

**Morfologische effecten  
bodemdaling in relatie tot  
gebruiksruimte**



# Morfologische effecten bodemdaling in relatie tot gebruiksruimte

Zheng Bing Wang  
Jelmer Cleveringa  
Albert Oost

1230937-000



**Titel**

Morfologische effecten bodemdaling in relatie tot gebruiksruimte

**Opdrachtgever**

NAM

**Project**

1230937-000

**Kenmerk**

1230937-000-ZKS-0005

**Pagina's**

41

**Classificatie**

vertrouwelijk tot januari 2027

**Trefwoorden**

Waddenzee, Bodemdaling, Morfologie, Meegroeivermogen, Zeespiegelstijging

**Samenvatting**







Voor gaswinning onder de Waddenzee wordt het "Hand aan de Kraan" principe gehanteerd, waarbij een gebruiksruimte per bekken is gedefinieerd voor de bodemdaling door gaswinning. In deze studie wordt onderzocht wat de effecten zijn van het tijdelijke overschrijden van de gehanteerde gebruiksruimte.

De eindconclusie van de huidige studie is dat een tijdelijke overschrijding van de gebruiksruimte zoals nu is gehanteerd voor de bodemdaling door gaswinning onder de Waddenzee niet tot ernstige effecten zal leiden. Deze eindconclusie is gebaseerd op de conclusies uit de aanvullende modellering voor morfologische ontwikkelingen, een bureaustudie waarbij het "Hand aan de Kraan" principe nader worden geanalyseerd, en een beschouwing van beschikbare waarnemingen:

- De hypothetisch extreme scenario's van bodemdaling, waarbij de gebruiksruimte is overschreden, zouden tot effecten in dezelfde orde van grootte leiden als de scenario's gehanteerd bij de MER studie. Door dat de overschrijding tijdelijk is, leidt het niet tot een extra cumulatief effect bij deze scenario's.
- Het HADK-principe is een vereenvoudigde en praktische toepassing van de kennis en inzichten over de morfologische ontwikkelingen in de Waddenzee tot 2006. De destijds gehanteerde waarden voor het meegroeivermogen zijn conservatief. Er is speelruimte die voor de verschillende bekkens verschillend is.

Op basis van de conclusies van de huidige studie doen wij de volgende aanbevelingen:

- 1 Niet meteen reageren op een overschrijding van de nu geldende gebruiksruimte door gaswinning onder de Waddenzee te reduceren / stoppen.
- 2 Doe verder (vooral ecologisch) onderzoek om een nieuw normensysteem te bepalen aan de hand van de grens waarbinnen het lineaire (geaggregeerde) model van toepassing is.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	Feb. 2017	Zheng Bing Wang		Peter Herman		Frank Hoozemans	
2	April 2017	Zheng Bing Wang		Peter Herman		Frank Hoozemans	

**Status**

definitief



## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doelstelling	1
1.3 Aanpak en leeswijzer	1
<b>2 Huidige inzichten en praktijk</b>	<b>3</b>
2.1 Inleiding	3
2.2 Het “Hand aan de Kraan” principe	3
2.3 Begrippenkader	4
2.4 Studies tot nu toe	5
2.5 Implementatie van nieuwe inzichten in de gebruiksrumberekeningen	9
2.6 Conclusies	10
<b>3 Aanvullende modellering</b>	<b>11</b>
3.1 Opzet van de modellering	11
3.2 Resultaten	15
3.3 Theoretische analyse	18
3.3.1 Niet-lineair 1-element model met beperking van transportcapaciteit	18
3.3.2 Lineair model zonder beperking van transport capaciteit	20
3.4 Discussie	22
3.4.1 Respons van een getijdebekken op ZSS	22
3.4.2 Invloed van de duur van de bodemdaling	23
3.4.3 De gehanteerde limiet	24
3.5 Samenvatting	26
<b>4 Discussie resultaten modellering in relatie tot waarnemingen</b>	<b>29</b>
4.1 Inleiding	29
4.2 Waargenomen sedimentatiesnelheden	29
4.3 Geologische observaties	33
4.4 De toepasbaarheid van de uitkomsten van het ASMITA-model	34
<b>5 Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>37</b>
<b>6 Referenties</b>	<b>39</b>
 <b>Bijlage(n)</b>	
<b>A Externe kwaliteitstoetsing</b>	<b>A-1</b>





# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

De Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) wint gas uit verschillende gasvelden die (deels) onder de Waddenzee liggen. Gaswinning leidt tot bodemdaling van de diepere ondergrond. De NAM voert voor haar Waddenzee-winningen een meet- en monitoringprogramma uit. Het doel van deze monitoring is te controleren of de bodemdaling binnen afgesproken grenzen blijft en of zich geen nadelige effecten op de natuur voordoen. Metingen aan de ontwikkeling van de bodemdalingsschotel worden gebruikt om middels modellen de toekomstige bodemdalingssnelheid te voorspellen. In deze voorspellingen presenteert NAM tevens een zogenaamde “high-case”, waarvoor geldt dat de bodemdalingssnelheid hoger wordt dan verwacht.

De resultaten uit het bovengenoemde monitoringprogramma worden jaarlijks gerapporteerd aan het bevoegd gezag. Het bevoegd gezag legt de resultaten voor aan een commissie van onafhankelijke experts die een advies uitbrengt over de kwaliteit en uitvoering van het monitoring programma en over de gaswinning in relatie tot de waargenomen en voorspelde bodemdalingssnelheid in het gebied. In haar advies in 2015 constateert deze commissie dat de voorspellingen voor de toekomstige bodemdalingssnelheid onder de wadplaten sterk fluctueren. De commissie begrijpt dat er onderzoek gaande is om tot stabielere voorspellingen te komen, maar vraagt zich ondertussen af of een bodemdalingsscenario waarbij de bodemdalingssnelheid buiten vastgestelde grenzen treedt, werkelijkheid kan worden. De commissie vraagt aan NAM aan te geven hoe zij handelt, en wellicht de gaswinning reduceert, indien een te hoog bodemdalingsscenario waarschijnlijk wordt.

De vraag hoe te handelen bij het overschrijden van de vastgestelde grenzen is gekoppeld aan de veronderstelling over de gevolgen van die overschrijding. Indien een tijdelijke overschrijding van de gebruiksruimte meteen een probleem veroorzaakt voor het natuurgebied Waddenzee, dan dient preventief ingegrepen te worden. Wanneer een tijdelijke overschrijding van de gebruiksruimte niet betekent dat er schade aan natuurwaarden optreedt, dan kan correctief worden gehandeld. Duidelijk is dat er een behoefte is aan beter inzicht in de effecten van een tijdelijke (gedurende een periode van een paar jaar) overschrijding van de tot nu toe vastgestelde gebruiksruimte.

## 1.2 Doelstelling

De doelstelling van de voorliggende studie is duidelijk aan te geven wat de effecten zijn van het tijdelijke overschrijden van de gehanteerde gebruiksruimte door de gaswinning.

Mede op basis van de resultaten van deze studie zal er worden vastgesteld welke handelingen dienen te worden uitgevoerd als de hoge bodemdalingsscenario's waarschijnlijk worden.

## 1.3 Aanpak en leeswijzer

Om het doel van de studie te bereiken worden er twee dingen gedaan:

- (1) duidelijk maken hoe de gehanteerde grenzen voor bodemdaling tot stand zijn gekomen en of het hanteren van deze grenzen overeenstemt met onze huidige kennis en inzichten over het morfologische systeem van de Waddenzee en de effecten van bodemdaling en zeespiegelstijging erop;

- (2) uitbreiden van de modellering van de effecten van bodemdaling op de morfologische ontwikkeling in de MER studie voor de gaswinning onder de Waddenzee door nieuwe scenario's van bodemdaling te beschouwen, om de effecten van tijdelijke overschrijding van de gebruiksruijme te bepalen.

De huidige praktijk van monitoring van bodemdaling en toezicht op de gaswinning is volgens het "Hand aan de Kraan" principe, vastgelegd bij het verlenen van de vergunning tot gaswinning onder de Waddenzee. In Hoofdstuk 2 wordt dit principe eerst uitgelegd en daarna wordt het tegen het licht gehouden door de resultaten van de relevante studies sinds het vaststellen ervan samen te vatten. In hoofdstuk 3 wordt de aanvullende modellering beschreven. De aanvullende modellering is bedoeld om te onderzoeken wat het effect is van een tijdelijke overschrijding van de gebruiksruijme op de ontwikkeling van de wadplaten. In hoofdstuk 4 worden de verschillende waarnemingen samengevat om de toepasbaarheid van de resultaten uit de aanvullende modellering te beschouwen. De bevindingen en de conclusies van de huidige studie worden samengevat in Hoofdstuk 5.

## 2 Huidige inzichten en praktijk

### 2.1 Inleiding

Sinds de jaren 1980 zijn vele studies uitgevoerd m.b.t. de effecten van bodemdaling in de Waddenzee veroorzaakt door gas- en zoutwinning. Deze studies hebben veel wetenschappelijke kennis geleverd over het morfologische systeem van de Waddenzee en de effecten van bodemdaling erop. Het “Hand aan de Kraan” principe gehanteerd bij het beheer van gas- en zoutwinning is gebaseerd op de studies tot 2006 toen vergunning voor gaswinning onder de Waddenzee werd verleend. Als beheerinstrument is het principe een vereenvoudigde en praktische vertaling/toepassing van de resultaten uit de studies. In dit hoofdstuk worden de huidige inzichten m.b.t. de effecten van relatieve zeespiegelstijging (ZSS) samengevat nadat het “Hand aan de Kraan” (HADK) principe met de bijbehorende begrippen zijn beschreven.

### 2.2 Het “Hand aan de Kraan” principe

Bij de verlening van vergunning tot gaswinning onder de Waddenzee vanuit de velden Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen is het “Hand aan de kraan” principe vastgesteld. Het “Hand aan de Kraan” principe omvat:

- 1 Het vaststellen van het meegroeivermogen, veelal uitgedrukt als de maximale relatieve zeespiegelstijging (ZSS) snelheid<sup>1</sup> in het kombergingsgebied van een zeegatsysteem die kan worden gecompenseerd door sedimentaanvoer van buitenaf, zonder significante milieuschade.
- 2 Het vaststellen van de gebruiksruimte; dit is het verschil dat overblijft van het meegroeivermogen na aftrek van ZSS snelheid. De vastgestelde gebruiksruimte is bedoeld als veilige grens, voor de gecombineerde gevolgen van zeespiegelstijging en bodemdaling door delfstoffenwinning.
- 3 Het vooraf vaststellen van de maximale bodemdalingsnelheid (gemiddeld over het kombergingsgebied) die zodoende (na aftrek van die door eventuele andere winningen) kan worden bijgehouden per kombergingsgebied zonder dat wezenlijke veranderingen optreden aan de Waddenzee met schade aan de natuur.
- 4 Het uitvoeren van een winningsplan waarbij de verwachte bodemdalingsnelheid binnen deze grens blijft.
- 5 Het via monitoring achteraf vaststellen van de daadwerkelijk opgetreden bodemdaling en het ontbreken van gevolgen voor de Waddenzee.
- 6 Het zo nodig bijsturen van de bodemdaling door de productie te beperken (“het dichtdraaien van de kraan”).

Omdat het voorzorgsprincipe geldt in de natuurwetgeving mogen er geen risico's worden genomen waarbij twijfel bestaat over de mogelijke schadelijke effecten voor het ecosysteem. Leidend voor de vaststelling van de gebruiksruimte was daarom dat er geen significante afname van het intergetijde plaatareaal gaat plaatsvinden ten gevolge van bodemdaling door gaswinning.

---

<sup>1</sup> Gedeeld door het kombergingsoppervlak resulteert dat in een verticaal meegroeivermogen gemiddeld over het kombergingsgebied. Het meegroeivermogen van een bekken wordt zowel in m<sup>3</sup>/j als in mm/j uitgedrukt.

Bij het vaststellen van het meegroeivermogen en de gebruiksruimte wordt uitgegaan van een relatief lange periode van 18.6 jaar, met het oog op de nodale cyclus van het getij<sup>2</sup>. Strikt genomen zou dan ook gekeken moeten worden naar overschrijding van de gebruiksruimte gemiddeld over deze periode. In de dagelijkse praktijk is dit een onwerkbaar lange periode, die in de richting gaat van de gehele productieperiode. Daarom maakt de operationele procedure opgelegd door de staat aan de mijnbedrijven gebruik van het 6 jarige lopende gemiddelde van de verwachte dalingssnelheden om te bepalen of men niet boven de maximaal toelaatbare snelheden uitkomt. Zo, was de gedachte, kon de gasproductie tijdig worden bijgesteld (hand aan de kraan), mocht de zeespiegelstijging of de bodemdaling te snel gaan verlopen. Een op GPS gebaseerd waarschuwingssysteem meet de snelheid van de (diep-ondergronds) bodemdaling. Onafhankelijk van de jaarlijkse meet- en controlecyclus, wordt nog gekeken door TNO of de (diep-ondergronds) bodemdaling door gaswinning niet te snel verloopt (De Waal e.a., 2012).

### 2.3 Begrippenkader

Rond bodemdaling onder de Waddenzee en het HADK-principe wordt een aantal begrippen gehanteerd, waarvan in deze paragraaf de definities of omschrijvingen zijn opgenomen, zoals deze in het voorliggende rapport zijn gehanteerd. De definities van de begrippen meegroeivermogen en gebruiksruimte zijn opgenomen in de Passende Beoordeling voor de Gaswinning Waddenzee (Gaswinning binnen randvoorwaarden, Ministerie van Economische Zaken, 2006).

#### Meegroeivermogen

Het meegroeivermogen van een getijdenbekken of kombergingsgebied is het natuurlijke vermogen van dat gebied, uitgedrukt in mm/jaar over het hele gebied, om de relatieve zeespiegelstijging op lange termijn bij te houden terwijl het geomorfologische evenwicht en de sedimentbalans in stand blijven (Gaswinning binnen randvoorwaarden, Ministerie van Economische Zaken 2006, p.62). Het geomorfologische evenwicht is met betrekking tot de Waddenzee gedefinieerd als de duurzame aanwezigheid van sedimentatie- en erosieprocessen, waarbij de verschillende geomorfologische elementen, zoals geulen en platen met een verschillende diepteligging, binnen dezelfde variatiebreedte als de afgelopen 100 jaar in stand blijven (ibidem, p.61). De sedimentbalans is de optelsom per deelgebied van de afzetting (sedimentatie) en erosie van zand en slib (incl. bodemdaling) (ibidem, p.63).

#### Gebruiksruimte

De gebruiksruimte is het verschil tussen het meegroeivermogen van een getijdenbekken of kombergingsgebied en de optredende, c.q. verwachte relatieve zeespiegelstijging. Dit verschil is de ruimte die te gebruiken is (lopend gemiddelde over 6 jaar) voor menselijke activiteiten die zandhonger genereren (ibidem, p.61).

#### Bodemdaling

Bodemdaling betreft in het voorliggende rapport steeds de bodemdaling van de ondergrond, waarbij de ondergrond enkele meters onder het maaiveld of de wadbodem is. Op deze diepte in de ondergrond zijn de peilmerken verankerd, die worden gebruikt om de bodemaling te meten. Het begrip bodemdaling wordt niet gebruikt om de daling van de wadbodem aan te duiden, omdat allerhande veranderingen in de hoogte van de wadbodem plaatsvinden. Over het algemeen wordt bij de bodemdaling in dit rapport de bodemdaling bedoeld die optreedt door de gaswinning of zoutwinning in de diepe ondergrond (kilometers onder de wadbodem

---

<sup>2</sup> De nodale cyclus van het getij is een cyclische variatie van de getijslag met een amplitude van ongeveer 4% en een periode van 18.6 jaar.

of het maaiveld). Maar er is ook een kleine autonome bodemdaling die het gevolg is van geologische processen op de schaal van Noordwest Europa.

### **Zeespiegelstijging (ZSS)**

Met de stijging van de zeespiegel wordt de geleidelijke toename van de gemiddelde waterstand in de Noordzee en de Waddenzee bedoeld. De relatieve zeespiegelstijging omvat naast de stijging van de waterstand (gerekend ten opzichte van een vast referentieniveau), ook de daling van de bodem.

### **Sedimentdelend systeem**

Aan de basis ligt het idee dat de Waddenzee opgebouwd is uit zeegatsystemen. Ieder zeegatsysteem bestaat uit een kombergingsgebied met geulen en inter- en subgetijde platen, een buitendelta en de aangrenzende eilandkusten. Verstoringen binnen een zeegatsysteem, door zeespiegelstijging, bodemdaling en ingrepen zoals afsluitingen, worden in eerste instantie opgevangen door uitwisseling van sediment tussen deze onderdelen. Relatieve zeespiegelstijging wordt in een natuurlijk systeem opgevangen door achteruitgang van de Noordzeekust (inclusief de buitendelta) en ophoging van het kombergingsgebied. Op langere termijn zou nog zand aangevoerd kunnen worden met het kust-parallelle transport, maar dat is in de huidige benadering buiten beschouwing gelaten. Zodoende wordt een zeegatsysteem met de aangrenzende kusten in eerste instantie gezien als een gesloten systeem waar het gaat om zand. Voor slib ligt dat anders: dit wordt via het Noordzeewater aangevoerd vanaf het Nauw van Calais en uit de grote rivieren. Het sedimentaandeel hiervan werd in de NAM-studie geschat op 10 volumeprocent.

