. De reden hiervoor is niet duidelijk maar moet mogelijk worden gezocht in de verstoringen op het Kennemerstrand. Doordat de kustlijn bij een kleinere terugkoppelingstijdstap gladder blijft, en de kust langzamer naar voren komt is er sprake van minder 'sand-bypassing'.



Figuur 4-11b Berekende jaarlijkse baggerhoeveelheden uit de IJgeul voor de verschillende berekeningen

Het verloop als functie van de tijd is met een terugkoppelingstijdstap van een jaar grillig tot zeer grillig te noemen. Dit in tegenstelling tot die bij gebruik van een terugkoppelingstijdstap van 4 en 6 maanden. Ook lijkt er bij de grote terugkoppelingstijdstap eerder sprake te zijn van een min-of-meer constant baggervolume. Bij een tijdstap van 1 jaar is er voor het gebied tussen de dammen evenwicht in 1976 terwijl dit pas in 1981 zo is bij een tijdstap van 4 en 6 maanden. In de IJgeul lijkt er bij de kleinere tijdstap een kleine toename te zijn terwijl er bij de grotere tijdstap vanaf 1980 een constant volume wordt berekend.

Volgens de gegevens wordt er per jaar enkele tonnen zand weggebaggerd uit de IJgeul en het gebied tussen de havendammen. Echter, in het rapport van Fase I staat dat de beschikbare baggergegevens van onvoldoende kwaliteit zijn voor de modelkalibratie omdat:

- Tussen de havendammen is de samenstelling van het materiaal onduidelijk, leidend tot een onzekerheid van minimaal een factor 2 (honderdduizenden kubieke meters per jaar),
- In de IJgeul data is onduidelijk welk deel betrekking heeft op de eerste 10 km. Tevens is veel data afwezig (1971 - 1976) en is er een enorme sprong in hoeveelheid gebaggerd materiaal rond 1977 (van orde  $0.4 \text{ Mm}^3$  naar  $1 - 2.5 \text{ Mm}^3$ ).

Dit maakt een kwantitatieve vergelijking moeilijk, maar het lijkt alsof de berekende hoeveelheid laag is.

## 4.5 Samenvatting en conclusies

Voortgaande op de resultaten van Fase 1 is er geprobeerd om de systematische afwijkingen van de modelresultaten en de metingen te verkleinen. Hiervoor is de beginbodem aangepast in het gebied waar de USB wordt toegepast en is het model 'gedebugged'. Met het aangepaste model zijn berekeningen gemaakt om het effect te beoordelen van:

- de aangepaste bodem,
- het gebruik van de smooting-routine, en

het verkleinen van de tijdstap.

Er is zoveel mogelijk over een langere periode doorgerekend om te kijken of het model ook stabiel blijft. Vanwege de langere rekentijd is in de sommen met de kleinere tijdstap doorgerekend tot 1986 waarna er is gekeken of er aanwijzingen waren voor het al dan niet instabiel worden. Als deze er waren is er niet verder gerekend. Er is gekeken naar 1) de volumeveranderingen, 2) de bodemveranderingen (vooral kwalitatief), 3) de uitbouw van het Kennemerstrand en 4) de baggerhoeveelheden (vooral kwalitatief). De nadruk lag hierbij op 1 en 3. In onderstaande Tabel 4-3 worden alle uitkomsten samengevat:

Tabel 4-3 Overzicht van de uitkomsten van de berekening. Z=zuid, vak 1-3, M=midden, vak 4, 5 en 8, N=noord vak 9-11

| Run          | Wanneer instabiel | Bagger volume | Bodem | Volume veranderingen |     |    | kustlijn |      |
|--------------|-------------------|---------------|-------|----------------------|-----|----|----------|------|
|              |                   |               |       | Z                    | M   | N  | Positie  | Vorm |
| 1. Bijk 1 nb | 1989              | -             | -     | +                    | +/- | -- | +/-      | -    |
| 2. Bijk 1 s  | 1990              | -             | -     | +                    | +/- | -- | +/-      | -    |
| 3. Bijk 0.3  | nog niet          | +             | +/-   | +                    | +/- | -  | -        | +/-  |
| 4. Bijk 0.5  | nog niet          | +             | +/-   | +                    | +/- | -  | -        | +/-  |

Per run kunnen de volgende opmerkingen worden gemaakt:

De berekende volumeveranderingen vooral ten zuiden van de dammen (vak 1, 2 en in mindere mate in vak 3) komen redelijk tot goed overeen met de gemeten waarden. In het gebied ten noorden van de dam is de overeenkomst veel minder goed. Echter, dit is goed te verklaren door de te westelijk gelegen ondiepte. Het verkleinen van de terugkoppelingstijdstap heeft een positief effect terwijl het gebruik van de smoothing routine geen effect van betekenis heeft. Het verschil tussen de resultaten met gebruik van een terugkoppelingstijdstap van 4 of 6 maanden is minimaal.

De berekening met een aangepaste bodem geeft voor wat betreft de snelheid waarmee het Kennemerstrand naar voren komt betere resultaten dan de berekening in fase I, waar de originele bodem is gebruikt. Echter, de vorm van de kustlijn is grilliger waardoor de onzekerheid in de ligging groter wordt. Het verkleinen van de terugkoppelingstijdstap zorgt er voor dat de kustlijn ten zuiden van de dam gladder blijft maar leidt tot een vertraging in de snelheid waarmee het strand naar voren komt. Het toepassen van de smoothing routine heeft een klein positief effect op de vorm van de kustlijn ten zuiden van de dam maar er blijven grote verstoringen zichtbaar. Het gebruikte rooster is, gegeven de nadruk op het gebied rond de dammen vrij grof. Ook de representatie van de dammen en de manier waarop de roosterlijnen er omheen liggen is misschien niet optimaal gegeven het doel van de studie.

Onder alle omstandigheden blijft er na een aantal jaren een instabiliteit ontstaan ten noordwesten van de dam. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat het gebied waarin de USB toegepast wordt te groot is gekozen.

De berekende baggerhoeveelheden bij een terugkoppelingstijdstap van een jaar, als functie van tijd zijn erg grillig. Een kleinere terugkoppelingstijdstap zorgt voor een gladder verloop maar tegelijkertijd zijn de berekende hoeveelheden kleiner.

### **Beste instelling**

De evenwichtsligging zal worden berekend met: de transportformulering van Bijker, de aangepaste bodem, een terugkoppelingstijdstap van 6 maanden en een  $d_{50} = 190 \mu\text{m}$ .

### **'Voorspelkracht'**

Voor de beoordeling van de kwaliteit van de uitkomsten wordt er gekeken naar de morfologische kentallen. Er wordt aangenomen dat de kwaliteit van de gemodelleerde waterbeweging zo groot in verhouding tot de morfologische berekeningen is, dat deze niet bepalend is voor de kwaliteit van de berekende morfodynamiek.

De grote lijnen van de morfologische ontwikkelingen worden goed weergegeven door de modeluitkomsten met de bovengenoemde instellingen. Zij vertonen echter de volgende systematische afwijkingen:

- Het gebruik van de transportformulering van Bijker heeft tot gevolg dat de ontwikkeling van de erosiekuil niet overeenkomt met de waarnemingen. Hij verplaatst zich naar het zuidwesten terwijl de metingen een meer kustwaartse trend aangeven.
- De kustlijn bij het Kennemerstrand is niet helemaal glad.
- Verder naar het zuiden er in de eerste jaren sprake is van een 'sprong' voorwaarts die niet overeenkomt met de waarnemingen. Het is niet duidelijk in hoeverre deze 'sprong' wordt veroorzaakt door de beginbodem.
- De uitbouwsnelheid is lokaal tot ongeveer 50% lager dan de metingen aangeven.
- De aanzanding net te noordwesten van de dam gaat te snel en ontaart uiteindelijk in en instabiliteit.
- De berekende baggerhoeveelheden zijn laag in vergelijking tot de beschikbare data.

In deze studie is gekeken naar de onzekerheid in de snelheid waarmee het strand uitbouwt als gevolg van:

- De korrelgrootte: een variatie van  $10 \mu\text{m}$  in de  $D_{50}$  van het zand betekent een marge van maximaal 40% in de grootte het netto sedimenttransport.
- De hoogte van de uniforme profielzone: een marge van 1,5 m naar boven en beneden betekent dat de uitbouwsnelheid maximaal orde 10% lager of hoger kan worden.

De berekeningen zijn gedaan met een gemiddeld golfklimaat. Onder de aanname dat de richting gelijk blijft maar dat de golfhoogte verandert kan een schatting van het effect van een variatie hierin worden gemaakt. Een variatie in de hoogte van 10% is zeer redelijk. Dit betekent een variatie in het langstransport van ongeveer 30%.

Omdat de drie bovengenoemde bronnen van onzekerheid onafhankelijk van elkaar zijn is de uiteindelijke onzekerheid in de snelheid waarmee het strand vooruit komt gelijk aan ruim 50%. Voor de baggerhoeveelheden wordt de onzekerheid bepaald door die in de korrelgrootte en golfklimaat. Toch heeft dit nauwelijks gevolgen voor de marge omdat de onnauwkeurigheid in de hoogte van de uniforme profielzone relatief klein is.

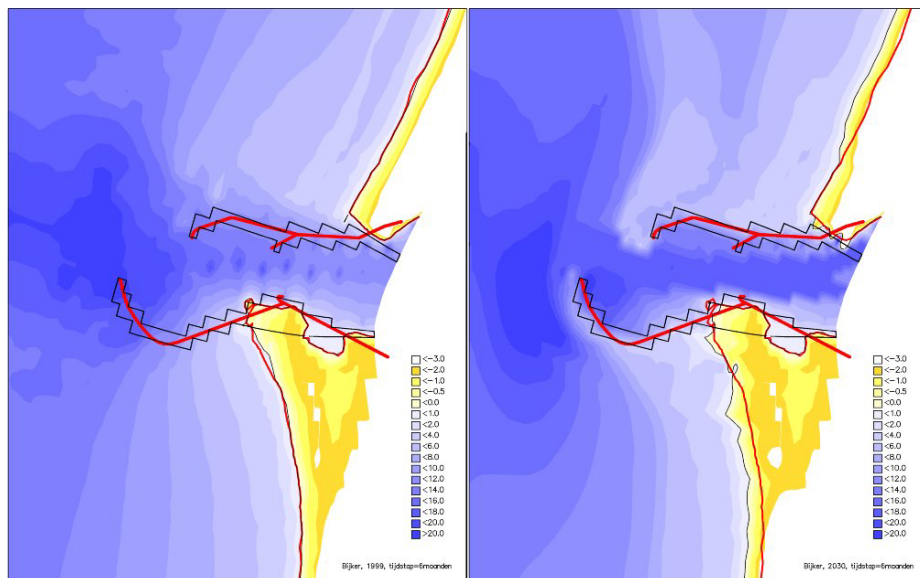
De snelheid waarmee het strand naar voren komt bepaalt hoe snel de evenwichtsligging zal worden behaald. De onzekerheid in deze ligging wordt vooral bepaald door de systematische fouten in de uitkomst. Als er voor de berekening van de evenwichtsligging steeds wordt uitgegaan van de meest recent gemeten bodem wordt de tijd totdat er sprake is van evenwicht steeds kleiner. Hierdoor speelt de onzekerheid in de uitbouwsnelheid een steeds kleinere rol en wordt de systematische afwijking in de berekende evenwichtsligging dominant.

