

2543-30

**Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en  
Vierhuizen  
Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2010**

NAM B.V.

<i>EP Document Nummer.:</i>	EP201109210410	<i>Owner:</i>	UIE/T/DPE
<i>Revision No.:</i>	1		
<i>Document Date:</i>	30/09/ 2011	<i>Security:</i>	

The copyright of this document is vested in Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Assen, The Netherlands. All rights reserved. Neither the whole, nor any part of this document may be reproduced, stored in any retrieval system or transmitted in any form or by any means (electronic, mechanical, reprographic, recording or otherwise) without the prior written consent of the copyright owner.

## Samenvatting

Ten behoeve van de gaswinning vanaf de mijnbouwlocaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen heeft de minister van Economische Zaken in 2006 ingestemd met het winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (kenmerk: ET/EM/6047343 d.d. 26 juni 2006). In 2011 heeft de NAM een wijziging ingediend voor dit Winningsplan (wijziging winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen), alsmede wijzigingen voor de winningsplannen Anjum en de Ameland.

Als onderdeel van de voorschriften behorende bij het voornoemde winningsplan is een Meet- en regelprotocol opgesteld<sup>1</sup>, waarmee de Inspecteur Generaal der Mijnen (IGM) heeft ingestemd bij brief van 2 februari 2007.

Op 5 februari 2007 is de gaswinning vanaf de locatie Moddergat uit de voorkomens Nes en Moddergat gestart. In juni 2008 is het voorkomen Vierhuizen in productie genomen terwijl de voorkomens Lauwersoog Oost en West in het vierde kwartaal van 2008 in productie zijn genomen.

Volgens het meetprogramma zijn in 2010 GPS metingen uitgevoerd op 6 peilmerken van de clusters in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. De continue GPS metingen op de locaties boven de gasvelden Anjum en Moddergat, die respectievelijk in juni en december 2006 zijn gestart (nog voor aanvang van de productie in Nes en Moddergat), zijn in 2010 voortgezet.

Voor de wijziging van de winningsplannen in 2011 zijn de geologische modellen van de gasvelden Ameland, Ezumazijl, Vierhuizen, Anjum, Metslawier, Nes, Moddergat en Lauwersoog-C, -W en -O herzien en aangepast. Gedetailleerde dynamische reservoir simulatie modellen zijn opnieuw gebouwd en met de gemeten gasproductie, reservoirdrukgegevens en geodetische informatie gekalibreerd. Ook is de geomechanische modellering gewijzigd en opnieuw gekalibreerd. Kalibratie met de gemeten bodemdaling sinds de start van de productie in 1997 in Anjum is uitgevoerd voor het hele gebied, waarbij de metingen in de Waddenzee boven de velden Nes, Moddergat en Lauwersoog-C, -O en -W ook zijn meegenomen.

Gebaseerd op geologische en reservoirsimulatie analyses zijn naast het meest waarschijnlijk reservoirdruk depletie scenario (basis scenario) twee mogelijke extreme scenario's (laag en hoog) opgesteld. Met behulp van deze scenario's is de onzekerheid in de gemodelleerde bodemdaling bepaald.

In het lage scenario is er geen drukdaling in mogelijke watervoerende pakketten (immobiel water) en een hoge GIIP aangenomen voor de Wadden voorkomens, tevens is de Cm voor dit scenario iets verlaagd. Het basis scenario gaat ook uit van dezelfde aquifer situatie maar met de verwachte GIIP voor de Wadden voorkomens. Het hoge scenario gaat uit van drukdaling in de Nes en Moddergat aquifers en de verwachte GIIP voor de Wadden voorkomens.

Voor modellering van de bodemdaling veroorzaakt door de gasproductie van de Ameland voorkomens wordt het geomechanische bodemdalingsmodel volgens het gewijzigde winningsplan 2011 gebruikt. Dit geomechanisch model laat een goede

---

<sup>1</sup> Meet- en regelprotocol Winning Waddenzee gas vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Nederlandse Aardolie Maatschappij BV. EP200612202122.

passing zien tussen meting en model, zowel op het Ameland eiland als in de Waddenzee.

Samenvattend kan worden geconcludeerd:

- Na herinterpretatie van de seismiek zijn de geologische modellen van de gasvelden Anjum, Ameland, Metslawier, Nes, Moddergat, Ezumazijl, Vierhuizen-Oost en Lauwersoog-C, -W en -O herzien en aangepast. Gedetailleerde dynamische reservoirsimulatie modellen zijn opnieuw gebouwd en met de gemeten gasproductie en reservoirdrukgegevens gekalibreerd. Deze met de gemeten productie en reservoirdruk gekalibreerde reservoir simulatie modellen hebben geleid tot een aanpassing van de totale oorspronkelijke hoeveelheid gas (GIIP) van de nieuwe velden.
- Na aanpassing van het geomechanische model voor bovengenoemde velden is er gekalibreerd met de gemeten bodemdaling sinds start van de productie van het Anjum veld in 1997 voor het gehele Waddengebied. Dit heeft geleid tot een significante aanpassing van het geomechanische model. Met name het vaststellen, op basis van geodetische informatie, van een niet meedepleterend watervoerend pakket, zorgde voor een lagere belasting in de kombergingsgebieden.
- Naast het basis scenario zijn een hoog en een laag scenario doorgerkend. Ook deze scenario's leiden tot bodemdalingsnelheden die binnen de gebruiksruimte blijven. Met een geplande totale gasproductie zoals aangegeven in het gewijzigde winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen uit 2011, zal in het basis scenario de belasting inclusief relatieve zeespiegelstijging (actualisatie 2011) de gebruiksruimte van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag pas na 2035 overschrijden. In het hoge scenario zal dat omstreeks 2028 gebeuren.

## Inhoud

1.	Inleiding.....	5
2.	Meet- en Regelcyclus Rapportage.....	6
2.1.	Metten (stap 1) .....	6
	Vlakdekkende metingen.....	6
	Reservoir monitoring.....	6
2.2.	Analyseren meetgegevens (stap 2) .....	7
	Kwaliteitscontrole en bodemdalingsberekening.....	7
	Resultaat bodemdalingsanalyse .....	7
	Waddenzee voorkomens.....	7
	Continue GPS metingen .....	8
2.3.	Verifiëren prognose (stap 3) .....	8
	Kalibratie dynamisch reservoir simulatiemodellen nieuwe Waddenzeevelden.....	8
	Modellering bodemdaling .....	10
2.4.	Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4) .....	13
	Bepaling volume en gemiddelde daling.....	13
	Onzekerheid gemodelleerde bodemdaling (alle velden behalve Ameland).....	14
	Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting rapportagejaar 2010 met onzekerheid .....	16
	Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting.....	17
2.5.	Indien nodig aanpassen productie (stap 5) .....	19
2.6.	Actualiseren (stap 6).....	19
	Bodemdaling GPS locaties op Moddergat en Ameland .....	21
3.	Kwaliteitsborging.....	24
4.	Conclusies.....	25
5.	Referenties.....	26
6.	Bijlage 1. Gemodelleerde en gemeten bodemdaling 2010.....	28

## 1. Inleiding

Voor het jaar 2010 is een Meet- en regelcyclus uitgevoerd zoals beschreven in het Meet- en regelprotocol. Dit document bevat een beschrijving van de resultaten van de 6 deelprocessen van de Meet- en regelcyclus. De volgende tabellen en figuren zijn, zoals in het Protocol beschreven, in deze rapportage opgenomen:

1. Twee figuren met de contouren van de gemodelleerde bodemdaling door gaswinning in combinatie met de op peilmerken uit hoogteverschilmetingen berekende bodemdaling. (Figuur 2.1 en 2.2).
2. Tabellen met de jaarlijkse toename van het bodemdalingsvolume (inclusief onzekerheid) per voorkomen per kombergingsgebied voor de jaren 2007 t/m 2013 (Tabel 2.4 & Tabel 2.5).
3. Een tabel met de bodemdalingssnelheid (per jaar; S) en belasting (gemiddelde bodemdalingssnelheid per 6 jaar; B) per kombergingsgebied (Zoutkamperlaag en Pinkegat) tot 2042 (Tabel 2.7)  
De gerapporteerde belasting B voor een bepaald jaar wordt berekend voor de situatie op 1 januari van dat jaar. Voor de rapportage in 2011 (over het jaar 2010) wordt op deze manier een B voor 1 januari 2011 berekend.
4. Grafieken met de bodemdalingsbelasting voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag vanaf start productie op de locatie Moddergat tot 2042 (Figuur 2.5 & Figuur 2.6) .
5. Voor de voorkomens in het winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen:
  - Drukdata per put op reservoirniveau en productie data van het rapportagejaar (Tabel 2.1 & Tabel 2.2).
  - Geplande productie per voorkomen (jaarprofiel; Tabel 2.8).
6. Gemeten en geprognoseerde bodemdaling op de permanente GPS locaties (Ameland, Moddergat en Anjum), inclusief onzekerheid (Figuur 2.7, Figuur 2.8 & Figuur 2.9)

N.B. In de grafieken van de belasting per kombergingsgebied wordt de verwachte zeespiegelstijging getoond. Deze is geactualiseerd in april 2011 door het Ministerie van EL&I.

## 2. Meet- en Regelcyclus Rapportage

Op basis van verzamelde data uit 2010 is opnieuw een Meet- en regelcyclus doorlopen. Bij de uitvoering van deze Meet- en regelcyclus worden de volgende 6 deelprocessen uitgevoerd: 1. meten, 2. analyseren meetgegevens, 3. verifiëren prognose, 4. berekenen volume en gemiddelde daling, 5. indien nodig aanpassen productie en 6. actualiseren. Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van deze 6 deelprocessen voor het rapportagejaar 2010.

### 2.1. Meten (stap 1)

#### Vlakdekkende metingen.

Op basis van het in 2009 ingediende meetplan Waddenzee zijn in 2010 GPS metingen in de Waddenzee uitgevoerd. De GPS metingen op het Wad zijn in de Referentie beschreven. De resultaten van de permanente GPS metingen zijn maandelijks aan SodM gerapporteerd.

#### Reservoir monitoring.

Tabel 2.1 toont de cumulatieve gasproductie per voorkomen en de gemeten reservoirdruk in de put op het tijdstip van de meting. Tabel 2.2 toont de cumulatieve gasproductie per voorkomen op 31 december 2010.

