

Opdrachtgever:

NAM

## Abiotische effecten van bodemdaling in de Waddenzee door gaswinning

Vloedkommen van het Friesche Zeegat

Rapport

Z3995

Opdrachtgever:

NAM

## Abiotische effecten van bodemdaling in de Waddenzee door gaswinning

Vloedkommen van het Friesche Zeegat

Z.B. Wang  
W.D. Eysink

Rapport

Z3995

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1</b>
1.1	Probleemstelling .....	1
1.2	Opdracht .....	1
<b>2</b>	<b>Aanpak en beschikbare gegevens .....</b>	<b>3</b>
2.1	Algemene overwegingen .....	3
2.2	Aanpak onderzoek .....	4
2.3	Beschikbare gegevens.....	5
<b>3</b>	<b>Effecten van bodemdaling (bureaustudie).....</b>	<b>8</b>
3.1	Aanpak bureaustudie .....	8
3.2	Effect in de Waddenzee.....	9
3.3	Effect op de Noordzeekust.....	11
3.4	Effect op kwelderrand en –niveau van de Peazemerlannen.....	12
3.4.1	Algemeen.....	12
3.4.2	Resultaten monitoring op Ameland .....	13
3.4.3	Resultaten 0-meting Peazemerlannen .....	15
3.4.4	Effect op het kwelderniveau en de kwelderrand van de Peazemerlannen .....	17
3.5	Effect op het economisch gebruik van de zomerpolder .....	18
<b>4</b>	<b>ASMITA-onderzoek.....</b>	<b>24</b>
4.1	Inleiding.....	24
4.2	Aanpak ASMITA-onderzoek .....	24
4.2.1	Beschrijving van het model .....	24
4.2.2	Uitgevoerde berekeningen .....	27

4.2.3	Interpretatie van modelresultaten.....	28
4.3	Basis scenario .....	29
4.4	Effect van de 18,6-jarige cyclus in getijslag.....	31
4.5	Effect versnelde zeespiegelrijzing .....	32
4.6	Effect toename getijslag.....	33
4.7	Bodemdaling scenario hoog.....	34
4.8	Effect gaswinning op vloedkom van het Pinkegat.....	34
4.9	Effect gaswinning op vloedkom van de Zoutkamperlaag.....	36
4.10	Discussie over kritische limit bodemdalingsnelheid.....	38
<b>5</b>	<b>ESTMORF-onderzoek.....</b>	<b>40</b>
5.1	Aanpak ESTMORF-onderzoek.....	40
5.1.1	Model opzet .....	40
5.1.2	Toepassing van het model.....	40
5.2	Resultaten .....	41
5.2.1	Sedimentatie erosie patroon.....	41
5.2.2	Grootschalige ontwikkeling.....	42
5.2.3	Ontwikkeling van de platen .....	42
<b>6</b>	<b>DELFT3D-onderzoek .....</b>	<b>44</b>
6.1	Doel en aanpak DELFT3D-onderzoek .....	44
6.2	Resultaten .....	44
6.2.1	Waterstanden en debieten .....	44
6.2.2	Stroomsnelheden.....	44
6.2.3	Getijasymmetrie.....	44
6.3	Conclusies.....	45
<b>7</b>	<b>Integrale beschouwing.....</b>	<b>46</b>
7.1	Inleiding.....	49

---

7.2	Effect bodemdaling Pinkegat.....	49
7.2.1	Buitendelta en kust .....	49
7.2.2	Geulen en platen .....	50
7.2.3	Waterbeweging en bodemsamenstelling.....	52
7.3	Effect bodemdaling Zoukamperlaag.....	52
7.3.1	Buitendelta en kust .....	52
7.3.2	Geulen en platen .....	53
7.3.3	Waterbeweging en bodemsamenstelling.....	54
7.4	Conclusies.....	54

## Tabellenlijst

- 2.3.1 Verwachte eindwaarden van bodemdaling door gaswinning
- 3.4.1 Bodemdaling en opslibbing in de Peazemerlanden en op Nieuwlandsrijd
- 3.4.2 Gemiddelde bruto opslibbing/erosie (mm/jaar) in de Peazemerlanden
- 3.5.1 Gemiddelde bedekkingpercentages van kwelderplanten in de Peazemerlanden gedurende de periode 1995 - 1998
- 3.5.2 Vergelijking van de opslibbing (SEB-methode, mm/j) in de Peazemerlanden (1995 - 2000) en op Nieuwlandsrijd (1993 - 2000)
- 3.7.1 Waterstanden van Lauwersoog
- 3.7.2 Statistische gegevens van HW te Lauwersoog van 1971-1980
- 3.7.3 Geschatte hoeveelheid ingestroomd water in de zomerpolder bij gegeven overschrijding van het HW-peil boven de kruin van de zomerkade
- 3.7.4 Statistische gegevens van LW te Lauwersoog van 1971-1980
- 3.7.5 Effect maximum bodemdaling op aantal overstromingen van de zomerpolder
- 4.1 Invoergegevens van ASMITA model
- 4.2 Definitie van scenario's
- 7.1 Totale volumes van de bodemdaling in Pinkegat
- 7.2 Maximale toename van sediment transport van kust naar Pinkegat
- 7.3 Voorspelde maximale afname plaatareaal in Pinkegat
- 7.4 Totale volumes van de bodemdaling in de Zoutkamperlaag
- 7.5 Maximale toename van sediment transport van kust naar Zoutkamperlaag
- 7.6 Voorspelde maximale afname van het plaatareaal in de Zoutkamperlaag

## Figurenlijst

- 1.1 Situatie Peazemerlannen
  
- 2.1 Totale bodemdaling in 2040 van de gasvelden Ameland, Anjum, Nes, Moddergat en Lauwersoog
- 2.2 Bodemdaling in de periode 2007 – 2040 van de gasvelden Ameland, Anjum, Nes, Moddergat en Lauwersoog
- 2.3 Verloop maximum bodemdaling op Ameland en van Anjum+nieuwe velden
  
- 3.1 Bodemdaling langs Friese Zeewering in 2040
- 3.2 Gevolgen bodemdaling op platen en geulvolume in de vloedkom Zoutkamperlaag
- 3.3 Slibgehalten wadbodem in het dalingsgebied
- 3.4 Overzicht van de SEB-metingen op het Nieuwlandsrijd, raai3
- 3.5a Verloop maaiveldhoogte met en zonder opslibbing op twee PQ's op Nieuwlandsrijd
- 3.5b Verloop maaiveldhoogte met en zonder opslibbing op twee PQ's op De Hon
- 3.6 Overzicht van de SEB-metingen in de Peazemerlannen
- 3.7a,b Voorspelling hoogteligging kwelderzones in de Peazemerlannen zonder en met bodemdaling
- 3.8 Voorspelling hoogteligging van de zomerpolder in de Peazemerlannen zonder en met bodemdaling
  
- 4.1 ASMITA-model
- 4.2 Ontwikkeling buitendelta Friesche Zeegat, Scenario 1 – Huidige zeespiegelrijzing
- 4.3 Ontwikkeling zandhonger Friesche Zeegat, Scenario 1 – Huidige zeespiegelrijzing
- 4.4 Ontwikkeling geulen Friesche Zeegat, Scenario 1 – Huidige zeespiegelrijzing
- 4.5 Ontwikkeling platen Friesche Zeegat, Scenario 1 – Huidige zeespiegelrijzing
- 4.6 Ontwikkeling buitendelta Friesche Zeegat, Scenario 2 – Getij met 18,6-jarige component
- 4.7 Ontwikkeling zandhonger Friesche Zeegat, Scenario 2 – Getij met 18,6-jarige component
- 4.8 Ontwikkeling geulen Friesche Zeegat, Scenario 2 – Getij met 18,6-jarige component
- 4.9 Ontwikkeling platen Friesche Zeegat, Scenario 2 – Getij met 18,6-jarige component
- 4.10 Ontwikkeling buitendelta Friesche Zeegat, Scenario 3 – Versnelde zeespiegelrijzing
- 4.11 Ontwikkeling zandhonger Friesche Zeegat, Scenario 3 – Versnelde zeespiegelrijzing
- 4.12 Ontwikkeling geulen Friesche Zeegat, Scenario 3 – Versnelde zeespiegelrijzing
- 4.13 Ontwikkeling platen Friesche Zeegat, Scenario 3 – Versnelde zeespiegelrijzing
- 4.14 Ontwikkeling buitendelta Friesche Zeegat, Scenario 4 – Groeiende getijslag

- 4.15 Ontwikkeling zandhonger Friesche Zeegat, Scenario 4 – Groeiende getijslag
- 4.16 Ontwikkeling geulen Friesche Zeegat, Scenario 4 – Groeiende getijslag
- 4.17 Ontwikkeling platen Friesche Zeegat, Scenario 4 – Groeiende getijslag
- 4.18 Ontwikkeling buitendelta Friesche Zeegat Scenario 5 – Huidige zeespiegelrijzing & Hoog scenario bodemdaling
- 4.19 Ontwikkeling zandhonger Friesche Zeegat Scenario 5 – Huidige zeespiegelrijzing & Hoog scenario bodemdaling
- 4.20 Ontwikkeling geulen Friesche Zeegat Scenario 5 – Huidige zeespiegelrijzing & Hoog scenario bodemdaling
- 4.21 Ontwikkeling platen Friesche Zeegat Scenario 1 – Huidige zeespiegelrijzing
- 4.22 Ontwikkeling buitendelta Friesche Zeegat Scenario 6 – Getij met 18,6 jarige component & Scenario hoog bodemdaling
- 4.23 Ontwikkeling zandhonger Friesche Zeegat Scenario 6 – Getij met 18,6 jarige component & Scenario hoog bodemdaling
- 4.24 Ontwikkeling geulen Friesche Zeegat Scenario 6 – Getij met 18,6 jarige component & Scenario hoog bodemdaling
- 4.25 Ontwikkeling platen Friesche Zeegat Scenario 6 – Getij met 18,6 jarige component & Scenario hoog bodemdaling
- 4.26 Ontwikkeling buitendelta Friesche Zeegat Scenario 7 – Versnelde zeespiegelrijzing & Scenario hoog bodemdaling
- 4.27 Ontwikkeling zandhonger Friesche Zeegat Scenario 7 – Versnelde zeespiegelrijzing & Scenario hoog bodemdaling
- 4.28 Ontwikkeling geulen Friesche Zeegat Scenario 7 – Versnelde zeespiegelrijzing & Scenario hoog bodemdaling
- 4.29 Ontwikkeling platen Friesche Zeegat Scenario 7 – Versnelde zeespiegelrijzing & Scenario hoog bodemdaling
- 4.30 Ontwikkeling buitendelta Friesche Zeegat Scenario 8 – Groeiende getijslag & Bodemdaling scenario hoog
- 4.31 Ontwikkeling zandhonger Friesche Zeegat Scenario 8 – Groeiende getijslag & Bodemdaling scenario hoog
- 4.32 Ontwikkeling geulen Friesche Zeegat Scenario 8 – Groeiende getijslag & Bodemdaling scenario hoog
- 4.33 Ontwikkeling platen Friesche Zeegat Scenario 8 – Groeiende getijslag & Bodemdaling scenario hoog
- 4.34 Vergelijking tussen scenario 1 en scenario 5 – Effect van bodemdaling niveau
- 4.35 Vergelijking tussen scenario 1 en scenario 5 – Effect van bodemdaling niveau
  
- 5.1 Schematisatie ESTMORF model
- 5.2 ESTMORF model Verdeling van deelgebieden
- 5.3 ESTMORF resultaten Buitendelta gebied Zoutkamperlaag
- 5.4 ESTMORF resultaten Vloedkom Zoutkamperlaag Verandering nattevolumen, deelgebieden 3 en 4

- 5.5 ESTMORF resultaten Vloedkom Zoutkamperlaag Verandering nattevolumen, deelgebieden 5 en 6
  - 5.6 ESTMORF resultaten Vloedkom Zoutkamperlaag Verandering nattevolumen, deelgebieden 7 en 8
  - 5.7 ESTMORF resultaten Vloedkom Zoutkamperlaag Verandering nattevolumen, deelgebieden 9 en 10
  - 5.8 ESTMORF resultaten Vloedkom Pinkegat Verandering nattevolumen, deelgebieden 11 en 12
  - 5.9 ESTMORF resultaten Vloedkom Zoutkamperlaag Verandering nattevolumen, vloedkom en buitendelta
  - 5.10 ESTMORF resultaten Pinkegat Verandering nattevolumen, vloedkom en buitendelta
  - 5.11 ESTMORF resultaten Friesche Zeegat Verandering nattevolumen, Zoutkamperlaag en Pinkgat
  - 5.12 ESTMORF resultaten Ontwikkeling van plaatareaal in verschillende deelgebieden
  - 5.13 ESTMORF resultaten Ontwikkeling van plaatareaal in verschillende deelgebieden
  - 5.14 ESTMORF resultaten Ontwikkeling van plaatareaal in verschillende deelgebieden
  - 5.15 ESTMORF resultaten Ontwikkeling van plaatareaal in verschillende deelgebieden
  - 5.16 ESTMORF resultaten Ontwikkeling van plaatareaal in verschillende deelgebieden
  - 5.17 ESTMORF resultaten Ontwikkeling van plaatareaal in twee vloedkommen
- 
- 6.1 Overzicht DELFT3D-model
  - 6.2 Berekende waterstanden en waterstandsverschillen in het Friesche zeegat als gevolg van ongecompenseerde bodemdaling
  - 6.3 Berekende debieten en debietverschillen in het Friesche zeegat als gevolg van ongecompenseerde bodemdaling
  - 6.4 Berekende stroomsnelheden en snelheidsverschillen in het Friesche Zeegat als gevolg van ongecompenseerde bodemdaling
  - 6.5 Berekende stroomsnelheidsverschillen in het gebied rond het Friesche Zeegat tijdens doortij als gevolg van ongecompenseerde bodemdaling
  - 6.6 Berekende stroomsnelheidsverschillen in het gebied rond het Friesche Zeegat tijdens springtij als gevolg van ongecompenseerde bodemdaling

# I Inleiding

## I.1 Probleemstelling

Voor de winning van gas uit een zestal gasvelden die onder de Waddenzee en in de kombergingen van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag liggen, moet een MER worden opgesteld. De winning zal plaatsvinden van buiten de Waddenzee en wel vanaf de landlocaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. In de MER die voor de winning moet worden gemaakt, moet de NAM inzichtelijk maken wat de te verwachten milieueffecten zijn. In de huidige studie gaat het om bodemdaling en verwante effecten op de morfologie, sedimentsamenstelling en sedimentatie-/erosieprocessen in de betrokken kombergingsgebieden.

In feite gaat het om een aanpassing van de resultaten van de Integrale Bodemdalingsstudie Waddenzee (Nam, 1998) voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag en een update van het eerder uitgebrachte Peazemerlannenrapport (Eysink, e.a., 2000) op basis van de meest recente inzichten over de (extra) bodemdaling veroorzaakt door de thans voorgenomen winningen. WL | Delft Hydraulics is gevraagd om de abiotische effecten in de Waddenzee van de geplande gaswinning te onderzoeken.

Sinds 1986 is er gasgewonnen op Ameland. De bodemdaling door de Ameland winning en de effecten ervan zijn vanaf het begin gemonitord (Bodemdalingscommissie / Nam, 2005). In de huidige studie wordt ook gebruik gemaakt van de inzichten uit deze monitoringstudie.

De resultaten van de huidige studie moet inzicht geven of de vewachte bodemdaling door de voorgenomen gaswinning samen met de reeds in gang zijnde Ameland tot ongewenste effecten kunnen leiden.

## I.2 Opdracht

Als product wordt gevraagd om een rapportage als het Peazemerlannenrapport, waarbij de focus ligt op het gedrag van de platen en geulen van de Waddenzee en de aangrenzende kustzone. Dit laatste wordt uitgedrukt in een verandering in de zandtoevoer van de kust naar het systeem buitendelta-vloedkom.

Een belangrijke reden dat de resultaten van van de IBW studie aanpassing nodig heeft is het feit dat volgens de meest recente inzichten de bodemdaling door de voorgenomen winningen samen met de lopende Ameland winning veel minder is dan bij de IBW studie is verondersteld. De gemiddelde bodemdaling in de vloedkommen van het Friesche Zeegat zijn dus veel lager volgens de huidige voorspellingen. De laatste inzichten in de verwachte bodemdalingen zijn hoger dan aangegeven voor de Peazemerlannenstudie. Dat is de reden waarom ook het Peazemerlannenrapport een update nodig heeft.

Om tot het gevraagde product te komen, wordt in eerste instantie een bureaustudie uitgevoerd. Net zoals bij de Peazemerlannenstudie zal hierbij worden uitgegaan van de

relatieve compensatie van de bodemdaling op de platen als berekend in de IBW voor een grote gemiddelde bodemdaling in de vloedkommen.

Daarnaast worden nieuwe berekeningen uitgevoerd met modellen, zoals in het IBW, voor de situatie met de huidige bodemdalingsvoorspelling. Dit zal leiden tot een betrouwbaarder inzicht in de morfologische effecten, zoals de compensatie van de bodemdaling op de platen door sedimentatie, voor de un verwachte, veel lagere bodemdalingsverwachting. Op basis van deze berekeningen kunnen de resultaten van de bureaustudie nog wat worden bijgesteld tot de meest waarschijnlijke waarden.

De offerte voor het door WL | Delft Hydraulics voorgestelde onderzoek is uitgebracht in brief MCM-11065a/Z3995.95/AvD dd 29 april 2005. De opdracht voor dit onderzoek is door de NAM verleend in haar brief dd 2 mei 2005.

Het onderzoek is uitgevoerd door:

- Dr. ir. Z.B. Wang                      projectleiding en –uitvoering
- Ing.R. Bruinsma                        projectuitvoering
- Ir.M.D. Klein                            projectuitvoering
- L. Verhage                                projectuitvoering
- Ir. W.D. Eysink                         advisering en kwaliteitsborging

## 2 Aanpak en beschikbare gegevens

### 2.1 Algemene overwegingen

De volgende overwegingen zijn van belang:

- Het gaat hier om een MER studie, waarbij het belangrijk is om te laten zien dat de best beschikbare kennis en middelen zijn ingezet om de effecten van de ingreep te voorspellen.
- De IBW studie is inmiddels 7-8 jaar geleden uitgevoerd. De modellen die toen werden gebruikt zijn inmiddels verder ontwikkeld. Het ESTMORF model wordt tegenwoordig gekoppeld aan het 1D netwerkmodel voor waterbeweging SOBEK in plaats van IMPLIC (geen wezenlijke verandering). Bij de ASMITA modellering is in de recente studies veelal de 3-elementenschematisatie toegepast in plaats van de wat meer ingewikkelde opzet, die is toegepast in de IBW (Nam, 1998.). Vooral door de ervaring opgedaan in recente ASMITA onderzoeken is de betrouwbaarheid / bruikbaarheid van het model verbeterd.
- Continuïteit en consistentie zijn belangrijk. De resultaten van de IBW-studie vormen een uitgangspunt bij de discussies in de afgelopen jaren. Resultaten van een nieuwe studie kunnen en mogen alleen tot afwijkende conclusies leiden als daar echt een goede reden voor is.
- Sinds de IBW-studie zijn er ook nieuwe inzichten verkregen door nieuwe studies en monitoring. Als voorbeeld kan genoemd worden de Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 (RIKZ, 2004), waarin vooral de onzekerheden van de IBW-resultaten aan de orde kwamen (en werden verkleind). Verder kan genoemd worden dat wij uit een recent onderzoek hebben geconcludeerd dat de natuurlijke fluctuaties, zoals de 18,6 jarige cyclus van de getijamplitude-variatie, een belangrijke rol speelt bij de aanpassing van een getijdebekken aan de relatieve zeespiegelrijzing. Het heeft waarschijnlijk tot gevolg dat het systeem zich sneller kan aanpassen. In het geval van bodemdaling betekent dat de bodemdalingskuil sneller wordt gevuld door sedimentatie.
- De resultaten van de studie moeten op korte termijn beschikbaar zijn.
- Het studiegebied beperkt zich tot de vloedkommen van het Friesche Zeegat (Zoutkamperlaag en Pinkegat) en de aanliggende kusten.
- Behalve de morfologische veranderingen zijn ook de eventuele veranderingen in de bodemsamenstelling van belang.

Op basis van deze overwegingen is de studie in twee blokken verdeeld, i.e.: een bureaustudie en een aanvullende modelstudie.

De bureaustudie heeft twee doelen:

- Een voorspelling geven van de effecten van de bodemdaling aan de hand van de nieuwe gegevens van de verwachte bodemdaling en de resultaten van de voorgaande studies. Dit kan worden bereikt met dezelfde aanpak als in de studie H3740 (Eysink, e.a., 2000).
- Motivatie van de in te zetten modellen en de uit te voeren berekeningen in de aanvullende modelstudie. Dit vereist een evaluatie van de studies vanaf de IBW-studie, waarbij onder andere het voorspellende vermogen van de in de IBW gebruikte modellen aan de orde komt. Zoals al eerder vastgesteld, is de belangrijkste aanleiding voor aanvullende modelstudie het beschikbaar komen van nieuwe voorspellingen voor de

bodemdaling, nieuwe veldgegevens sinds de IBW-studie, verbeterde en verder ontwikkelde modellen, en nieuwe inzichten in de relevante processen.

De aanvullende modelstudie heeft dus vooral als doel te komen tot nauwkerigere voorspellingen specifiek toegespitst op de nieuwe en beter beschreven bodemdalingsscenario's en met een betere onderbouwing en verkleining van de onzekerheden.

Voor de IBW-studie werden de modellen ASMITA en ESTMORF toegepast op het Friesche Zeegat, het studiegebied in dit project. Voor de continuïteit en consistentie is het logisch om beide modellen opnieuw te gebruiken in de huidige studie. Verder zal het Delft3D-model worden ingezet bij de aanvullende modelstudie om een aantal sommen te maken voor de waterbeweging, in een ongestoorde situatie en in een situatie met maximum bodemdaling zonder compensatie door sedimentatie. ASMITA en ESTMORF zijn in principe gebaseerd op hetzelfde modelconcept: beide zijn semi-empirische modellen, waarin fysische procesbeschrijvingen worden gecombineerd met empirische relaties voor het morfologische evenwicht. Het Delft3D-model wordt gezien als het state-of-the-art model en is procesgebaseerd (model formulering gebaseerd procesbeschrijvingen aan de hand van fysische wetten). Voor het studiegebied is een bestaand Delft3D-model beschikbaar. De resultaten van dit model worden gebruikt om de aannames in de semi-empirische modellen te toetsen en te onderbouwen. Verder zijn de resultaten van het Delft3D-model gebruikt voor de voorspelling van eventuele veranderingen in de bodemsamenstelling.