## 5 Voorspelling van evenwichtsligging Kennemerstrand inclusief nauwkeurigheid

### 5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het resultaat besproken van een berekening van de mogelijke ontwikkeling tot aan 2030. Hiervoor worden die instellingen gebruikt die in hoofdstuk 4 zijn bestempeld als de meest geschikte.

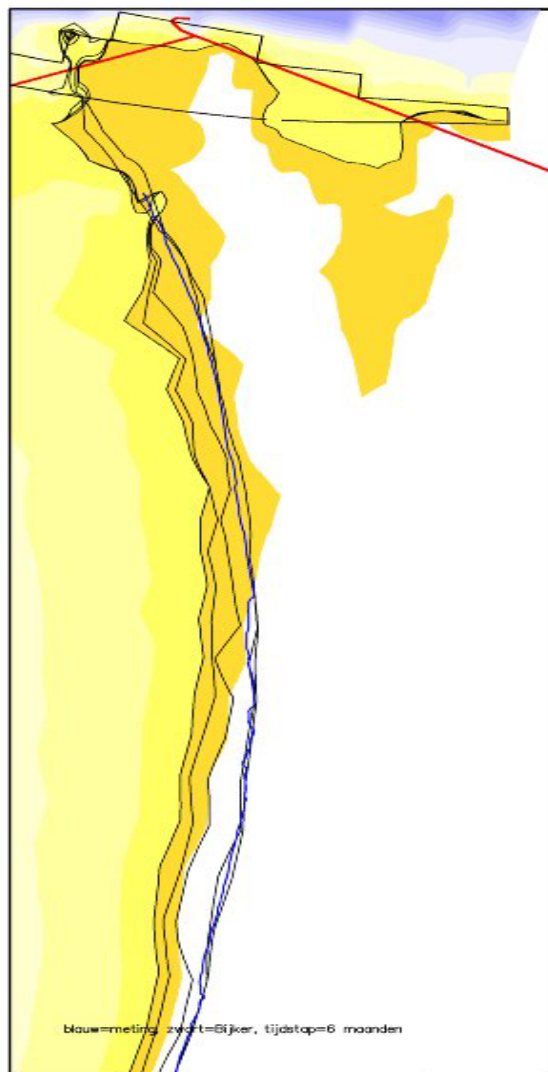
### 5.2 Resultaat



Figuur 5-1 De beginbodem uit 1999 en de berekende bodem in 2030 met een tijdstap van 6 maanden.

De meest recent beschikbare RWS-bodemmeting van het gebied is uit 1999 en deze wordt gebruikt als startpunt voor de berekeningen. Net zoals voor de bodem in 1968 wordt deze aangevuld met gegevens van TNO-NITG voor het diepere gedeelte. De duinhoogtes net ten zuiden van de dammen zijn weer verlaagd zoals beschreven in hoofdstuk 4.

Figuur 5-1 laat het eindresultaat zien. In bijlage C is ook een figuur van het erosie/sedimentatie patroon opgenomen. Wat gelijk opvalt, is dat de problemen die optraden bij het doorrekenen van de periode 1968-2000 nu niet voorkomen: de kustlijn blijft redelijk glad en er is geen sprake van instabiel gedrag. Echter, ook nu lijkt een kleine inham weer de reden dat het strand ten noorden hiervan niet verder naar voren komt.

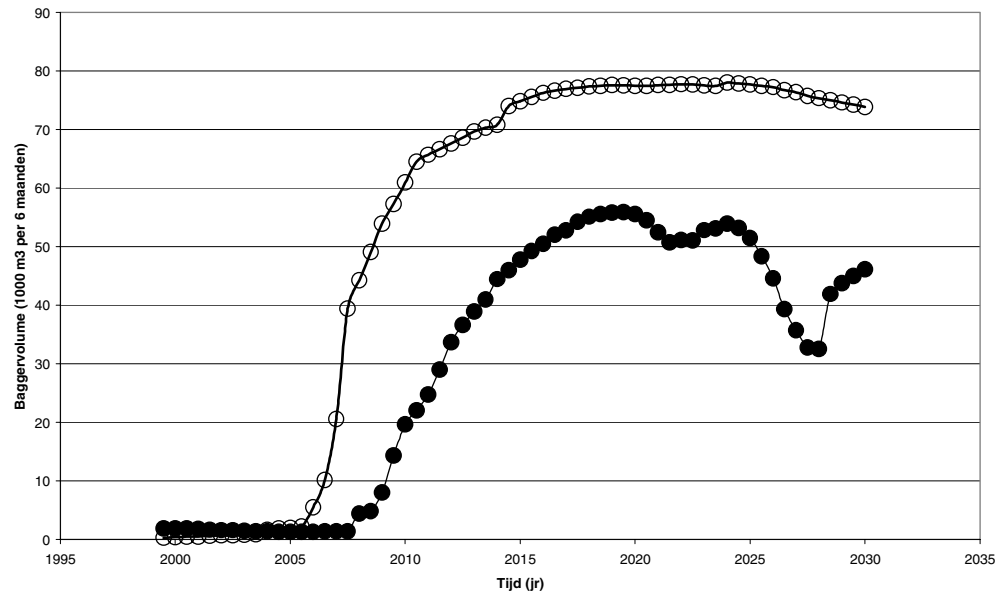


Figuur 5-2 De ligging van de NAP 0 m lijn in 2000, 2010, 2020 en 2030.

Volgens deze berekening zal de huidige ligging van de NAP 0 lijn dicht bij de dammen na een jaar of 20 weinig meer veranderen zoals is te zien in figuur 5-2. Hoewel de uitbouw van het strand langzamer lijkt te gaan is deze niet gestopt na 30 jaar. Gedeeltelijk is dit volgens verwachtingen; na verloop van tijd zal het strand verder naar het zuiden wat 'bijdraaien' t.o.v. het strand net ten zuiden van de dammen. Echter in hoeverre de bovengenoemde verstoring van de kustlijn hierbij een rol speelt is moeilijk te zeggen. Hoe dan ook, het is niet mogelijk op basis van de berekende positie van de NAP 0 m –lijn de evenwichtsligging te bepalen.

Wat verder van de dammen af op het Kennemerstrand is er sprake van een 'sprong voorwaarts' in de eerste 10 jaar die groter is dan voor de rest van het strand. Echter, deze heeft niet dezelfde grootte als in de calibratie periode, zie hoofdstuk 4, en bovendien is het niet de zelfde locatie. Dit duidt op een effect dat wordt veroorzaakt door de beginbathymetrie en niet door het model.

Er ontstaat een 'zand tong' die na een jaar of 7 om de zuidelijke havendam heen gaat. Ook vanuit het noorden komt er zand de haven en de IJgeul in. Dit komt tot uiting in de berekende baggerhoeveelheden die zijn weergegeven in figuur 5-3. In de eerste jaren hoeft er geen of nauwelijks zand te worden weggehaald maar vanaf een jaar of 7 nemen de hoeveelheden snel toe.



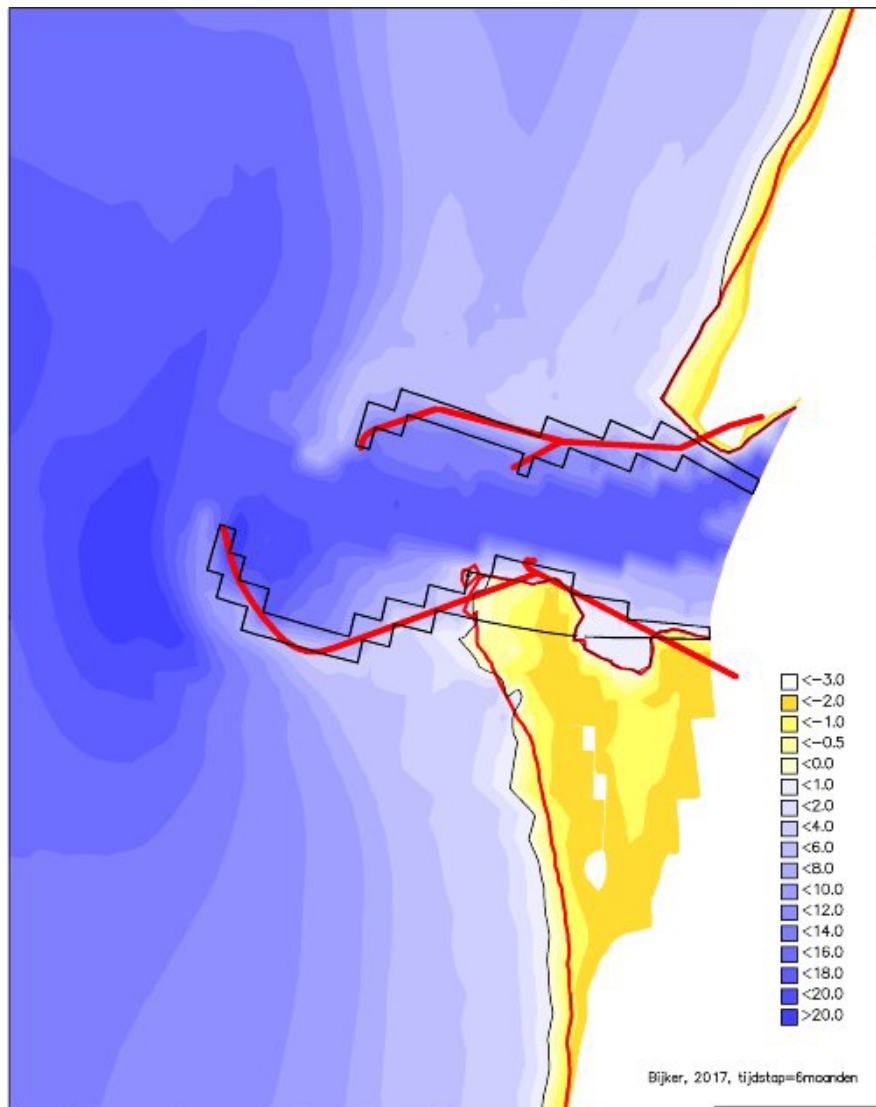
Figuur 5-3 Berekende halfjaarlijkse baggervolumes. De gele lijn geeft aan hoeveel er uit de IJgeul is gehaald en de roze de hoeveel er vanuit het gebied tussen de havendammen.

Bij de berekende baggervolumes moet worden aangetekend dat er per abuis een baggerdiepte van 16.5 m is opgegeven voor de IJgeul i.p.v. 19.5 m zoals van toepassing na 1986. Dit betekent niet dat de uiteindelijk baggervolumes hoger moeten zijn, deze worden immers bepaald door het binnenkomende sediment. Het is wel mogelijk dat dit verklaard waarom er in het begin de baggervolumes ongeveer gelijk aan 0 zijn. Figuur 5-1 laat zien dat in grote delen van de geul de diepte rond de 20 m ligt zodat deze eerst moet verondiepen voordat het model er zand weg gaat halen.

