

Bestemd voor:

RIKZ

## Update inzichten gaswinning

Voorspelbaarheid van het Waddensysteem

L. van der Valk, W.D. Eysink en Z.B. Wang

Notitie

Juni '04

**WL | delft hydraulics**

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Voorspelbaarheid Waddensysteem.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Met betrekking tot de voorspelbaarheid van het waddensysteem: een samenvatting en conclusies morfologische studie IBW .....</b>	<b>4</b>
2.1	Aanpak morfologische studie .....	4
2.2	Algemene conclusies .....	5
2.3	Noordzeekust .....	5
2.4	Wadplaten .....	7
2.5	Geulen.....	9
2.6	Kwelders en duinen .....	9
2.7	Opmerkingen .....	10
<b>3</b>	<b>Overzicht nieuwste gegevens eigen dynamiek Waddensysteem.....</b>	<b>14</b>
3.1	Het Waddengebied .....	14
3.2	Hoe werkt het waddensysteem?.....	14
3.3	Verwachte autonome ontwikkeling van het Waddensysteem .....	16
3.4	Autonoom en door de mens bepaald gedrag van het Waddensysteem: toegenomen inzicht in de samenhang van de natuurlijke processen sinds 1998 .....	18
<b>4</b>	<b>Monitoring.....</b>	<b>19</b>
4.1	Inleiding.....	19
4.2	Inrichting monitoring programma .....	19
	Indicatoren .....	20
4.3	Nulmeting .....	21
<b>5</b>	<b>Met betrekking tot de effecten van suppleties .....</b>	<b>22</b>

<b>6</b>	<b>Literatuur .....</b>	<b>25</b>
----------	-------------------------	-----------

# 1 Voorspelbaarheid Waddensysteem

Er bestond verschil van mening over de mate van voorspelbaarheid van het Waddensysteem, mede vanwege de grote natuurlijke dynamiek en de mate van bodemdaling. Aan de orde is of er voldoende garanties vooraf en voldoende risicodekking in relatie tot het voorgestelde gaswinningssysteem gegeven kunnen worden. Sinds het verschijnen van het IBW (rapport Integrale Bodemdalingsstudie Waddenzee, 1998) zijn nieuwe inzichten verkregen t.a.v. de modellen en de eigen dynamiek van het systeem.

Gevraagd wordt:

1. Met betrekking tot de voorspelbaarheid van het Waddensysteem:

- Een overzicht van de modelconclusies uit het IBW en de veranderingen hierin op basis van nieuwe literatuur. De conclusies betreffen met name de kritische grenzen voor verdrinking van de wadplaten in het kombergingsgebied. Ook is van belang of de gebruikte modellen zijn gevalideerd.
- Een overzicht van de nieuwste gegevens over de eigen dynamiek van het systeem
- Een oordeel over de verandering van de mate van voorspelbaarheid sedert het IBW.

2. Met betrekking tot een nulmeting:

De enorme dynamiek van het gebied (morfologisch en ecologisch) maakt dat elke nulmeting per definitie een momentopname is van deze dynamiek. Jaarlijks voegt Rijkswaterstaat door dieptepeilingen kennis toe aan de informatie over de ontwikkeling van het gebied. Het gedrag van geulen en platen is goed bekend. Er wordt gevraagd in te gaan op de morfologische nulmeting door een beknopte beschrijving te geven van de ontwikkeling van het gebied (toestand, variabiliteit en trend). Tevens wordt er gevraagd om een advies over de vraag of morfologische veranderingen te relateren aan zijn gaswinning, dan wel wat er voor nodig is om dit te kunnen.

3. Met betrekking tot de effecten van suppleties

- Kwantiteit van het sediment - kan het sediment wel in voldoende mate aangevoerd worden? Van belang hierbij zijn de grenzen van het sedimentimporterend vermogen van het zeegat en de snelheid waarmee materiaal uit de kust kan worden afgevoerd in relatie tot de zandbehoefte door bodemdaling.
- Kwaliteit van het sediment - heeft het suppletiezand door haar grotere korrelgrootte niet een negatieve invloed?
- De effecten van de in het suppletiezand aanwezige slibfractie - welke gevolgen heeft de slibfractie op de troebelheid in de Waddenzee en slibfractie van de bodem?

Een vierde vraag heeft betrekking op eventueel niet-lineair gedrag van het Waddensysteem. Deze vraag is in een aparte notitie behandeld (Wang, 2004).

In de volgende paragrafen is getracht een zo goed mogelijk antwoord op deze drie vragen te geven binnen het bestek van de opdracht.

## 2 Met betrekking tot de voorspelbaarheid van het waddensysteem: een samenvatting en conclusies morfologische studie IBW

In het onderzoek naar de morfologische effecten van de bodemdaling door gaswinning is in principe uitgegaan van drie scenario's voor de zeespiegelrijzing (ZSR) (18 cm/eeuw, 60 cm/eeuw en 100 cm/eeuw) en twee voor de bodemdaling (minimum en maximum daling). Om de nieuwe schattingen van ZSR volgens IPCC scenario's (2001) te verwerken (respectievelijk 9 cm/eeuw aan te passen voor het waddengebied naar 18 cm/eeuw; 48 cm/eeuw en 88 cm/eeuw) was binnen de huidige opdracht geen tijd voorhanden. Er overigens niet verwacht dat de gereduceerde midden- en hoge scenariowaarden veel uit zullen maken voor het verloop van de morfodynamische processen in het Waddengebied, ook niet voor de door bodemdaling agv gaswinning veroorzaakte compensatiemechanismen. Het totaaleffect van bodemdaling zal op termijn alleen iets hoger uitvallen dan ZSR alleen.

### 2.1 Aanpak morfologische studie

De morfologische respons van het waddensysteem met het bijbehorende deel van de Noordzee is door WL | Delft Hydraulics bestudeerd met behulp van de modellen MORRES, ESTMORF en ASMITA. Het zijn "state-of-the-art" modellen voor het voorspellen van morfologische ontwikkelingen van een getijdebekkensysteem waarvan het dynamisch evenwicht wordt verstoord en het aanpassingsproces lange tijd kan vergen. In alle drie modellen wordt deze aanpassing berekend op basis van verstoringen in het sedimenttransport in de evenwichtssituatie. Deze verstoringen leiden tot (andere) gradiënten in het sedimenttransport, waardoor afwijkende sedimentatie en erosie in het systeem optreedt totdat er weer nieuw evenwicht is. Door de sedimenttransporten op een relatieve manier en op een hoog integratieniveau te beschrijven, zijn de modellen stabiel en niet rekenintensief, terwijl toch de morfologische processen goed worden benaderd (geen black-box of volledig empirisch model). Voor een betrouwbaar resultaat moeten randvoorwaarden en bepaalde modelparameters via ijking worden afgeregeld.

**De ESTMORF- en ASMITA-modellen, zijn afgeregeld op het waargenomen morfologisch gedrag van het Friesche Zeegat vóór (geen verstoring) en na de afsluiting van de Lauwerszee (instantane verstoring in de Zoutkamperlaag overeenkomend met een kuil van 30 à 60 miljoen m<sup>3</sup>). De afregeling van het ESTMORF-model is uitgevoerd op basis van het gedrag van de geulen (dwarsprofiel, geulvolume), de hoge en de lage platen (hoogte en oppervlak) in vakken op de buitendelta en in de vloedkommen. Het ASMITA-model is afgeregeld op het volume van de verschillende modeleenheden, die representatief zijn voor respectievelijk het gemiddeld plaatniveau, het geulvolume in de vloedkom, het zandvolume in de buitendelta, de positie van de kustlijn en de diepte van de vooroever.**

**De gecalibreerde modellen bleken in staat om zowel het gedrag van het systeem in de (dynamisch stabiele) situatie vóór de afsluiting van de Lauwerszee als de respons van het sterk verstoorte systeem na de afsluiting van de Lauwerszee goed weer te geven.** Hieruit mag worden geconcludeerd dat de fysische processen voldoende betrouwbaar worden gesimuleerd en de modellen geschikt zijn om de effecten van bodemdaling en versnelde zeespiegelrijzing behoorlijk te voorspellen, zeker in relatieve zin. De grootste onzekerheid van de modellen zit niet zozeer in de wijze waarop het systeem reageert op de bodemdaling, maar meer in de mate waarin dit gebeurt. Hierdoor kan de werkelijke tijdschaal van herstel wat afwijken van de berekende. Door de ijking van de modellen is deze fout zo klein mogelijk gemaakt. **De bodemdalingskuilen zijn allemaal veel kleiner dan de verstoring als gevolg van de afsluiting van de Lauwerszee en dus binnen het geldigheidsgebied van de gecalibreerde modellen. De betrouwbaarheid van de resultaten wordt dus niet beïnvloed door extrapolatiefouten.**

De resultaten en conclusies van deze modelstudies en die van MORRES worden hieronder samengevat.

## 2.2 Algemene conclusies

Het effect van de bodemdaling door gaswinning op de morfologie is vrijwel ongevoelig voor de zeespiegelrijzing. In het algemeen neemt het effect iets af met toenemende zeespiegelrijzing en is relatief klein ten opzichte van het effect van zeespiegelrijzing zelf. Indien bodemdaling plaatsvindt tijdens toenemende zeespiegelrijzing, dan is het resultaat dat een bepaalde situatie 10 à 20 jaar eerder wordt bereikt dan zonder versnelde zeespiegelrijzing. In alle gevallen worden de buitendijkse effecten van bodemdaling in de Waddenzee op termijn (50 à 100 jaar) geheel of grotendeels door de natuur gecompenseerd. Dit geldt niet voor de extra regressie van de Noordzeekust en een geringe verdieping van de diepere kustwateren. Die leveren nl. het sediment voor de compensatie in de Waddenzee (tenzij men een zandsuppletie uitvoert langs de kust).

De voorspelde bodemdalingen zijn grootschalig, maar gering in verticale zin. Hierdoor zullen kustzones een geringe horizontale verplaatsing ondergaan, geulen iets dieper worden en platen geleidelijk iets zakken. Al tijdens het ontstaan van de bodemdaling zal deze gedeeltelijk worden gecompenseerd door sedimentatie, waardoor de effecten op de morfologie verder beperkt blijven. Dit alles heeft tot gevolg dat de hydraulische condities overal slechts marginaal veranderen, waardoor de sortering van sediment en de ecologische randvoorwaarden van het aquatisch milieu niet zullen veranderen. Wel zal het zakken van de platen enige invloed kunnen hebben op het fourageren van wadvogels door een iets kortere droogvaltijd van platen.