Velden	Datum	Cumulatieve productie (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Druk op reservoir niveau (bara)
Nes	15/4/2010	1577	485,3 (@ 3700 mTVDNAP)
Moddergat	15/4/2010	1292	365,6 (@ 3860 mTVDNAP)
Lauwersoog-Oost	14/4/2010	408	322,5 (@ 4050 mTVDNAP)
Lauwersoog-West	15/4/2010	450	199,2 (@ 4060 mTVDNAP)
Vierhuizen-Oost	-	-	(geen meting in 2010)

**Tabel 2.1 Resultaten reservoir drukmeting 2010 met cumulatieve productie op tijdstip van de meting.**

Velden	Cumulatieve productie (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Productie volgens 2006 winningsplan (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Nes	2065	961
Moddergat	1588	1860
Lauwersoog-C	-	-
Lauwersoog-West	566	961
Lauwersoog-Oost	585	961
Vierhuizen-Oost	747	597
Totaal	5515	4521

**Tabel 2.2 Cumulatieve productie per voorkomen tot 31/12/2010**

## **2.2. Analyseren meetgegevens (stap 2)**

### **Kwaliteitscontrole en bodemdalingsberekening**

De GPS metingen zijn volgens de in Referentie 12 beschreven GNSMART methodiek geanalyseerd. Hierbij wordt een vijftal permanente stations als vaste (statische) referentie gebruikt. De coördinaten van deze stations zijn voorafgaand aan de 2009 campagne in een aparte analyse over een periode van zes weken bepaald. De lange termijn beweging van deze stations net zo als de invloed van geconstateerde relatieve bewegingen op de hoogten van de monitoringstations is onderzocht in Referentie 14.

### **Resultaat bodemdalingsanalyse**

#### **Waddenzee voorkomens.**

De met GPS bepaalde hoogteverschillen zijn met behulp van het NLGEO2004 geoidemodel van ellipsoidische naar orthometrische hoogteverschillen geconverteerd (Referentie 16). Vanwege het verschil in meetmethode tijdens de nulmeting (waterpassing/hydrostatisch) en de 2010 herhalingsmeting (GPS) staan de peilmerkbewegingen met referentiejaar 1986 (Figuur 2.1) gedeeltelijk onder invloed van de onzekerheid van dit geoidemodel. De peilmerkbewegingen uit Figuur 2.2 hebben hier geen last van, omdat analyse van de nulmeting (2006) en de herhalingsmeting (2010) volgens dezelfde methodiek is uitgevoerd.

Voor de interpretatie van Figuur 2.2 moet voor de in 2006 door NAM nieuw geplaatste waddenpeilmerken rekening gehouden worden met de in 2008 geconstateerde relatieve instabiliteit van deze peilmerken (hypothese uit M&R rapport 2008, Referentie 10: initiële gemiddelde zetting van de NAM peilmerken van gemiddeld 5mm). Uit het in 2008 en 2009 uitgevoerd stabiliteitsonderzoek blijkt:

- de relatieve stabiliteit van de peilmerken voor de periode 2008-09 is gemiddeld 0.4mm (voor de periode 2006-2008: 5mm).
- de tussen 2008 en 2009 geconstateerde relatieve peilmerkbewegingen per cluster vallen grotendeels binnen de meetruis.

Terwijl de uitkomsten van de vastgestelde gegevens op een systematisch, eenzijdig effect (zakking) t.o.v. een bestaand, stabiel referentievlak duiden, is op grond van de lage magnitude van het effect de initiële peilmerkbeweging op de NAM clusters voor het gemak als een Gaussische (normaalverdeelde) foutenbron behandeld (met uitzondering van de 4 cm afwijking op M008).

### Continue GPS metingen

Als onderdeel van het Meet- en regel protocol worden continue GPS metingen uitgevoerd op de locaties AME en Moddergat. Daarnaast heeft NAM ook een (tijdelijke) continue GPS meetinstallatie geïnstalleerd op de locatie Anjum. Deze metingen hebben een signaalfunctie voor het bepalen van de noodzaak voor aanvullende vlakdekkende metingen.

Tabel 2.3 geeft de analyse van de continue GPS metingen op de locaties AME, Moddergat en Anjum. De onzekerheden zijn bepaald m.b.v. de methode beschreven in Referentie 12. De bodemdaling in tijd wordt in de Figuur 2.7, 2.8 en 2.9 getoond.

Locatie	Absolute daling van 05/02/07 t/m 31/12/2010 [mm]	Gem. snelh. vanaf 01/01/09 (1 jaar) [mm/jaar]
Ameland	26	6.2 [ $1\sigma= 0.7$ mm/jaar]
Moddergat	6	1.4 [ $1\sigma= 0.7$ mm/jaar]
Anjum	15	3.7 [ $1\sigma= 0.6$ mm/jaar]

*Tabel 2.3 Gemeten daling en dalingssnelheid op de locaties m.b.v. continue GPS metingen*

### 2.3. Verifiëren prognose (stap 3)

#### Kalibratie dynamisch reservoir simulatiemodellen nieuwe Waddenzeevelden

Oorspronkelijk is de dynamische modellering van de nieuwe Waddenzeevelden Nes, Moddergat, Lauwersoog-C, -O en -W en Vierhuizen-O uitgevoerd met behulp van een twee dimensionaal (droog gas) model. Gebruikmakend van het driedimensionale reservoir simulatie model van het analoge gasveld Anjum werd een analytische techniek toegepast om de drukdaling in de aquifers te simuleren. Voor de velden Nes en Moddergat waren reeds meer gedetailleerde drie dimensionale (meerfase) reservoir simulatie modellen geconstrueerd. In 2009-2010 heeft er een herinterpretatie plaatsgevonden van de seismiek en zijn naast bovengenoemde Waddenzeevelden ook voor de velden Ameland, Anjum en Metslawier nieuwe geologische modellen opgezet. Voor alle velden is nu voldoende productie en druk data beschikbaar om zinvolle gedetailleerde 3 dimensionale dynamische modellen van de reservoirs te genereren en deze te kalibreren.

De reservoir simulatie modellen zijn gebaseerd op het gedetailleerd heterogeen geologisch model waarin veel aandacht is besteed aan parameters die een effect hebben op bodemdaling. Het geologische model beschrijft de distributie van reservoir eigenschappen zoals geobserveerd in de putten.

De dynamische modellen zijn gebruikt voor een gedetailleerde onzekerheid analyse (een zogenaamd experimenteel ontwerp methode). Met behulp van de experimenteel ontwerp methode worden gericht een aantal parameters in het model gevarieerd. Hierdoor wordt inzicht verkregen in het effect van deze parameters en combinatie van deze parameters op bijvoorbeeld bodemdaling. Voorbeelden van deze parameters zijn onder andere: porositeit (volume), permeabiliteit, capillaire druk (effect op water en gassaturatie), grootte en sterkte van de watervoerende laag.

In combinatie met de gemeten data is deze methode gebruikt om uit te zoeken welke combinaties van parameters mogelijk zijn en welke niet. Op basis hiervan zijn een aantal realisaties gekozen die waarschijnlijk worden geacht en goed overeenkomen met alle meetgegevens. De gebruikte meetgegevens zijn onder andere: dagelijkse gas- en water



productie, putmondruk en drukdata op reservoir niveau gemeten tijdens putttesten (SPG en FBU). De putmondruk is gebruikt om de druk op reservoir niveau te berekenen tijdens de productie.

De geconstrueerde 3 dimensionale reservoir simulatie modellen zijn een significante verbetering ten opzichte van voorgaande modellen aangezien hiermee ook de drukdaling van de watervoerende laag beter kan worden gesimuleerd. De hoeveelheid drukdaling in de aangrenzende watervoerende pakketten wordt voornamelijk begrensd door geodetische informatie. Deze informatie toont aan dat er niet of nauwelijks drukdaling plaats vindt in deze pakketten. De goede overeenkomst met de gemeten data geeft vertrouwen dat deze modellen realistisch zijn en een goede basis zijn voor voorspellingen van de reservoirdruk daling die de basis is voor de modellering van opgetreden en toekomstige bodemdaling.

De resultaten voor de drie dynamische modellen worden hieronder kort beschreven.

#### Anjum en Metslawier

Een zeer goede overeenkomst tussen de resultaten van het dynamische model met de gemeten data kon worden gemaakt. Vanwege de lange productie geschiedenis, resulterend in een uitgebreide hoeveelheid gemeten data, is de onzekerheid in de gasvolumes en toegepaste veldparameters relatief klein.

#### Nes en Moddergat

Voor Moddergat blijkt dat er alleen een goede overeenkomst met gemeten data gemaakt kan worden door middel van een oost-west breuk die geen of nauwelijks communicatie tussen het noordelijk en zuidelijke blok toestaat. Aangezien het veld Moddergat wordt geproduceerd via het noordelijk blok (via put MGT-1B, Moddergat veld), houdt dit in dat het zuidelijk deel van het veld veel minder in druk is gedaald.

De resultaten van het reservoir simulatiemodel van de velden Nes en Moddergat geven zeer goede overeenkomst met de gemeten data. De onzekerheid in gasvolumes van beide gasvelden is relatief klein, de range in gasvolume bedraagt voor Nes  $17 - 22 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ , voor Moddergat is de range  $7 - 10 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ . Gezien de jonge levensfase voor deze velden kan niet met zekerheid worden bepaald of de watervoerende pakketten rondom deze velden gaan depletieren. Deze onzekerheid wordt ondervangen d.m.v. scenario's. Het hoge scenario gaat ervan uit dat de watervoerende pakketten meedepletieren.

#### Lauwersoog -West en -Oost.

Ook voor de velden Lauwersoog -W en -O komen de resultaten van het reservoir simulatie (dynamische) model zeer goed overeen met de gemeten data. Op basis van de resultaten van het dynamisch model is het contrast tussen lage en hoge permeabiliteit lagen in het geologisch model vergroot. Dit is geverifieerd en in lijn met een ondergrondse productie instroom meting (PLT) in put LWO-3.

Ondanks een relatieve korte productie periode is de onzekerheid in de absolute gasvolumes van het veld niet groot.

De gasvolumes in het reservoir worden gezien als de parameters die het meeste effect hebben op bodemdaling. Realisaties met respectievelijk relatief hoge en lage GIIP worden mogelijk geacht en zijn daarom doorgerekend voor het maken van voorspellingen. Voor Lauwersoog Oost is deze range in gasvolume  $5.5 - 10 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  en voor Lauwersoog West is de range  $3.6 - 4.2 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ .

### Vierhuizen Oost

Voor Vierhuizen Oost zijn er nog geen drukdata op reservoir niveau gemeten (komt in 2011). Met gebruik van de voorhanden zijde data is er een goede match bereikt in het driedimensionale reservoir model. Het statische GIIP volume is  $1.96 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ . Voor het dynamische modelleren is er uitgegaan van  $1.39 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  wat een zoals gezegd goede "history-match" geeft.

### **Modellering bodemdaling**

Bodemdalingsmetingen op het eiland Ameland en in de Waddenzee geven aan dat de bodemdaling zoals voorspeld door de modellen, die gebruikt zijn voor voorspellingen in de vorige winningsplannen, geen bevredigende passing meer geeft. In de Waddenzee bijvoorbeeld voorspelt het Ameland WP2003 model te veel bodemdaling terwijl de daling in het centrum van de bodemdalingkom onderschat wordt. Mede in verband hiermee is een nieuw geomechanisch model voor de Ameland, Wadden en Anjum voorkomen opgezet dat de gemodelleerde bodemdaling beter in overeenstemming brengt met de gemeten bodemdaling.