## 2.2 Aanpak onderzoek

In meer detail uitgewerkt bestaat de aanpak zoals hierboven geschetst uit de volgende werkzaamheden:

- 1 **Bureaustudie**, die uit twee onderdelen bestaat:
  - 1.1 Voorspellen van de effecten op basis van de resultaten van de eerdere studies, gebruik makend van de nieuwe gegevens van de verwachte bodemdalingen.
  - 1.2 Evaluatie van ontwikkelingen sinds de IBW studie. Zowel de ontwikkelingen op het gebied van modellen als die op het gebied van algemeen inzicht zijn hierbij van belang.
- 2 **Aanvullende modelstudie**:
  - 2.1 **Modellering aan de hand van ASMITA**. Hierbij zal de nieuwe modelschematisatie worden gebruikt. De resultaten zijn van belang voor zowel de morfologische ontwikkelingen binnen het bekken als voor de invloed op de kust. De volgende stappen zijn nodig:
    - 2.1.1 Verwerking van aangeleverde gegevens. De bodemdalingen worden verwerkt tot verandering van de platen, geulen en de buitendelta.
    - 2.1.2 Uitvoeren van de berekeningen. Hierbij gaan wij uit van 2 zeespiegelrijzing scenario's en 2 scenario's van bodemdaling t.g.v. gaswinning (Basis en Hoog).
    - 2.1.3 Interpretatie van de modelresultaten. Hierbij is het ook van belang om te controleren of de verandering van de modelschematisatie tot veranderingen van de resultaten hebben geleid.
  - 2.2 **Modellering aan de hand van ESTMORF**. Hiervoor zijn de volgende stappen nodig:
    - 2.2.1 Omzetten van het oude ESTMORF model voor het Friesche Zeegat om het geschikt te maken voor het nieuwe ESTMORF model. Dit houdt in dat de IMPLIC-schematisatie moet worden omgezet naar de SOBEK-schematisatie.

- 2.2.2 Verwerking van de aangeleverde gegevens.
- 2.2.3 Uitvoeren van de berekeningen.
- 2.2.4 Interpretatie van de modelresultaten.
- 2.3 **Modellering aan de hand van Delft3D.** Hierbij zullen wij alleen simulaties uitvoeren voor de waterbeweging. Wij zullen gebruik maken van een bestaande modelschematisatie voor het gebied. Wij zullen berekeningen uitvoeren voor extreme situaties voor wat betreft de veranderingen van het bodemniveau, omdat wij verwachten dat de invloed van de bodemdaling weinig invloed zal hebben op de waterbeweging.
- 3 **Rapportage en presentatie van resultaten:**
  - 3.1 Opstellen van een studierapport waarin de uitgevoerde werkzaamheden en de uitkomsten daarvan worden beschreven.
  - 3.2 Opstellen van een uitgebreide samenvatting van de studie en de studieresultaten.
  - 3.3 Presentaties van de studieresultaten aan de opdrachtgever en eventueel andere belanghebbenden.

## 2.3 Beschikbare gegevens

### Rapporten

De benodigde gegevens voor deze studie zijn verkregen uit:

1. W.E. van Duin, K.S. Dijkema & J. Zegers, (1997). Veranderingen in bodemhoogte (opslibbing, erosie en klink) in de Peazemerlannen, IBN-DLO, rapport 326, 1997
2. Integrale Bodemdalingsstudie Waddenzee, (Nam, 1998). Hoofdrapport en Geomorfologie en infrastructuur, NAM (en diverse instituten), Rapporten ISBN 90-804791-4-4 en 90-804791-2-8, dec. 1998
3. W.D. Eysink, K.S. Dijkema en W.E. van Duin, (2000). Effecten van bodemdaling door gaswinning op de Peazemerlannen, WL | Delft Hydraulics en Alterra, WL-rapport H3740, oktober 2000
4. H.J. Hoeksema et al, (2004). Bodemdalingsstudie Waddenzee 2004, Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd, RIKZ, Rapport RIKZ/2004.025, 14 juni 2004
5. W.D. Eysink et al., (1995, 2000). Monitoring van de effecten van Bodemdaling door gaswinning op Ameland-oost na 8 jaar en 13 jaar gaswinning, WL | Delft Hydraulics en Alterra, jan. 1995 en maart 2000 (reproductie verzorgt door NAM).
6. Bodemdalingscommissie/NAM, (2005). Monitoring van de effecten van Bodemdaling door gaswinning op Ameland-oost na 18 jaar gaswinning, NAM, juni 2005
7. W.D. Eysink, (2005). Monitoring van de effecten van Bodemdaling door gaswinning op Ameland-oost na 18 jaar gaswinning, Addendum bij Rapport H841 dd maart 2000, WL | Delft Hydraulics (bijlage bij Bodemdalingscommissie/NAM, 2005)

### Bodemdaling

De voorspelde bodemdaling in de IBW (Rapport 2) was gebaseerd op een minimum en een maximum schatting van de te winnen hoeveelheid gas uit de prospects. Het maximum scenario ging er van uit dat er in alle prospects gas zou zitten dat volledig gewonnen zou kunnen worden (extreem). Dat leidde voor het Pinkegat tot een maximum bodemdaling

gemiddeld over de hele vloedkom van 14,1 cm en voor de Zoutkamperlaag van 15,6 cm gemiddeld over de hele vloedkom. Deze waarden zouden optreden indien er geen enkele compensatie door sedimentatie zou optreden. Uit de modelberekeningen in IBW volgt dat door compensatie door sedimentatie de maximum daling van het plaatoppervlak in de beide vloedkommen slechts ca. 30 % respectievelijk ca. 53 % van de voorspelde bodemdaling zal bedragen.

De voorspelde bodemdaling voor de gasvelden Nes, Moddergat en Lauwersoog voor rapport 3 was veel lager dan die voor de IBW, omdat NAM toen op basis van beperkte resultaten van proefboringen dacht dat het grondwater in de gasvelden actief was en bij drukvermindering in het gasveld omhoog zou komen. In dat geval zou de druk in de gasvoerende laag minder afnemen en de bodemdaling gering zijn. De maximum bodemdaling in het diepste punt zou slechts 7 à 8 cm bedragen. De gemiddelde bodemdaling in de vloedkom van de Zoutkamperlaag zou slechts in de orde van 2 cm bedragen.

NAM is later weer teruggekomen op die prognose; de nu verwachte bodemdaling is circa tweemaal zo hoog als gegeven in rapport 3. De NAM heeft de bodemdaling voor resterende gaswinning op Ameland afzonderlijk berekend. Vervolgens is de gezamenlijke bodemdaling van Anjum en de nieuwe gasvelden in de Waddenzee berekend volgens de nieuwste inzichten. Tenslotte is de totale bodemdaling berekend als gevolg van de gaswinning in de bestaande velden Ameland en Anjum en die in de nieuwe velden. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de bodemdaling van de nieuwe velden nauwelijks invloed heeft op de bodemdaling van het grotere Ameland-veld; er vindt slechts overlapping op de randen van de beide velden plaats waar de verwachte bodemdaling minder zal zijn dan 6 cm in 30 jaar. De bodemdaling van de nieuwe velden vertoont een grote overlap met de daling door het Anjum-veld net ten zuiden van de nieuwe gasvelden. Daar is de overlap zo groot dat het de maximum bodemdaling van beide velden zal beïnvloeden; de locatie met het maximum voor het Anjum-veld zal verschuiven naar een locatie van een gezamenlijk maximum op 1 à 2 km landinwaarts van de zeevering. Omdat beide velden klein zijn, is het effect echter gering. In de Figuur 2.1 wordt een beeld gegeven van de totale bodemdaling in het gebied tot 2040 en in Figuur 2.2 een beeld van de verwachte bodemdaling vanaf het begin van de gaswinning in de nieuwe velden in 2007 tot 2040. De gezamenlijke maximum daling van het Anjum-veld en de nieuwe velden zal oplopen tot circa 17 cm (Figuur 2.3).

In verband met blijvende onzekerheden in de modelbeschrijving voor het berekenen van de bodemdaling en in de gegevens moet rekening worden gehouden met een mogelijke afwijking van circa 20 procent van de berekende waarden.

In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de verwachte maximum bodemdalingen in de drie velden en de bijbehorende volumevergroting van de Waddenzee, indien alle velden worden geëxploiteerd.

Tabel 2.3.1 Verwachte eindwaarden van bodemdaling door gaswinning

Gasveld	Maximum bodemdaling (cm; $\pm 20\%$ )	Volumevergroting Waddenzee ( $10^6 \text{ m}^3$ ; $\pm 20\%$ )	
Ameland	31	7,29	totaal in 2040
		2,65	2007 – 2040

Anjum/Nes, Moddergat, Lauwersoog	17	5.07 4,75	totaal in 2040 2007 – 2040
-------------------------------------	----	--------------	-------------------------------

Het verloop van de bodemdaling van de nieuwe gasvelden in de tijd wordt bepaald door het gekozen productiescenario. Door de NAM is de volgende schatting gegeven (zie ook Fig. 2.3):

1. De bodemdaling zal pas na een jaar na het begin van de gaswinning aan het oppervlak merkbaar worden.
2. In de daarop volgende 10 jaar zal 60 % van de zakking plaatsvinden.
3. In de daarop volgende 10 jaar zal de rest van de zakking optreden.

Op het moment dat deze bodemdaling begint zijn de bodemdalingen van het Ameland- en het Anjum-veld al dicht bij hun eindwaarden (op punt van de maximale daling t.g.v. Ameland winning is 27 cm van de 31 cm bereikt in 2007, zie Fig. 2.3). Bovendien is de bodemdaling van het Ameland-veld in de Waddenzee dan al voor een belangrijk deel door sedimentatie gecompenseerd.

## 3 Effecten van bodemdaling (bureaustudie)

### 3.1 Aanpak bureaustudie

Sinds het begin van de gaswinning op Ameland in het begin van 1986 zijn er meerdere, veelomvattende onderzoeken uitgevoerd naar de effecten van bodemdaling door gaswinning. Deze studies zijn uitgevoerd door gerenommeerde instituten op basis van de meest recente kennis en modellen. Al deze kennis en modellen besloegen samen alle relevante vakgebieden, die een rol spelen in het betreffende probleem. In de meeste gevallen werden de studies begeleid door een onafhankelijke begeleidingscommissie. In twee gevallen, de IBW studie (NAM, 1998) en de monitoringstudie naar de effecten van bodemdaling door gaswinning op Ameland (Eysink et al., 2000; Bodemdalingcomm./NAM, 2005), werden de onderzoeksresultaten zelfs getoetst door een panel van onafhankelijke deskundigen op de verschillende vakgebieden. Met name deze laatste twee onderzoeken, i.e. een zeer uitgebreide effect-voorspellingsstudie gebaseerd op de meest recente kennis en modellen (IBW studie) en de monitoringstudie van het derde gasveld van Nederland met werkelijk opgetreden effecten in een periode van 13 resp. 18 jaar gaswinning, geven een betrouwbare basis voor het voorspellen van de bodemdalingseffecten. De resultaten van deze studies zijn als uitgangspunt gebruikt in de onderhavige bureaustudie.

Daarnaast bestond er reeds een brede algemene kennis betreffende de geomorfologische processen, die een rol spelen in de Waddenzee (o.a. Van Straaten, 1954 en 1964; Eysink, 1979, 1991, 1992, 1993; Stive en Eysink, 1989; Eysink en Biegel, 1992; Louters en Gerritsen, 1994).

De invloed van de bodemdaling van het Ameland-veld in de Waddenzee beperkt zich tot de vloedkom van het Pinkegat en in mindere mate tot die van het Borndiep. Deze invloed is uitgebreid bestudeerd in de voorspellingsstudies voor Ameland en de IBW, alsook in de monitoringstudie voor Ameland. De invloed van de nieuwe velden op dat van Ameland is klein (ca.  $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  extra verruiming van de vloedkom van het Pinkegat onder GHW t.o.v ca.  $6,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  door het Ameland-veld). De nieuwe gasvelden strekken zich voornamelijk uit onder de vloedkom van de Zoutkamperlaag. In de volgende paragrafen is vooral gekeken naar de invloed van de bodemdaling rond de nieuwe gasvelden.

Om tot quantitative antwoorden te komen over de effecten van de bodemdalingen worden de modelresultaten uit de IBW studie gebruikt. Deze modelresultaten hebben betrekking op de toen veel te groot geschatte bodemdalingen. Zij worden in deze bureaustudie op een relatieve manier gebruikt. Er wordt gekeken welk deel (percentage) van de bodemdaling na hoeveel jaren door sedimentatie is gecompenseerd. Vervolgens wordt verondersteld dat dit verloop van van percentage van compensatie in de tijd ook van toepassing is op de nu voorspelde, veel lagere bodemdaling. Zo kunnen de resultaten van de IBW studie via een soort interpolatie worden vertaald naar voorspellingen van effecten van de nu verwachte bodemdalingen door de nieuwe gasvelden. Verder is bij de beschouwing gebruik gemaakt

van de inzichten verkregen in de monitoringstudie naar de effecten van de bodemdaling door gaswinning op Ameland.

## 3.2 Effect in de Waddenzee

### Resultaten IBW

In de Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee (IBW) is uitgebreid gestudeerd op de effecten van de totale bodemdaling door gaswinning uit alle bestaande en mogelijke, toekomstige velden bij en onder de oostelijke Waddenzee. De verwachte bodemdalingen bij het Anjum-veld en de nieuwe velden Nes-Moddergat-Lauwersoog waren toen groter (NAM, 1998a-Geomorfologie en Infrastructuur) dan nu op basis van de huidige kennis is voorspeld. Toen werd bij de Peazemerlannen een maximum daling van circa 22 cm voorspeld op basis van seismische gegevens. Na uitvoering van 5 boringen wordt op basis van feitelijke gegevens een maximum bodemdaling van circa 16 cm (+/- 20%) verwacht aan de westzijde van de Peazemerlannen aflopend tot circa 12 cm aan de oostzijde (zie Fig. 3.1). Deze daling zal plaatsvinden in de zomerpolder. Op de kwelder en langs de hoge zijde van het Wierumerwad zal de bodemdaling slechts 1 à 2 cm lager zijn. Langs de noordzijde van het Wierumerwad is de verwachte daling nog maar 6 à 8 cm. Op de grote plaat Brakzand in het hart van de vloedkom is de verwachte bodemdaling 2 à 6 cm en op het wad onder Schiermonnikoog slechts 1 à 3 cm. De bodemdaling in de grote geul Zoutkamperlaag varieert tussen 1 en 8 cm, en die in de geul Gat van Schiermonnikoog-Brakzandstergat ten noorden van de plaat Brakzand rond de 4 cm.

WL | Delft Hydraulics heeft voor de IBW met drie verschillende modellen onderzoek uitgevoerd naar de effecten van de toen voorspelde bodemdaling door gaswinning, te weten met:

1. het morfodynamische model MORRES gebaseerd op empirische evenwichtsrelaties voor een vloedkom met buitendelta,
2. het gedetailleerde, numerieke morfodynamische 1D-netwerkmodel ESTMORF van het Friesche Zeegat met buitendelta en de vloedkommen van de Zoutkamperlaag en het Pinkegat, en
3. met het morfodynamische model ASMITA van het Friesche Zeegat met buitendelta, vloedkommen en de aangrenzende Noordzeekustzone.

Alle modellen zijn meer of minder geschematiseerde sedimenttransportmodellen. De modellen ESTMORF en ASMITA zijn voor toepassing eerst afgeregeld en geverifieerd op basis van historische gegevens van het gedrag van het gebied rond het Friesche Zeegat vóór (dynamisch evenwicht) en na sluiting van de Lauwerszee (grote verstoring; resterende geulen ca.  $35 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  te ruim voor nieuwe situatie). De modellen MORRES en ESTMORF gaven informatie over de invloed van bodemdaling en zeespiegelstijging op het platenareaal in de vloedkommen van de Zoutkamperlaag en van het Pinkegat. De drie modellen gaven informatie over het effect op het plaatniveau en de mate van compensatie door sedimentatie tijdens het ontstaan van de bodemdalingsschotel. Alle resultaten gaven aan dat de invloed van gaswinning op de grootte van het platenareaal en op het plaatniveau gering was. Dit

werd ook nog eens bevestigd door berekeningen met een vierde model AEGHIS, ontwikkeld en afgeregeld door de Universiteit van Utrecht (NAM, 1998a-Hoofdrapport).

### **Effect op platen**

Bij de beschouwde extreme bodemdalingsscenario's in de IBW (bodemdaling 11,5 à 19,2.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> als alle prospects zouden worden geëxploiteerd) zou het verlies aan plaatoppervlak in de kom van de Zoutkamperlaag bij maximale ontwikkeling van de bodemdaling kunnen liggen tussen 0,13 en 1,1 km<sup>2</sup> op een platenareaal van 81,6 km<sup>2</sup>. Dit is minder dan 1,4 %. Bij de momenteel voorspelde bodemdaling voor de nieuwe gasvelden (4,75.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) zal dit zelfs minder dan 0,3 % (i.e. minder dan 0,2 km<sup>2</sup>) bedragen. Dit geringe verlies zal naar verwachting 15 à 20 jaar na het begin van gaswinning in de nieuwe velden optreden. Daarna zal de compensatie door sedimentatie groter worden dan de bodemdalingssnelheid en zal geleidelijk herstel optreden.

Uit de IBW volgt dat, als gevolg van compensatie door sedimentatie, de werkelijke maximum bodemdaling op de platen in de vloedkom van de Zoutkamperlaag ongeveer de helft zal bedragen van het voorspelde maximum (Figuur 3.2). In de vloedkom van het Pinkegat was dat nog minder, i.e. slechts 30 %. Dit houdt in dat de maximum verlagings van het Wierumerwad naar verwachting niet meer zal bedragen dan tussen de 3 en 4 cm langs de plaatrand met een plaatniveau dat overwegend tussen 1 à 1,7 m boven LLWS ligt, en niet meer dan circa 5 à 7 cm op de hoge plaat tegen de kwelderwerken waar het plaatniveau rond de 2 m boven LLWS ligt. De maximale verlagings van de platen op het Wierumerwad zal dus na 15 à 20 jaar gaswinning niet meer bedragen dan circa 2 à 3 % van de hoogte boven LLWS, waarna geleidelijk herstel zal optreden. Op de Brakzandplaat (maximale verlagings 1 à 3 cm) en op de platen onder Schiermonnikoog (maximale verlagings 0 à 2 cm) is het effect nog geringer.

### **Effect op geulen**

De voorspelde bodemdaling in de geulen is in het algemeen minder dan 1% van de waterdiepte onder NAP. Dit is ongeveer de gemiddelde waterstand waarbij de maximum stroomsnelheden in de geulen plaatsvinden. Verdere geulverruiming van enkele procenten zal plaatsvinden, omdat de geulen in eerste instantie een deel van het sediment (zandfractie) zullen leveren voor het herstel van de platen. Hierdoor zal de stroomsnelheid in de geulen iets afnemen. Naast dit effect van geulverruiming door bodemdaling zal door het verlagen van de platen het getijprisma van de vloedkom van de Zoutkamperlaag (i.e. het volume water van circa 200.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> dat met de vloed naar binnenstroomt en met de eb weer uitstroomt) met de bodemdaling eerst geleidelijk met circa 2.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> toenemen. Dientengevolge zullen de stroomsnelheden weer met circa 1 % toenemen. Al met al zal de stroomsnelheid in de geulen slechts marginaal veranderen en na 15 à 20 jaar zal weer geleidelijk herstel optreden. In het gebied oostelijk van de bodemdaling zal in het geheel geen verandering optreden.

### **Bodemgesteldheid**

Doordat de hydraulische condities in de geulen en op de platen nauwelijks zullen veranderen, zal er ook geen merkbare verandering in het mechanisme van natuurlijke

sortering van sediment door het getij optreden en dus ook niet in de bodemgesteldheid in de Waddenzee.

## Natuurlijke dynamiek

Door geulmigratie, seizoensverschillen in waterbeweging (golven, op- en afwaaiing, dood- en springtij) en seizoensverschillen per jaar (meer of minder storminvloed) vertoont het waddengebied van nature aanzienlijke fluctuaties, die groter zijn dan de effecten van bodemdaling door gaswinning. Uit het monitoringsonderzoek op Ameland is gebleken dat de effecten van bodemdaling op het Pinkewad, zelfs bij de grotere bodemdaling daar (23 cm op de wadrand; dalingsvolume onder het Pinkewad ca.  $4,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ), al grotendeels of mogelijk zelfs geheel door sedimentatie gecompenseerd is (Eysink, 2005; Kersten, 2003).

### 3.3 Effect op de Noordzeekust

Het is inmiddels een algemeen aanvaard uitgangspunt dat de Waddenzee en de aangrenzende Noordzeekustzone een zanddelend systeem vormen. Dit betekent dat elke verstoring in de Waddenzee uiteindelijk ook effect zal hebben op de Noordzeekustzone. Ook in de natuurlijke situatie treden “verstoringen” op, zoals zeespiegelstijging en kweldergroei. Zeespiegelstijging leidt tot verdieping van de Waddenzee, waardoor de stroomsnelheden afnemen en de Waddenzee als zandvang gaat werken. Bij de huidige zeespiegelstijging van circa 18 cm per eeuw kan voldoende sediment vanuit de Noordzee worden aangevoerd om de zeespiegelstijging te volgen en een dynamisch evenwicht in stand te houden. Ook kweldergroei leidt tot een extra zandvraag van de Noordzee. Door kweldergroei als gevolg van afzetting van fijn sediment in luwe delen langs de Waddenzee kust neemt zeer geleidelijk de komberging in de Waddenzee af en dientengevolge de stroomsnelheden in de geulen. Ook dit leidt tot afzetting van zand in de geulen die zich aanpassen aan de situatie met een kleiner getijprisma. Beide processen spelen al vele eeuwen een rol in de Waddenzee en de gevolgen voor de Noordzeekust zijn al lang zichtbaar in de vorm van zich landwaarts verplaatsende waddeneilanden. Sinds 1990 wordt de Noordzeekust in Nederland dynamisch gehandhaafd door de kustachteruitgang te suppleren met zand uit de Noordzee.

### Zandhonger Zoutkamperlaag

Bodemdaling door gaswinning heeft een meer lokaal en tijdelijk, maar vergelijkbaar effect als zeespiegelstijging. De bodemdalingsschotel van de nieuwe gasvelden en van de extra bodemdaling in het Ameland-veld zal uiteindelijk weer worden opgevuld met sediment uit de Noordzee. Hiervoor is voor de kom van de Zoutkamperlaag  $4,75 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  sediment nodig, dat via het Westgat en de Zoutkamperlaag moet worden aangevoerd en  $2,65 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  via het Pinkegat. In de IBW is geschat dat deze volumina zullen worden opgevuld met een zand-23 slibmengsel met circa 10 % slib. Uit recente informatie blijkt dat dit een conservatieve aanname is (zie Figuur 3.3). De dichtheid van een zand-slibmengsel is wat lager dan die van zand alleen. Daarom is maar 85 % van het volume aan zand nodig, i.e.  $4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  respectievelijk  $2,25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  zand dat uiteindelijk van de Noordzee moet komen, om de bodemdalingsschotel in de Waddenzee weer op te vullen. In eerste instantie wordt dit zand door de geulen geleverd. De verruiming van de geulen wordt via zand van de buitendelta gecompenseerd en uiteindelijk wordt die verstoring weer vanuit de Noordzeekustzone gecompenseerd. Gebaseerd op berekeningen voor een veel grotere bodemdalingsschotel van

11,5 à 19,2.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> in de Zoutkamperlaag in de IBW kan worden afgeleid dat de zandhonger van de vloedkom van de Zoutkamperlaag voor de situatie met de nieuwe gasvelden met een kuil van 4,75.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> in de eerste 15 à 20 jaar geleidelijk kan toenemen met maximaal 140.000 m<sup>3</sup>/jaar. Dit zou leiden tot een verhoging van de natuurlijke zandhonger van de Zoutkamperlaag (0,54.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/j) met maximaal 25 %. Verwacht wordt dat dit zand uiteindelijk zal worden geleverd door de Noordzeebodem, i.c. de vooroever van Ameland, omdat daar het water voor het vullen van de vloedkom van de Zoutkamperlaag vandaan komt. Uiteindelijk zal dit kunnen leiden tot een verlaging van deze vooroever van circa 2 cm (i.e. ca. 20 % van de berekende waarde in de IBW voor maximale bodemdaling). De invloed hiervan op de stranden van Ameland en Schiermonnikoog is klein en zeer indirect en zal niet merkbaar zijn.