Vanaf 2006 is er een forse toename waar te nemen in de hoeveelheid 'gebaggerd' materiaal uit de IJgeul. Voor het gebied tussen de dammen begint deze enige jaren later. Vanaf 2017 is er sprake van constante hoeveelheid materiaal dat weggehaald wordt uit de IJgeul. Voor het gebied tussen de havendammen varieert het berekende baggervolume na 2017 en is er net voor 2030 sprake van een dip. Dit kan worden verklaard doordat, in tegenstelling tot de IJgeul, de baggervolumes tussen de havendammen bepaald worden door wat er ten noorden van de dammen gebeurt. En zoals bekend is dit gebied vrij 'onrustig'.

Zoals boven gezegd is het niet goed mogelijk om de positie van de evenwichtsligging van het Kennemerstrand te bepalen. Echter, de baggervolumes geven aan dat er vanaf ongeveer 2017 sprake is van een evenwichtssituatie. De baggervolumes zijn direct gerelateerd aan de berekende sedimenttransporten welke weer bepalend zijn voor de uitbouw van het Kennemerstrand. Daarnaast is de vorm en de ligging van het strand ook van invloed op de mate van zandbypassing. Hierom wordt er aangenomen dat het constant zijn van de baggerhoeveelheden een goede indicatie is voor het bereiken van een evenwichtssituatie ten

zuiden van de dammen. Het verkeerd invoeren van de baggerdiepte draagt bij tot een extra onzekerheidsmarge. Bij een grotere diepte zou er eerder sprake zijn van 'baggeren' in het model en mogelijk ook tot het vervroegen van het ontstaan van een evenwichtssituatie.



Figuur 5-4 De berekende bodem in 2017 het tijdstip waarop er sprake is van een evenwicht in de baggerhoeveelheden.

## 5.2.1 Conclusie

De berekening vanaf 1999 lijkt goed te verlopen, er ontstaat geen instabiliteit en de kustlijn blijft redelijk glad. Hoewel de snelheid afneemt stopt de uitbouw van het Kennemerstrand niet. Het is dus niet mogelijk de positie van de evenwichtsligging te bepalen. Ten opzichte van de situatie in 1999 komt het Kennemerstrand nog enkele tientallen meters naar voren in de komende 30 jaar.

Uit de jaarlijkse baggerhoeveelheden kan worden afgeleid dat er na ongeveer 18 jaar sprake is van een evenwichtssituatie. Vanaf dat moment is de hoeveelheid extra materiaal die de IJgeul binnen komt constant.

## 5.3 Kwaliteit van de uitkomsten

### 5.3.1 Systematische afwijkingen

De systematische afwijkingen zijn voor een deel verminderd doordat er minder verstoringen zijn opgetreden. Echter, ook nu nog lijkt een kleine 'dip' in de kustlijn, net ten zuiden van de dammen, zie figuur 5-4, een effect te hebben op de berekende ontwikkeling van het strand. Ten noorden is er nauwelijks een verandering waar te nemen terwijl verder naar het zuiden het strand uniform naar voren komt. Ook nu moet rekening worden gehouden met een tot zo'n 50% lagere uitbouwsnelheid en de mogelijkheid dat er bij een grotere baggerdiepte eerder evenwicht kan ontstaan.

Het verkeerd invoeren van de baggerdiepte draagt bij tot een extra onzekerheidsmarge. Bij een grotere diepte zou er eerder sprake zijn van 'baggeren' in het model en mogelijk ook tot het vervroegen van het ontstaan van een evenwichtssituatie. Deze marge is maximaal 7 jaar wat betekent dat er al na 10 jaar sprake zou kunnen zijn van een evenwichtssituatie.

### 5.3.2 Onzekerheid of bandbreedte

De onzekerheid in het moment dat de evenwichtsligging wordt bereikt wordt bepaald aan de hand van de variaties in de korrelgrootte, de uniforme profielzone en het golfklimaat. In hoofdstuk 4 is aangegeven hoe groot deze marges zijn te weten:

- Korrelgrootte: een variatie van 10  $\mu\text{m}$ , 180-200  $\mu\text{m}$  betekent een variatie in de berekende baggerhoeveelheden van maximaal 40%. Omdat de baggervolumes worden bepaald door het binnenkomende zand wordt aangenomen dat de marge op de zandtransporten dus ook maximaal 40% is.
- Uniforme profielzone: een marge van 1.5 m in de duintophoogte betekent een variatie van orde 10% in de hoogte van de uniforme profielzone en dus in 10% in de uitbouwsnelheid van het strand
- Golven: een variatie van 10% in de golfhoogte betekent een variatie in de langstransporten van 30%.

De drie bronnen van onzekerheid zijn onafhankelijk van elkaar wat betekent dat de relatieve fouten bij elkaar kunnen worden opgeteld. Hieruit volgt dat de onzekerheidsmarge in de snelheid waarmee het strand naar voren komt gelijk is aan 90%. Dit is de maximaal mogelijke fout. De verwachtingswaarde van de fout is gelijk aan de wortel uit de som van het kwadraat van de relatieve fouten of te wel aan 50%. Wordt de evenwichtssituatie nu na ongeveer 10 jaar bereikt dan zal dat bij een toename van het sedimenttransport met 50 % na ongeveer 5 jaar zijn. Een afname van het transport met 50% betekent dat de evenwichtsligging pas na 30-40 jaar zal worden bereikt!

## 5.4 Conclusies aangaande voorspelkracht VOP-IJmuiden-model

Uit de jaarlijkse baggerhoeveelheden kan worden afgeleid dat er na ongeveer 15 jaar sprake is van een evenwichtssituatie. Uit een schatting van het effect van een variatie in korrelgrootte, de grootte van de uniforme profielzone en het golfklimaat volgt dat dit kan variëren tussen de 10-50 jaar. Er moet rekening worden gehouden met systematische afwijkingen in de orde van 5-10 jaar als gevolg van een te lage uitbouwsnelheid van het Kennemerstrand en het gebruik van een te kleine baggerdiepte. Dit betekent dat op basis van de berekeningen wordt verwacht dat het evenwicht tussen 2005-2030 zal worden bereikt.

Het is niet mogelijk een uitspraak te doen over de ligging van het Kennemerstrand op het moment van evenwicht. De kwaliteit van de modeluitkomsten is daarvoor te gering, vooral de afwijking in de berekende vorm van de kustlijn net ten zuiden van de dammen is groot. Het enige wat men kan zeggen op grond van de resultaten is dat ten opzichte van de huidige situatie het strand nog enkele tientallen meters naar voren zal komen. Op den duur zal het strand verder naar zuiden 'bijdraaien' en ook naar voren komen.

Over het strand ten noorden van de dammen kan op basis van de huidige resultaten geen uitspraak worden gedaan.

## 6 'Voorspelkracht' Delft3D-RAM

### 6.1 Algemeen

Dit hoofdstuk gaat in op de meer generieke conclusies en lessen t.a.v. de voorspelkracht van Delft3D-RAM die uit de huidige studie volgen. In deze studie is de Uniforme StrandBenadering (USB) toegepast en in de loop ervan is duidelijk geworden dat deze een dominante rol heeft gespeeld. Dit betekent dat een belangrijk deel van de bevindingen alleen van toepassing zijn op Delft3D-RAM in combinatie met USB.

Hoewel het USB-concept al is toegepast voor de studie van ONL is dit de eerste studie waarin het een dermate grote rol speelt. Dat komt door de nadruk op de ontwikkeling van het strand. Dit betekent dus ook dat de vergelijking met andere studies moeilijk is.

De studie laat zien dat morfodynamiek op hoofdlijnen goed wordt weergegeven, het strand komt vooruit, er ontstaat een erosiekuil en er is sprake van sedimentatie ten noorden van de dammen. Echter op detail niveau zijn de resultaten minder goed waardoor het model niet in staat is voldoende nauwkeurig kwantitatieve antwoorden te geven. Denk aan de exacte locatie en ontwikkeling van de erosiekuil, de locatie en snelheid van de sedimentatie ten noorden van de dammen en de vorm van de kustlijn ten zuiden van de dammen.

In paragraaf 6.2 worden de bevindingen en de lessen die daaruit kunnen worden getrokken puntsgewijs besproken.

### 6.2 Lessen

Het toepassen van de Uniforme Strand Benadering (USB) moet zorgvuldig gebeuren omdat de invloed ervan op de uitkomsten erg groot is. De juiste afmeting van de uniforme profielzone is in de tweede fase van deze studie niet gebruikt als calibratieparameter maar is bepaald aan de hand van beschikbare profielmetingen. Als dergelijke gegevens niet beschikbaar moet er gebruik worden gemaakt van 'expert judgement'. Hoe de waarde wordt ingesteld heeft effect op de onzekerheidsmarge. Het gebied waarin de USB wordt toegepast moet feitelijk worden bepaald aan de hand van de morfodynamiek. De snelle sedimentatie ten noorden van de dam in deze studie had mee moeten worden genomen bij het vaststellen van de contouren van het gebied.

Het lijkt erop dat de Delft3D-RAM module met gebruik van de USB in de gebruikte model opzet 'moeite heeft' om de snelle veranderingen ten zuiden van de IJmuider havendammen in de afgelopen 35 jaar goed weer te geven. Het is niet mogelijk gebleken in dit project om die combinatie van parameters te vinden die het gewenste resultaat geeft voor de periode 1968-2002; de berekende kustlijn is erg grillig en er ontstaat een instabiliteit. De voorspellingen voor de periode tot 2030 op basis van een bodem uit 1999 geven meer vertrouwen. Er ontstaat geen instabiliteit en de kustlijn ten zuiden van de dammen is veel

gladder dan in de berekeningen over de voorgaande periode. Dit komt mogelijk omdat de situatie dicht bij het evenwicht ligt waardoor de veranderingen veel kleiner zijn.

In het verlengde hiervan kan ook worden opgemerkt dat Delft3D-RAM met USB gevoelig lijkt voor de bathymetrie dicht bij de kust. Bestaande verstoringen worden uitvergroot waardoor deze de waterbeweging beïnvloeden en weer nieuwe verstoringen ontstaan. Dit betekent een negatieve feedback. Dit kan slechts gedeeltelijk verholpen door een kleinere terugkoppelingstijdstap te gebruiken.

De beperkingen van Delft3D-MOR worden bepaald door de beperkingen in de kennis van de processen. Dit geldt vooral voor de transportformuleringen. Dit betekent dat een model als RAM niet ingezet kan worden voor de voorspelling van heel verschillende aspecten van een systeem. Voor elk aspect is een specifieke afregeling vereist zoals duidelijk is geworden in de eerste fase van deze studie. De indruk bestaat dat Delft3D-RAM op relatief 'dieper' water robuuster is dan heel dicht bij de kust en in de buurt van kunstwerken. Hierdoor is ook de voorspelkracht op dieper water groter. Wel is het zo dat de hoeveelheid metingen verder van de kust kleiner is op dieper water waardoor het moeilijker wordt om de grootte van de systematische fout te bepalen.

Voor andere toepassingen in de nabije kustzone waarbij de USB wordt ingezet moet er meer aandacht aan het gebruik van de USB worden gegeven.