De belangrijkste aanpassingen zijn:

- actualisering van het geologische en dynamische reservoir model van het gebied.
- het inbrengen van een op diffusie gebaseerd compactiemechanisme voor het reservoir. Dit mechanisme wordt hieronder verder beschreven.
- het inbrengen van een kruip mechanisme in de steenzout laag boven het reservoir. Ook dit mechanisme wordt hieronder verder beschreven.

### **Diffusie mechanisme in het reservoir**

De resultaten van bodemdalingmetingen op Ameland en in de Waddenzee laten zien dat de bodemdaling in de beginfase van de productie een zekere vertraging heeft ten opzichte van de drukdaling in het veld. Aan het einde van de productie lijkt het omgekeerde te gebeuren: de bodemdaling stopt niet direct bij beëindiging van de productie (referentie 6). Een mogelijke verklaring van deze observatie is dat er een diffusie proces optreedt in het reservoir.

De compactie bij gasproductie uit een reservoir wordt gestuurd door drie parameters: de dikte van het reservoir, de drukdaling in het reservoir en de compactiecoëfficiënt, welke een maat is voor de stijfheid van het reservoir. In een eerste benadering, wanneer geen rekening wordt gehouden met het bovengenoemde diffusie gedrag, wordt voor compactie modellering de drukdaling gebruikt, zoals berekend met het dynamische reservoirmodel. Dit model gaat echter uit van een gemiddelde permeabiliteit en zowel de hoge als de lage waarden van de permeabiliteit worden daardoor niet goed gerepresenteerd. In werkelijkheid zal het gas langzamer toestromen uit die delen van het reservoir waar de permeabiliteit lager is. In deze delen zal, i.v.m. de hogere poriedruk, de waarde voor de stijfheid van het gesteente hoger zijn dan in de delen waar het gas wel is weggestroomd. Daardoor gedraagt het reservoir zich in de beginfase van de productie stijver. In de eindfase van de productie zal de drukdaling juist doorgaan in de delen met lage permeabiliteit. Dit veroorzaakt een doorgaande, maar afnemende, compactie terwijl het dynamische reservoirmodel geen (gemiddelde) drukdaling meer laat zien.

In eerdere compactiemodelleringen werd een bi-lineair compactiemodel gebruikt. Dit model geeft een goede passing met de bodemdaling in de beginfase van de productie

maar geeft geen goede passing met de langer doorgaande bodemdaling aan het einde van de productie, zoals nu waargenomen boven Ameland-Oost. Door toepassing van het diffusie mechanisme past zowel de beginfase als de eindfase. De diffusie komt uiteindelijk tot uitdrukking in de volumerek van het reservoirgesteente die, vervolgens, de bodemdaling veroorzaakt.

De volumerek,  $e_{ii}$ , op een punt,  $\mathbf{x}$ , en tijdstip,  $t$ , in het reservoir kan dan worden beschreven door het product van de drukverandering,  $\Delta p$ , en de uniaxiale compactiecoëfficiënt,  $c_m$ , geconvolveerd in tijd,  $*_t$ , met een "time decay" functie:  $\frac{1}{\tau} \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right]$  met  $t$  in jaren en  $\tau$  de "time decay" constante.

$$e_{ii}(\mathbf{x}, t) = \Delta p(\mathbf{x}, t) c_m(\mathbf{x}, t) *_t \frac{1}{\tau} \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right]$$

Op basis van de meest optimale kalibratie met de beschikbare metingen volgt voor de voorkomens in en rondom de Waddenzee een waarde van 5 jaar voor de "time decay" constante.

De doorzetting van de bodemdaling, nadat de drukdaling nagenoeg gestopt is, zou ook veroorzaakt kunnen zijn door een "worst case" compactie scenario gebaseerd op "structural collapse" van het gesteente zoals waargenomen in kalksteen velden. Dit scenario is tot nu toe echter niet beschreven in de literatuur voor gecementeerde zandsteen reservoirs en is ook niet waargenomen in laboratoriumexperimenten op Rotliegend gesteente, die zijn uitgevoerd voor representatieve spanningspaden (o.a. referentie 7). Om deze redenen wordt de kans op een versnelling van de bodemdaling veroorzaakt door dit mechanisme als "laag" ingeschat. Dit neemt niet weg dat de NAM dit mechanisme in de komende jaren nader zal onderzoeken. In hetzelfde onderzoek zal ook aandacht worden besteed aan verdergaande en langdurige compactie door "kruip" in het reservoir gesteente. Een eerste aanwijzing voor de importantie van dit mechanisme volgt uit geodetische metingen boven het "Roswinkel" veld. In SAR metingen boven dit veld tonen aan dat de bodemdaling aanvankelijk doorging na beëindiging van de productie, maar dat deze inmiddels niet meer toeneemt.

### Zoutkruip

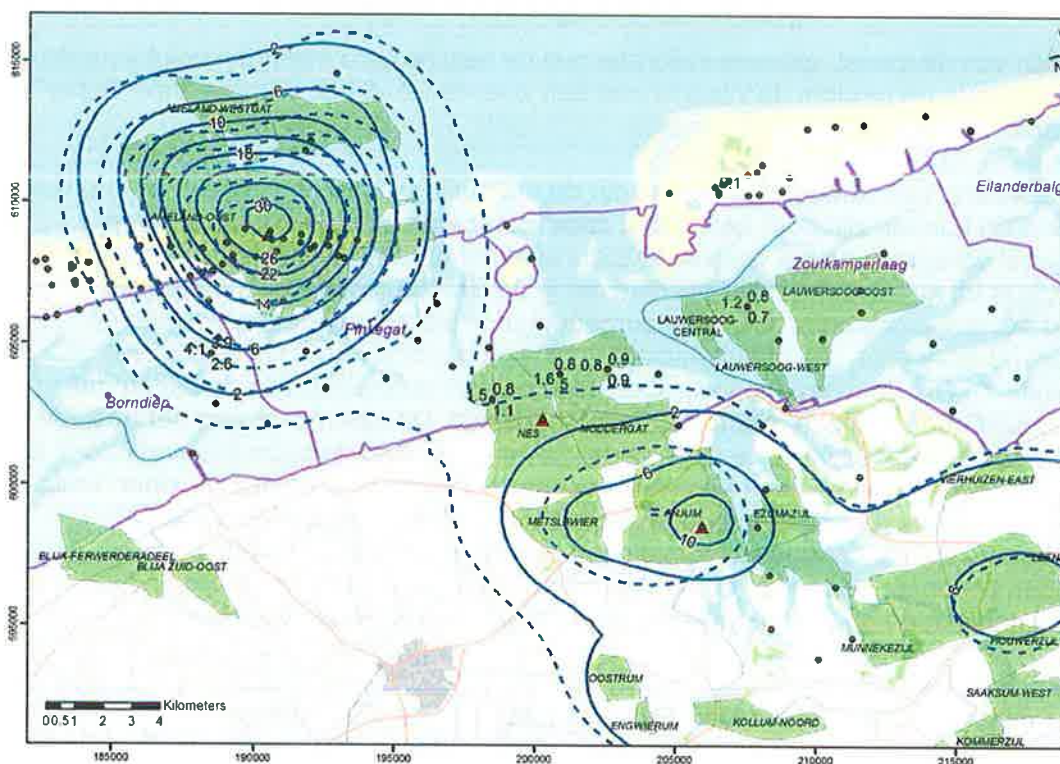
Boven de gasvelden in Noord Nederland bevindt zich een dikke steenzoutlaag. Ditzelfde zout wordt gewonnen onder de bodem van Noord Friesland. Het is bekend dat steenzout onder differentiële belasting langzaam gaat stromen (of kruipen). Referentie 19 beschrijft de relatie tussen de zoutwinning en de bodemdaling, evenals de snelheid en de vorm van dit vloeigedrag. Gegevens uit deze studie zijn gebruikt om ook het vloeigedrag van het steenzout onder Ameland te beschrijven. De reksnelheid van het zout wordt, gegeven de druk en geïnduceerde differentiële spanningen, gedomineerd door oplossingskruip (Referentie 20) en beschreven door de volgende formule:

$$\dot{\epsilon} \rightarrow A \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right)$$

Waarbij de waarde van de activatie energie gedeeld door de gasconstante ( $Q/R$ ) gelijk is aan 3007 K. De waarde voor  $A$  ( $1,69E-09 \text{ s}^{-1}$ ) is voor de voorkomens in en rondom de Waddenzee op basis van kalibratie bepaald.

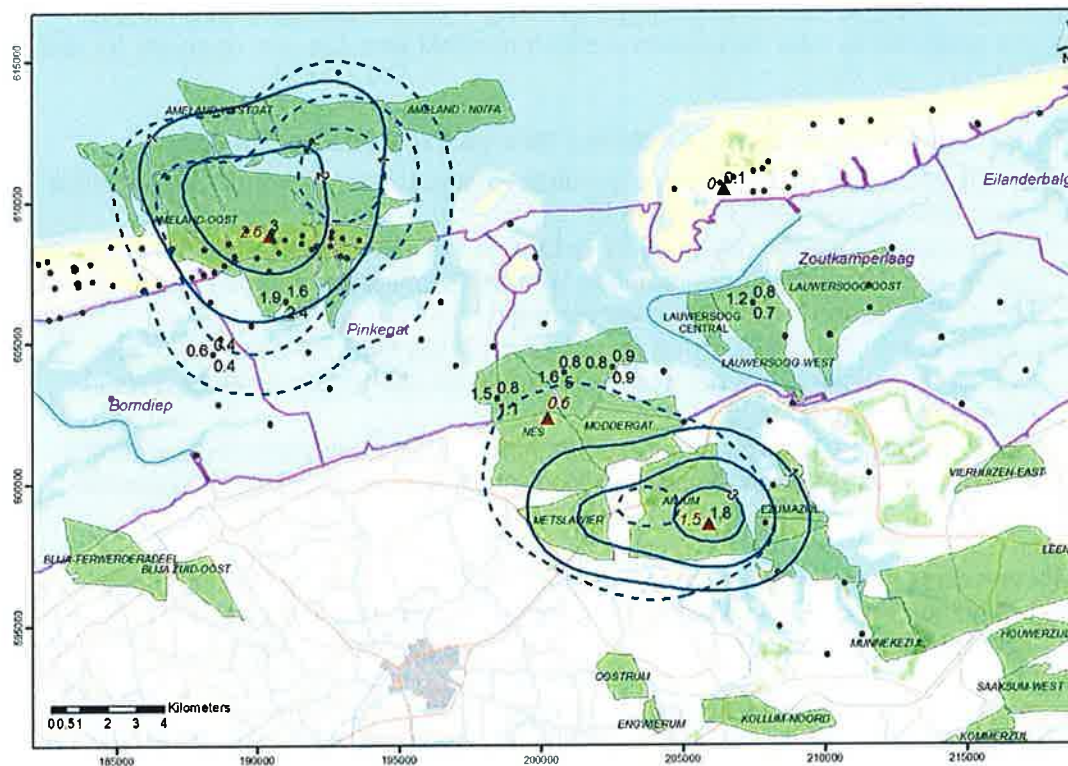
Alle bodemdalingberekeningen zijn uitgevoerd met het eindige elementen programma "Geomec", een Shell applicatie die gebaseerd is op DIANA (<http://tnodiana.com/>).