## **2.4 Studies tot nu toe**

In deze paragraaf wordt beknopt weergegeven hoe de vigerende getallen voor het meegroeivermogen in de Waddenzee tot stand zijn gekomen. De vijf belangrijkste documenten voor de gaswinning onder de Waddenzee met betrekking tot het meegroeivermogen zijn:

- 1998 Integrale bodemdalingsstudie Waddenzee (Oost e.a., 1998);
- 2004 Bodemdalingsstudie Waddenzee 2004 (Hoeksema e.a., 2004);
- 2006 MER Aardgaswinning Waddenzegebied vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (NAM, 2006);
- 2006 Passende beoordeling van het rijksprojectbesluit gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (Ministerie van Economische Zaken, 2006).
- 2010 Meegroeivermogen en gebruiksruimte in de getijdebekkens Vlie en Marsdiep; Grootschalige morfologische ontwikkelingen westelijke Waddenzee (Cleveringa & Grasmeijer, 2010).

### **Integrale Bodemdalingsstudie Waddenzee**

De integrale bodemdalingsstudie Waddenzee (Oost e.a., 1998) is het basisdocument voor het vaststellen van het meegroeivermogen van de Waddenzee. Bij de bepaling van het meegroeivermogen is gekeken naar vier potentiële knelpunten die beperkingen kunnen opleveren voor de sedimentatie in kombergingsgebieden, te weten: de zandleverantie door de Noordzeekust; de invoer via het zeegat, sedimentatie in het kombergingsgebied en de sedimentatie op platen. Hieronder worden deze potentiële knelpunten kort weergegeven:

1. Zandleverantie door de Noordzeekust.  
Bij het vaststellen van de maximale omvang hiervan was het uitgangspunt dat de middens van de eilanden de langzaamste schakel vormen voor de mogelijke netto

achteruitgang van de kust. Rekening houdend met langjarige fluctuaties werd gekeken naar ontwikkelingen over langere perioden dan 19 jaar. De maximale terugtrekkingsnelheid gemiddeld over 19 jaar bleek 8 m/jaar. Hier wordt een deel gebruikt voor het terugtrekken van het kustprofiel zelf met de stijgende zeespiegel. Per meter terugtrekking van de kustlijn van de Wadden, van Kop van Noord-Holland tot en met Rottumeroog, waarbij is aangenomen dat het actieve profiel gemiddeld 21 m in de verticaal bedraagt, komt in totaal  $3.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  zand vrij. Een achteruitgang van  $8.0 - 0.8 = 7.2$  m/jaar levert een volume van  $27.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  zand per jaar. Daarbovenop komt nog ca. 10% slib aan volume. Op deze wijze is berekend dat de kustzone voldoende zand levert om gemiddeld voor de gehele Waddenzee zeespiegelstijgingsnelheden van 4.0 tot 6.6 mm/jaar over langere perioden bij te houden, een en ander afhankelijk van de mate van zandvraag voor andere ontwikkelingen en ingrepen (zie punt 3) in de kombergingsgebieden.

2. Invoer via het zeegat.

De bruto grootte van het zwevend sediment transport (het grootste deel van het zandtransport) is geschat door Eysink (1993) op grond van een aantal theoretische overwegingen, in combinatie met waarnemingen en kentallen van de verschillende kombergingsgebieden. Geconcludeerd is dat de capaciteit van invoer via het zeegat geen beperkingen oplevert voor de sedimentatie in het kombergingsgebied en dus ook geen beperkende factor is voor het meegroeivermogen op langere termijn.

3. Sedimentatie in het kombergingsgebied.

De sedimentatie in de Waddenzee als functie van de zeespiegelstijging, inclusief diverse 'verliesposten' is gebaseerd op het werk van Eysink en Biegel (1992), Eysink (1993) en Louters en Gerritsen (1994). De 'sedimentvraag' in de Waddenzee is de optelsom van:

- de sedimentatie in respons op de zeespiegelstijging;
- de sedimentatie die optreedt als gevolg van langjarige verlanding (waaronder de toename van het areaal kwelders wordt verstaan);
- de winning van zand en schelpen; en
- de sedimentatie die nog steeds optreedt als gevolg van aanpassingen aan de afsluitingen van de Zuiderzee en Lauwerszee.

Daarmee is berekend hoeveel ruimte er nog is voor andere menselijke ingrepen gemiddeld over een heel kombergingsgebied als functie van de snelheid van zeespiegelstijging (Oost e.a., 1998; tabel 5.5). Daaruit volgde dat grote zeegaten minder ruimte hebben voor het opvangen van menselijke ingrepen dan kleine. Zo zou in het Vlie, bij relatieve zeespiegelstijging tussen 3.1 en 4.9 mm/jaar, geen sedimentimport meer over zijn voor het opvangen van bodemdaling en/of meer relatieve zeespiegelstijging, terwijl dat voor de Zoutkamperlaag pas zou gebeuren rond de 7 mm/jaar en het Pinkegat pas boven de 11 mm/jaar.

4. Sedimentatiesnelheden op platen.

De volgende stap betreft de sedimentatie op de intergetijdeplaten, die ook voldoende groot dient te zijn om de relatieve zeespiegelstijging bij te houden. Biegel (1993) heeft een lange termijn sedimentatiesnelheid van 3-6 mm/jaar (over een periode van 60 jaar) op de intergetijde platen waargenomen. Op basis van verschillende geologische studies (Van der Spek en Beets, 1992; Beets e.a., 1994; Beets en van der Spek, 1996) is gesteld dat in eerdere fasen van het Holoceen de sedimentatiesnelheden in grote kombergingsgebieden te klein was om zeespiegelstijgingsnelheden van 3 à 4 mm/jaar bij te houden.

Uit de studie kwam naar voren dat over perioden van meer dan 19 jaar de sedimentatie op de wadplaten en de erosie van de Noordzeekust uiteindelijk bepalend zijn voor het meegroeivermogen: deze bepalen de verticale sedimentatiesnelheid op langere termijn in de kombergingsgebieden (afsluitingen en dergelijke buiten beschouwing latend waarbij vooral geulen zich moeten aanpassen). De maximale sedimentvraag die jaarlijks gedurende meerdere decennia met grote mate van zekerheid nog gecompenseerd kan worden bedraagt gemiddeld over het hele kombergingsgebied: 5 mm/jaar voor de Zoutkamperlaag en 6 mm/jaar voor het Pinkegat (zie verder 4.1).

#### **Bodemdalingsstudie Waddenzee 2004**

In de Bodemdalingsstudie Waddenzee 2004 (Hoeksema e.a., 2004) worden verschillende studies met het ASMITA-model geïntroduceerd: Kragtwijk (2001), Kragtwijk e.a. (2004), Van Goor<sup>3</sup> (2001), Van Goor e.a. (2003). Op basis van de studie van Van Goor e.a. (2003) wordt gesteld dat 60 cm/eeuw (6 mm/jaar) een typerende maat is voor kleine bekkens en 40 cm/eeuw voor grotere bekkens. Let op dat dit anders is dan de door Van Goor e.a. (2003) gehanteerde kritische snelheid voor verdrinking die veel groter is (bijvoorbeeld 327 cm/eeuw voor het Pinkegat, zie Wang en Eysink, 2005).

#### **Passende beoordeling**

In de Passende Beoordeling voor gaswinning onder de Waddenzee (Ministerie van Economische Zaken, 2006) is een belangrijkste opmerking dat met het oog op het voorzorgbeginsel gekozen is voor een voorzichtige, conservatieve benadering, waarbij wordt uitgegaan van de laagste schatting van het maximale meegroeivermogen zoals dat naar voren komt bij diverse onderdelen van het systeem.

In de passende beoordeling is de exacte omschrijving van de gebruiksruimte opgenomen. Ook de toekomstige zeespiegelcurve voor de berekeningen van de gebruiksruimte bij de gaswinning is vastgelegd in de Passende Beoordeling voor gaswinning onder de Waddenzee (Ministerie van Economische Zaken, 2006).

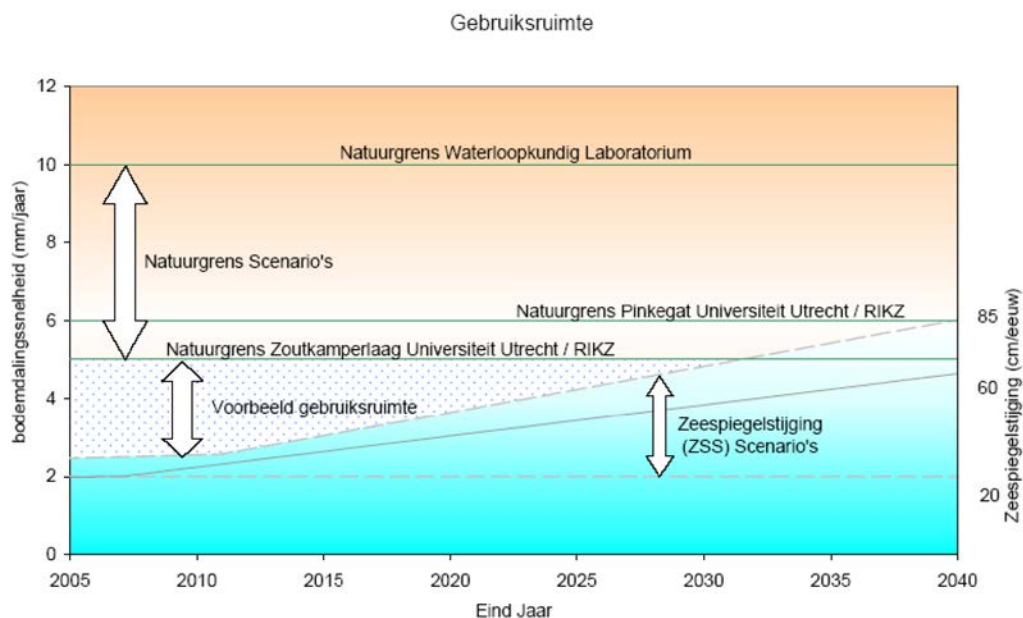
#### **MER Aardgaswinning Waddenzegebied**

In paragraaf 3.5 van de MER Aardgaswinning Waddenzegebied vanaf locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (NAM, 2006) wordt de gebruiksruimte voor gaswinning gepresenteerd. In tabel 3.6 van de MER Aardgaswinning Waddenzegebied (NAM, 2006) worden hiervoor getallen gegeven en deze zijn in Tabel 2.1 overgenomen. In Fig.2.1 is de overzichtsfiguur uit het MER opgenomen. De oorspronkelijke bron zijn de getallen uit de Integrale Bodemdalingsstudie Waddenzee (Oost e.a., 1998).

Tabel 2.1 Overzichtstabel met de bovengrens van de gemiddelde sedimentatiesnelheid over perioden van 19 jaar over het hele oppervlak uit het MER Aardgaswinning Waddenzegebied vanaf locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (NAM, 2006).

Historische gegevens	modellen Universiteit Utrecht			modellen WL	
	Klein: Pinkegat	Intermediar: Zoutkamperlaag	Groot: Vlie	Alle grote kombergingen	Kleinere kombergingen
4-6.6 mm/j	6 mm/j	5 mm/j	3 mm/j	6 mm/j	10 mm/j

<sup>3</sup> In de Bodemdalingsstudie worden waarden gebruikt uit Van Goor (2001), maar omdat in Van Goor e.a. (2003) de juiste waarden zijn gebruikt, wordt hieraan gerefereerd in het voorliggende rapport.



**Fig.2.1** Overzichtsfiguur van gebruiksruijme, natuurgrenzen (de trem die in het MER is gehanteerd voor het meegroeivermogen, ook wel de bovengrens van de gemiddelde sedimentatiesnelheid) en zeespiegelstijgingsscenario's uit het MER Aardgaswinning Waddenzeegebied vanaf locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (NAM, 2006)

### Meegroeivermogen en gebruiksruijme Vlie en Marsdiep

In het rapport Meegroeivermogen en gebruiksruijme in de getijdebekken Vlie en Marsdiep; Grootschalige morfologische ontwikkelingen westelijke Waddenzee (Cleveringa & Grasmeijer, 2010) heeft een beschouwing plaatsgevonden van het meegroeivermogen van de grote bekkens met behulp van:

1. De sedimentatie in de getijdebekken van de westelijke Waddenzee;
2. Simulaties met het ASMITA-model;
3. Een update van de sedimentbalans uit de Integrale bodemdalingstudie (Oost e.a., 1998);
4. Een beschouwing van de kennisontwikkeling rond de argumenten voor de ondergrens aan de maximale sedimentatiesnelheid uit de Integrale bodemdalingstudie (Oost e.a., 1998)

De uitkomst van de verschillende berekeningen en overwegingen is dat het meegroeivermogen van de grote bekkens tenminste 5 mm/jaar bedraagt. De documentatie over dit onderwerp is omvangrijk, omdat in de aanloop naar het MER, de vergunningverlening voor de Natuurbeschermings-wetvergunning en uiteindelijk de Raad van State-zitting over die vergunning veel aanvullende rapporten en notities zijn opgesteld. Hieronder de toelichting op de bovenstaande punten.

Ad 1. De waargenomen sedimentatie in de kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep is 4.69 mm/jaar gemiddeld over de periode 1935-2005. Het meegroeivermogen is per definitie groter dan of gelijk aan de gerealiseerde sedimentatie. Daarom geeft dit een ondergrens voor het meegroeivermogen.



Ad 2. Berekeningen met het ASMITA-model voor beide kombergingsgebieden met steeds oplopende snelheden van zeespiegelstijging en met en zonder bodemdaling door zoutwinning, hebben laten zien dat bij snelheden van zeespiegelstijging van 5.9 mm/jaar voor het Vlie en 4.8 mm/jaar voor het Marsdiep de sedimentatie op de droogvallende platen voldoende groot is om tenminste constant in oppervlak te blijven.

Ad 3. De update van de sedimentbronnen en -putten in de sedimentbalans heeft laten zien dat in de huidige situatie voldoende zand beschikbaar is om een zeespiegelstijging van 5 mm/jaar bij te houden. In die balans is rekening gehouden met de processen in de kombergingsgebieden waarvoor ook zand en slib wordt gevraagd (verlanding en afsluitingen) en wordt onttrokken (zandwinning). Verder is aan de aanbodzijde rekening gehouden met het kustonderhoudsprincipe dat de afname van het zandvolume in de kustzone via suppleties wordt aangevuld, zodat bij een versneld stijgende zeespiegel ook meer zand beschikbaar is voor de kombergingsgebieden.

Ad 4. De belangrijkste argumenten uit de kennisontwikkeling betreffen de sedimentatiesnelheden in de getijdebekken in het Holocene en de gemeten hoogteveranderingen op de droogvallende platen. Bij de gemeten hoogteveranderingen op de droogvallende platen is het gemiddelde onder de huidige omstandigheden beschouwd. De sedimentatiesnelheid die optrad in de voormalige Holocene getijdebekken, vond plaats onder condities van beduidend hogere snelheden van zeespiegelstijging dan de huidige, en bleek hoger dan verondersteld in de Integrale bodemdalingsstudie (Oost e.a., 1999). Deze vroeg Holocene waarden geven een indicatie van de mogelijke sedimentatiesnelheden in situaties met een hogere snelheid van zeespiegelstijging dan de huidige.

## 2.5 Implementatie van nieuwe inzichten in de gebruiksrumberekeningen

Bij de berekening van de beschikbare gebruiksrumbte en de benutting daarvan door de bodemdaling als gevolg van gaswinning is rekening gehouden met de implementatie van nieuwe inzichten en kennis:

- ieder jaar worden nieuwe prognoses gemaakt voor de verwachte bodemdaling door de gaswinning, op basis van de meest actuele inzichten.
- iedere vijf jaar wordt het te hanteren scenario voor de toekomstige zeespiegelstijging geactualiseerd.

Alleen voor het meegroeivermogen is geen cyclus geïnstitutionaliseerd van herbeschouwing en eventuele aanpassing. Er zijn wel aanleidingen om, tien jaar na het vaststellen ervan, het vastgestelde meegroeivermogen kritisch te beschouwen. Eén daarvan is het bijstellen van het meegroeivermogen voor de grote bekkens Vlie en Marsdiep van 3 mm/jaar naar 5 mm/jaar, in het MER en vergunningverleningstraject voor zoutwinning onder de Waddenzee. Daarmee is het meegroeivermogen van deze zeer grote bekkens gelijk aan dat van het beduidend kleinere Friesche Zeegat. Het onderscheid tussen kleine en grote bekkens is gebaseerd op het onderbouwde inzicht dat kleinere bekkens een hogere snelheid van ZSS kunnen bijhouden dan grotere bekkens (Oost e.a., 1998; Van Goor e.a., 2003; Hinkel e.a., 2013) Vanwege de oorspronkelijke differentiatie van de meegroeivermogens naar grote, middelgrote en kleine bekkens moet men zich afvragen of de nu ontstane gelijkstelling terecht is, of dat een hoger meegroeivermogen voor middelgrote en kleine bekkens ook logisch is.

Het gehanteerde scenario voor het verloop van zeespiegelstijging wordt iedere vijf jaar bijgewerkt in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en valt buiten de scope van deze studie. Ook de prognoses voor de bodemdaling als gevolg van de gaswinning vallen buiten de scope van deze studie.

De onzekerheden in de schatting van het meegroeivermogen en de consequenties daarvan voor de gevolgen van een tijdelijke overschrijding komen in deze studie aan de orde.

## 2.6 Conclusies

Samengevat houdt het “Hand aan de Kraan” principe in dat de snelheid van bodemdaling door gaswinning, gemiddeld over een getijbekken en gemiddeld over een periode van 6 jaar, niet hoger mag zijn dan de voor het betreffende bekken vastgestelde *gebruiksruimte*. De gebruiksruimte wordt bepaald als het verschil tussen het *meegroeivermogen* en de verwachte snelheid van ZSS.