## 7 Samenvatting en conclusies

### 7.1 Samenvatting

In dit rapport wordt een studie beschreven naar de 'voorspelkracht' van Delft3D-RAM op een termijn van 25-100 jaar. De voorspelkracht van een model wordt bepaald door de kwaliteit van de uitkomsten die het gevolg is van de systematische en toevallige fouten. In de studie wordt een schatting gemaakt van de grootte van beide soorten van onzekerheden. Een belangrijk onderdeel zijn de meer generieke lessen die uit deze studie kunnen worden getrokken t.a.v. de voorspelkracht van Delft3D-RAM. Hiervoor is de casus 'IJmuiden' gebruikt waarin de aandacht vooral uitging naar de bepaling van de evenwichtsligging van het Kennemerstrand.

Dit rapport omvat een beschrijving van de tweede fase van deze studie. Een belangrijke conclusie van de eerste fase is dat de waterbeweging naar tevredenheid wordt gemodelleerd. Na de kalibratie is de afwijking tussen gemeten en berekende waterstanden en stroomsnelheden niet groter dan 5-10%.

In de eerste fase is ook vastgesteld dat het niet mogelijk was om met een instelling zowel de ontwikkeling van de erosiekuil, het Kennemerstrand als de baggervolumes goed te modelleren. Liek (2000) heeft al geconstateerd dat een fijner grid in combinatie met Large Eddy Simulation voor de erosiekuil betere resultaten geeft. Echter voor langere termijn studies is dit in verband met de toenemende rekentijd geen reële optie.

Om de systematische afwijkingen zo klein mogelijk te maken is het model gekalibreerd aan de hand van: de transportformulering, de grootte van de terugkoppelingstijdstap en het gebruik van de 'smoothing routine'. Daarnaast is een gevoeligheidsanalyse gedaan om de invloed van de korrelgrootte en uniformeprofielzone te bepalen. De invloed van een variatie in het opgegeven golfklimaat is aan de hand van 'expert-judgment' bepaald. Deze parameters zijn gekozen op basis van eerdere studies van Jeuken et al. (2002), Steijn et al. (2000) en Boutmy (1998). Een samenvatting van deze studies is te vinden in het rapport van de eerste fase van deze studie.

Na kalibratie worden de gemeten volume veranderingen nabij het Kennemerstrand redelijk (tot goed) gereproduceerd door Delft3D-RAM. Hierbij is de terugkoppelingstijdstap een belangrijke factor terwijl het gebruik van de smoothing-routine geen significant positief effect heeft. Echter, de snelheid waarmee het strand naar voren komt is lager dan in werkelijkheid en de vorm van het strand is erg grillig en ook niet in overeenstemming met de waarnemingen. In de huidige studie is gebleken dat een terugkoppelingstijdstap van 4 maanden nauwelijks andere resultaten geeft dan met gebruik van een tijdstap van 6 maanden. Ook in de studie van Jeuken et al (2000) was de conclusie dat een terugkoppelingstijdstap van 6 maanden en de transportformulering van Bijker het beste resultaat geeft.

Het toepassen van de Uniforme Strand Benadering (USB) moet zorgvuldig gebeuren omdat de invloed ervan op de uitkomsten groot is. De juiste afmeting van de uniforme profielzone is in deze studie niet gebruikt als calibratieparameter maar is bepaald aan de hand van beschikbare profielmetingen. Als dergelijke gegevens niet beschikbaar moet er gebruik worden gemaakt van 'expert judgement'. Hoe de waarde wordt ingesteld heeft effect op de onzekerheidsmarge. Het gebied waarin de USB wordt toegepast moet worden bepaald aan de hand van de morfodynamiek. De snelle sedimentatie ten noorden van de dam in deze studie had mee moeten worden genomen bij het vaststellen van de contouren van het gebied. Bij een begin in 1968 ontstaat na verloop van tijd een instabiliteit ten noorden van de dammen waarvan de oorsprong nog niet helemaal wordt begrepen. Het heeft mogelijk te maken met het feit dat de lokatie nog net binnen het USB toepassingsgebied ligt, door de snelle sedimentatie daar komt de bodem boven de NAP -6m te liggen en wordt de USB toegepast. Dit leidt mogelijk tot discontinuïteiten in de bodemtopografie. Bij een berekening vanaf 1999 is de sedimentatie veel minder en gebeurt dit niet.

Ondanks bovengenoemde problemen is het toch mogelijk gebleken om uitgaande van een gemeten bodem uit 1999 op basis van de baggervolumes een evenwichtssituatie te voorspellen. Op dat moment is er sprake van een constante 'zand-bypassing'. Volgens het model zal deze situatie in de periode 2005 tot 2030 ontstaan. De gegeven marge is het gevolg van marges in de gebruikte korrelgrootte, de gebruikte uniforme profielzone en het golfklimaat. De modelresultaten voor de ligging van de NAP 0 m-lijn zijn te onnauwkeurig om de positie van deze lijn op het moment van evenwicht te voorspellen. Het is zelfs de vraag of er daadwerkelijk sprake is van een volledig 'vaste' ligging. De modelresultaten geven aan dat het strand naar het zuiden toe naar voren blijft komen.

Een marge van 25 jaar is te groot voor beheerders om daar een beleid op uit te stippelen. Bovendien is het niet mogelijk om aan te geven hoeveel het strand naar voren komt in die periode. Het model laat wel zien dat de baggervolumes naar een evenwicht toegaan. Daar staat tegenover dat het niet mogelijk is om een schatting te maken van het te baggeren volume omdat de data niet nauwkeurig genoeg zijn om een kalibratie uit te voeren. Dit betekent dat het model alleen de orde grootte van de hoeveelheid te baggeren zand bepaald.

Het lijkt dat RAM moeite heeft met de snelle morfologische veranderingen en het juist weergeven van de kustlijn. Ook is gebleken dat het USB-concept een dominante rol speelt in de uitkomsten. Voor het juist toepassen hiervan moet de uniforme profielzone, bepaald door de duinhoogte en de referentiediepte goed worden opgegeven.

## 7.2 Conclusies

De belangrijkste conclusies zijn:

1. De morfodynamiek van het gebied wordt op hoofdlijnen door het model goed weergegeven. Het is echter niet mogelijk was om met één instelling zowel de ontwikkeling van de erosiekuil, het Kennemerstrand als de baggervolumes goed te modelleren.
2. De uniforme profielzone bepaald door de duintophoogte en referentiediepte, is geen kalibratieparameter.
3. Het beste resultaat is verkregen met de transportformulering van Bijker en een terugkoppelingstijdstap van 6 maanden. Het verkleinen van de terugkoppelingstijdstap van 6 naar 4 maanden heeft geen significant effect.

4. De onzekerheid in de ligging van de NAP 0 lijn van het Kennemerstrand is te groot om de evenwichtsligging te bepalen. Dit is wel mogelijk op basis van de baggervolumes. Hierbij is de aanname dat de constante sandbypassing een 'indicator' is voor het bestaan van een evenwichtssituatie. Deze situatie ontstaat rond 2010.
5. Op basis van eerder gedane studies is de onzekerheidsmarge in de snelheid waarmee het strand uitbouwt bepaald aan de hand van de variaties in korrelgrootte, uniforme profielzones en golfklimaat. Deze marge is 50% waardoor de periode waarin evenwicht wordt bereikt gelijk is aan 2005-2030.
6. Er is rekening gehouden met een systematische afwijking door het verkeerd invoeren van de baggerdieptes. Dit betekent dat de evenwichtssituatie maximaal 7 jaar eerder kan worden bereikt. Daarnaast is de snelheid waarmee het strand uitbouwt lokaal tot 50% te laag.

### 7.3 Hoe nu verder

Er is een aantal punten die kunnen zorgen voor het verbeteren van de voorspelkracht van Delft3D-RAM:

1. Het dient te worden uitgezocht hoe het USB-concept het meest effectief kan worden ingezet. Dit is zekere van belang bij gedetailleerd kustonderzoek zoals het Kennemerstrand.
2. Het ontstaan van de instabiliteit in het VOPIJmuiden-model ten noordwesten van de dammen wordt op dit moment niet goed begrepen. Dit moet worden uitgezocht waarbij moet worden begonnen met het verifiëren van de hypothese dat dit komt door het te groot nemen van het toepassingsgebied van de USB.
3. Het dient te worden uitgezocht waar de verstoringen in de kustlijn door worden veroorzaakt. Is dit een 'model-artefact' of is het te voorkomen?
4. Delft3D-RAM is op dit model een expert-user model. Er is tijd voor nodig om de werking goed te begrijpen en te kunnen interpreteren. Het opstellen van een volledige beschrijving en manual is noodzakelijk.
5. De grootste verbetering van de voorspelkracht van Delft-RAM en morfologische modellen in het algemeen, moet in eerste instantie worden gezocht in een verbetering van de berekening van de sedimenttransporten en niet van de waterbeweging.
6. Voor een beter inzicht in de voorspelkracht zou een meer fundamentele aanpak met een zogenaamde 'bottom-up aanpak' beter geschikt zijn. Hierbij moet een simpele situatie zoals een rechte kustlijn als uitgangspunt moeten dienen. Dit is bijvoorbeeld gedaan door Visser (2003).

Meer algemene aanbevelingen voor onderzoek ter verbetering van de voorspelkracht:

1. Er moet een duidelijk onderscheid worden gemaakt tussen 1) een studie met als doel het oplossen van concrete beheersvragen en 2) een studie aan de hand van een onderzoeksvraag die naar voren is gekomen bij het beantwoorden van beheersvragen. In het eerste geval vormt 'de casus an sich' het primaire doel terwijl in het tweede geval het om een meer generiek doel gaat waarbij een casus als uitgangspunt kan dienen of als voorbeeld. Hierbij gaat het niet om de *beheersvraag* maar om het *beheersprobleem*.
2. Voor het vaststellen van *de* onzekerheid in, bijvoorbeeld, de evenwichtsligging van het Kennemerstrand zouden meer modellen moeten worden gebruikt. Dit zou mogelijk de systematische afwijking kunnen verkleinen. Hiervoor is het wel noodzakelijk dat er een goed overzicht is van de modellen en hun werking.

## 8 Referenties

Alkyon, 2001.

Boutmy, A.E.G., 1998. *Morphological impact of IJmuiden harbour*. M.Sc. thesis, TUD.

CERC, 1984. Shoreface Protection Manual.

Jeuken et al., 2000. *Modelling van de grootschalige bodemveranderingen in de voordelta van Oosterschelde en Grevelingen*. WL/Delft Hydraulics, Z2422.

Jörissen, J.G.L., 2001. *Strandhoofden gemodelleerd in Delft3D-RAM: strandhoofden als instrument voor het regelen van het langstransport*. MSc thesis, TUD.

Liek, G.A., 2000. *Horizontal large eddy simulation using Delft2D-MOR: the influence of large horizontal eddies on the shape, depth and extent of scour holes*. M.Sc. thesis, TUD.

Nipius, K.G., 1998. *Dwarstransportmodellering m.b.v. Bailard, toegepast op de Voordelta Grevelingen-monding*. M.Sc. thesis, TUD.