Figuur 2.1 toont de resultaten van de metingen uit 2010 als bodemdaling op de peilmerken in vergelijking met de contouren van de gemodelleerde bodemdaling. De contouren weergegeven met een doorgetrokken lijn geven de bodemdaling weer die is gemodelleerd met de nieuwe parameters en modellen terwijl als vergelijking de contouren met de gestreepte lijn de gemodelleerde bodemdaling weergegeven met de parameters en modellen zoals toegepast in de Meet- en regelrapportage van 2009 (Referentie 11).



**Figuur 2.1 Totale bodemdaling door gaswinning t/m 2010 (sinds start productie). In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling (gestreepte contouren geven de bodemdaling zoals beschreven in de M&R 2009<sup>1</sup>). De groene punten met label representeren de peilmerken met in 2010 gemeten hoogteverschillen sinds start productie. Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 3 posities continue GPS metingen uitgevoerd (rode driehoek). Bodemdaling in cm.**

Figuur 2.2 toont de gemeten en gemodelleerde daling in 2010 sinds de nulmetingen van 2006. De contouren weergegeven met een doorgetrokken lijn geven de bodemdaling weer die is gemodelleerd met de nieuwe parameters en modellen terwijl als vergelijking de contouren met de gestreepte lijn de gemodelleerde bodemdaling weergegeven met de parameters en modellen zoals toegepast in de Meet- en regelrapportage van 2009.



**Figuur 2.2 Totale bodemdaling door gaswinning in 2010 sinds nulmetingen in 2006. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens de aangepaste/gekalibreerde geomechanische modellen (gestreepte contouren geven de bodemdaling weer zoals getoond in de M&R 2009). De groene punten met label representeren de peilmerken met in 2010 gemeten hoogteverschillen sinds start productie van de waddenvelden in 2006. Bodemdaling in cm.**

Voor de leesbaarheid zijn beide figuren in A4 formaat in bijlage 1 getoond.

## 2.4. Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4)

### Bepaling volume en gemiddelde daling

Met behulp van de gekalibreerde geomechanische modellen zijn zowel het reeds opgetreden dalingsvolume in de betreffende kombergingsgebieden als de nog in de toekomst te verwachten jaarlijkse toename daarvan bepaald. Door de jaarlijkse volumetoename te delen door het kombergingsoppervlak wordt de gemiddelde bodemdalingssnelheid (mm/jr) per kombergingsgebied S (met bijbehorende onzekerheid) berekend.

Als basis voor de kombergingsgrenzen gelden de GIS bestanden van de grenzen van de kombergingsgebieden, die door RIKZ aan NAM zijn geleverd. Deze grenzen zijn door RIKZ voor de Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 toegepast (Referentie 2). Hierbij zijn de oppervlakten voor respectievelijk de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag  $60 \times 10^6 \text{ m}^2$  en  $148 \times 10^6 \text{ m}^2$ .

Uit de gemiddelde bodemdalingssnelheid S wordt de belasting B, d.w.z. de bodemdalingssnelheid gemiddeld over 6 jaar, bepaald. De in een bepaald jaar

gerapporteerde waarde van de belasting B geldt op 1 januari van dat jaar en is het zesjaarlijks gemiddelde over de periode die zich uitstrekt van drie jaar daarvoor tot drie jaar daarna.

#### **Onzekerheid gemodelleerde bodemdaling (alle velden behalve Ameland).**

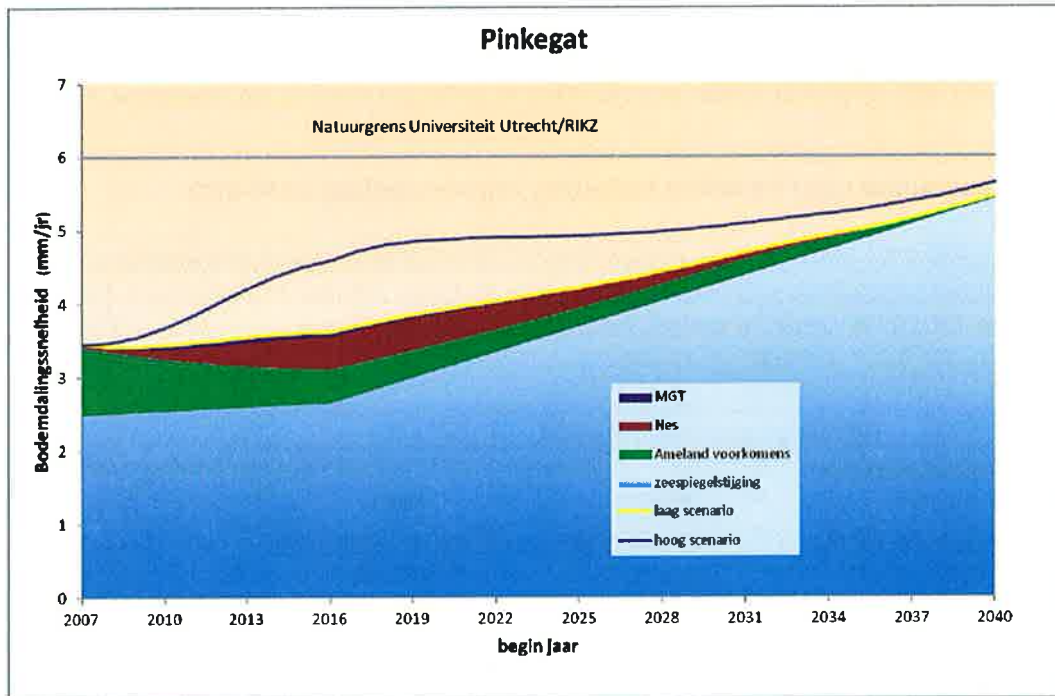
Gebaseerd op geologische en reservoir simulatie analyses zijn de volgende mogelijke reservoirdruk depletie scenario's opgesteld:

- Basis scenario, hierbij bevatten de velden de verwachte GIIP en is het water niet mobiel, dat wil zeggen geen depletie van de watervoerende lagen. Tevens is de  $C_m$  in dit scenario in geringe mate verlaagd.
- Laag scenario, hierbij bevatten de velden de hoge GIIP en is het water niet mobiel. In dit scenario is het productieprofiel aan de hogere GIIP aangepast. Tevens is de  $C_m$  verlaagd.
- Hoog scenario, uitgangspunt van dit scenario is het basisscenario (verwachte GIIP), maar voor de velden Nes en Moddergat depleteren de watervoerende lagen.

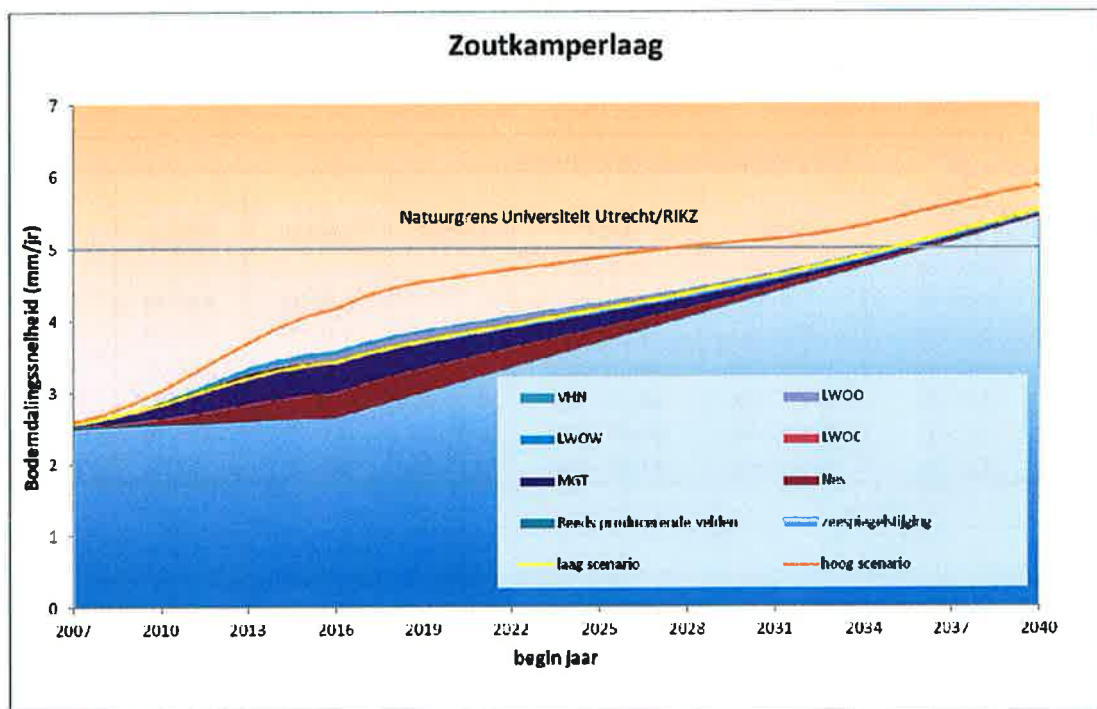
Voor eik van deze mogelijk reservoirdruk depletie scenario's kon een acceptabele reservoir simulatie kalibratie worden verkregen met de gemeten reservoirdrukken en gas- en waterproductie sinds de start van de gas productie van de betreffende gasvelden.

De geomechanische parameters zijn voor alle scenario's constant gehouden. Er is een vaste relatie gebruikt voor de  $C_m$  als functie van de porositeit, die gebaseerd is op een polynoom regressie van de op kernmonsters gemeten  $C_m$  en porositeit.

De bodemdalingssnelheid voor deze scenario's is getoond in figuur 2.3 en 2.4.



Figuur 2.3 Voorspelde belasting voor het basis scenario voor het kombergingsgebied Pinkegat. Hoog en laag scenario's zijn als lijnen weergegeven.



Figuur 2.4 Voorspelde belasting voor het basis scenario voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. Hoog en laag scenario's zijn als lijnen weergegeven.

Voor de berekening van de verwachte bodemdaling in de toekomst en het bijbehorende volume en bodemdalingssnelheden is uitgegaan van het basis scenario. Om de onzekerheid voor de volumes en bodemdalingssnelheden te bepalen is gebruik gemaakt van het hoge en lage scenario. Deze onzekerheid is gerapporteerd in de tabellen 2.4 t/m 2.7.

### Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting rapportagejaar 2010 met onzekerheid

Tabel 2.4 en tabel 2.5 tonen de door gaswinning veroorzaakte bodemdalingsvolumina met bijbehorende onzekerheid per voorkomen voor de jaren J-3 t/m J+2 waarbij J-1 het rapportagejaar (2010) is. Voor de volledigheid zijn ook de resultaten voor het jaar 2007 getoond.