De voor de gaswinning onder de Waddenzee gehanteerde meegroeivermogens zijn in 2006 bepaald, op basis van inzichten uit de tot dan toe uitgevoerde studies en via een toen gewenste (voorzorgprincipe) conservatieve benadering. De toen bepaalde waarden zijn 3 mm/jaar voor grote bekkens zoals Vlie en Marsdiep, 5 mm/jaar voor middelgrote bekkens zoals de Zoutkamperlaag, en 6 mm/jaar voor kleine bekkens zoals het Pinkegat. Voor de zoutwinning in de westelijke Waddenzee is het meegroeivermogen van de grote bekkens Vlie en Marsdiep bijgesteld tot 5 mm/jaar, op basis van de studies na 2006. Er is consensus dat het meegroeivermogen van een kleiner bekken groter is dan van een groter bekken. Op grond van deze nieuwe inzichten verdient het de aanbeveling om het meegroeivermogen van de bekkens Pinkegat en Zoutkamperlaag opnieuw te beschouwen.

Het HADK-principe is een vereenvoudigde en praktische toepassing van de kennis en inzichten over de morfologische ontwikkelingen in de Waddenzee. De vraag is gesteld of er ernstige effecten optreden als de gebruiksruimte wordt overschreden. Om meer te weten te komen over welke effecten de bodemdaling kan veroorzaken als de gebruiksruimte wordt overschreden is er behoefte aan aanvullende modellering van de effecten van ZSS en bodemdaling door gaswinning.

## 3 Aanvullende modellering

### 3.1 Opzet van de modellering

#### **Gebruikt model**

Tijdens de MER studie voor de gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen zijn de effecten van bodemdaling door gaswinning geëvalueerd aan de hand van de modellen Delft3D, ESTMORF en ASMITA (Wang en Eysink, 2005). Uiteindelijk is de kwantificering van de effecten gebaseerd op de resultaten van het ASMITA model. Het Delft3D model werd alleen ingezet om de effecten van de bodemdaling op de hydrodynamica te bepalen. Ook voor het bepalen van het meegroeivermogen van het Marsdiep en het Vlie voor de zoutwinning onder de Waddenzee is gebruik gemaakt van simulaties met het ASMITA model. Daarom wordt de aanvullende modellering in de huidige studie alleen met het ASMITA model uitgevoerd. Voor consistentie gebruiken we hier precies dezelfde versie van het model als in de MER studie. Een uitgebreide beschrijving van het model is gegeven in Wang en Eysink (2005). Deze beschrijving wordt hier niet herhaald. Wel worden de nieuwe inzichten in de werking van het ASMITA model verkregen sinds de MER studie hieronder kort samengevat.

Uit het onderzoek naar lange-termijn morfologische modellering voor de Waddenzee sinds de MER studie (Wang e.a., 2008; Wang en van der Spek, 2015; Townend e.a., 2016a, 2016b) kan worden geconcludeerd dat ASMITA op dit moment het meest effectieve en betrouwbare model is voor het evalueren van het effect van relatieve ZSS. De studies laten zien dat er qua modelformulering geen principiële verschillen bestaan tussen ASMITA en Delft3D. De vergelijkingen in ASMITA kunnen via aggregatie (integratie over ruimte en tijd) wiskundig formeel worden afgeleid uit de vergelijkingen in Delft3D. Het essentiële verschil tussen de twee typen modellen zit in de formulering voor de sedimentuitwisseling tussen de bodem en de waterkolom, waarin beide modellen empirische elementen bevatten. Door empirische (uit veldwaarnemingen afgeleide) relaties voor morfologisch evenwicht te betrekken bij de formulering garandeert ASMITA dat de modelresultaten van simulaties met constante forcering op den duur aan die relaties voldoen.

#### **Scenario's**

In de MER studie zijn twee scenario's m.b.t. bodemdaling door gaswinning gesimuleerd, een basisscenario en een hoog scenario. In Fig.3.1 en Fig.3.2 zijn de gemiddelde snelheid van bodemdaling in de twee kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag in de verschillende perioden weergegeven. Dit is de bodemdaling die optreedt door de gaswinning op Ameland en de gaswinning onder de Waddenzee. De gaswinning op Ameland is gestart in de jaren '80 en had ten tijde van de studie in 2005 al geresulteerd in bodemdaling. De opgetreden gemeten bodemdaling is in de simulaties opgenomen, in combinatie met de destijds voorspelde bodemdaling voor de lopende Ameland-winning en de toekomstige Waddenzeewinning.

Opvallend is dat in beide scenario's de maximale bodemdalingssnelheid in het Pinkegat ongeveer 1 mm groter is dan het later vastgestelde meegroeivermogen van 6 mm/jaar (EZ, 2006). Toch is aan de hand van de modelresultaten over een langere termijn destijds geconcludeerd dat de effecten op de morfologische ontwikkelingen niet meetbaar, en dus gering zullen zijn. Deze conclusies zijn door de monitoring studies tot nu toe (Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, 2005, 2010, 2017) bevestigd.

In de MER studie zijn ook verschillende scenario's van ZSS en ontwikkeling van getijslag gesimuleerd. Voor de ontwikkeling van de getijslag is zowel een trendmatige toename als een periodieke verandering met een periode van 18.6 jaar beschouwd. Uit de modelresultaten is echter geconcludeerd dat de effecten van de bodemdaling zelf niet van deze verschillende scenario's afhangen. Het verschil tussen de simulaties met en zonder bodemdaling blijft praktisch hetzelfde voor alle scenario's van ZSS en ontwikkeling van getijslag. Daarom wordt in de voorliggende rapportage alleen het basisscenario m.b.t. ZSS en getijslagontwikkeling gehanteerd voor de aanvullende modellering.

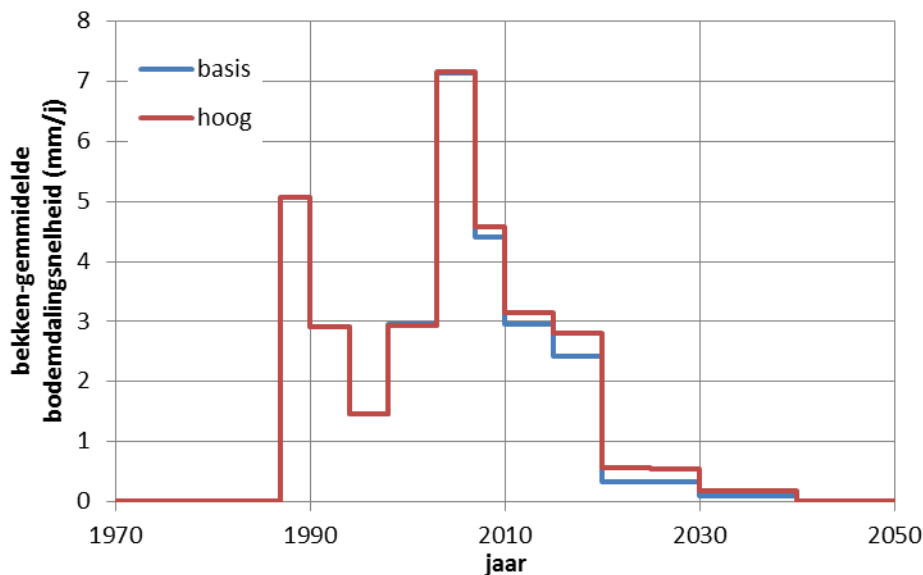


Fig.3.1 Bodemdalingssnelheid in het Pinkegat-bekken volgens de twee scenario's gesimuleerd in de MER studie.

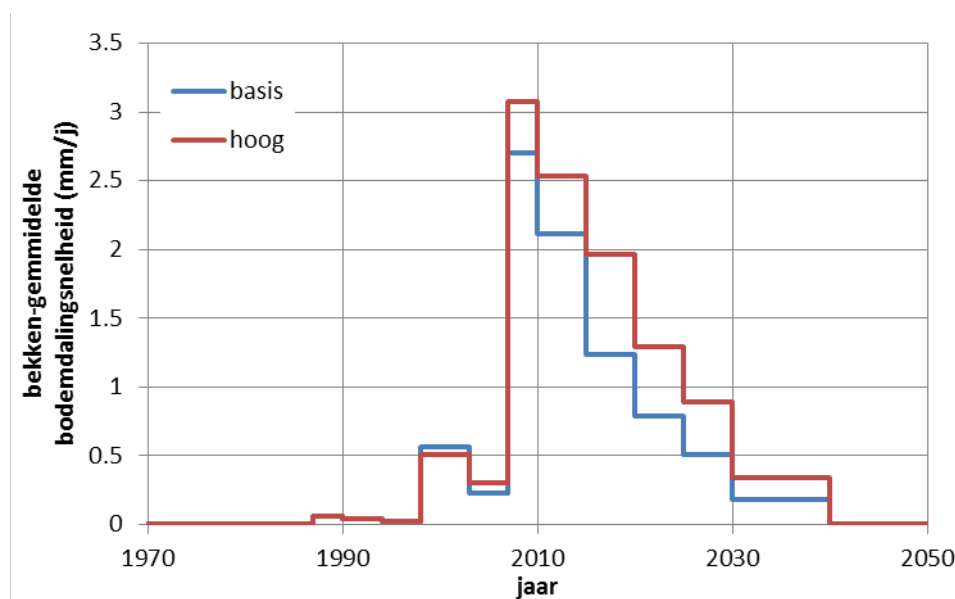
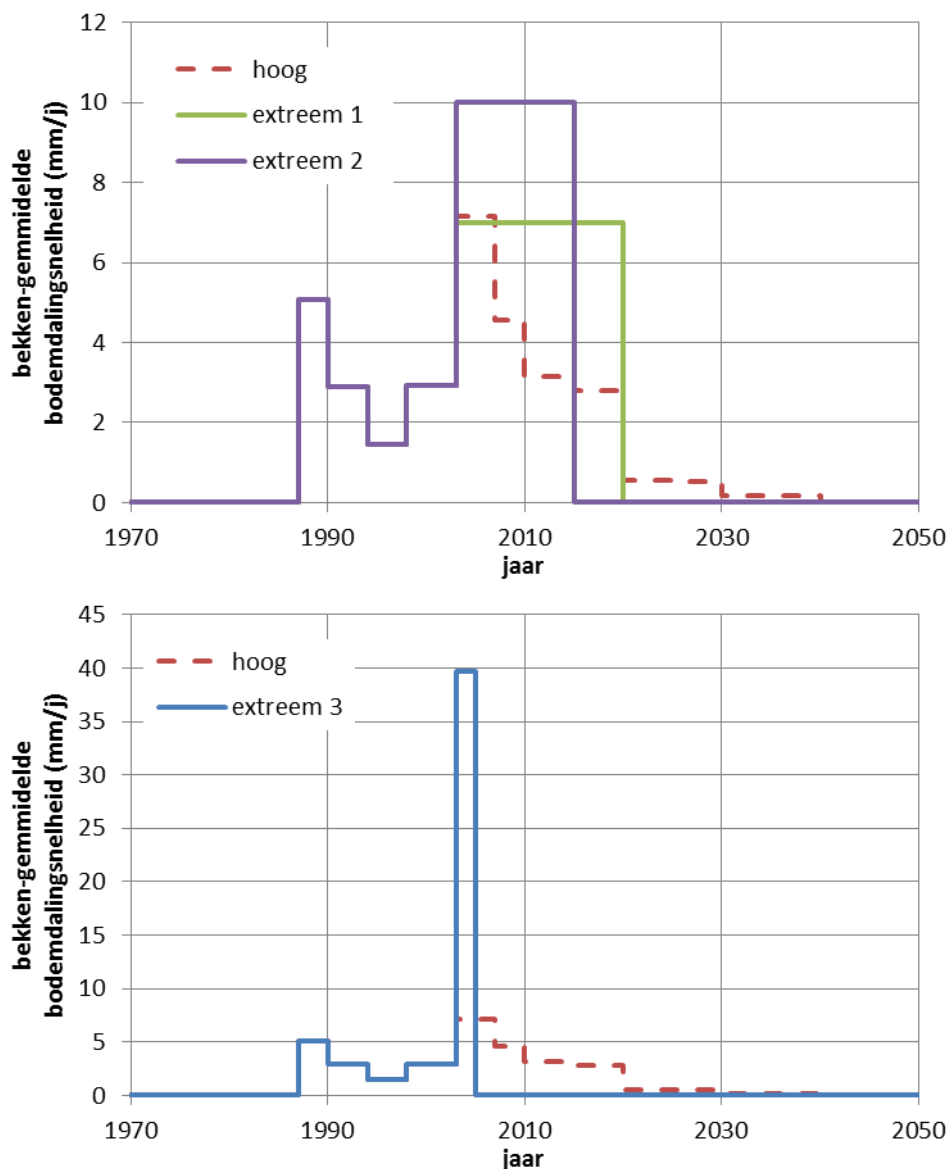


Fig.3.2 Bodemdalingssnelheid in het Zoutkamperlaag-bekken volgens de twee scenario's gesimuleerd in de MER studie.

Opgemerkt moet worden dat de zeespiegelstijging (2 mm/jaar oplopend tot 6 mm/jaar) nog bovenop de bekkengemiddelde bodemdaling komt. Op basis van Fig.3.1 en Fig.3.2 kunnen wij constateren dat overschrijding van het meegroeivermogen eerder in het Pinkegat dan in de Zoutkamperlaag zou optreden. Bovendien verwachten wij dat de reacties op zo'n overschrijding door de verschillende zeegatsystemen vergelijkbaar zijn. Daarom wordt aanvullende modellering alleen voor het Pinkegat uitgevoerd.



**Fig.3.3** Gemiddelde bodemdalingssnelheid in het Pinkegat-bekken volgens het scenario 'hoog' in de MER studie en de drie extreme scenario's. Boven: extreem 1 en 2, Onder: extreem 3.

De aanvullende modellering beschouwt drie nieuw extreme scenario's, zie Fig.3.3. Benadrukt wordt dat daarbij hypothetische situaties zijn behandeld die niet in werkelijkheid zijn opgetreden. Om de vergelijking met de oorspronkelijk modelresultaten mogelijk te maken zijn de scenario's in de 2005 studie (Wang en Eysink, 2005) als uitgangspunt gehanteerd. Volgens de voorspelling van toen is het grootste gedeelte van de bodemdaling al opgetreden

vóór 2020. De volgende overwegingen zijn verder gemaakt bij het opstellen van de nieuwe extreme scenario's:

- (1) De bodemdaling tot 2003 is in alle scenario's dezelfde. De bodemdaling tot 2003 betreft de feitelijk opgetreden bodemdaling door de gaswinning Ameland. De gegevens vanaf 2003 gebruikt bij de MER studie zijn voorspellingen (en verschillen ook tussen de scenario's).
- (2) Scenario 'hoog': de gemiddelde snelheid van bodemdaling in de periode 2003-2020 in het Pinkegat is 4.24 mm/jaar, conform het scenario 'hoog' in de MER studie, met een maximale waarde van net boven 7 mm/jaar in de periode 2003-2007.
- (3) Scenario Extreem 1: de hoge snelheid van 7 mm/jaar wordt gehandhaafd over de hele periode 2003-2020. Daarna houdt de bodemdaling op (snelheid=0).
- (4) Scenario Extreem 2: de snelheid is verhoogd naar 10 mm/jaar, maar de periode verkort tot 2003-2015 (12 i.p.v. 17 jaar), zodat de totale bodemdaling in de twee extreme scenario's ongeveer hetzelfde is ( $17 \text{ jaar} * 7 \text{ mm/jaar} = 11.9 \text{ jaar} * 10 \text{ mm/jaar}$ ).
- (5) Scenario Extreem 3: bedoeld om het effect van overschrijding van de kritische snelheid van relatieve ZSS (=32.7 mm/jaar voor het Pinkegat) gedurende een korte tijd te bekijken; alle bodemdalingen in het bekken vanaf 2003 volgens het scenario 'hoog' is daartoe geconcentreerd in de periode 2003-2005. Dit scenario Extreem 3 heeft dezelfde totale daling als het scenario 'hoog'.

In de ASMITA simulaties wordt de bodemdaling toegerekend aan alle morfologische hoofdelementen: platen en geulen van het Waddenzeebekken en buitendelta. Voor de twee extreme scenario's is alleen binnen het Waddenzeebekken de bodemdaling veranderd. Op de buitendelta, waarop de gebruiksruimte geen betrekking heeft, wordt de bodemdaling hetzelfde gehouden als in het scenario 'hoog'. De (relatieve) verdeling van de bodemdaling over de morfologische elementen geulen en platen is dezelfde gehouden als in het scenario 'hoog'.

### Interpretatie van resultaten

In ASMITA wordt een zeegatsysteem geschematiseerd in 3 morfologische elementen: de buitendelta, de geulen in het bekken, en de (intergetijde) platen in het bekken. Als resultaten berekent het model de volumeontwikkelingen van deze 3 elementen en de netto sedimenttransporten tussen de omgeving (buiten het systeem) en de buitendelta, tussen de buitendelta en de geulen, en tussen de geulen en de platen. Voor het effect op het ecologische systeem zijn de veranderingen van de platen het meest relevant omdat de wadplaten als belangrijk ecotoop worden beschouwd. Voor het effect op het kustonderhoud is het netto sedimenttransport tussen de omgeving en de buitendelta het meest relevant omdat het een indicatie geeft voor de extra benodigde zandsuppleties langs de Noordzeekust. In de discussie over de gebruiksruimte is het effect op het ecotoop wadplaten het belangrijkste. Daarom zullen wij ons concentreren op de veranderingen van de platen bij de beschouwing van de modelresultaten.

Net zoals in de MER studie zullen wij de modelresultaten vooral relatief bekijken, door modelberekeningen met en zonder bodemdaling met elkaar te vergelijken. In de MER studie werden de effecten van de bodemdalingen door gaswinning op Ameland en door gaswinning uit de nieuwe velden onder de Waddenzee apart beschouwd. Deze separate beschouwing was destijds nodig omdat de Ameland gaswinning een lopende activiteit was en de beoogde gaswinning Waddenzee beoordeeld diende te worden. Voor de aanvullende modellering worden de effecten van de totale bodemdaling van beide gaswinnings beschouwd. Beide zijn immers lopende activiteiten.