### **Zandhonger Pinkegat**

Bij Ameland heeft de totale bodemdaling in de Waddenzee en in de Noordzee (13.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) invloed op de Noordzeekust. De totale, extra zandvraag van 2,25.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> door de resterende gaswinning uit het Ameland-veld en het deel van de bodemdalingsschotel van de nieuwe velden in de vloedkom van het Pinkegat zal het effect van de bodemdaling van het Ameland-veld enigzins versterken. Omdat de bodemdaling van de nieuwe velden samenvalt met het afnemen van de verdere bodemdaling in het Amelandveld, zal de extra jaarlijkse zandvraag van het Pinkegat niet groeien in grootte, maar zal de verhoogde vraag langer duren. Gezien de ervaringen van het monitoringsonderzoek op Ameland tot nu toe, zal naar verwachting ook dit door de sterke dynamiek in de actieve kuststrook van de Noordzee niet terug te vinden zijn. Het geringe effect kan alleen op theoretische gronden aannemelijk worden gemaakt. In de praktijk zal het indirect via de reguliere kustsuppleties worden gecompenseerd.

## **3.4 Effect op kwelderrand en –niveau van de Peazemerlannen**

### **3.4.1 Algemeen**

Deze paragraaf is overgenomen uit Eysink, Dijkema en Van Duin (2000) en is daarin opgesteld door Dijkema. De tekst is nog onverkort geldig, mede gezien de recente resultaten van de monitoring van de effecten van bodemdaling op Ameland (Bodemdalingscommissie/NAM, 2005). Waar nodig is de tekst iets aangepast aan de nieuwe bodemdalingsvoorspelling.

Het doel van deze paragraaf is om op grond van de Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee (NAM, 1998a), van gegevens van de monitoring van de bodemdaling op Ameland (Eysink et al., 2000), van 0-metingen van 1994-1996 in de Peazemerlannen zelf (Van Duin et al., 1997) en van latere metingen een voorspelling te doen van de effecten van eventuele bodemdaling op de Peazemerlannen. De Peazemerlannen omvatten een kwelder en een zomerpolder. De bodem van dit gebied bestaat uit een dikke laag zeeklei, die bij de zeewering op een hoogte van ongeveer NAP + 2 m overgaat in een geasfalteerde dijkvoet. Er zijn geen duinen, zodat de monitoring van de bodemdaling op Ameland-Oost in de duinen en duinvalleien niet relevant is voor de Peazemerlannen.

De kwelder van de Peazemerlannen vertoont qua opbouw een zekere overeenkomst met het Nieuwlandsrijd op Ameland. Beide kwelders hebben een harde oeververdediging met onderbrekingen. Bij de Peazemerlannen gaat het om stormdoorbraken in een met asfalt beklede zomerkade, die in 1973 zijn ontstaan en niet meer zijn hersteld. Sindsdien heeft zich een natuurlijke kwelder ontwikkeld. Bij het Nieuwlandsrijd gaat het om een natuurlijke kwelder, die door middel van enkele hoofdkreken een open verbinding heeft met het wad. De kwelderrand is tegen afslag verdedigd door een stenen beschoeiing. In beide gevallen is de kwelderrand dus grotendeels van een harde bescherming voorzien, zodat afslag van de kwelderrand door bodemdaling niet kan plaatsvinden.

De ontwikkeling van de vegetatie in een kwelder hangt sterk af van de ontwikkeling van het kwelderniveau en het beheer van de kwelder. Hierin spelen de natuurlijke opslibbing en bodemdaling door klink of gaswinning een rol, maar ook de intensiteit van beweiding. Gegevens over bodemdaling en opslibbing voor de Peazemerlannen en het Nieuwlandsrijd zijn samengevat in Tabel 3.4.1.

Snelheid van bodemdaling (mm/j)	Bodemdaling (mm)	Opslibbing (mm/j)
Peazemerlannen (prognose, $\pm 20\%$ ) 6,6 – 9,0 (jaar 2 - 11) 4,4 – 6,0 (jaar 12 - 21)	110 - 150 (totaal, $\pm 20\%$ )	8 - 16 (1973 - 1997)
Nieuwlandsrijd (gemeten, raai 3) 10 (1987 - 1999)	120 (1987 - 1999)	1 - 11 (1993 - 2000)

Tabel 3.4.1 Bodemdaling en opslibbing in de Peazemerlannen en op Nieuwlandsrijd.

Uit deze tabel blijkt dat de prognose voor de bodemdaling Peazemerlannen vrijwel volledig binnen de gemeten waarden voor die op het Nieuwlandsrijd valt. De gemeten opslibbing op de Peazemerlannen is daarentegen hoger dan op Ameland en in het algemeen voldoende om het effect van zeespiegelstijging (orde 2 mm/j) en verwachte bodemdaling te compenseren. Lokaal zou er in de eerste tien jaar een geringe relatieve daling van het maaiveld kunnen optreden van maximaal 3 cm ten opzichte van de gestegen zeespiegel. Daarna kan de bodem overal de zeespiegel volgen of zelfs relatief verder opslibben.

Het kwelderdeel van de Peazemerlannen is onbeweid en het Nieuwlandsrijd wordt sinds lang intensief beweid, wat deze Amelander kwelder gevoeliger maakt voor bodemdaling. De monitoring op Ameland beschrijft dus een veel zwaardere ingreep dan die in de Peazemerlannen, zodat een voorspelling van de effecten van bodemdaling Peazemerlannen aan een echte, veel zwaardere, praktijksituatie getoetst kan worden.

### 3.4.2 Resultaten monitoring op Ameland

#### Doel en methode van de monitoring op Ameland

De inzichten van de Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee (NAM, 1998a) waren bij de start van de gaswinning onder Ameland in 1986 nog niet beschikbaar. Vandaar dat er op

basis van de voorspelling van 1986 zonder voorwaarden aan de snelheid van bodemdaling gas werd geproduceerd. De doelen van kweldermonitoring op Ameland zijn:

1. Kwantificeren van de opslibbingsbalans en toetsing aan de grenswaarde.
2. Kwantificeren van de vegetatieveranderingen (successierichting en kwelderareaal) en verklaren van veranderingen aan de hand van de opslibbingsbalans, de ontwatering, de beweiding, de veranderingen in Gemiddeld Hoog Water (GHW) en de eventuele cumulatie van deze factoren.
3. Voorstellen van eventuele beheersmaatregelen.

In het kader van het eerste punt werd de opslibbing periodiek in proefvakken (pq's) gemeten:

- Vanaf 1993 zijn op alle pq's drie maal per jaar metingen van de opslibbing/inklink uitgevoerd met de SEB-methode (onderdeel van het SEB-meetnet van Alterra in de Waddenzee). Voor 1993 werd de opslibbing gewaterpast en aan de pq-palen gemeten.
- Waterpassingen van de pq-palen en de bodemdaling werden per twee jaar aangeleverd door de NAM, en jaarlijks opslibbingsgegevens van 7 pq's door het WL | Delft Hydraulics gemeten ten opzichte van een ingegraven plaat.

### **Resultaten van de monitoring op Ameland**

De SEB-metingen van de opslibbing zijn in Figuur 3.4 weergegeven. Deze metingen geven tevens een beeld van de seizoensfluctuaties en de achterliggende processen. Die kunnen de jaarlijkse veranderingen in bodemhoogte verklaren. Onder invloed van waterverlies en waterabsorptie kunnen oude (= gerijpte) kleiige bodems door krimp en zwelling een variatie in bodemhoogte vertonen van 3-4 cm (Veenstra, 1965; De Glopper, 1973). De mate van fluctuatie hangt sterk samen met de hoeveelheid neerslag en dus het vochtgehalte van de bodem. Bij een binnendijkse uitgerijpte bodem is de zomerse inklink (vrijwel) geheel reversibel (pers. comm. De Glopper, 1997).

Figuur 3.4 toont de volgende resultaten van de opslibbing op het Nieuwlandsrijd:

- In alle zomers is er in mindere of meerdere mate inklink geweest. Herstel treedt meestal vrij snel op in de herfst door zwelling als gevolg van neerslag of overvloeding.
- De weersomstandigheden in 1995 en 1999 waren vrij uitzonderlijk: een warme zomer met sterke krimp van de bodem door uitdroging (tot circa 2 cm in de referentiegebieden).
- De winter van 1995/1996 was ook uitzonderlijk; de wind kwam vrijwel uitsluitend uit oostelijke richtingen, waardoor de slibaanvoer gering was (nauwelijks overvloedingen en geen stormtijden).
- In alle jaren is de winter voor opslibbing de belangrijkste periode, waarbij de opslibbing in de winters 1998/99 en 1999/2000 het hoogst is. Dat is ook bij de SEB-metingen van Alterra in alle referentiegebieden het geval.
- De gemiddelde opslibbing over de periode 1993-2000 op het Nieuwlandsrijd is 11 mm/j per jaar voor de pionierzone, 7 mm/j voor de lage kwelder, 8 mm/j voor de midden kwelder en 1 mm/j voor de hoge kwelder. Dat is hoog voor een eilandkwelder, op het

niveau van de bovenwaarde van de in 1986 voorspelde range (3-8 mm/j voor de lage kwelder; Reinalda et al. 1987).

De bodemdaling in de vegetatieraaian van het Nieuwlandsrijd en De Hon (Ameland) is 8 - 19 mm per jaar. Dat is uitzonderlijk hoog voor de draagkracht van een eilandkwelder (Dijkema et al., 1990). Uit onderzoek gedurende 13 jaar gaswinning (Eysink et al., 2000) is gebleken dat in de laagste zones van de kwelder en de delen, die het dichtst bij de Waddenzee of de kreken zijn gelegen, de opslibbing niettemin in evenwicht is met de bodemdaling. Het maaiveld van de midden- en hoge kwelders en de kwelders, die ver van het wad zijn gelegen, heeft als gevolg van de bodemdaling een achterstand in hoogte opgelopen (Fig. 3.5a,b). De opslibbing is daar het laagst. De grenswaarde van 50 mm voor veranderingen in de vegetatie, die voor een negatieve opslibbingsbalans is gesteld, wordt ruim overschreden. Deze negatieve opslibbingsbalans is een effect van bodemdaling door gaswinning. Na beëindiging van de gaswinning zal herstel van de oorspronkelijke maaiveldhoogte plaatsvinden als gevolg van een dan weer positieve opslibbingsbalans.

### **Conclusies van de monitoring**

De voornaamste conclusies in het onderzoeksrapport met de resultaten van de monitoring tot en met 1999 voor de abiotische factoren op de kwelders zijn (Eysink et al., 2000):

- Vorm en oppervlakte van Ameland-Oost zijn niet duidelijk beïnvloed door de bodemdaling. De kwelderafslag langs de bestaande afslagrand bij het Oerd, de Oerderduinen en De Hon is doorgegaan, maar heeft zich niet versneld. Langs een ander deel van De Hon vond enige aangroei plaats.
- In de buurt van de rand van de kwelders en van de kwelderkreken (bodemdaling 120 - 180 mm) is de bodemdaling gecompenseerd door de opslibbing. Op grotere afstand van de rand van de kwelders en de kreken vond gedeeltelijke compensatie plaats.
- De afstand tot het wad of tot de kreken (de bronnen van het sediment) blijkt minstens zo belangrijk te zijn voor de snelheid van opslibbing als de hoogteligging (Stoddart et al. 1989; Van Duin et al. 1997; Esselink et al. 1998; Reed et al. 1999).
- De ontwatering blijkt voor de kwelderzonerings, binnen marges, meer en in ieder geval sneller tot veranderingen in vegetatie te leiden dan de maaiveldhoogte.

### **3.4.3 Resultaten 0-meting Peazemerlannen**

#### **Doel en methode van de 0-meting Peazemerlannen**

Uit vooronderzoek dat in 1993 in opdracht van NAM door Alterra en de Universiteit Utrecht is uitgevoerd (Oost & Dijkema, 1993), is gebleken dat de Peazemerlannen het meest gevoelige gebied voor bodemdaling waren. Die conclusie was niet op metingen in de kwelder gebaseerd, maar op (te) voorzichtige aannames voor de opslibbing. Eind 1994 is daarom door Alterra onderzoek gestart naar de opslibbing en vegetatie in de Peazemerlannen. Het onderzoek is deels uitgevoerd in samenwerking met het Kernfysisch Versnellingsinstituut van de RU Groningen. De nulmetingen zijn gedurende een aantal jaren uitgevoerd en omvatten een periode van extreme droogte en klink en van zware storm. De resultaten zijn vastgelegd in het rapport 'Veranderingen in bodemhoogte (opslibbing, erosie

en inklink) in de Peazemerlannen' (Van Duin et al., 1997). Dit rapport maakt onderdeel uit van de Integrale Bodemdalingstudie (in het deelrapport kwelders, rapport nummer 3). De opslibbing is onderzocht met verschillende methoden, i.e. via Caesiumdatering (1973 - 1986 en 1986 - 1996), hermeting van een oude hoogtekaart (1973 - 1996), metingen aan import en export van sediment en opslibbingsmetingen met SEB (1995 - 1997) en met filters.

### Resultaten van de 0-meting Peazemerlannen

De lage kwelderzone werd als meest kritisch voor bodemdaling beschouwd. De opslibbingscijfers voor de lage kwelder in Van Duin et al. (1997) variëren van 8 - 16 mm per jaar. In Tabel 3.4.2 worden de opslibbingscijfers van de verschillende methoden met elkaar vergeleken. De cijfers van de hermeting zijn het meest betrouwbaar door de lange tijdperiode waarover gemiddeld is. De hermeting leverde voor de lage kwelderzone een gemiddelde opslibbing op van 16 mm/j.

Deelgebied	Hermeting	n	SEB	n	<sup>137</sup> Cs	n
Kwelder	16,1	115	8,1	25	10,0	2
Oeverwal	22,5	47	10,8	6		
Lage kwelder	15,6	29	8,1	11		
Kom (secundaire pionierzone)	10,9	24	4,1	6		
Gat (primaire pionierzone)	5,4	15	12,3	2		
Buitendijks		19				
Voor zeewering	5,0	15				
Langs strekdam	-21,2	4				
Zomerpolder	-0,3	89	-7,0	3		

Opslibbing/erosie gemeten tijdens de hermeting (1973 - 1996), met de sedimentation-erosion bar (SEB 1995 - 1997) en met de <sup>137</sup>Cs-methode (1973 - 1986 en 1986 - 1996).

Tabel 3.4.2 Gemiddelde bruto opslibbing/erosie (mm/jaar) in de Peazemerlannen.

De SEB-metingen zijn door Alterra na 1997 voortgezet. De reeks is nu zo lang (jan. 1995 - maart 2000) en de opslibbingscondities zijn zo divers (zie paragraaf 'Resultaten van de monitoring op Ameland'), dat de SEB-gegevens nu als beste schatting van de actuele opslibbing in de verschillende zones kunnen worden beschouwd. In Figuur 3.6 zijn de resultaten per zone weergegeven, op een vergelijkbare wijze als voor het Nieuwlandsrijd (Ameland). Daaruit blijkt een gemiddelde opslibbing, op basis van de SEB-metingen over de langere periode maart 1995-maart 2000, van 20 mm/j voor de primaire pionierzone (achter het gat in de bitumenkade), 11 mm/j voor de secundaire pionierzone (de kommen in de kwelder), 14 mm/j in de lage kwelder en op de oeverwallen (de hogere zone langs de kwelderkreken) en - 3 mm/j in de zomerpolder. Deze cijfers worden hierna in de effecten-voorspelling gebruikt.

### **3.4.4 Effect op het kwelderniveau en de kwelderrand van de Peazemerlannen**

#### **Methode opslibbingsbalans**

Het bepalen van de balans tussen opslibbing, bodemdaling en veranderingen in GHW is in de lopende monitoringsprogramma's in de Groninger en Friese kwelderwerken (beheermetingen, RWS) en op Ameland (monitoring effecten van bodemdaling door gaswinning, Alterra) een beproefde methode. De methode wordt o.a. aanbevolen door de Raad voor de Natuur in haar advies over bodemdaling door gaswinning. De methode is gebaseerd op opslibbing/inklinkmetingen gekoppeld aan de pq's. Het SEB-meetnet van Alterra in o.a. de Peazemerlannen, in verschillende delen van de kwelderwerken en op Ameland is een betrouwbare basis voor interpretatie van de waargenomen processen op één bepaalde locatie.

Met de SEB-gegevens van de opslibbing is de trendlijn per zone berekend en doorgetrokken tot 2021 (Figuur 3.7a,b). In werkelijkheid zal de lijn bij een toenemende hoogte op een bepaald moment afvlakken, omdat de aanvoer van sediment dan afneemt. Dat afvlakken heeft geen invloed op de resultaten van de voorspelling, want door bodemdaling zal het afvlakken later optreden. Als cijfer voor de bodemdaling is het meest waarschijnlijke scenario (base case) voor de Peazemerlannen aangehouden: totaal 70 mm, waarvan 60 % = 4,2 mm/j in jaar 2 – 11 en 40 % = 2,8 mm/j in jaar 12 – 21 (Figuur 3.7a,b).

Voor de nieuwe bodemdalingsvoorspelling geldt een totale zakking in de Peazemerlannen variërend van 11 cm aan de oostzijde tot 15 cm aan de westzijde met bijbehorende zakkingsnelheden van 6,6 – 9,0 mm/j gedurende de eerste tien jaar en 4,4 – 6,0 mm/j gedurende de volgende tien jaar. Ook voor deze getallen blijven de balansen op de figuren 3.7a en 3.7b positief.

#### **Resultaten kwelder Peazemerlannen**

Uit Figuur 3.7a,b blijkt dat (ook voor de nieuwe bodemdalingsgegevens) de opslibbingsbalans nauwelijks door de bodemdaling wordt beïnvloed. Zowel in de primaire pionierzone achter de stormdoorbraak, de kommen, de lage kwelder als op de oeverwallen blijft de opslibbingsbalans positief. Ook als een zeespiegelstijging van 2 mm/j zou zijn meegenomen is dat het geval.

De primaire pionierzone achter de doorbraak in de asfalt zomerkade werd in de bodemdalingstudies van 1993 en 1998 nog als een probleem gezien. Op grond van de recente SEB-metingen is dat niet meer het geval. De eerder aanbevolen mitigatie d.m.v. een rijshoutdam wordt op dit moment dan ook niet meer noodzakelijk geacht. Monitoring zal moeten uitwijzen hoe deze zone zich in de toekomst ontwikkelt, mede om aantasting van de achterliggende zomerpolder en vervolgens van de dijkvoet te voorkomen. Ervaring in de kwelderwerken van Rijkswaterstaat langs de noordkust van Groningen en Friesland heeft geleerd dat mitigatie, indien bij veranderende omstandigheden toch noodzakelijk, te allen tijde snel en doeltreffend met rijshoutdammen kan worden uitgevoerd.

## Resultaten zomerpolder Peazemerlannen

Uit Figuur 3.8 blijkt dat de opslibbingsbalans in de zomerpolder in het jaar 2021 in totaal 126 mm negatief wordt: 56 mm door inklink en 70 mm door de bodemdaling. Volgens de nieuwe gegevens zal de uiteindelijke bodemdaling in de zomerpolder 12cm (oostzijde) tot 16 cm (westzijde) bedragen. De totale daling door klink en bodemdaling zou dus naar verwachting nu oplopen tot 176 mm aan de oostzijde en tot 216 mm aan de westzijde. Omdat ook de duikers in de zomerkade met de bodemdaling zullen meezakken en het gebied voldoende hoog ligt, zal de ontwatering van de zomerpolder ook in de nieuwe situatie niet door de bodemdaling als gevolg van gaswinning worden beïnvloed. Eventuele veranderingen in het grondwaterpeil ten opzichte van het maaiveld zullen voornamelijk worden veroorzaakt door de natuurlijke inklink.

Mogelijke klifvorming langs de voorliggende kwelder en de noodzaak van mitigatie met een rijzendam wordt in de voorgaande paragraaf bij 70 mm en ook bij de hogere waarde van circa 150 mm bodemdaling niet waarschijnlijk geacht. Verkweldering van de zomerpolder zou de doorslag kunnen geven om dat wel te doen om te voorkomen dat een klif naar de dijkvoet loopt.

### 3.5 Effect op het economisch gebruik van de zomerpolder

De zomerpolder achter het kweldergebied van de Peazemerlannen is door It Fryske Gea verpacht aan een boer, die er van half april tot half oktober vee laat grazen. De tegen de hoge zeevering gelegen polder is ongeveer 3 km lang en circa 75 ha groot. Aan de zeezijde is de polder beschermd door een zomerkade met een kruinhoogte op NAP + 2,25 m. Het maaiveld in de polder ligt overwegend tussen 0,9 m en 2,4 m boven NAP met een gemiddelde hoogte van 1,55 á 1,6 m boven NAP. De polder watert door negen klepduikers in de zomerkade af naar de Waddenzee via de sloten in de ervoor liggende kwelder.

De verwachte bodemdaling in dit gebied zal uiteindelijk 12 cm bedragen in het oosten oplopend tot 16 cm in het westen. Deze daling zal niet of slechts zeer langzaam door opslibbing worden gecompenseerd, omdat de polder door een zomerkade van de zee is afgeschermd. Hierdoor is de polder voor frequent voorkomende stormvloed tegen overfloeding beschermd, terwijl het meeste slib dat bij hoge stormvloed met het water over de zomerkade de polder instroomt door een relatief snelle afwatering weer via de negen klepduikers naar de Waddenzee wordt teruggespoeld. Als gevolg van de bodemdaling zakt niet alleen de polder, maar ook de kruin van de zomerkade. De zakking van de polder en de zomerkade kan leiden tot economische schade door:

1. frequentere wateroverlast door overstroming van de zomerkade in het graasseizoen, en
2. moeilijker afwatering van de polder.

In het volgende is getracht om de mogelijke schade zo goed mogelijk aan te geven.

#### Frequenter wateroverlast door overstroming

De zomerkade, die de zomerpolder aan de noordzijde tegen de zee beschermt, is een groene dijk met een kruinhoogte op circa NAP + 2,25 m. Uit jaargegevens van de waterstanden in

het nabijgelegen getijstation Lauwersoog van de periode 1981-1997 blijkt, dat dit onder normale omstandigheden ruim voldoende bescherming geeft, maar dat dit niveau elk jaar één of meerdere keren tijdens een stormvloed ruim wordt overschreden (zie Tabel 3.7.1) en de polder volloopt met zeewater.

Uit HW-overschrijdingsgegevens van Lauwersoog van de periode 1971-1980 blijkt, dat hoge stormvloeden voornamelijk voorkomen in de periode van november tot februari en incidenteel tijdens vroege najaarsstormen in oktober of tijdens voorjaarsstormen in maart of april (Tabel 3.7.2).