Door de natuurlijke "ruis" in het waddensysteem zullen de effecten van verstoringen door bodemdaling in de komende decennia niet of nauwelijks te meten zijn en slechts op basis van theoretische beschouwingen geschat kunnen worden.

## 2.3 Noordzeekust

De effecten van de bodemdaling door gaswinning op de Noordzeekust van de waddeneilanden is verschillend. In principe kan de kustligging direct worden beïnvloed door

bodemdaling van de Noordzeekust zelf (lokaal) en indirect door de zandhonger van de vloedkom.

De Noordzeekust van **Vlieland** wordt niet direct door bodemdaling beïnvloed en ligt op grote afstand van een kleine bodemdaling in de kom van het Vlie en zal dientengevolge geen significant negatief effect ondervinden.

De kust van **Terschelling** zal in een periode van 10 à 15 jaar een geringe lokale extra regressie van maximaal 10 m ondergaan door (maximale) bodemdaling langs de Noordzeekust. Daarnaast zal langs de hele kust een extra regressie kunnen optreden door (maximale) bodemdaling in de vloedkom van het Borndiep, die in de periode van 2000 - 2025 kan oplopen tot maximaal 0,03 à 0,1 m/j. Daarna zal dit weer geleidelijk teruglopen.

De kust van **Ameland** zal het sterkst door de bodemdaling worden beïnvloed. De natuurlijke kustregressie bij de huidige zeespiegelrijzing bedraagt circa 2 m/j. Op de Hon kan de extra kustregressie bij het extreme bodemdalingsscenario oplopen tot maximaal 1,8 à 3 m/j en verder naar het westen tot maximaal 0,9 à 1,5 m/j. Na 2025 loopt dit terug tot een niveau van 0,3 à 0,6 m/j extra dat in elk geval tot het jaar 2100 blijft gehandhaafd. Pas ver daarna zal het weer tot nul zijn gereduceerd.

Ook de kust van **Schiermonnikoog** zal bij het extreme bodemdalingsscenario aanmerkelijk kunnen worden beïnvloed door de gaswinning in de kommen en buitendelta's van de Eilanderbalg en Lauwers. Verwacht wordt dat hier de kustregressie door bodemdaling in de periode 2000 - 2025 kan oplopen tot maximaal 1,1 à 1,8 m/j op de oostpunt en 0,55 à 0,9 m/j in het centrale deel van de Noordzeekust van dit eiland. Na 2025 loopt dit terug tot circa 0,2 à 0,3 m/j in 2035 en blijft dan vrijwel constant tot 2100.

Op **Rottumerplaat** kan de extra kustregressie door gaswinning in de kom van het Schild oplopen tot maximaal 0,2 à 0,6 m/j in de periode 2000 - 2025 of tot 0,3 à 0,5 maal de huidige regressie (grootste van de twee). Door bodemdaling in de Westereems kan hier naar schatting nog eens 0,1 à 0,3 m/j bijkomen. Dit laatste geldt tevens als maximum voor **Rottumeroog**.

De extra kustregressie zal naar verwachting exponentieel groeien in de periode 2000 - 2015 om daarna af te vlakken rond de maximum waarde in de periode 1015 - 2025 en vervolgens geleidelijk asymptotisch weer naar nul terug te lopen. Dit duurt tot na 2100.

Om een vergelijking te kunnen maken tussen het effect van bodemdaling door gaswinning op de Noordzeekust en dat van versnelde zeespiegelstijging, zijn voor Ameland de kustregressie en vooroeververdieping in de periode 2000 - 2100 bekeken. Uit deze vergelijking blijkt dat de extra regressie van de centrale kust van Ameland door bodemdaling in het jaar 2100 minimaal 40 - 50 m bedraagt en maximaal 70 à 80 m. Deze extra regressie is vrijwel onafhankelijk van de zeespiegelstijging. De regressie van de centrale kust door zeespiegelstijging bedraagt over die periode 205 m bij de huidige zeespiegelstijging, 400 m bij versnelde zeespiegelstijging en 567 m bij extreme zeespiegelstijging. **Het effect van zeespiegelstijging is dus belangrijk groter dan dat van bodemdaling door gaswinning.** Bovendien blijkt dat de vooroever in dat geval belangrijk zal verdiepen (resp. 0,11 m, 0,55 m en 0,82 m), terwijl bodemdaling slechts een beperkte verdieping van de vooroever geeft (0,06 à 0,12 m).

**Het effect van bodemdaling op de Noordzeekust is door de relatief grote gaswinning in de vloedkommen van Pinkegat en Zoutkamperlaag verreweg het grootst op Ameland. Uit het bovenstaande blijkt dat het effect daar beheersbaar is en beduidend kleiner dan het effect van zeespiegelstijging.**

## 2.4 Wadplaten

De verschillende modellen geven allemaal aan dat de bodemdaling in de Waddenzee in belangrijke mate wordt gecompenseerd door sedimentatie. Dit geldt in elk geval voor de platen; de geulen zullen in eerste instantie wat achterblijven en verruimen. Op basis van deze resultaten en de extra zandhonger van de vloedkommen berekend met MORRES, kon de volgende classificatie van vloedkommen met bijbehorend compensatieverloop in de tijd worden gegeven:

Klasse	Vloedkommen	Compensatie momentane bodemdaling (volledige compensatie=1)				
		2000	2015	2025	2050	2100
1	Pinkegat, Eilanderbalg, Schild	0	0,55	0,70	0,86	0,92
2	Zoutkamperlaag, Lauwers	0	0,30	0,45	0,65	0,75
3	Borndiep	0	0,15	0,23	0,33	0,38
4	Vlie, Westereems	0	0,10	0,15	0,22	0,25

De cijfers in de tabel hebben algemene geldigheid.

Het effect van versnelde zeespiegelrijzing is in de verschillende modellen duidelijk verschillend. MORRES geeft impliciet dat de platen bij een responsieperiode  $\tau_p = 3$  jaar na 10 à 12 jaar volledig de verhoogde zeespiegelrijzing (dZSR) volgen. De verlaging van de platen blijft hierdoor beperkt tot enkele centimeters ( $= \tau_p \cdot dZSR1$ ). In ASMITA blijven de platen bij versnelde zeespiegelrijzing duidelijk achter (2 à 3 dm bij hoge ZSR) en hebben in 2100 nog geen nieuw evenwicht bereikt. ESTMORF, met de meest gedetailleerde schematisatie, geeft resultaten die tussen die van beide andere modellen in ligt.

In principe is elk model zo goed mogelijk afgeregeld gebaseerd op beschikbare gegevens uit de natuur, doch er bestaan verschillen in de schematisatie in de modellen, i.e.:

- In ASMITA zijn de plaat- en geularealen gekozen en kunnen alleen de plaathoogte en geuldiepte variëren.
- In ESTMORF kan door geulverbreding plaatverlies optreden dat zich echter (door de numerieke schematisatie) moeilijk kan herstellen en er vindt ook geen compensatie plaats door grensverschuiving aan kwelderzijde. Hierdoor wordt plaatverlies in ESTMORF overdreven.
- In MORRES treedt verandering in plaatareaal op door grensverschuivingen aan geul- en kwelderzijde bij verandering van plaathoogte zonder vervorming van de platen. In werkelijkheid kan het plaatverlies groter zijn door verruiming van de geulen als gevolg van erosie van de plaatranden.

**Daarom moeten de verschillen in de modelresultaten als onzekerheidsmarge worden gezien en zijn na afweging van verschillende aspecten praktische relaties gekozen om de resultaten van ESTMORF via MORRES naar de overige vloedkommen te vertalen.**

Een redelijke schatting van het uiteindelijke maximale verlies van plaatareaal wordt verkregen door de MORRES-resultaten voor  $\tau_p = 3$  jaar te vermenigvuldigen met een factor 5. De gegeven MORRES-waarden gelden als ondergrens bij maximale bodemdaling. Bij minimale bodemdaling zijn alle waarden een factor 0,6 lager.

Vloedkom	Maximum plaatverlies (km <sup>2</sup> )		Maximum plaatverlaging (cm)	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Vlie	0,02 – 0,10	0,03 – 0,15	0	0,01
Borndiep	0,17 – 0,87	0,29 – 1,45	0,2	0,3
Pinkegat	0,16 – 0,81	0,27 – 1,35	4,3	7,2
Zoutkamperlaag	0,13 – 0,66	0,22 – 1,10	2,0	3,3
Eilanderbalg	0,08 – 0,42	0,14 – 0,70	1,2	2,1
Lauwers	0,18 – 0,90	0,30 – 1,50	1,3	2,1
Schild	0,01 – 0,06	0,02 – 0,10	0,5	0,9
Westereems	0,11 – 0,54	0,18 – 0,90	0,3	0,5

Maximaal verlies aan plaatareaal en plaathoogte door bodemdaling. Scenario volgens NAM (1998): min. is laag scenario en max. is hoog scenario.

Ook voor de relatieve daling van de platen door versnelde zeespiegelrijzing geldt dat de MORRES-resultaten met een factor 5 moeten worden vermenigvuldigd om op waarden uit te komen die vergelijkbaar zijn met die uit ESTMORF. Dit wordt bereikt door toepassing van  $\tau_p = 15$  jaar in plaats van  $\tau_p = 3$  jaar in MORRES. Met  $\tau_p = 15$  jaar zijn daarom de volgende meest waarschijnlijke relatieve dalingsverlopen berekend voor versnelde zeespiegelrijzing (daling in cm).

Jaar	Compensatie momentane bodemdaling (volledige compensatie=1)	Verlaging plaathoogte t.o.v. MSL (cm)	
		ZSR = 60 cm/eeuw	ZSR = 100 cm/eeuw
2005	0,28	1,8	2,9
2010	0,49	3,1	5,1
2015	0,63	4,0	6,6
2025	0,81	5,1	8,5
2050	0,96	6,0	10,1
2100	0,999	6,3	10,5

Verloop relatieve daling van platen bij versnelde zeespiegelrijzing, geldig voor de gehele Waddenzee.

De werkelijke daling van de plaatoppervlakten kan gezien de resultaten van alle drie de modellen globaal een factor 3 hoger of lager zijn. Alleen langdurige monitoring of modellering op lange termijn zal de onzekerheden in dit opzicht verkleinen.

De maximum extra daling door bodemdaling is vrijwel onafhankelijk van de zeespiegelstijging. De waarden voor de verschillende vloedkommen zijn hiervoor al in tabelvorm samengevat en kunnen worden bijgeteld in het jaar 2015. Hierbij zij opgemerkt dat de waarde voor het Pinkegat, door de gekozen schematisatie in MORRES, aan de hoge kant is.

