

# Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen

## Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2015

NAM B.V.

<i>EP Document Nummer.:</i>	EP201602210605	<i>Owner:</i>	<i>UIO/T/DL</i>
<i>Revision No.:</i>		<i>Status:</i>	<i>DRAFT</i>
<i>Document Date:</i>	1/5/2016	<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 verzoek om instemming op een wijziging van dit winningsplan ingediend (Referentie 1), alsmede voor wijzigingen van de winningsplannen Anjum en Ameland. In 2013 heeft de minister ingestemd met deze wijzigingen voor de winningsplannen (Referentie 12).

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. NAM heeft in 2012 ten genoegen van de IGM een wijziging van dit protocol met de bijbehorende technische bijlage ingediend (Referentie 11 en Referentie 3).

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. Tenslotte is het voorkomen Lauwersoog C in juni 2012 in productie genomen. Samen vormen deze voorkomens de "Wadden voorkomens".

Overeenkomstig het meetplan Waddenzee (Referentie 10) worden elke 3 jaar geodetische GPS metingen uitgevoerd op peilmerken van de peilmerkclusters in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Omwille van de totale benodigde tijd van meten en om elk jaar te kunnen monitoren wordt de meetinzet verdeeld over de 3 jaren, zodat er elk jaar een aantal GPS metingen plaatsvinden. In 2015 zijn er in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag op 28 peilmerkclusters metingen uitgevoerd en zijn er 5 nieuwe peilmerkclusters geplaatst. Verder is er een waterpassing uitgevoerd rondom het Lauwersmeer, zijn op een zestal ondergrondse merken GPS metingen verricht en zijn er GPS metingen verricht in het Lauwersmeer.

De continue GPS metingen op de locaties boven de gasvelden Ameland, Anjum en Moddergat, die respectievelijk in juni en december 2006 zijn gestart (nog voor aanvang van de productie in Nes en Moddergat), zijn in 2015 voortgezet.

Bij 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. Deze modellen zijn na 2011 verder bijgewerkt en gekalibreerd op basis van o.a. gegevens uit de nieuwe boring in het Nes veld en productie data. De gedetailleerde dynamische reservoirsimulatiemodellen zijn ook bijgewerkt op basis van deze nieuwe geologische modellen en gekalibreerd met de gemeten gasproductie en reservoirdrukgegevens t/m 1-1-2016. Vervolgens is ook het geomechanische model met informatie uit deze vernieuwde modellen aangepast en opnieuw gekalibreerd met de gemeten bodemdaling.

Het dynamisch reservoirgedrag is onderzocht door verschillende parameters per voorkomen te variëren. Combinaties van deze realisaties leiden vervolgens tot de definities van een aantal scenario's waarvoor de bodemdaling is berekend met behulp van analytische en numerieke geomechanische modellen.

Hierbij is de onzekerheid in de geomechanische modellering bepaald middels een Monte Carlo analyse. De onzekerheid is tevens inzichtelijk gemaakt in de grafieken die de belasting tonen voor de twee kombergingsgebieden. Daarbij dient opgemerkt te worden dat het

---

<sup>1</sup> Meet- en regelprotocol Winning Waddenzeegas vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Nederlandse Aardolie Maatschappij BV. EP200612202122. Versie 1 juli 2012 revA

verwachte scenario leidend is voor mogelijke productiebijsturing volgens het Meet- en regelprotocol.

Samenvattend wordt voor deze rapportage geconcludeerd:

- De beschikbare modellen voor de voorkomens onder en rondom de Waddenzee zijn grondig geëvalueerd en gekalibreerd met de beschikbare metingen. De resultaten van metingen en modellen komen goed met elkaar overeen.
- De gepresenteerde resultaten gaan uit van een richtscenario voor de zeespiegelstijging. Het nieuwe zeespiegelscenario dat op 1-1-2016 beschikbaar zou moeten zijn is op het moment van schrijven niet beschikbaar voor NAM. Vooralsnog gaat NAM ervan uit dat het richtscenario een conservatieve (overschatting) voorspelling geeft van de zeespiegelstijging voor de gegeven periode.
- Op basis van het meetplan Waddenzee zijn in 2015 GPS metingen in de Waddenzee uitgevoerd op 28 peilmerken van de clusters in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag, is er een waterpassing uitgevoerd rondom het Lauwersmeer en zijn op een zestal ondergrondse merken GPS metingen verricht. De resultaten hiervan zijn gerapporteerd in Referentie 14. Tevens zijn er GPS metingen verricht in het Lauwersmeer. Verder zijn er 5 nieuwe peilmerkclusters geplaatst in de Waddenzee. Alle metingen zijn gebruikt in de kalibratie van de modellen.
- De continue GPS metingen op de locaties boven de gasvelden Ameland, Anjum en Moddergat, die respectievelijk in juni en december 2006 zijn gestart (nog vóór aanvang van de productie in Nes en Moddergat), zijn in 2015 voortgezet. De modellen volgen deze metingen redelijk tot goed, waarbij opgemerkt dient te worden dat de kalibratie van het model wordt gedaan op basis van alle beschikbare metingen. Een betere kalibratie aan de GPS metingen kan worden gerealiseerd maar dit zou met de huidige modellen betekenen dat andere meetpunten een groter verschil zullen laten zien t.o.v. de modelresultaten.
- Voor de modellering van de bodemdaling ten gevolge van gasproductie 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" (Referentie 8). Dit geomechanisch model wordt in meer detail beschreven in Referentie 3 en Referentie 13. Het model inclusief de geomechanische parameters is ongewijzigd t.o.v. het model dat voor de M&R 2014 rapportage is gebruikt.
- De voorspelde bodemdalingssnelheid over de komende 20 jaar is lager dan voorspeld in de M&R cyclus 2014. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de aanname van residueel gas in de aquifers. Deze aanname zorgt ervoor dat er minder drukdaling plaatsvindt en zal plaatsvinden in de aquifers. Deze verminderde aquiferdepletie en daarmee gepaarde verminderde bodemdaling rond het veld Vierhuizen heeft de grootste invloed op de verminderde bodemdalingssnelheid in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag.
- Een verbeterde procedure voor het overbrengen van de druinformatie naar de geomechanische modellen heeft eveneens tot gevolg dat de bodemdalingssnelheid lager is dan getoond in de M&R 2014 rapportage.
- Er is geen integrale onzekerheidsanalyse uitgevoerd voor de gehele keten van de modellering maar wel een analyse voor componenten binnen deze keten. Er zijn een aantal realisaties geleverd van mogelijke reservoirdrukken per voorkomen en er is een Monte-Carlo onzekerheidsanalyse doorgevoerd op basis van de geomechanische parameters.
- Bij het opstellen van de realisaties van de dynamische reservoir modellen voor Anjum, Ameland en de Wadden voorkomens is de mobiliteit van de aquifer gevarieerd. Dit is geheel in lijn met de vorig jaar al ingezette verbetering van het

dynamisch modeleren in dit gebied. Voor alle voorkomens zijn 3 realisaties gemaakt, allen met een andere mobiliteit die een functie is van de saturatie van het residuele gas en de permeabiliteit van het gesteente in de aquifer.

- Een combinatie van deze realisaties toegepast op verschillende voorkomens heeft geleid tot de definitie van een laag, basis en hoog bodemdalingsscenario.
- Volgens het basisscenario zal de bodemdaling de gebruiksruimte rond het jaar 2035 in Zoutkamperlaag overschrijden. Dit scenario past het best met de beschikbare metingen. In Pinkegat wordt de gebruiksruimte volgens het verwachte scenario na 2036 overschreden.
- De meet- en regelcyclus stuurt op basis van de verwachtingswaarde voor de belasting dat uitgaat van het basisscenario. Aangezien de bodemdaling volgens het basisscenario binnen de gebruiksruimte valt (in ieder geval voor de komende 18 jaar), worden er geen maatregelen genomen om de productie bij te stellen.

# Inhoud

1	Inleiding .....	8
2	Deelprocessen .....	10
2.1	Metten (stap 1).....	10
2.1.1	Vlakdekkende metingen.....	10
2.1.2	Reservoir monitoring.....	10
2.2	Analyseren meetgegevens (stap 2).....	11
2.2.1	Kwaliteitscontrole en bodemdalingsberekening.....	11
2.2.2	Resultaat bodemdalingsanalyse .....	11
2.2.3	Waddenzee voorkomens .....	11
2.2.4	Continue GPS metingen .....	12
2.3	Verifiëren prognose (stap 3).....	12
2.3.1	Overzicht veranderingen reservoirsimulatiemodellen t.o.v. M&R2014.....	12
2.3.2	Kalibratie reservoirsimulatiemodellen.....	13
2.3.3	Ameland realisaties.....	15
2.3.4	Gaswinningsprognose .....	16
2.4	Modellering bodemdaling .....	17
2.4.1	Opstellen van bodemdalingsscenario's: minimum, laag, basis, hoog en maximum .....	17
2.4.2	Modellering bodemdaling Ameland .....	18
2.4.3	Modellering bodemdaling Anjum en Wadden voorkomens.....	18
2.4.4	Belangrijkste verschillen tussen de M&R 2014 en M&R 2015 bodemdalingsmodellen .....	21
2.4.5	Onzekerheid van de geomechanische parameters in de gemodelleerde bodemdaling .....	23
2.5	Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4).....	29
2.5.1	Bepaling volume en gemiddelde daling.....	29
2.5.2	Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting rapportagejaar 2015 met onzekerheid .....	31
2.5.3	Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting .....	32
2.6	Indien nodig aanpassen productie (stap 5) .....	34
2.7	Actualiseren (stap 6).....	34
2.7.1	Bodemdaling GPS locaties op Moddergat en Ameland.....	36
3	Kwaliteitsborging.....	38
4	Conclusies .....	39
5	Referenties .....	41
	Bijlage 1. Gemodelleerde en gemeten bodemdaling 2014 .....	42
	Bijlage 2 .....	44
	Bijlage 3 Verwachte bodemdaling in het jaar 2050 .....	45
	Bijlage 4 Werkplan Long Term Subsidence Fase II (LTS-II) .....	46
	Introductie .....	46
	LTS-II en de Meet- & Regelcyclus .....	47
	Samenwerking.....	48
	Basis voor het werkplan .....	48
	De opdracht voor LTS-II .....	48
	Workshop LTS-II .....	49
	Hoofdcomponenten van het werkplan .....	49
	Ondergrondse gegevens, modellen, metingen en onzekerheid .....	49

Reservoir/geologisch model .....	50
Geomechanisch model .....	51
Geodetische gegevens en onzekerheid .....	52
Confrontatie en combinatie van de ondergrondse kennis met de bovengrondse geodetische informatie .....	52
Verdere uitwerking van de scenario's voor Ameland .....	54
Uitkomsten van deze studie .....	55
Projectmanagement en communicatie naar de stakeholders .....	56
Communicatie met de stakeholders .....	56
Commissievergaderingen .....	57
Meet- en Regelcyclus rapportage en de AuditCie .....	57
Jaarlijks .....	57
Tijdsplan van de studie .....	58
Referenties .....	59
Appendix A .....	60

# 1 Inleiding

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 verzoek om instemming op een wijziging van dit winningsplan ingediend (Referentie 1), alsmede voor wijzigingen van de winningsplannen Anjum en Ameland. In 2013 heeft de minister ingestemd met deze wijzigingen voor de winningsplannen (Referentie 12).

Als onderdeel van de voorschriften behorende bij het voornoemde winningsplan is een Meet- en regelprotocol opgesteld (Referentie 18), waarmee de Inspecteur Generaal der Mijnen (IGM) heeft ingestemd bij brief van 2 februari 2007. NAM heeft in 2012 ten genoegen van de IGM een wijziging van dit protocol met de bijbehorende technische bijlage ingediend (Referentie 11 en Referentie 3).

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. Tenslotte is het voorkomen Lauwersoog C in juni 2012 in productie genomen. Samen vormen deze voorkomens de "Wadden voorkomens".

Voor het jaar 2015 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. Deze deelprocessen zijn:

1. Meten
2. Analyseren meetgegevens
3. Verifiëren prognose
4. Berekenen volume en gemiddelde daling
5. Indien nodig aanpassen productie
6. Actualiseren

Hierna volgt een hoofdstuk over de kwaliteitsborging, zoals eveneens beschreven in het Meet- en regelprotocol. Als laatste worden alle conclusies van de Meet- regelcyclus 2015 nog op een rij gezet.

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 gemeten bodemdaling. (Figuur 3 en Figuur 4).
2. Tabellen met de jaarlijkse toename van het bodemdalingsvolume (inclusief onzekerheid) per voorkomen per kombergingsgebied voor de jaren 2005 t/m 2018 (Tabel 2-6 en Tabel 2-7)
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 2-8).
4. De in een bepaald jaar gerapporteerde belasting B wordt berekend voor de situatie op 1 januari van dat jaar. Voor de rapportage in 2016 (over het jaar 2015) wordt op



deze manier een B voor 1 januari 2016 berekend.

5. Grafieken met de bodemdalingsbelasting voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag vanaf start productie op de locatie Moddergat tot 2040 (Figuur 14 & Figuur 15).
6. Voor de voorkomens in het winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen: drukdata per put op reservoirniveau en productie data van het rapportagejaar (Tabel 2-1 en Tabel 2-2).
7. Geplande productie per voorkomen (jaarprofiel; Tabel 2-5).
8. Gemeten en geprognoseerde bodemdaling op de permanente GPS locaties (Ameland, Moddergat en Anjum), inclusief onzekerheid (Figuur 18, Figuur 19, Figuur 20).

#### Terminologie

In het document zullen veelvuldig de termen *realisatie* en *scenario* gebruikt worden.

- Bij *realisatie* wordt bedoeld op de variatie van parameters binnen het reservoirmodel, die tot een bepaald *drukprofiel* in het *reservoir* en onderliggend en aangrenzend watervoerend pakket zal leiden.
- Bij *scenario* wordt bedoeld op een combinatie van reservoir realisaties in combinatie met aannames over de geomechanische parameters. Deze zullen tot een bepaald *bodemdalingsprofiel* in de kombergingsgebieden leiden.

## 2 Deelprocessen

Op basis van de tot en met het jaar 2015 verzamelde data 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 bodemdaling, 4. Berekenen volume en gemiddelde daling, 5. Indien nodig aanpassen productie en 6. Actualiseren prognose bodemdaling. Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van deze 6 deelprocessen voor het rapportagejaar 2015.