Jaar	Lauwersoog		
	Max, HW	GHW	GLW
1981	324	107,9	-128,0
1982	284	103,5	-131,4
1983	336	109,9	-123,9
1984	270	100,2	-133,4
1985	266	101,1	-131,5
1986	247	98,9	-130,6
1987	285	100,4	-133,0
1988	258	106,9	-124,0
1989	283	102,6	-125,0
1990	341	106,8	-121,4
1991	286	96,3	-136,0
1992	240	101,1	-131,2
1993	307	100,8	-133,1
1994	343	104,4	-130,0
1995	320	105,6	-129,0
1996	268	92,9	-143,6
1997	248	100,4	-134,9
1981-'97	343	102,3	-130,6

Tabel 3.7.1 Waterstanden van Lauwersoog (cm t.o.v. NAP)

Gemiddeld aantal hoogwaters gelijk aan of hoger dan het referentiepeil, periode 1971-1980													
Waterhoogte (NAP+cm)	Hoogwaters												jaar
	jan	feb	mrt	april	mei	juni	juli	aug	sep	okt	nov	dec	
300	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3	1,0
290	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3	1,0
280	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3	1,0
270	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,3	1,3
260	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0,6	1,7
250	0,5	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,8	0,8	2,2
240	0,5	0	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0,1	1,2	1,0	3,0
230	0,7	0	0,1	0,3	0	0	0	0	0	0,2	1,5	1,0	3,8
<b>220</b>	<b>0,7</b>	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,2</b>	<b>2,0</b>	<b>1,4</b>	<b>4,8</b>
<b>210</b>	<b>0,7</b>	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>2,6</b>	<b>1,7</b>	<b>6,0</b>
<b>200</b>	<b>0,8</b>	<b>0</b>	<b>0,2</b>	<b>0,6</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,5</b>	<b>3,1</b>	<b>2,1</b>	<b>7,5</b>
190	1,3	0,1	0,3	0,7	0	0	0	0,1	0,3	1,1	4,1	2,9	10,9
180	1,8	0,2	0,5	0,7	0	0	0,1	0,1	0,7	1,3	4,7	3,2	13,3
170	2,6	0,7	0,7	0,8	0,1	0,2	0,1	0,2	1,0	2,1	6,0	4,2	18,7
160	3,4	1,2	0,9	1,3	0,4	0,2	0,2	0,5	1,3	3,4	7,6	6,0	26,4
150	5,5	2,0	1,9	1,9	0,5	0,5	0,8	1,1	2,2	4,5	9,4	7,9	38,2
140	7,3	3,4	3,7	2,9	0,9	0,9	1,7	1,8	3,8	7,3	13,1	11,2	58,0
130	10,7	5,3	5,2	4,7	1,6	2,6	4,9	3,4	7,2	9,8	17,1	15,3	87,8
120	14,1	7,9	8,8	7,5	3,1	6,4	11,3	10,2	13,8	13,4	23,2	20,7	140,4
110	19,1	11,8	14,4	12,4	7,9	13,6	19,4	16,9	21,7	19,2	28,9	26,3	211,6
100	25,3	17,3	20,8	18,4	16,7	24,4	28,2	24,2	28,9	28,1	35,3	32,5	300,1

Tabel 3.7.2 Statistische gegevens van HW te Lauwersoog van 1971-1980.

Bij het gebruik van de gegevens uit deze tabel in de huidige situatie dient rekening te worden gehouden met een zeespiegelstijging van circa 5 cm; d.w.z. dat het aantal overschrijdingen van een niveau van NAP + 2,20 m nu optreedt bij het huidige kruinniveau van de zomerkade op NAP + 2,25 m. Bij een verlaging van 10 cm van de kruin van de zomerkade neemt de kans op overstroming dus toe. Over het hele jaar zal de kans van 4,8 maal per jaar toenemen tot 6,0 maal per jaar. In april is er geen significante toename en in oktober neemt de kans iets toe van eens per 5 jaar tot eens per 3,3 jaar. Daarnaast bestaat er nu ook een kans van eens per 10 jaar dat er een overstroming in augustus of september plaats zal vinden. Voor een bodemdaling van 12 tot 16 cm gelden de waarden tussen die van de niveau's van 200 en 210 cm boven NAP. Over het hele jaar neemt de kans op vollopen toe tot 6,75 maal per jaar en de kansen in april en oktober tot 0,5 respectievelijk 0,4 maal per jaar. De totale kans in het graasseizoen neemt toe tot 1,1 maal per jaar.

Opgemerkt zij dat een waarnemingsperiode van 10 jaar voor statistische doeleinden kort is en dat dit slechts een redelijke indruk van de overstromingskansen geeft; de werkelijke kans kan wat afwijken. Voor de onderhavige studie worden de gebruikte gegevens voldoende representatief geacht.

In het algemeen kan worden gesteld dat bij overschrijding van het peil van de kruin van de zomerkade in de periode april tot en met oktober het verschil tussen waterstand en dijk kruin betrekkelijk gering is en van vrij korte duur. In sommige gevallen zal de polder slechts gedeeltelijk vollopen. Om een indruk te krijgen bij welke hoogwaterstand volledige vulling optreedt, zijn berekeningen gemaakt voor een lange, volkomen overlaat met een kruinhoogte op NAP + 2,25 m en een breedte van 1000 m respectievelijk 3000 m met een sinusvormig getij (amplitude 1,25 m) en verschillende middenstandsverhogingen. Dit gaf de resultaten, die zijn gegeven in Tabel 3.7.3.

HW - 225 (cm)	Maximum debiet (m <sup>3</sup> /s)	Ingestroomd volume (m <sup>3</sup> )
1,0	1,5 - 4,5	2.700 - 8.100
4,0	12,5 - 37	27.200 - 81.600
5,0	17,5 - 52	42.700 - 128.200
9,5	45 - 135	152.200 - 456.500
17,0	108 - 323	553.500 - 1.660.500

Tabel 3.7.3 Geschatte hoeveelheid ingestroomd water in de zomerpolder bij gegeven overschrijding van het HW-peil boven de kruin van de zomerkade.

Het volume van de zomerpolder onder de kruin van de zomerkade bedraagt ongeveer 500.000 m<sup>3</sup>. Hieruit volgt dat de zomerpolder volledig volloopt bij een HW dat 16 cm à 10 cm boven de zomerkade uitkomt bij een overlaatbreedte van 1000 m à 3000 m. Bij een verschil van 5 cm loopt de polder maar voor 10 à 25 % vol. Door de beperkte capaciteit van de negen klepduikers zal het meerdere dagen duren voordat dit water weer uit de polder is weggestroomd. In de winter is dit een normaal voorkomend verschijnsel, maar in het graasseizoen zal dit tot enige schade voor de boer leiden. Door de bodemdaling zal de kans op deze schade iets toenemen.

## Afwatering van de zomerpolder

De zomerpolder en de ervoor liggende kwelder liggen in hun geheel in het hart van het bodemdalingsgebied van de nieuwe gasvelden. De dalingsverschillen in de richting van de afwatering (zuid-noord) zullen kleiner zijn dan 2 cm. Ook in oost-westelijke richting zal het zakkingsverschil naar verwachting niet meer dan 3 cm bedragen, zodat er als gevolg van de gaswinning geen slecht afwaterende pockets in de zomerpolder zullen ontstaan. De polder met afvoersloten, eventuele overlaatjes en de klepduikers zullen in hun geheel gelijkmatig worden verlaagd.

De afwatering van de zomerpolder zal geen probleem opleveren als het peil in de sloten, na zakking, onder een peil kan worden gehouden dat wordt geschat op NAP + 0,8 m of hoger. Uit de statistische gegevens van de periode 1971-1980 blijkt (zie Tabel 3.7.4) dat in het graasseizoen alle laagwaters lager waren dan NAP + 0,6 m, dat het laagwater slechts incidenteel niet onder NAP zakt en in verreweg de meeste gevallen lager is dan NAP - 1 m. Hieruit kan worden afgeleid dat er ook na de bodemdaling rond laagwater voldoende verval overblijft voor een goede afwatering.

Gemiddeld aantal laagwaters lager dan het referentiepeil, periode 1971-1980													
Waterhoogte (NAP+cm)	Laagwaters												jaar
	jan	feb	mrt	april	mei	juni	juli	aug	sep	okt	nov	dec	
100	59,8	54,7	59,9	58,0	59,9	58,0	59,9	59,9	58,0	59,9	57,9	59,8	705,8
90	59,8	54,7	59,9	58,0	59,9	58,0	59,9	59,9	58,0	59,9	57,9	59,8	705,8
80	59,7	54,7	59,9	58,0	59,9	58,0	59,9	59,9	58,0	59,9	57,9	59,8	705,7
70	59,6	54,7	59,9	58,0	59,9	58,0	59,9	59,9	58,0	59,9	57,7	59,6	705,2
60	59,6	54,7	59,9	58,0	59,9	58,0	59,9	59,9	58,0	59,9	57,7	59,5	705,1
50	59,6	54,7	59,9	58,0	59,9	58,0	59,9	59,9	58,0	59,8	57,5	59,4	704,7
40	59,4	54,7	59,9	57,9	59,9	58,0	59,9	59,9	57,9	59,8	57,1	59,4	703,9
30	59,3	54,7	59,9	57,9	59,9	58,0	59,9	59,9	57,9	59,7	57,0	59,1	703,3
20	59,2	54,7	59,9	57,9	59,9	58,0	59,9	59,9	57,9	59,7	56,9	59,0	703,0
10	59,2	54,7	59,9	57,9	59,9	58,0	59,9	59,9	57,9	59,4	56,5	58,7	701,9
0	58,8	54,6	59,8	57,8	59,9	58,0	59,9	59,7	57,8	59,3	56,1	58,5	700,3
-10	58,6	54,6	59,7	57,8	59,9	58,0	59,9	59,7	57,7	58,9	55,7	58,4	699,0
-20	58,1	54,5	59,7	57,7	59,9	58,0	59,9	59,7	57,4	58,6	55,0	57,9	696,5
-30	58,1	54,4	59,5	57,7	59,9	58,0	59,8	59,6	57,2	58,5	54,2	57,2	694,2
-40	57,6	54,4	59,3	57,7	59,9	58,0	59,8	59,5	56,6	58,3	53,2	56,3	690,7
-50	56,8	54,1	58,6	57,2	59,9	58,0	59,7	59,3	56,2	57,5	51,8	54,9	684,1
-60	55,5	53,8	57,8	56,5	59,6	57,9	59,5	58,8	55,4	56,6	50,3	54,1	675,9
-70	54,5	53,4	57,3	55,8	59,5	57,6	59,3	58,8	54,1	54,2	47,0	52,4	663,7
-80	52,8	52,6	56,3	54,9	59,3	57,3	58,7	57,0	52,1	53,0	43,5	49,6	647,2
-90	50,0	51,2	55,1	53,6	59,0	56,3	57,3	55,2	49,8	50,7	40,3	46,3	624,8
-100	47,8	48,8	52,3	52,3	58,5	55,1	55,2	52,8	45,8	46,9	35,8	42,4	593,7

Tabel 3.7.4 Statistische gegevens van LW te Lauwersoog van 1971-1980.

## Mogelijke schade

Eventuele schade in de zomerpolder zal beperkt blijven tot een geringe verhoging van de overstromingsfrequentie van de polder. Gebaseerd op een waarnemingsperiode van 10 jaar en gecorrigeerd voor de zeespiegelstijging in de afgelopen 25 jaar geldt de toename van de overstromingskans in het graasseizoen en het hele jaar bij een bodemdaling van 15 cm als gegeven in Tabel 3.7.5.

Periode	Aantal overstromingen per 10 jaar	
	Zonder bodemdaling	Met maximum bodemdaling
april	4	5
mei	0	0
juni	0	0
juli	0	0
augustus	0	1
september	0	1
oktober	2	4
hele jaar	48	67,5

Tabel 3.7.5 Effect maximum bodemdaling op aan tal overstromingen van de zomerpolder.

Per overstroming zal de boer het vee tijdig uit de polder moeten halen en kan de polder gedurende een aantal dagen niet worden gebruikt. Door de bodemdaling zal het aantal overstromingen in het graasseizoen, zonder tegenmaatregelen, geleidelijk toenemen van gemiddeld 6 naar 11 per 10 jaar, waarvan de meeste gebeuren in april en oktober. Behoudens het effect van verdere zeespiegelstijging blijft dit daarna zo.

Per overstroming wordt door het Waterschap het drijfvuil van de dijk verwijderd om de conditie van het gras op de dijk goed te houden. Over het hele jaar zal het aantal overstromingen toenemen van 48 tot 67,5 keer per 10 jaar. Het Waterschap zal hiervoor dus extra kosten moeten maken.

Bovengenoemde nadelige effecten kunnen worden tegengegaan door de zakking van de zomerkade als gevolg van de bodemdaling te compenseren door dijkverhoging.

Het bovenstaande is echter niet meer relevant, indien in het kader van de nieuwe PKB voor de Waddenzee door de beleidsmakers, de eigenaar Waterschap Friesland en de beheerder It Fryske Gea wordt besloten de zomerpolder te ontpolderen. Voor het geval die optie wordt gekozen, zal nader naar de mogelijke aantasting van de dijkvoet en de opruiming van extra feek moeten worden gekeken, want dat zijn zwaarwegende zaken voor het Wetterskip. Mogelijke klifvorming langs de voorliggende kwelder en de noodzaak van mitigatie met een rijzendam wordt bij 12 tot 15 cm bodemdaling niet waarschijnlijk geacht. In geval van verkweldering van de zomerpolder zou dat de doorslag kunnen geven om dat wel te doen om te voorkomen dat een klif naar de dijkvoet loopt.

## 4 ASMITA-onderzoek

### 4.1 Inleiding

De bureaustudie in het vorige hoofdstuk is vooral gebaseerd op de resultaten van de IBW studie, die inmiddels 7 jaar geleden is uitgevoerd. Sindsdien zijn er veel dingen veranderd. Het meest belangrijke is dat de voorspellingen van de bodemdaling zijn aangepast aan de hand van verbeterde inzichten (zie hoofdstuk 2). Daarnaast zijn de toen in de studie gebruikte morfologische modellen verder ontwikkeld en er zijn nieuwe inzichten over de morfologische ontwikkelingen van de Waddenzee verkregen in de verschillende studies. Daarom is besloten in de huidige studie naast de bureaustudie ook aanvullende modelonderzoeken uit te voeren. De aanvullende modelberekeningen zijn uitgevoerd met de nieuwe ontwikkelde / aangepaste modellen ASMITA, ESTMORF en Delft3D. De nieuwe ontwikkelingen rondom ASMITA, dat ook in de IBW studie is toegepast, is samengevat in de volgende paragraaf. De ontwikkeling van ESTMORF, dat ook is gebruikt in de IBW studie, betreft vooral softwarezaken (zie hoofdstuk 5). Verder wordt Delft3D, dat niet was toegepast in de IBW studie, gebruikt om de invloed van de bodemdaling op de waterbeweging te bestuderen.

De aanvullende modelberekeningen gaan uit van de laatste bodemdalingvoorspellingen volgens de meest recente inzichten. Hierdoor kunnen de effecten van de bodemdaling direct worden bepaald in plaats van via een interpretatieslag zoals bij de bureaustudie.

### 4.2 Aanpak ASMITA-onderzoek

#### 4.2.1 Beschrijving van het model

##### model principe

ASMITA is een acroniem voor Aggregated Simulation of Morphological Interaction between a Tidal inlet system and Adjacent coast. In het model wordt een zeegat systeem geschematiseerd in een aantal grote morfologische elementen, te weten de plaat binnen de vloedkom, de geulen binnen de vloedkom en de buitendelta (Fig.4.1). Deze elementen zijn als volgt gedefinieerd:

- plaat: zandvolume tussen GLW en GHW.
- geul: watervolume onder GLW
- delta: zandvolume boven een fictief kustprofiel dat er zou zijn als er geen zeegat was.

Van elk element is de evenwichtstoestand bekend. In het model is het evenwichtsvolume een eenduidige functie van de hydrodynamica (getijprisma, getijslag). In de evenwichtstoestand heeft elk element een constante sedimentconcentratie: de evenwichtconcentratie  $c_E$ . Aangenomen is dat op de zeerand de concentratie constant is en gelijk aan de

evenwichtsconcentratie. Een verstoring van een evenwichtsvolume (bijvoorbeeld een volumeverkleining) leidt tot uitwisseling van sediment, net zo lang tot dat het evenwicht weer hersteld is. Elk element heeft ook een lokale evenwichtsconcentratie  $c_e$ . Deze concentratie is volume-gebonden en wordt in geval van watervolume als volgt bepaald:

$$c_e = c_E \left( \frac{V_e}{V} \right)^n \quad (4.1)$$

waarin:

$c_e$	=	lokale evenwichtsconcentratie	[-]
$c_E$	=	globale evenwichtsconcentratie	[-]
$n$	=	macht uit de transportformule	[-]
$V$	=	actueel volume	[m <sup>3</sup> ]
$V_e$	=	evenwichtsvolume	[m <sup>3</sup> ]

De volumeverandering van een element wordt bepaald door het verschil tussen de actuele en de lokale evenwichtsconcentratie. Als de actuele concentratie groter is dan de lokale evenwichtsconcentratie, dan zal een aanzanding optreden en omgekeerd erosie. Dit wordt beschreven met de volgende simpele formulering in geval van nat volume:

$$\frac{dV}{dt} = w_s A (c_e - c) \quad (4.2)$$

waarin

$A$	=	horizontaal oppervlak van element	[m <sup>2</sup> ]
$c$	=	actuele concentratie	[-]
$w_s$	=	verticale uitwisselingscoëfficiënt	[m/s]

Volgens de massa-balans van sediment moet de sedimentatie / erosie in een element aan de totale uitwisseling tussen het element en de andere elementen:

$$\sum_{\text{alle verbindingen}} T_{ab} = w_s A_a (c_{ae} - c_a) \quad (4.3)$$

De horizontale sediment uitwisseling tussen twee elementen a en b worden bepaald door het verschil in actuele concentratie:

$$T_{ab} = \delta_{ab} (c_a - c_b) \quad (4.4)$$

waarin

$T_{ab}$	=	sedimenttransport van element a naar element b	[m <sup>3</sup> /s]
$\delta_{ab}$	=	horizontale uitwisselingscoëfficiënt tuseen elementen a en b	[m <sup>3</sup> /s]

## Opzet model

Bij de IBW studie was het ASMITA model al gebruikt om de effect van de bodemdaling op de morfologische ontwikkeling van het Friesche Zeegat te simuleren. Daarbij is de schematisatie volgens Buijsman (1997) gebruikt. Sindsdien zijn er veel meer studies met het

ASMITA model uitgevoerd, vooral voor de Waddenzee. Een overzicht van deze studies is gegeven door Stive en Wang (2003). Van Goor (2001, zie ook Van Goor e.a., 2003) heeft het model gebruikt om de invloed van (versnelde) zeespiegelstijging op de morfologische ontwikkeling van de Waddenzee bekkens te analyseren. Hij concludeerde dat de plaatareaal van een bekken afneemt naarmate de snelheid van de zeespiegelrijzing hoger wordt. Bij een kritische snelheid van de zeespiegelrijzing zal een bekken op den duur verdrinken, i.e. dat er geen plaat meer zal overblijven. Deze kritische snelheid is sterk afhankelijk van de grootte van het bekken; hoe groter het bekken hoe lager de kritische snelheid. Voordat hij deze analyse deed heeft hij het model eerst goed gecalibreerd aan de hand van alle beschikbare gegevens rondom de aanpassing van de Zoutkamperlaag na de afsluiting van de Lauwerszee. Kragtwijk (2001, zie ook Kragtwijk e.a., 2004) heeft het model gebruikt om de morfologische tijdschalen van de zeegaten te analyseren. Bij deze studie heeft ze de modelopzet, zoals door Van Goor (2001) is gecalibreerd, verder geverifieerd aan de hand van de gegevens over de morfologische aanpassing van het Marsdiep na de bouw van de afsluitdijk. In al deze studies is de basis een 3-elementen schematisatie (zie Fig.4.1) in plaats van de ingewikkeldere schematisatie van Buijsman (1997). Met deze 3-elementen schematisatie is dus veel ervaring en kennis opgebouwd in de afgelopen jaren. Daarmee is het vertrouwen in het model sinds de IBW studie vergroot. Daarom is besloten in de huidige studie ook deze schematisatie te hanteren.

Van Goor (2001) heeft in zijn studie voor zowel de Zoutkamperlaag en het Pinkegat een ASMITA model met 3 elementen opgezet. In de huidige studie zijn deze modellen gebruikt en zijn de volgende aanpassingen gedaan:

- **Aanpassing m.b.t. getijslag verandering.** In de studies tot nu toe is de getijslag als constant in de tijd beschouwd. In werkelijkheid neemt de getijslag langs de Nederlandse kust langzaam toe met een trend van ongeveer 4% per eeuw. Bovendien varieert de getijslag ook cyclisch met o.a. een periode van 18,6 jaar. In de huidige studie willen wij de effecten van beide variaties bekijken. Hiervoor is de software van het ASMITA model aangepast.
- **Aanpassing vloedkom Oppervlak.** Bij het analyseren van de gegevens is gebleken dat de huidige grootte van de vloedkommen niet precies hetzelfde is als in de modellen van Van Goor (2001). Dit heeft vooral te maken met het feit dat de grootte van m.n. de Zoutkamperlaag is veranderd in de tijd na de afsluiting van de Lauwerszee door een verschuiving van de Wanttij achter de eiland Schiermonkoog. Daarom zijn de oppervlakken van de elementen plaat en geul in het model aangepast aan de hand van de bodemligingsgegevens van 2000.

Verder zijn alle parameters in de modellen dezelfde gehouden als in de beste calibratie berekening van Van Goor (2001). De invoergegevens van de modellen voor de twee zeegaten zijn samengevat in de volgende tabel.

Tabel 4.1 invoergegevens van ASMITA model

	Pinkegat		Zoutkamperlaag	
	Oppervlak	Volume	Oppervlak	Volume
Plaat	44,6 km <sup>2</sup>	34,7 Mm <sup>3</sup>	72,146 km <sup>2</sup>	73,43 Mm <sup>3</sup>
Geul	15,6 km <sup>2</sup>	25,1 Mm <sup>3</sup>	43,33 km <sup>2</sup>	178,01 Mm <sup>3</sup>
Delta	34 km <sup>2</sup>	35 Mm <sup>3</sup>	78 km <sup>2</sup>	151 Mm <sup>3</sup>

Getijverschil	2,15 m		2,25 m
Evenwichtsconcentratie	0,0002		
horizontale uitwisselingscoëfficiënten	plaat-geul 840 m <sup>3</sup> /s	geul-delta 1290 m <sup>3</sup> /s	delta-buiten 1060 m <sup>3</sup> /s

### Verwerking van bodemdalinggegevens

Door NAM zijn twee voorspellingen van de nu verwachte bodemdalingen aangeleverd, een basis scenario en een hoog scenario waarbij bodemdalingen van de nieuwe gasvelden ongeveer 30% hoger zijn dan bij het basis scenario. Verder zijn ook de gegevens van de bodemdalingen door Ameland de winning het het Amelandveld sinds 1986 aangeleverd.