Kobergingsgebied Pinkegat			
Jaar	Reeds producerende velden	NES	MGT
	volume(onzekerheid)	volume(onzekerheid)	volume(onzekerheid)
2007	51 (50 - 51)	0 (0 - 1)	0 (0 - 0)
2008	48 (48 - 48)	2 (2 - 6)	1 (1 - 1)
2009	44 (44 - 44)	5 (5 - 16)	2 (2 - 3)
2010	39 (39 - 39)	10 (10 - 26)	4 (3 - 6)
2011	35 (35 - 35)	13 (13 - 37)	5 (5 - 9)
2012	33 (33 - 33)	17 (17 - 51)	6 (6 - 9)
2013	31 (31 - 31)	21 (21 - 65)	6 (6 - 10)

**Tabel 2.4 Jaarlijks bodemdalingsvolume Pinkegat voor de overig producerende velden (producerend voor 2007) en voor de nieuwe velden per voorkomen met tussen haakjes de bandbreedte (onzekerheid). Volumina en bandbreedte (onzekerheid) in duizend m<sup>3</sup>.**

Kobergingsgebied Zoutkamperlaag							
Jaar	Reeds producerende velden	NES	MGT	LWO-C	LWO-W	LWO-O	VHZ
	2007	4 (4 - 4)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)			
2008	4 (3 - 4)	1 (0 - 0)	1 (0 - 1)		0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	1 (1 - 1)
2009	3 (2 - 3)	4 (3 - 7)	8 (7 - 20)		1 (1 - 1)	1 (1 - 1)	5 (4 - 5)
2010	2 (2 - 2)	14 (11 - 18)	44 (37 - 56)		0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	7 (5 - 7)
2011	2 (1 - 2)	21 (17 - 30)	59 (48 - 84)	2 (2 - 2)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	8 (7 - 8)
2012	1 (1 - 1)	30 (24 - 46)	67 (55 - 101)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	10 (9 - 10)
2013	1 (1 - 1)	39 (32 - 60)	73 (60 - 114)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	12 (10 - 12)

**Tabel 2.5 Jaarlijks bodemdalingsvolume Zoutkamperlaag voor de overig producerende velden (producerend voor 2007) en voor de nieuwe velden per voorkomen met tussen haakjes de bandbreedte (onzekerheid). Volumina en bandbreedte (onzekerheid) in duizend m<sup>3</sup>.**



NES: Nes  
 MGT: Moddergat  
 LWO-C: Lauwersoog-C  
 LWO-W: Lauwersoog-West  
 LWO-O: Lauwersoog-Oost  
 VHZ-O: Vierhuizen-Oost

Het effect ten gevolge van de productie van Ameland op de bodemdaling in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag is verwaarloosbaar.

Onderstaande Tabel 2.6 geeft de bodemdalingssnelheid S voor het rapportagejaar 2010 en belasting B op 1-1-2011.

Zoutkamperlaag		Pinkegat	
S (onzekerheid)	B (onzekerheid)	S (onzekerheid)	B (onzekerheid)
0.45(0.37 - 0.56)	0.47(0.39 - 0.67)	0.89(0.87 - 1.20)	0.91(0.90 - 1.32)

**Tabel 2.6 Bodemdalingssnelheid en belasting (mm/jr) met onzekerheid (bandbreedte) per kombergingsgebied in het rapportagejaar 2010.**

#### **Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting**

Tabel 2.7 toont de prognose van de bodemdalingssnelheid per kombergingsgebied per jaar (S) ten gevolge van de gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen in combinatie met de bodemdalingssnelheid door de reeds voor 2007 gestarte gaswinning in dit gebied. Ook is de op basis van deze waarden berekende belasting B weergegeven, waarbij  $B(J) = (S(J-3) + S(J-2) + \dots + S(J+2))/6$ .

Jaar	Zoutkamperlaag		Pinkegat		Gebruiksruimte G	
	S (onzekerheid)	B (onzekerheid)	S (onzekerheid)	B (onzekerheid)	Zoutkamp erlaag	Pinkegat
2004	0,04(0,03 - 0,04)		1,11(1,11 - 1,11)		2.57	3.57
2005	0,04(0,03 - 0,04)		1,02(1,01 - 1,01)		2.55	3.55
2006	0,04(0,03 - 0,04)		0,95(0,95 - 0,96)		2.53	3.53
2007	0,05(0,04 - 0,05)	0,06(0,05 - 0,07)	0,91(0,91 - 0,93)	0,95(0,95 - 1,0)	2.52	3.52
2008	0,05(0,04 - 0,04)	0,13(0,11 - 0,16)	0,86(0,86 - 0,93)	0,91(0,91 - 1,01)	2.50	3.50
2009	0,14(0,12 - 0,24)	0,22(0,18 - 0,30)	0,86(0,86 - 1,06)	0,90(0,89 - 1,08)	2.48	3.48
2010	0,45(0,37 - 0,56)	0,34(0,28 - 0,47)	0,89(0,87 - 1,20)	0,90(0,89 - 1,18)	2.46	3.46
2011	0,62(0,51 - 0,85)	0,47(0,39 - 0,67)	0,94(0,93 - 1,39)	0,91(0,90 - 1,32)	2.44	3.44
2012	0,72(0,60 - 1,06)	0,62(0,51 - 0,91)	0,95(0,93 - 1,57)	0,94(0,92 - 1,49)	2.43	3.43
2013	0,84(0,69 - 1,26)	0,76(0,63 - 1,13)	0,98(0,96 - 1,77)	0,96(0,95 - 1,65)	2.41	3.41
2014	0,94(0,77 - 1,45)	0,86(0,71 - 1,31)	1,01(0,99 - 1,93)	0,98(0,96 - 1,80)	2.39	3.39
2015	1,01(0,83 - 1,60)	0,91(0,75 - 1,45)	1,02(1,00 - 2,06)	0,98(0,96 - 1,91)	2.37	3.37
2016	1,02(0,84 - 1,67)	0,94(0,78 - 1,54)	1,00(0,97 - 2,09)	0,97(0,95 - 1,97)	2.35	3.35
2017	0,96(0,79 - 1,65)	0,95(0,78 - 1,58)	0,94(0,92 - 2,03)	0,95(0,93 - 1,99)	2.24	3.24
2018	0,90(0,74 - 1,6)	0,92(0,76 - 1,59)	0,89(0,87 - 1,95)	0,91(0,89 - 1,96)	2.12	3.12
2019	0,85(0,70 - 1,54)	0,88(0,72 - 1,55)	0,83(0,81 - 1,86)	0,86(0,84 - 1,89)	2.01	3.01
2020	0,80(0,66 - 1,47)	0,83(0,68 - 1,50)	0,78(0,76 - 1,75)	0,80(0,78 - 1,80)	1.89	2.89
2021	0,75(0,62 - 1,40)	0,77(0,64 - 1,43)	0,72(0,70 - 1,64)	0,75(0,73 - 1,69)	1.77	2.77
2022	0,70(0,58 - 1,33)	0,72(0,59 - 1,37)	0,66(0,65 - 1,54)	0,69(0,67 - 1,59)	1.66	2.66
2023	0,64(0,53 - 1,27)	0,67(0,55 - 1,31)	0,61(0,59 - 1,43)	0,64(0,62 - 1,48)	1.54	2.54
2024	0,59(0,48 - 1,22)	0,61(0,50 - 1,25)	0,55(0,54 - 1,32)	0,58(0,57 - 1,37)	1.43	2.43
2025	0,53(0,43 - 1,17)	0,56(0,46 - 1,19)	0,49(0,48 - 1,21)	0,53(0,51 - 1,27)	1.31	2.31
2026	0,47(0,39 - 1,12)	0,50(0,41 - 1,13)	0,44(0,43 - 1,11)	0,48(0,47 - 1,17)	1.19	2.19
2027	0,42(0,34 - 1,05)	0,45(0,37 - 1,06)	0,40(0,39 - 1,01)	0,43(0,42 - 1,07)	1.08	2.08
2028	0,37(0,30 - 0,96)	0,40(0,33 - 0,99)	0,37(0,36 - 0,93)	0,40(0,39 - 0,98)	0.96	1.96
2029	0,33(0,27 - 0,87)	0,35(0,29 - 0,91)	0,34(0,34 - 0,85)	0,36(0,36 - 0,90)	0.85	1.85
2030	0,29(0,24 - 0,77)	0,31(0,26 - 0,82)	0,32(0,32 - 0,78)	0,33(0,33 - 0,82)	0.73	1.73
2031	0,25(0,21 - 0,68)	0,27(0,23 - 0,74)	0,30(0,29 - 0,71)	0,30(0,30 - 0,74)	0.61	1.61
2032	0,22(0,18 - 0,61)	0,24(0,20 - 0,67)	0,26(0,26 - 0,63)	0,27(0,26 - 0,67)	0.50	1.50
2033	0,19(0,16 - 0,57)	0,21(0,18 - 0,62)	0,22(0,22 - 0,56)	0,23(0,23 - 0,60)	0.38	1.38
2034	0,17(0,14 - 0,54)	0,19(0,16 - 0,58)	0,17(0,16 - 0,49)	0,19(0,18 - 0,53)	0.27	1.27
2035	0,15(0,13 - 0,53)	0,17(0,14 - 0,56)	0,11(0,11 - 0,41)	0,14(0,14 - 0,46)	0.15	1.15
2036	0,14(0,11 - 0,54)	0,15(0,12 - 0,54)	0,07(0,06 - 0,36)	0,10(0,10 - 0,40)	0.03	1.03
2037	0,13(0,10 - 0,54)	0,14(0,11 - 0,52)	0,04(0,03 - 0,31)	0,07(0,07 - 0,35)	0.00	0.92
2038	0,12(0,10 - 0,51)	0,12(0,10 - 0,50)	0,02(0,02 - 0,28)	0,05(0,04 - 0,31)	0.00	0.80
2039	0,11(0,09 - 0,47)	0,11(0,09 - 0,47)	0,02(0,02 - 0,26)	0,03(0,03 - 0,28)	0.00	0.69
2040	0,10(0,08 - 0,40)	0,10(0,08 - 0,43)	0,03(0,03 - 0,24)	0,03(0,03 - 0,26)	0.00	0.57
2041	0,09(0,07 - 0,35)	0,09(0,08 - 0,39)	0,04(0,04 - 0,23)	0,03(0,03 - 0,24)	0.00	0.45
2042	0,08(0,07 - 0,32)	0,09(0,07 - 0,35)	0,04(0,04 - 0,22)	0,04(0,04 - 0,23)	0.00	0.34

**Tabel 2.7 bodemdalingssnelheid (onzekerheid), belasting en gebruiksruimte voor de kombergingsgebieden Zoutkamperlaag en Pinkegat (mm/jaar) op basis van het productie profiel volgens tabel 3.8 en inclusief de bodemdalingssnelheid veroorzaakt door de overige producerende velden.**

## 2.5. Indien nodig aanpassen productie (stap 5)

Tabel 2.8 toont de jaarlijkse productie (miljoen m<sup>3</sup>) per voorkomen. Totale productie is overeenkomstig de in 2011 ingediende wijziging winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen.