### 2.1 Meten (stap 1)

#### 2.1.1 Vlakdekkende metingen

Volgens het meetplan voor de Waddenzee zijn in 2015 GPS metingen in de Waddenzee uitgevoerd op 28 peilmerken van de clusters in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. Tevens zijn er 5 nieuwe peilmerkclusters geplaatst. De GPS metingen op het Wad zijn in Referentie 5 beschreven.

De resultaten van de permanente GPS metingen zijn maandelijks aan SodM gerapporteerd. In plaats van een GPS meting elke 3 jaar op de platforms AWG1 en AME2 zijn ook daar in september 2014 permanente GPS stations geplaatst. Gebleken is, dat de metingen sterk afhankelijk zijn van temperatuurschommelingen. De meetwaarden dienen derhalve eerst gecorrigeerd te worden alvorens deze gebruikt kunnen worden in de kalibratie van de geomechanische modellen.

Verder is er een waterpassing uitgevoerd rondom het Lauwersmeer en zijn op een zestal ondergrondse merken GPS metingen verricht. De resultaten hiervan zijn gerapporteerd in Referentie 14. Tevens zijn er GPS metingen verricht in het Lauwersmeer.

#### 2.1.2 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 2015.

**Tabel 2-1 Meest recente resultaten van reservoirdrukmetingen.**

Velden	Datum	Put	Druk op reservoir niveau (bara)
Lauwersoog-Centraal	22/04/2015	LWO-2	188 (@ 3700 mTVDNAP, MGT-2)
Lauwersoog-Oost	23/04/2015	LWO-1B	187 (@ 3700 mTVDNAP, MGT-3)
Lauwersoog-West	24/04/2015	LWO-3	154 (@ 3860 mTVDNAP)
Moddergat	22/04/2015	MGT-1B	205 (@ 4035 mTVDNAP)
Nes	27/04/2015	MGT-3	260 (@ 4060 mTVDNAP)
Vierhuizen-Oost	09/08/2014	VHN-1C	114 (@ 3850 mTVDNAP)

**Tabel 2-2 Productie per voorkomen tot en met 31/12/2015.**

<i>Velden</i>	<i>Cumulatieve productie t/m 2015 (106 Nm3)</i>	<i>Productie volgens 2011 winningsplan in 2015 (106Nm3)</i>	<i>Actuele productie in 2015 (106 Nm3)</i>
<i>Nes</i>	<i>7744</i>	<i>1351</i>	<i>930</i>
<i>Moddergat</i>	<i>3577</i>	<i>209</i>	<i>280</i>
<i>Lauwersoog-C</i>	<i>107</i>	<i>3</i>	<i>10</i>
<i>Lauwersoog-West</i>	<i>1206</i>	<i>89</i>	<i>82</i>
<i>Lauwersoog-Oost</i>	<i>1729</i>	<i>137</i>	<i>146</i>
<i>Vierhuizen-Oost</i>	<i>1434</i>	<i>35</i>	<i>75</i>
<i>Totaal</i>	<i>15797</i>	<i>1824</i>	<i>1523</i>

*\*Afwijking van de actuele productie t.o.v. de winningsplan productie valt binnen de toegestane bandbreedte.*

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

### **2.2.1 Kwaliteitscontrole en bodemdalingsberekening**

De GPS metingen zijn volgens de in Referentie 5 beschreven GNSMART methodiek geanalyseerd. Hierbij wordt een twaalfstal permanente stations als vaste (statische) referentie gebruikt. De coördinaten van deze stations zijn voorafgaand aan de 2015 campagne in een aparte analyse over een periode van zes weken bepaald. De lange termijn beweging van deze stations evenals de invloed van geconstateerde relatieve bewegingen op de hoogten van de monitoringstations is onderzocht in Referentie 6.

### **2.2.2 Resultaat bodemdalingsanalyse**

#### **2.2.3 Waddenzee voorkomens**

De ellipsoidische hoogteverschillen van de wadpunten worden sinds 2006 met GPS bepaald. Voor het omrekenen naar orthometrische hoogteverschillen wordt sinds 2006 gebruikgemaakt van het NLGEO2004 geoidemodel (Referentie 7).

De hoogteverschillen t.o.v. het referentiepeilmerk van een aantal wadpunten (oorspronkelijke Rijkswaterstaat punten) zijn tijdens de nulmeting in 1986 direct orthometrisch bepaald d.m.v. optische waterpassing (m.b.v. optisch instrument) / hydrostatische waterpassing (middels lange flexibele buis/slang).

Voor de interpretatie van Figuur 4 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, initiële gemiddelde zetting van de NAM peilmerken van gemiddeld 5 mm). Uit het in 2008 en 2009 uitgevoerde stabiliteitsonderzoek (zie Meet & Regel rapportages 2008 en 2009) blijkt:

- de relatieve stabiliteit van de peilmerken voor de periode 2008-09 is gemiddeld 0,4 mm (voor de periode 2006-2008: 5 mm).
- de tussen 2008 en 2009 geconstateerde relatieve peilmerkbewegingen per cluster vallen grotendeels binnen de meetruis.

Hoewel verondersteld kan worden, dat zetting heeft plaatsgevonden voor alle 3 nieuw geplaatste peilmerken van een cluster wordt voor de verdere analyse de meetwaarden van het meest stabiele peilmerk (zoals bepaald in het stabiliteitsonderzoek) gebruikt en als zodanig meegenomen in de kalibratie van het geomechanisch model.

## 2.2.4 Continue GPS metingen

Als onderdeel van het Meet- en regelprotocol worden continue GPS metingen uitgevoerd op de locaties Ameland, Moddergat en 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 Ameland, Moddergat en Anjum. Voor de bepaling van de snelheid en bijbehorende standaardafwijking wordt rekening gehouden met de correlatie van hoogteschattingen in de GPS tijdserie. Het GPS-sigitaal in tijd wordt in Figuur 18, Figuur 19 en Figuur 20 getoond. Tevens zijn er in 2014 GPS antennes geplaatst op de AWG en AME productieplatforms. Analyse na meer dan een jaar meten wijst uit, dat de metingen sterk afhankelijk zijn van temperatuurschommelingen, waardoor eerst correcties uitgevoerd moeten worden, alvorens deze te gebruiken in de kalibratie van de geomechanische modellen.

Tabel 2-3 Gemeten daling en dalingssnelheid op de locaties m.b.v. continue GPS metingen

Locatie	Daling van 05/02/07 t/m 31/12/2015 [mm]	Dalingssnelheid in 2015 [mm/jaar]
Ameland	61	6,4 [ $1\sigma = 1,0$ mm/jaar]
Anjum	34	3,6 [ $1\sigma = 0,4$ mm/jaar]
Moddergat	28	3,9 [ $1\sigma = 0,7$ mm/jaar]

## 2.3 Verifiëren prognose (stap 3)

### 2.3.1 Overzicht veranderingen reservoirsimulatiemodellen t.o.v. M&R2014

De jaarlijkse update van de reservoirmodellen, die per voorkomen worden opgesteld, resulteert in enkele veranderingen. Hieronder volgt een overzicht van de belangrijkste veranderingen.

- Voor alle velden zijn drie in plaats van twee realisaties gegenereerd. Vorig jaar had alleen Ameland drie realisaties en dit is nu gelijkgetrokken voor de overige voorkomens. Dit jaar is voor deze voorkomens een derde realisatie geconstrueerd waarbij de aquifer gemodelleerd wordt met paleo-residueel gas (residueel gas dat voor de productie al aanwezig was in de aquifer). In generieke zin zorgt dit model voor een aquiferdrukdaling die tussen de hiervoor genoemde twee realisaties in zit. Dit residueel gasmodel vormt dan ook de basisrealisatie voor de bodemdalingmodellen.
- Nes en Ameland vormen een uitzondering op de hierboven genoemde realisatieverdeling, omdat meer informatie over de aquiferdrukdaling beschikbaar is. Voor beide voorkomens geldt echter ook dat paleo-residueel gas de basisrealisatie vormt.

#### Terminologie

In dit gedeelte wordt de term *GIIP* (gas-initially-in-place) veelvuldig gebruikt. Met deze term wordt het initiële volume aan gas in het voorkomen in normale condities (0°C, 1 atm) aangeduid. Het paleo-residuele gas in de aquifer wordt hierbij *niet* meegenomen om consistentie te behouden tussen de met modellen met en zonder paleo-residueel gas. Met GIIP wordt derhalve bedoeld: initieel gasvolume *boven* het vrije waterniveau.

Er zijn enkele kleine wijzigingen aangebracht in de statische (geologische basisstructuur) realisatie:

- Moddergat: Het statische model is aangepast, waarbij twee veranderingen hebben plaatsgevonden.
  - Het statische model is aangepast naar aanleiding van het residueel gas zoals gebruikt in de dynamische realisatie.
  - De verdeling van de absolute permeabiliteit is veranderd. Dit heeft gemiddeld geleid tot een daling van de permeabiliteit en derhalve de connectiviteit naar de zuidelijke delen van het veld.  
De effecten van deze twee veranderingen heffen elkaar grotendeels op.
- Bij Vierhuizen Oost is de realisatie met de immobiele aquifer geschrapt, omdat geen aanvaardbare passing verkregen kon worden met de beschikbare data. De lage en basisrealisatie zijn aan elkaar gelijk: gemodelleerd met paleo-residueel gas in de aquifer.

De verwachte productieprofielen van de nieuwe putten in het Nes veld (MGT-4 en MGT-5) en de mogelijke nieuwe putten in de voorkomens Lauwersoog-Oost en Moddergat zijn meegenomen in de productieprognoses voor deze M&R cyclus. Hoewel de putten MGT-4 en MGT-5 inmiddels zijn geboord, zijn de resultaten van de putmetingen te laat binnengekomen om de modellen hierop aan te passen. Mogelijke veranderingen hierdoor worden in de volgende Meet&Regel rapportage meegenomen.

De aangepaste productieprofielen zijn gemaakt op basis van inschattingen waarbij het zeer waarschijnlijk is dat deze twee nieuwe putten in de toekomst een lagere productiecapaciteit krijgen dan op basis van de in dit rapport gebruikte inschatting.

### **2.3.2 Kalibratie reservoirsimulatiemodellen**

Met behulp van de geologische modellen zijn gedetailleerde driedimensionale dynamische modellen van de reservoirs gemaakt voor de Anjum voorkomens (Anjum, Ezumazijl, Metslawier), Wadden voorkomens (Lauwersoog-C, -Oost, -West, Moddergat, Nes en Vierhuizen-Oost) en de Ameland voorkomens. Deze reservoir modellen zijn gekalibreerd op de meest recente productie- en drukdata.

De grootte en sterkte van de watervoerende laag is in het algemeen minder goed te bepalen op basis van de in de put gemeten drukdata en introduceert daardoor een veel grotere onzekerheid dan een mogelijke variatie van de GIIP en de permeabiliteit in de berekening van het bodemdalingsvolume. De verschillende bodemdalingsscenario's zijn dan ook alleen op de variatie van de aquifermobiliteit gebaseerd.

Extra kennis over de hoeveelheid drukdaling in de watervoerende pakketten is verkregen op basis van geodetische informatie rond de Ameland en Anjum velden. Deze informatie geeft aan dat er slechts beperkte bodemdaling plaatsvindt boven deze watervoerende pakketten. Daarmee is het onwaarschijnlijk dat er snelle drukdaling plaatsvindt in deze pakketten (Referentie 13). De aangenomen theorie hiervoor is tweeledig. Ten eerste is op basis van kernmetingen aangetoond dat de permeabiliteit van de watervoerende laag meestal lager is dan voor de gasvoerende laag door de aanwezigheid van kleideeltjes beneden het gas-water contact. Tevens reduceert het paleo-residueel gas in de watervoerende laag de permeabiliteit (Referentie 15)

Per voorkomen zijn drie realisaties opgesteld, waarbij de mobiliteit van de aquifer bepalend is. Voor alle velden behalve Nes zijn de realisaties als volgt opgesteld:

- De eerste realisatie (lage drukdaling) gaat uit van een immobiele aquifer.

- Bij de tweede realisatie (verwachte drukdaling) is paleo-residueel gas expliciet gesimuleerd en zorgt daarmee voor een geringere aquifermobiliteit vanwege de geringe relatieve permeabiliteit.
- Een derde realisatie (hoge drukdaling) gaat uit van een volledig mobiele aquifer, waarbij de aquifer eenzelfde permeabiliteit heeft als het gas. De aquifer bevat in deze realisatie geen residueel gas. Bij deze realisatie is bovendien ook de breukdoorlaatbaarheid gemaximaliseerd, zolang de dynamische putdata dat toelaten.

Voor het Nes en Ameland voorkomen zijn de realisaties anders opgesteld, omdat er meer data beschikbaar is voor deze voorkomens. Voor Nes is de verticale permeabiliteit aangepast terwijl voor het Ameland aquifer de gemeten bodemdaling bepalend is voor de drukrealisaties.

Een overzicht van de alle opgestelde realisaties is weergegeven in Tabel 2-4.