Roelvink et al., 1998. *Kleinschalig morfologisch onderzoek MV2, Fase 1: validatie morfologische modellering Haringvlietmonding: verslag modelonderzoek*. WL rapport Z2428.

Roelvink et al., 2001a. Reference scenarios and design alternatives. Phase 1. Perceel 2, subproduct 3, Z3029.10, ONL-Flyland.

Roelvink et al., 2001b. *Calibration and verification of 2D/3D flow models*. Z3029.10, ONL-Flyland.

Roelvink, J.A., van der Kaaij, T., and Ruessink G., 2001, 'Calibration and verification of large-scale 2D/3D flow models Phase I', Subproduct 2 Parcel 2 MARE

Roelvink, J.A., Jeuken, M.C.J.L., Van Holland, G., Aarninkhof, S.G.J., en Stam, J.M.T. , 2001, 'Long-term, process-based modelling of complex areas' , Proceedings Coastal Dynamics '01, ASCE.

Steijn, R.C., Eysink, W.D., van Holland, G. en van de Graaff, 2001, J., 'Bandbreedte morfologische effectvoorspelling-MV2: een onderzoek ten behoeve van natuurtypering, Samenwerkingsverband Alkyon, WL/delft hydraulics, rapportnr. A792/Z3127'

Steijn et al., 2002. *Vervolgstudie Zeeweringen Maasvlakte 2: onderhoud zachte zeewering, ontgroning, aanzanding Maasgeul en aanlegoverwegingen*. Concept rapport.

Tatman, S., 2002. Plan van Aanpak - Fase 2. Perceel 1, deelproduct 14. MARE 20020052.

Van Duin, M.J.P., 2002. *Evaluation of the Egmond shoreface nourishment. Part III: validation morphological modelling Delft3D-MOR*. DC Coasts report, Z3054/Z3148. MSc thesis, TUD.

Van Rijn, L.C. en D.W. Dunsbergen, 2002. *Voortschrijdend Onderzoek Programma; voorstel voor generiek kustonderzoek 2002*. WL rapport Z3224.

Visser, R., 2002, '*Morphological modelling in the vicinity of groynes*', Msc. Thesis, TUDelft.

## A De smoothing routine in Delft3D-RAM (uit Visser, 2003)

### A.1 Description

As starting point for the new procedure, it is assumed that the smoothing mechanism to be implemented in the model represents some physical process that prevents the occurrence of large irregularities in the bed topography. In reality this process will arise out of the interaction between waves, currents and the bed level. In the model however, this adaptation process can not be reproduced directly because its time scale as well as its length scale is smaller than that imposed by the numerical grid and time step. The process is now implemented on a higher scale as a redistribution process, where the degree of redistribution of sediment is determined by a smoothing coefficient and the gradient of the bed level change rate. In contrast to the original procedure the redistribution of sediment will be based on actual transports, so that mass should be conserved. The use of the gradient of the bed level change rates includes the influence of the distance between grid points. After all, when the difference in bed level change rate between two points is supposed constant and the distance between these points is supposed to increase, the gradient of the bed level change rate will decrease.

Without smoothing the bed level change rate is given by:

$$(1-n) \cdot \frac{\partial z_{orig}}{\partial t} + \frac{\partial Sx}{\partial x} + \frac{\partial Sy}{\partial y} = 0$$

in which  $\frac{\partial z_{orig}}{\partial t}$  is the bed level change rate in m/s and  $Sx$  and  $Sy$  are the sediment transports in x- and y-direction in m<sup>3</sup>/s/m. Due to the smoothing procedure a correcting bed level change rate is added to the original bed level change rate:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial z_{orig}}{\partial t} + \frac{\partial z_{corr}}{\partial t}$$

For reasons of simplicity the bed level change rate  $\frac{\partial z_{orig}}{\partial t}$  is now called  $w_{orig}$ . The correcting change rate is the result of correcting transports in x- and y-direction ( $Sx_{corr}$  and  $Sy_{corr}$ ). The correcting transports are assumed to be dependent on a smoothing factor  $\varepsilon$  and the gradient in bed level change rate:

$$Sx_{corr} = \varepsilon \cdot \frac{\partial w_{orig}}{\partial x}$$

$$Sy_{corr} = \varepsilon \cdot \frac{\partial w_{orig}}{\partial y}$$

so that:

$$(1-n) \cdot \frac{\partial z_{corr}}{\partial t} + \frac{\partial Sx_{corr}}{\partial x} + \frac{\partial Sy_{corr}}{\partial y} = (1-n) \cdot \frac{\partial z_{corr}}{\partial t} + \varepsilon \cdot \left( \frac{\partial^2 w_{orig}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_{orig}}{\partial y^2} \right) = 0$$

The form of this equation corresponds to the equation of diffusive transports. The bed level change rate is redistributed over a certain area in a diffusive manner. The smoothing factor  $\varepsilon$  has the dimension [m<sup>2</sup>] and is related to the area over which an irregularity is assumed to be redistributed. Within the RAM-model the proposed procedure can be repeated a user-defined number of times so that irregularities will be stronger reduced.

## A.2 Results

The new smoothing method was first tested for the stationary case to obtain results within a reasonable computational time. Tests were carried out with morphological time steps of two, six and ten days over a simulation period of one year. The applied smoothing factors were 0 m<sup>2</sup> (no smoothing), 10 m<sup>2</sup> and 50 m<sup>2</sup>. First the results are evaluated for a morphological time step of two days. Although no instabilities occur when a smoothing factor of 0 m<sup>2</sup> is applied and smoothing is in fact not necessary, the influence of the smoothing on the results can easily be considered. It appears that the results with a smoothing factor of 0 m<sup>2</sup> and 10 m<sup>2</sup> are identical after one year.

The results of the simulation with a factor of 50 m<sup>2</sup> differ slightly within the uniform profile zone, as shown in Appendix F. The differences in bottom level occur around the waterline and measure 0.10 m at maximum. The uniform beach profile turns out to get somewhat steeper. According to the "uniform beach profile" method the shape of the profile should not change. However, the smoothing is also applied within this zone and causes small changes in the profile. The small grid spacing, which is generally present in this zone, enlarges the effect. As long as the effect stays limited to a few centimetres per year and the simulation time is limited to a number of years no problem arises. With higher smoothing factors the development of the beach profile should be watched carefully. It is then up to the user of the model to decide whether the reduced computational time or the constant beach profile is preferred.

A second cause of possible inaccuracies introduced by the smoothing procedure is the fact that no special measures are included yet to prevent the exchange of sediment through the groyne due to smoothing. Apparently these transports are very small, as the influence on the morphological development around the groyne is at least not visible in the plot.

With the tests involving a morphological time step of two days it is demonstrated that the application of smoothing factors up to 50 m<sup>2</sup> leads to reliable results. Next a comparison is made between the results with several time steps and a smoothing factor of 50 m<sup>2</sup> (see Appendix F). A simulation, with a time step of six days without smoothing, shows that already after two months instable bottom changes occur at the foot of the uniform profile zone, directly upstream of the groyne. When smoothing is applied with a factor of 50 m<sup>2</sup> the bottom instability is suppressed and the morphological development of the beach is simulated over a whole year without any trouble. Even with a time step of ten days no irregularities occur at all.

When the results of time steps of two, six and ten days are compared, it appears that the morphological time step does have an effect on the erosion and accretion rate. The model with a time step of two days predicts a slower morphological development with less erosion downstream of the groyne and less accretion upstream. The mutual differences between the results of the six day and ten day time step are significantly less. The higher accretion and erosion rate with a larger morphological time step can be understood when it is considered that with the RAM-method only the magnitude of the sediment transports is corrected for the changed bed level. However, close to the groyne also the direction of the sediment transports changes considerably with a changing bed level. With the relatively small time step of 2 days the directions of the sediment transport are adapted more often, resulting in a slightly less pronounced morphological development.

## B Beschrijving van de randvoorwaarden en kalibratie van de berekening van de waterbeweging

### B.1 Getij

De randvoorwaarden voor het IJmuidenVOP model zijn aangemaakt met het ZUNO-fijn model (Roelvink et al., 2001) voor het Noordzee bekken dat wordt aangedreven door astronomische randvoorwaarden en door wind, zoals geschematiseerd in §3.4.3. De morfologische berekeningen zijn uitgevoerd met een zogenoemd cyclisch morfologisch getij. Dit is een 745 minuten lange periode (een enkele dubbeldaagse getijcyclus) die resulteert in hetzelfde tijdsgemiddelde kustlangse sediment transport als het lange termijn getij-geïnduceerde langstransport. In navolging van Roelvink et al. (1998) en diverse andere studies (zoals, Roelvink et al. (2001a,b), Van Duin (2002)), is dit cyclisch getij gebaseerd op de periode 4 augustus 1988 11:35 tot en met 5 augustus 1988 12:25, zie voor meer details Roelvink et al. (1998). Het gekozen 'morfologische getij' is ongeveer 5% groter dan een gemiddeld getij. Om morfologische berekeningen voor elk willekeurig moment in de tijd mogelijk te maken zijn de originele tijdserie randvoorwaarden omgezet in astronomische randvoorwaarden door middel van een getij-analyse op de tijdseries. Zoals aanbevolen door Roelvink et al. (1998) zijn hierbij de oneven getijcomponenten verwijderd.

In het IJmuidenVOP model is de noordrand een waterstandsrand, terwijl op de west- en zuidrand snelheidsinformatie wordt opgeleid.

### B.2 Golven

#### Schematisatie randvoorwaarden

Voor de schematisatie van het golfklimaat is gebruikt gemaakt van de 3-uurlijkse metingen van significante golfhoogte  $H_{m0}$ , piekperiode  $T_{piek}$  en hoek van inval  $\theta$  van de IJmuiden boei YM6 over de periode 1979-1998. Voor de richtingssector  $15^\circ$ - $195^\circ$ N wordt aangenomen dat er geen golven zijn. De resterende sector  $195^\circ$ N- $15^\circ$  (via west) is opgedeeld in  $30^\circ$  brede sectoren. Voor elke sector is vervolgens een representatieve golfhoogte  $H_{rep}$  berekend, volgens

$$H_{rep} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} H_{m0}(i)^{2.5} \right]^{0.4}$$

Hierbij is  $i$  een integer en  $N$  het aantal golfwaarnemingen in de richtingssector in kwestie. De macht 2.5 is de machtsrelatie tussen sediment-transport en golfhoogte in de CERC (1984)-formule. Alhoewel in deze studie de CERC formule niet gebruikt wordt, wordt de macht 2.5 ook toegepast wanneer andere sedimenttransport formuleringen worden toegepast, zoals die van Bijker en Soulsby-Van Rijn, zie bijvoorbeeld Roelvink et al.

(2001a,b). De piekperiode in elke sector is de gemiddelde waarde van de waarnemingen in de sector in kwestie.