Uitgaande van het basis scenario en de productie volgens Tabel 2.8 volgen waarden voor de bodemdalingssnelheid S en de resulterende belasting B die niet leiden tot overschrijding van de gebruiksruimte eerder dan het jaar 2035 (zie Tabel 2.7).

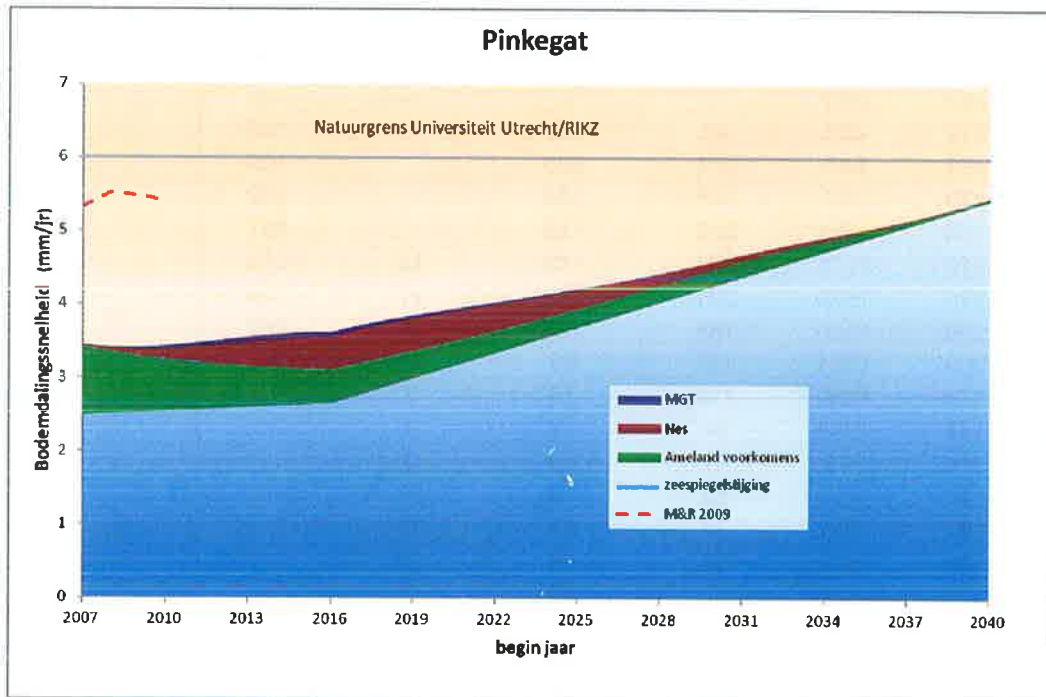
Jaar	Moddergat	Nes	Lauwersoog-Oost	Lauwersoog-West	Lauwersoog-C	Vierhuizen-Oost
2007	382	340	-	-	-	-
2008	312	485	42	85	-	168
2009	453	540	271	300	-	309
2010	479	767	295	184	-	292
2011	504	750	259	135	-	357
2012	419	1175	237	163	13	358
2013	321	1589	201	132	17	355
2014	256	1550	164	104	3	267
2015	209	1351	137	89	3	35
2016	174	1180	114	79	3	15
2017	144	1033	97	47	3	15
2018	184	943	87	60	3	-
2019	191	856	82	78	16	-
2020	161	753	73	62	26	-
2021	138	662	66	54	20	-
2022	121	577	60	49	8	-
2023	108	504	55	46	3	-
2024	97	441	52	43	3	-
2025	88	383	49	40	3	-
2026	54	337	48	40	2	-
2027	22	303	49	40	3	-
2028	21	265	46	35	2	-
2029	-	230	43	24	2	-
2030	-	200	40	29	2	-
2031	-	175	38	25	2	-
2032	-	161	30	26	2	-
2033	-	164	9	24	2	-
2034	-	145	6	24	2	-
2035	-	128	6	23	2	-

**Tabel 2.8 Gerealiseerde (2007 - 2010) en voorgenomen productie (miljoen m<sup>3</sup>) per voorkomen.**

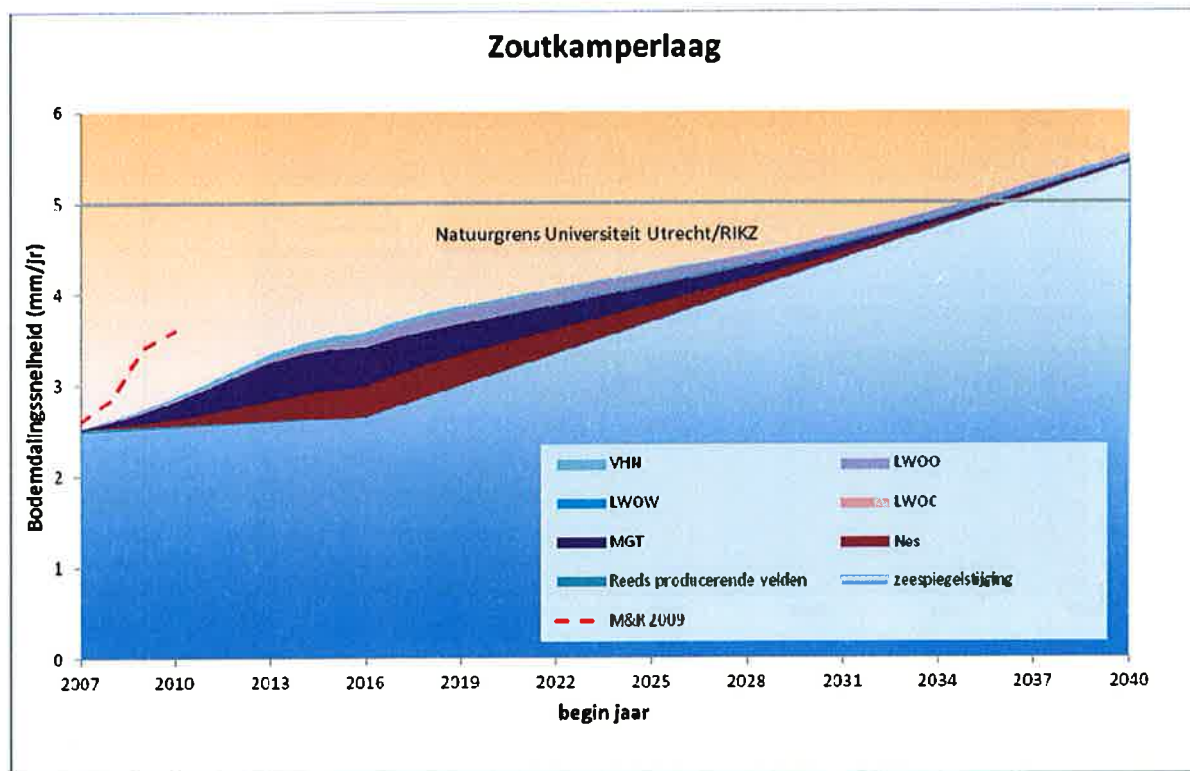
## 2.6. Actualiseren (stap 6)

Figuur 2.5 & Figuur 2.6 tonen de geactualiseerde verwachte belastingen voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag volgens het in tabel 2.8 getoonde productie scenario. De belasting inclusief relatieve zeespiegelstijging (actualisatie 2011) zal de gebruiksruimte van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag niet eerder dan in 2035 overschrijden. In de grafieken is steeds de belasting in een bepaald jaar door een veld, dat op 1 januari van dat jaar nog niet in productie is, gelijk aan nul

gesteld. Dit is gedaan om presentatietechnische redenen en niet volledig in overeenstemming met de waarden zoals gepresenteerd in tabel 2.8. In de figuren is tevens de belasting zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclus rapportage 2009 (M&R 2009) voor de jaren 2007 t/m 2010 weergegeven. Met name het vernieuwde Ameland model, waarbij een verminderde reservoir drukdepletie van de watervoerende pakketten is aangenomen, en de niet mobiele watervoerende pakketten rondom de overige voorkomens leiden tot een significant lagere belasting dan eerder werd aangenomen.



**Figuur 2.5** Voorspelde belasting inclusief Zeespiegelstijging + autonome daling voor het kombergingsgebied Pinkegat. Voor de modellering van de bodemdaling tengevolge van de gaswinning van Ameland is het meest recente geomechanische model toegepast. De rood gestreepte lijn geeft berekende belasting aan zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclusrapportage 2009.



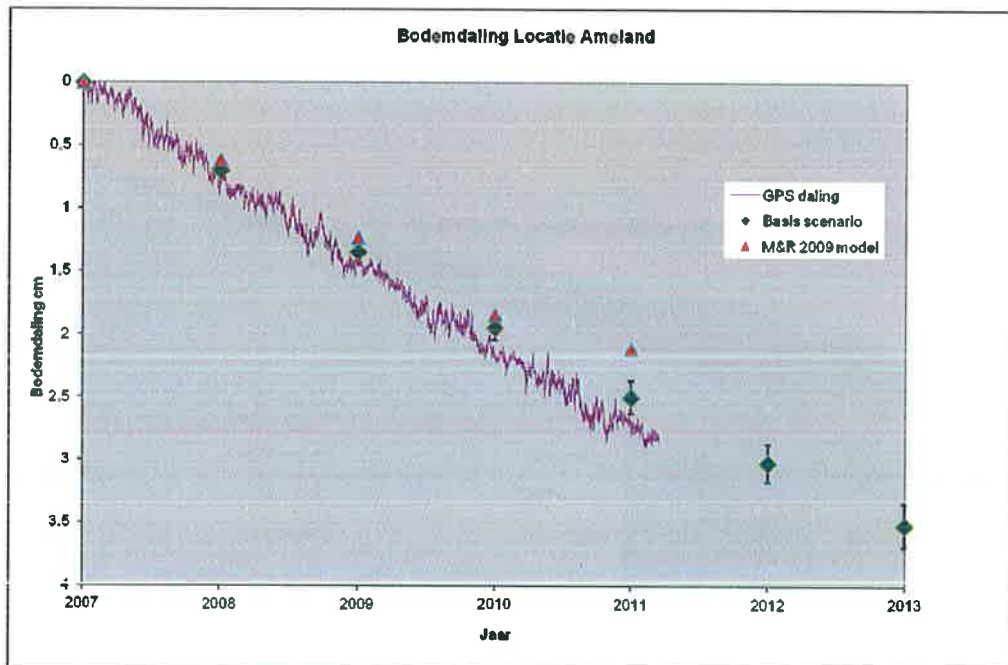
**Figuur 2.6** Voorspelde belasting inclusief Zeespiegelstijging + autonome daling voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. De rood gestreepte lijn geeft berekende belasting aan zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclusrapportage 2009.