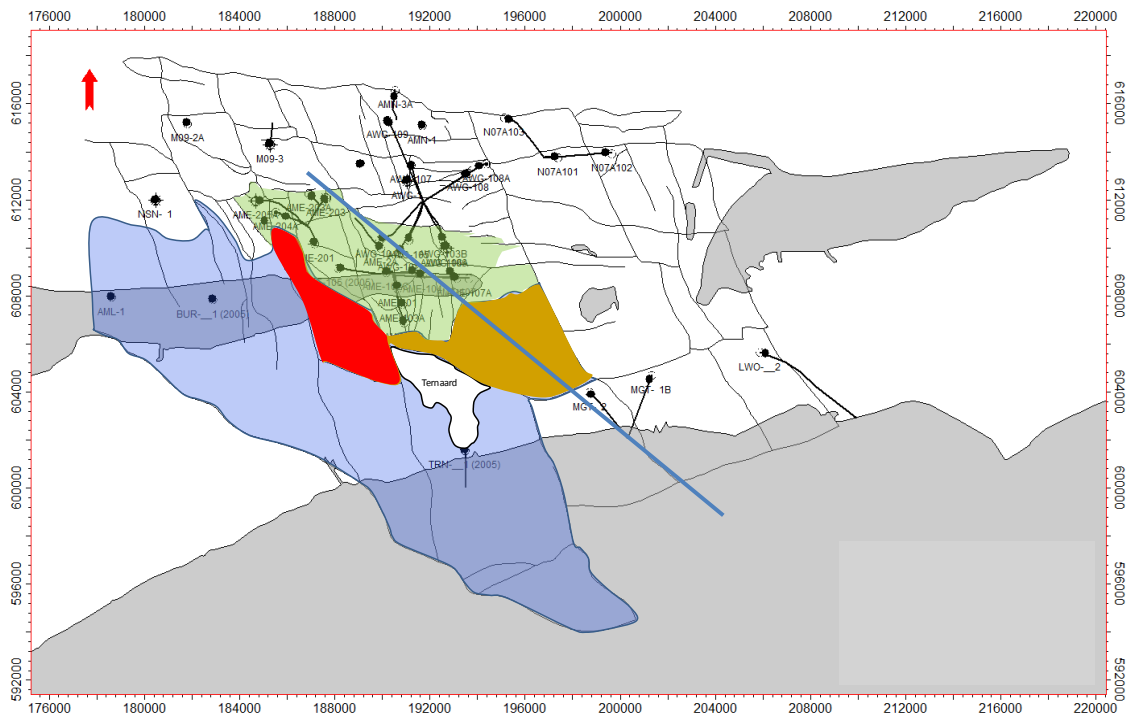
**Tabel 2-4 Overzicht van de opgestelde realisaties**

Voorkomen	realisatie #	Paleo-residueel gas (%)	Permeabiliteits-factor aquifer t.o.v. permeabiliteit reservoir	Permeabiliteits-factor ROSLU2 kleilaag.	Aquifer-druk gepast op meting
Ameland	laag	15	0,3	nvt	GPS Waddenzee
Ameland	basis	15	0,5	nvt	GPS Waddenzee
Ameland	hoog	15	0,7	nvt	GPS Waddenzee
Anjum	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Anjum	basis	6	0,1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Anjum	hoog	0	1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Ezumazijl	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Ezumazijl	basis	17	0,1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Ezumazijl	hoog	0	1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauwersoog-C	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauwersoog-C	basis	24	0,1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauwersoog-C	hoog	0	1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauwersoog-Oost	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauwersoog-Oost	basis	23	0,1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauwersoog-Oost	hoog	0	1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauwersoog-West	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauwersoog-West	basis	21	0,3	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauwersoog-West	hoog	0	1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Metslawier	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Metslawier	basis	8	0,1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Metslawier	hoog	0	1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Moddergat	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Moddergat	basis	20	0,3	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Moddergat	hoog	0	1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Nes	laag	15	0,7	2·10 <sup>-4</sup>	RFT MGT-3
Nes	basis	15	0,3	0,03	RFT MGT-3
Nes	hoog	15	1,0	3,2	RFT MGT-3
Vierhuizen	laag/basis	16	0,3	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Vierhuizen	hoog	0	1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>

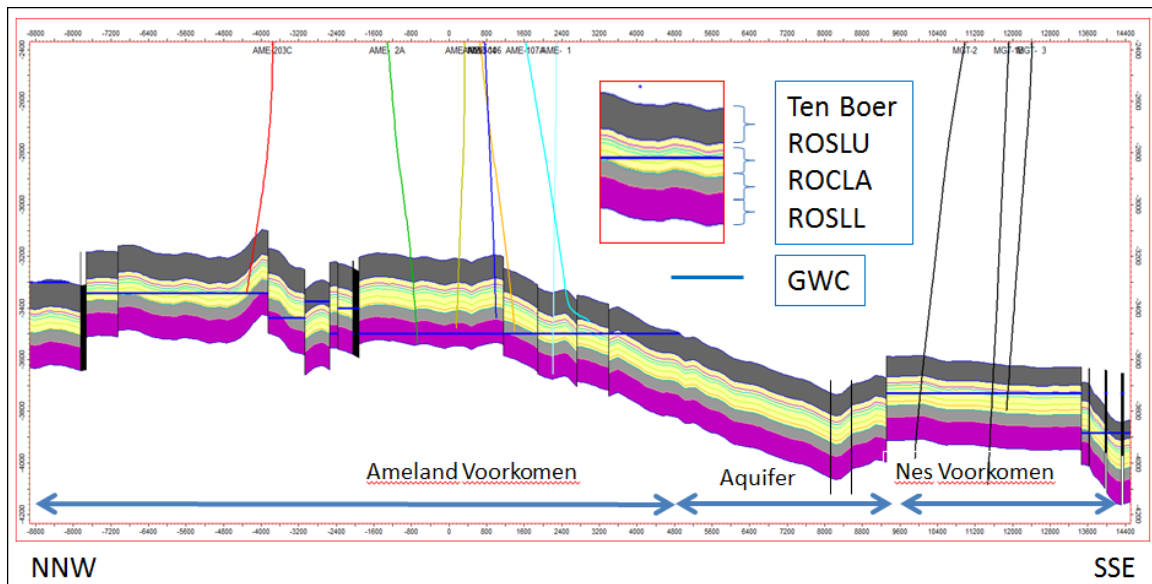
Voor meer details en figuren van alle dynamische data en modelpassingen voor de voorkomens in Tabel 2-4 wordt verwezen naar Referentie 17.

### 2.3.3 Ameland realisaties

Bodemdalingsmetingen in de Waddenzee tussen het voorkomen Nes en Ameland geven sinds 2014 aan dat er een zekere mate van bodemdaling heeft plaatsgevonden. De meest waarschijnlijke verklaring is dat de aquifers ten zuiden van Ameland langzaam in druk dalen. De rode en oranje aquifers in Figuur 1 tonen de in de modellen aangenomen actieve aquifers die door breuken met een groot verzet begrensd worden. De grote blauwe aquifer daalt waarschijnlijk niet in druk omdat er boven deze aquifer geen bodemdaling wordt gemeten. Figuur 2 toont een doorsnede van structuur rond de oranje aquifer. Het grote verzet tussen deze aquifer en het Nes voorkomen en het gebrek aan verzet met het Ameland voorkomen toont aan waarom depletie van de aquifer vanuit het Ameland voorkomen aannemelijk is. Uit het verschil in gas-water-contact (en de hoge initiële druk van Nes) blijkt bovendien dat de Nes- en Ameland voorkomens niet met elkaar in verbinding kunnen staan.



Figuur 1 Laterale aquifers van het Ameland voorkomen (rood en geel). De blauwe lijn geeft de doorsnede van Figuur 2 aan.



Figuur 2 Verticale doorsnede van de in Figuur 1 getoonde lijn.

Waar voor de andere velden een bodemdalingpassing gemaakt kan worden gemaakt met zowel immobiele als mobiele aquifers, is dit voor Ameland niet mogelijk. De onzekerheid in het aquifergedrag is kleiner op basis van de bodemdalingsdata en daarom is voor Ameland alleen de aquiferpermeabiliteitsfactor gevarieerd waarbij wordt uitgegaan van een vast percentage residueel gas (15%).

### 2.3.4 Gaswinningsprognose

De aanpassing van de reservoirmodellen heeft geresulteerd in een nieuwe prognose die nog steeds past binnen de vergunde productiebandbreedte op basis van de 2011 wnningsplannen (Referentie 1). Tabel 2-5 toont de jaarlijkse productie per voorkomen.

Tabel 2-5 Voorgenomen productie (miljoen m<sup>3</sup> per jaar) per voorkomen.

Jaar	Moddergat	Nes	Lauwersoog- Oost	Lauwersoog- West	Lauwersoog- C	Vierhuizen- Oost
2016	243	1163	128	82	8	55
2017	230	1160	104	87	11	61
2018	302	1012	330	84	11	-
2019	424	822	261	77	6	-
2020	247	652	193	71	-	-
2021	191	573	160	67	-	-
2022	154	485	131	63	-	-
2023	143	409	111	59	-	-
2024	134	344	92	56	-	-
2025	78	299	83	54	-	-
2026	77	240	74	49	-	-
2027	75	196	63	43	-	-
2028	73	151	-	-	-	-
2029	-	-	-	-	-	-
2030	-	-	-	-	-	-
Totaal	2371	7506	1730	792	36	116



De getallen van Tabel 2-5 bevatten ook de verwachte profielen van de nieuwe putten MGT-4 en MGT-5 in het Nes veld voordat deze waren geboord en de verwachte profielen van mogelijke toekomstige putten in Lauwersoog-Oost en Moddergat.

## 2.4 Modelling bodemdaling

De bodemdalingberekeningen worden sinds 2010 uitgevoerd met het eindige elementen programma "Geomec", een Shell applicatie die gebaseerd is op DIANA (<http://tnodiana.com>). Meer informatie over deze geomechanische modellen en de gebruikte invoergegevens is te vinden in Referentie 3. Recent is een vergelijking gemaakt tussen de resultaten van dit model en de resultaten die verkregen worden met een analytisch "Geertsma en van Opstal" model. De rekensnelheid van dit analytisch model is vele malen hoger waarmee het mogelijk wordt een probabilistische workflow in te bouwen om de onzekerheid te kwantificeren die geïntroduceerd wordt door de geomechanische parameters (Referentie 13). Daarnaast is het mogelijk om de compactiemodellen die beschreven zijn in Groningen winningsplan uit 2013 ook voor het Waddengebied in te brengen en te testen op de meetgegevens in het Waddengebied.

Naast het time-decay model wordt daarom ook het RTCiM (Rate Type Compaction isotach Model, Referentie 16) gebruikt binnen de analytische omgevingen. Van beide modellen worden de invoergegevens gevarieerd en vergeleken met de metingen.

### 2.4.1 Opstellen van bodemdalingsscenario's: minimum, laag, basis, hoog en maximum

Er is geen integrale onzekerheidsanalyse uitgevoerd voor de gehele keten van de modellering maar wel een analyse voor de delen. Er zijn per voorkomen een aantal realisaties geleverd van mogelijke reservoirdrukken waarbij de mobiliteit van de aquifer is gevarieerd.

Combinaties van deze reservoir realisaties hebben geleid tot het opstellen van een laag, basis en hoog bodemdalingsscenario voor de Wadden voorkomens. De Anjum, Ezumazijl en Metslawier voorkomens gelden hier als kalibratie, aangezien deze velden de langste productie- en meetgeschiedenis kennen (sinds 1997).

- Het lage bodemdalingsscenario wordt gevormd door de realisaties met een mobiel aquifer voor Anjum/Ezumazijl/Metslawier (hoge drukdaling in deze velden) en een immobiele aquifer voor de overige voorkomens (lage drukdaling in de overige velden). Om een goede passing van de gemodelleerde bodemdaling met de bodemdalingmetingen te verkrijgen, leidt in dit scenario de aanname van een mobiele aquifer in Anjum/Ezumazijl/Metslawier tot een verlaging van de gesteentecompressibiliteit, waardoor er in de toekomst minder daling zal optreden boven de Wadden voorkomens voor dit scenario.
- Het basisscenario wordt gedefinieerd door de realisaties met een geringe aquifer mobiliteit voor alle voorkomens. Deze verwachte drukrealisaties in combinatie met een gemiddelde gesteentecompressibiliteit, leidt tot het verwachte bodemdalingsscenario.
- Het hoge scenario wordt gevormd door de realisaties met een gering mobiele aquifer (verwachte realisatie) voor de velden Anjum, Ezumazijl en Metslawier te combineren met een volledig mobiele aquifer voor Ameland, Nes, Moddergat, LWO-C,-O,-W en Vierhuizen (hoge realisatie). De waarde van de gesteentecompressibiliteit is hiermee hetzelfde als in het basisscenario, en in combinatie met de mobiele Waddenzee-aquifers leidt dit hoge scenario tot de hoogste bodemdalingssnelheid in de Waddenzee.

De gebruikte stijfheid (Young's modulus) in de eindige elementen berekeningen past in alle scenario's binnen de bandbreedte van de gemeten waarden die volgen uit core plug experimenten.

Naast deze modellen zijn er ook geomechanische analytische modellen gebruikt om de onzekerheidsruimte te onderzoeken voor de twee compactiemodellen en bijbehorende parameters. Deze onzekerheidsruimte is begrensd door de root mean square (RMS) waarde die volgt uit vergelijking tussen de modelresultaten en de metingen. Maximum en minimum begrenzings zijn gebruikt boven op de bovengenoemde hoge en lage reservoirscenario's. Dit leidt tot de definitie van het minimum en maximum scenario:

- Het minimumscenario bestaat uit het lage (reservoir) scenario inclusief de minimumbegrenzing bepaald door de geomechanische onzekerheid.
- Het maximumscenario bestaat uit het hoge (reservoir) scenario inclusief de maximumbegrenzing bepaald door de geomechanische onzekerheid.

Door de combinatie van de maximale onzekerheden uit de verschillende modellen in de modelketen is de kans dat deze scenario's daadwerkelijk gelden verwaarloosbaar. In 2016 zal door NAM een vervolg worden gegeven aan de "long term subsidence study"<sup>2</sup>. Deze tweede fase heeft het doel om tot een geïntegreerde onzekerheidsanalyse te komen voor het veld Ameland. Het werkplan voor deze studie is volledig weergegeven in Bijlage 4 Werkplan Long Term Subsidence Fase II (LTS-II). In de M&R 2017 rapportage zal de nieuw ontwikkelde workflow ook worden toegepast op de overige Waddenvelden.

#### **2.4.2 Modelling bodemdaling Ameland**

De GPS metingen in de Waddenzee tussen Nes en Ameland tonen in 2014 een significante bodemdaling. De metingen in 2011 in dit gebied toonden deze bodemdaling (nog) niet omdat de meetpunten pas in 2009 stabiel waren en daarmee de meetperiode te kort was. De metingen in 2014 geven echter aanleiding om de ideeën over de mobiliteit van de aquifers te wijzigen. In 2011 was de gedachte om deze mobiliteit te reduceren op basis van bodemdalingmetingen ten zuidwesten van het gasreservoir. Deze metingen toonden en tonen aan dat de mobiliteit van de aquifer en daarmee gepaarde drukkaling waarschijnlijk gering is/was. De huidige metingen (na 2011) laten echter bodemdaling ten zuiden van het gasveld zien, waarvoor de meest waarschijnlijke verklaring drukkaling in de aquifer onder deze meetpunten is.