Het verlagen van de platen heeft tot gevolg dat een bepaalde plaats op de plaat vaker per jaar wordt overspoeld door HW en dat de droogvaltijd per getij korter wordt.

Voor het Pinkegat, met een maximale bodemdaling door gaswinning (4,3 à 7,2 cm) leidt dit tot een maximale reductie van de droogvaltijd voor de lage platen en een toename in de overvloedingsfrequentie als gegeven in onderstaande tabel.

Plaatniveau	Droogvaltijd per getij		Overvloedingsfrequentie per jaar	
	Gemiddeld	Max. reductie	Gemiddeld	Max. toename
NAP + 0,7 m	9,0 uur	15 à 25 min	600	17,5 à 29 (2,9 à 4,8 %)
NAP + 0,2 m	6,7 uur	11 à 18 min	700	1 à 2 (0,15 à 0,3 %)
NAP - 0,1 m	5,5 uur	11 à 18 min	705	ca. 0,5 (nihil)
NAP - 1,0 m	2,1 uur	10 à 17 min	706	0 (0 %)

Maximum verlies droogvaltijd en toename overvloedingsfrequentie platen Pinkegat

De maximum reducties worden pas bereikt in de periode 2015 - 2025 en nemen daarna met het opvullen van de bodemdalingskuil zeer geleidelijk weer af.

## 2.5 Geulen

De geulen zullen door de bodemdaling maar het meest nog door de versnelde zeespiegelrijzing verruimen. De veranderingen van de geulprofielen door bodemdaling zijn marginaal (5 procent of minder onder NAP). Door versnelde zeespiegelrijzing kan dit aanmerkelijk meer worden. Doordat echter het getijprisma wat zal toenemen door het achterblijven van de platen, zullen de stroomsnelheden minder reduceren. Het karakter van de getijbeweging in de Waddenzee zal naar verwachting ook bij versnelde zeespiegelrijzing niet belangrijk veranderen.

## 2.6 Kwelders en duinen

In het algemeen worden geen belangrijke negatieve effecten van bodemdaling op kwelders en duinen verwacht. Het is echter niet uitgesloten dat de gaswinning in een aantal kwelderwerken langs de Fries-Groningse kust tot (extra) verlies aan kwelderareaal zal leiden door golfwerking aan de voorzijde. In het algemeen zal de natuurlijke opslibbing op de kwelders zelf de bodemdaling kunnen bijhouden. In enkele gevallen is dit mogelijk niet het geval. Uit ervaringen op Ameland blijkt echter dat dit niet tot aantoonbare ecologische

schade hoeft te leiden. Wel kan enige economische schade ontstaan voor boeren die de kwelders gebruiken (Eysink et al., 2000).

## 2.7 Opmerkingen

### Modelvalidatie in 1998

Zoals al aangegeven in de Samenvatting en Conclusies van het WL-onderzoek (IBW-deelrapport Geomorfologie en infrastructuur) moet worden onderstreept dat de modellen ESTMORF en ASMITA waren gecalibreerd op de ongestoorde situatie vóór de afsluiting van de Lauwerszee en op de verstoorde situatie na afsluiting van de Lauwerszee. In het laatste geval waren de geulen Zoutkamperlaag en Westgat onmiddellijk na de afsluiting in de orde van 30 tot 60 miljoen m<sup>3</sup> te ruim voor het sterk gereduceerde getijprisma. Tevens was de buitendelta veel te groot. Gebaseerd op de beschikbare gegevens zijn de beide modellen afgeregeld en werd de aanpassing van het wadsysteem aan de nieuwe situatie goed weergegeven. Hiermee was duidelijk aangetoond dat de modellen ook geschikt waren voor het simuleren van de effecten van de veel kleinere en langzaam groeiende kuilen door bodemdaling door gaswinning op het wadsysteem. Deze effecten zijn veel kleiner dan die van de afsluiting van de Lauwerszee, waardoor geen extrapolatieprocedure wordt toegepast (werkgebied binnen de verificatiegrenzen). Er is daarom geen enkele reden om de betrouwbaarheid van de resultaten in twijfel te trekken behoudens onnauwkeurigheidsmarges als gevolg van de toegepaste schematisaties. Deze marges zijn duidelijk aangegeven. Alle resultaten van de afregeling zijn opgenomen in het IBW rapport, wat als zodanig een open-proces karakter heeft gekregen.

De onzekerheden in het MORRES-model konden worden afgeschat door de overeenkomstige resultaten uit MORRES en de andere (gecalibreerde) modellen voor de vloedkommen van het Friesche Zeegat (Pinkegat en Zoutkamperlaag) met elkaar te vergelijken.

Tenslotte konden de resultaten van de WL-modellen worden vergeleken met die van het empirische model AEGHIS van de Universiteit van Utrecht. Ook dit model was afgeregeld op de ontwikkelingen in de Zoutkamperlaag. Dit model gaf vergelijkbare resultaten.

### Verdrinking wadplaten

Er wordt door belangenorganisaties erg veel nadruk gelegd op het gevaar van verdrinking van de wadplaten als gevolg van gaswinning. Aan verdrinking van het wad door versnelde zeespiegelrijzing (een veel uitgebreidere en grotere bodemdaling) kunnen we niets doen en bovendien speelt dat gevaar op langere termijn (na 100 jaar); dan pas blijven de platen zoveel achter bij de gemiddelde zeespiegel dat er echt merkbare schade voor de vogelstand zal optreden (bij 30 cm verlaging of meer). Het effect van bodemdaling door gaswinning is een korter durend fenomeen en is dan al weer grotendeels gecompenseerd door extra sedimentatie.

Door de bodemdaling zal een bepaalde situatie bij versnelde zeespiegelstijging 1 tot 2 decennia eerder optreden dan in een situatie zonder bodemdaling. In deze periode is de relatieve bodemdaling echter nog zo beperkt dat dit weinig schade oplevert voor het bodemleven en de vogelstand. Merkbare schade zal pas veel later optreden als gevolg van de doorgaande, versnelde zeespiegelrijzing.

Op basis van de modelresultaten van WL wordt geschat dat een versnelde zeespiegelstijging van 0,6 m/eeuw nog zal leiden tot een wadsysteem met iets lagere platen, maar met een zelfde karakter als nu. Bij een ZSR van 1 m/e bestaat er twijfel of het huidige karakter op langere termijn (na 150 jaar of meer) ook nog bewaard zal blijven, met name in de grotere vloedkommen.

In principe kan het systeem de stijgende zeespiegel volgen, zij het met steeds ruimere geulen en steeds lagere platen naarmate de toename in de zeespiegelstijging groter wordt, zolang de zandvraag kleiner is dan het aanbod in de zeegaten. Dit punt zal bij een groot systeem met een nauwe mond sneller worden bereikt dan bij een kleine vloedkom met een brede mond. Bij een zeespiegelstijging van 1 m/e wordt de zandvraag in de vloedkommen van het Borndiep, het Vlie en de Westereems 42,5 %, 53 % respectievelijk 73,5 % van de geschatte jaarlijkse sedimentinflux (Tabel 2.14 van het WL-deelrapport van IBW).

Op basis van theorie en logisch redeneren is het aannemelijk dat het verdrinken van de wadden geen zaak is van een plotselinge omslag wanneer een bepaalde grens wordt overschreden. Het is logischer dat het systeem bij sterke zeespiegelrijzing over een periode van eeuwen geleidelijk van karakter zal veranderen. In de eerste tijd moet de verstoring groeien om tot stroomreductie en extra sedimentafzetting te leiden. De extra afzetting van sediment overal in de kom vergt tijd, omdat het tijd vraagt omdat het extra zand vanaf de Noordzee tot achterin de kom moet worden getransporteerd. Het is aannemelijk dat de aanvoer aan het eind van de vloedkom bij hogere ZSR steeds meer zal achterblijven. Uiteindelijk kan dat leiden tot een zich langzaam naar het zeegat terugtrekkende vloeddelta en geleidelijk verdrinkende platen achterin de vloedkom (lagunevorming). Bedacht moet worden dat een plaat ca. 2 m hoog is en dat het bij een ZSR van 1 m/e zonder compensatie toch nog meer dan 2 eeuwen duurt voordat de plaat volledig is verdrongen. **Meer inzicht in dit proces is te verkrijgen met ESTMORF-berekeningen over dergelijke perioden.** De procesbeschrijving in ESTMORF laat dit toe (zandvraag mag het aanbod in het zeegat overschrijden). In het model kan zich dan een nieuw stabiel evenwicht met een kleinere binnendelta ontwikkelen of er kan zelfs een situatie ontstaan die nooit meer overal een nieuw evenwicht zal bereiken.

Samenvattend kan gesteld worden dat de modelberekeningen in 1998 goed zijn uitgevoerd, met die aantekening dat verdere beperking van de onzekerheden op zijn plaats was. In de onderstaande paragraaf wordt ingegaan hoe de onzekerheden verkleind konden worden sinds 1998.

## Voorspelbaarheid effecten bodemdaling en ZSR: veranderingen ten opzichte van de situatie 1998

Sinds 1998 zijn met behulp van het modellen ESTMORF en ASMITA een aantal gevoeligheidsexperimenten uitgevoerd. Die experimenten hebben het volgende opgeleverd (Wang & van der Weck, 2002; Kragtwijk et al., 2004) :

1. Het ASMITA model geeft het sediment transport onder invloed van versnelde ZSR goed aan. Het voorspelt dat kleinere bekkens de ZSR beter zullen volgen dan grotere bekkens.
2. Er zijn grenzen vastgesteld waarboven de kleine bekkens respectievelijk de grote bekkens zullen verdrinken. Bij de kleine is dat een maximale snelheid van 60 cm per eeuw; bij de grote is dat 30 cm per eeuw. Volgens Van Goor et al. (2003) is de kans van verdrinking bij deze snelheden van ZSR ongeveer 10% (in stochastische termen). Als men deze limiet hanteert, moet men zich realiseren dat hier een conservatieve schatting wordt gegeven. De werkelijke kritische snelheid van ZSR is waarschijnlijk hoger.
3. Substantieel werk met het ESTMORF en ASMITA modellen is uitgevoerd in de Westerschelde en in de Humber (UK). Daar bleek het model zeer nauwkeurig de optredende veranderingen in de getijden amplitudes te kunnen genereren, waardoor eveneens optredende veranderingen in morfologie nu goed kunnen worden begrepen (Jeuken et al., 2003). Tevens bleek het mogelijk het eventuele baggervolume in de Westerschelde te voorspellen ten behoeve van een betere vaarweg naar Antwerpen (Wang et al., 2003).