De bodemdalinggegevens zijn geleverd in de vorm van  $Z(x,y)$ , tabellen, die de ruimtelijke verdeling van de daling aangeven, in verschillende jaren tot 2040. Voor het draaien van het model moeten deze gegevens worden vertaald naar veranderingen van de volumes van de drie morfologische elementen (plaat, geul, delta) per zeegat. Om dit te kunnen doen zijn de bodemdalingen op elk tijdstip opgeteld op de 2000 bodemligging. Zo kunnen de volumes van de morfologische elementen met en zonder bodemdaling worden bepaald. Verschil tussen de volumes van een elementen met en zonder bodemdaling geeft het effect van de bodemdaling. Dit proces is herhaald voor elk jaar waarin de bodemdalinggegevens zijn aangeleverd, en voor zowel de bodemdaling door de Amelandwinning alleen als de bodemdaling door alle velden (Ameland + nieuwe velden) samen.

#### 4.2.2 Uitgevoerde berekeningen

Bij het opstellen van het programma van uit te voeren berekeningen is naast de bodemdaling rekening gehouden met mogelijke veranderingen in de natuurlijke randvoorwaarden, zoals versnelde zeespiegelrijzing, een toename in het tijverschil en het effect van de cyclische variatie van de getijamplitude met een periode van 18,6-jaar. Dit heeft geleid tot vier scenarios voor de natuurlijke ontwikkeling in het gebied. Samen met de twee scenario's voor de bodemdalingen leidt dit tot 8 scenarios, zoals in de volgende tabel is samengevat.

Tabel 4.2 definitie van scenario's

Scenario		Zeespiegelrijzing		Getijslag	
nr.	beschrijving	tot 2007 (m/eeuw)	vanaf 2007 (m/eeuw)	toename per eeuw	ampl. van 18,6 jarige cyclus
1	Basis	0,20	0,20	0	0
2	18,6 jarig cyclus	0,20	0,20	0	3,8%
3	versnelde zeespiegel- rijzing	0,20	0,60	0	0
4	getijslag vergroting	0,20	0,20	4%	0
5	Bodemdaling	0,20	0,20	0	0
6	scenario hoog,	0,20	0,20	0	3,8%
7	verder als 1 t/m	0,20	0,60	0	0
8	4	0,20	0,20	4%	0

Per scenario worden er zowel voor het komgebied van het Pinkegat als voor dat van de Zoutkamperlaag 3 berekeningen uitgevoerd, i.e.:

- Zonder bodemdaling (ongestoorde situatie)
- Met bodemdaling van alleen het Ameland-veld
- Met totale bodemdaling van de gasvelden van Ameland en Anjum plus de nieuwe gasvelden

Er zijn dus in totaal 24 berekeningen per zeegat uitgevoerd. Alle berekeningen zijn gestart in 1970, na de afsluiting van de Lauwerszee, en doorgezet tot 2100.

### 4.2.3 Interpretatie van modelresultaten

De modelresultaten worden vooral op een relatieve manier bekeken. Dit betekent dat de simulaties zonder en met verschillende bodemdalingsscenario's met elkaar worden vergeleken. Zo worden de resultaten van de drie berekeningen per scenario, zoals beschreven in 4.2.2, met elkaar vergeleken. Het verschil tussen de resultaten met de bodemdaling door de Amelandwinning alleen en de resultaten zonder bodemdaling geeft het effect van de bodemdaling door de Amelandwinning. Op dezelfde manier kan het effect van de totale bodemdaling van alle gasvelden samen afgeleid. Vervolgens kan het effect van de nieuwe velden ook worden afgeleid uit het verschil tussen het effect van alle gasvelden samen en dat van alleen de Amelandwinning. Door de resultaten van de verschillende scenario's van natuurlijke ontwikkelingen met elkaar te vergelijken kunnen de effecten van de verschillende natuurlijke ontwikkelingen (verandering van zeespiegelstijgingsnelheid en getijslag) worden geanalyseerd. Zowel het effect op de morfologische ontwikkeling in het algemeen als het effect op de invloed van de bodemdalingen kunnen worden geïdentificeerd.

Als uitvoer geeft ASMITA de volumes van de drie morfologische elementen als functie van tijd. Verder geeft het model ook de transporten tussen de elementen onderling (plaat-geul, geul-delta) en transport tussen het modelgebied en het buitenwereld als functie van tijd. Het sedimenttransport naar het buitenwereld wordt gebruikt om de invloed op de Noordzee kust te analyseren. Door de sedimentthongering t.g.v. de bodemdaling ontstaat er extra import naar het zeegat. Deze extra import moet worden geïmporteerd van de Noordzeekust. Binnen de vloedkom is vooral de invloed van de bodemdaling op de ontwikkeling van de plaat van belang. Hierbij zijn de veranderingen van zowel het areaal als de hoogte van de plaat belangrijk. Het model geeft alleen de verandering van het plaatvolume. Deze volumeverandering kan worden verdeeld naar de twee bijdragen: verandering van plaatareaal en verandering van plaathoogte. De verhouding tussen deze twee bijdragen is bepaald tijdens de verwerking van de bodemdalinggegevens (zie vorige subparagraaf). Deze verhouding wordt constant verondersteld bij de interpretatie van de resultaten. Bij de presentatie van de veranderingen van de volumes van de drie morfologische elementen worden ook het gevolg van bodemdaling zonder compensatie gepresenteerd. Dit is gedaan door de verandering door bodemdaling bij de berekende verandering zonder bodemdaling op te tellen. Door dit te vergelijken met de berekende veranderingen met bodemdaling wordt een duidelijk beeld van de compensatie door sedimentatie verkregen.

Zoals beschreven in de vorige subparagraaf zijn er een groot aantal berekeningen uitgevoerd. Bij de analyse van de modelresultaten moeten verschillende aspecten worden bekeken. In de volgende 4 paragrafen worden de resultaten van de eerste vier scenario's in tabel 4.2.

gepresenteerd. Vervolgens wordt in paragraaf 4.7 de resultaten van de laatste vier scenario's in tabel 4.2 gepresenteerd om de invloed van hogere bodemdalingen te analyseren. De presentatie van de modelresultaten in 4.3 t/m 4.7 zijn verdeeld naar scenario's van natuurlijke ontwikkelingen en van bodemdalingen. Daarom worden de effecten van bodemdaling op de twee vloedkomgebieden weer samengevat in de laatste paragrafen van dit hoofdstuk. Daarbij wordt de nadruk vooral op de voor de MER relevante aspecten gelegd.

## 4.3 Basis scenario

### Buitendelta

De ASMITA-berekeningen zijn toegepast op de afzonderlijke vloedkommen van het Pinkegat en van de Zoutkamperlaag. De buitendelta van het Friesche Zeegat is daarom zo goed mogelijk verdeeld over deze twee zeegaten. De berekening is gestart in 1970 om zowel het effect van de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 als de bodemdalingen sinds de Ameland gaswinning vanaf 1986 te kunnen meenemen.

Figuur 4.2 laat de ontwikkelingen van de zandvolumes in de beide buitendelta's tussen 1985 en 2100 zien voor de ongestoorde situatie met en zonder bodemdaling door gaswinning. Met de drie lijnen in elk van de twee figuren worden de resultaten van de drie berekeningen gepresenteerd, namelijk zonder bodemdaling, met alleen de bodemdaling door Ameland winning, en met de totale bodemdaling van alle gasvelden samen. Verder zijn twee series met punten (kruisjes) gepresenteerd voor de twee bodemdalingen. Zij zijn bepaald door de berekende verandering zonder bodemdaling te verminderen met de directe verandering door de bodemdaling zoals uit de verwerking van de bodemdalingsgegevens is afgeleid en als invoer gebruikt in het model. Zij geven dus de situatie weer waarbij de bodemdaling geen invloed zou hebben op de sedimentatie / erosie. Het verschil met de resultaten van de berekening met de betreffende bodemdaling is dus de compensatie door sedimentatie. Hierna zullen bij de andere elementen en bij de andere scenario's de resultaten op dezelfde manier worden gepresenteerd.

Duidelijk blijkt dat buitendelta van het Pinkegat in 1985 dicht bij zijn theoretische evenwichtsvolume zit en in de ongestoorde situatie vanaf circa 2010 vrijwel constant blijft. Dit geldt niet voor de buitendelta van de Zoutkamperlaag. Daar is het effect van de afsluiting van de Lauwerszee nog duidelijk zichtbaar, hoewel het momenteel in 2005 nog maar betrekkelijk gering is.

Figuur 4.3 laat de "zandhonger" van de vloedkommen zien. Dit is het sedimenttransport tussen de buitendelta en de aangrenzende kust. Dit levert dus informatie over de invloed op de Noordzee kust op. In de ongestoorde situatie bij de huidige zeespiegelrijzing is deze zandvraag circa 0,19 miljoen m<sup>3</sup>/jaar voor het Pinkegatsysteem en circa 0,39 miljoen m<sup>3</sup>/jaar voor het Zoutkamperlaagsysteem. Bij de Zoutkamperlaag is deze vraag nu nog wat lager, omdat de buitendelta nog steeds een klein deel van de vraag levert en iets in omvang afneemt door de aanpassing aan de afsluiting van de Lauwerszee.

De verschillen tussen de drie lijnen in de figuren geven weer de invloed van de bodemdalingen door de verschillende gasvelden. Door de bodemdaling van alle velden samen zal het sedimentimport naar het Pinkegat met maximaal 0,29 miljoen m<sup>3</sup> per jaar, en dit wordt bereikt rond 2010. Door de bodemdaling van de Amelandwinning alleen zal rond 2010 de toename ongeveer 0,27 miljoen m<sup>3</sup> per jaar bedragen. De bodemdaling door alleen de nieuwe gasvelden veroorzaakt een maximale toename van 0,15 miljoen m<sup>3</sup> per jaar, die pas rondom 2020 optreedt. Doordat de maximale invloed van de Amelandwinning en die van de nieuwe velden niet in tijd samenvallen, veroorzaakt de bodemdaling door de nieuwe velden meer een verlenging van de verhoogde import dan een verhoging van de maximale toename. De invloed van de nieuwe velden is erg klein.

## Geulen

Figuur 4.4 geeft de ontwikkeling van het geulvolume onder gemiddeld laagwater (GLW) in beide vloedkommen van het Friesche Zeegat. Ook hier blijkt dat het volume van de geulen in de vloedkom van het Pinkegat in de ongestoorde situatie stabiel is en dat die van de kom van de Zoutkamperlaag zich nog wat aanpast aan de nieuwe situatie na de afsluiting van de Lauwerszee.

Bij het Pinkegat is te zien dat de grootste bijdrage van de invloed van de bodemdaling wordt veroorzaakt door de Amelandwinning. Als gevolg van compensatie door sedimentatie zal de geul na circa 2015 niet meer verdiepen en beginnen te herstellen. De bodemdaling van de nieuwe velden heeft voornamelijk als gevolg dat het herstel aantal jaren later ingaat.

Het evenwichtsvolume onder GLW van Zoutkamperlaag lijkt circa 165 miljoen m<sup>3</sup> te bedragen. Hiervoor moet de huidige, gemiddelde geuldiepte (geulopp. = 43,33 km<sup>3</sup>) van 3,72 m onder GLW toenemen tot 3,81 m. De nieuwe velden leveren de grootste bijdrage aan de invloed van de bodemdaling hier. De bodemdaling heeft voornamelijk als gevolg dat het evenwichtsvolume eerder wordt bereikt. Verder wordt opgemerkt dat in de eerste fase de bodemdaling in de geul niet wordt gecompenseerd maar er juist extra erosie optreedt (de blauwe lijn komt boven de blauwe kruisjes). Dit komt doordat voor de compensatie op de plaat er extra sediment nodig is, dat in eerste instantie door de geul wordt geleverd.

## Platen

Ook op de platen wordt een zelfde beeld gevonden (zie Figuur 4.5); het plaatvolume in de kom van het Pinkegat is stabiel op een gemiddelde hoogte van 0,90 m boven GLW (i.e. ongeveer 0,17 m onder NAP) ( $A_p = 38,1 \text{ km}^2$ ) en dat in de kom van de Zoutkamperlaag niet. Het plaatniveau daar zakt geleidelijk van 0,985 m boven GLW in 2005 naar een evenwicht op 0,97 m.

Figuur 4.5 laat zien dat op de platen in beide kommen reeds vanaf het begin van de gaswinning compensatie van de bodemdaling optreedt door sedimentatie. Bij het Pinkegat komt de invloed voornamelijk van de bodemdaling door de Amelandwinning, terwijl in de Zoutkamperlaag de invloed van de nieuwe velden dominant is. De invloeden van de bodemdalingen worden uitgebreider besproken in 4.8 en 4.9.

## 4.4 Effect van de 18,6-jarige cyclus in getijslag

De cyclische variatie van de getijslag met een periode van 18,6 jaar is astronomisch van oorsprong. De variatie heeft een relatieve amplitude van ongeveer 3,8%. Voor het Friesche zeegat betekent het dat de getijslag varieert tussen de 2,12 en 2,28 m rondom de gemiddelde waarde van ongeveer 2,2 m. Het effect van de variatie blijkt overal terug te vinden in de morfologische ontwikkelingen. Het leidt tot een kleine fluctuatie rond de ontwikkelingen als berekend zonder deze component (vgl. Fig. 4.6-4.9 met Fig. 4.2-4.5). Als wij naar de verschillen tussen de verschillende berekeningen kijken dan blijkt dat de effecten van de bodemdalingen nagenoeg dezelfde te zijn als die in het basisscenario beschreven in de vorige paragraaf.

### Pinkegat

De hoogte van de slingering in het plaatoppervlak in het Pinkegat bedraagt circa 10 cm, die in de geulbodem circa 10 cm en die op de buitendelta circa 3 cm. Dezelfde orde slingeringen treden ook op in de situaties met bodemdaling. De hoogte is bepaald door het volume te delen door het oppervlak van het betreffende element.

### Zoutkamperlaag

De amplitude van de slingering in het plaatoppervlak in de kom van de Zoutkamperlaag bedraagt circa 9 cm, die in de geulbodem circa 8 cm en die op de buitendelta circa 3 cm. Dezelfde orde slingeringen treden ook op in de situaties met bodemdaling.

### Conclusies

Een van de doelen van de simulaties voor dit scenario is om een idee te krijgen van de natuurlijke variaties van de morfologische ontwikkelingen. Deze cyclische variatie is namelijk een van de oorzaken van de fluctuaties in de morfologische veranderingen zoals ook waargenomen in onder andere de monitoringstudie naar de effecten van de Ameland winning. Door de sterkte van de slingerende variaties te vergelijken met de effecten van de bodemdalingen (zie Fig.4.2 t/m Fig.4.5) is duidelijk te zien dat deze natuurlijke slingerende variatie sterker is dan de veranderingen veroorzaakt door de bodemdaling door gaswinning. Opgemerkt wordt dat deze een variatie is, maar niet de enige natuurlijke variatie die fluctuaties in de morfologische ontwikkeling kan veroorzaken. Dit verklaart ook waarom het zo moeilijk is de morfologische effecten van de Amelandgaswinning te identificeren in de monitoringstudie.

Een andere reden van het uitvoeren van de berekeningen met dit scenario is om na te gaan of er niet-lineaire interactie optreedt tussen de slingerende variatie met de aanpassing aan de zeespiegelrijzing en de bodemdaling. Bij de Humberstudie is geconcludeerd dat door de cyclische variatie met 18,6 jaar periode het estuarium zich sneller aanpast aan de versnelde zeespiegelstijging. De resultaten van de berekeningen laten echter zien dat deze cyclische variatie vrijwel geen invloed heeft op de effecten van de bodemdalingen. De niet-lineaire interactie zoals bij het Humber Estuarium treedt hier dus niet op. De reden hiervan is waarschijnlijk dat de buitendelta hier als een buffer functioneert. De slingerende variatie veroorzaakt vooral een heen en weer gaand transport tussen de delta en de geul. De reactie

van deze twee elementen op een verandering van de getijslag is precies omgekeerd: wanneer er in een zandhonger ontstaat in het ene element, dan is er een zandoverschot in het andere, en omgekeerd.

## 4.5 Effect versnelde zeespiegelrijzing

In de berekeningen voor scenario 3 is de zeespiegelrijzing vanaf 2007 plotseling verhoogd van 0,20 m/eeuw tot 0,60 m/eeuw. Dit heeft een duidelijk effect op de ontwikkeling van het gebied. De resultaten van de berekeningen zijn om twee redenen van belang: (1) de invloed van de versnelde zeespiegelstijging op de morfologische ontwikkeling beschouwen, en (2) een eventuele invloed van de versnelde zeespiegelstijging op de effecten van de bodemdaling bepalen.

### Buitendelta

Figuur 4.10 laat zien dat het zandvolume van de buitendelta van het Pinkegat na 2007 circa 1,3 miljoen m<sup>3</sup> afneemt tot 32,6 miljoen m<sup>3</sup> en rond 2050 weer stabiel lijkt. Het zandvolume van de buitendelta van de Zoutkamperlaag neemt na 2007 versneld af tot circa 112 miljoen m<sup>3</sup> in plaats van 116 miljoen m<sup>3</sup> in de ongestoorde situatie. Deze veranderingen komen kwalitatief overeen met de verwachting. Bij hogere snelheid van zeespiegelstijging ontstaat er een grotere overdiepte in het gebied, wat een kleinere buitendelta betekent; ook het volume van de buitendelta gaat najlen t.o.v. de evenwichtsrelatie.

Uit Figuur 4.11 blijkt de versnelde zeespiegelrijzing grote gevolgen heeft voor de zandvraag van de aangrenzende kust en zeebodem. Deze wordt uiteindelijk drie maal zo hoog als in de huidige situatie.

### Geulen

Figuur 4.12 toont duidelijk dat de versnelde zeespiegelrijzing vanaf 2007 leidt tot een verruiming van de geulen tot een nieuw evenwicht is bereikt. In de vloedkom van het Pinkegat zullen de geulen door de toegenomen zeespiegelrijzing uiteindelijk circa 10 % ruimer worden. In de kom van de Zoutkamperlaag is het moeilijker om de mate van verruiming te bepalen, omdat het systeem nog niet volledig in evenwicht is. In de ongestoorde situatie wordt dit evenwicht geschat op circa 165 miljoen m<sup>3</sup> en in de situatie met versnelde zeespiegelrijzing op 195 à 200 miljoen m<sup>3</sup>, i.e. een toename van rond 20 %. De gemiddelde geuldiepte zal hierdoor in de kom van het Pinkegat met bijna 21 cm toenemen en in die van de Zoutkamperlaag met 70 à 80 cm.

### Platen

Figuur 4.13 laat zien dat ook de platen duidelijk door de versnelde zeespiegelrijzing worden beïnvloed. Vanaf 2007 neemt het plaatvolume en –niveau af tot een nieuwe evenwichtswaarde. In de kom van het Pinkegat neemt hierdoor het gemiddelde plaatniveau uiteindelijk met 6 cm af tot 84 cm boven GLW.

In de kom van de Zoutkamperlaag zal het evenwichtsvolume van de platen naar schatting rond 10 miljoen m<sup>3</sup> minder worden en naar circa 60 miljoen m<sup>3</sup> zakken. Dat betekent een uiteindelijke verlaging van het gemiddelde plaatniveau van circa 14 cm naar een evenwichtsniveau van ongeveer 83 cm boven GLW.

## Conclusies

Er is dus een aanzienlijk effect van de versnelde zeespiegelstijging op de morfologische veranderingen. De effecten zijn veel groter dan die van de bodemdaling door gaswinning. Dit is ook logisch wegens de beschouwde mate van versnelling. De snelheid gaat met 4 mm per jaar om hoog, wat over het hele gebied en gedurende de hele simulatieperiode geldt. De vraag is echter wanneer deze zss van 60 cm per eeuw zal gaan inzetten. De waarnemingen tot nu toe laten nog geen versnelling in de zeespiegelstijging zien in dit gebied. Daarom is het ook niet waarschijnlijk dat de in de berekeningen gehanteerde versnelling inderdaad al in 2010 gaat beginnen.

## 4.6 Effect toename getijslag

Ook een geringe toename van de getijslag met 4 %/eeuw blijkt invloed te hebben op de morfologie in de Waddezee. De resultaten van deze berekeningen zijn gegeven in Figuren 4.14-4.17.

### Buitendelta's

Als gevolg van de toename in de getijslag neemt geleidelijk ook het getijprisma toe. Dit resulteert in een geleidelijke toename van het zandvolume in de buitendelta (vgl. Fig. 4.2 met 4.14), omdat het evenwichtsvolume van de buitendelta afhankelijk is van het getijprisma. De zandhonger van de vloedkommen verandert niet of nauwelijks; die van de Zoutkamperlaag lijkt uiteindelijk iets af te nemen. Dit komt door de omgekeerde response van de geulen. Het benodigde zand voor de vergroting van de delta wordt voornamelijk aangeleverd door erosie in de geulen. Met andere woorden er vindt voornamelijk een interne herverdeling van zand plaats.

### Geulen

Ook de geulen tonen een geleidelijke verruiming (vgl. Fig. 4.4 met 4.16). Dit komt door de toename van het getijprisma en dus een groter evenwichtsvolume voor de geul.

### Platen

De wadplaten volgen netjes de toename van GHW (vgl. Fig. 4,5 met 4.17).

### Invloed op effect bodemdaling

Ook de toename van getijslag heeft vrijwel geen invloed op de berekende effecten van de bodemdalingen. De verschillen tussen de verschillende lijnen (voor zonder en met bodemdalingen) in Fig.4.14 t/m 4.17 zijn nagenoeg hetzelfde als die in Fig.4.2 t/m 4.5.

## 4.7 Bodemdaling scenario hoog

De berekeningen zoals besproken in de voorgaande paragrafen hebben allemaal betrekking op het basis scenario voor bodemdaling. Zoals beschreven in 4.2 is door NAM ook een scenario “hoog” voor de bodemdaling bepaald, waarbij de bodemdaling door de nieuwe gasvelden met 30% is verhoogd. In de scenario’s 5 t/m 8, zoals gedefinieerd in tabel 4.2, zijn dezelfde berekeningen in de eerste vier scenario’s, zoals in de voorgaande paragrafen zijn beschreven, herhaald, maar dan alleen met het bodemdalingsscenario “hoog” (zie tabel 4.2). Doel hiervan is een gevoeligheidsbeschouwing.

De resultaten van de berekeningen voor deze vier scenario’s met hogere bodemdaling zijn gepresenteerd in Fig.4.18 t/m 4.33. zij kunnen direct met de Figuren 4.2 t/m 4.17 worden vergeleken. Het verschil geeft het effect van de hogere bodemdaling weer. Er blijkt dat het effect van de hogere bodemdaling vrijwel niet afhangt van welke scenario van natuurlijke ontwikkelingen wordt bekeken. Dit is ook te verwachten omdat in de voorgaande paragrafen is al geconcludeerd dat de beschouwde variaties van de natuurlijke ontwikkelingen (variatie van getijamplitude en zeespiegelstijging) geen invloed hebben op de berekende effecten van de bodemdalingen.

Om inzicht te verkrijgen van de effecten van de hogere bodemdaling is het dus voldoende de resultaten van scenario 5 (Fig.4.18 t/m 4.21) te vergelijken met die van scenario 1 (Fig.4.2 t/m 4.5). Er is gebleken de effecten van de bodemdaling door de nieuwe velden volgens scenario 5 ongeveer 30% hoger zijn dan die volgens scenario 1 (zie Fig.4.34 en Fig.4.35). Er kan dus worden geconcludeerd dat de effecten lineair evenredig zijn met grootte van de bodemdaling.