Voor Ameland zijn de dynamische reservoir scenario's voornamelijk gebaseerd op variatie in aquiferactiviteit onder het gasveld en ten zuiden en zuidwesten van het Ameland veld (rode en oranje vlakken in Figuur 1). Referentie 13 gaat in op de passing van het Ameland Geomec model met de metingen die vooral boven het eiland zijn gedaan. De tijdsconstante voor het "time-decay" compactie model is zeven jaar, evenals in de M&R 2014. De stijfheid van het reservoirgesteente is gelijk gebleven en wanneer deze wordt vertaald in een compressibiliteit, komt de waarde via de Cm-porositeitsrelatie op het gemiddelde van de core plug experimenten.

#### **2.4.3 Modelling bodemdaling Anjum en Wadden voorkomens**

Voor de Anjum voorkomens (Anjum, Ezumazijl en Metslawier) en de Wadden voorkomens blijft de Youngs modulus (12 GPa) gelijk aan die zoals vermeld in de M&R 2014. Ook de creep strain rate coëfficiënt ( $1,39 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ ) voor het steenzout boven het reservoir is gelijk gebleven aan die zoals gebruikt in de M&R 2014. De time decay constante in de M&R 2015 is op 5 jaar gezet voor deze voorkomens op basis van de metingen.

---

<sup>2</sup> Voor een overzicht van de rapporten zie <http://www.nam.nl/nl/downloads/reports-wadden/long-term-study-reports.html>

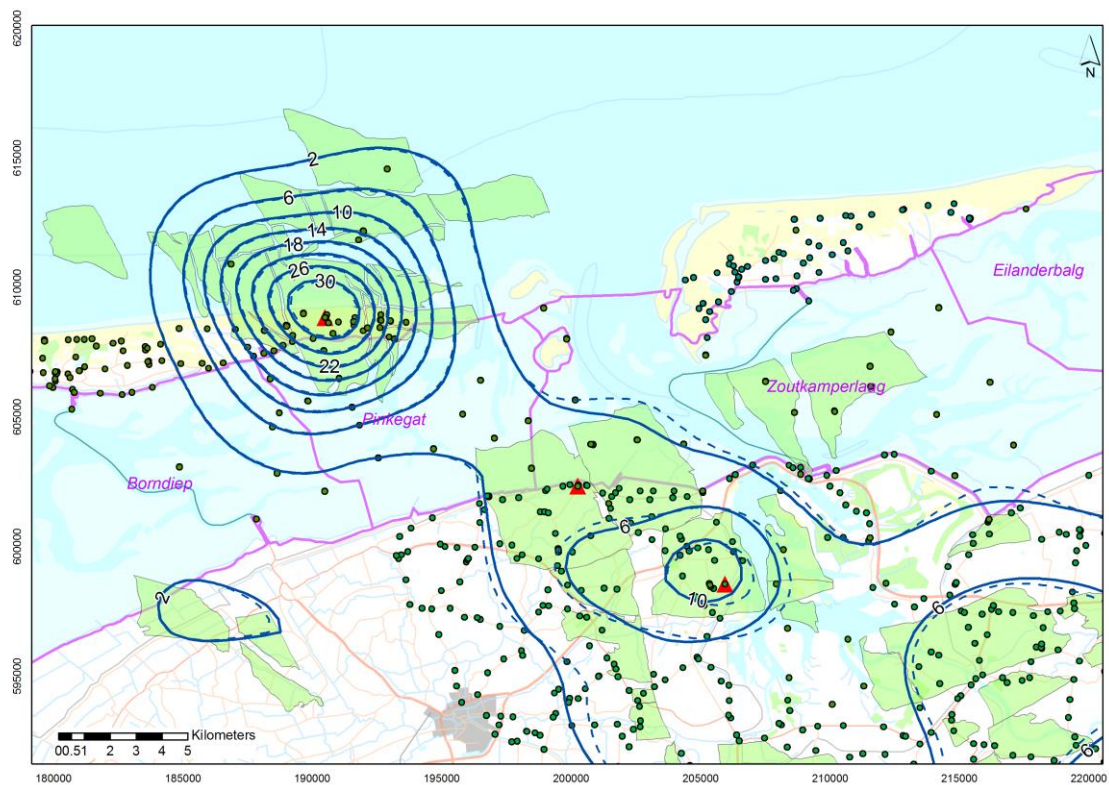
De passing van de gemeten daling en gemodelleerde daling is, in een eerste orde benadering, vergelijkbaar voor de verschillende compactiemodellen en rekenwijzen (analytisch en eindige elementen/geomec) wanneer de modellen optimaal worden gekalibreerd. Door de geringe verschillen is er niet één beste model of rekenwijze aan te wijzen. De belangrijkste observaties voor de M&R 2015 rapportage worden hieronder weergegeven:

- Het Geomec model zoals gebruikt in deze M&R 2015 rapportage overschat de bodemdaling op de Anjum GPS locatie. De analytische compactiemodellen laten, binnen een bepaalde RMS begrenzing, een onderschatting van de bodemdaling in het diepste punt zien.
- De toekomstige maximale bodemdaling boven Anjum is in de analytische berekeningen minder dan in de numerieke berekeningen, terwijl het totale bodemdalingsvolume in de analytische berekening meer is dan in de numerieke berekening. Dit is waarschijnlijk het gevolg van het visceus gedrag van zout dat er voor zorgt dat de bodemdaling kom smaller en dieper wordt. Dit gedrag wordt niet gemodelleerd in de analytische berekeningen.
- De bodemdalingsvolumes in de kombergingsgebieden die volgen uit beide rekenmethodes zijn vergelijkbaar.

Net als voor de M&R 2014 vormt het Geomec model de basis voor het genereren van de contourkaarten en de berekening van de bodemdalingssnelheden volgens het lage, verwachte en hoge scenario. Het RTCiM compactiemodel is niet beschikbaar in Geomec en is daarom niet gebruikt voor de base case. RTCiM is wel gebruikt in de analytische onzekerheidsberekeningen.

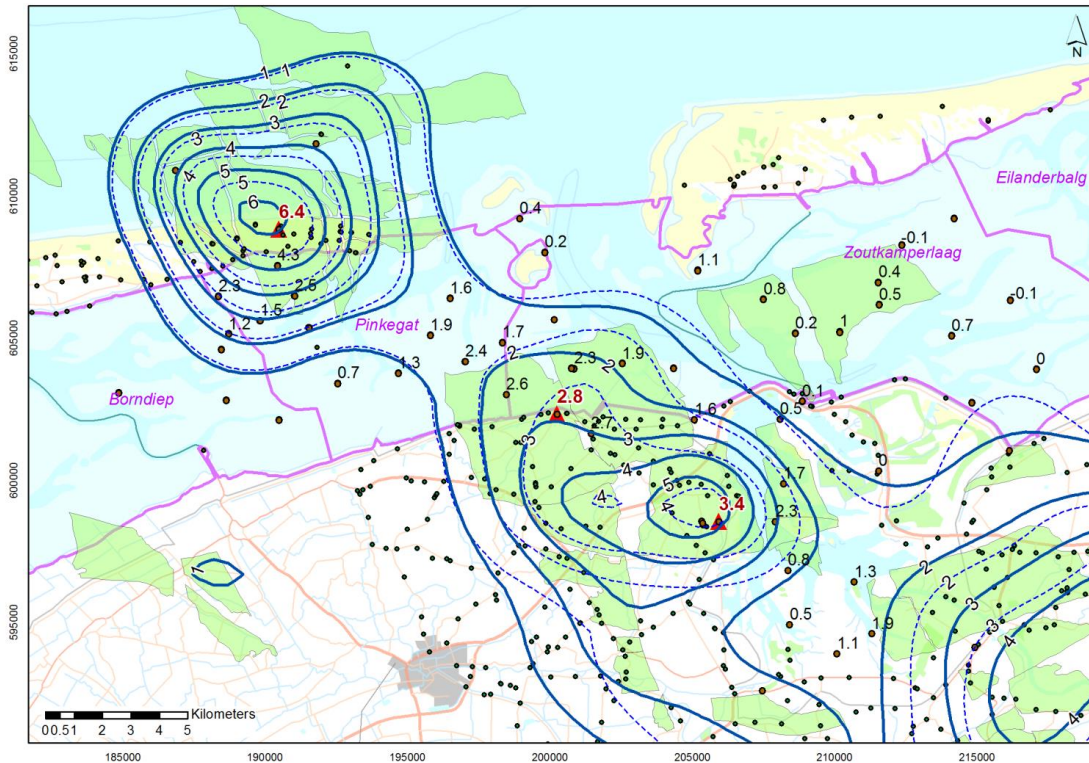
De geomechanische onzekerheid die volgt uit verschillende compactiemodellen en geomechanische parameters wordt m.b.v. deze analytische modellen geschat.

Figuur 3 toont de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens het basis scenario. De contouren zijn gepresenteerd voor 1-1-2015 omdat dit tijdstip het beste overeenkomt met het tijdstip van meten voor het merendeel van de metingen. De contouren weergegeven met een doorgetrokken lijn geven de bodemdaling weer die is gemodelleerd met de vernieuwde modellen en parameterwaarden. Ter vergelijking zijn de contouren (onderbroken lijn) weergegeven die het berekende resultaat weergegeven voor het jaar 2014 zoals gerapporteerd in de Meet- en regelrapportage van 2014 (Referentie 4).



**Figuur 3 Totale bodemdaling (status contour 1-1-2015) door gaswinning sinds de start van de productie. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling (gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2014 zoals beschreven in de M&R rapportage over 2014). Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 3 posities continue GPS metingen uitgevoerd sinds 2007 (rode driehoek). Bodemdaling in cm.**

Figuur 4 toont de gemeten en gemodelleerde daling in 2015 sinds de nulmetingen van 2006. De contouren zijn gepresenteerd voor 1-1-2015 omdat dit tijdstip het dichtst bij het tijdstip van de metingen ligt. Ook hier tonen de contouren, weergegeven met een doorgetrokken lijn, de bodemdaling die is gemodelleerd met de nieuwe modellen en parameterwaarden. Ter vergelijking geven de gestreepte contouren de gemodelleerde bodemdaling voor 2014 zoals gepresenteerd in het M&R rapport 2014 weer.



**Figuur 4 Bodemdaling (status contour 1-1-2015) door gaswinning sinds de nulmeting Waddenzee in 2006. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens de aangepaste/gekalibreerde geomechanische modellen (gestreepte contouren geven de bodemdaling 2014 weer zoals getoond in de M&R rapportage over 2014). De punten met label representeren de peilmerken met de gemeten hoogteverschillen vanaf 2006 (nulmeting Waddenzee) tot de laatst uitgevoerde meting in mei 2015. Rode waarden geven de daling aan van de permanente GPS stations in de periode feb. 2007- jan. 2016. Bodemdaling in cm.**

Voor de leesbaarheid zijn beide figuren in A4 formaat in bijlage 1 getoond. Het verwachte bodemdalingsmodel is tevens gebruikt om een voorspelling van de daling te maken voor 2050. Deze contourkaart wordt getoond in Bijlage 3.

#### **2.4.4 Belangrijkste verschillen tussen de M&R 2014 en M&R 2015 bodemdalingsmodellen**

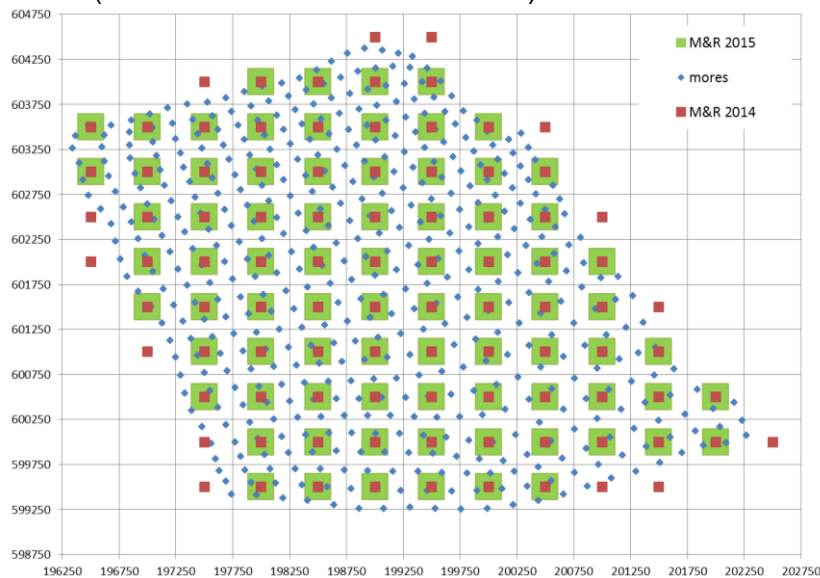
Hieronder volgt een beschrijving van de belangrijkste veranderingen die aangebracht zijn in de huidige M&R 2014 rapportage en die een gevolg hebben op de resultaten voor de bodemdalingsberekeningen.

- De combinaties van realisaties (scenario's) om tot het lage en het basis bodemdalingsscenario te komen, zijn vergelijkbaar met die in M&R2014. Voor het hoge bodemdalingsscenario werden in M&R2014 immobiele realisaties voor de velden Anjum, Ezumazijl en Metslawier gebruikt, en volledig mobiele aquifers voor de overige velden. De data die sinds M&R2014 is verkregen, is echter niet meer goed te passen met een combinatie van realisaties met een groot contrast in aquifermobiliteit. In een dergelijke combinatie van realisaties zijn de drukdalingsverschillen tussen Anjum/Ezumazijl/Metslawier enerzijds en de overige velden anderzijds te groot om een passend bodemdalingsmodel te krijgen voor het volledige Waddenzee gebied.
- Om een goede passing tussen meting en model te krijgen is er daarom nu gekozen om in het hoge scenario een geringe aquifer mobiliteit (verwachte realisatie voor de drukontwikkeling) voor Anjum, Ezumazijl en Metslawier te gebruiken. Met deze keuze blijft ook de waarde voor de compactiecoëfficiënt dicht bij de in het laboratorium gemeten waarden.