De modellen zijn in opzet echter niet veranderd en nog steeds State-of-the-Art modellen, zeker voor voorspellingen over termijnen van 50 - 100 jaar of langer. Sinds de IBW studie van 1998 is ons vertrouwen van de gebruikte (semi-) empirische modellen wel vergroot ook door onderzoek uit te voeren met de proces-gebaseerde modellen. De kloof tussen onze empirische kennis en onze proces kennis is verkleind. Voor een overzicht van de voortgangen in het onderzoek naar morfodynamische modellering voor systemen als de Waddenzee zie Stive en Wang (2003). Het belangrijkste uitgangspunten van de (semi-) empirische modellen is dat er een morfologische evenwichtstoestand bestaat en dat de evenwichtstoestand sterk gerelateerd is aan hydrodynamische parameters. Dit uitgangspunt is steeds meer bevestigd door de resultaten van studies aan de hand van proces-gebaseerde modellen. Vooral de studies met de geïdealiseerde modellen (Schuttelaars en De Swart, 1996, 2000) hebben theoretische bewijs gegeven dat voor de relatieve korte getijdenbekkens in de Waddenzee het morfologische evenwicht inderdaad bestaat en dat het inderdaad moet voldoen aan de relaties zoals door de (semi-) empirische modellen worden gehanteerd. Een ander principe dat de (semi-) empirische modellen hanteren is dat wanneer het evenwicht wordt verstoord het systeem de neiging heeft zich weer te ontwikkelen naar een toestand die weer voldoet aan de evenwichtsrelaties. De onderzoeken met de proces-gebaseerde modellen hebben ook meer inzicht geleverd waarom dit gebeurt. Vooral het onderzoek naar de relatie tussen de getijasympmetrie (die netto sediment transport veroorzaakt) en de morfologie van een bekken heeft hieraan bijgedragen (Dronkers, 1998, Van de Kreeke en Dunsbergen, 2000, Wang et al., 2002). Fundamenteel onderzoek aan de hand van complex proces-gebaseerde modellen zoals Delft3D hebben ook meer inzicht geleverd over gedrag van de getijdenbekkens in meer detail zoals de platen-geulen systeem (Hibma, 2004) en zand-slib segregatie (Van Ledden, 2003). De toegenomen fundamentele kennis maakt dergelijk complex model steeds beter inzetbaar voor studies zoals die naar het effect van bodemdaling.

Samenvattend kunnen we stellen dat de voorspelbaarheid van het Waddensysteem middels modelering is sinds 1998 substantieel toegenomen omdat een aantal onzekerheden konden worden weggenomen danwel sterk verkleind door het uitvoeren van gerichte acties, elk op een verschillend aspect van een van de bestudeerde modelsituaties. Elk van deze acties is inmiddels gepubliceerd (hierboven geciteerd). Verder toename van voorspelbaarheid van het

Waddensysteem wordt eerst verwacht na het aangaan van nieuwe studies, bijvoorbeeld een eventuele nieuwe en meer uitgebreide nulmeting voorafgaande aan gaswinning uit niet eerder geëxploiteerde gasvelden.

## 3 Overzicht nieuwste gegevens eigen dynamiek Waddensysteem

### 3.1 Het Waddengebied

Het Waddengebied bestaat in min of meer de huidige vorm al enkele duizenden jaren. Vanaf ca. 6000 jaar geleden zijn de dynamische, natuurlijke processen zodanig met elkaar in evenwicht dat zich een uitgebreid en nagenoeg uitgebalanceerd Waddensysteem heeft kunnen vormen. Van de vorming van de laatste 2000 jaar zijn de sporen nog aanwezig; de reconstructie van de voorgaande periode berust meest op geologische aannamen. De laatste 1000 jaar heeft de mens zich laten kennen als een factor van belang, waarvan de invloed de laatste 200 jaar zich nog veel sterker heeft vergroot. Zodanig vergroot dat kustlijnen voor bewoonde gebieden zowel langs de Waddeneilanden als langs het vasteland, nu wettelijk vastgelegd zijn en ook op hun plaats moeten blijven liggen. Slechts de onbewoonde uiteinden van de bewoonde eilanden en enkele kleinere onbewoonde eilanden kunnen “vrij” bewegen (met uitzondering van het eiland Griend: ook daar heeft de mens ingegrepen). Tegelijk met de vergrootte greep van de mens op de begrenzingen is ook het gebruik van de Waddenzee sterk toegenomen. Waren in de vorige eeuw alleen “ambachtelijke” vissers actief, plus wat schelpenvissers voor kalkbranderijen, nu beslaat het scala van menselijke activiteiten intensieve productievissers op garnalen en schelpdieren (mosselen, kokkels en enkele andere schelpsoorten), er is veel recreatie en scheepvaart naar en van de eilanden (twee miljoen recreatieve overnachtingen per jaar), het gebied zelf wordt druk bevaren met kleine recreatievaartuigen, er vindt gas- en zoutwinning plaats vanaf het vasteland onder de Waddenzee, en vanaf Ameland. Er is ook een tijdlang zand gewonnen in de Waddenzee. Daarnaast is het een internationaal erkend natuurgebied van hoge kwaliteit, met name vanwege de uitgestrektheid (eilandenreeks, inter- en subgetijdengebied), zoals het deel uit maakt van een internationaal waddengebied wat drie landen omvat, en vanwege de functie die het vervult als vogelverblijfgebied (stand- en doortrek).

### 3.2 Hoe werkt het waddensysteem?

Het Waddensysteem wordt nog niet zolang begrepen in termen van systematiek. Het is met name Prof. van Straaten (RUG) geweest die in de zestiger jaren van de vorige eeuw het Noord-Nederlandse Waddensysteem voor het eerst beschreef in termen van geologische processen (Van Straaten, 1954). Tegelijk ontwikkelde zich de waterstaat van de Wadden die eerst een cartografische inslag had, en pas later een veelmeer technische inslag kreeg met het op hoogte brengen van de Deltakering op de eilanden en langs het vasteland, en het aanleggen van de inpolderingen van de Lauwerszee. Voorafgaande de aanleg van de Afsluitdijk (1932) zijn vooral de gevolgen voor de in af te sluiten Zuiderzee bekeken, en iets minder die voor de Waddenzee. Het Zuiderzee-biologisch onderzoek in de eerste decennia van de vorige eeuw mag gerust een vroeg voorbeeld van een nul-meting genoemd worden. Het onderzoek voor de Deltawet was een eerstvolgend middel om naar langdurige

kustontwikkeling te kijken. De door de mens veroorzaakte veranderingen zijn pas op latere datum van de natuurlijke onderscheiden kunnen worden, met name omdat de opname- en analysetechnieken sterk verbeterden in die jaren. Rond 1960-70 vindt veel fundamenteel onderzoek plaats naar de sedimentologie van waddengebieden (Reineck en Singh, 1975; Dijkema e.a. 1980). Pas recent zijn door middel van de onderzoeksprogramma's van RWS, te beginnen met Kustgenese gedurende de jaren 1985-1995, integrale visies ontwikkeld met betrekking tot kustontwikkeling op verschillende tijdschalen: tientallen, honderden en duizenden jaren. Opmerkelijke vooruitgang werd geboekt in de toename van systeeminzicht in het deltagebied, langs de Hollandse kust en in het Waddengebied.

Gedurende dat proces is in toenemende mate de door de tijd toenemende invloed van de mens begrepen. Met name de analysecapaciteit met behulp van computers (die nog steeds toeneemt) heeft verder bijgedragen aan de verbeterde inzichten, naast gerichte data-acquisitie campagnes op die verschillende tijdschalen. De ontwikkeling van computermodel programma's heeft sinds 1980 een grote vlucht genomen. Er bestaan nu verschillende modellen, elk met zijn eigen merites. Het is sterk afhankelijk van de vraagstelling welk model gebruikt zal kunnen worden. Recentelijk is flinke vooruitgang geboekt met op ervaring gebaseerd model (ASMITA), met name als het gaat om process-response relaties als bijvoorbeeld ten opzichte van bodemdaling/zeespiegelrijzing (zie elders in deze notitie).

Het Waddensysteem kent een aantal overal voorkomende elementen. De kust is opgedeeld in segmenten van eiland tot eiland, of wellicht beter gekarakteriseerd als van waterscheiding (wantij) achter een eiland tot de waterscheiding achter het volgende eiland. Het systeem is zo opgedeeld in cellen. Elke cel heeft de kenmerkende onderdelen: voordelta en omringend zeegebied tot -20m, een naar binnen toe dendritisch-fractaal verdeeld geulsysteem, inter- en subgetijdenplaten. Slechts op enkele plekken bestaan supra-getijdengebied, die toch nog wel zo laag zijn dat ze met stormvloeden onderlopen. In de natuurlijke situatie vormen kwelders de achterrand van het systeem bij GHW; het oppervlak wordt bij stormvloeden opgerekt tot aan de dijk. Elke cel heeft ook, afhankelijk van getijslag en -volume, tijdstip van binnenkomst van het getij, oriëntatie op de overheersende windrichting (en dus ook op de richting van golfvoortplanting), de grootte en diepteligging van het wadoppervlak, en de sedimentkarakteristieken van de ondergrond zijn "eigen" ontwikkeling, uiteraard in samenhang met de aanpalende cellen. Deze externe en interne afhankelijkheid heeft ervoor gezorgd dat de waddengebied is wat het al zolang is: een samenhangend geheel. Effecten in de ene cel zullen op kortere of langere termijn een effect hebben op een andere; effecten op een element binnen een cel zullen effect hebben op andere elementen van de cel.

Uit geologisch en historisch onderzoek is inmiddels bekend hoe grote ontwikkelingen op een bepaalde plek hebben geleid tot grootschalige wijzigingen in het gebied. Voorbeelden hiervan zijn: de doorbraak van de Waddenzee naar de Middellandse Zee en andere laaggelegen en met veen gevulde gebieden; de doorbraak naar de Almere lagune in de 12<sup>e</sup> eeuw; de aanleg van de Afsluitdijk en de afdamming van de Lauwerszee. De effecten van dit soort gebeurtenissen (die als deelsysteem-schokken gekenschetst kunnen worden) hebben repercussies gehad van relatief kortdurende aard, plaatsvindend in een relatief klein gebied. Meer langdurig en regionaal van invloed zijn geweest: de bodemdaling ten gevolge van de post-glaciale isostatische terugvering van Scandinavië (na 18.000 jaar voor heden), gekoppeld aan het afsmelten van landijs resulterend in zeespiegelrijzing, de tektonische bodemdaling, de (auto)compactie van de holocene sedimenten en recentelijk de meer lokale bodemdaling veroorzaakt door gaswinning onder Oost-Groningen en onder Ameland. Dat zijn meer geleidelijk verlopend processen met een uitgesmeerd effect over een groot deel

van het gebied. Elk proces heeft weer zijn eigen tijdschaal en eigen invloedsgebied (bovenstaande factoren zijn ongeveer gerangschikt naar afnemende doorsnede). Het Noord-Nederlandse Waddensysteem (samen met het Duitse en Deense gebied) berust aldus op een delicate balans tussen voortgaande (relatieve) zeespiegelrijzing, sedimentaanvoer en biogene processen. De verankering van de eilandketen aan de westzijde aan de stuwmaraine van Texel is een bijzonderheid, die van veel betekenis is geweest bij de vorming van het gebied en nog steeds is bij de huidige vorm.