Dit leidt tot de volgende schematisatie van het golfklimaat:

Tabel B.1 Schematisatie van het golf- en windklimaat

|     | Golfcondities        |                       |        | Windcondities        |          | voorkomen<br>(%) |
|-----|----------------------|-----------------------|--------|----------------------|----------|------------------|
|     | H <sub>rep</sub> (m) | T <sub>piek</sub> (s) | θ (°N) | U <sub>w</sub> (m/s) | dir (°N) |                  |
| W00 | -                    | -                     | -      | 6.7                  | 91       | 21.01            |
| W01 | 1.75                 | 5.8                   | 210    | 9.9                  | 204      | 12.38            |
| W02 | 1.94                 | 6.0                   | 240    | 10.3                 | 228      | 17.12            |
| W03 | 2.01                 | 6.1                   | 270    | 9.3                  | 260      | 10.21            |
| W04 | 1.92                 | 6.3                   | 300    | 8.3                  | 283      | 10.31            |
| W05 | 1.83                 | 6.6                   | 330    | 6.8                  | 321      | 15.47            |
| W06 | 1.39                 | 6.1                   | 360    | 6.0                  | 17       | 13.51            |

De golfcondities in Tabel 3.2 worden op de westelijke rand als mede op beide laterale randen opgelegd. De IJmuiden havendammen zijn geïmplementeerd als obstakels met een transmissie-coëfficiënt van 0%. De windcondities in Tabel 3.2 worden in §3.4.3 toegelicht.

### Golf-stroom interactie

Golven zullen tijdens laag water of hoog water op verschillende plekken dissiperen. Om dit effect tot uiting te brengen in de stromingsberekening (golf-stroom interactie) wordt op een aantal karakteristieke tijdstippen in het getij een (stationaire) golfberekening uitgevoerd. Waterstand en stroomsnelheden berekend in Delft3D-Flow worden gebruikt om in Delft3D-Wave de golfkrachten te berekenen. Delft3D-Flow gebruikt de golfkrachten vervolgens om op de beschikbare tijden golf gedreven stromingen te berekenen. In de onderstaande tabel staan de tijden beschreven waarop een golfberekening wordt uitgevoerd.

Tabel B.2 Tijden waarop golfberekeningen worden uitgevoerd, ten opzichte van de referentie tijd

| Tijd (uren) | tijd (minuten) | beschrijving waterstandscondities |
|-------------|----------------|-----------------------------------|
| 1:36        | 96             | laag water                        |
| 3:36        | 216            | nul-doorsnijding                  |
| 5:36        | 336            | hoog water                        |
| 10:00       | 600            | nul-doorsnijding                  |

### Overig

Zoals reeds vermeld in §3.1, wordt in de huidige studie het golfvoortplantingsmodel SWAN gebruikt. De berekeningen worden uitgevoerd op hetzelfde kromlijnige grid als gebruikt door Delft3D-FLOW, zie Figuur 3.1. Gebaseerd op ervaringen in de ONL-Flyland studies (Roelvink et al., 2001a,b,c), is SWAN gebruikt als tweede-orde generatie model. De volgende processen zijn tijdens de berekeningen geactiveerd: dissipatie door bodemwrijving (Jonswap formulering), dissipatie door breken (Battjes-Janssen formulering), niet-lineaire triade interactie, golfgroei door wind, whitecapping, quadruplets en refractie. In alle gevallen is gebruik gemaakt van default instellingen.

## B.3 Wind

De schematisatie van het windklimaat is gebaseerd op windgegevens gemeten bij IJmuiden Semafoon gedurende dezelfde periode als waarvoor de golfgegevens beschikbaar zijn. Per golfrichtingssector is de windsnelheid en -richting bepaald die dezelfde kustdwarse en kustlangse windschuifspanning oplevert als de langjarige kustdwarse en kustlangse windschuifspanning in de sector in kwestie. Bij de berekening van de windschuifspanning is gebruik gemaakt van de formulering van Smith en Banke (1975). De gevolgde procedure is identiek aan die in ONL Flyland studies, zie Roelvink et al. (2001a).

## B.4 Afvoeren

De enige afvoer in het IJmuidenVOP model is de afvoer van de IJmuiden sluizen naar de Noordzee. Deze is op gezet op  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ , de langjarig gemiddelde waarde.

## B.5 Opzet van de morfologische berekeningen

De opzet van de morfologische berekening betreft een combinatie van het complexe Delft3D-MOR system en de snelle Delft3D-RAM methode. Met Delft3D-MOR worden de golven, stromingen en sediment transporten berekend. Vervolgens wordt Delft3D-RAM toegepast om een snelle assessment te maken van de bodemveranderingen.

Het stroomschema van één Delft3D-MOR en Delft3D-RAM stap is als volgt. Voor elke conditie (Tabel 3.2) worden achtereenvolgens de volgende modules aangeroepen:

1. FLOW
2. WAVE
3. FLOW (voor het berekenen van golfgedreven stromingen)
4. TRAN

Wanneer alle condities zijn doorgerekend worden de transportvelden gewogen met de wegingsfactoren in Tabel 3.2, leidend tot een 'jaar-gemiddeld' transport. Dit transport gaat de RAM module in, en leidt tot een nieuwe diepte-gegevens. Met het berekenen van deze nieuwe diepte-gegevens zijn we een tijdstap verder gekomen, en herhaalt de procedure zich. Voor conditie W00 vervallen de WAVE en tweede FLOW stap.

Voor doeleinden van archivering, statistiek en reproduceerbaarheid staan in de onderstaande tabel de karakteristieken van de morfologische berekening samengevat

|                                       |                           |
|---------------------------------------|---------------------------|
| Calibratie jaren                      | 1968 – 1986               |
| Validatie jaren                       | 1986 – 2000               |
| Tijdstap FLOW                         | 2 minuten                 |
| Tijdstap TRAN                         | 4 minuten                 |
| Aantal golfcondities                  | 7 (waarvan 1 geen golven) |
| Aantal golfberekeningen per condities | 4, zie Tabel 3.3          |
| <i>b</i>                              | 4                         |
| Diepte waarbij USB wordt geactiveerd  | 6 m                       |

## B.6 Calibratie

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van de calibratie van het IJmuidenVOP model. Deze calibratie valt uiteen in een hydrodynamisch en morfologisch deel. Beide delen komen achtereenvolgens aan bod in §4.2 en §4.3.

Voor de hydrodynamische calibratie is gekozen voor de periode 5 juni - 3 juli 1984. Gedurende deze periode zijn stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd met een Flachsee snelheidsmeter, ruwweg 5 km uit de kust voor Egmond aan Zee (RSP 38; geografische coördinaten: 52°37'30" NB en 4°32'24" OL), op ongeveer de mid-waterdiepte. Voor dezelfde periode zijn ook waterstanden beschikbaar voor het getijstation IJmuiden Buitenhaven, liggend aan de noordkant van de zuidelijke havendam.

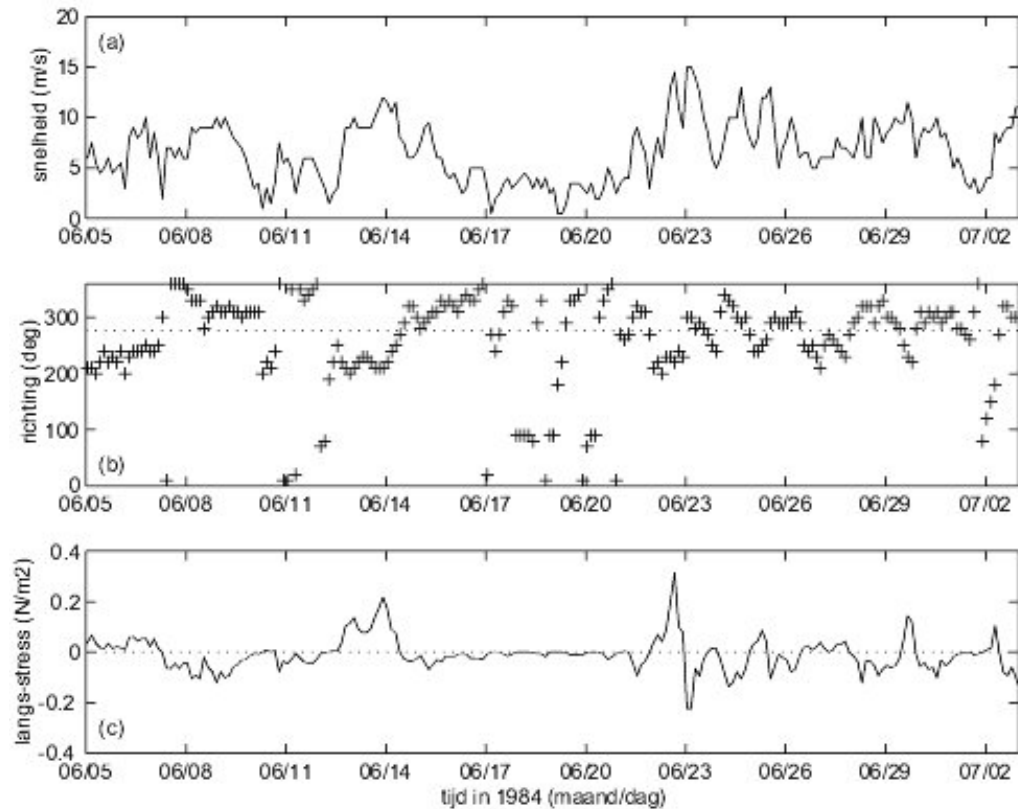
Voor de morfologische calibratie is gekozen voor de periode 1968 - 1986, oftewel, de eerste 18 jaar na het gereed komen van de IJmuiden havendammen. Zoals nader gemotiveerd en geprecisieerd in §4.3, zal de morfologische calibratie plaatsvinden op de NAP +0 m positie van het strand en de baggervolumes van de IJgeul.

### Stroomsnelheden

De calibratie van stroomsnelheden is uitgevoerd aan de hand van de 1984 metingen in de Egmond raai, ruwweg 5 km uit de kust. De randvoorwaarden voor deze berekeningen zijn gemaakt met het ZUNO-fijn model. Hierbij zijn de drie-uurlijks bij IJmuiden gemeten windsnelheden en -richtingen (zie Figuur 4.1) uniform over de Noordzee opgelegd. Omdat de berekeningen in het IJmuidenVOP model gebaseerd zijn op ZUNO-fijn randvoorwaarden, worden de IJmuidenVOP berekeningen ook vergeleken met reeds beschikbare ZUNO-fijn resultaten (Roelvink et al., 2001b). De IJmuidenVOP berekeningen zijn uitgevoerd met de volgende instellingen:

Tabel B-3 Instellingen hydrodynamische 1984 Delft3D\*FLOW run

| Omschrijving                       | Waarde                             |
|------------------------------------|------------------------------------|
| Simulatie-periode                  | 5 juni 00:00 - 3 juli 00:00 (1984) |
| Tijdstap (rekenen)                 | 5 minuten                          |
| Tijdstap (wegschrijven resultaten) | 1 uur                              |
| Ruwheid                            | Manning coëfficiënt, 0.028         |
| Horizontale viscositeit            | 1 m <sup>2</sup> /s                |



**Figuur B.1** Tijdsree van (a) windsnelheid en (b) windrichting, gemeten bij IJmuiden semafoon, opgelegd als een uniform veld aan ZUNO-fijn en IJmuidenVOP model

De gekozen modelsettings zijn identiek aan die gebruikt tijdens de calibratie van het ZUNO-fijn model, zie Roelvink et al. (2001b). De gebruikte bodem is de 1968 schematisatie.