### Bodemdaling GPS locaties op Moddergat en Ameland

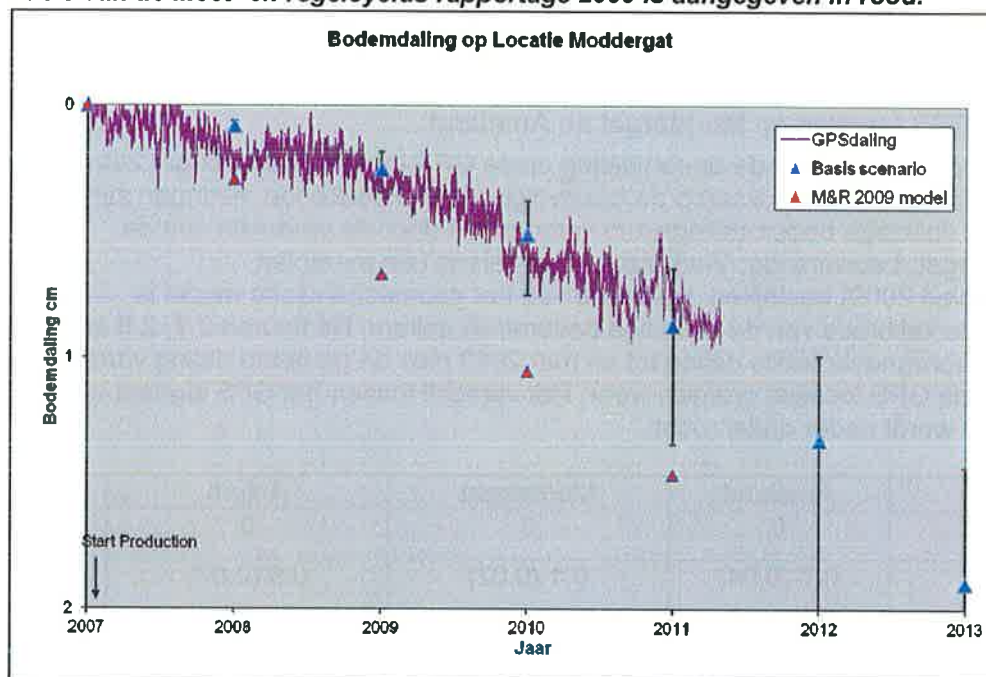
Tabel 2.9 geeft de gemodelleerde bodemdaling op de GPS locaties vanaf begin 2007 tot en met 2011. Dat is het tijdstip waarop de eerstvolgende vlakdekkende metingen zijn gepland, die de volledige bodemdalingskom veroorzaakt door de productie van de locaties Moddergat, Lauwersoog, Vierhuizen en Ameland (zie meetplan Waddenzeegebied 2009) bestrijken. Kalibratie van het geomechanische model is gebaseerd op de kalibratie van de volledige bodemdalingskom. De figuren 2.7, 2.8 en 2.9 geven de geprognosticeerde daling tot en met 2013 plus de gemeten daling vanaf begin 2007 op de GPS locaties grafisch weer. Het verschil tussen het GPS signaal en model in Anjum wordt nader onderzocht.

Datum	Ameland	Moddergat	Anjum
1.1.2007	0	0	0
1.1.2008	0.7 (0.04)	0.1 (0.02)	0.9 (0.07)
1.1.2009	1.3 (0.07)	0.3 (0.09)	1.7 (0.12)
1.1.2010	1.9 (0.13)	0.5 (0.24)	2.4 (0.17)
1.1.2011	2.5 (0.13)	0.9 (0.47)	3.2 (0.20)

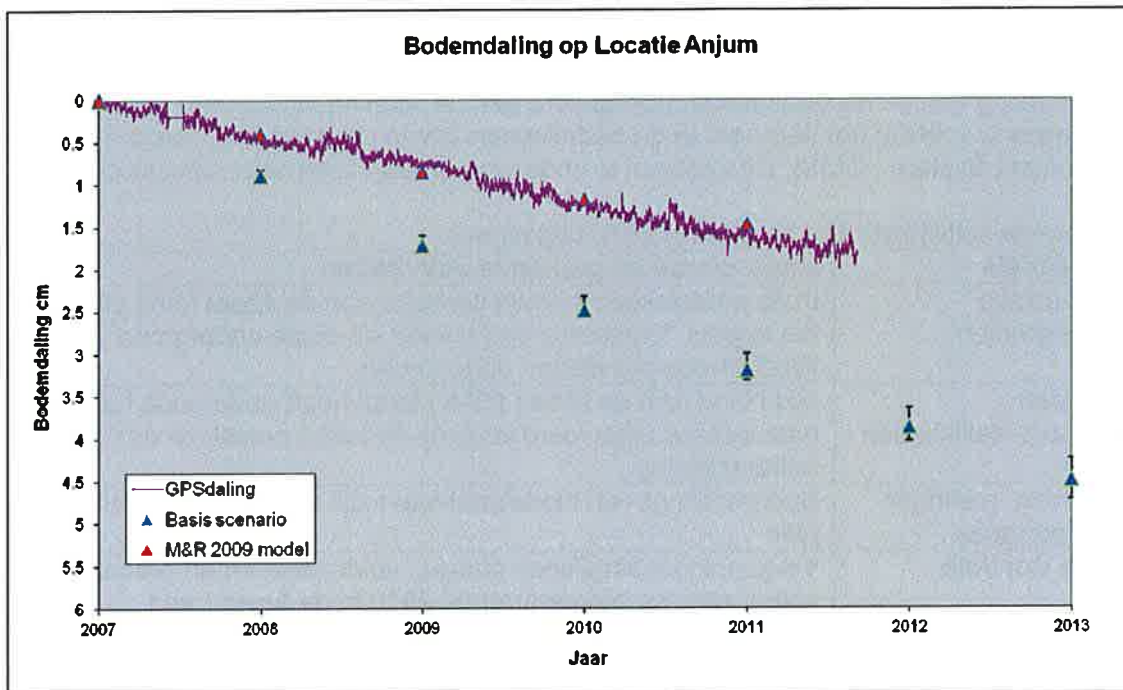
**Tabel 2.9** Voorspelde daling t.o.v. 1.1.2007 op de GPS locaties (cm). Tussen haakjes is het absolute verschil met het hoge scenario aangegeven.



**Figuur 2.7** Voorspelde en gemeten (GPS) bodemdaling locatie Ameland (coördinaten: X-RD:190474.978, Y-RD: 608822.469). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de voorspelling van respectievelijk het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage 2009 is aangegeven in rood.



**Figuur 2.8** Voorspelde en gemeten (GPS) bodemdaling locatie Moddergat (coördinaten: X-RD: 200244.559, Y-RD: 602329.794). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de voorspelling van respectievelijk het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage 2009 is aangegeven in rood.



**Figuur 2.9** Voorspelde en gemeten bodemdaling (GPS) locatie Anjum (coördinaten: X-RD: 205931.145, Y-RD: 598546.039). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de voorspelling van respectievelijk het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage 2009 is aangegeven in rood.

### 3. Kwaliteitsborging.

De beheersing van de milieuaspecten gerelateerd aan de winningsactiviteiten van het Waddengas is volledig geïntegreerd in de bedrijfsvoering van de NAM (het Corporate Management System - CMS). Dit systeem is onderworpen aan externe certificatie (ISO 14001).

De volgende activiteiten zijn hiervoor in 2010 uitgevoerd:

<b>Systeem-eis</b>	<b>Uitgevoerde en geplande activiteiten</b>
Inventarisatie milieuaspecten	In de milieuaspecten inventarisatie van de Asset Land zijn bij het aspect "Verstoring van bodem en diepe ondergrond" de Waddenzee-activiteiten opgenomen
Toewijzen verantwoordelijkheden	Het Hand Aan de Kraan (HAK) team heeft gedurende het jaar haar beheer uitgevoerd volgens de taken gesteld in de CMS rolbeschrijving.
Monitoring, metingen en rapportages	Bodemdalings- en biotiekmetingen zijn uitgevoerd volgens plan
Interne Controle	Vergunningscompliance checks, veldbezoeken en process safety reviews zijn gedurende 2010 in de Asset Land uitgevoerd volgens het geplande schema.



#### 4. Conclusies.

- Na herinterpretatie van de seismiek zijn de geologische modellen van de gasvelden Anjum, Ameland, Metslawier, Nes, Moddergat, Ezumazijl, Vierhuizen-Oost en Lauwersoog-C, -W en -O herzien en aangepast. Gedetailleerde dynamische reservoir simulatie modellen zijn opnieuw gebouwd en met de gemeten gasproductie- en reservoirdruk gegevens gekalibreerd.
- Volgens het meetprogramma zijn in 2010 GPS metingen uitgevoerd op 6 peilmerken van de clusters in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag.
- De continue GPS metingen op de locaties boven de gasvelden Anjum en Moddergat, die respectievelijk in juni en december 2006 zijn gestart (nog voor aanvang van de productie in Nes en Moddergat), zijn in 2010 voortgezet.
- Op basis van het geproduceerde volume gas in combinatie met de resultaten van de drukmetingen leiden de nieuwe dynamische reservoir simulatie modellen tot een aanpassing t.o.v. het oorspronkelijke winningplan Moddergat van het totale gasvolume van de voorkomens:

Voorkomens	Oorspronkelijk winningsplan (2006) (GIIP; $10^9$ m <sup>3</sup> )	Wijziging winningsplan (2011) (GIIP; $10^9$ m <sup>3</sup> )
Nes	6,02	17 – 22
Moddergat	6,45	7 -10
Lauwersoog-O	3,41	5,5 - 10
Lauwersoog-W	2,87	3,6 – 4,2

- Na aanpassing van het geomechanische model voor bovengenoemde velden is er gekalibreerd met de gemeten bodemdaling sinds start van de productie van het Anjum veld in 1997 voor het gehele Wadden gebied. Dit heeft geleid tot een significante aanpassing van het geomechanische model. Met name het vaststellen, op basis van geodetische informatie, van een niet meedepleterend watervoerend pakket zorgde voor een lagere belasting in de kombergingsgebieden.
- Voor de modellering van de bodemdaling ten gevolge van de gas productie van de Ameland velden is in de rapportage uitgegaan van het geomechanische model dat is gebruikt voor het in 2011 ingediende winningsplan "wijziging winningsplan Ameland". Dit geomechanisch model laat een goede passing zien tussen meting en model, zowel op het Ameland eiland als in de Waddenzee.
- Met een geplande totale productie, zoals aangegeven in het gewijzigde winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen uit 2011 zal de belasting inclusief relatieve zeespiegelstijging (actualisatie door EL&I 2011) het meegroeiervermogen van het kombergingsgebied Zoutkamperlaag in 2035 overschrijden. Voor het kombergingsgebied Pinkegat zal dit later plaatsvinden.

## 5. Referenties

Referentie 1 Meet- en regelprotocol Winning Waddenzeegas vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Nederlandse Aardolie Maatschappij BV. EP200612202122.

Referentie 2 Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 – Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. Rapport RIKZ / 2004.025.

Referentie 3 MER Aardgaswinning Waddenzeegebied vanaf locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Nederlandse Aardolie Maatschappij BV. Januari 2006.

Referentie 4 Verzoek om instemming voor winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Nederlandse Aardolie Maatschappij BV. Januari 2006.