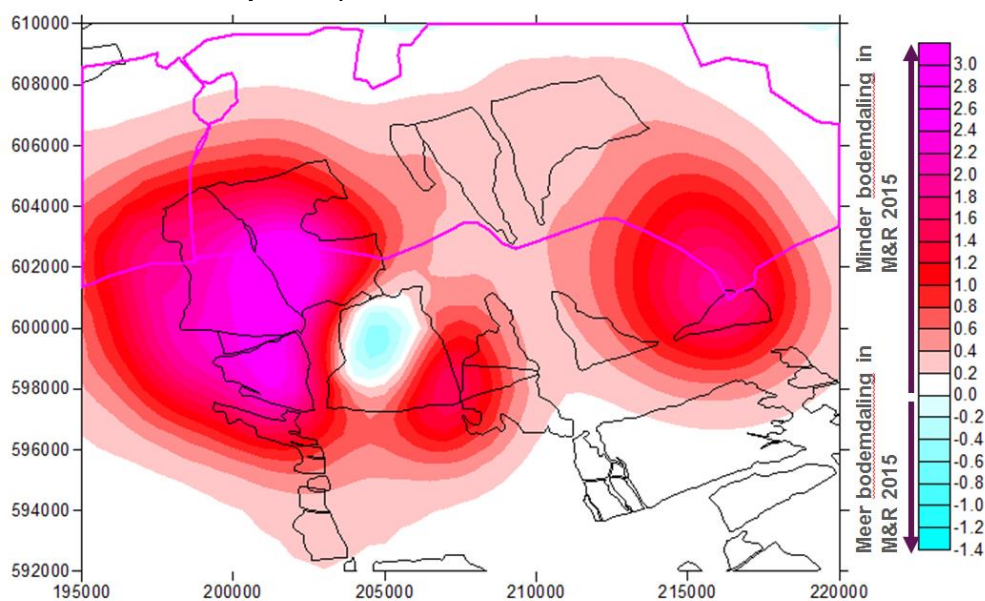
De drukdaling in het hoge scenario laat voor de Lauwersoogvelden en het Vierhuizen aquifer een hogere drukdaling zien dan in M&R 2014. Dit heeft tot gevolg dat de bodemdalingsnelheid in Zoutkamperlaag voor het hoge scenario in de huidige M&R 2015 rapportage hoger ligt dan die van de M&R 2014.

- Om een goede passing op zowel de absolute bodemdaling als de dalingstrend te krijgen, is de time decay constante voor alle velden behalve Ameland nu op 5 jaar gezet. Dit is hoger dan de 3 jaar in M&R2014, maar dichterbij de waarde van 7 jaar die gebruikt wordt in het Ameland model. De verandering naar een time decay waarde van 5 jaar geeft een betere passing met de GPS data op zowel Anjum als Moddergat.
- Er is een verbeterde procedure opgesteld voor de vertaling van de gridcellen uit het reservoir model Mores naar het geomechanisch compactiemodel. In de vorige M&R rapportages kreeg elke gridcel in het geomechanisch model een drukdaling mee zodra ook maar één drukpunt uit het Mores model zich binnen de grenzen bevond van de betreffende gridcel. De nieuwe routines geven slechts een drukdaling aan de geomechanische gridcel mee indien deze meer dan 50% bedekking heeft van drukpunten uit Mores. De actieve oppervlaktes van zowel het Mores model als het geomechanisch model komen hierdoor beter met elkaar overeen (Figuur 5). Dit heeft een significant effect op de bodemdalingsvolumes boven met name de kleinere velden (10-15% afname t.o.v. M&R 2014).



**Figuur 5** Overbrenging van druinformatie (blauwe punten) naar het grovere geomechanische grid. De bruinrode vierkantjes beschrijven het resultaat gebruikt in de vorige M&R rapportages. De groene vierkanten laten de bedekking zien voor het huidige geomechanische grid.

- De aanname van residueel gas in de aquifers zorgt er voor de aquifers minder zullen depleteren dan werd aangenomen in de M&R 2014. De gevolgen van de wijzigingen in de verwachte reservoirscenario's voor de bodemdaling zijn inzichtelijk gemaakt in Figuur 6. Op basis van de verwachte realisaties in de M&R 2014 en de huidige M&R 2015 zijn voorspellingen gemaakt voor de bodemdaling in 2030 in de Waddenzee. Wanneer deze resultaten van elkaar af worden getrokken (M&R 2014 - M&R 2015) laat de uitkomst zien dat bijna boven alle velden minder bodemdaling wordt voorspeld in 2030 voor de M&R 2015 basisrealisaties. Het effect van de verbeterde gridding in de M&R 2015, zoals beschreven in het vorige punt, is inbegrepen in dit vergelijk. In totaal levert dit een verschil in bodemdalingvolumes tussen de 12 en 30% t.o.v. de M&R 2014 resultaten. De afname in de verwachte druk van de aquifer rondom het veld Vierhuizen levert de grootste bijdrage aan de volume afname. Boven Anjum is in het noordwestelijk deel meer bodemdaling te zien omdat in de M&R 2015 cyclus wordt uitgegaan van een beperkte (bodem)aquifermobiliteit in het basisscenario terwijl de aquifer immobiel was in het M&R 2014 basisscenario.



**Figuur 6** Verschil in bodemdaling voor het jaar 2030 waarbij het de resultaten op basis van de huidige M&R 2015 reservoirrealisaties zijn afgetrokken van de resultaten op basis van de M&R 2014 reservoirrealisaties. In beide gevallen zijn de basisscenario's gebruikt.

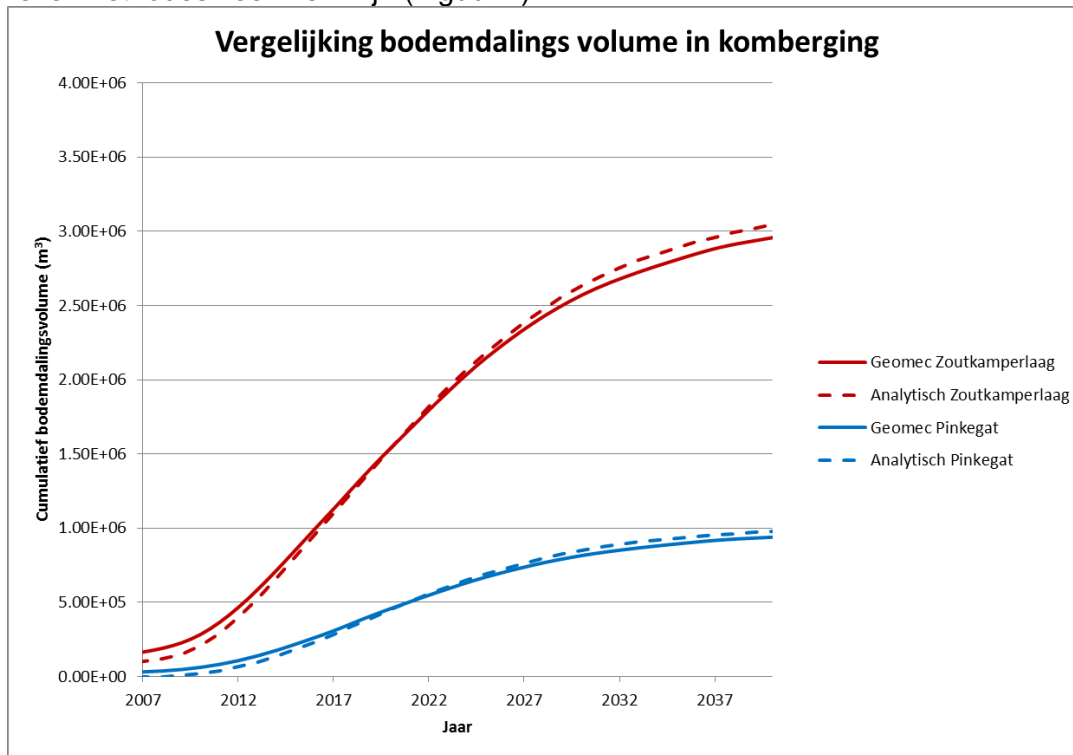
- Het hoge scenario daarentegen voorspelt nu een iets hogere belasting, doordat de aquifers nu ook mee depleteren in navolging van de veranderingen in het Ameland model. Het aquifer van Vierhuizen beslaat een groot gebied in vergelijking met de grootte van het gasveld. Daardoor wordt er in het hoge scenario met mobiele aquifers meer bodemdaling verwacht wordt dan in het geval van immobiele aquifers, zoals werd aangenomen in M&R2014.

#### 2.4.5 Onzekerheid van de geomechanische parameters in de gemodelleerde bodemdaling

Naast de statische en dynamische onzekerheid die leidt tot de definitie van laag, basis en hoog scenario wordt voor de Wadden voorkomens ook de onzekerheid meegenomen van het compactiegedrag en bijbehorende parameters. Hierbij wordt de onzekerheid onderzocht voor het time-decay model en RTCiM model mbv analytische modellen (zie ook Referentie 13 en Referentie 16).

In de meet en regelrapportage 2013 is voor het eerst een vergelijk gemaakt tussen de numerieke en de Geertsma en van Opstal berekeningen. Ook voor de huidige rapportage

geldt dat de verschillen in bodemdalingsvolumes die resulteren uit deze twee rekenmethodes zeer klein zijn (Figuur 7).



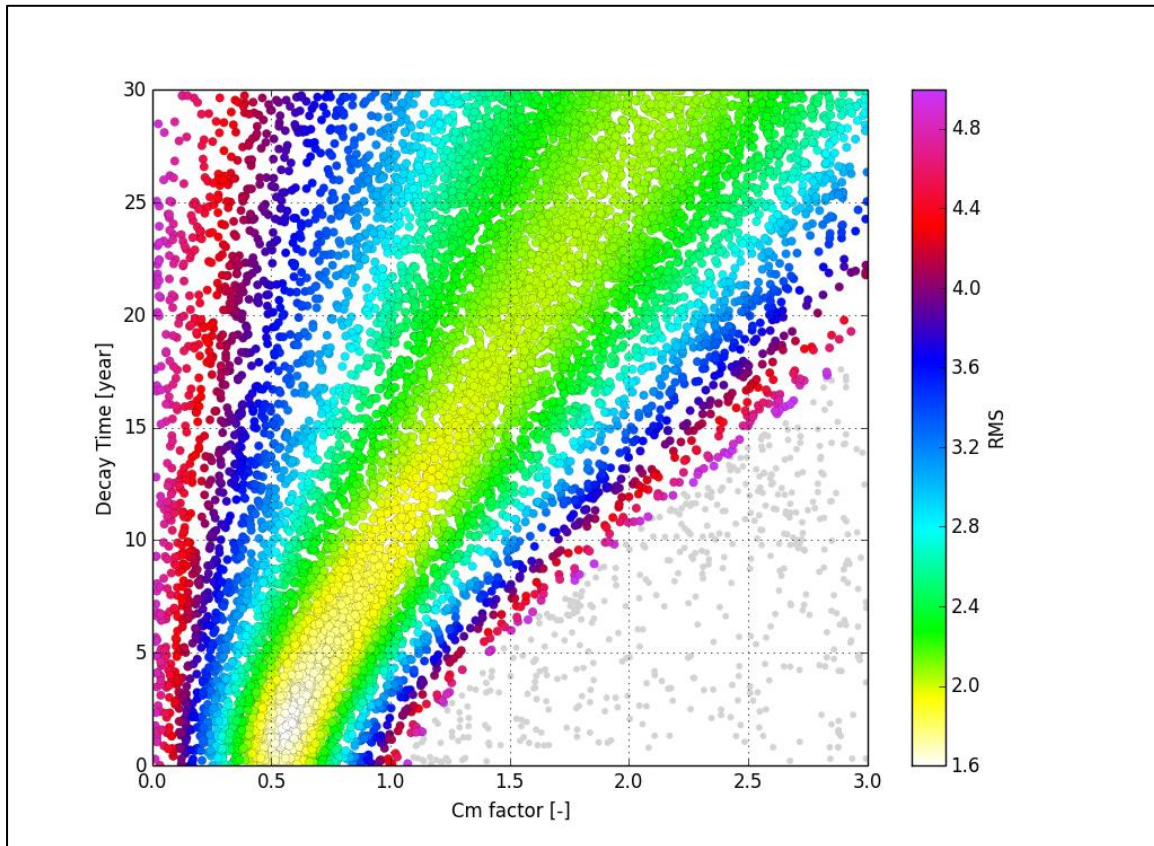
**Figuur 7** Vergelijking van het bodemdalingsvolume voor de Waddenzee velden in de beide kombergingen. Het volume is berekend met de numerieke (Geomec) en met het analytische (Geertsma en Van Opstal) methode voor het basisscenario.

Het grote voordeel van de analytische berekeningsmethode is het snel kunnen doorrekenen van de parameter variaties behorend bij verschillende compactiemodellen in de vorm van een Monte Carlo analyse. De resultaten van deze parameter variatie worden geconfronteerd met de resultaten van de metingen. Hierbij kan het verschil tussen model en meting uitgedrukt worden in de root mean square (RMS), waarbij een lage RMS aangeeft dat het modelresultaat beter past bij de meting. Het resultaat van deze Monte Carlo berekening voor het time-decay model is te zien in Figuur 8. Hierbij is het hoge bodemdalingsscenario als uitgangspunt gekozen om later het maximum scenario te bepalen.