De model-data vergelijking is achtereenvolgens uitgevoerd op (1) de belangrijkste getij-componenten (M2, S2, N2, K1, O1, M4) in de langsstroming en (2) de tijdseries van langsstroming, dwarsstroming en stromingsrichting.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de gemeten en gemodeleerde getij-amplitudes en fases bij Egmond 5 km.

Tabel B.4 Getij-amplitudes en -fases van de langsstroming gemeten en gesimuleerd bij Egmond 5 km, 1984

| Component | Amplitude (m/s) |      |      | Fase (deg) |       |       |
|-----------|-----------------|------|------|------------|-------|-------|
|           | Gemeten         | VOP  | ZUNO | Gemeten    | VOP   | ZUNO  |
| M2        | 0.64            | 0.61 | 0.52 | 124.4      | 114.7 | 109.7 |
| S2        | 0.16            | 0.13 | 0.14 | 175.1      | 167.8 | 162.1 |
| N2        | 0.12            | 0.11 | 0.09 | 105.3      | 90.0  | 88.7  |
| O1        | 0.01            | 0.02 | 0.01 | 209.0      | 179.0 | 171.7 |
| K1        | 0.00            | 0.01 | 0.00 | 88.1       | 26.7  | 302.9 |
| M4        | 0.08            | 0.08 | 0.06 | 214.5      | 236.8 | 222.9 |

Zoals uit Tabel B.4 blijkt, zijn de door het IJmuidenVOP model gesimuleerde getij-amplitudes in goede overeenstemming met de gemeten amplitudes. De belangrijkste

component, M2, is 3 cm/s lager dan gemeten; dit is zo'n 5%. Opvallend is dat de IJmuidenVOP M2 component dichter bij de metingen zit dan op grond van het ZUNO-fijn model; dit geldt ook voor de M2 fase. Ook de amplitudes van de andere twee-dagelijkse componenten worden iets onderschat (1 - 3 cm/s). De IJmuidenVOP fases zijn in het algemeen vergelijkbaar met die van het ZUNO-fijn model, en met die van de metingen. Al met al concluderen we dat de gebruikte instellingen (Tabel B.3) leiden tot een adequate beschrijving van het horizontale getij (althans bij Egmond 5 km) en dat additionele calibratie runs niet nodig zijn.

Tijdseries van de gemeten en gemodelleerde langs- en dwarssnelheden staan in Figuur B.2a en c. De gemodelleerde langssnelheden zijn, zoals reeds verwacht mocht worden uit Tabel B.4, in goede overeenstemming met de metingen. In meer detail, echter, worden de vloodsnelheden (positieve waardes) onderschat tot ongeveer 15 cm/s, vooral tijdens springtij (bijvoorbeeld, 14 juni). Tijdens doottij of gemiddeld tij zijn de verschillen tussen gemodelleerde en gemeten vloodsnelheden kleiner, < 10 cm/s. De ebsnelheden (negatieve waardes) zijn zowel tijdens springtij en doottij in goede overeenkomst met de metingen, met verschillen die in het algemeen kleiner zijn dan 5 tot 10 cm/s.

In de gemodelleerde dwarssnelheden (Figuur B.2c) komt een duidelijk twee-dagelijks signaal naar voren dat niet in de metingen zit (Figuur B.2d). De huidige 2DH benadering is niet in staat om de verticale structuur van de dwarsstroom in de 'kustrivier' te simuleren (zie Roelvink et al., 2001b). In deze structuur zijn snelheden aan de bodem in het algemeen naar het land gericht, terwijl ze hoger in de verticaal naar zee gericht zijn. De verschillen tussen gemeten en gemodelleerde dwarssnelheden is inherent aan de gekozen 2DH aanpak, en kan niet met door een verandering in modelparameters verholpen worden. Omdat zowel de gemeten als gemodelleerde dwarssnelheden vele malen kleiner zijn dan de gemeten en gemodelleerde langssnelheden, is de stromingsrichting bij benadering kustlangs (Figuur 4.2e), en is er een 180° verschil tussen de de noordwaarts gerichte vloedstroom en de zuidwaarts gerichte ebstroom.

## Waterstanden

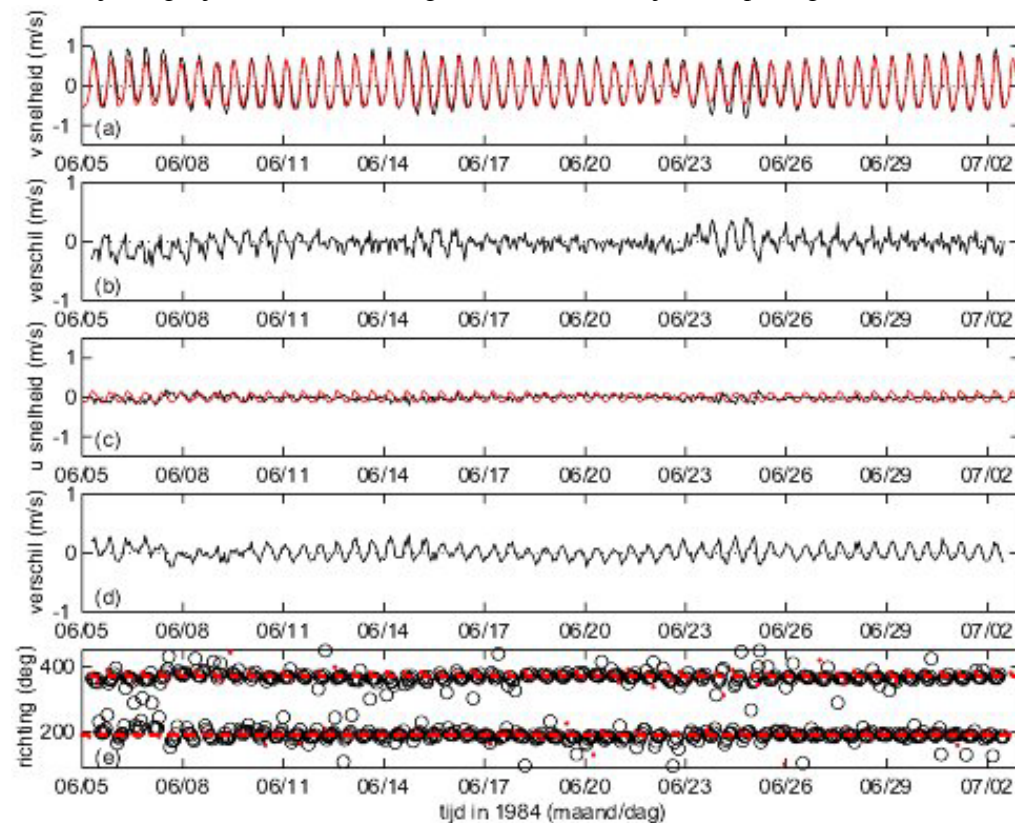
Net zoals bij de stroomsnelheden, vergelijken we bij de waterstanden niet alleen de IJmuidenVOP berekeningen met die van de metingen, maar ook met die van ZUNO-fijn. Deze vergelijking wordt wederom uitgevoerd voor de getijcomponenten en de tijdseries.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de gemeten en gemodelleerde getij-amplitudes en fases in de waterstand bij IJmuiden Buitenhaven.

Tabel B-5 Getij-amplitudes en -fases van de waterstand gemeten en gesimuleerd bij IJmuiden, 1984

| Component | Amplitude (m) |      |      | Fase (deg) |       |       |
|-----------|---------------|------|------|------------|-------|-------|
|           | Gemeten       | VOP  | ZUNO | Gemeten    | VOP   | ZUNO  |
| M2        | 0.69          | 0.76 | 0.68 | 127.8      | 126.2 | 126.2 |
| S2        | 0.18          | 0.18 | 0.18 | 196.1      | 203.8 | 194.6 |
| N2        | 0.09          | 0.15 | 0.11 | 105.6      | 128.7 | 111.6 |
| O1        | 0.12          | 0.15 | 0.15 | 192.8      | 182.4 | 186.3 |
| K1        | 0.08          | 0.10 | 0.09 | 358.4      | 356.8 | 359.9 |
| M4        | 0.20          | 0.24 | 0.20 | 184.5      | 198.1 | 200.7 |

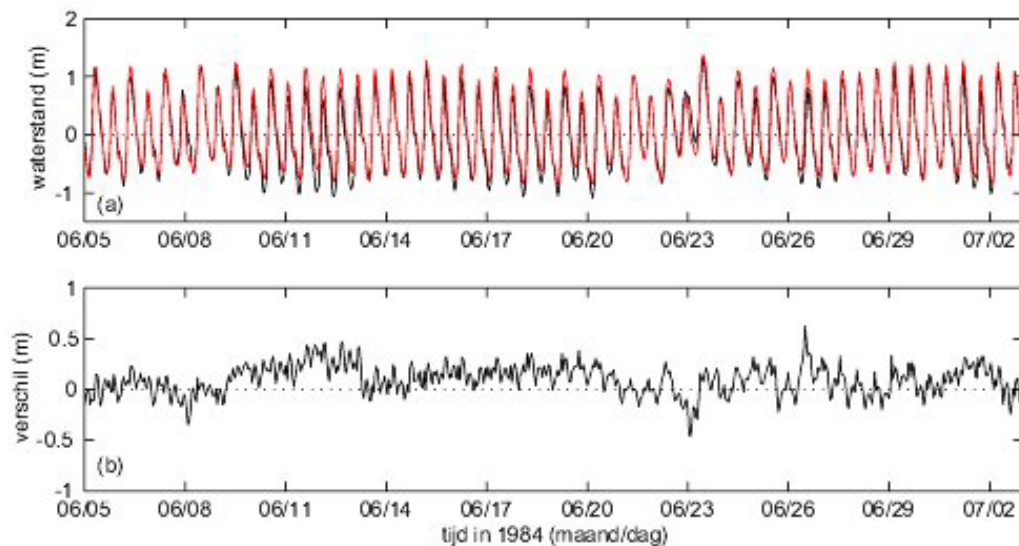
Opvallend is dat de amplitude van de belangrijkste getij component, M2, 7 cm hoger is dan gemeten, dit is zo'n 10%. Ook de N2 component is aanzienlijk hoger dan gemeten en gesimuleerd met ZUNO-fijn, in dit geval zo'n 60%. De overige amplitudes, als mede alle fases, zijn vergelijkbaar met de metingen en met ZUNO-fijn voorspellingen.



**Figuur B.2** Tijdsreeksen van (a) berekende (rood) en gemeten (zwart) langssnelheid, (b) het verschil tussen berekende en gemeten langssnelheid, (c) berekende (rood) en gemeten (zwart) dwarssnelheid, (d) het verschil tussen berekende en gemeten dwarssnelheid en (e) berekende (rood) en gemeten (zwart) stromingsrichting bij Egmond aan Zee.