Er is veel geschreven over de natuurlijke dynamiek van het gebied. We kunnen concluderen dat de grootschalige natuurlijke dynamiek een pre-conditie is voor het voortbestaan ervan. Als er in de toekomst een van de bovengenoemde factoren zal gaan ontbreken (bijvoorbeeld er zal geen zeespiegelrijzing of bodemdaling meer plaatsvinden, dat is in dit geval om het even), dan zal het met de Wadden op lange termijn gedaan zijn, omdat delen van het bekken dan zullen gaan verlanden. Zal er sedimenttekort optreden, dan zal het bekken geleidelijk aan verdrinken. Wat de biogene factoren betreft, nu al weten we dat het ontbreken van mosselbanken (min of meer verdwenen in de westelijke Waddenzee sinds de strenge winter van 1990/91 en de opgetreden meer intensieve mosselkor-activiteiten sinds die tijd) vermoedelijk leidt tot een algemeen zandiger wadoppervlak in het westelijke Waddengebied. De klei werd immers alleen vastgelegd omdat mossels van uit het water gezeefde klei kleine pakketjes maakten, die onder de heersende stroom –en golf condities konden neerslaan; dat gaat nu niet meer. Daarbij moeten we dan veronderstellen dat dezelfde wind- en getijcondities zullen blijven gelden: daar worden vraagtekens bij gesteld tegenwoordig (bijvoorbeeld: Lindeboom, 2004).

Tot voor twee eeuwen kon de grootschalige morfologie van het Waddengebied zich min of meer vrijelijk aanpassen aan de veranderende omstandigheden. Met de toegenomen (en nu bijna volledige) vastlegging van de geografische grenzen van het systeem, komt het moment in zicht dat de Waddenzee zich niet verder kan aanpassen, door bijvoorbeeld naar het oosten en zuiden gerichte verplaatsing van de waddeneilanden. Die verplaatsingen zouden anders het benodigde sediment voor plaataanwas in de Waddenzee opgeleverd kunnen hebben. Op de lange duur moet voorzien worden dat de mens in deze lacune moet gaan voorzien of anders genoeg moet nemen met het opgeven van eilandgebied.

### 3.3 Verwachte autonome ontwikkeling van het Waddensysteem

De analyse van de ontwikkeling van het Waddengebied zoals uitgevoerd door A. Oost voor de IBW (NAM, 1998) heeft geleerd dat het Waddengebied nog volop in ontwikkeling is. Het westelijke Waddengebied is nog in een jonger stadium van ontwikkeling dan het oostelijke. Dit kan goed begrepen worden uit de verschillende geschiedenis van de beide onderdelen (Oost, 1995; NAM, 1998; Oost en Kleine Punte, 2003). Bovendien kan aangenomen worden dat de ontwikkelingen in het westelijke gebied nog wel enkele eeuwen door het gehele gebied zullen lopen, terwijl de algemene verwachting is dat tevens effecten daarvan zullen doorwerken in het oostelijke gebied. In het oostelijke gebied zelf lopen nog enkele ontwikkelingen die meer lokaal zijn, met in afnemende belangrijkheid: nauwelijks effecten afsluiting Lauwerzee, verplaatsing Rottermerplaat en R'oog; neiging tot dichtsedimenteren

van de Ems wegens overdimensionering (overigens op te heffen door inpoldering van kwelders, zoals historisch gebruikelijk was!).

In het algemeen zullen de volgende effecten merkbaar zijn op elk van de onderdelen van het systeem. In het algemeen is het nuttig om de Waddenzee in een westelijk en een oostelijk gebied te verdelen omdat beide gebieden zich in verschillend ontwikkelingsstadium bevinden.

stysteemonderdelen\gebieden	Westelijk Waddengebied	Oostelijk Waddengebied
vooroever (tot -20m)	Erosie	erosie
<b>ondiepe vooroever (tot ca -15m) en strand</b>	status-quo; erosie met fluctuaties; *	status-quo; erosie met fluctuaties; *
<b>buitendelta's</b>	erosie; lichte uitbouw zeewaarts	erosie (deels aanpassing)
duinkusten	eolisch transport landinwaarts; terugschrijding kustlijn indien niet tot staan gebracht door harde maatregelen	eolisch transport landinwaarts en kustlangs
<b>geulsystemen</b>	langzame verdieping; bovenstroomse aantappingen?	laterale verschuivingen naar het oosten onder invloed van autocyclische processen
<b>verlaten geulen</b>	aan de achterkant: vollopen met sediment (zand en klei; verdeling afhankelijk van seizoen)	langzame sedimentatie als gevolg van verminderd getijdeprisma (Friesche Zeegat; Ems)
subgetijdenplaten	langzame opzanding; wantij verplaatsingen naar oosten	zeer langzame opzanding, gelijke tred met ZSR; langzame wantijverplaatsing naar het oosten.
intergetijdenplaten	langzame opzanding, najlend bij ZSR; gering in oppervlakte	zeer langzame opzanding, gelijke tred met ZSR
kwelders	matige aan- en opwas	doorgaande opwas; enige aanwas

\*: periodiek aangevuld door middel van zandsuppleties in **vet**: gebieden met de hoogste dynamiek

**Tabel 1. Verwachte autonome veranderingen in het Waddengebied per systeem-eenheid**

Bij het lezen van deze tabel moet er vanuit gegaan worden dat alle onderdelen van het systeem met elkaar in verbinding staan en dat materiaal-fluxen van het ene compartiment naar het andere overgaan. Uiteraard is voor elk van die bewegingen een bepaalde samenstelling van processen verantwoordelijk. Hier spelen: golf- en stroomgedreven transport; eolisch transport. Voorafgaand aan sedimentatie van klei vindt biogene filtering en compactie plaats.

**Autonome ontwikkeling van de westelijke Waddenzee-cf. Oost en Kleine Punte (ontwerp tekst, 2003)**

*In het algemeen kan gesteld worden dat de volgende effecten zullen gaan plaatsvinden in de westelijke Waddenzee, die alle reeds waargenomen zijn, en waarvan verwacht wordt dat die effecten voort zullen duren:*

1. *Langzaam doorgaande groei van getijdenvolume van het Marsdiep, vergroting van het kombergingsgebied door mogelijke aantapping van geulen in het bovenstroomse gebied van het Vlie;*
2. *Opschuiven van wantij-liggingen verder naar het oosten;*
3. *Ophoging Balgzand en verdere opvulling geulen die vm Wieringermeer bedienen;*
4. *Voortgezette cyclische veranderingen van geulen in de buitendelta's, met als bijzonderheid de meer ZZW-NNE orientatie van de hoofdgeul van het Marsdiep;*
5. *Kleine zeegaten veranderen weinig; kleine geulen in de buitendelta's zijn minder stabiel.*

### **3.4 Autonoom en door de mens bepaald gedrag van het Waddensysteem: toegenomen inzicht in de samenhang van de natuurlijke processen sinds 1998**

Samenvattend kan gesteld worden dat de effecten van de meest grote en directe ingrepen van de vorige eeuw (afsluiting Zuiderzee en aanleg Wieringermeer); afsluiting Lauwerszee) als proces in hun onderlinge verband bekend zijn geworden sinds 1998; die ingrepen werken nog langzaam na (Oost, 1995; NAM, 1998; Oost en Kleine Punte 2003). Van de bodemdaling in Oost-Groningen en Ameland zijn we tevens goed op de hoogte geraakt van het verloop en de aard van het proces (Op Ameland zijn geen effecten merkbaar op de vegetatie ondanks ietwat achterblijvende sedimentatie, m.a.w. gasextractie verloopt zonder nadelige gevolgen voor de natuurlijke waarden van het beïnvloede gebied; Eysink et al, 2000). Bodemdaling als gevolg van eventuele verder uitgebreide gaswinning is overigens een gekend proces, in binnen- en buitenland. De natuurlijke bodemdaling (inclusief ZSR) in het Waddengebied is echter van een grootheid die het lastig maakt om de bodemdaling ontstaan als gevolg van gaswinning apart te monitoren vanwege de sterk verschillende grootheden (factor 5-10). Als echter het monitoring netwerk voldoende uitgekend wordt neergezet, de achtergrondwaarden voldoende bekend zijn en referentiegebieden tevens gemonitord worden, bestaat een kans dat de bodemdaling als gevolg van gaswinning geregistreerd kan gaan worden. Hier wordt in een ander deel van dit rapport nader op ingegaan. Het EVA-II onderzoek heeft een beter inzicht in de bio-geomorfologische processen gegeven. De resultaten daarvan kunnen nog verder uitgewerkt worden. Een en ander geeft vertrouwen dat er een goed inzicht is in het toekomstige verloop en de eventuele beheersbaarheid van gevolgen van te initiëren verdere ingrepen, wanneer daartoe besloten wordt.

Het is lijkt noodzakelijk dat nieuwe reservoirgegevens worden verworven om de modelberekeningen van bodemdaling als gevolg van eventuele gaswinning te kunnen maken; slechts dan kunnen voorspellingen van voldoende nauwkeurigheid met betrekking tot optredende bodemdaling gemaakt worden. Inmiddels is uit vergelijkend onderzoek naar het Waddensysteem bekend dat een bodemdaling van enkele millimeters (1-4mm/jaar) door het systeem verwerkt kunnen worden, zelfs zonder vertraging. Indien besloten wordt met een vertraging genoeg te nemen, bestaat er nog steeds geen fundamenteel bezwaar om de maatregel uit te voeren: de sedimentaanvoer zal iets langer moeten duren. Een kortdurend verlaagd Wadplaatoppervlak heeft hoegenaamd geen schadelijke invloed op het bodemleven (Beukema, 2001).