## 4.8 Effect gaswinning op vloedkom van het Pinkegat

In de figuren 4.2-4.17 zijn naast de ontwikkeling zonder bodemdaling ook de ontwikkelingen met bodemdaling door gaswinning uit alleen het Amelandveld en die door winning uit alle gasvelden uitgezet. De winning uit het Amelandveld is begonnen in 1986 en die uit de nieuwe velden is verondersteld te beginnen in 2007. Waar relevant is ook de ontwikkeling aangegeven bij bodemdaling door gaswinning zonder compensatie door sedimentatie. Zoals eerder is uitgelegd, is dit gedaan om duidelijk te maken hoe de compensatie door sedimentatie in de tijd verloopt. Dit geldt voor beide vloedkommen. De effecten van de bodemdaling door gaswinning blijken het duidelijkst uit de resultaten van scenario 1 en 3 (zie Fig. 4.2-4.5 en Fig. 4.10-4.13). In de voorgaande paragrafen is geconcludeerd dat de berekende effecten van de bodemdaling vrijwel niet worden beïnvloed door de natuurlijke ontwikkelingen. Dit wil zeggen dat voor de beschouwing van de effecten van de bodemdalingen het niet uitmaakt van welke scenario de resultaten worden geanalyseerd. Daarom wordt verder alleen de resultaten van scenario 1 beschouwd bij het bespreken van de effecten van het basis scenario voor bodemdaling.

Voor het bodemdalingsscenario “hoog” is in 4.7 al geconcludeerd dat kwalitatief de effecten precies hetzelfde zijn als bij het bodemdalingsscenario basis. Kwantitatief zijn de effecten evenredig met de hoogte van de bodemdaling. De effecten van de bodemdaling door de nieuwe velden zijn dus 30% hoger dan bij het basis scenario. Daarom worden verder in deze en de volgende paragraaf verder alleen de effecten van het basis scenario besproken.

## Buitendelta

Uit Figuur 4.2 blijkt duidelijk dat beide buitendelta's vrijwel niet door de nieuwe velden worden beïnvloed; alleen op de buitendelta van het Pinkegat is enige invloed van de nieuwe velden te zien. De bodemdaling op de buitendelta's wordt al snel gecompenseerd door sedimentatie, waardoor het maximale volume van de kuil niet groter wordt dan 33 % van het voorspelde kuilvolume. Dit maximum, een afname van ongeveer 1 miljoen m<sup>3</sup> van de totaal 34 miljoen m<sup>3</sup>, wordt al bereikt voordat de maximum bodemdaling door gaswinning is bereikt. De afname is vooral een gevolg van de Amelandwinning. Vergeleken met de fluctuatie van het buitendeltavolume door bijvoorbeeld de 18,6 cyclische variatie van het getij (Fig.4.6) is de maximale afname in dezelfde orde van fluctuatie. In de praktijk zal de afname dus moeilijk te meten zijn. De bodemdaling zal rond 2055 volledig zijn gecompenseerd door sedimentatie. Het effect van de nieuwe gaswinning op de buitendelta van het Pinkegat is slechts marginaal.

## Kust

De extra zandvraag van de kust en het aangrenzende zeegebied door bodemdaling wordt gegeven in Fig. 4.3. De extra zandvraag door bodemdaling ligt hier in dezelfde orde als de extra zandvraag door toegenomen zeespiegelrijzing (zie Fig.4.11). Hierdoor is hier het effect van bodemdaling door gaswinning vergelijkbaar met die van een toegenomen zeespiegelrijzing die begonnen zou zijn in 1986.

Door de bodemdaling van alle velden samen zal het sedimentimport naar het Pinkegat met maximaal 0,29 miljoen m<sup>3</sup> per jaar toenemen. Dit wordt bereikt rond 2010. Door de bodemdaling van alleen de Ameland winning is de toename maximaal ongeveer 0,27 miljoen m<sup>3</sup> per jaar rond 2010. De bodemdaling door alleen de nieuwe gasvelden veroorzaakt een maximale toename van 0,15 miljoen m<sup>3</sup> per jaar, die pas rond 2020 optreedt. Doordat de maximale invloed van de Amelandwinning en die van de nieuwe velden niet in tijd samenvallen, veroorzaakt de bodemdaling door de nieuwe velden meer een verlenging van de toegenomen zandvraag dan een vergroting van de waarde van de maximale toename. De invloed van de nieuwe velden is erg klein.

## Geulen

Figuur 4.4 toont dat in de eerste fase van de gaswinning op Ameland het geulvolume iets meer dan met het bodemdalingsvolume toenam. Naast de bodemdaling in de geulen trad er initieel dus ook enige erosie op. Sinds ongeveer 2000 is de erosie in de geul omgeslagen in sedimentatie en groeit het geulvolume langzamer dan de bodemdaling. Het maximum als gevolg van de gaswinning op Ameland zou worden bereikt rond 2010. Als gevolg van de winning in de nieuwe velden loopt dit maximum iets verder op voordat herstel intreedt en wordt dan pas in 2015 bereikt. Bij de huidige zeespiegelrijzing wordt volledig herstel van de bodemdaling door sedimentatie bereikt rond 2100. De maximum geulverruiming door bodemdaling ligt in de orde van 70 % van de voorspelde bodemdaling door gaswinning. Ook bij de geulen geldt dat de verruiming door bodemdaling dezelfde orde van grootte heeft als de natuurlijke fluctuaties (Fig.4.8).

De geulverruiming wordt ten deel veroorzaakt door een areaalvergroting en ten dele door verdieping. Het totale oppervlak van de vloedkom, bestaande uit platen en geulen, blijft constant in de tijd. Dit betekent dat verlies van plaatareaal automatisch een toename van geulareaal van dezelfde grootte tot gevolg heeft. De verandering van het areaal wordt bij de plaat besproken.

## Platen

Figuur 4.5 laat zien dat op de platen reeds vanaf het begin van de gaswinning compensatie van de bodemdaling optreedt door sedimentatie. Ook is duidelijk dat de invloed van de nieuwe velden hier groter is dan in de geulen en op de buitendelta. Als gevolg van de compensatie door sedimentatie wordt de uiteindelijke maximum daling van de plaat niet meer dan circa 40 % van de voorspelde bodemdaling door gaswinning. De feitelijke maximum verlaging van de platen in de kom van het Pinkegat zal dan gemiddeld 4,9 cm bedragen van een gemiddeld plaatniveau op 90,5 cm boven GLW, waarvan slechts 0,5 cm is veroorzaakt door de gaswinning uit de nieuwe velden. Dit maximum wordt in 2006/2007 bereikt, waarna geleidelijk weer herstel optreedt. Volledig herstel van de bodemdaling wordt bereikt rond 2085. In grote lijnen heeft de gaswinning op Ameland het effect van de versnelde zeespiegelrijzing circa 20 jaar in de tijd vervroegd (zie Fig.4.13). Uit Fig.4.9 is te zien dat de 18,6 jarig variatie van het getij een fluctuatie van het plaatvolume veroorzaakt die veel groter is dan het plaatverlies door de bodemdalingen.

Bij de analyse van de bodemdalingsgegevens is gebleken dat de daling het plaatareaal verkleint en een verlaging van de plaathoogte veroorzaakt. Het areaalverlies veroorzaakt orde 25% van het verlies van het plaatvolume en de andere 75% van het volumeverlies komt tot uiting in een verlaging van de plaathoogte. Deze verhouding is gebuikt om uit het berekende volumeverlies van de plaat het verlies van plaatareaal te bepalen. Door de Amelandwinning zal de bodemdaling een maximaal verlies plaatareaal van 0,53 km<sup>2</sup> van veroorzaken, dat rond 2005 wordt bereikt. Als de nieuwe gasvelden in productie worden genomen (vanaf 2007) zal het maximale verlies verder oplopen tot 0,57 km<sup>2</sup> dat dan rond 2010 wordt bereikt. De maximale afname van plaatareaal door alleen de nieuwe velden is ongeveer 0,095 km<sup>2</sup> en wordt rond 2020 bereikt.

## 4.9 Effect gaswinning op vloedkom van de Zoutkamperlaag

### Buitendelta

De bodemdaling op de buitendelta van de Zoutkamperlaag wordt vrijwel alleen bepaald door gaswinning op Ameland (zie Fig. 4.2). Anders dan bij het Pinkegat is de buitendelta hier nog aan het verkleinen ten gevolge van de afsluiting van de Lauwerszee in 1969. Het effect is dat deze buitendelta sneller naar zijn nieuwe evenwicht convergeert zonder daar onder te schieten. Dit laatste komt door de compensatie van de kuil door sedimentatie. De maximale volumevermindering door bodemdaling is daardoor maar 50 % van de voorspelde bodemdaling door gaswinning. De maximale volumeverandering van de delta door gaswinning is ongeveer 0,5 miljoen m<sup>3</sup>. Dat is slechts een fractie van het totale volume van circa 120 miljoen m<sup>3</sup>. Vergeleken met de fluctuatie van het buitendeltavolume door bijvoorbeeld de 18,6 jarige cyclische variatie van het getij (Fig.4.6) is de maximale afname

veel kleiner dan die fluctuatie. In de praktijk zal de afname dus niet te meten zijn. Volledige compensatie wordt bereikt rond 2060.

## Kust

De extra zandvraag van de kust en het aangrenzende zeegebied door bodemdaling wordt gegeven in Fig. 4.3. Door de bodemdaling van alle velden samen zal de sedimentimport naar Zoutkamperlaag met maximaal 0,065 miljoen m<sup>3</sup> per jaar toenemen. Dit maximum wordt bereikt rond 2020. Door de bodemdaling van alleen de Amelandwinning is de toename maximaal ongeveer 0,02 miljoen m<sup>3</sup> per jaar in rondom 2010. De bodemdaling door alleen de nieuwe gasvelden veroorzaakt een maximale toename van 0,05 miljoen m<sup>3</sup> per jaar, die pas rond 2030 optreedt. De invloed van zowel de nieuwe velden als van de Amelandwinning is erg klein.

## Geulen

Figuur 4.4 toont dat de gaswinning op Ameland nauwelijks invloed heeft op het geulvolume in de kom van de Zoutkamperlaag. Duidelijke effecten ontstaan pas door gaswinning uit de nieuwe velden onder de Waddenzee. Initieel neemt dan het geulvolume meer toe dan met het bodemdalingsvolume. Naast de bodemdaling in de geulen treedt er initieel ook hier erosie op. In ongeveer 2060 zal de erosie in de geul omgeslaan in sedimentatie en zal het geulvolume langzamer groeien dan de bodemdaling. Het maximum effect als gevolg van de gaswinning zou worden bereikt rond 2030. Bij de huidige zeespiegelrijzing wordt volledig herstel van de bodemdaling door sedimentatie pas bereikt na 2100. De maximum geulverruiming door bodemdaling ligt in de orde van 130 % van de voorspelde bodemdaling door gaswinning. Ook bij de geulen geldt dat de verruiming door bodemdaling veel kleiner is dan de natuurlijke fluctuaties (Fig.4.8).

## Platen

Figuur 4.5 laat zien dat ook op de platen in de kom van de Zoutkamperlaag reeds vanaf het begin van de gaswinning compensatie van de bodemdaling optreedt door sedimentatie. Ook is duidelijk dat de invloed van de nieuwe velden hier dominant is. Als gevolg van de compensatie door sedimentatie wordt de uiteindelijke maximum daling van de plaat niet meer dan circa 44 % van de voorspelde bodemdaling door gaswinning. De maximum verlaging van de plaathoogte door gaswinning bedraagt gemiddeld slechts 1,4 cm en wordt in 2025 bereikt. Daarna treedt weer geleidelijk herstel op. Volledig herstel van de bodemdaling wordt pas bereikt na 2100. Uit Fig.4.9 is te zien dat de 18,6 jarig variatie van het getij een fluctuatie van het plaatvolume veroorzaakt die veel (factor 5) groter is dan het plaatverlies door de bodemdalingen.

Bij de analyse van de bodemdalingsgegevens is gebleken dat de daling het plaatareaal verkleint en een verlaging van de plaathoogte veroorzaakt. Het areaalverlies veroorzaakt circa 25% van het verlies van het plaatvolume en de andere 75% van de volumeverlies komt tot uiting in een verlaging van de plaathoogte. Deze verhouding is gebruikt om op basis van het berekende volumeverlies van de plaat het verlies van plaatareaal te bepalen. Door de Amelandwinning zal de bodemdaling een maximaal verlies van plaatareaal van slechts 0,02 km<sup>2</sup> veroorzaken, dat rond 2020 wordt bereikt. Als de nieuwe gasvelden in productie

worden genomen (vanaf 2007) zal het maximale verlies verder oplopen tot 0,23 km<sup>2</sup>. Dat maximum wordt rondom 2025 bereikt. De maximale afname van plaatareaal door alleen de nieuwe velden is ongeveer 0,21 km<sup>2</sup> en wordt ook rond 2025 bereikt.

#### 4.10 Discussie over kritische bodemdalingsnelheid

Al bij de IBW studie wordt gesproken over een kritische snelheid van de relatieve zeespiegelrijzing. Waarschijnlijk wordt hiermee niet door iedereen hetzelfde bedoeld. Vanuit de modelconcepten zoals gebruikt in de huidige studie wordt deze limiet gedefinieerd als de snelheid van relatieve zeespiegelrijzing die het waddensysteem niet meer kan volgen door sedimentatie. Dit is dus de zeespiegelrijzingsnelheid 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 vloedkom theoretisch worden bepaald (Van Goor et al, 2003). Met gebruik van de invoerparameters zoals gebruikt in de ASMITA modellering gepresenteerd in Hoofdstuk 4, zijn de grenswaarden voor Pinkegat en Zoutkamperlaag berekend op respectievelijk 3,27 m/eeuw en 1,71 m/eeuw.

De zo bepaalde limiet is geen geschikte maat daar men wil dat de Waddenzee niet wezenlijk verandert. Tijdens de IBW-studie is ook een limiet voor de relatieve zeespiegelrijzingsnelheid bepaald door een maximale grens van sedimenttoevoer te bepalen uit historische gegevens van kustafslag. Volgens het principe van het ASMITA-model kan zo'n grens aan sedimenttoevoer niet van te voren worden aangegeven. De toevoer neemt toe naar mate de overdiepte door relatieve zeespiegelrijzing toeneemt. Principieel neemt met het toenemen van de overdiepte in de vloedkom (nodig om extra sediment te kunnen vangen) ook het geulareaal geleidelijk toe en nemen het plaatareaal en plaathoogte geleidelijk af. Bij een snellere zeespiegelrijzing zal de overdiepte blijvend tot veranderingen leiden, terwijl dit bij bodemdaling door gaswinning de veranderingen tijdelijk zullen zijn. Het is daarom eigenlijk beter om naar de effecten op de morfologische ontwikkelingen te kijken bij het beoordelen of een grens al dan niet mede door gaswinning wordt overschreden. Maar het is wel erg praktisch om zo'n limietwaarde te definiëren, omdat men dan makkelijk kan beoordelen of een voorgenomen gaswinning wel of niet mag. Om tot zo een praktische en realistische grenswaarde te komen kan men denken aan de volgende aanpakken:

- 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 dus niet belangrijk.
- De waarde horend bij een kleine kans (bijvoorbeeld 10%) van verdrinking, zoals bepaald door Van Goor e.a. (2003), hanteren als limit.

Het bepalen van de exacte waarde van de te hanteren grenswaarde valt buiten deze studie, omdat hieraan de discussie ten grondslag ligt welk effect niet wezenlijk en dus toelaatbaar is. Wel kan aan de hand van de resultaten van het ASMITA model worden geconcludeerd dat de beschouwde bodemdalingen de grens niet zullen overschrijden als de hierboven voorgestelde criteria worden gehanteerd.

Verder wordt opgemerkt dat er een essentieel verschil is tussen bodemdaling en zeespiegelrijzing. De bodemdaling is eenmalig en van relatief korte duur, terwijl versnelde zeespiegelrijzing vele eeuwen kan duren. Hierdoor zal er geen verdrinking optreden t.g.v. bodemdaling door gaswinning, ook niet als de snelheid van bodemdaling (wel dan niet gecombineerd met zeespiegelrijzing) tijdelijk de grenswaarde zou overschrijden. Ook als de kritische waarde is overschreden zal verdrinking pas optreden na een lange tijd van meerdere eeuwen. Bodemdaling door gaswinning beperkt zich tot een aantal decennia en kan daarom geen verdrinking veroorzaken. In dit opzicht is er voor het morfologische effect niet veel verschil tussen een snelle daling in een korte tijd en een langzame daling in een langere tijd. Dit betekent dat het weinige zin heeft de bodemdalingsnelheid van jaar tot jaar tegen een grenswaarde te toetsen die geldt voor de lange termijn.

## 5 ESTMORF-onderzoek

### 5.1 Aanpak ESTMORF-onderzoek

#### 5.1.1 Model opzet

In de IBW-studie is het ESTMORF-model gebruikt en een uitgebreide beschrijving van het model is gegeven in Eysink e.a. (1998). Het concept achter ESTMORF is hetzelfde als dat achter het ASMITA-model. Belangrijk verschil is dat ESTMORF gebruik maakt van een veel gedetailleerdere schematisatie van het gebied. Het model is gekoppeld aan een 1D-netwerkmodel voor de getijstroming. De modelschematisatie, zoals gebruikt in de IBW-studie is weergegeven in Fig.5.1.

In de IBW studie was de ESTMORF versie gebruikt waarbij het IMPLIC model fungeert als het 1D-netwerkmodel voor de getijstroming. Maar sindsdien is ESTMORF verder ontwikkeld. Het model maakt nu gebruik van SOBEK i.p.v. het verouderde IMPLIC als stromingsmodel. Daarom was het noodzakelijk in deze studie de IMPLIC-modelschematisatie om te zetten naar de SOBEK schematisatie.

In de IBW studie zijn twee aparte modellen opgezet voor het Pinkegat en voor de Zoutkamperlaag. Dit is echter niet noodzakelijk. Daarom zijn de twee modellen in de huidige studie samengevoegd tot een model.

Verder zijn alle parameters in het model hetzelfde gehouden als tijdens de IBW studie.

#### 5.1.2 Toepassing van het model

Voor verschillende jaren zijn de bodemdalingsgegevens aangeleverd door NAM in de vorm van een  $Z(x,y)$  tabel, die de ruimtelijke variatie van de bodemdaling in de tijd weergeeft. Hieruit zijn de gemiddelde waarden per ESTMORF-modelvak, zoals te zien in Fig.5.1, berekend. Door dit voor ieder jaar waarvoor de gegevens beschikbaar zijn te doen, ontstaat er dus per modelvak de bodemdaling als functie van tijd. Dit is gebruikt als invoer voor het model in de simulaties.

Met het ESTMORF-model is alleen het bodemdalingsscenario Basis gesimuleerd. Dit is gedaan voor de situaties zonder bodemdaling en met de bodemdaling door Amelandwinning alsook met de bodemdaling van alle velden samen. In tegenstelling tot de ASMITA-modellering wordt hier niet uitgebreid met variërende natuurlijke condities gesimuleerd, maar er wordt gefocust op de evaluatie van de effecten van de bodemdalingen. Daarom wordt er bij de berekening verondersteld dat de niet gestoorde morfologie in evenwicht is, waardoor alleen de door de bodemdaling geïnitieerde veranderingen worden berekend in de simulaties. Voor zowel de bodemdaling door de Amelandwinning als voor de bodemdaling van alle gasvelden samen wordt er ook een berekening gemaakt waarbij de sedimentatie

erosie proces is uitgeschakeld. Het verschil tussen de resultaten van deze berekeningen en die van de berekeningen met erosie/sedimentatie geeft aan hoe de compensatie door sedimentatie verloopt.

Door de veel gedetailleerdere modelschematisatie kan nu ook de ruimtelijke verdeling van de morfologische veranderingen worden beschouwd. Voor de presentatie van de modelresultaten gebruiken wij hiervoor de gebiedsindeling zoals weergegeven in Fig.5.2. Het hele Friesche Zeegatgebied is verdeeld in 13 deelgebieden. Deelgebieden 1 en 2 vormen samen de buitendelta van de Zoutkamperlaag. Deelgebieden 3 t/m 8 vormen samen de vloedkom van Zoutkamperlaag. De vloedkom van het Pinkegat is gevormd door de deelgebieden 9 t/m 12. Deelgebied 13 wordt beschouwd als de buitendelta van Pinkegat.

## 5.2 Resultaten

### 5.2.1 Sedimentatie/erosiepatroon

Figuren 5.3 t/m 5.8 presenteren de berekende veranderingen van het natte volume onder NAP+2,0 m in de verschillende deelgebieden. De verdeling van het studiegebied in deelgebieden is weergegeven in Fig.5.2. In deze figuren is alleen het effect van de bodemdaling weergegeven, i.e. het verschil met de autonome ontwikkeling. Bodemdaling veroorzaakt verruiming, of wel een toename van het natte volume. Door de keuze van de hoge referentieniveau boven GHW geven de gepresenteerde veranderingen de totale veranderingen in het gebied. In de figuren zijn zowel de resultaten voor de totale bodemdaling (t.g.v. alle velden samen) als voor de bodemdaling t.g.v. de Amelandvelden weergegeven. Voor beide worden zowel de verandering t.g.v. de bodemdaling alleen (zonder aanpassing, dus sedimentatie-erosie niet meegenomen) als de totale verandering (met aanpassing door sedimentatie-erosie) gepresenteerd. Het verschil tussen de twee lijnen geeft dus de veranderingen t.g.v. sedimentatie-erosie aan. De volgende waarnemingen zijn gedaan:

- In de Zoutkamperlaag is alleen in het buitengebied, deelgebieden 1 en 2, enig effect te merken van de bodemdalingen t.g.v. de Amelandvelden. Binnen de vloedkom (deelgebieden 2 t/m 8) is alleen het effect van de nieuwe velden van belang.
- Binnen eenzelfde zeegat zijn de reacties van de verschillende deelgebieden op de bodemdaling verschillend. In de Zoutkamperlaag treedt er in deelgebieden 4 en 5, waar de bodemdaling de grootste is, vanaf begin sedimentatie op. Dit is te zien aan het feit dat de getrokken lijn (met aanpassing) onder de gestippelde lijn blijft. In de gebieden daaromheen, deelgebieden 2,3,6,7 en 8, treden er in de eerste instantie erosie op en de sedimentatie treedt pas later op. De modelresultaten geven dus aan dat de bodemdalingsskuil eerst wordt uitgevlakt binnen het systeem. Voor de deelgebieden 2 en 3 blijft er aan het eind van de simulatie (2070) nog steeds een netto erosie over. Dit geeft aan dat de bodemdaling in het binnendeel van de kom (deelgebieden 4 t/m 8) gevuld wordt met sediment van buiten, maar nog niet direct afkomstig vanuit gebieden buiten het modelgebied. In het buitenste deelgebied 1 vindt wel vanaf het begin het dicht bij de sedimentbron van buiten ligt.
- In de vloedkom Pinkegat spelen dezelfde soort ontwikkelingen. De Deelgebieden 10 en 12 trekken sediment aan omdat daar de bodemdaling het grootste is. De aanpassingen in

deze vloedkom treden wel sneller op. Ook in deelgebieden 9 en 11 treedt al snel sedimentatie op. Dit komt doordat het Pinkegat veel kleiner is dan de Zoutkamperlaag en daardoor een veel kleinere morfologische tijdschaal heeft.