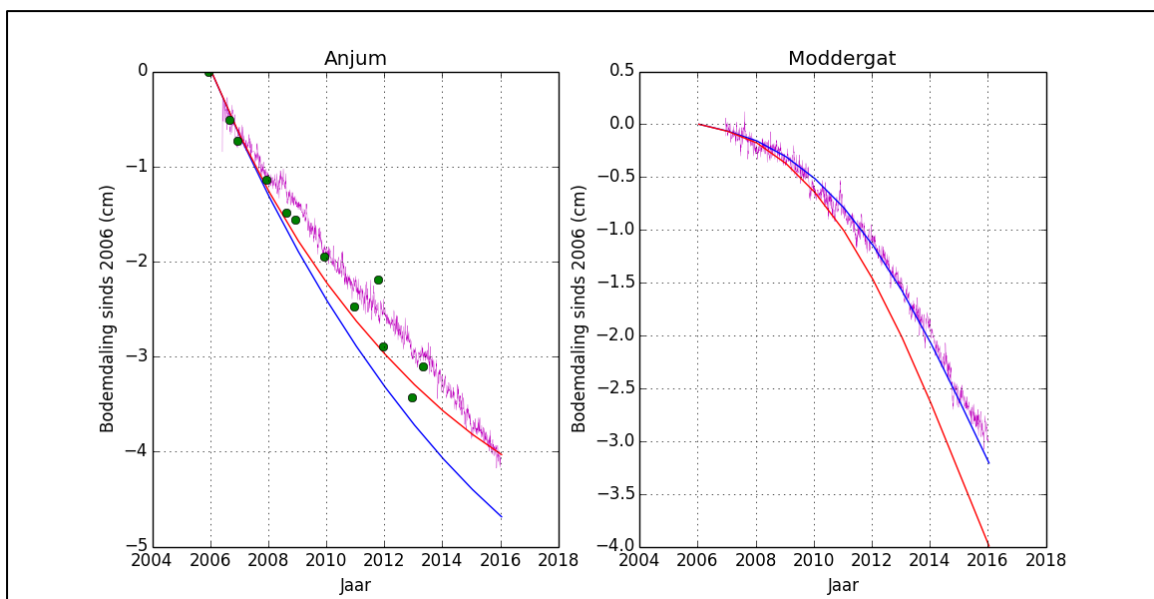
De Monte Carlo analyse wordt alleen gedaan voor de Wadden voorkomens. In alle analyses wordt aangenomen dat de  $C_m$  (compactiecoëfficiënt) afhankelijk is van de porositeit volgens een polynome trendlijn door de datapunten ( $C_m$  bij een gegeven porositeit) van de laboratoriumexperimenten op kernen (zie Referentie 13). In de parameter variatiestudie is gekozen om deze polynoom te variëren door middel van een vermenigvuldigingsfactor, de  $C_m$ -factor, die op de x-as in Figuur 8 te zien is. Op de Y-as is de time decay constante in jaar te zien. De kleuren zijn een indicatie voor RMS waarden. De beste parameter combinaties (resultierend in de laagste RMS) voor de gesteente parameters zijn volgens de grafiek een  $C_m$  factor van 0,5 tot 0,7 en een time decay constante van 1 tot 5 jaar. De eindige elementen modellering laat vergelijkbare resultaten zien voor een model met dezelfde waarden voor de time decay constante, echter de keuze voor de time decay constante heeft invloed op de bodemdalingssnelheid (of trend). Deze trend wordt in Figuur 9 vergeleken met het GPS signaal waarbij de verschillen te zien zijn tussen een numeriek model met 3 jaar (rode lijn) en met 5 jaar (blauwe lijn) en de continue GPS data (magenta) en pijlmerken (groen). Te zien is dat het model met een time decay van 3 jaar weliswaar beter past op de peilmerken met absolute bodemdalingsswaarden (vooral in Anjum), maar dat het model met 5 jaar time decay de trend van de continue GPS beter volgt. Het model met een time decay van 3 jaar beschrijft het bodemdalingsniveau nu nog goed, maar zal



deze in de toekomst waarschijnlijk gaan onderschatten. De voorspelling van het model met een time decay van 5 jaar lijkt de bodemdaling in de toekomst beter te kunnen beschrijven, en volgt ook de continue GPS data in Moddergat beter.



**Figuur 8, RMS versus Cm factor en Time decay constante voor het hoge scenario, de witte punten geven de beste passing met de metingen aan (RMS < 1,7).**

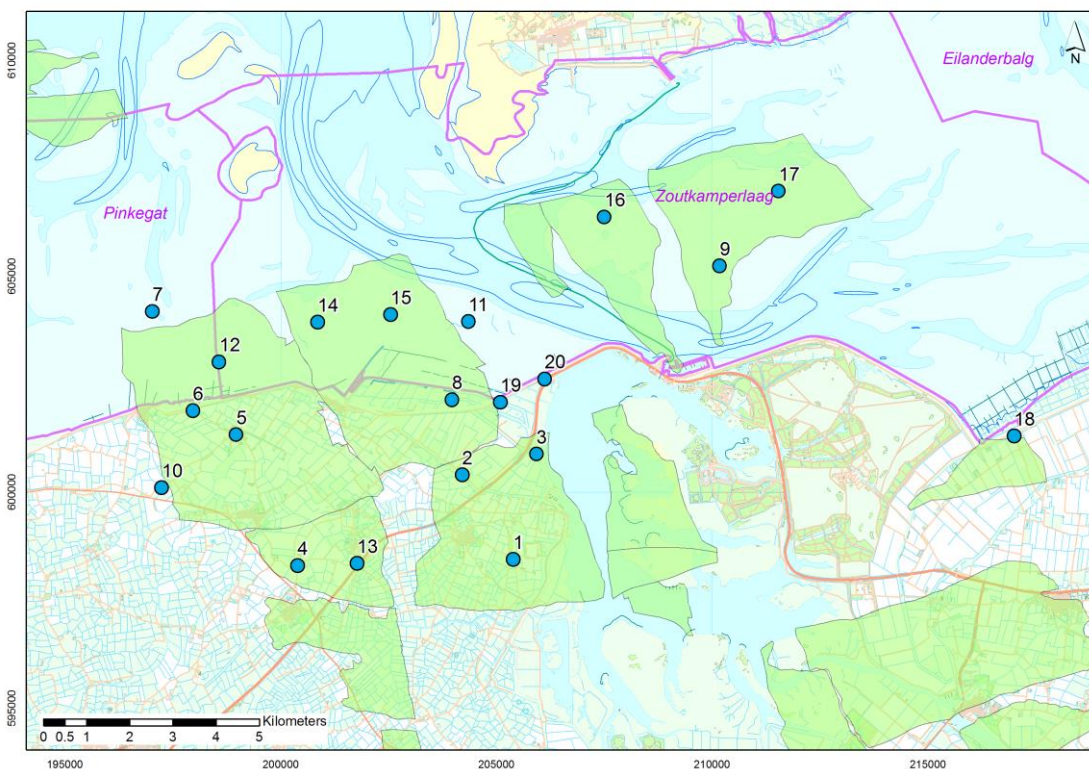


**Figuur 9, bodemdalingsmetingen van continue GPS (magenta) en peilmerken (groen), vergeleken met de numerieke berekeningen voor een time decay van 3 jaar (rood) en 5 jaar (blauw). Hoewel het model met 3**

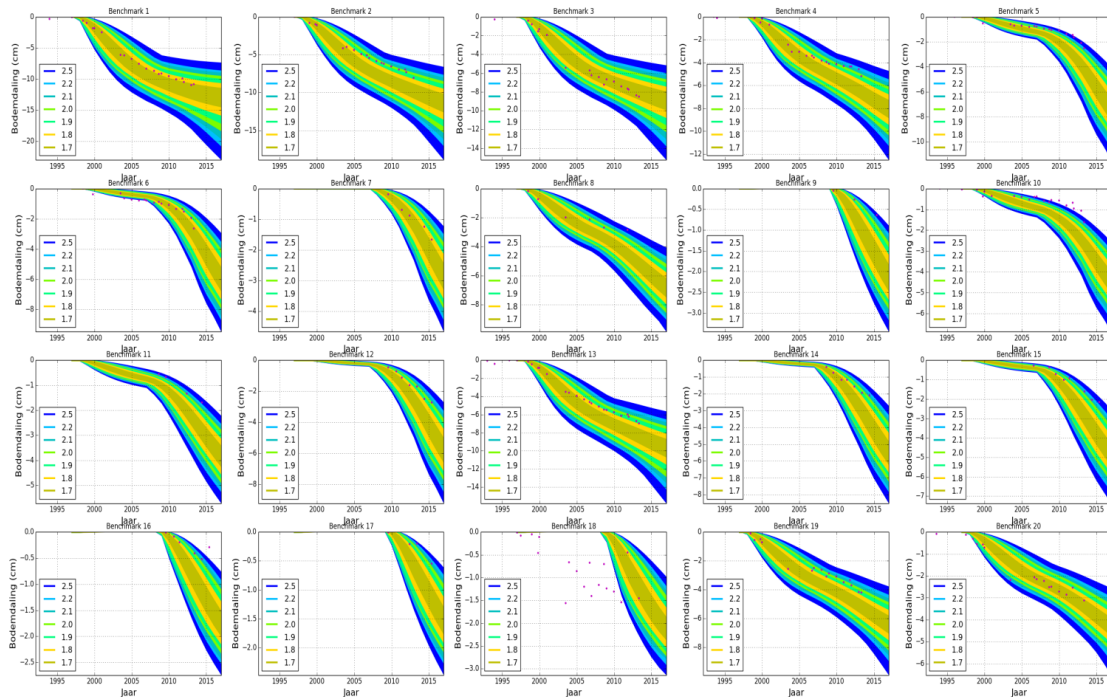
jaar dicht bij de data in Anjum ligt, volgt het model met 5 jaar de trend in de bodemdaling beter. NB: voor alle data en modellen geldt de bodemdaling vanaf 2006.

De passing van de Monte Carlo resultaten op het hoge bodemdalingsscenario met de gemeten bodemdaling voor een 20-tal geselecteerde peilmerken (op de locaties als in Figuur 10) is getoond in Figuur 11 ter illustratie. Voor de leesbaarheid is dit figuur in A4 formaat tevens in bijlage 2 getoond.

Deze peilmerken zijn geselecteerd op basis van de geografische spreiding boven de voorkomens en de hoeveelheid gemeten data per peilmerk. De combinaties van de Cm factor en time decay constante zijn zo gekozen dat ze op de begrenzing vallen van de RMS gebieden om de impact van de verschillende waarden zo goed mogelijk weer te geven. Bijvoorbeeld de buitengrenzen van de groene banden in Figuur 11 komen overeen met een RMS waarde van 2, en vormen de begrenzing van het gele gebied zoals getoond in Figuur 8.



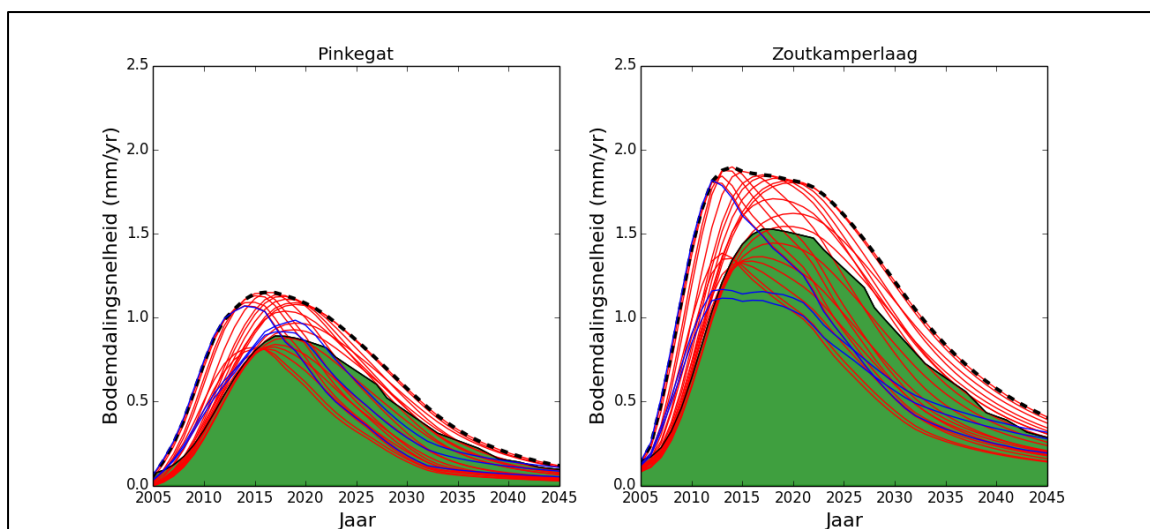
**Figuur 10** Peilmerk locaties die geselecteerd zijn voor de vergelijking met de Monte Carlo uitkomsten (Figuur 11).



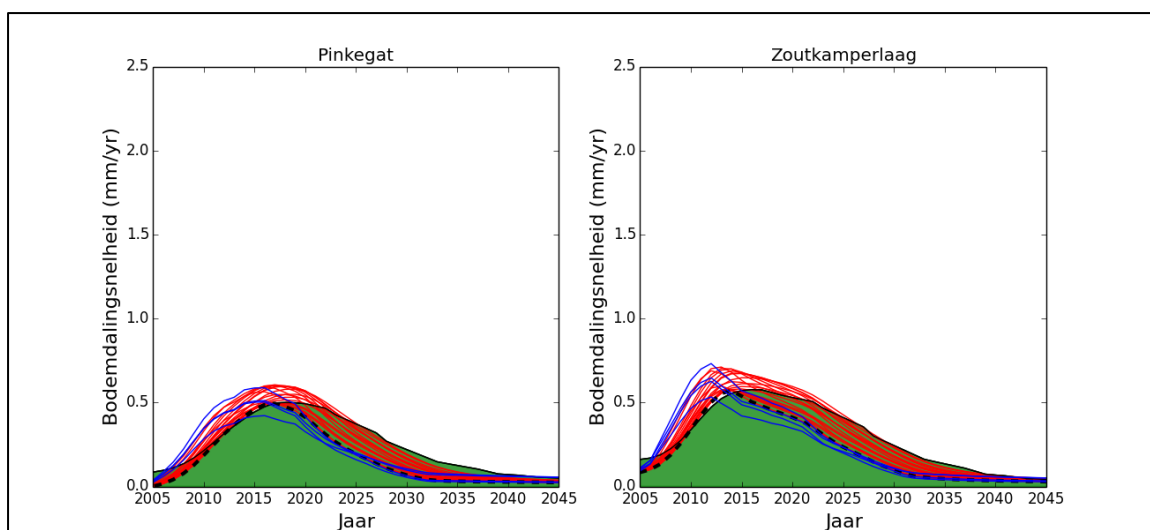
**Figuur 11** Gemodelleerde variatie in bodemdaling voor het hoge reservoir scenario vergeleken met de metingen op de peilmerken (rode punten). De kleuren van de lijnen horen bij de RMS categorieën zoals getoond in Figuur 8. Het grafieknnummer geeft de locatie van het peilmerk weer in Figuur 10.