## 4 Monitoring

### 4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk gaat in op de vraag over de nulmeting met betrekking tot het monitoren van effecten van eventuele gaswinning. De vraag is als volgt geformuleerd:

*“Een uitgebreidere nulmeting is noodzakelijk om de voor het Waddengebied karakteristieke dynamiek en variatie in de tijd te beschrijven. Pas dan is het mogelijk veranderingen te relateren aan eventuele gaswinning. Dit vraagt om een uitgebreidere inventarisatie gedurende meerdere jaren.”*

De achterliggende vraag is eigenlijk hoe kunnen wij straks de gemeten morfologische veranderingen relateren aan de gaswinning? De genoemde nulmeting is een onderdeel van een monitoring programma dat moet garanderen dat eventuele negatieve effecten van gaswinning tijdig worden gesignaleerd. Om deze vraag te beantwoorden wordt een beknopte beschrijving gegeven van de ontwikkeling van het gebied (toestand, variabiliteit en trend). Tevens worden aanbevelingen gedaan over het inrichten van het totale monitoring programma.

### 4.2 Inrichting monitoring programma

Achtergrond van de vraag is dat men graag het eventueel schadelijke effect van gaswinning snel wil ontdekken via monitoring zodat de gaskraan tijdig kan worden dichtgedraaid als er ontoelaatbare schade wordt gesignaleerd. Het grootste probleem hierbij is dat het effect van de gaswinning relatief klein is t.o.v. de natuurlijke dynamiek van de morfologie van de Waddenzee, zoals in het IBW studie was al geconcludeerd. Dit betekent dat het dan erg moeilijk wordt om het effect van de gaswinning terug te vinden uit de metingen die per definitie betrekking hebben het totale effect van de natuurlijke veranderingen en veranderingen t.g.v. gaswinning en andere menselijke invloeden samen. Met andere woorden de ruis in de metingen is relatief erg groot t.o.v. het signaal dat men wilt meten.

Men kan zich natuurlijk afvragen of het erg is dat het effect van de gaswinning op de morfologische ontwikkeling waarschijnlijk niet te meten is. Het zal immers goed zijn als het effect van de bodemdaling t.g.v. gaswinning klein blijkt zoals de voorspellingen aangeven. Maar de monitoring is bedoeld als extra zekerheid en als bewaking van het optreden van onverwacht effect. Dan is wel belangrijk het effect van de gaswinning te volgen, hoe klein het ook is. Hiervoor is een goed ontworpen monitoring programma vereist. Een compleet ontwerp van zo een monitoring programma valt buiten het kader van deze korte beschouwing. Daarom beperken we ons hier tot een aantal aanbevelingen over hoe het effect van bodemdaling t.g.v. gaswinning op de morfologische ontwikkeling het best kan worden gemonitord.

## Methodologie identificatie van effect

Men kan op twee manieren proberen het effect van gaswinning te identificeren uit de metingen:

Door het zoeken naar trendbreuken in de gemeten ontwikkelingen (in tijd). Als een trendbreuk in de verandering van een bepaalde gemeten grootheid (een indicator) samenvalt met het begin van de bodemdaling t.g.v. gaswinning is het verschil tussen de opgetreden verandering en de doorgaande trend een indicatie van het effect van de gaswinning. Dit houdt in dat de nulmeting behalve de huidige fysieke toestand van het gebied ook de ontwikkelingen (trend en eventuele periodiciteit) moet bevatten (zie volgende paragraaf). Door ontwikkelingen in gebieden onder invloed van gaswinning te vergelijken met die in referentiegebieden waar geen invloed van de gaswinning wordt verwacht. Dit levert dan extra zekerheid over wel dan niet een geconstateerde trendbreuk toe te schrijven is aan het effect van de gaswinning. Hiervoor moet men het monitoring programma, inclusief de nulmeting, niet alleen in bekkens waar bodemdaling t.g.v. gaswinning wordt verwacht maar ook in referentie bekken(s) waar geen invloed van gaswinning wordt verwacht. Als referentie bekken kan men ook denken aan bekkens in de Duitse Waddenzee. Uiteraard moet daarbij bedacht worden dat het selecteren en volgen van een referentiegebied problematisch is, want de ruis is groot en wordt bepaald door natuurlijke EN antropogene invloeden

## Indicatoren

Belangrijk bij het monitoren is het definiëren van geschikte indicatoren. Een bepaalde grootheid kan geschikt zijn als indicator omdat het belangrijke kenmerk en / of functioneren van het gebied weergeeft, of omdat het gevoelig t.o.v. de bodemdaling is. Zonder verder diep in te gaan wordt aanbevolen in ieder geval de volgende drie typen indicatoren in overweging te nemen:

- Werkelijke bodemdaling t.g.v. gaswinning. Deze kan ondergronds worden gemeten. Hiermee kan de ontwikkeling van de schotelvormige kuil van bodemdaling t.g.v. gaswinning worden vastgelegd.
- Morfologische indicatoren. Hierbij kan men denken aan hypsometrie van een bekken of van delen van een bekken. Men kan ook denken aan grootheden zoals plaatareaal, geulvolume, etc..
- Hydrodynamische indicatoren. In de Westerschelde is gebleken dat bepaalde eigenschappen van de getijgolf gevoelig zijn voor morfologische ontwikkelingen. Verdieping van de vaargeul en de samenhangende morfologische veranderingen heeft geleid tot vergrote amplificatie van het getij binnen in het estuarium, verkleind faseverschil tussen binnen en buiten van het estuarium, en veranderde asymmetrie (uitgedrukte in amplitudeverhouding en faseverschil tussen M2 en M4 componenten van het getij) (Wang et al., 2002). Deze eigenschappen van het getij zijn af te leiden uit registraties van waterstanden die relatief eenvoudig te meten zijn. Zij hebben ook het voordeel dat zij instantaan reageren op morfologische veranderingen en omgekeerde zeggen deze grootheden ook iets over te verwachten morfologische veranderingen (Getij asymmetrie is bijvoorbeeld een belangrijk mechanisme voor de import/export van sediment voor de Waddenzeebekkens). Het is zeker de moeite waard om na te gaan of deze grootheden geschikt zijn als indicatoren bij het bepalen van het effect van gaswinning in de Waddenzee.

## Opzet programma

Het monitoring programma zal ten minste twee elementen bevatten: verzamelen van gegevens en analyse van gegevens. Bij verzamelen van gegevens moet men behalve het meten in het veld ook aan andere bronnen van gegevens denken. Vooral bij de nulmeting is dit belangrijk omdat de gegevens gemeten in het verleden een essentiële rol spelen. Bij de analyse van de gegevens leidt men eerst de relevante indicatoren uit de ruwe gegevens en daarna kan wordt geprobeerd het effect van gaswinning te identificeren door het zoeken naar trendbreuk in de veranderingen in tijd en naar verschil in de veranderingen t.o.v. van die in de referentiegebieden. De analyse hoeft zich niet te beperken tot puur data analyse. Men kan ook de analyse laten ondersteunen door modelstudies.

Ten slotte wordt opgemerkt dat het bepalen van het effect van de gaswinning een grote uitdaging is. Daarom wordt aanbevolen om open te staan voor innovatieve meettechnieken zoals remote sensing.

### 4.3 Nulmeting

Nulmeting is een belangrijk onderdeel bij monitoren. Zoals in de vorige paragraaf aangegeven, moet men voor het monitoren van effect van gaswinning vooral zoeken naar trendbreuk van ontwikkelingen in de tijd en verschil t.o.v. veranderingen in referentiegebieden. Dit betekent dat nulmeting niet kan zich beperken tot een moment opname maar ook een analyse van de historische ontwikkelingen moet bevatten. Een goed voorbeeld van hoe men dit kan aanpakken is de MOVE (Monitoring Verdieping) studie die momenteel door RIKZ voor de Westerschelde wordt uitgevoerd. Bij aanvang van MOVE is een uitgebreide beschrijving gegeven van de 'huidige' fysische toestand van het estuarium gegeven (Mol et al., 1997). Nieuw voor het huidige geval is dat de nulmeting ook voor de gekozen referentiegebieden moet worden uitgevoerd. Belangrijk bij het selecteren van referentiegebied is dat een referentiegebied niet door de gaswinning mag worden beïnvloed. Hierbij kan men ook denken aan de Duitse Waddenzeebekkens.

Er is een grote hoeveelheid veldgegevens en rapporten die de morfologie en de dynamiek van de wadden beschrijven (o.a. Van Straaten (1954), Eysink (1992;1993), Oost (1995), Louters en Gerritsen (1997) en NAM (1998). Jaarlijks voegt Rijkswaterstaat door dieptepeilingen kennis toe aan de informatie over de ontwikkeling van het gebied. Het gedrag van geulen en platen is goed bekend.

Voor een beknopte beschrijving van de autonome ontwikkeling van de Waddenzee wordt verwezen naar hoofdstuk 2. Hier wordt alleen nog even kort ingegaan op de dingen waarop men moet opletten bij het analyseren van de gegevens om tot een nulmeting te komen. Belangrijk hierbij zijn de relevante tijdschalen van bodemdaling t.g.v. gaswinning en de morfologische response erop. Bodemdaling t.g.v. gaswinning treedt op in enkele tientallen jaren. De morfologische response op de bodemdaling heeft ook een tijdschaal in de orde van decennia. Dit betekent dan men bij de analyse vooral op ontwikkelingen met tijdschalen in de orde van decennia moet letten. Voorbeelden van natuurlijke dynamiek met dergelijke tijdschalen zijn de response op de 18.6 jaar cyclus van het getij, en de min of meer periodieke migratie van geulen in de buitendelta. Men moet ook letten op de response van de eerdere menselijke ingrepen, omdat die ook tijdschalen hebben in dezelfde orde van

grootte. Als voorbeelden kunnen worden genoemd de afsluiting van de Lauwerszee en de afsluiting van de Zuiderzee. Effecten van beide afsluitingen zijn grotendeels maar nog niet volledig uitgewerkt.

## 5 Met betrekking tot de effecten van suppleties

Het rijk heeft al sinds 1990 op zich genomen om de kustlijn van 1990 te handhaven. In dat verband worden er al regelmatig kustsuppleties uitgevoerd. Varianten van de kustsuppletie zijn strandsuppleties en vooroeversuppleties. De belangrijkste overweging daarbij was kostenbesparing. Suppleties worden zonder MER uitgevoerd. Bodemdaling door gaswinning vraagt een beperkte en tijdelijke extra kustsuppletie op de waddeneilanden (zie IBW). Versnelde ZSR vraagt een blijvend hogere kustsuppletie. Het zij opgemerkt dat dit probleem los staat van eventuele effecten van gaswinning.