Tijdsreeksen van de gemeten en gemodeldeerde waterstand zijn weergegeven in Figuur 4.3a. De overschatting van de dubbeldagse getij-componenten blijkt voornamelijk bij hoog water, wanneer de waarden tot 20 - 30 cm te hoog zijn, terwijl de waarden bij laag water geringere verschillen geven. Opvallend is verder de systematisch te hoge voorspelde waterstanden in de periode van 9 t/m 13 juni (Figuur 4.3b). Tijdens deze periode neemt het verschil geleidelijk tot orde 50 cm, om abrupt tot 0 cm te reduceren op 14 juni. De periode van 9 t/m 13 juni wordt, zo blijkt uit Figuur 4.1, gekenmerkt door persistente noordenwind, terwijl op 14 juni de wind naar het zuidwesten draait. Deze noordenwind problemen zijn consistent met de ZUNO-fijn verschillen gerapporteerd in Roelvink et al. (2001b). Naar alle waarschijnlijkheid worden de verschillen veroorzaakt door de aanname in de ZUNO-fijn berekeningen (en dus voortwerkend in de randvoorwaarden van het IJmuidenVOP model) dat de wind uniform over de gehele Noordzee wordt opgelegd. Bij noorden wind leidt dit tot een opstuwning over de gehele Noordzee. In werkelijkheid is een windveld ruimtelijk variabel, leidend tot een geringere opstuwning. Bij zuidenwind is dit door de geringere strijklengte van de wind minder een probleem. In fase 2 van het ONL-Flyland onderzoek

(Tatman, 2002) wordt aandacht besteed aan deze problematiek; de resultaten hiervan zijn ten tijde van de uitvoering van het huidige project nog niet beschikbaar.

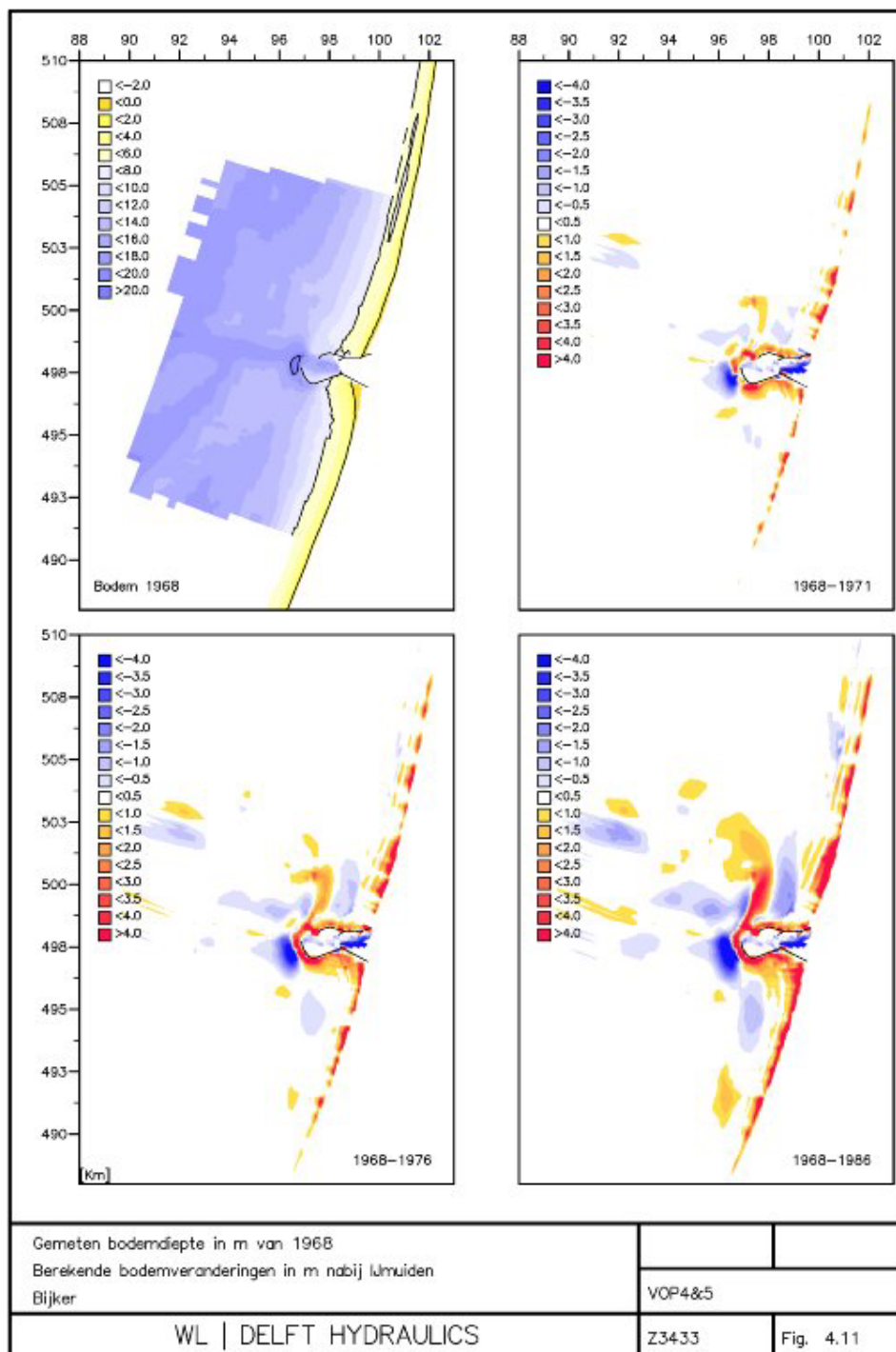


**Figuur B.3** Tijdsreeksen van (a) berekende (rood) en gemeten (zwart) waterstand en (b) het verschil tussen berekende en gemeten waterstand bij IJmuiden Buitenhaven.

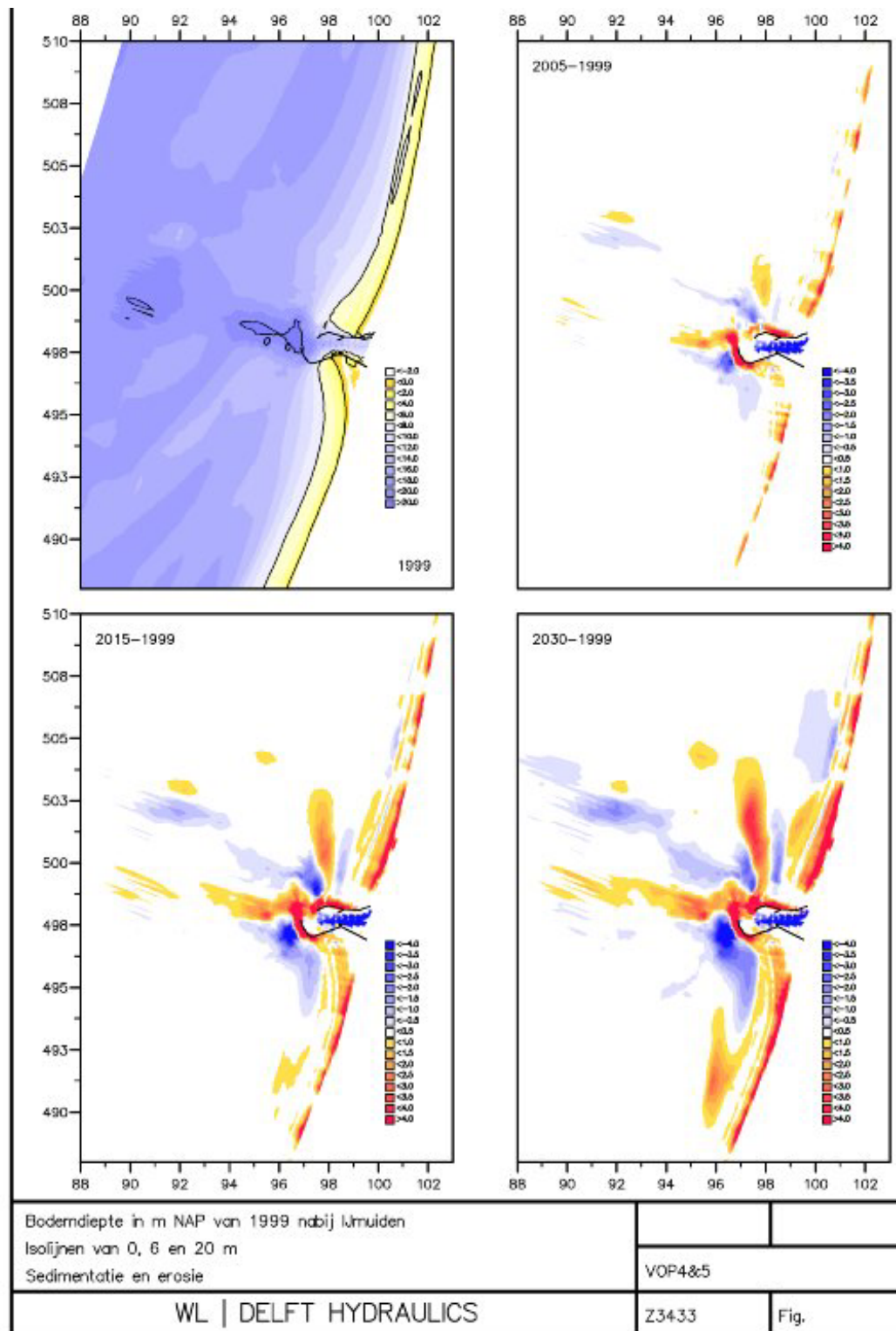
## Discussie en conclusies

In deze paragraaf zijn resultaten gepresenteerd van een data-model vergelijking van het horizontale getij bij Egmond and het verticale getij bij IJmuiden. Daarnaast zijn de modelberekeningen vergeleken met ZUNO-fijn berekeningen. Het moet worden opgemerkt dat de ruimtelijke dekking van de data-model vergelijking beperkt is. Vooral het ontbreken van stroomsnelheidsgegevens rond de havendammen van IJmuiden is hierbij onfortuinlijk. In het algemeen kan op grond van de beschikbare data worden gezegd dat het IJmuidenVOP model het horizontale en verticale getij goed simuleert met model-instellingen gebaseerd op de door Roelvink et al. (2001b) uitgevoerde calibratie van het ZUNO-fijn model. De amplitude van de belangrijkste getij-component is binnen 5% van de metingen in het horizontale getij en binnen 10% van de metingen in het verticale getij. Additionele modelruns worden derhalve niet uitgevoerd. Het gebruik van het ZUNO-fijn model voor de IJmuidenVOP berekeningen brengt met zich mee dat de waterstanden tijdens noordenwind overschat zullen worden tot orde 50 cm. De gekozen 2DH aanpak impliceert dat de dwarsnelheden niet adequaat kunnen worden weergegeven, aangezien uit metingen en 3D berekeningen is gebleken dat deze een duidelijke verticale structuur bevat. Ondanks deze beperkingen in de huidige modellering wordt geconcludeerd dat de huidige instellingen in de Delft3D\*FLOW kunnen worden gebruikt in het vervolg van deze studie.

## C Initiele erosie sedimentatie



Figuur C-1 Erosie en sedimentatie in de periode 1968-1986 berekend met Bijker, de oude bodem en een tijdstap van 1 jaar,



Figuur C-2 Erosie en sedimentatie in de periode 1999-2030 berekend met Bijker, een aangepaste bodem en een tijdstap van 6 maanden.