### 3.2 Resultaten

De gesimuleerde ontwikkelingen van de wadplaten voor de verschillende scenario's zijn gepresenteerd in de Figuren 3.4 t/m 3.7. In elke figuur zijn telkens de berekende volumes van de wadplaten weergegeven voor twee bodemdaling scenario's samen met de overeenkomstige resultaten van een simulatie zonder bodemdaling. In de figuren zijn dit de getrokken lijnen. De resultaten van de simulatie zonder bodemdaling worden als referentie gebruikt voor de evaluatie van de effecten van de bodemdaling. Voor elk scenario is ook de ontwikkeling van de wadplaten weergegeven als de Waddenzee niet op de bodemdaling zou reageren. In de betreffende figuur is dit weergegeven met de symbolen. Deze waarden zijn berekend door het cumulatieve volume van bodemdaling bij de resultaten van de simulatie zonder bodemdaling op te tellen.

In Fig.3.4 zijn de resultaten voor de scenario's 'hoog' en 'extreem 1' met elkaar vergeleken. Bij het scenario 'hoog' wordt volgens het model de maximale afname van plaatvolume rondom 2013 bereikt en gaat daarna de bodemdaling nog door tot in 2040 (Fig.3.2). De maximale afname is dan ongeveer 1.84 miljoen m<sup>3</sup>. Bij het scenario 'extreem1' wordt volgens het model de maximale afname van ongeveer 2.88 miljoen m<sup>3</sup> bereikt in 2020 wanneer de bodemdaling ophoudt. Het effect van bodemdaling op de wadplaten is bij het scenario 'extreem 1' hoger dan bij het scenario 'hoog'. Dit komt vooral doordat de totale daling aanzienlijk groter is bij het scenario 'extreem 1', hoewel de maximale snelheid van daling nog net kleiner is dan bij het scenario 'hoog'. *Voor het effect van de bodemdaling is dus niet alleen de maximale snelheid, maar het hele verloop van de daling van belang.*

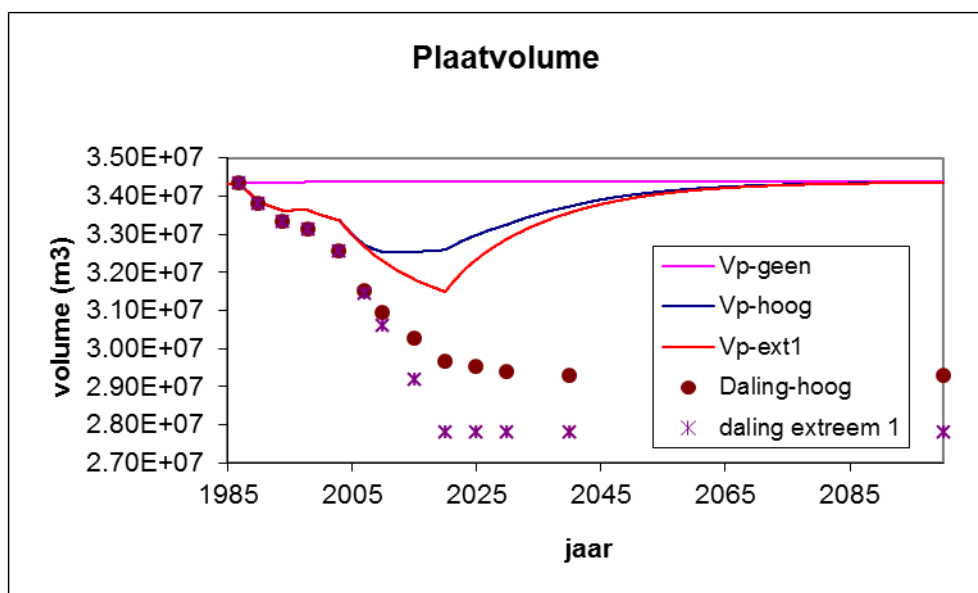


Fig.3.4 Ontwikkeling van het plaatvolume voor de scenario's 'hoog' en 'extreem 1'.

In Fig.3.5 zijn de resultaten voor de scenario's 'extreem 1' en 'extreem 2' met elkaar vergeleken. Deze twee scenario's hebben dezelfde totale daling. Het verschil tussen de twee zit in de tijdsduur van de daling. Bij het scenario 'extreem 2' duurt de daling tot 2015 i.p.v. 2020 en met hogere snelheid. Dit heeft als gevolg dat de maximale afname van het plaatvolume, dat ook in 2015 i.p.v. 2020 wordt bereikt, groter is. *Voor dezelfde totale daling wordt het maximale effect groter als de daling in een kortere tijd wordt geconcentreerd. Daar staat tegenover dat het herstel ook eerder ingaat, waardoor na verloop van tijd het effect van*

het scenario 'extreem 2' *minder* dan dat van het scenario 'extreem 1' wordt. Volgens het model gebeurt de omslag in 2017.

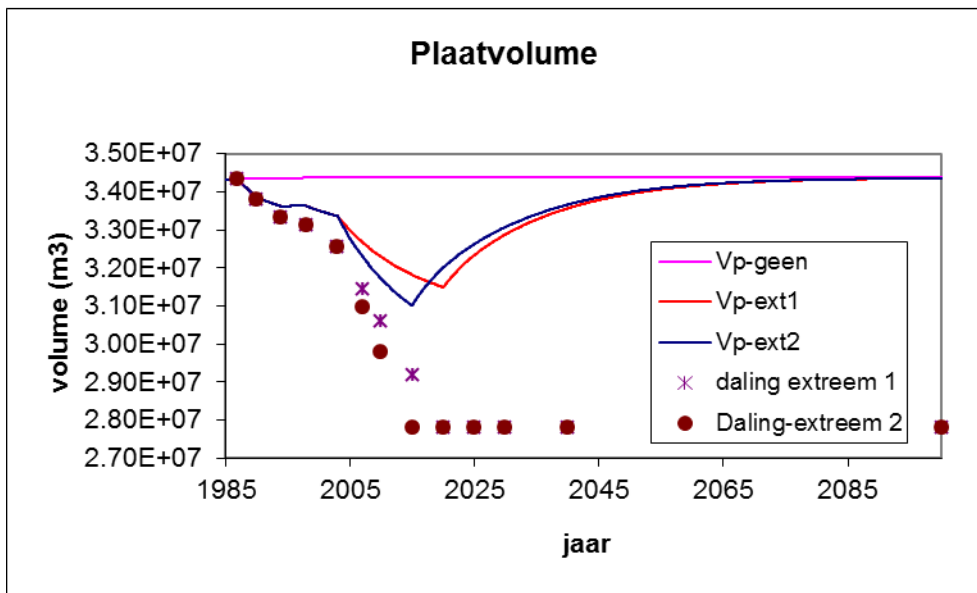


Fig.3.5 Ontwikkeling van het plaatvolume voor de scenario's 'extreem 1' en 'extreem 2'.

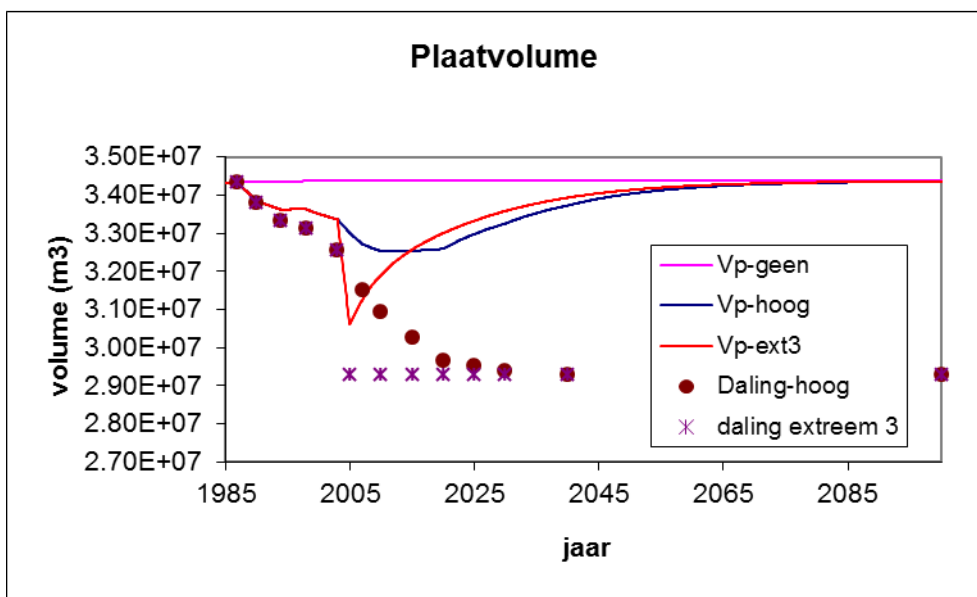


Fig.3.6 Ontwikkeling van het plaatvolume voor de scenario's 'hoog' en 'extreem 3'.

De resultaten voor het scenario 'extreem 3' worden vergeleken met die van het scenario 'hoog' in Fig.3.6 en met die van het scenario 'extreem 2' in Fig.3.7. De totale daling volgens het scenario 'extreem 3' is dezelfde als in het scenario 'hoog', maar de daling vanaf 2003 (tot 2040) wordt in 2 jaar (tot 2005) geconcentreerd waardoor de bekken-gemiddelde snelheid van bodemdaling bijna 4 cm/jaar wordt. De maximale afname van het plaatvolume wordt volgens het model in 2005 bereikt, wanneer de bodemdaling ophoudt, en is veel groter dan bij het scenario 'hoog' (Fig.3.6). Maar er is zeker nog geen sprake van verdrinking, hoewel de snelheid van bodemdaling ruim boven de berekende kritische snelheid voor verdrinking van 3.27 cm/jaar ligt. De afname wordt niet veel meer dan 10% van het totale plaatvolume. Ook



als snelheid van relatieve ZSS hoger dan de kritische waarde wordt treedt de verdrinking pas na een lange tijd op. Door het eerder ingezette herstel wordt het effect bij scenario 'extreem 3' minder groot dan bij het scenario 'hoog' na verloop van tijd, vanaf 2015 volgens het model (Fig.3.6). De maximale afname bij het scenario 'extreem 3' is weliswaar hoger dan bij het scenario 'extreem 2', maar het verschil is klein (Fig.3.7). De omslag waarbij de afname van het plaatvolume door het scenario 'extreem 2' groter wordt dan bij scenario 'extreem 3', gebeurt in 2009. Dit heeft te maken met de totale daling die bij het scenario 'extreem 2' beduidend groter is.

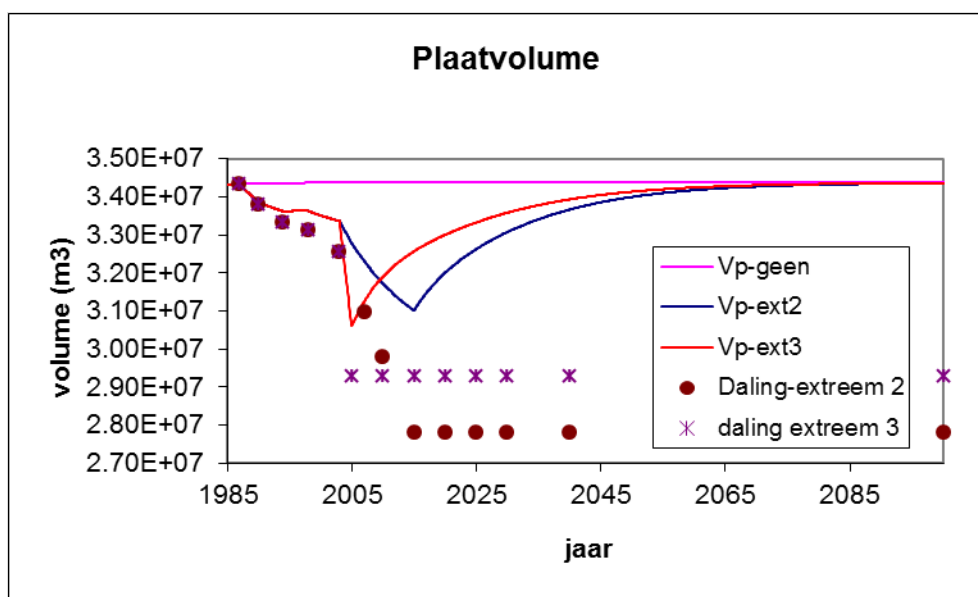


Fig.3.7 Ontwikkeling van het plaatvolume voor de scenario's 'extreem 2' en 'extreem 3'.

Tabel 3.1 Samenvatting maximale effecten op de wadplaten.

Merk op dat het hypothetisch scenario's betreffen.

Scenario	Volume verlies		Aareaal verlies		Hoogte* verlies	
	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	% initiele waarde	km <sup>2</sup>	% initiele waarde	m	% initiele waarde
hoog	1.84	4.13	0.59	1.70	0.031	3.98
extreem 1	2.88	6.46	0.93	2.67	0.048	6.22
extreem 2	3.37	7.56	1.08	3.12	0.057	7.28
extreem 3	3.78	8.48	1.22	3.50	0.064	8.17

\*Plaathoogte wordt gemeten vanaf LW. Het is dus eigenlijk een (sediment) dikte

In Tabel 3.1 worden de maximale effecten van de bodemdaling volgens de verschillende scenario's samengevat voor de verschillende eigenschappen van de wadplaten. Het berekende volumeverlies wordt verdeeld naar een verlies in areaal en een verlies in hoogte van de platen volgens de verdeelsleutel  $\frac{1}{4}$ geul –  $\frac{3}{4}$ plaat, afgeleid door de bodemdalingsschotel op de huidige bodem te projecteren (Wang en Eysink, 2005). Merk op dat het maximale verlies op één moment optreedt en op zich geen indicatie is voor het effect op het ecologische systeem waarbij ook de tijdsduur etc. van belang zijn. Daarom zullen wij in de volgende paragraaf een andere indicator ernaast introduceren: het *cumulatief effect*, berekend door het effect (bijvoorbeeld het verlies aan plaatareaal) te integreren over de tijd.

### 3.3 Theoretische analyse

#### 3.3.1 Niet-lineair 1-element model met beperking van transportcapaciteit

Om de modelresultaten beter te kunnen begrijpen worden eenvoudigere modellen gebruikt voor verdere analyse naar het effect van relatieve ZSS op een Waddenzeebekken. Relatieve zeespiegelstijging bestaat in dit model uit het effect van zeespiegelstijging en de bodemdaling door gaswinning.

Als het ASMITA modelconcept wordt toegepast op het 1-element systeem waarbij het (water onder hoogwater) volume  $V$  van het bekken als systeemvariabele wordt gebruikt dan kan de volgende vergelijking worden afgeleid (zie Stive & Wang, 2003):

$$\frac{dV}{dt} = \frac{w\delta c_E S}{\delta + wS} \left[ \left( \frac{V_e(t)}{V(t)} \right)^n - 1 \right] + Sr \quad (3-1)$$

Dit is een niet-lineair model, waarbij

- $t$  = Tijd
- $V_e$  = Statische evenwichtswaarde (evenwicht zonder ZSS, i.e.  $r=0$ ) van  $V$
- $w$  = Verticale uitwisselingscoëfficiënt,
- $\delta$  = Horizontale uitwisselingscoëfficiënt,
- $n$  = Macht in de formulering voor lokale evenwichtskoncentratie,
- $c_E$  = Overall evenwichtssedimentconcentratie,
- $S$  = Horizontale oppervlakte van het bekken
- $r$  = Snelheid van relatieve zeespiegelstijging

Een dynamisch evenwicht bij een constante snelheid van ZSS wordt bereikt als het volume niet meer verandert, dus:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{w\delta c_E S}{\delta + wS} \left[ \left( \frac{V_e(t)}{V(t)} \right)^n - 1 \right] + Sr = 0 \quad (3-2)$$

Bij constante snelheid van ZSS  $r$  bestaat dynamisch evenwicht alleen als  $r$  kleiner is dan een kritische waarde  $r_c$ , met

$$r_c = \frac{w\delta c_E}{\delta + wS} \quad (3-3)$$

Voor het dynamische evenwicht geldt dan

$$\frac{V}{V_e} = \left( 1 - \frac{r}{r_c} \right)^{-\frac{1}{n}} \quad (3-4)$$

Dit is afgebeeld in Fig.3.8 voor  $n=2$ .