### **Voldoende sedimentaanvoer naar de Waddenzee ?**

Afgaande op de reeds millennia zich ontwikkelende en nog steeds bestaande Wadden, kan gesteld worden dat sedimentaanvoer altijd heeft plaatsgevonden. Ook tijdens perioden met snelle tot zeer snelle zeespiegelrijzing (die reeds ver achter ons liggen) bestonden er waddeneilanden met daarachter waddegebieden. Het enige verschil met de huidige tijd is dat de sedimentatiegordels “naar behoefte” landinwaarts konden verschuiven met de stijgende zeespiegel mee. Dat laatste is nu (bijna) niet meer mogelijk. Met behulp van geologische gegevens en reconstructie-methodieken is vastgesteld dat er een bovengrens is aan het “meegroei-vermogen” van wadplaten. Boven een stijging van 3-6 mm per jaar, zo is gebleken, verdrinken wadplaten (de vooralsnog enige goed beschreven historische analoog is voorhanden in West Nederland -Beets & Van der Spek, 2000; zie ook Van Goor et al., 2003). Dat betekent dat als de huidige bodemdaling in het waddegebied op ca. 1,7 mm per jaar gesteld wordt, er nog 1.3 tot 4.3 mm sediment aangevoerd zou kunnen worden (mits bronnen en mechanismen voorhanden zijn).

Gezien de maximale stroomsnelheden in de huidige (en ook fossiele wadgeulen) algemeen op ca. 1 m/s gesteld wordt, en er buiten de geulen veel lagere stroomsnelheden gelden, zal er een praktisch-limiet zijn aan de gemiddelde korrelgrootte die tot op de platen aangevoerd kan worden. Op de huidige Wadden bestaan de plaatszanden over het algemeen uit fijn zand (rond de 160 µm). Dit is de korrelgrootte die in suspensie meegevoerd kan worden. We nemen aan dat dit mechanisme overeind blijft. En omdat transportmechanisme overeind blijft, zal het mogelijk blijven dat sediment van deze korrelgrootte de wadplaten bereikt.

Een vervolgvraag die hierbij gesteld moet is de volgende: is er voldoende zand van die bepaalde korrelgrootte voorhanden in het gebied van de voordelta's en de vooroever van de eilanden? Deze vraag wordt impliciet en kwalitatief in een volgende paragraaf beantwoord.

### **Heeft de gemiddeld grotere korrelgrootte invloed?**

Gezien de effectiviteit van de tot nu toe uitgevoerde suppleties (Mulder, 2000) kan de vraag in zijn algemeenheid ontkennend beantwoord worden. Mulder (2000) geeft aan dat het

zelfregulerend vermogen van het kustsysteem (vooroever en getijdendelta's) zodanig groot is dat suppleties moeiteloos opgenomen worden. Recent onderzoek naar een vooroeversuppletie op Terschelling heeft dat ook bewezen (Guillen en Hoekstra, 1997; Grunnet en Hoekstra, 2004). Tegenwoordig is het mogelijk snel een analyse te plegen van eventuele effecten van suppleties (voorbeeld: De Ruig en Noordstra, 1996). Naar de gemiddelde korrelgrootte van suppletiezand is nog niet veel onderzoek gedaan, maar er is wel altijd geprobeerd een "best fit" tussen de bron en doelgebied te streven. Gezien de overeenkomst tussen de gemiddelde korrelgrootte van de meeste suppletie-zandvoorraden, en van de locatie van de meeste suppleties, meestal hoog in de brekerbankzone of op het strand, heeft dit niet eerder een rol gespeeld. Dat zal met een toenemende behoefte om het zandige kustsysteem, dan inclusief het Waddengebied, anders worden: er bestaat nu een eerder niet herkende, specifieke nood aan fijn zand binnengaats. Daarnaast komt in elke hoeveelheid suppletiezand uiteraard ook een fijnere fractie voor. Zanden met een gemiddelde korrelgrootte van 160  $\mu$ m (de gemiddelde korrelgrootte van wadzand) komen vooral voor op de vooroever van de kust, beneden de -5 NAP en boven de -15 m. (Eisma, 1968), maar die gebieden kunnen niet als bron fungeren op basis van het huidige kustbeleid. Er dient dus naar alternatieven gezocht te worden.

Historisch gezien werden de Wadplaatzanden waarschijnlijk afgezet door opname en transport van de betreffende korrelgrootteklasse uit oudere wadzanden in het eroderende vooroeverprofiel (geologisch gesproken: het "roll-over" model). Door de steeds verdergaande vastlegging van de positie van de Waddeneilanden valt er niet veel meer te eroderen op de vooroever dan reeds plaats gevonden heeft. Er blijft natuurlijk gelden: beter iets te grof zand dan helemaal geen zand. Maar de mogelijkheid bestaat dat er wel degelijk onderhand een tekort aan zand aan het optreden is. De discussie gevoerd door Mulder (2000) geeft dat ook al aan: een grote hoeveelheid zand moet al uit het buitengaats afkomstig zijn, want de uitgevoerde suppleties zijn bij lange niet voldoende om de berekende zandhonger van de westelijke Waddenzee te dekken. Er is een factor 2 tot 3 nodig van wat er door suppleties en kustsysteem geleverd wordt!

Geconcludeerd wordt dat het natuurlijk systeem zo robuust en zelf-regulerend van aard is dat de benodigde hoeveelheid zand van de geschikte korrelgrootte aangeleverd kan worden. Er bestaat een mogelijkheid dat de plaatzanden in het mondingsgebied van de zeegaten een bron zijn van Waddenzand. Tenslotte verliezen de buitendelta's tezamen jaarlijks ca. 3.5  $\text{Mm}^3$  zand (Mulder, 2000)! Dit cijfer geeft tevens aan dat het huidige suppletiebeleid slechts voor een klein deel (ca. 25%) in de echte zandbehoefte van het Nederlandse kustsysteem voorziet (inclusief de Wadden).

### **Worden er gevolgen van toenemende suppletieactiviteit op de slibhoudendheid en troebelheid van het Waddenzee water verwacht ?**

De huidige zandvoorraden die voor suppleties worden aangesproken zijn over het algemeen niet of zeer gering slibhoudend. Uitzonderingen vormen hierop de suppleties die gebruik maken van zand-slib mengsels afkomstig uit onderhoudsbaggerwerk (die met name in Zeeland worden aangewend voor lokale kustversterking-bijvoorbeeld de Kop van Schouwen). Daar zal een zeker percentage slib extra in het zeewater terecht komen dan in andere gevallen.

In de Nederlandse kustzone komen überhaupt weinig slibgebieden voor (ICONA,1992): alleen het gebied van de Vlaamse Banken wordt als brongebied gezien. Uit gedetailleerd

onderzoek is bekend dat er in eroderende gebieden in Zeeland, voor zuidelijk Zuid- Holland, voor de kust van Egmond tot aan Den Helder en lokaal voor de Waddeneilanden fijnkorrelig sediment (plus slib en klei) uit oudere sedimenten opgenomen wordt. Tussen Scheveningen en Egmond kan uit op de ondiepe zeebodem dagzomende oude geulbasis afzettingen (Rieu et al., 2003; Van Heteren et al., 2003) ook fijnkorrelig materiaal opgenomen worden. Voor zuidelijk Zuid Holland ligt tevens nog de Loswal Noord die als puntbron voor fijn materiaal kan fungeren, wat met de reststroom langs de kust getransporteerd kan worden.

Het kan aangenomen worden dat fijnkorrelig materiaal wat in suspensie komt door natuurlijke erosie en tijdens het uitvoeren van bagger c.q. stortwerkzaamheden alleen lokaal een relatief geringe verhoging van het slibgehalte zal veroorzaken. De uitwisseling van de Noordzee naar de Wadden is zo frequent en zo intens dat lokaal geen sterk vergrote troebelheid zal optreden.

Er wordt niet verwacht dat de algehele troebelheid van het Noordzee- en waddenwater significant verhoogd zal worden bij meer suppleties, meer dan al natuurlijk optreedt, hier en daar geholpen door de mens (garnalenvangst; kokkel- en andere schelpdier "visserij") . Bijvoorbeeld, de kokkelvisserij in de Waddenzee brengt een complete omwoeling van de bovenste 5 cm van het wadoppervlak met zich mee en dus het in suspensie brengen van de gehele fijne fractie over uitgestrekte gebieden, verdeeld over een tijdvak van een paar maanden per jaar.

Goede voorselectie van brongebieden van suppletiezand, van precieze locatie en seizoenskeuze zal in vele gevallen een eventueel tijdelijk hoger slibgehalte in het waddenzeewater kunnen beperken tot een minimum boven de natuurlijke belasting uit.

### **Gevolgen van toenemende suppletieactiviteit op de slibhoudendheid van de bodem?**

De langdurige morfologische effecten van de grootschalige ingrepen van de mens in het Waddensysteem worden de laatste ca. 15 jaar intens bestudeerd (Oost, 1995; NAM, 1998; Oost en Kleine Punte, 2003). De natuurlijke processen in de Waddenzee zijn zeer overheersend, met de aantekening dat de door de mens veroorzaakte grote wijzigingen in het Wadden-systeem (afdamming Zuiderzee; afdamming Lauwersmeer etc.) een veel belangrijker invloed hebben op het natuurlijke sedimentatiepatroon in de Waddenzee dan de relatief lokale effecten van baggerwerk, visserij en wat dies meer zij. Zo is volgens deze onderzoekers het zandiger worden van de westelijke waddegebied vooral het gevolg van het nog steeds groeien van het debiet van het Marsdiep. Anderen (Lindeboom, 2004) wijzen ook op een klimatologisch gedreven proces wat "in de laatste tijd" een rol zou zijn gaan spelen.

Feit is dat volgens RIZA (2003) het westelijke Waddegebied zandiger is geworden en het grootste deel van de Waddenzee slibrijker sinds 1950 tot aan 1990. Ook de aanslibbing langs de Fries-Groningse kust (actieve landaanwinning stopt in 1961) wordt hiermee in verband gebracht als gevolg van een "meer beschutte positie" (RIZA, 2003).