## 5.2.2 Grootschalige ontwikkeling

In Figuren 5.9 en 5.10 zijn dezelfde resultaten gepresenteerd, maar dan gesommeerd over de hele vloedkom (bekken) en over het hele buitendeltagebied per zeegat. Voor de Zoutkamperlaag bestaat de buitendelta uit de deelgebieden 1 en 2. Deelgebieden 3 t/m 8 vormen samen het bekken van de Zoutkamperlaag. Voor het Pinkegat vormt deelgebied 13 de buitendelta. Het bekken bestaat uit de resterende vier deelgebieden (9 t/m 12). Op dit schaalniveau treedt er in alle onderdelen sedimentatie op.

In Fig.5.11 zijn dezelfde resultaten voor de twee zeegatsystemen als geheel (buitendelta+bekken) weergegeven. De twee plaatjes geven ook weer de totale 'sedimenthonger' van de twee zeegaten. De totale sedimentatie in een zeegat is namelijk het gevolg van de extra sedimentaanvoer van buiten. De figuren presenteren de cumulatieve volumes. Het sedimenttransport is de afgeleide in de tijd van de sedimentatie.

De bodemdaling door de Amelandwinning veroorzaakt een extra sediment toevoer naar het Pinkegat van maximaal 0,15 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Dat maximum wordt rond 2010 bereikt. In productie nemen van de nieuwe velden verandert dit beeld niet. Kijken wij naar het effect van de nieuwe gasvelden alleen, dan zal dit een maximale toename van de sedimenttoevoer van 0,02 miljoen m<sup>3</sup>/jaar veroorzaken, dat pas in 2040 wordt bereikt.

Bij de Zoutkamperlaag is de invloed van de nieuwe velden belangrijker dan die van de Amelandwinning. De bodemdaling door de Amelandwinning veroorzaakt een extra sediment toevoer aan Zoutkamperlaag van maximaal 0,02 miljoen m<sup>3</sup>/jaar, dat rond 2010 wordt bereikt. Als de nieuwe velden in 2007 in productie worden genomen zal de maximale toename van de sedimenttoevoer 0,035 miljoen m<sup>3</sup>/jaar bedragen, dat rond 2030 wordt bereikt. Dit is ook het beeld als alleen naar het effect van de nieuwe gasvelden wordt gekeken.

Het ESTMORF-model voorspelt dus een langzamere aanpassing van beide zeegaten dan ASMITA. Volgens het ESTMORF model zijn de effecten van de Amelandwinning en de nieuwe gasvelden verder in tijd van elkaar verwijderd. Kwalitatief komen de resultaten van beide modellen wel tot dezelfde conclusie: de invloed van de bodemdalingen op de onttrekking van zand aan de kust is klein.

## 5.2.3 Ontwikkeling van de platen

Figuren 5.12 t/m/ 5.17 presenteren de ontwikkeling van het plaatareal per deelgebied (Fig.5.12 t/m 5.16) en per vloedkom als geheel (Fig.5.17). Het plaatareal is hier bepaald aan de hand van het lokale LW en HW. Verder zijn de resultaten op dezelfde manier gepresenteerd als bij het natte volume in Fig.5.3 t/m 5.11. Ook hier blijkt dat sedimentatie-erosie niet overal meteen tot herstel leidt. Ook blijkt dat het herstel van de Zoutkamperlaag veel trager verloopt dan in het Pinkegat (Fig.5.17). Wel is het verlies hier veel kleiner door de kleinere omvang van de bodemdaling dan bij het Pinkegat.

In Fig.5.15 zijn de ontwikkelingen van het plaatareaal in de twee vloedkommen gepresenteerd. Hieruit is te zien dat de Amelandwinning een maximaal verlies van plaatareaal van  $2,1 \text{ km}^2$  in het Pinkegat veroorzaakt, dat rond 2020 wordt bereikt. Met de nieuwe velden erbij loopt deze waarde iets op tot  $2,2 \text{ km}^2$ . Ook deze waarde wordt rond 2020 bereikt. De nieuwe velden alleen veroorzaken een verlies van plaatareaal tot maximaal  $0,1 \text{ km}^2$ . Voor de Zoutkamperlaag is het effect van de Amelandwinning op het plaatareaal nihil. De nieuwe gasvelden veroorzaken een verlies aan plaatareaal oplopend tot maximaal  $0,9 \text{ km}^2$  in 2035.

Deze resultaten kunnen met de resultaten van het ASMITA model worden vergeleken. De waarden van de maximale verlies volgens de ESTMORF-resultaten zijn veel groter dan die volgens ASMITA en bovendien treden zij pas later op. Het grote verlies aan plaatareaal in de ESTMORF-resultaten hebben te maken met de manier waarop het ESTMORF-model de dwarsprofielen aanpasten na morfologische verandering. Dit modelartefact was ook geconstateerd in de IBW-studie, Westerschelde studie en in de Humber studie.

## 6 DELFT3D-onderzoek

### 6.1 Doel en aanpak DELFT3D-onderzoek

Het doel van het onderzoek met het DELFT3D-model is om aan te tonen wat het maximale effect van de bodemdaling op de waterbeweging kan zijn. Daarom is een numeriek getijmodel van het gebied gebouwd in het DELFT3D-programma (zie Fig.6.1). Gebruik is gemaakt van een bestaand model. Alleen de bodemligging in het model is vervangen door de 2000 bodem en de 2000 bodem plus de totale bodemdaling van alle velden in 2040. Met het model zijn getijberekeningen uitgevoerd met dieptegemiddelde stroomsnelheden (2DH-mode) voor de situatie zonder bodemdaling en met de voorspelde totale einddaling door gaswinning zonder compensatie door sedimentatie (extreme toestand). Om een zo compleet mogelijk beeld te krijgen is in beide gevallen eenzelfde periode van 16 dagen doorgerekend waarbinnen een volledige doottij-springtijcyclus valt.

### 6.2 Resultaten

#### 6.2.1 Waterstanden en debieten

De betrekkelijk geringe veranderingen leiden, geheel naar verwachting, niet tot significante verschillen in de waterstanden. Als voorbeeld worden de waterstandsverlopen en de – verschillen in de zeegaten van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag gegeven (Fig. 6.2). De bodemdaling heeft slechts marginale effecten op de waterstand.

Door de bodemverlaging is het getijprisma marginaal toegenomen. Dat effect is slechts goed zichtbaar als het verschil in debiet apart wordt getoond (zie Fig. 6.3). Het verschil in de situatie met ongecompenseerde maximum bodemdaling ligt in de orde van 3,37 % in het Pinkegat en circa 1,5 % in de Zoutkamperlaag.

#### 6.2.2 Stroomsnelheden

Het effect op de stroomsnelheden is minder dan dat op de debieten, omdat een deel van het extra debiet wordt gecompenseerd door verruiming van de geulen als gevolg van bodemdaling. De invloed in de zeegaten is gegeven in Figuur 6.4. Voor het hele gebied is de invloed op de maximum stroomsnelheden bij doottij gegeven in Figuur 6.5 en voor springtij in Figuur 6.6. Daaruit blijkt dat de maximum stroomsnelheden in het algemeen niet of met minder dan 0,04 m/s veranderen en slechts lokaal met 0,04 à 0,06 m/s toenemen.

#### 6.2.3 Getijasymmetrie

Interessant is dat de bodemdaling de getijasymmetrie beïnvloedt. Met getijasymmetrie wordt bedoeld het verschijnsel dat de vloedperiode korter is dan de ebperiode, waardoor de stroomsnelheid tijdens vloed groter is dan die tijdens eb (omdat er dezelfde hoeveelheid

water wordt getransporteerd tijdens vloed en tijdens eb). Door de niet-lineaire relatie tussen het sedimenttransport en de stroomsnelheid ontstaat er dan een import van sediment hoewel er netto geen water in een bekken achterblijft. Dit wordt vloeddominantie genoemd.

Hoewel de verandering van de stroomsnelheid door de bodemdaling klein is, kan duidelijk worden waargenomen in Fig.6.4 dat de toename van snelheid tijdens vloed groter is dan tijdens eb. Dit is ook goed te zien in Fig.6.5 en Fig.6.6. Tijdens zowel springtij als doottij is de toename van de maximale vloodsnelheid groter dan die van de maximale ebsnelheid, rondom de keel van beide zeegaten. Dit betekent dat de bodemdaling de vloeddominantie bevordert, en dus extra sedimentimport als gevolg heeft. Hiermee is een proces-  
onderbouwing gegeven van het uitgangspunt in zowel ESTMORF als ASMITA: sedimenthonger door bodemdaling veroorzaakt extra sedimentimport om de sedimenthonger weg te werken.

### 6.3 Conclusies

Uit het onderzoek met het Delft3D model zijn de volgende waarnemingen gedaan:

- De invloed van de bodemdaling op de waterstand is nihil.
- De bodemdaling veroorzaakt een vergroting van de debiet bij de keel van Pinkegat met ongeveer 3.4% en bij de keel van Zoutkamperlaag met 1.5%.
- De maximale stroomsnelheid wordt nauwelijks beïnvloed door de bodemdaling. De veranderingen is in het algemeen minder dan 0.04 m/s tegenover de ongestoorde waarde van orde 1 m/s.
- De bodemdaling versterkt de vloeddominantie.

Geïnterpreteerd naar de gevolgen van sedimenttransport en morfologie leiden deze constatering tot de volgende conclusies:

- Gezien de kleine veranderingen in de waterbeweging door de bodemdaling zal er geen verandering in de sedimenttransportprocessen die de het dynamische morfologische evenwicht van de zeegatsystemen kan bedreigen.
- De relatief kleine verandering van de stroomsnelheid kan niet leiden tot een merkbare verandering van de sedimentsamenstelling in het gebied.
- De versterkte vloeddominantie kan extra sedimentimport veroorzaken om de bodemdalingskuil op te vullen.

## 7 Scheiding Anjum en de nieuwe velden

### 7.1 Inleiding

Bij de ASMITA modellering beschreven in hoofdstuk 4 en bij de ESTMORF modellering in hoofdstuk 5 zijn alleen de effecten van de bodemdalingen t.g.v. de Amelandvelden en van alle velden bij elkaar (Totaal, i.e. Ameland, Anjum en de nieuwe velden in de Waddenzee) bekeken. Hieruit kunnen de effecten van de bodemdalingen t.g.v. het Anjumveld en de nieuwe velden samen ook worden bepaald door naar het verschil tussen Totaal en Ameland te bekijken. Anjum is echter een veld dat al in productie is, en hoort dus niet bij de nieuwe velden. Voor de MER is het van belang een duidelijk onderscheid te maken tussen autonome ontwikkelingen en de effecten van de nieuwe velden. Daarom wordt is het nodig een onderscheid te maken tussen de effecten van de bodemdalingen t.g.v. het Anjum veld en van de nieuwe velden. Dit wordt gedaan door extra simulaties met het ASMITA model uit te voeren voor de bodemdalingen t.g.v. het Anjumveld alleen.

In hoofdstuk 4 is al geconcludeerd dat het voor de bepaling van de effecten van de bodemdalingen niets uitmaakt welk scenario m.b.t. zeespiegelstijging en getijslagontwikkeling wordt genomen. Daarom worden de simulaties alleen voor scenario 1, het basis scenario, uitgevoerd.

### 7.2 Verwerking bodemdalingsgegevens

De bodemdalinggegevens zijn geleverd in de vorm van  $Z(x,y)$ , tabellen, die de ruimtelijke verdeling van de daling aangeven, in verschillende jaren tot 2040. Voor het draaien van het model moeten deze gegevens worden vertaald naar veranderingen van de volumes van de drie morfologische elementen (plaat, geul, delta) per zeegat. De benodigde vertaling is al beschreven in hoofdstuk 4, en de procedure is herhaald voor de bodemdalingen van het Anjum veld alleen.

De resultaten van de data verwerking zijn weergegeven in Fig.7.1, waarin per vloedkom de vermindering van het plaatvolume en de vergroting van het geulvolume zijn gegeven. In de figuur zijn de resultaten voor de bodemdalingen t.g.v. Anjum en de nieuwe velden samen ook gegeven. Zo kan men zien dat na verloop van tijd de bodemdalingen door het Anjumveld relatief onbelangrijk worden. Er is uitgegaan dat de nieuwe velden in 2007 in productie gaan. Merk verder op dat de invloed van het Anjumveld op de buitendelta's is verwaarloosbaar en niet meegenomen in de simulaties.

### 7.3 Effecten van Anjumveld

De resultaen van de simulaties met de bodemdalingen t.g.v. het Anjumveld zijn gepresenteerd in Fig.7.2 t/m 7.5. In de figuren zijn ook de resultaten van de simulaties zonder bodemdaling gepresenteerd. De resultaten met de bodemdalingen van alle velden samen en van het Amelandveld zijn niet meegenomen, omdat anders de effecten van het

Anjumveld niet zichtbaar worden. De figuren zijn dus hetzelfde als die in hoofdstuk 4 maar de schalen van de verticale assen zijn aangepast.

### **Buitendelta's**

In Fig.7.2 zijn de ontwikkelingen van de twee buitendelta's onder invloed van de bodemdalingen t.g.v. het Anjumveld weergegeven. Er is nauwelijks enig verschil te zien met de situatie zonder bodemdaling. Dit is ook te verwachten omdat het Anjumveld geen bodemdaling in het gebied van de buitendelta's veroorzaken. Het kleine effect is dus een gevolg van de ontwikkelingen binnen de vloedkommen. De zandhonger van de vloedkommen verandert ook nauwelijks (Fig.7.3). Bij het Pinkegat lijkt het effect van de bodemdaling groter, maar het komt door de schaal van de verticale as. Het maximale verschil tussen de twee lijnen is in feit niet meer dan ongeveer 1%. Het kleine verschil dat ook na verloop van lange tijd aanhoudt is gevolg van de nauwkeurigheid in de uitvoer.

### **Geulen**

Ook in de geulen tonen is het effect van de bodemdalingen door het Anjumveld beperkt (Fig.7.4). We kan men duidelijk waarnemen dat de geulen van beide vloedkommen meer wordt verdiept dan door de bodemdaling zelf. Dit komt door de erosie voor het leveren van sediment aan de platen waar de bodemdaling grotere direct effect heeft (zie Fig.7.1).

### **Platen**

De effecten van de bodemdalingen t.g.v. het Anjumveld op de platen is beter te zien (Fig.7.5). In tegenstelling tot de geulen herstellen de platen veel sneller. Let ook hier op de schalen van de verticale assen.

## **7.4 Vergelijking tussen de effecten van verschillende gasvelden**

Samen met de resultaten van de andere simulaties in scenario 1 beschreven in hoofdstuk 4 kunnen de effecten van de verschillende gasvelden van elkaar worden onderscheiden. In Fig.7.6 is dit gedaan voor verlies van plaatvolume t.g.v. bodemdaling. In deze figuur zijn de resultaten van de simulaties afgetrokken van die van de simulatie zonder bodemdaling. Uit de figuur kan men zien hoe het verlies van plaatvolume t.g.v. de totale bodemdaling door alle velden samen is opgebouwd door die van het Amelandveld, het Anjumveld en de Nieuwe velden. Voor het Pinkegat is de bijdrage van het Anjumveld van praktisch geen betekenis. Het verschil de resultaten van de simulatie met de totale bodemdaling en die van de simulatie met de bodemdaling door het Amelandveld kan praktisch worden beschouwd als het effect van de Nieuwe velden, zoals in hoofdstuk 4 is gepresenteerd. Voor de Zoutkamperlaag levert het Anjumveld wel een merkbare bijdrage, maximaal ongeveer 0.1 miljoen m<sup>3</sup> in rondom 2025. De bijdrage van de nieuwe velden in deze vloedkom is het grootst, ongeveer 0,8 miljoen m<sup>3</sup> in rondom 2025.

In Fig.7.7 zijn de bijdragen van de verschillende gasvelden op de zandhonger in de twee zeegaten uitgezet. Ook hier is de bijdrage van het Anjumveld te verwaarlozen bij het

Pinkegat en enige zins merkbaar in de Zoutkamperlaag. De toename van het sedimenttransport van de kust naar Zoutkamperlaag door bodemdaling t.g.v. het Anjumveld is met maximaal ongeveer 0.006 miljoen m<sup>3</sup>/jaar in rondom 2010. Door de bijdrage van het Anjumveld af te trekken wordt de bijdrage van de Nieuwe velden maximaal ongeveer 0.045 miljoen m<sup>3</sup>/jaar i.p.v. 0.05 miljoen m<sup>3</sup>/jaar, beide in rondom 2030.

De conclusies zijn dus:

- Bij het Pinkegat is de bijdrage van het Anjumveld aan het effect van de bodemdalingen relatief verwaarloosbaar. Door de bijdrage van het Amelandveld van het effect van de totale bodemdaling af te trekken, zoals gedaan in hoofdstuk 4, krijgt men een goede bepaling van de bijdrage van de Nieuwe velden.
- Voor de Zoutkamperlaag is de bijdrage van het Anjumveld wel merkbaar. Als men geen rekening heirmee houdt, zoals in hoofdstuk 4, overschat men de bijdrage aan het effect van de bodemdalingen door de nieuwe velden orde 10%.

## 8 Integrale beschouwing

### 8.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken zijn de resultaten van de bureaustudie en van de verschillende modellen apart gepresenteerd. In dit hoofdstuk worden de resultaten van de verschillende methoden integraal beschouwd om de verschillende aspecten van de effecten van de bodemdaling door gas winning te evalueren. Sommige aspecten van de effecten worden gedekt door meer dan een methode. In dat geval worden de resultaten van de verschillende methoden naast elkaar gezet en wordt vervolgens een oordeel gegeven wat de meest waarschijnlijke voorspelling is.

Bij de beschouwing worden de volgende zaken meegenomen:

- Verandert er iets in de (sedimenttransport)processen zodat de het dynamisch evenwicht wordt bedreigd of het meegroeivermogen van een komberging wordt overschreden?
- Kan er iets worden gezegd over de UU-grenswaarde (3-6mm/j), aan de hand van de casus Ameland of andere gevallen, of is die grens nog steeds de enige juiste
- Verandert er iets in arealen specifieke habitats (zandplaten, slikplaten, ondiepe geulen en geulen) zodat de biotiek van die habitats negatief wordt beïnvloed?
- Is er voldoende sediment; hoeveel suppletie zand verdwijnt er in de bodemdalingskuil en als er niet gesuppleerd wordt wat is dan het effect op de Noordzeekustzone en delta?
- In hoeverre treedt verlaging van platen op?
- Zijn de effecten van bodemdaling gelijk verdeeld over de komberging of hebben bepaalde delen meer te verduren?
- Hoe verhouden veranderingen zich tot de jaarlijkse dynamiek?

### 8.2 Effect bodemdaling Pinkegat

#### 8.2.1 Buitendelta en kust

Een belangrijke vraag hierbij is hoeveel zand er extra van de aangrenzende eilandkusten naar het zeegatsysteem wordt getransporteerd t.g.v. de bodemdaling. Op deze vraag zijn er drie methoden die elk een antwoord geven: de bureaustudie, de ASMITA-modellering en de ESTMORF-modellering.

De bodemdaling veroorzaakt een tijdelijke verstoring. Dit betekent dat na verloop van een langere tijd de bodemdalingskuil gevuld zal zijn door extra aanvoer van sediment. Dus voor de totale hoeveelheden zijn de verschillende methoden het eens: het is het volume van de bodemdalingskuil in het beschouwde gebied. Een deel van het extra aangevoerde sediment is slib, ongeveer 10% zoals voorzichtig geschat in de bureaustudie (hoofdstuk 3). De totale volumes van de bodemdaling in het Pinkegat zijn samengevat in de volgende tabel. De getallen zijn gebaseerd op de dataverwerking van het ASMITA-model, en bevat ook de daling in de buitendelta.

Tabel 7.1 Totale volumes van de bodemdaling in het Pinkegat

Gasvelden	Ameland	Totaal	Anjum + Waddenzee
Scenario Basis	9,75 miljoen m <sup>3</sup>	11,04 miljoen m <sup>3</sup>	1,28 miljoen m <sup>3</sup>
Scenario Hoog	9,75 miljoen m <sup>3</sup>	11,50 miljoen m <sup>3</sup>	1,74 miljoen m <sup>3</sup>

Over hoe het verloop van de aanvoer in de tijd is zijn de antwoorden van de verschillende methoden verschillend.

Tabel 7.2 Maximale toename van sediment transport van kust naar het Pinkegat

	Maximale waarde extra aanvoer (miljoen m <sup>3</sup> /jaar)			optreden rond jaar		
	Ameland	Totaal	Nieuw	Ameland	Totaal	Nieuw
t.g.v. gasvelden						
Bureaustudie	Nieuwe velden versterken enigszins het effect van Amelandveld					
ASMITA	0,29	0,27	0,04	2010	2010	2020
ESTMORF	0,15	0,15	0,02	2010	2010	2040

Het ASMITA model voorspelt dus een snellere aanpassing met een grotere maximale waarde van het transport, die ook eerder optreedt. Aangezien het ASMITA model recentelijk beter gecalibreerd is, kunnen wij het best uitgaan van het verloop dat ASMITA berekent.

Het bodemdalingsscenario Hoog is alleen gemodelleerd met ASMITA. De conclusie is dat de effecten evenredig met de bodemdalingswaarde kunnen worden beschouwd. De waarden zijn in dit geval dus ongeveer 30% hoger voor de nieuwe velden. Omdat de bodemdaling t.g.v. het Amelandveld die het grootste effect heeft in het Pinkegat, hetzelfde is er weinig verschil tussen de scenario's Hoog en Basis.

In het Pinkegat worden de bodemdalingen vooral veroorzaakt door het Amelandveld dat sinds 1986 al in productie is. Het grootste deel van de effecten hiervan bestaat al. De effecten van de nieuwe velden zijn minimaal. Dit is de reden waarom er in de bureaustudie niet in detail naar dit zeegat is gekeken.

Volgens de resultaten van het Delft3D model veroorzaakt de bodemdaling weinige verandering in de waterbeweging in het buitendelta gebied. Op basis hiervan wordt niet verwacht dat de bodemdaling een significante invloed heeft op de dynamiek van de buitendelta. Het is wel zo dat de dynamiek in de buitendelta in belangrijke mate wordt bepaald door de korte golven en de golf-gedreven stroming. In de huidige studie zijn de korte golven niet gemodelleerd, maar verwacht wordt dat ook het effect van de bodemdaling daarop klein is.

## 8.2.2 Geulen en platen

Binnen de vloedkom is de belangrijkste vraag hoeveel verlies van plaatareaal de bodemdalingen veroorzaken. In de tabel hieronder zijn de uitkomsten van de verschillende methoden samengevat. De resultaten van het ESTMORF model is direct uit hoofdstuk 5 genomen (Fig.5.17). ASMITA berekent voor de plaat het plaatvolume (zie hoofdstuk 4). Bij de analyse van de bodemdalinggegevens is gebleken dat de daling het plaatareaal verkleint en een verlaging van de plaathoogte veroorzaakt. Het areaalverlies veroorzaakt orde 25%

van de verlies van het plaatvolume, en de andere 75% van de volumeverlies komt tot uiting in een verlaging van de plaathoogte. Deze verhouding is gebruikt om het berekende volumeverlies van de plaat om te rekenen naar het verlies van plaatareaal.