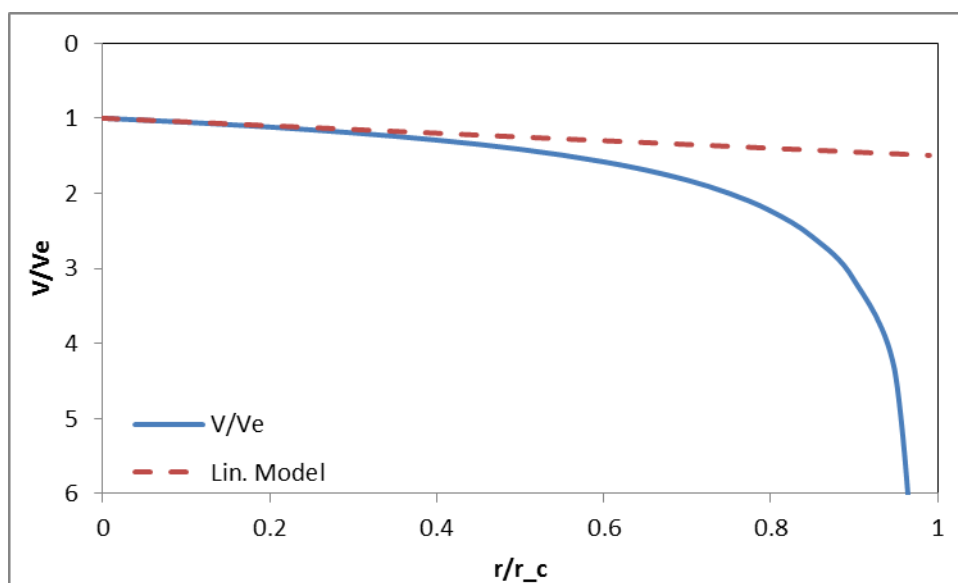
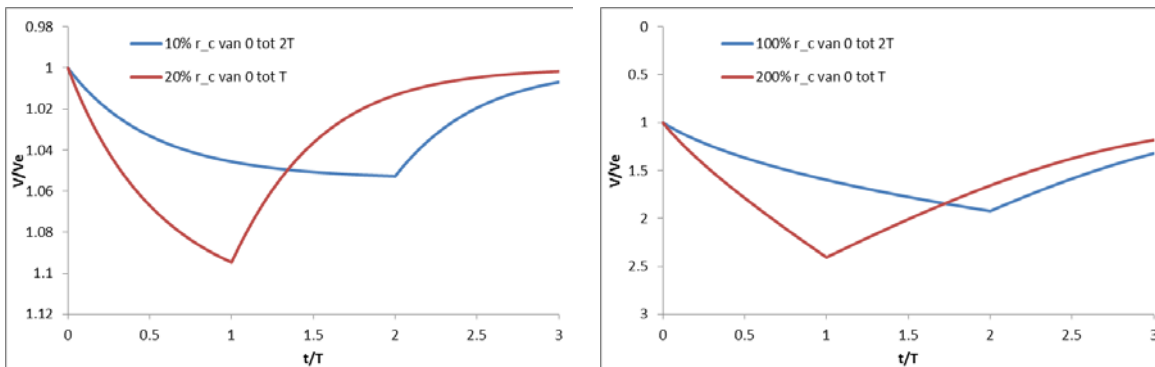


Fig.3.8 Dynamisch morfologisch evenwicht horende bij relatieve ZSS met constante snelheid. Het 1-element model werkt met water volume als systeemvariabele. Toename daarvan komt overeen met afname van het plaatvolume zoals in de vorige paragraaf is gepresenteerd. Daarom is de positieve richting van de verticale as naar beneden gedefinieerd. Dit geldt ook voor de figuren hierna in dit hoofdstuk.

In Fig.3.9 laten wij de oplossingen van vergelijking (3-1) zien voor 4 gevallen. In het linker plaatje zijn de gevallen (1)  $r=0.1r_c$  van  $t=0$  tot  $t=2T$  en (2)  $r=0.2r_c$  van  $t=0$  tot  $t=T$  met elkaar vergeleken. In het rechter plaatje zijn de gevallen (3)  $r=r_c$  van  $t=0$  tot  $t=2T$  en (4)  $r=2r_c$  van  $t=0$  tot  $t=T$  met elkaar vergeleken.  $T$  is de morfologische tijdschaal, afgeleid door vergelijking (3-1) te lineariseren (zie 3.3.2). Voor alle gevallen geldt  $V=V_e$  op  $t=0$ . ZSS veroorzaakt een afwijking t.o.v. het evenwicht. Als de ZSS snelheid constant en kleiner is dan de kritische waarde  $r_c$  dan gaat het systeem asymptotisch naar een nieuw dynamisch evenwicht. Dit geldt voor beide gevallen in het linker plaatje: de afwijkingen t.o.v. het evenwicht blijven beperkt en het volume nadert de dynamische evenwichtswaarde exponentieel. Als de kritische ZSS snelheid voor een lange periode overschreden wordt neemt het volume (dus ook diepte) op den duur lineair toe in de tijd, i.p.v. asymptotisch naar een nieuw dynamisch evenwicht toeneemt: zie het rechter plaatje, vooral bij geval (4). Als ZSS ophoudt dan herstelt het (oude) evenwicht zich op den duur weer. De snelheid van het herstel neemt toe met toenemende afwijking t.o.v. het evenwicht, maar als de afwijking erg groot wordt is er een bovengrens doordat de transportcapaciteit de beperkende factor wordt. In de eerste periode met ZSS bestaat de verandering uit twee delen: de lineair toenemende afwijking t.g.v. de ZSS (laatste term in vergelijking (3-1)) plus het herstel dat de afwijking kleiner maakt (de rest aan het rechterlid van vergelijking (3-1)). Als de afwijking erg groot wordt dan nadert de snelheid van het herstel de bovengrens, waardoor de ontwikkeling lineair in de tijd wordt, zie de veranderingen rondom  $t/T=1$  voor geval (4). Dit kunnen wij ook goed begrijpen vanuit vergelijking (3-2), die laat zien dat  $dV/dt$  bij benadering constant wordt als  $V$  groot wordt ten opzichte van  $V_e$ .

De totale ZSS is dezelfde voor de twee gevallen (1) en (2) (linker plaatje van Fig.3.9) maar in geval (2) gebeurt het in de helft van de tijd. Concentreren van de totale ZSS in een kortere tijd resulteert dus tijdelijk in een groter effect, maar na verloop van tijd is het effect juist kleiner door het eerder ingegane herstel. Kwalitatief is dit gedrag hetzelfde als de resultaten van het ASMITA model m.b.t. de ontwikkeling van de wadplaten laten zien. Ook voor de twee

gevallen (3) en (4) (rechter plaatje van Fig.3.9) geldt dat de totale ZSS dezelfde is. Kwalitatief geldt de vergelijking tussen de twee gevallen (1) en (2) ook voor de gevallen (3) en (4). Maar er is een essentieel verschil: Het cumulatieve effect, berekend door de afwijking t.o.v. evenwicht te integreren over de tijd, is ongeveer hetzelfde voor gevallen (1) en (2). Dit geldt niet voor gevallen (3) en (4), waarbij het concentreren van de ZSS in een kortere periode behalve een groter maximaal effect ook een groter cumulatief effect veroorzaakt. Dit is een belangrijke constatering die hierna nader wordt uitgewerkt.



**Fig.3.9** Verstoring t.o.v. morfologisch evenwicht veroorzaakt door een relatieve ZSS van beperkte duur.  $T$  is de morfologische tijdschaal (zie 3.3.2), die voor het Pinkegat ongeveer 30 jaar is. Let verder op de verschillende schalen op de verticale assen van de twee plaatjes.

### 3.3.2 Lineair model zonder beperking van transport capaciteit

Het 1-element model kan verder worden vereenvoudigd door de niet-lineaire vergelijking (3-1) te lineariseren.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_e - V}{T} + Sr \tag{3-5}$$

Hierin

$T$  = Morfologische tijdschaal

$$T = \frac{1}{nc_E} \left( \frac{V_e}{wS} + \frac{V_e}{\delta} \right) \tag{3-6}$$

Uit de vergelijking van (3-5) met (3-3) volgt een relatie tussen  $T$  en  $r_c$ .

$$r_c = \frac{V_e}{nTS} \quad \text{or} \quad T = \frac{V_e}{nr_c S} \tag{3-7}$$

Volgens het ASMITA model zoals gebruikt in de MER studie en de voorgaande paragrafen is de kritische snelheid van relatieve ZSS voor verdrinking  $r_c$  32.7 mm/jaar voor Pinkegat (Wang en Eysink, 2005). Volgens vergelijking (3-7) komt dit overeen met een morfologische tijdschaal  $T$  van ongeveer 30 jaar.

Een dynamisch evenwicht bij een constante snelheid van ZSS wordt bereikt als het volume niet meer verandert, dus:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_e - V}{T} + Sr = 0 \quad (3-8)$$

Dit leidt tot

$$V = V_e + SrT = V_e \left( 1 + \frac{r}{nr_c} \right) \quad (3-9)$$

Deze oplossing volgens het lineaire model is ook in Fig.3.8 weergegeven. Bij lage snelheid van ZSS (t.o.v. de kritische waarde) komt het lineaire model goed overeen met het niet-lineaire model.

Het dynamische evenichtsvolume neemt dus lineair toe met de toenemende snelheid van ZSS. Er is verder geen limiet aan de snelheid van ZSS voor het bestaan van een dynamisch evenwicht. Dit komt door dat het lineaire model - in tegenstelling tot het niet-lineaire model - geen rekening houdt met de beperking van de transportcapaciteit.

Als de ZSS bij  $t=0$  ingaat wanneer  $V(0)=V_e$ , dan is de oplossing van vergelijking (3-5)

$$V = V_e + SrT \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right) \quad \text{of} \quad V - V_e = SrT \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right) \quad (3-10)$$

Deze vergelijking beschrijft hoe het volume zich ontwikkelt vanaf het initiële volume naar de nieuwe dynamische evenichtswaarde. Als ZSS op een bepaald tijdstip  $t_0$  weer stopt, dan gaat het volume weer terug naar het initiële volume volgens

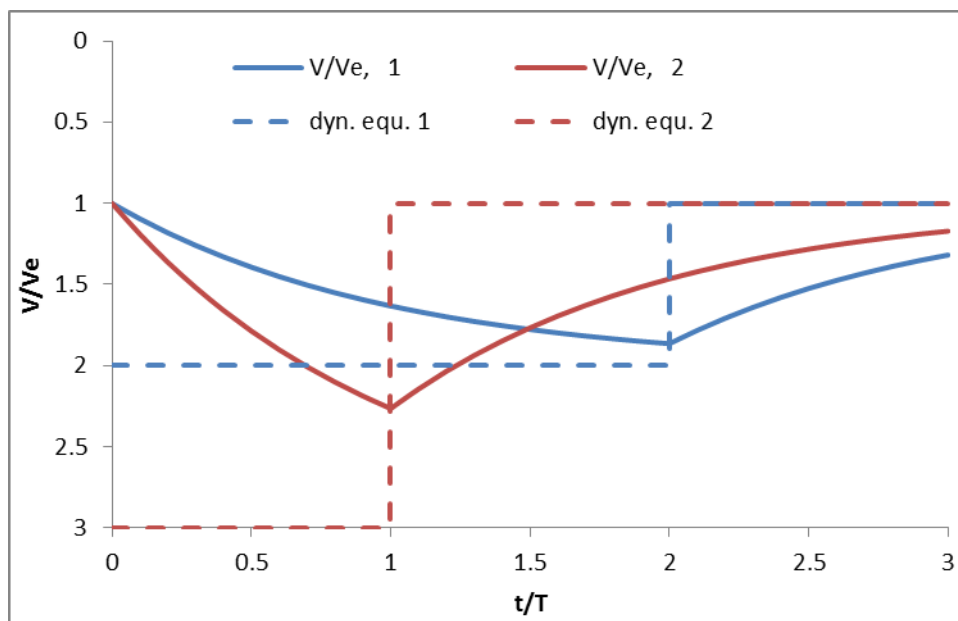
$$V - V_e = V_{i0} \exp\left(-\frac{t-t_0}{T}\right) \quad (3-11)$$

waarbij

$$V_{i0} = SrT \left( 1 - \exp\left(-\frac{t_0}{T}\right) \right)$$

het volumeverschil (ten opzichte van  $V_e$ ) is op het ogenblik  $t_0$ .

Fig.3.10 laat zien hoe de afwijking t.o.v. het oude evenwicht zich ontwikkelt in de tijd voor twee gevallen. De totale ZSS is dezelfde voor de twee gevallen maar in het ene geval gebeurt het in de helft van de tijd. Concentreren van de totale ZSS in een kortere tijd resulteert dus tijdelijk in een groter effect, maar na verloop van tijd is het effect juist kleiner door het eerder ingegane herstel. Kwalitatief is dit gedrag precies hetzelfde als dat van het niet-lineaire model en wat de resultaten van het ASMITA model m.b.t. de ontwikkeling van de wadplaten laten zien.



**Fig.3.10** Verstoring t.o.v. morfologisch evenwicht veroorzaakt door een relatieve ZSS van beperkte duur

De afwijking t.o.v. het initiële volume integreren in de tijd leidt tot

$$\int_0^{\infty} (V - V_e) dt = \int_0^{t_0} (V - V_e) dt + \int_{t_0}^{\infty} (V - V_e) dt = Srt_0T \tag{3-12}$$

Merk op dat  $Srt_0$  gelijk is aan de totale volumetoename in het bekken t.g.v. ZSS. Bij ZSS van beperkte duur is deze integraal dus alleen afhankelijk van de totale stijging en niet afhankelijk van de duur en het tijdverloop. Verder neemt deze integraal lineair toe met de morfologische tijdschaal.

Hiermee is het verschil tussen de twee plaatjes in Fig.3.9 m.b.t. het cumulatieve effect beter te begrijpen. Voor de twee gevallen getoond in het linker plaatje is de afwijking t.o.v. evenwicht klein en is het lineaire model geldig. Daarom is het cumulatieve effect voor de twee gevallen hetzelfde. Voor de twee gevallen getoond in het rechter plaatje is de afwijking te groot, waardoor het lineaire model niet meer geldig is. Dan is het cumulatieve effect voor de twee gevallen niet meer hetzelfde, en het concentreren van ZSS in een kortere tijd veroorzaakt een groter cumulatief effect.

### 3.4 Discussie

#### 3.4.1 Respons van een getijdebekken op ZSS

De analyse met het eenvoudige 1-element model, zowel lineair als niet-lineair, maakt duidelijk hoe de respons van een vereenvoudigd getijdebekken op de relatieve ZSS werkt. Zonder ZSS is er in een dergelijk getijdebekken sprake van een morfologisch evenwicht. Een verstoring van het evenwicht veroorzaakt een morfologische verandering, maar het systeem heeft de neiging om het evenwicht weer te herstellen. De snelheid van de herstellende morfologische verandering hangt af van de grootte van de afwijking t.o.v. het evenwicht: hoe groter de afwijking, hoe sneller de herstellende verandering verloopt. Volgens het lineaire model is het

verband tussen afwijking en herstelsnelheid lineair. Volgens het niet-lineaire model is de toename van de snelheid steeds minder als de afwijking groter wordt en is er een maximum aan deze snelheid dat asymptotisch wordt benaderd als de afwijking oneindig groot wordt, zie Fig.3.9 en de uitleg in 3.3.1. Er is dus een wezenlijk verschil in het effect van de ZSS, afhankelijk of men zich binnen of buiten de geldigheidsgrens van het lineaire model bevindt. Fig.3.8 laat dit duidelijk zien, als de ZSS snelheid groter is dan ongeveer 40% van de kritische snelheid van verdrinking neemt de afwijking van het lineaire model (voor dynamisch evenwicht) snel toe.

Relatieve ZSS veroorzaakt een in de tijd toenemende afwijking van het evenwicht. Bij het begin van de ZSS is de afwijking nog klein en daarom neemt de afwijking lineair toe. De toenemende afwijking veroorzaakt de herstellende morfologische verandering die de afwijking weer kleiner maakt. Het resultaat van de twee veranderingen samen is dat de afwijking t.o.v. het morfologische evenwicht steeds langzamer in de tijd toeneemt. Bij het lineaire model nadert de afwijking altijd asymptotisch naar een maximum waarde die het dynamisch evenwicht vertegenwoordigt. Bij het niet-lineaire model geldt dit ook voor lage snelheid van ZSS. Als de snelheid van ZSS boven een kritische waarde komt zal de afwijking blijven toenemen en er is dus geen dynamisch evenwicht meer. Als de ZSS weer ophoudt dan zorgt de herstellende morfologische verandering dat de afwijking afneemt in de tijd en het systeem asymptotisch naar het evenwicht terug gaat.

De geldigheid van het lineaire model hangt af van de grootte van de afwijking t.o.v. het statische evenwicht. Fig.3.8 laat zien dat het lineaire model geldig is als de snelheid van relatieve ZSS binnen 40% van de kritische snelheid voor verdrinking ligt. De bijbehorende afwijking van het volume t.o.v. het statische evenwichtsvolume is dan meer dan 20% (waarde volgens het lineaire model die kleiner is dan die volgens het niet-lineaire model). Daarom kan 20% afwijking t.o.v. het statische evenwicht als grens voor de geldigheid van het lineaire model worden gebruikt. Merk op dat het lineaire model kan geldig blijven ook als de snelheid van de relatieve ZSS tijdelijk boven de 40% grens komt, zolang de afwijking van het volume t.o.v. het statische evenwichtsvolume maar binnen de 20% blijft.

#### 3.4.2 Invloed van de duur van de bodemdaling

De resultaten van zowel het 3-elementen ASMITA model als het 1-element model laten zien dat het hele tijdsverloop van de relatieve ZSS van belang is voor het effect op de morfologische ontwikkeling. Een relatieve ZSS met een hoge snelheid maar van korte duur kan minder effect hebben dan relatieve ZSS met een lage snelheid maar van langere duur. In die zin doet het hanteren van een vaste grens als het meegroeivermogen, zonder daarbij rekening te houden met de verandering in de snelheid van de relatieve ZSS, geen recht aan de volledige dynamiek van de respons van getijdebekkens op veranderingen.

Als de afwijking t.o.v. evenwicht relatief klein is, zodanig dat het lineaire model van toepassing is, dan hangt de integraal van het effect (afwijking t.o.v. evenwicht) alleen af van de totale stijging en niet van de verdeling in de tijd. In het geval van bodemdaling betekent dit dat het effect alleen afhankelijk is van het totale volume van de daling, als wij de integraal als indicator nemen. Concentreren van daling binnen een kortere tijd veroorzaakt tijdelijk een hoger effect, maar geïntegreerd over de tijd is het effect hetzelfde.

Zeespiegelstijging en bodemdaling worden samen beschouwd als relatieve zeespiegelstijging, maar er is een essentieel verschil tussen de twee. De bodemdaling door gaswinning is van relatief korte duur, terwijl versnelde zeespiegelstijging vele eeuwen tot

millennia kan duren. Hierdoor zal er geen verdrinking optreden t.g.v. bodemdaling door gaswinning, ook niet als de snelheid van bodemdaling (al dan niet gecombineerd met zeespiegelstijging) tijdelijk de grenswaarde zou overschrijden. Als de kritische waarde langdurig wordt overschreden zal verdrinking pas optreden na een periode van meerdere eeuwen (zelfs zonder sedimentatie is de tijd die nodig is voor volledige verdrinking gelijk aan de getijslag (orde 2 m in dit gebied) gedeeld door de ZSS snelheid). De bodemdaling door gaswinning kan en zal geen verdrinking veroorzaken omdat deze een duur heeft van maximaal een aantal decennia.