Referentie 5 Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, Vastlegging nul situatie, Meetresultaten. Rapport EP200612204999. Nederlandse Aardolie Maatschappij BV. December 2006.

Referentie 6 Houtenbos, A.P.E.M. (2007) Subsidence and gas production: an empirical relation

Referentie 7 Holt, 2011, Core damage corrected compaction modelling: Development and application of a method for determination of yield onset during compaction

Referentie 8 Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Resultaten uitvoering Meet- en Regelcyclus 2006; Rapport EP20612205324, september 2007.

Referentie 9 Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Resultaten uitvoering Meet- en Regelcyclus 2007; Rapport EP200803216458, 29 april 2008.

Referentie 10 Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Resultaten uitvoering Meet- en Regelcyclus 2008; Rapport EP200903207091, 28 mei 2009

Referentie 11 Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Resultaten uitvoering Meet- en Regelcyclus 2009; Rapport EP201005315203, mei 2010

Referentie 12 GPS Survey NAM Waddenzee v. 1.15. 06-GPS B.V., 01/2011.

Referentie 11 de Jong, J.W.: Procedureafspraken waterpassingen. Brief aan de NAM, 18 augustus 2005

Referentie 12 Duquesnoy, A.J.H.M.: Wettelijke voorschriften en normering bij de meting van bodembeweging als gevolg van delfstoffenwinning. In: Bodemdaling meten in Nederland – Hoe precies moet het? NCG 39, Delft, 2002.

Referentie 13 R. Amiri-Simkooei, C. C. J. M. Tiberius and P. J. G. Teunissen: Assessment of noise in GPS coordinate time series: Methodology and results. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 112, 2007.

Referentie 14 Check reference station coordinates NAM project Waddenzee. 06 GPS B.V., 07/2009.

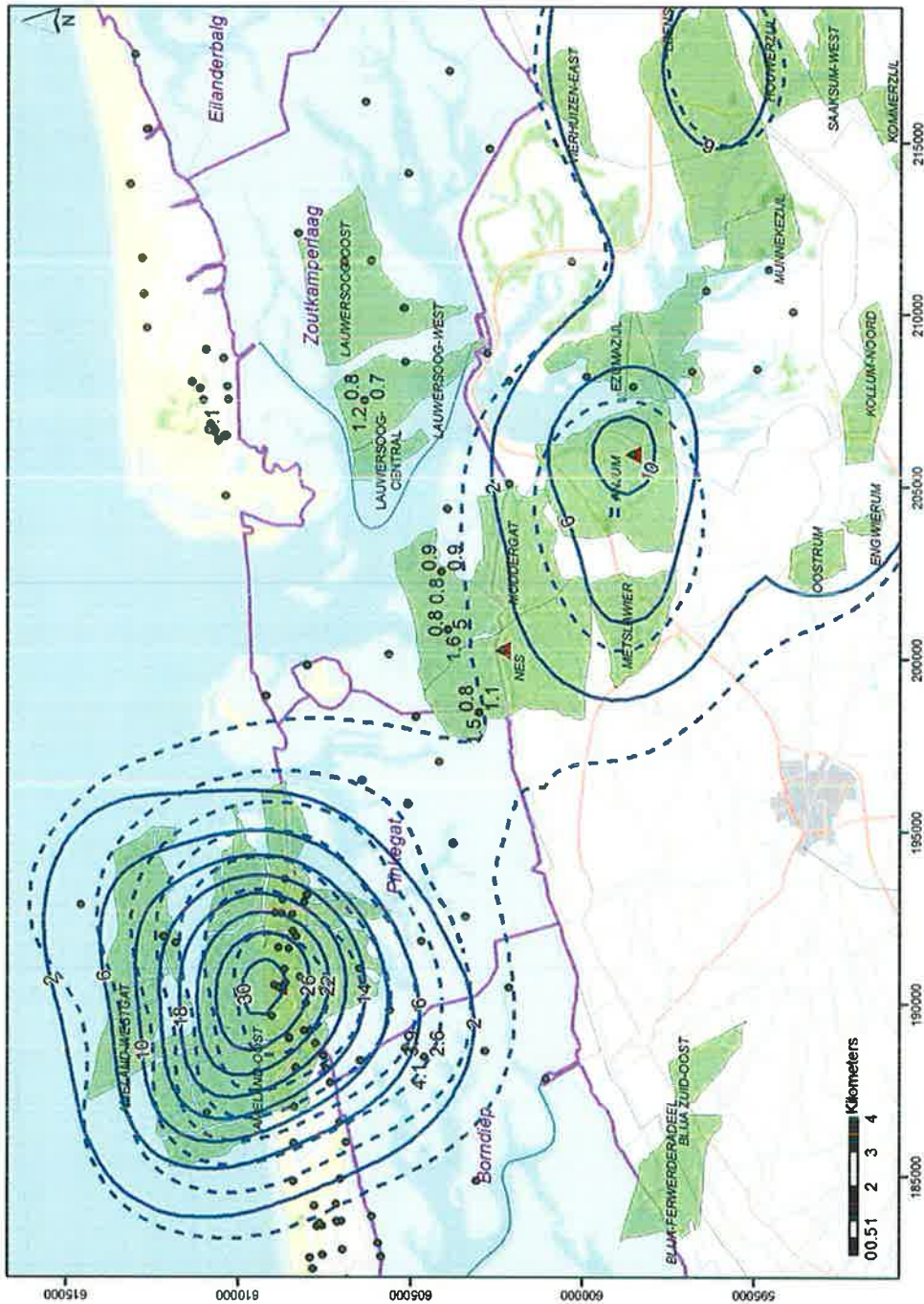
Referentie 15 MOVE3, Grontmij B.V., URL: <http://www.grontmij.nl/site/nl-nl/Diensten/GIS+en+ICT/Softwareproducten/MOVE3.htm>.

Referentie 16 NLGEO2004: het geoidemodel voor Nederland. Data-ICT-Dienst, Rijkswaterstaat, URL: <http://www.rdnap.nl/algemeen/hooqte/geoide.html>.

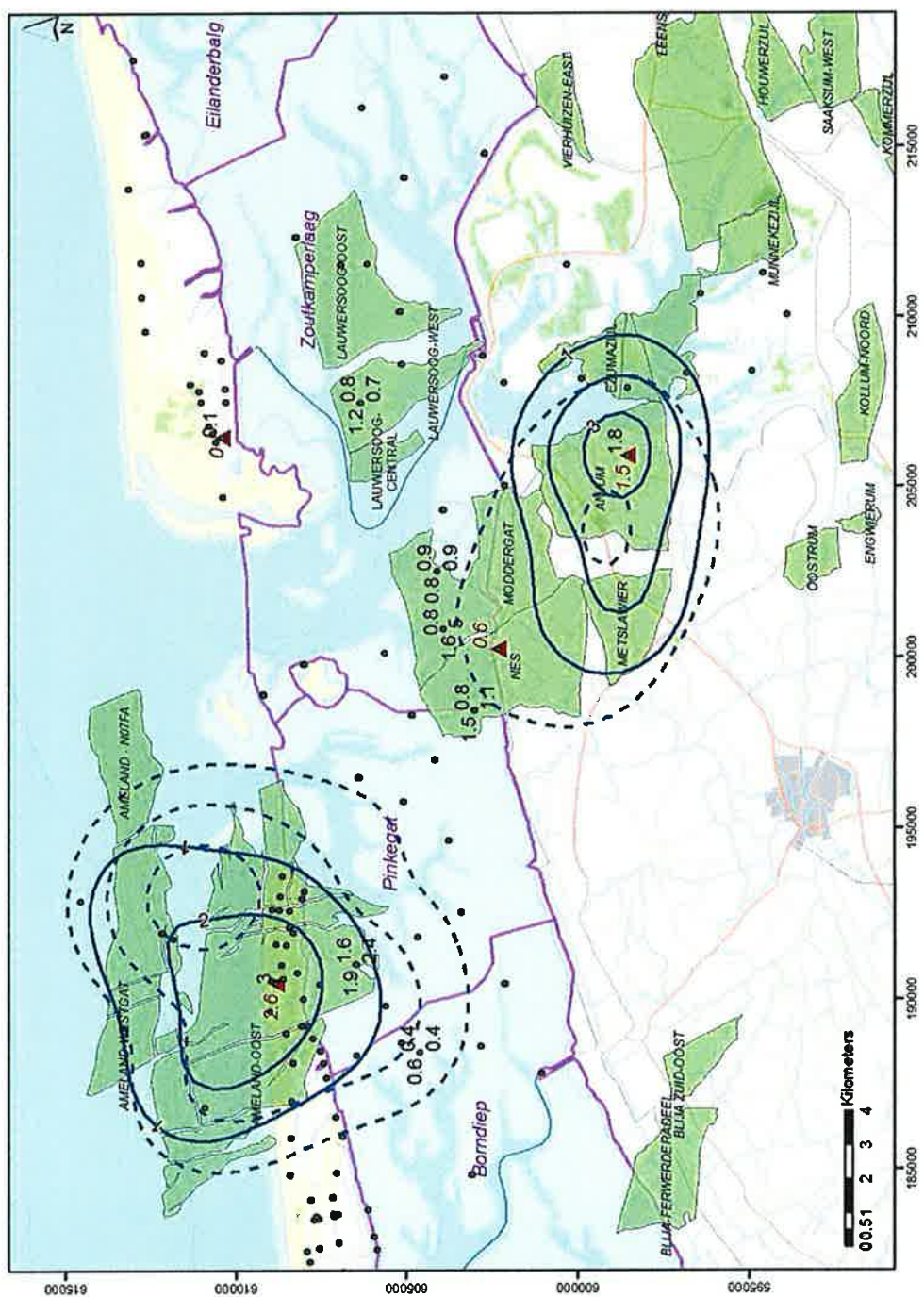
Referentie 19 Breunese, J.N., van Eijs, R.M.H.E., de Meer, S., Kroon, I.C Observation and prediction of the relation between salt creep and land subsidence in solution mining. The Barradeel Case, 2003

**Referentie 20 Spiers et al., 1990; Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rocksalt by pressure solution**

## 6. Bijlage 1. Gemodelleerde en gemeten bodemdaling 2010



**Figuur 6.1** Totale bodemdaling door gaswinning t/m 2010 (sinds start productie). In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling (gestreepte contouren geven de bodemdaling zoals beschreven in de M&R 2009"). De groene punten met label representeren de peilmerken met in 2010 gemeten hoogteverschillen sinds start productie. Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 3 posities continue GPS metingen uitgevoerd (rode driehoek). Bodemdaling in cm.



**Figuur 6.2** Totale bodemdaling door gaswinning in 2010 sinds nulmetingen in 2006. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens de aangepaste/gekalibreerde geomechanische modellen (gestreepte contouren geven de bodemdaling weer zoals getoond in de M&R 2009). De groene punten met label representeren de peilmerken met in 2010 gemeten hoogteverschillen sinds start productie van de waddenvelden in 2006. Bodemdaling in cm.