Figuur 11 laat zien dat alle combinaties van Cm factor en time decay met een RMS <1,8 (gele gebied) binnen de bandbreedte van de meeste metingen blijven. Vervolgens zijn deze parametercombinaties gebruikt om de bodemdalingssnelheid in de kombergingen te berekenen. Een vergelijkbare analyse is gedaan voor het RTCiM model. De resultaten voor de bodemdalingssnelheid berekend met het RTCiM model zijn samen met die van het time decay model en numerieke model getoond in Figuur 12. De resultaten van de RTCiM modellen lijken vooral nadat een piek in bodemdalingssnelheid is behaald, een lagere snelheid te voorspellen dan het numerieke model. De spreiding in de resultaten van de time decay modellen lijken beter verdeeld rond het numerieke model, en laten zowel langzamere als snellere bodemdaling zien. Voor de definitie van het maximum scenario is daarom gekozen voor het time decay model, voor zowel Pinkegat als Zoutkamperlaag. Hierbij is het maximum scenario voor elk jaar gelijk gezet aan de maximale bodemdalingssnelheid van alle modellen (zwarte stippellijn in Figuur 12). Omdat het maximum scenario zoals op deze manier gedefinieerd een combinatie van verschillende time decay parameters is, is de kans dat dit scenario zich daadwerkelijk voordoet erg klein.

Een vergelijkbare analyse is gedaan op het lage scenario, getoond in Figuur 13. Ook hier laat het time decay model een spreiding zien van snelheden zowel hoger als lager dan in het numerieke model. Het minimum bodemdalingsscenario is hier gedefinieerd als de minimum bodemdalingssnelheid van alle time decay modellen die een goede passing op de data hebben (zwarte stippellijn).



**Figuur 12 Bodemdalingssnelheden met hun onzekerheden voor een RMS afsnijding van 1,8 voor het hoge bodemdalingsscenario. Het groene gebied geeft het resultaat van de numerieke berekening aan en de rode (time decay) en blauwe (RTCiM) lijnen de realisaties die binnen de begrenzing  $RMS < 1,8$  vallen. De zwart geblokte lijn geeft de bodemdalingssnelheden aan die in het maximum scenario gebruikt zijn.**



**Figuur 13 Bodemdalingssnelheden met hun onzekerheden voor een RMS afsnijding van 1,8 voor het lage bodemdalingsscenario. Het groene gebied geeft het resultaat van de numerieke berekening aan en de rode (time decay) en blauwe (RTCiM) lijnen de realisaties die binnen de begrenzing  $RMS < 1,8$  vallen. De zwart geblokte lijn geeft het minimum scenario aan.**

Omdat de bodemdalingssnelheid tussen de analytische en eindige elementen modellen vergelijkbaar is, zijn de begrenzingen van de rode lijnen in Figuur 12 en Figuur 13 gebruikt als geomechanische onzekerheid in de bodemdalingssnelheid. Dezelfde geomechanische onzekerheidsanalyse is ook uitgevoerd voor het basis scenario.

Voor de Ameland voorkomens is, naast het basis bodemdalingsscenario, een hoog en laag scenario gedefinieerd op basis van verschillende dynamische realisaties. De combinatie van het hoog scenario voor Ameland met het hoge scenario voor de Wadden voorkomens geeft het hoge scenario voor de bodemdaling in met name Pinkegat. Het lage scenario gaat uit van een combinatie van de lage scenario's. De bodemdalingssnelheid (belasting, berekend zoals beschreven in de volgende sectie) voor deze scenario's is getoond in Figuur 14 en Figuur 15.



## **2.5 Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4)**

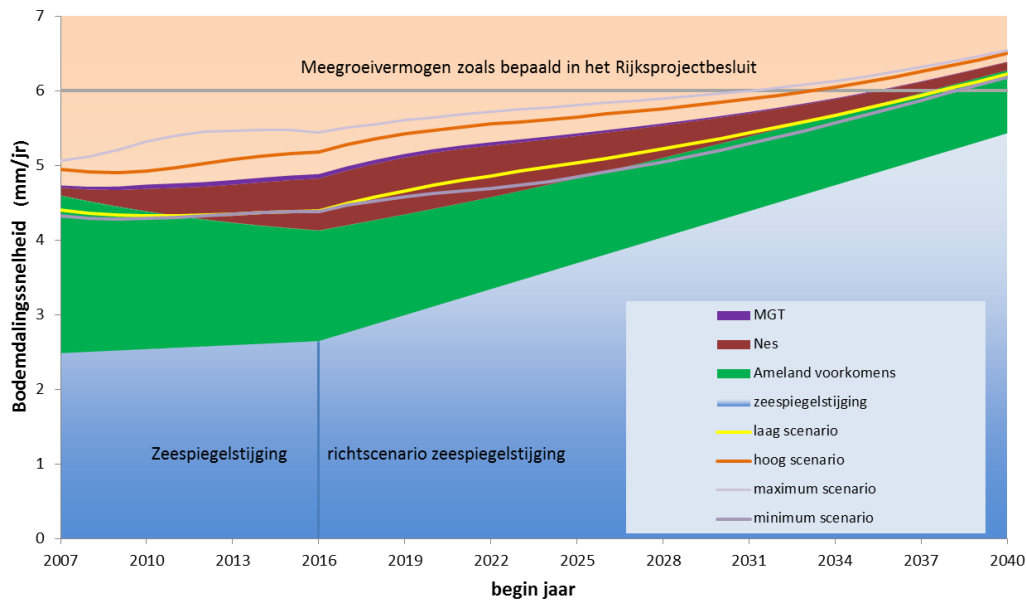
### **2.5.1 Bepaling volume en gemiddelde daling**

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 bepaald. Door de jaarlijkse volumetoename te delen door het kombergingsoppervlak wordt de gemiddelde bodemdalingssnelheid  $S$  (in mm/jr) per kombergingsgebied (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. (Referentie 2) Deze grenzen zijn door RIKZ voor de Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 toegepast. Hierbij zijn de oppervlakten voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag respectievelijk  $60 \times 10^6 \text{ m}^2$  en  $148 \times 10^6 \text{ m}^2$ .

Uit de 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.

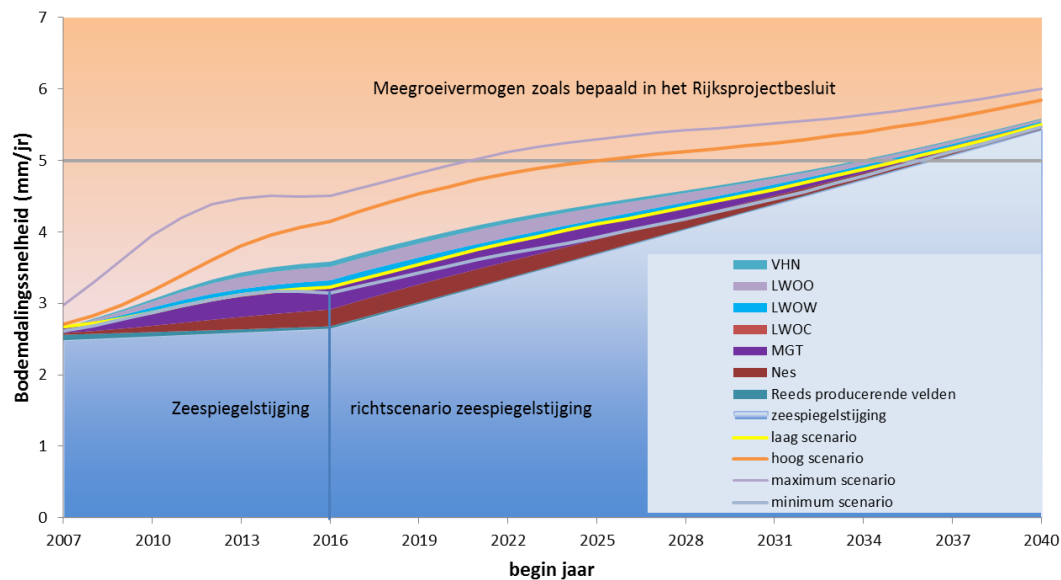
De belasting van de gebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag zijn respectievelijk getoond in Figuur 14 en Figuur 15. Voor het basis scenario is onderscheid gemaakt in de bijdrage van de individuele voorkomens. Ook is de belasting voor de hoge en lage scenario's getoond (oranje en gele lijnen) en de maximum en minimum scenario's zoals bepaald uit de onzekerheidsanalyse.

## Pinkegat



**Figuur 14** Voorspelde belasting voor het basis scenario voor het kombergingsgebied Pinkegat aangegeven door de bovengrens van de gekleurde vlakken. Het lage en hoge scenario zijn getoond als lijnen (geel: laag scenario, oranje: hoog scenario) weergegeven. De grijze lijnen in dit figuur geven de boven- cq ondergrens van de totale (minimum, maximum) onzekerheid aan waarbij ook de onzekerheid van de geomechanische parameters en modellen in het hoge en lage scenario is meegenomen. Zoals in hoofdstuk 1 al is aangegeven, is het onwaarschijnlijk dat het minimum danwel maximum scenario gerealiseerd wordt.

## Zoutkamperlaag



**Figuur 15** Voorspelde belasting voor het basis scenario voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag aangegeven door de bovengrens van de gekleurde vlakken. Het lage en hoge scenario zijn als lijnen (geel: laag scenario, oranje: hoog scenario) weergegeven. De grijze lijnen in dit figuur geven de boven- cq ondergrens van de totale (minimum, maximum) onzekerheid aan waarbij ook de onzekerheid van de geomechanische parameters en modellen in het hoge en lage scenario is meegenomen. Zoals in hoofdstuk 1 al is aangegeven, is het onwaarschijnlijk dat het minimum dan wel maximum scenario gerealiseerd wordt.

Voor de berekening van de verwachte bodemdaling in de toekomst en de bijbehorende volumes en bodemdalingsnelheden is uitgegaan van het basis scenario. Om de

onzekerheid voor de volumes en bodemdalingssnelheden te bepalen voor de individuele voorkomens is gebruik gemaakt van het hoge en lage scenario (zie Tabel 2-6 t/m Tabel 2-9).

## 2.5.2 Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting rapportagejaar 2015 met onzekerheid

Tabel 2-6 en Tabel 2-7 tonen de door gaswinning veroorzaakte bodemdalingsvolumes met bijbehorende onzekerheid per voorkomen voor de jaren J-3 t/m J+2 waarbij J-1 het rapportagejaar (2014) is. Voor de volledigheid zijn ook de resultaten voor het jaar 2005 tot en met 2017 getoond. Anjum heeft een verwaarloosbaar effect op de belasting in Pinkegat.

De volgende afkortingen voor de voorkomens zijn gebruikt in de tabellen:

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

**Tabel 2-6** Jaarlijks bodemdalingsvolume in Pinkegat voor Ameland en Anjum voorkomens en voor de Wadden voorkomens met tussen haakjes de bandbreedte tussen de hoge en lage scenario's (onzekerheid). Volume en bandbreedte (onzekerheid) in duizend m<sup>3</sup>.

Pinkegat			
Jaar	Anjum/Ameland voorkomens	NES	MGT
	volume(onzekerheid)	volume(onzekerheid)	volume(onzekerheid)
2005	133 (115 - 150)		
2006	127 (109 - 144)		
2007	121 (104 - 127)	9 (6 - 9)	3 (3 - 3)
2008	115 (99 - 120)	14 (12 - 15)	4 (3 - 4)
2009	111 (94 - 119)	15 (13 - 16)	3 (3 - 3)
2010	106 (90 - 116)	18 (15 - 20)	3 (3 - 4)
2011	102 (86 - 112)	23 (17 - 26)	4 (3 - 4)
2012	98 (83 - 108)	28 (20 - 33)	4 (3 - 4)
2013	94 (80 - 105)	33 (23 - 40)	4 (3 - 5)
2014	91 (77 - 101)	38 (25 - 46)	4 (3 - 5)
2015	89 (75 - 98)	40 (26 - 49)	4 (3 - 5)
2016	86 (73 - 95)	43 (28 - 50)	3 (2 - 4)
2017	83 (70 - 93)	46 (30 - 52)	3 (2 - 4)
2018	81 (68 - 90)	47 (31 - 53)	3 (2 - 4)

**Tabel 2-7 Jaarlijks bodemdalingvolume Zoutkamperlaag voor de Anjum voorkomens en voor de Wadden voorkomens met tussen haakjes de bandbreedte tussen het hoge en lage scenario (onzekerheid). Volume en bandbreedte (onzekerheid) in duizend m<sup>3</sup>.**

Zoutkamperlaag							
Jaar	Anjum voorkomes	NES	MGT	LWO-C	LWO-W	LWO-O	VHZ
2005	13 (13 - 13)						
2006	12 (12 - 12)						
2007	11 (11 - 11)	3 (2 - 3)	9 (6 - 10)				
2008	10 (10 - 10)	7 (5 - 8)	21 (14 - 23)		2 (1 - 2)	1 (1 - 1)	1 (1 - 2)
2009	9 (9 - 9)	11 (7 - 12)	28 (19 - 31)		8 (6 - 11)	7 (6 - 10)	4 (3 - 7)
2010	9 (8 - 9)	14 (10 - 15)	34 (23 - 38)		13 (10 - 20)	16 (14 - 23)	7 (5 - 16)
2011	8 (7 - 8)	19 (13 - 21)	40 (25 - 45)		15 (11 - 25)	23 (19 - 34)	8 (6 - 23)
2012	7 (6 - 7)	24 (16 - 26)	43 (26 - 49)	1 (1 - 1)	15 (11 - 29)	27 (21 - 41)	9 (7 - 30)
2013	6 (6 - 6)	29 (18 - 33)	45 (26 - 52)	2 (1 - 3)	16 (11 - 31)	29 (22 - 46)	10 (7 - 35)
2014	6 (5 - 6)	33 (21 - 38)	46 (26 - 54)	2 (2 - 5)	16 (10 - 32)	29 (22 - 48)	10 (8 - 39)
2015	5 (4 - 5)	35 (21 - 40)	45 (26 - 53)	2 (2 - 6)	15 (10 - 33)	29 (21 - 49)	11 (8 - 41)
2016	5 (4 - 5)	36 (22 - 42)	43 (24 - 56)	2 (2 - 7)	15 (9 - 33)	28 (20 - 49)	11 (8 - 43)
2017	4 (3 - 4)	38 (24 - 44)	42 (23 - 55)	2 (1 - 7)	15 (9 - 33)	26 (19 - 48)	11 (8 - 44)
2018	4 (3 - 4)	39 (24 - 44)	40 (22 - 54)	2 (1 - 7)	14 (8 - 32)	28 (20 - 50)	11 (8 - 43)

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

Onderstaande Tabel 2-8 geeft de bodemdalingssnelheid S voor het rapportagejaar 2015 en belasting B op 1-1-2016. De onzekerheidsbandbreedte wordt gekozen op basis van de combinatie van hoge en lage reservoirrealisaties die gedefinieerd zijn voor de verschillende voorkomens (lage en hoge scenario; respectievelijk gele en oranje lijn in Figuur 14 en Figuur 15).