De redenering hierboven geldt onder de voorwaarde dat verstoring in het morfologische evenwicht zich kan herstellen. Bodemdaling in de Waddenzee moet leiden tot extra sedimentatie (negatieve feedback) en niet tot extra erosie (positieve feedback). Met andere woorden, het systeem mag geen zodanig niet-lineair gedrag vertonen dat er meerdere stabiele evenwichtstoestanden bestaan. Deze kwestie van een eventuele niet-lineair gedrag van een Waddenzeebekken is beschouwd in de Bodemdalingstudie (Hoeksema e.a., 2004). Aan de hand van het werk van Schuttelaars en de Swart (2000) is aangetoond dat de Waddenzeebekkens te kort zijn voor het bestaan van meerdere stabiele morfologische evenwichtstoestanden. Bovendien is de verstoring veroorzaakt door bodemdaling dusdanig klein dat deze niet kan leiden tot de overgang naar een andere morfologische evenwichtstoestand, als die al zou bestaan. Het belang van de bekkenlengte is verder bevestigd in het recente werk van Ridderinkhof e.a. (2014) over de relatie tussen de morfologie van een bekken en het netto transport door het zeegat.

### 3.4.3 De gehanteerde limiet

Vanuit het 3-elementen ASMITA model zoals gebruikt in de huidige studie kan een limiet worden gedefinieerd als de snelheid van relatieve zeespiegelrijzing die het waddensysteem niet meer kan volgen door sedimentatie. Dit is dus de ZSS snelheid waarbij de wadplaten op lange-termijn (over eeuwen) zal gaan verdrinken (geen wadplaat meer over). Op basis van de formulering van het ASMITA model kan deze grenswaarde per bekken theoretisch worden bepaald (Van Goor e.a., 2003). Met gebruik van de invoerparameters zoals gebruikt in de ASMITA studie van Wang en Eysink (2005), zijn de grenswaarden voor het Pinkegat en de Zoutkamperlaag berekend op respectievelijk 3.27 m/eeuw (32.7 mm/j) en 1.71 m/eeuw (17.1 mm/j). Deze waarden zijn aanzienlijk groter dan die gehanteerd in het "Hand aan de Kraan" principe. Dit is begrijpelijk omdat de zo bepaalde limiet betekent dat de wadplaten verdwenen zouden zijn en dat is geen geschikte maat, omdat het niet de bedoeling is dat de Waddenzee wezenlijk verandert.

Het is daarom beter om naar de effecten op de morfologische ontwikkelingen te kijken bij het beoordelen of de natuureffecten (al dan niet mede door gaswinning) een grenswaarde overschrijden. Om tot een praktische en realistische grenswaarde voor het effect te komen zijn er in de MER studie (Wang en Eysink, 2005) verschillende voorstellen gedaan, o.a.:

- De natuurlijke fluctuatie in de morfologische veranderingen als grenswaarde hanteren voor de invloed van de bodemdaling door gaswinning.
- De meetnauwkeurigheid als limiet hanteren voor de invloed van de bodemdaling door gaswinning: effecten die niet waarneembaar zijn, zijn dan niet belangrijk.

Aan de hand van de resultaten van het ASMITA model is in de MER-studie geconcludeerd dat de beschouwde effecten van de bodemdaling zullen voldoen aan de hierboven voorgestelde criteria (Wang en Eysink, 2005). Er moet wel nadrukkelijk worden opgemerkt



dat de toen beschouwde twee scenario's van bodemdaling NIET het werkelijk verloop van de bodemdaling weergeven. Dit blijkt al uit het feit dat volgens beide scenario's het meegroeivermogen voor het Pinkegat zou zijn overschreden tussen 2003 en 2007 (zie Fig.3.1), wat in de praktijk niet zal gebeuren vanwege het "Hand aan de Kraan" principe. In de MER-studie was dus al geconcludeerd dat het tijdelijke overschrijden van de gebruiksruimte niet tot significant effect op de morfologie hoeft te leiden als de hierboven genoemde criteria worden gehanteerd. De resultaten van de aanvullende modellering hebben deze conclusie verder bevestigd en versterkt. De drie extreme scenario's gehanteerd in deze aanvullende modellering bevatten bodemdalingen ver boven de voorspellingen die gehanteerd zijn in de MER-studie, zowel qua totale omvang als qua maximale snelheid. Het zijn dus geen realistische maar hypothetische, extreme scenario's. De maximale afname van het plaatareaal en van de plaathoogte bij het ergst scenario 'extreem 3' is ongeveer twee keer zo groot als dat bij het scenario 'hoog' in de MER-studie.

De hierboven genoemde grenzen voor de effecten hebben hun beperkingen / nadelen. Zo kan niet elke natuurlijke fluctuatie als maat worden gebruikt, omdat er fluctuaties kunnen voorkomen op een korte tijdschaal die voor de lange termijn volkomen irrelevant zijn. In de MER-studie werd alleen de fluctuatie t.g.v. de 18.6 jarige cyclus in de getijamplitude gebruikt voor de vergelijking met het effect van bodemdaling. Die is wel geschikt omdat de betreffende tijdschaal (18.6 jaar) vergelijkbaar is met die van de bodemdaling door gaswinning. De meetnauwkeurigheid is in principe ook geen geschikte maat omdat hij afhangt van de beschikbare technische middelen. In de MER-studie werd er impliciet uitgegaan van de meetnauwkeurigheid in de 'huidige' bathymetriegegevens.

De resultaten van de modellering en vooral van de theoretische beschouwing geven een beter inzicht in de te hanteren grenzen. De berekende effecten van bodemdaling (relatieve ZSS) leveren twee bruikbare indicatoren: de maximale waarde van het effect en de integraal van het effect over de tijd. Het effect van bodemdaling is in dit geval het verlies aan intergetijdeplaat (volume, areaal en/of hoogte) en bij de theoretische beschouwing met het 1-element model is het de volume-afwijking t.o.v. het statische evenwicht. Uit de theoretische beschouwing is geconcludeerd dat de integraal van het effect over de tijd alleen afhankelijk van de totale omvang van de bodemdaling (Relatieve ZSS) is en niet van het verloop in de tijd, zo lang het lineaire model van toepassing is. In dat geval blijft er dan dus alleen de maximale waarde van het effect over. Daarvoor moet gelden dat het bijbehorende effect op de ecologie niet significant is.

Voor de geldigheid van het lineaire model moet de afwijking t.o.v. het evenwicht niet te groot zijn. In termen van de snelheid van (relatieve) ZSS zien wij in Fig.3.8 dat deze grens bij ongeveer 40% van de kritische snelheid voor verdrinking ligt. De bijbehorende afwijking van volume t.o.v. het statische evenwichtsvolume is dan meer dan 20% (waarde volgens het lineaire model die kleiner is dan die volgens het niet-lineaire model) als het dynamische evenwicht wordt bereikt. Deze grens wordt zelfs niet overschreden door de extreme scenario's van bodemdaling beschouwd in de huidige studie, zie Tabel 3.1. De beschouwde extreme scenario's vallen dus binnen het geldigheidsgebied van het lineaire model. Dit geldt zelfs voor het scenario Extreem 3 waarbij de relatieve snelheid van ZSS gedurende een korte periode boven de kritische snelheid voor verdrinking komt. Het cumulatieve effect van de bodemdaling (integraal van het effect over de tijd) is dan hetzelfde als voor het scenario waarbij dezelfde totale bodemdaling over een langere tijd is verspreid.

De kritische snelheid voor verdrinking is 32.7 mm/j voor het Pinkegat en 17.1 mm/j voor de Zoutkamperlaag. 40% hiervan is dus respectievelijk ongeveer 13 mm/j en 7 mm/jaar. De

waarden voor het meegroeivermogen van 6 mm/j voor het Pinkegat en 5 mm/j voor de Zoutkamperlaag zijn dus conservatief gekozen. Vooral voor het Pinkegat is er nog speelruimte.

### 3.5 Samenvatting

Het hele verloop van bodemdaling in de tijd is van belang voor de effecten op de morfologische ontwikkelingen. Behalve de maximale snelheid zijn ook de tijdsduur en de totale omvang van de bodemdaling van belang.

Voor de evaluatie van het effect van bodemdaling kunnen wij twee indicatoren hanteren, de maximale waarde van het verlies aan wadplaat en het cumulatieve effect (integraal van het verlies over de tijd). Uit de theoretische analyse zijn de volgende conclusies getrokken:

- Als de verstoring op het morfologische evenwicht door bodemdaling / (relatieve ZSS) binnen de grens van de geldigheid van het lineaire model blijft, is het cumulatieve effect niet afhankelijk van het tijdverloop van de bodemdaling, maar alleen van de totale daling. Voor het cumulatieve effect maakt het dan dus niet uit of de bodemdaling geconcentreerd in een korte tijd of verspreid over een lange periode optreedt.
- Voor de geldigheid van het lineaire (1-element) model is de grens voor de volumeafwijking ongeveer 20% van het statische evenwichtsvolume. Bij alle beschouwde extreme scenario's van bodemdaling zien wij bij de ASMITA modelresultaten dat het verlies aan plaatvolume onder de 10% blijft. Alle beschouwde extreme en hypothetische gevallen bevinden zich binnen de geldigheidsgrens. Dit houdt in dat de herstelsnelheid lineair toeneemt met de verstoring en dat een snelheid van bodemdaling die tijdelijk hoger is dan het meegroeivermogen geen extra cumulatief effect veroorzaakt.
- Als de snelheid van relatieve ZSS kleiner is dan ongeveer 40% van de kritische snelheid voor verdrinking, is het lineaire model een goede benadering. Deze 40% grens komt overeen met ongeveer 13 mm/j voor het Pinkegat en 7 mm/j voor de Zoutkamperlaag. De gehanteerde waarden voor het meegroeivermogen voor de twee bekkens, respectievelijk 6 mm/j en 5 mm/j, zijn dus conservatief.

In de huidige studie hebben wij geen evaluatie gemaakt of de grens voor de toepasbaarheid van het lineaire model, i.e. het een plaatvolumeverlies van orde 20% (plaatareaalverlies orde 5%), ecologisch aanvaardbaar is of niet. Maar dit is, in vergelijking met de gehanteerde normen, over een heel groot verlies gaat dat in de huidige praktijk niet wordt bereikt. Bij de MER-studie is geconcludeerd dat bodemdaling door gaswinning slechts tot geringe effecten op de morfologische ontwikkeling zou leiden, die vergelijkbaar met de natuurlijke fluctuatie t.g.v. de 18.6 jarige cyclus van de getijamplitude zijn. Aangezien het meegroeivermogen (per definitie hoger dan de gebruiksruimte) tijdelijk overschreden zou worden volgens de toen gesimuleerde scenario's van bodemdaling door gaswinning, was toen eigenlijk al de conclusie getrokken dat een tijdelijke overschrijding van de gebruiksruimte door bodemdaling en zeespiegelstijging niet tot significante effecten hoeft te leiden.

De resultaten van de aanvullende modellering bevestigen deze conclusie. De extreme scenario's van bodemdaling, zoals in de aanvullende modellering zijn gehanteerd, zouden tot effecten van dezelfde orde van grootte leiden als de scenario's gehanteerd bij de MER-studie. De effecten van de bodemdaling volgens de extreme scenario's zijn dus ook vergelijkbaar met bijvoorbeeld de natuurlijke fluctuatie t.g.v. de 18.6 jarige cyclus van de getijamplitude.

De aanvullende modellering heeft ook nogmaals bevestigd dat er geen gevaar bestaat voor een eventuele verdrinking van de wadplaten in de bekkens t.g.v. bodemdaling. De bijdrage van bodemdaling aan de veranderingen van de wadplaten is tijdelijk. Zelfs als de bodemdaling door gaswinning in een zodanig korte tijd wordt geconcentreerd zodat de theoretisch kritische snelheid van relatieve ZSS voor verdrinking wordt overschreden zal het effect op de wadplaten ver van verdrinking zijn. Verdrinking van de wadplaten kan alleen optreden als de snelheid van relatieve ZSS eeuwenlang de kritische waarde overschrijdt.

*Kort samengevat: tijdelijke overschrijding van de gebruiksruijnte leidt niet tot problemen zolang het maximale verlies aan wadplaat acceptabel is en het systeemgedrag zich binnen de geldigheidsgrens van het lineaire model blijft. Alle beschouwde extreme scenario's voldoen aan deze voorwaarden.*



## 4 Discussie resultaten modellering in relatie tot waarnemingen

### 4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de aanvullende modellering uit het voorgaande hoofdstuk gelegd naast recente waarnemingen van de morfologische ontwikkelingen in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag en naast geologische observaties aan voormalige Holocene getijdebekken.

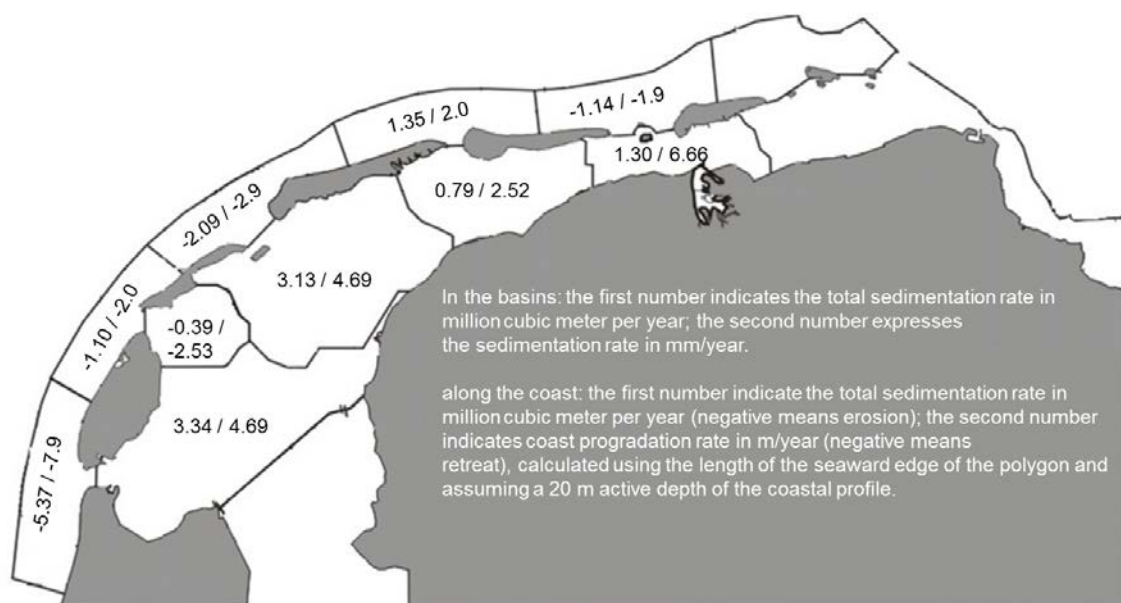
### 4.2 Waargenomen sedimentatiesnelheden

De modellering in het voorgaande hoofdstuk gaat uit van de werking van het sedimentdelende systeem, zoals dat is geformaliseerd in het ASMITA-model. De uitwisseling tussen de verschillende onderdelen van het sedimentdelende systeem is ook beschouwd in de Integrale bodemdalingsstudie (Oost e.a., 1998). Daarin is langs andere wegen dan het ASMITA-model, gerekend aan de uitwisseling van zand en slib tussen de kust en de buitendelta en de geulen en platen in de Waddenzee. Volgens Oost e.a. (1998) is het sedimenttransport vanuit de geulen naar de platen, samen met de leverantie vanaf de kust, de beperkende factor voor het volgen van de stijgende zeespiegel, waarbij men uitkwam op 3-6 mm/jaar. Hieronder worden ingegaan op de waarnemingen aan sedimentatiesnelheden, waaronder die op platen.

#### Op basis van vaklodingen Rijkswaterstaat

Historische ontwikkelingen in de Waddenzee kunnen een indicatie geven over het meegroeivermogen. De waargenomen gemiddelde sedimentatiesnelheid in het kombergingsgebied vormt per definitie een ondergrens van het sediment importerend vermogen van het betreffende gebied als geheel.

Aan de hand van bodemhoogte-gegevens vanaf de afsluiting van de Zuiderzee tot 2005 hebben Elias e.a. (2012) een sedimentbalans opgesteld voor de verschillende zeegatsystemen in de Nederlandse Waddenzee. Daarbij worden de sedimentatie-erosie hoeveelheden in de Waddenzeebekken en de bijbehorende gebieden langs de kust buiten de zeegaten in verschillende perioden bepaald. Voor de kombergingsgebieden Marsdiep, Vlie zijn de afsluiting van de Zuiderzee en voor de Zoutkamperlaag de afsluiting van de Lauwerszee mede bepalend voor de hoge sedimentatiesnelheden die zijn waargenomen. In Fig.4.1. worden de resultaten voor de gemiddelde snelheid van verandering voor de hele periode (1935-2005) samengevat.



**Fig.4.1** Gemiddelde sedimentatie-erosie snelheid in de periode 1935-2005, op basis van de resultaten van Elias e.a. (2012). Zie witte tekst in de figuur voor de betekenis van de getallen.