De onderzoekingen in verband met de kokkelvisserij (RIZA, 2003) hebben aangetoond dat zelfs voor een gebiedsbestrijkende en langer durende activiteit als het zgn. kokkelvissen het moeilijk was aan te tonen dat de activiteit bijdroeg aan verhoogde slibgehalten in het sediment. Dat wijst erop dat de gestelde vraag zich binnen of net op de grens met de omtrek

van de natuurlijk actieve processen heeft begeven. Het in zulke gevallen zeer moeilijk om tot stellige conclusies te komen. Toch is er geconcludeerd dat de mechanische kokkelvisserij op zowel de korte, midden-lange en lange termijn leidt tot een slibarmere wadbodem. Bij het trekken van die conclusie wordt niet aangegeven of er nog andere oorzaken zijn die mede verantwoordelijk kunnen worden geacht voor deze tendens (RIZA, 2003). Door Oost en Kleine Punte (2003) wordt alleen voor het Balgzand een algemene maaiveldverhoging aan gevoerd, maar die is goed verklaarbaar doordat het gebied niet meer als doorgangshuis hoefde te fungeren voor de Zuiderzee: de snelle ophoging van het Balgzandgebied is dan begrijpelijk als een inhaalmanoeuvre in een luwe hoek sinds de afsluiting van de Zuiderzee in 1932. Oost en Kleine Punte wijzen echter ook op enkele onduidelijkheden met betrekking tot de afname van de buitendelta's en het jaarlijkse te transporteren volume zand: men raakt zand kwijt naar binnen toe en weet niet waar dat aan ligt. Zij opperen dat er met stormtij zand over de wantijen wordt heengevoerd. Die suggestie is lastig te controleren. Diepte kaarten van de Wadden worden in het zomerseizoen gemaakt, en geven dus een "steady state" van jaar tot jaar. Regionale en lokale diepteverschillen van seizoen op seizoen zijn onbekend, maar op grond van waarnemingen op enkele punten zouden die verschillen wel eens aanzienlijk kunnen zijn. Beter inzicht in de seizoensdynamiek van de wadplaten zou een aanmerkelijke verbetering kunnen betekenen in de kennis van de sedimenthuishouding van de Waddenzee. Waarnemingen nabij Ameland onderbouwen deze suggestie (Eysink et al., 2000).

Oost en Kleine Punte (2003) melden verder dat sommige geulen, die hun functie verliezen ook fijnkorrelig sediment gaan invangen, en zo snel ondieper worden. Dit is een gekend principe in een getijdenomgeving (Van den Berg, 1986). De laatste auteur heeft in Zeeland zulke geulopvullingen gedocumenteerd met relatief minder fijn sediment afzetting gedurende de winter en fijnere tijdens de zomer. Dat is echter een sterk lokaal effect. Uiteindelijk bestaat er nog steeds aanwas van kwelders, dus fijnkorrelig materiaal komt op den duur toch in de randzone van de Waddenzee terecht en wordt daarmee aan de circulatie onttrokken.

Indien als gevolg van o.a. gaswinning suppleties op de kust van de Waddenzee worden aangebracht dan kan volstaan worden met het benodigde volume op de drempel van de Waddenzee neer te leggen. Het zelfregulerende transport- en selectie mechanisme van de wadgeulen is volledig in staat de benodigde hoeveelheid zand (matig fijn en fijn) en eventueel aanwezig slib naar binnen te voeren en ter bestemder plaatse te krijgen. Fijn materiaal zal met een relatief korte vertraging in restgeulen sedimenteren en in de kwelders worden opgeslagen.

## 6 Literatuur

Beets, D.J. & A.J.F. van der Spek, 2000: The Holocene evolution of the barrier and the back barrier basins of Belgium and the Netherlands as a function of late Weichselian morphology, relative sea-level rise and sediment supply. *Neth. Journal of Geosciences*, 79, pp. 3-16.

- Beukema, J.J., 2002: Expected changes in the benthic fauna of Wadden Sea tidal flats as a result of sea-level rise or bottom subsidence. *Journal of Sea Research*, 47, pp. 25-39.
- Dijkema, K.S., H.-E. Reineck & W.J. Wolff, 1980: *Geomorphology of the Wadden Sea area*. Balkema, Rotterdam, pp 135.
- Dronkers, J., 1998, Morphodynamics of the Dutch delta. In: Dronkers, J. and Scheffers, M. (eds), *Physics of estuaries and coastal seas*, Rotterdam, Balkema, pp.297-304.
- Eisma, D., 1968: Composition, origin and distribution of Dutch coastal sands between Hoek van Holland and the island of Vlieland. Thesis RU Groningen, pp. 120-267.
- Elias, E., M. Stive, H. Bonekamp & J. Cleveringa, 2003: Tidal inlet dynamics in response to human intervention. *Coastal Engineering Journal* 45, pp. 629-658.
- Eysink, W.D., 1998: Effecten van bodemdaling door gaswinning in en rond de Waddenzee. WL | Delft Hydraulics, Rapport H3099.00.
- Eysink, W.D., Dijkema, K.S., van Dobben, H.F., Slim, P.A., Smit, C.J., Sanders, M.E., Schouwenberg, E.P.A.G., Wietsz, J. & De Vlas, J., 2000: Samenvatting monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost: evaluatie na 13 jaar gaswinning.
- Goor, M.A. van, T.J. Zitman, Z.B. Wang, & M.J.F. Stive, 2003: Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets. *Marine Geology* 202, pp. 211-227.
- Grunnet, N.M., & P. Hoekstra, 2004: Alongshore variability of the multiple barred coast of Terschelling, The Netherlands. *Marine Geology* 203, pp. 23-41.
- Guillen, J. & P. Hoekstra, 1997, Sediment Distribution in the nearshore zone: grain size evolution in response to shoreface nourishment (Island of Terschelling, The Netherlands). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 45, pp. 639-652
- Heteren, S. van, A.J.F. van der Spek & Th.A.M. de Groot: Architecture of a preserved Holocene tidal complex offshore the Rhine-Meuse River mouth, The Netherlands. In: *Proceedings Coastal Sediments '03*, CD-ROM ISBN 981 238 422 7 (CD), 12 pp.
- Hibma, A., 2004, Morphodynamic modelling of estuarine channel-shoal systems, Doctoral thesis, Delft University of Technology.
- ICONA, 1992: Noordzee-atlas voor het Nederlands beheer en beleid. Amsterdam, kaarten 1-96.
- IPCC, 2001: Executive summary. in: *The Scientific basis, Changes in Sea-level*.  
[http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/)
- Jeuken, M.C.J.L., Z.B. Wang, D. Keiller, I. Townend & G.A. Liek, 2003, Morphological response of estuaries to nodal tide variation, In: *Proc. Int. Conf. Estuaries and Coasts*, Hangzhou, China, pp. 166-173.
- Kreeke, J. van de, and J. Dunsbergen, D.W., 2000, Tidal asymmetry and sediment transport in Friesian Inlet, In: Yanagi, T. (Ed.), *Interaction between estuaries, Coastal Seas and Shelf seas*, Terra Scientific publishing company, Tokyo, 2000.
- Kragtwijk, N., T.J. Zitman, M.J.F. Stive & Z.B. Wang, 2004: Morphological responses of tidal basins to human interventions. *Coastal Engineering* 51, pp 207-221.
- Van Ledden, M., 2003, Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins, Doctoral thesis, Delft University of Technology.
- Lindeboom, H., 2004: Waddengas. Ingezonden brief in: *Bionieuws* 14, afl. 10, 21 Mei 2004.
- Louters, T., & F. Gerritsen, 1994: *Het Mysterie van de Wadden: Hoe een Getijdesysteem Inspeelt op Zeespiegelstijging*, rapport RIKZ -94.040, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 70 pp.
- Mol, G., A.M. van Berchum & G.M. Krijger, 1997: De toestand van de Westerschelde aan het begin van de verdieping 48'/43'. Beschrijving van de trends in de fysische, biologische en chemische toestand. Rapport RIKZ -97.049, pp. 52 +68+21.
- Mulder, J.P.M., 2000: Zandverliezen in het Nederlandse kustsysteem. Advies voor dynamisch handhaven in de 21<sup>e</sup> eeuw. Rapport RIKZ/2000.36, pp. 55.
- Mulder, E.F.J. de, M.C. Geluk, I. Ritsema, W.E. Westerhoff & Th.E. Wong:  
De ondergrond van Nederland. Utrecht, pp. 379.
- NAM, 1998: *Integrale Bodemdalingsstudie Waddenzee*. Assen, pp. 372.
- Oost, A.P., 1995: Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Friesian Inlet. *Proefschrift Geologica Ultraiectina* No. 126, pp. 455; Appendix A.

- Oost, A.P. & P.A.H. Kleine Punte, 2003: Autonome morfologische ontwikkeling westelijke Waddenzee. Concept rapport RIKZ (versie 31 juli 2003), Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 91 pp.
- Rieu, R., S. van Heteren, A.J.F. van der Spek & P.L. de Boer: Development and preservation of a mid-Holocene tidal channel system offshore the western Netherlands. In: Proceedings Coastal Sediments '03, CD-ROM ISBN 981 238 422 7 (CD), 9 pp.
- RIZA, 2003: Bodemgesteldheid en mechanische kokkelvisserij in de Waddenzee. Rapport tbv EVA-II (concept), 123 pp.
- Ruig, J. de, & P. Noordstra, 1996: Erosie op Ameland-Bornrif en Terschelling-Noordergronden. Werkdocument RIKZ/AB-96.101x, pp. 39.
- Schuttelaars, H.M. and H.E. De Swart, 1996, An idealized long-term morphologic model of a tidal embayment, Eur. J. Mech. B, 15, 55-80.
- Schuttelaars, H.M. and H.E. De Swart, 2000, Multiple morphodynamic equilibria in tidal embayments, J. of Geophysical Res. Vol.105, No. C10, 24,105-24,118.
- Stive, M.J.F. & Z.B. Wang, 2003: Morphodynamic modeling of tidal basins and coastal inlets. In: Advances in coastal modelling, V.C. Lakhan (ed.), Elsevier Oceanography Series, 67, Amsterdam-Boston etc, pp.367-392.
- Straaten, L.M.J.U. van, 1954: De bodem der Waddenzee. In: Het Waddenboek, Zutphen, pp. 75-151.
- Wang, Z.B. & van der Weck, A., 2002. Sea-level rise and Morphological development in the Wadden Sea, a desk study, Report Z3441, WL | Delft Hydraulics.
- Wang, Z.B., M.C.J.L. Jeuken, H. Gerritsen, H.J. De Vriend en B.A. Kornman, 2002: Morphology and asymmetry of the vertical tide in the Westerschelde estuary, Continental Shelf Research 22, pp, 2599-2609..
- Wang, Z.B., M.C.J.L. Jeuken & B.A. Kornman, 2003: A model for predicting dredging requirement in the Westerschelde. In: Proc. Int. Conf. Estuaries and Coasts, Hangzhou, China, pp. 429-435.