Tabel 7.3 Voorspelde maximale afname plaatareaal in het Pinkegat

Methodie		Maximale afname plaatareaal (km <sup>2</sup> )	Rond jaar
Bureaustudie			
ASMITA	Alle velden samen	0,57	2010
	Amelandveld	0,53	2005
	Nieuwe velden	0,095	2020
ESTMORF	Alle velden samen	2,2	2020
	Amelandveld	2,1	2020
	Nieuwe velden	0,1	2020

ESTMORF blijkt een veel grotere verlies van het plaatareaal te voorspellen dan ASMITA. ASMITA. De ESTMORF resultaten m.b.t. het maximale verlies blijken overeen te komen met de ASMITA-resultaten als het totale verlies van plaatvolume aan het verlies aan plaatareaal zou worden toegeschreven. Het is uit eerdere studies in andere gebieden (IBW-studie, Westerschelde en Humber) gebleken dat ESTMORF het verlies van plaatareaal overschat. Dit heeft te maken met het feit dat het model de vorm van de geulen (onder LW) niet gedetailleerd genoeg kan schematiseren. In dit zeegat loopt er ook al een lang monitoringprogramma van de effecten van de bodemdalingen t.g.v. de Amelandvelden. In dit programma wordt de ontwikkeling van de plaat via platen de gegevens van de lodingen gevolgd. Tot nu toe is er nog geen significant verlies van de platen geconstateerd. Op basis van deze overwegingen wordt verondersteld dat de voorspelling van ASMITA het meest waarschijnlijke is.

Het verwachte verlies aan plaatareaal is klein t.o.v. de natuurlijke fluctuaties. Voor de bodemdaling t.g.v. alle velden samen is het voorspelde verlies in de orde van 1,3% van het totale plaatareaal in het Pinkegat. Dit is kleiner dan de natuurlijke fluctuaties t.g.v. bijvoorbeeld de 18,6 jarige cyclus in de getijamplitude, die een meer dan 2 keer zo grote verandering aan de platen veroorzaken. De effecten van de nieuwe velden voor dit zeegat zijn nog veel kleiner. Bovendien valt het maximale effect hiervan niet samen met dat veroorzaakt door het Amelandveld. Dit is de reden waarom volgens ASMITA er nauwelijks verschil is tussen het maximale verlies t.g.v de totale bodemdaling en die van de daling t.g.v. het Amelandveld alleen.

De bodemdaling veroorzaakt ook een verlaging van de plaathoogte. Door 75% van de berekende volumeverandering van de platen toe te schrijven aan de hoogteverandering is de maximale verlaging van de plaat in het Pinkegat volgens ASMITA 3,7 cm van de gemiddelde hoogte van 90,5 cm boven GLW. Hiervan is alleen ongeveer 0,37 cm het gevolg van de gaswinning uit de nieuwe velden. Volgens ESTMORF treedt er praktisch geen hoogte verlies op en het volumeverlies van de plaat uit zich voornamelijk in een areaalverlies. Om dezelfde reden hierboven hanteren wij ook hier de resultaten van ASMITA als meest waarschijnlijke voorspelling.

De ruimtelijke verdeling van de bodemdaling (Fig.2.1 en Fig.2.2) geeft een beeld van hoe de effecten ruimtelijk zijn verdeeld. Waar de bodemdaling groot is is het effect ook groter. De resultaten van ESTMORF geven verder aan dat de bodemdalingskuil wordt uitgevlakt door sedimentatie in het gebied met de grootste daling en erosie in de directe omgeving tijdens de vulling van de kuil door sedimentatie.

Er is op geen enkele wijze gevaar van verdrinking geconstateerd, ook niet met de versnelde zeespiegelrijzing met een snelheid van 60 cm/eeuw. De snelheid van de totale relatieve zeespiegelrijzing is nog ver beneden de kritische grens voor versnelde zeespiegelrijzing. Bovendien is de bodemdaling door gaswinning een tijdelijk effect dat al lang gecompenseerd voordat er significante effecten kunnen optreden.

Volgens de ASMITA resultaten is het effect van het bodemdalingsscenario Hoog 30% meer dan dat van het scenario Basis hierboven beschreven. Deze 30% is echter alleen van toepassing op het effect van de bodemdaling t.g.v. de nieuwe velden. Voor het Pinkegat worden de bodemdalingen vooral veroorzaakt door het Amelandveld dat sinds 1986 al in productie is. Het grootste deel van de effecten hiervan zijn al gegenereerd zonder dat dit tot aantoonbare schade heeft geleid. De effecten van de nieuwe velden, ook volgens scenario Hoog, zijn slechts minimaal. Dat is de reden waarom er in de bureaustudie niet in detail naar dit zeegat is gekeken.

### 8.2.3 Waterbeweging en bodemsamenstelling

Zowel op basis van de resultaten van de bureaustudie als op die van het Delft3D-model is geconcludeerd dat de invloed van de bodemdalingen t.g.v. gaswinning op de waterbeweging niet significant is. Daaruit is ook geconcludeerd dat er geen verandering is in de sedimenttransportprocessen die het dynamische morfologische evenwicht van de zeegatsystemen zou kunnen bedreigen, en dat er de sortering van sediment door de getijbeweging niet zal veranderen en dus geen verandering van de bodemsamenstelling in de vloedkom te verwachten is.

## 8.3 Effect bodemdaling Zoukamperlaag

### 8.3.1 Buitendelta en kust

Voor de Zoutkamperlaag zijn voornamelijk de nieuwe velden (Anjum + Waddenzee) van belang. De winning uit het Amelandveld veroorzaakt alleen wat bodemdaling in de buitendelta van dit zeegat. De totale volumes van de bodemdalingen door gaswinning in de Zoutkamperlaag zijn samengevat in de volgende tabel.

Tabel 7.4 Totale volumes van de bodemdaling in de Zoutkamperlaag

	Ameland	Totaal	Anjum + Waddenzee
Scenario Basis	1,17 miljoen m <sup>3</sup>	5,42 miljoen m <sup>3</sup>	4,25 miljoen m <sup>3</sup>
Scenario Hoog	1,17 miljoen m <sup>3</sup>	6,93 miljoen m <sup>3</sup>	5,76 miljoen m <sup>3</sup>

Deze volumes moeten uiteindelijk worden gecompenseerd door extra sedimentaanvoer van de Noordzee en van de eilandkusten. Over hoe het verloop in tijd is van de aanvoer van het sediment eruit zal zien, zijn de antwoorden van de verschillende methoden verschillend. De volgende tabel geeft de voorspelde maximale toename van sedimenttransport naar het zeegatsysteem (inclusief buitendelta) en wanneer de betreffende maximale waarden worden verwacht.

Tabel 7.5 Maximale toename van sediment transport van kust naar Zoutkamperlaag

t.g.v. gasvelden	Maximale waarde extra aanvoer (miljoen m <sup>3</sup> /jaar)			optreden rond jaar		
	Ameland	Totaal	Nieuw	Ameland	Totaal	Nieuw
Bureaustudie	-	0,14	0,14		2022-2027	
ASMITA	0,02	0,065	0,05	2010	2020	2030
ESTMORF	0,02	0,035	0,035	2010	2030	2030

Zoals bij de resultaten voor het Pinkegat worden de voorspelling door het ASMITA-model als het meest waarschijnlijk beschouwd. (Bij de bureaustudie is waarschijnlijk het transport in de keel van het zeegat gehanteerd. Dat kan groter zijn maar is niet de juiste indicator voor zanghonger van het systeem omdat de buitendelta fungeert als buffer van zand en in het begin een belangrijk deel van de import naar de vloedkom levert).

De waarden van de toename in de aanvoer van sediment is veel lager dan voor het Pinkegat, ook vergeleken met het effect van het Amelandveld dat in productie is. Het effect voor dit zeegat is dus erg klein. Dit heeft te maken met het feit dat de omvang van de bodemdaling t.g.v. de nieuwe velden kleiner is en deze vloedkom veel groter is dan die van het Pinkegat. Verwacht wordt dat het effect zo klein is dat het niet meetbaar zal zijn.

### 8.3.2 Geulen en platen

De resultaten m.b.t. verlies van plaatareaal in de Zoutkamperlaag zijn samengevat in de volgende tabel. De verwerking van de modelresultaten is hetzelfde als beschreven voor het Pinkegat (7.3.2). De bureaustudie heeft wel een voorspelling gedaan voor dit zeegat, omdat door de nieuwe velden in de vloedkom van dit zeegat zullen liggen het belangrijkste deel van de bodemdalingen.

Tabel 7.6 Voorspelde maximale afname van het plaatareaal in de Zoutkamperlaag

Methode		Maximale afname plaatareaal (km <sup>2</sup> )	Rond jaar
Bureaustudie	Alle velden	0,2	2022-2027
ASMITA	Alle velden samen	0,23	2025
	Amelandveld	0,02	2020
	Nieuwe velden	0,21	2025
ESTMORF	Alle velden samen	0,9	2035
	Amelandveld	0	
	Nieuwe velden	0,9	2035

De uitkomsten van het ASMITA-model komen overeen met de voorspelling uit de bureaustudie. Zoals bij Pinkegat voorspelt het ESTMORF model een groter verlies dat later optreedt. Om dezelfde reden als bij Pinkegat (7.3.2) worden de voorspellingen van ASMITA als het meest waarschijnlijk geacht. Volgens ASMITA heeft ook het Amelandveld een kleine invloed op het plaatareaal in de Zoutkamperlaag. Dit komt door de daling in de buitendelta die export uit de kom (c.q. verminderde import) als gevolg heeft.

De bodemdaling veroorzaakt ook een verlaging van de plaathoogte. De grootste verlaging wordt voorspeld door ASMITA en bedraagt maximaal 1 cm van de gemiddelde hoogte van 98 cm boven GLW. Dit is voornamelijk een gevolg van de nieuwe gasvelden.

De hierboven beschreven resultaten gelden voor het scenario Basis van de voorspelde bodemdalingen. Voor het scenario Hoog moeten de voorspelde waarden met ongeveer 30% worden verhoogd. Dit geldt voor de effecten van de nieuwe velden en dus praktische voor het gehele effect van alle velden in dit zeegat.

Zowel de afname van het plaatareaal als de verlaging zijn veel (ongeveer een factor 5) kleiner dan de verandering t.g.v. natuurlijke fluctuatie door de 18,6 jarig cyclische variatie van de getijslag. Bovendien zal het praktisch onmogelijk zijn om de effecten via metingen aan te horen. Daarom worden de effecten als niet significant beschouwd.

### **8.3.3 Waterbeweging en bodemsamenstelling**

Zowel op basis van de resultaten van de bureaustudie als op basis van de resultaten van het Delft3D model is geconcludeerd dat de invloed van de bodemdalingen t.g.v. gaswinning op de waterbeweging niet significant is. Daaruit is ook geconcludeerd dat er geen verandering is in de sedimenttransportprocessen, die de het dynamische morfologische evenwicht van de zeegatsystemen kan bedreigen, en dat er geen verandering van de bodemsamenstelling in de vloedkom te verwachten is.

## **8.4 Conclusies**

Alles overwegend zijn de effecten van de beschouwde bodemdalingen t.g.v. de gaswinning gering. Dit geldt voor zowel het Pinkegat als voor de Zoutkamperlaag. Van de totale bodemdaling t.g.v. alle gasvelden samen zijn de effecten in het Pinkegat het grootst. Het grootste deel hiervan wordt veroorzaakt door het al in productie zijnde Amelandveld. Een groot deel hiervan is momenteel al aanwezig. Overeenkomstig de conclusies van de monitorings studie tot nu toe, zijn de effecten van de totale daling klein. De effecten van de nieuwe velden (Anjum + Waddenzee) zijn nog veel kleiner en spelen zich vooral af in de grotere vloedkom van de Zoutkamperlaag.

De effecten worden klein en niet significant genoemd omdat de grootte ervan ver binnen de marge van natuurlijke fluctuaties vallen. De voorspelde effecten waarschijnlijk niet aantoonbaar zullen zijn.

Een belangrijk effect voor de Noordzeekust is de extra ‘zandhonger’ die ontstaat om de bodemdalingsskuil te vullen. Het totale volume wordt aangevoerd over een lange periode. De verhoging van het jaarlijkse import naar de zeegaten t.g.v. de nieuwe velden is daardoor

slechts een fractie van de natuurlijke import van sediment om bijvoorbeeld zeespiegelrijzing te compenseren.

Het belangrijkste binnen de vloedkom is verlies van plaatareaal. Voor beide vloedkommen is het verwachte maximale verlies t.g.v. de nieuwe velden minder dan een half procent van het totale plaatareaal. Alleen in het Pinkegat zal het verlies door de bodemdaling van alle velden samen (dus inclusief Amelandveld) boven de 1% uitkomen. Zelfs dan is dit minder groot dan de natuurlijke fluctuatie t.g.v. de 18,6 jarige cyclus van de getijamplitude.

Er bestaat geen enkel gevaar voor een eventuele verdrinking van de wadplaten in de vloedkommen. Zelfs met een versnelde zeespiegelrijzing van 60 cm/eeuw zal de som van de bodemdaling en de zeespiegelrijzing ver onder de kritische snelheden voor verdrinking liggen. Bovendien is de bijdrage van bodemdaling eenmalig en tijdelijk.

## Referenties

- Bodemdalingscommissie/NAM, 2005. Monitoring van de effecten van bodemdaling door gaswinning op Ameland-oost na 18 jaar gaswinning.
- Boer, S. en Eysink, W.D., 1993. Bodemdaling door gaswinning op Ameland-oost. Effecten op overstromingsfrequentie en gras-opbrengsten voor polder Buurdergrie, WL, verslag H114, februari 1993.
- Bossinade, J.H.; Van den Bergs, J., and Dijkema, K.S., 1993. De invloed van wind op het jaargemiddelde hoogwater langs de Friese en Groninger Waddenkust. Nota GRAN 1993-2009 + IBN-rapport 049. Groningen, Texel: Rijkswaterstaat Directie Groningen + DLO Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek, 22 p.
- Buijsman, M.C., 1997, The impact of gas extraction and sea-level rise on the morphology of the Wadden Sea, WL | Delft Hydraulics, Report H3099.30.
- Dankers, N. en Wintermans, G.J.M., 1996. Exploratieboringen en ecologie, Een bijdrage aan de MER van de NAM ten behoeve van de proefboringen naar aardgas in de Waddenzee en de Noordzeekustzone. IBN-DLO, IBN-rapport 214, 1996.
- De Glopper, R.J., 1973. Subsidence after drainage of the deposits in the former Zuider Zee and in the brackish and marine forelands in The Netherlands. Van Zee tot Land 50. Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders. 205 p.
- Dijkema, K.S.; Bossinade, J.H.; Bouwsema, P., and De Glopper, R.J., 1990. Salt marshes in the Netherlands Wadden Sea: rising high-tide levels and accretion enhancement. In: J.J. Beukema, W.J. Wolff and J.J.W.M. Brouns (eds), Expected effects of climatic change on marine coastal ecosystems. Dordrecht: Kluwer Publishers, pp. 173-188.
- Duin, W.E. van, K.S. Dijkema & J. Zegers, 1997. Veranderingen in bodemhoogte (opslibbing, erosie en inklink) in de Peazemerlannen. IBN-rapport 326, 104 p.
- Esselink, P., K.S. Dijkema, S. Reents & G. Hageman, 1988. Vertical accretion and profile changes in abandoned man-made tidal marshes in the Ems Dollard Estuary, The Netherlands. Journal of Coastal Research 14 (2), pp. 570-582.
- Eysink, W.D., 1979. Morfologie van de Waddenzee. Gevolgen van zand- en schelpenwinning, WL, Verslag Literatuuronderzoek, R1336, mei 1979 (met 2 bijlagen).
- Eysink, W.D., 1987. Gaswinning op Ameland-oost, effecten van de bodemdaling. Report H114. WL | Delft Hydraulics Laboratory. 53 p.
- Eysink, W.D., 1991. ISOS\*2 Project, Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function, Inventory of available data and literature and recommendations to be studied, Report H1300-Phase 1, WL | Delft Hydraulics Laboratory, August 1991, 24 p.
- Eysink, W.D., 1992. ISOS\*2 Project, Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function, Proposed set-up of a dynamic morphological model for Wadden Sea basins and estuaries based on empirical relations, Report H1300-Phase 3, WL | Delft Hydraulics Laboratory, December 1992, 38 p.
- Eysink, W.D., 1993. ISOS\*2 Project, Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function, General considerations on hydraulic conditions, sediment transports, sand balance, bed composition and impact of sea-level rise on tidal flats, Report H1300-Phase 4, WL | Delft Hydraulics Laboratory, July 1993, 35 p.
- Eysink, W.D., 2005. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost, Evaluatie na 18 jaar gaswinning, Addendum bij Rapport H841 dd maart 2000, WL | Delft Hydraulics Laboratory, (H4413) april 2005, 42 p (bijlage bij Bodemdalingscommissie/NAM, 2005).
- Eysink, W.D. and 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 H1300-Phase 2, WL | Delft Hydraulics Laboratory, September 1992, 73 p.
- Eysink, W.D.; Dankers, N.; Dijkema, K.S.; Dobben, H.F. van; Smit, C.J., and Vlas, J. de, 1995. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost, eerste evaluatie na 8 jaar gaswinning. WL en DLO-IBN Wageningen/Texel, januari 1995, 61 p.
- Eysink, W.D., et al, 1998, Effecten van bodemdaling door gaswinning in en rond de Waddenzee, Morfologie, infrastructurele en economische aspecten. WL | Delft Hydraulics, Rapport H3099.

- Eysink, W.D., Dijkema, K.S. en W.E. van Duin, 2000, Effecten van bodemdaling door gaswinning op de Peazemerlannen, Bureau studie, WL | Delft Hydraulics & ALTErrA, rapport H3740.
- Eysink, W.D.; Dijkema, K.S.; van Dobben, H.F.; Slim, P.A., Smit, C.J., de Vlas, J., Sanders, M.E., Wiertz, J., en Schouwenberg, E.P.A.G., 2000. Monitoring effecten bodemdaling op Ameland-Oost, evaluatie na 13 jaar gaswinning, WL | Delft Hydraulics / Alterra, rapport H841, maart 2000, 203 p, 7 App.Reproductie verzorgd door NAM (rapport en samenvatting + rapport en gegevens op CD)
- Kersten, M., 2003. Effecten van sedimentatie en erosie op de hoogteligging van het wad onder Oost-Ameland, Tussentijdse rapportage tot en met maart 2003, Natuurcentrum Ameland, juni 2003.
- Kragtwijk, N.G, 2001, Aggregated scale modeling of tidal inlets of the Wadden Sea, WL | delft Hydraulics / Delft Cluster, Report Z2822 / DC03.01.03a.
- Kragtwijk, N.G, T.J. Zitman., M.J.F. Stive and Z.B. Wang, 2004, Morphological response of tidal basins to human interventions, *Coastal Engineering*, 51 (2004) 207-221.
- Louters, T. en 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. RIKZ-94.040, oktober 1994.
- NAM, 1990. Bodemdaling door aardgaswinning, Groningen Veld en Randvelden, Statusrapport 1990, Prognose tot het jaar 2050, NAM, februari 1990.
- NAM, 1995. Bodemdaling door aardgaswinning, Groningen veld en randvelden in Groningen, Noord Drente en het Oosten van Friesland, Statusrapport 1995, Prognose tot het jaar 2050, NAM, februari 1995.
- NAM, 1995a. MER Proefboringen naar aardgas in de Noordzeekustzone en op Ameland. Rapport samengesteld door Hasko op basis van bijdragen door DLO-IBN, DLO-Staring Centrum, TNO-Milieuwetenschappen, NIOZ en WL, NAM-rapport juli 1995.
- NAM, 1995b. MER Proefboringen naar aardgas in de Waddenzee. Rapport samengesteld door Hasko op basis van bijdragen door DLO-IBN, DLO-Staring Centrum, TNO-Milieuwetenschappen, NIOZ en WL, NAM-rapport december 1995.
- NAM, 1998. Bodemdalingprognose Ameland, Bodemdaling door aardgaswinning, Statusrapport 1998, NAM, Afd. PEB, Rapport No. 1998.09.000394, december 1998.
- NAM, 1998a. Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee, december 1998, rapport bestaat uit: Samenvatting, Hoofdrapport samengesteld door UU-Inst. Aardwetenschappen, IBN-DLO, WL | Delft Hydraulics, NIOZ en NAM, Geomorfologie en Infrastructuur door WL | Delft Hydraulics met bijdragen van Grondmechanica Delft en Alkyon, Kwelders door IBN-DLO, WL | Delft Hydraulics en RuG, en Vogels door IBN-DLO.
- Oost, A.P. en Dijkema, K.S., 1993. Effecten van bodemdaling door gaswinning in de Waddenzee, IBN-DLO en UU-Fac. Aardwetensch., IBN-rapport 025, 1993, 133 p. + 8 bijl.
- Reed, D.J., T. Spencer, A.L. Murray, J.R. French & L. Leonard 1999. Marsh surface sediment deposition and the role of tidal creeks: Implications for created and managed coastal marshes. *J. Coastal Conservation* 5, pp. 81-90.
- Reinalda, R., Kollen, J. en Eysink, W.D., 1987. Gaswinning op Ameland-oost, effecten van de bodemdaling. WL | Delft Hydraulics in samenwerking met RIN, WL-verslag H114 en RIN-rapport 87/14, april 1987, 53 p.
- RIKZ, 2004, Bodemdalingstudie Waddenzee 2004, Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd, Rapport RIKZ / 2004.25.
- Stive, M.J.F. en Eysink, W.D., 1989, Voorspelling ontwikkeling kustlijn 1990-2090, fase 3. WL | Delft Hydraulics, H 825-deelrapport 3.1: dynamisch model van het Nederlandse kuststelsel, september 1989.
- Stive, M.J.F. and Z.B. Wang, 2003, Morphodynamic modelling of tidal basins and coastal inlets, In C. Lakkhan (Ed.) *advances in coastal modelling*, Elsevier Sciences, pp. 367-392.
- Stoddart, D.R., D.J. Reed & J.R.French, 1989. Understanding salt-marsh accretion, Scolt Head Island, Norfolk, England. *Estuaries* 12, pp. 228-236.
- Storm, K. 1999. Slinkend Onland. Over de omvang van zeeuwse schorren; ontwikkelingen, oorzaken en mogelijke beheersmaatregelen. Rijkswaterstaat Directie Zeeland. Nota AX-99.007, 68 p.
- Straaten, L.M.J.U. van, 1954. Composition and structure of recent marine sediments in the Netherlands, Leidse Geol. Meded., 19, 1954, pp 1-110.
- Straaten, L.M.J.U. van, 1964. De bodem der Waddenzee, Het Waddenboek, Thieme, Zutphen, 1964, pp 75-151.

- 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., T.J. Zitman, Z.B. Wang, M.J.F. Stive, 2003, Impact of sea level rise on the morphological stability of tidal inlets, *Marine Geology*, Volume 202, issues 3-4, pp.211-227.
- Veenstra, K., 1965. De invloed van het vochtgehalte van de grond op de hoogte van het maaiveld bij een zware vaste kleigrond. Intern rapport Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, Baflo.