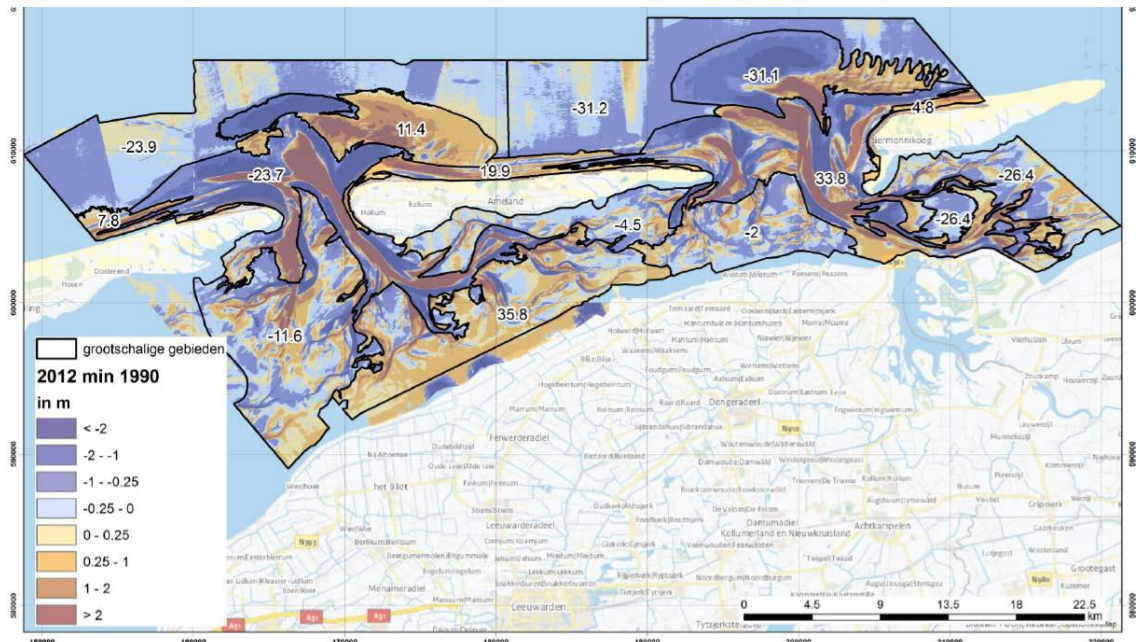
In de figuur zijn de veranderingen uitgedrukt in miljoen m<sup>3</sup> per jaar (het eerste getal in elke polygoon). Verder is het ook uitgedrukt in mm/jaar in de bekkens en in m/jaar (verandering kustlijn positie) langs de kust buiten de zeegaten (zie tekst uitleg in de figuur).

Uit de analyse van Elias e.a. (2012) blijkt dat in het Friesche Zeegat (dat bestaat uit de gecombineerde kombergingsgebieden van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag) de sedimentatiesnelheid de hoogst is van alle kombergingsgebieden in de Nederlandse Waddenzee, namelijk 6.66 mm/jaar gemiddeld over de hele periode 1935-2005. Dit komt door de reactie van het systeem op de afsluiting van de Lauwerszee in 1969. Kijken wij naar de periode tot 1990 dan is de sedimentatiesnelheid in dit bekken zelfs 8.25 mm/jaar. Het is logisch dat de sedimentatiesnelheid na 1990 afneemt omdat het effect van de afsluiting van de Lauwerszee dan verder uitgedempt is.

In de analyse van Elias e.a. (2012) is er geen onderscheid gemaakt tussen het Pinkegat en de Zoutkamperlaag. Het hele Friesche Zeegat, i.e. het Pinkegat en de Zoutkamperlaag samen, wordt beschouwd. De zo verkregen sedimentatiesnelheid is per definitie een (naar oppervlakte) gewogen gemiddelde van de sedimentatiesnelheden in de twee bekkens. Het sediment invoerend vermogen van het Friesche Zeegat zou daarbij gemiddeld kunnen worden geschat op 8 mm/jaar. Sedimentatiestudies, zoals onder andere uitgevoerd in Oost (1995), laten zien dat de sedimentatie in de Zoutkamperlaag veel groter was dan in het Pinkegat. Deze grote sedimentatie was het gevolg van de afsluiting van de Lauwerszee. Analyses van het Pinkegat in de periode voor de aanvang van de gaswinning laten zien dat dit kombergingsgebied ook sterk kan sedimenteren. De gemiddelde sedimentatie in het Pinkegat over de periode 1967-1987 heeft bijvoorbeeld een waarde van 9.9 mm/jaar (Oost, 1995). Op basis van de waargenomen historische ontwikkelingen kunnen wij dus stellen dat het sedimentinvoerende vermogen in de bekkens Pinkegat en Zoutkamperlaag groter is dan 8.25 mm/jaar.

Door Vermaas en Marges (2015) is een analyse uitgevoerde van de sedimentvolumes rondom Ameland, op basis van de vaklodinggegevens tot en met 2012. Het studiegebied

omvat ook het Pinkegat en het Friesche Zeegat. De gebiedsindeling die door Tommer en Marges is gebruikt, wijkt af van de indeling die door Elias e.a. (2012) is gehanteerd, waardoor een onderlinge vergelijking lastig is.



**Fig.4.2** Grootchalige gebieden met verandering in volume tussen 1990 en 2012 in miljoen  $m^3$ , positieve waarden zijn verhoging, negatieve verlaging, uit Vermaas en Marges (2015).

Een van de conclusies uit Vermaas en Marges (2015) is dat netto in het onderzochte gebied het volume sediment met ruim  $-22$  miljoen  $m^3$  is afgenomen tussen 1990 en 2012. Belangrijker is echter de verdeling van het sediment over het gebied. De belangrijkste gebieden waarvan de sedimentvolumes zijn toegenomen zijn de kusten van de eilanden en het geul/plaat systeem tegen het vasteland van Friesland aan bij het Zeegat van Ameland. De andere geul/plaat systemen in de Waddenzee laten juist een afname in sedimentvolume zien in deze periode, terwijl de meeste gebieden vóór 1990 wel nog sedimentatie lieten zien. Overall tonen de kwelders die direct tegen het vasteland liggen een toename in volume, in totaal geschat op  $18$  miljoen  $m^3$  tussen 1990 en 2012. Deze gebieden zijn echter niet vaak ingemeten, waardoor alleen een schatting gemaakt kon worden. Voor beide zeegaten is het volume van buitendelta samen met dat van het zeegat min of meer gelijk gebleven of iets achteruit gegaan. De grootste afname in volume is in de offshore gebieden. Hoewel de veranderingen hier klein zijn, wordt het totaal volume ( $-55$  miljoen  $m^3$ ) groot doordat het een groot gebied beslaat.

De analyse van Elias e.a. (2012) omvat de bodemliggingsgegevens tot en met 2005. De vaklodinggegevens van het kombergingsgebieden Zeegat van Ameland (Borndiep) van 2008 en 2014 en van het gecombineerde Pinkegat en Friesche Zeegat van 2009 en 2015 zijn niet in de analyse van Elias e.a. (2012) betrokken. De analyse van Vermaas en Marges (2015) heeft betrekking op de gegevens tot en met 2012, maar er is geen volumeberekening op dezelfde manier als in Elias e.a. (2012) gedaan. Daarom hebben wij een aanvullende data-analyse uitgevoerd voor de periode 2006-2012. In deze aanvullende analyse zijn er voor het bekken van het Friesche Zeegat bodemkaarten van 2006 en 2012 gemaakt aan de hand van gegevens van vaklodingen (lodingen aangevuld met LIDAR metingen). Fig. 4.3 toont het verschil tussen de bodemniveaus van de twee jaren. In de figuur zijn de totale hoeveelheden



van sedimenttoename in de bekkens van Pinkegat en Zoutkamperlaag ook gemeld. Deze hoeveelheden komen overeen met de gemiddelde snelheden van bodemhoogteverandering (de absolute sedimentatiesnelheden zijn nog iets hoger, omdat er geen rekening met de bodemdaling is gehouden) in de twee bekkens van respectievelijk 5.3 mm/jaar en 2.2 mm/jaar.

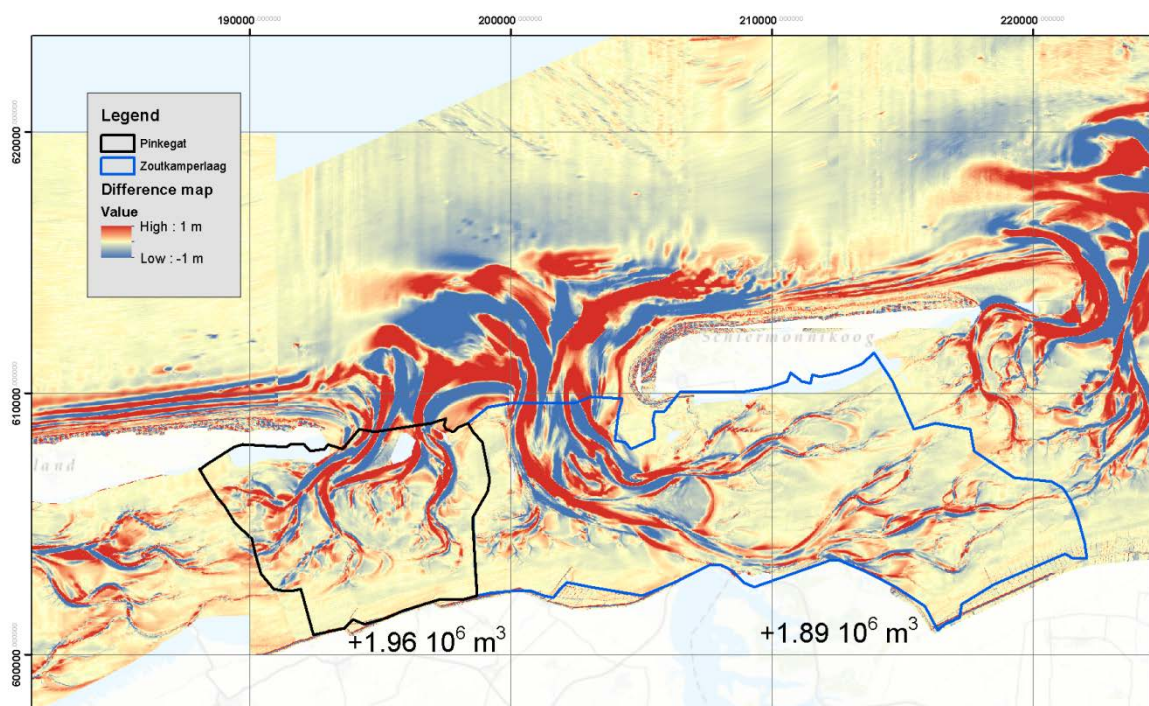


Fig.4.3. Veranderingen in bodemniveau in de periode 2006-2012 (positief=sedimentatie).

#### Detailmetingen aan de sedimentatiesnelheden op wadplaten (spijkermetingen)

Aanvullende gegevens die met voldoende vertrouwen kunnen worden geraadpleegd zijn de spijkermetingen (Krol, 2015; 2016). Deze metingen betreffen lokale puntmetingen van sedimentatie-erosie dikte (geen verandering van bodemhoogte die ook door bodemdaling kan worden beïnvloed), maar zijn zo gekozen dat deze gezien de uniformiteit van het wad over grote afstanden, als representatief worden gezien voor een groter plaatoppervlak.

Uit Krol (2015) volgt dat gerekend over de gehele meetperiode die tussen de onderzoeksgebieden varieert van de afgelopen 8 tot 14 jaar, er sprake is van sedimentatie in alle 5 onderzochte gebieden. Op Engelsmanplaat 1.2 mm/jaar, Oost-Ameland 7.3 mm/jaar, Paesens 10.8 mm/jaar, West-Ameland 5.9 mm/jaar en Schiermonnikoog 7.1 mm/jaar.

Krol (2016) laat zien dat de jaarlijkse ophoging op het wad ten zuiden van West-Ameland (5.8 mm/j) niet belangrijk verschilt van de ophoging bij Oost-Ameland (6.6 mm/jaar). Dit zou kunnen duiden op een voor heel Ameland geldend sedimentatiemechanisme onafhankelijk van bodemdaling.

De ophoging bij Oost-Ameland (6.6 mm/j) wordt voor bijna de helft teniet gedaan door de daling van de ondergrond door gaswinning, waardoor er gemiddeld voor het hele gebied een opslibbing van 3.1 mm/jaar netto resulteert.



In een beperkt waddegebied van 3 km lengte vlak langs de zuidkust bij Oost-Ameland, waar de bodemdaling maximaal is, vindt een netto verlaging van het maaiveld met ongeveer 5 mm/jaar plaats.

### **LIDAR metingen**

Sinds 2010 worden de morfologische veranderingen op de wadplaten in het Friesche Zeegat ook gemeten met LIDAR. Tot nu toe zijn de gemeten veranderingen nog binnen de foutmarges van de metingen (Wang e.a., 2010; Cronin en Wang, 2012; Elias e.a., 2013; Arentz en Vroom, 2014; Vroom en Beekhuizen, 2015; Schrijvershof en Vroom, 2015). Het is daarom nog niet mogelijk om op basis van de LIDAR hoogtemetingen uitspraken te doen over de hoogteveranderingen op de droogvallende platen.

De verschillende waarnemingen aan de recente sedimentatiesnelheden in het kombergingsgebied van het Pinkegat hebben plaatsgevonden onder de huidige condities van relatieve zeespiegelstijging, al dan niet in combinatie met bodemdaling door gaswinning. Deze condities zijn nog ver verwijderd van de condities van de kritische snelheid van verdrinken uit het voorgaande hoofdstuk en de waargenomen sedimentatiesnelheden zijn derhalve geen indicatoren voor de maximale sedimentatiesnelheden. Voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag is de afsluiting van de Lauwerszee ook van invloed geweest op de waargenomen hoge sedimentatiesnelheden. Het is niet zonder meer mogelijk om deze afsluiting te vertalen naar een versnelde zeespiegelstijging en/of bodemdaling met een vergelijkbaar effect, maar de waargenomen hoge sedimentatiesnelheden na de afsluiting geven wel inzicht in de maximale netto transporten naar het kombergingsgebied.

Uit de verschillende waarnemingen aan het Pinkegat en de Zoutkamperlaag volgt dat de sedimentatiesnelheden gemiddeld in de bekkens en op de platen tenminste zo groot zijn als de gerapporteerde meegroeivermogens van respectievelijk 5 en 6 mm/jaar. Een kortdurende overschrijding van de gebruikruimte op basis van deze waarden van het meegroeivermogen kan worden bijgehouden door de sedimentatie in deze bekkens.

### **4.3 Geologische observaties**

In de oorspronkelijke opzet naar het zoeken van het meegroeivermogen van de Waddenzee werd onderkend dat de wadplaten van de Waddenzee waarschijnlijk een limiet kennen voor wat betreft hun vermogen om mee te kunnen groeien met de relatieve zeespiegel door middel van sedimentatie. Een en ander was gebaseerd op geologische reconstructies van het grote getijddebekken van het Zeegat van Alkmaar/Bergen, dat in plaats van droogvallende wadplaten grote arealen sublitoraal omvatte (Beets en Van der Spek, 1996). Als oorzaak voor deze ontwikkeling is de grote omvang van het bekken in combinatie met de hoge zeespiegelstijgingssnelheden genoemd. De aanvoer van sediment naar bekken was onvoldoende om de zeespiegelstijging bij te houden.

Geologische studies naar de Holocene kustontwikkeling van Nederland van de afgelopen 20 jaar hebben de nadruk gelegd op de balans tussen het aanbod van sediment uit de kustzone ('sediment supply') en de ruimte voor sedimentatie door de stijging van de zeespiegel ('accomodation space'). Met deze balans is onder meer goed te verklaren dat bij hoge snelheden van zeespiegelstijging sommige getijddebekken wel verlanden en andere niet. Dit conceptuele model is onder andere gepresenteerd in Beets en Van der Spek (1996). Het conceptuele model voor de ontwikkeling van getijddebekken in het Holoceen, op tijdschalen van millennia tot eeuwen, komt overeen met het conceptuele model van het sedimentdelende systeem dat voor de morfologische ontwikkelingen van moderne getijddebekken wordt gehanteerd.

In eerste instantie is op basis van verschillende studies (Van der Spek en Beets, 1992; Beets e.a., 1994; Beets en van der Spek, 1996) gesteld dat in eerdere fasen van het Holoceen de sedimentatiesnelheden in grote kombergingsgebieden te klein waren om zeespiegelstijgingssnelheden van 3 à 4 mm/jaar bij te houden. Nieuwe gegevens van de Holocene getijdebekken wijzen op hogere gemiddelde sedimentatiesnelheden, van 0.3-0.6 m/eeuw (3-6 mm/j) voor de lange periode van 7500-5500 BP tot 0.8-1.1 m/eeuw (8-11 mm/j) voor de lange periode van 5500-4500 BP (Van der Spek, 2004). Over kortere perioden varieerden de sedimentatiesnelheden in de verschillende bekken tussen 0.1 tot 3.5 m/eeuw. Deze nieuwe geologische observaties van sedimentatiesnelheden wijzen, in tegenstelling op eerdere schattingen, niet op een beperkt meegroeivermogen.

#### 4.4 De toepasbaarheid van de uitkomsten van het ASMITA-model

Bij de bepaling van het meegroeivermogen in de Integrale Bodemdalingstudie (Oost, 1998), werden vier schakels vanaf erosie langs de Noordzee kust tot de sedimentatie op de wadplaten apart beschouwd. Deze schakels vormen samen het sedimentdelende systeem, zoals dat in het ASMITA-model is opgenomen. De schakels: transport van de geulen naar de platen en afslag aan de Noordzeekusten werden samen als maatgevend (d.w.z. het meest beperkend) beschouwd.

Het meegroeivermogen gaat uit van de bekken-gemiddelde sedimentatiesnelheid gebaseerd op toenmalige inzichten (Biegel, 1993) van wat er aan afzetting op de platen terecht komt. Deze waarden zijn beduidend lager dan de waarden die met het ASMITA-model worden berekend voor de sedimentatie op de platen. In de voorgaande paragrafen is getoond dat de bekkengemiddelde sedimentatie, de sedimentatiesnelheden die worden gemeten met de spijkermetingen en geologische observaties waarden laten zien die hoger zijn dan de door Biegel (1993) gerapporteerde waarden<sup>4</sup>. Een en ander duidt erop dat de door Biegel bepaalde sedimentatiesnelheden op de platen niet de maximale snelheden zijn die werkelijk gerealiseerd kunnen worden. Een kortdurende overschrijding van de gebruiksruimte, welke mede gebaseerd is op de waarnemingen van Biegel, hoeft derhalve niet problematisch te zijn.

De andere potentiële beperking van de uitwisseling tussen de onderdelen van het sedimentdelende systeem komt voort uit de maximale achteruitgang van de kustlijn. Door Oost e.a. (1998) is berekend dat de kustzone voldoende zand levert om gemiddeld voor de gehele Waddenzee zeespiegelstijgingssnelheden van 4.0 tot 6.6 mm/jaar over langere perioden te kunnen volgen. In de achtergrondstudie bij de bodemdaling door zoutwinning Cleveringa & Grasmeijer (2010) is beargumenteerd dat bij het continueren van het vigerende kustbeleid- en beheer door het uitvoeren van zandsuppleties, bij hogere snelheden van zeespiegelstijging meer zand beschikbaar is voor de Waddenzee. De reden is dat dan geen lokale herverdeling van zand nodig is van het kustprofiel bij een versneld stijgende zeespiegel, omdat daarvoor zandsuppleties worden ingezet. Op basis van dit inzicht mag worden uitgegaan van een grotere levering van zand door de kustzone en derhalve van waarden van tenminste 5 mm/jaar voor de getijdebekken Vlie en Marsdiep. Een soortgelijke

---

<sup>4</sup> Als inderdaad een hogere sedimentatie over langere perioden op platen mogelijk is, dan blijven de droogvallende platen bij hogere waarden voor relatieve zeespiegelstijging in stand dan tot nu toe is aangenomen en is vastgelegd in het meegroeivermogen voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Een studie naar sedimentatiesnelheid (maximaal gedurende een periode van tientallen jaren en gemiddeld over het kombergingsgebied) op platen wordt dan ook dringend aanbevolen.

redenatie kan ook gehouden worden voor de overige zeegaten en leidt dan tot het inzicht dat de levering van zand vanaf de kustzone op die wijze vergroot zou kunnen worden. Op die wijze zou een eventuele beperking vanuit de levering van zand vanaf de kust minder groot zijn waarmee een kortdurende overschrijding van de gebruiksruijnte geen probleem is.



## 5 Conclusies en aanbevelingen

De eindconclusie van de huidige studie is dat een tijdelijke overschrijding van de gebruiksruimte zoals die nu is gehanteerd voor de bodemdaling door gaswinning onder de Waddenzee niet tot ernstige effecten zal leiden.

Deze eindconclusie is gebaseerd op de aanvullende modellering van de lange-termijn en grootschalige morfologische ontwikkelingen en wordt ondersteund door de analyse van het "Hand aan de Kraan" principe en het daarin gehanteerde meegroeivermogen en door de beschouwing van de verschillende meetgegevens.

De volgende conclusies worden getrokken aan de hand van de aanvullende modellering en de bijbehorende theoretische analyse:

- De aanvullende modellering bevestigt de conclusies uit de MER-studie (Wang en Eysink, 2005) dat het tijdelijke overschrijden van de gebruiksruimte door bodemdaling en zeespiegelstijging niet tot significante effecten zal leiden. De extreme scenario's van bodemdaling, zoals in de aanvullende modellering zijn gehanteerd, zouden tot effecten met dezelfde orde van grootte leiden als de scenario's gehanteerd bij de MER-studie.
- De aanvullende modellering heeft ook nogmaals bevestigd dat er geen gevaar voor een eventuele verdrinking van de wadplaten in de bekkens t.g.v. bodemdaling bestaat. Verdrinking van de wadplaten kan alleen optreden als de snelheid van relatieve ZSS de kritische waarde eeuwenlang overschrijdt.
- Het hele verloop van de bodemdaling in de tijd is van belang voor de effecten op de morfologische ontwikkelingen. Behalve de maximale snelheid zijn ook factoren als tijdsduur en het totale omvang van de bodemdaling van belang.
- Alle beschouwde extreme (en hypothetische) scenario's bevinden zich binnen de geldigheidsgrens van het lineaire model. Concentratie van de bodemdaling in een kortere periode, waardoor de gebruiksruimte tijdelijk wordt overschreden, leidt niet tot een extra cumulatief effect als het totale bodemdalingsvolume gelijk blijft.

In de analyse zijn het "Hand aan de Kraan" principe en daarin gehanteerde begrippen meegroeivermogen en gebruiksruimte nader beschouwd. De onderliggende studies en de relevante studies sinds de invoering ervan worden gereviewd. Uit de bureaustudie zijn de volgende conclusies getrokken:

- Het HADK-principe is een vereenvoudigde en praktische toepassing van de kennis en inzichten over de morfologische ontwikkelingen in de Waddenzee tot 2006.
- De in 2006 bepaalde waarden voor het meegroeivermogen van de verschillende Waddenzeebekkens zijn conservatief. Vergeleken met de grens waarbinnen het lineaire model geldig is, is er speelruimte die voor de verschillende bekkens verschillend is. Een aanpassing van het meegroeivermogen voor de Marsdiep en het Vlie is doorgevoerd in verband met de zoutwinning onder de Waddenzee.
- De waargenomen sedimentatiesnelheden in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag, die hoger zijn dan de vigerende waarden voor de meegroeivermogens geven aan dat er voldoende sediment binnenkomt om een zeespiegelstijging van 8 mm/jaar op te vangen.

Op basis van de conclusies van de huidige studie doen wij de volgende aanbevelingen:

1. Niet meteen reageren op een overschrijding van de nu geldende gebruiksruimte door gaswinning onder de Waddenzee te stoppen, maar wel corrigerend zo bijstellen dat de totale afwijking van het evenwicht niet zo groot wordt dat er significante aantasting van intergetijdeplaten optreedt.
2. De grens voor de geldigheid van het lineaire model kan mogelijk een nieuwe definitie van het meegroeivermogen worden. Er is ecologische evaluatie nodig om daarop een nieuw normensysteem te baseren. De ecologische evaluatie moet vooral aangeven welke maximale (momentane) verlies van wadplaat nog aanvaardbaar is.
3. Bij monitoring goed letten op eventuele overschrijding van de grens waarbinnen het lineaire model van toepassing is.

## 6 Referenties

Arentz, L. & Vroom, J., 2014: Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2013): Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1209136-000.

Beets, D.J. & Van der Spek, A.J.F., 1996: Development of the Dutch Coastal Plain during the Holocene; relation to sea-level rise and subsurface geology. In: Proceedings of the symposium: Effects of future sea-level rise and subsidence on the Wadden Sea tidal system; Sediment dynamics and biology; what do(n't) we know? p. 15-21.

Beets, D.J., Van der Spek, A.J.F. & Van der Valk, L., 1994: Holocene ontwikkeling van de Nederlandse kust. RGD rapport 40.016 - Project Kustgenese. Haarlem, Rijks Geologische Dienst, Hoofdafdeling Ondiepe Ondergrond, 53 pp.

Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, 2005: Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost, evaluatie na 18 jaar gaswinning.

Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, 2010: Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost.

Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, 2017: Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost, evaluatie na 18 jaar gaswinning.

Biegel, E.R.J., 1993: Morphological changes due to sea-level rise in tidal basins in the Dutch Wadden Sea versus concepts morphological response model MORRES. Rijksuniversiteit Utrecht IMAU rapport IMAU 93-14.

Cleveringa, J. & Grasmeyer, B., 2010: Meegroeivermogen en gebruiksruimte in de getijbekkens Vlie en Marsdiep; Grootschalige morfologische ontwikkelingen westelijke Waddenzee, Arcadis, Rapport A2062R3r5.

Cronin, K. & Wang, Z.B., 2012: Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat: Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1204654-000.

De Waal, J.A., Roest, J.P.A., Fokker, P.A., Kroon, I.C., Breunese, J.N. Muntendam-Bos, A.G., Oost, A.P. & van Wirdum, G., 2012: The effective subsidence capacity concept: How to assure that subsidence in the Wadden Sea remains within defined limits? Netherlands Journal of Geosciences — Geologie en Mijnbouw, vol. 91 – 3, pag. 385 – 399.

Eysink, W.D., 1993a: Bodemdaling door gaswinning in de Waddenzee, Effecten op zandhonger en platen volgens berekeningen met het Morfologisch Responsie-Model MORRES, Bijlage 7 in Oost, A.P. en Dijkema, K.S. (1993), IBN-DLO-rapport 025, ISSN 0928-6888, WL kenmerk H1948, augustus 1993.

Eysink, W.D. & Biegel, E.J., 1992: ISOS\*2 Project, Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function, Investigations on empirical morphological relations, Report H1300Phase 2, WL | Delft Hydraulics Laboratory, September 1992, 73 p.

Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B. & De Ronde, J.G., 2012. "Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century," *Netherlands Journal of Geoscience*, 91(3), 293–310.

Hinkel, J., Nicholls, R.J., Tol, R.S.J., Wang, Z.B., Hamilton J.M., Boot, G., Vafeidis, A.T., McFadden, L., Ganopolski, A. & Klein, R.J.T., 2013: A global analysis of erosion of sandy beaches and sea-level rise: An application of DIVA, *Global and Planetary Change* 111 (2013) 150–158, doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.09.002

Hoeksema, H.J., Mulder, H.P.J., Rommel, M.C., de Ronde, J.G. & de Vlas, J., 2004: Bodemdalingstudie Waddenzee 2004: Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. RIKZ-rapport 2004-025. 67 p. + bijlagen.

Elias, E.P.L., Wang, Z.B. & Cronin, K., 2013: Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2012): Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1206958-000.

Kragtwijk, N.G, 2001: Aggregated scale modelling of tidal inlets of the Wadden Sea, WL | delft Hydraulics / Delft Cluster, Report Z2822 / DC03.01.03a.

Kragtwijk, N. G., Zitman, T. J., Stive, M. J. F. & Wang, Z. B., 2004: Morphological responses of tidal basins to human interventions, *Coast. Eng.*, 51(3): 207-221.

Krol, J. 2015. Wadsedimentatiemetingen Ameland, Engelsmanplaat, Paesens en Schiermonnikoog 2007-2014 Rapport Natuurcentrum Ameland.

Krol, J. 2016. Wadplaat sedimentatie bij Ameland 2000-2015. Rapport Natuurcentrum Ameland.

Louters, T. & Gerritsen, F., 1994: Het mysterie van de wadden, Hoe een getijdesysteem inspeelt op de zeespiegelstijging. Min. van V. en W., Dir.Gen. RWS, RIKZ, Rapp. RIKZ94.040, oktober 1994. NAM, 1990. Bodemdaling door aardgaswinning, Groningen Veld en Randvelden, Statusrapport 1990, Prognose tot het jaar 2050, NAM, februari 1990.

Ministerie van Economische Zaken, 2006, Gaswinning binnen randvoorwaarden, Passende beoordeling van het Rijksbesluit over de aardgaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen.

NAM, 2005. Startnotitie milieu effect rapportage: Aardgaswinning vanaf locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. NAM, Assen. 42 p.

Oost, A.P., Ens, B.J., Brinkman, A.G., Dijkema, K.S., Eysink, W.D., Beukema, J.J., Gussinklo, H.J., Verboom, B.M.J. & Verburgh, J.J., 1998: Integrale bodemdalingstudie Waddenzee. Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Assen. 372 p.

Ridderinkhof, W., Swart, H.E., van der Vegt, M. Alebregtse, N.C., & Hoekstra, P., 2014: Geometry of tidal inlet systems: A key factor for the net sediment transport in tidal inlets, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 6988–7006, doi:10.1002/2014JC010226.

Schuttelaars, H.M. & De Swart, H.E., 2000: Multiple morphodynamic equilibria in tidal embayments, *J. of Geophysical Res.* Vol.105, No. C10, 24,10524,118.



- Stive, M.J.F., & Wang, Z.B., 2003: "Morphodynamic modelling of tidal basins and coastal inlets." In: C. Lakkhan (ed.), *Advances in Coastal Modelling*, Elsevier Sciences, 367-392.
- Townend, I. H., Wang, Z. B., Stive, M. J. F. & Zhou, Z., 2016a: Development and extension of an aggregated scale model: Part 1 – Background to ASMITA, *China Ocean Eng.*, 30(4): 483-504.
- Townend, I. H., Wang, Z. B., Stive, M. J. F. & Zhou, Z., 2016b: Development and extension of an aggregated scale model: Part 2 – Extensions to ASMITA, *China Ocean Eng.*, 30(5): 651-670.
- Van der Spek, A.J.F., 2004: Sediment accumulation in Atlantic back-barrier basins in the Netherlands; fine-grained infilling under high rates of sea-level rise. Bartholdy, J. & J.B. Torp Pederson (red.). *Abstracts Tidalites 204*, 6th International Conference on Tidal Sedimentology, 2-5 aug. 2004 Copenhagen, Denmark.
- Van der Spek & D.J. Beets (1992) Mid-Holocene evolution of a tidal basin in the western Netherlands: a model for future changes in the northern Netherlands under conditions of accelerated sea-level rise? *Sedimentary Geology* 80. 185-197.
- Van Goor, M.A., 2001: Influence of relative sea-level rise on coastal inlets and tidal basins, WL | delft Hydraulics / Delft Cluster, Report Z2822 / DC03.01.03a.
- Van Goor, M.A., Zitman, T.J., Wang, Z.B. & Stive, M.J.F., 2003: Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets, *Mar. Geol.*, 202(3-4): 211-227.
- Vermaas, T. & Marges, V. 2015: Detailanalyse volumeveranderingen rondom Ameland, Deltares, Rapport 1220040-006.
- Vroom, J. en Beekhuizen, J., 2015: Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2014): Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1210543-000.
- Wang, Z.B. & Eysink, W.D., 2005: Abiotische effecten van bodemdaling in de Waddenzee door gaswinning, Rapport Z3995, WL | Delft Hydraulics.
- Wang, Z.B., de Vriend, H.J., Stive, M.J.F. & Townend, I.H., 2008: On the parameter setting of semi-empirical long-term morphological models for estuaries and tidal lagoons, in: C. M. Dohmen-Janssen, S. J. M. H. Hulscher (Eds.), *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Taylor & Francis, pp. 103-111.
- Wang, Z.B., Cronin, K. & van Ormondt, A., 2010: Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat: Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1202285-000.
- Wang Z.B. & van der Spek, A., 2015: Importance of mud for morphological respons of tidal basins to sea-level rise, *Proceedings of Coastal Sediments*, 2015.



## **A Externe kwaliteitstoetsing**

dr. H Speelman  
Prof.dr.ir. H.J. de Vriend

<b>Datum</b>	<b>Ons kenmerk</b>	<b>Aantal pagina's</b>
14 april 2017	1230937-000-ZKS-0004	1
<b>Contactpersoon</b>	<b>Doorkiesnummer</b>	<b>E-mail</b>
Zheng Wang	+31(0)88335 8202	zheng.wang@deltares.nl

**Onderwerp**  
Review rapport Morfologische effecten bodemdaling in relatie tot gebruiksruimte

Geachte heren, beste Huib en Hessel,

Bij de uitvoering van de studie naar de morfologische effecten van bodemdaling in relatie tot gebruiksruimte (1230937) bent u betrokken geweest als externe reviewer. Om het reviewproces formeel te kunnen afronden verzoeken we u uw goedkeuring van het eindrapport schriftelijk te bevestigen. Uw bevestiging zal als bijlage worden opgenomen in het definitieve eindrapport.

Bij voorbaat danken wij u voor uw medewerking.

Met vriendelijke groet,



dr.ir. D.J.R. Walstra  
Zee- en Kustsystemen Afdelingshoofd Applied Morphodynamics

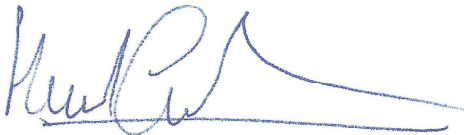
Aan: Deltares, Kust- en Zeesystemen  
t.a.v. dr.ir. D.J.R. Walstra  
Postbus 177  
2600MH Delft

Betreft: Rapport Morfologische effecten bodemdaling in relatie tot gebruiksruijnte  
Datum: 17 april 2017  
Uw kenmerk: 1230937 -000-ZKS-0004

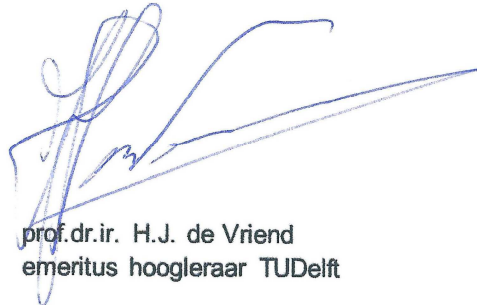
Geachte heer Walstra,

Op uw verzoek hebben we bovenstaand rapport getoetst op inhoudelijke kwaliteit. Dit leidde tot de conclusie dat, binnen de gestelde kaders van tijd en budget, optimaal gebruik is gemaakt van de beschikbare gegevens en state-of-the art modellen. Wij staan achter de daaruit getrokken conclusies ten aanzien van de respons van het beschouwde fysische systeem op zeespiegelstijging en bodemdaling, maar onderschrijven anderzijds de noodzaak van nadere ecologische evaluatie om te komen tot normen voor een (tijdelijk) verlies aan plaatoppervlakte, -hoogte en -relief.

Hoogachtend,



dr. H. Speelman  
vice-voorzitter Waddenacademie



prof.dr.ir. H.J. de Vriend  
emeritus hoogleraar TUDelft