**Tabel 2-8 Bodemdalingssnelheid en belasting (mm/jr) met onzekerheid (bandbreedte) per kombergingsgebied in het rapportagejaar 2015.**

Zoutkamperlaag		Pinkegat	
S (laag-hoog)	B (laag-hoog)	S (laag-hoog)	B (laag-hoog)
0,96 (0,62 - 1,54)	0,94 (0,61 - 1,53)	2,21 (1,73 - 2,53)	2,20 (1,73 - 2,49)

### 2.5.3 Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting

Tabel 2-9 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  $B(J) = (S(J-3) + S(J-2) + \dots + S(J+2)) / 6$ .



**Tabel 2-9 bodemdalingssnelheid S met bijbehorende onzekerheidsbereik bepaald door het lage en hoge scenario, belasting B en gebruiksruimte G voor de kombergingsgebieden inclusief de bodemdalingssnelheid veroorzaakt door de Anjum en Ameland-Oost voorkomens. De splitsing vanaf 2016 geeft aan dat de Gebruiksruimte G geldig is tot 2016, vanaf deze datum geldt het richtscenario zeespiegelstijging en het hier van afgeleide richtscenario Gebruiksruimte.**

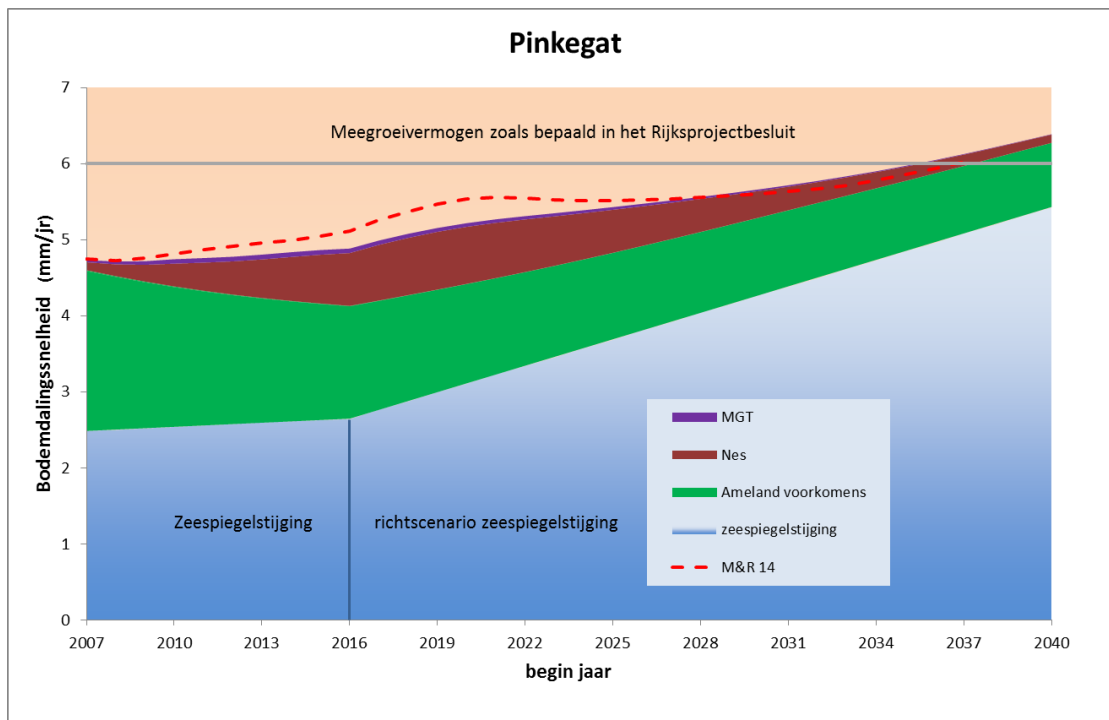
Jaar	Zoutkamperlaag			Pinkegat		
	S (onzekerheid)	B (onzekerheid)	G	S (onzekerheid)	B (onzekerheid)	G
2004	0,09(0,09 - 0,09)		2,57	2,33(2,01 - 2,62)		3,57
2005	0,09(0,09 - 0,09)		2,55	2,22(1,91 - 2,51)		3,55
2006	0,09(0,09 - 0,09)		2,53	2,13(1,82 - 2,41)		3,53
2007	0,17(0,13 - 0,17)	0,20(0,16 - 0,21)	2,52	2,21(1,86 - 2,32)	2,21(1,89 - 2,41)	3,52
2008	0,29(0,21 - 0,31)	0,29(0,22 - 0,33)	2,50	2,21(1,90 - 2,31)	2,17(1,86 - 2,36)	3,50
2009	0,46(0,35 - 0,54)	0,40(0,30 - 0,49)	2,48	2,15(1,85 - 2,31)	2,16(1,84 - 2,34)	3,48
2010	0,63(0,47 - 0,81)	0,53(0,38 - 0,68)	2,46	2,12(1,80 - 2,33)	2,17(1,83 - 2,35)	3,46
2011	0,76(0,55 - 1,05)	0,65(0,47 - 0,89)	2,44	2,14(1,78 - 2,38)	2,16(1,81 - 2,37)	3,44
2012	0,85(0,59 - 1,24)	0,76(0,53 - 1,09)	2,43	2,17(1,77 - 2,42)	2,17(1,78 - 2,41)	3,43
2013	0,91(0,62 - 1,39)	0,84(0,58 - 1,25)	2,41	2,19(1,76 - 2,48)	2,18(1,76 - 2,44)	3,41
2014	0,95(0,63 - 1,49)	0,90(0,60 - 1,38)	2,39	2,21(1,75 - 2,53)	2,19(1,75 - 2,47)	3,39
2015	0,96(0,62 - 1,54)	0,93(0,61 - 1,47)	2,37	2,21(1,73 - 2,53)	2,20(1,74 - 2,49)	3,37
2016	0,94(0,60 - 1,58)	0,94(0,61 - 1,53)	2,35	2,21(1,72 - 2,50)	2,20(1,73 - 2,49)	3,35
2017	0,94(0,59 - 1,58)	0,94(0,60 - 1,56)	2,24	2,21(1,71 - 2,48)	2,19(1,71 - 2,48)	3,24
2018	0,93(0,58 - 1,58)	0,93(0,59 - 1,57)	2,12	2,18(1,69 - 2,44)	2,17(1,68 - 2,44)	3,12
2019	0,92(0,57 - 1,58)	0,92(0,57 - 1,56)	2,01	2,13(1,65 - 2,38)	2,13(1,65 - 2,39)	3,01
2020	0,89(0,56 - 1,54)	0,90(0,56 - 1,55)	1,89	2,06(1,59 - 2,30)	2,08(1,61 - 2,33)	2,89
2021	0,86(0,54 - 1,52)	0,87(0,54 - 1,52)	1,77	1,98(1,53 - 2,22)	2,01(1,56 - 2,26)	2,77
2022	0,83(0,51 - 1,48)	0,84(0,52 - 1,48)	1,66	1,90(1,47 - 2,13)	1,94(1,50 - 2,18)	2,66
2023	0,79(0,48 - 1,43)	0,80(0,49 - 1,43)	1,54	1,82(1,41 - 2,05)	1,86(1,44 - 2,09)	2,54
2024	0,74(0,44 - 1,36)	0,75(0,46 - 1,38)	1,43	1,75(1,35 - 1,97)	1,79(1,38 - 2,01)	2,43
2025	0,68(0,41 - 1,29)	0,70(0,42 - 1,31)	1,31	1,67(1,29 - 1,89)	1,71(1,32 - 1,93)	2,31
2026	0,62(0,37 - 1,21)	0,65(0,39 - 1,24)	1,19	1,60(1,24 - 1,81)	1,64(1,27 - 1,85)	2,19
2027	0,57(0,33 - 1,13)	0,60(0,35 - 1,17)	1,08	1,53(1,19 - 1,73)	1,57(1,22 - 1,77)	2,08
2028	0,52(0,30 - 1,05)	0,54(0,31 - 1,09)	0,96	1,46(1,14 - 1,65)	1,50(1,17 - 1,69)	1,96
2029	0,46(0,26 - 0,97)	0,49(0,28 - 1,01)	0,85	1,40(1,09 - 1,58)	1,43(1,12 - 1,62)	1,85
2030	0,41(0,23 - 0,89)	0,44(0,25 - 0,93)	0,73	1,33(1,05 - 1,50)	1,37(1,07 - 1,55)	1,73
2031	0,37(0,20 - 0,82)	0,40(0,22 - 0,86)	0,61	1,27(1,01 - 1,44)	1,31(1,03 - 1,48)	1,61
2032	0,33(0,17 - 0,75)	0,35(0,19 - 0,79)	0,50	1,22(0,97 - 1,37)	1,25(0,99 - 1,41)	1,50
2033	0,29(0,15 - 0,69)	0,31(0,16 - 0,73)	0,38	1,16(0,93 - 1,31)	1,20(0,95 - 1,35)	1,38
2034	0,26(0,13 - 0,63)	0,28(0,14 - 0,67)	0,27	1,12(0,90 - 1,26)	1,15(0,92 - 1,29)	1,27
2035	0,23(0,11 - 0,58)	0,25(0,13 - 0,61)	0,15	1,07(0,87 - 1,21)	1,10(0,89 - 1,24)	1,15
2036	0,21(0,10 - 0,54)	0,23(0,11 - 0,56)	0,03	1,03(0,85 - 1,16)	1,06(0,86 - 1,19)	1,03
2037	0,19(0,09 - 0,49)	0,20(0,10 - 0,52)	0,00	1,00(0,82 - 1,12)	1,03(0,84 - 1,15)	0,92
2038	0,18(0,08 - 0,46)	0,19(0,09 - 0,48)	0,00	0,97(0,81 - 1,09)	0,99(0,82 - 1,11)	0,80
2039	0,16(0,07 - 0,42)	0,17(0,08 - 0,44)	0,00	0,95(0,79 - 1,06)	0,97(0,80 - 1,08)	0,69
2040	0,15(0,06 - 0,39)	0,16(0,07 - 0,41)	0,00	0,93(0,78 - 1,04)	0,94(0,78 - 1,05)	0,57
2041	0,14(0,06 - 0,36)	0,14(0,06 - 0,38)	0,00	0,91(0,76 - 1,01)	0,91(0,76 - 1,01)	0,45
2042	0,13(0,05 - 0,34)	0,13(0,06 - 0,35)	0,00	0,87(0,73 - 0,97)	0,88(0,74 - 0,98)	0,34

## 2.6 Indien nodig aanpassen productie (stap 5)

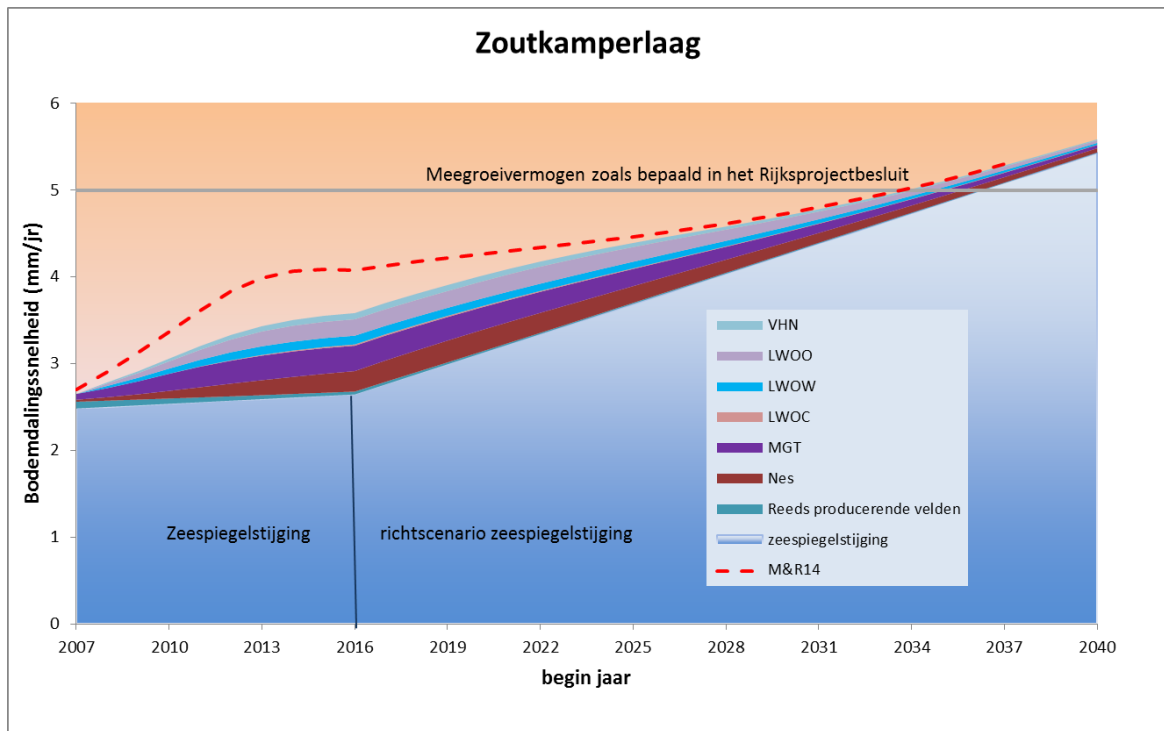
Uitgaande van het basisscenario en de productie volgens Referentie 1, volgen waarden voor de bodemdalingssnelheid  $S$  en de resulterende belasting  $B$  die leiden tot overschrijding van de gebruiksruijme eerder dan het jaar 2035 (zie Tabel 2-9). In ieder geval zal de gebruiksruijme niet voor 1-1-2016 worden overschreden. Na deze tijd geldt voorlopig het richtscenario van de zeespiegelstijging.

## 2.7 Actualiseren (stap 6)

Figuur 16 en Figuur 17 tonen de geactualiseerde berekeningen van de 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 gebruiksruijme van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag niet overschrijden voor 2035. In de figuren is tevens de belasting zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclus rapportage over 2014 (gerapporteerd in 2015) weergegeven.



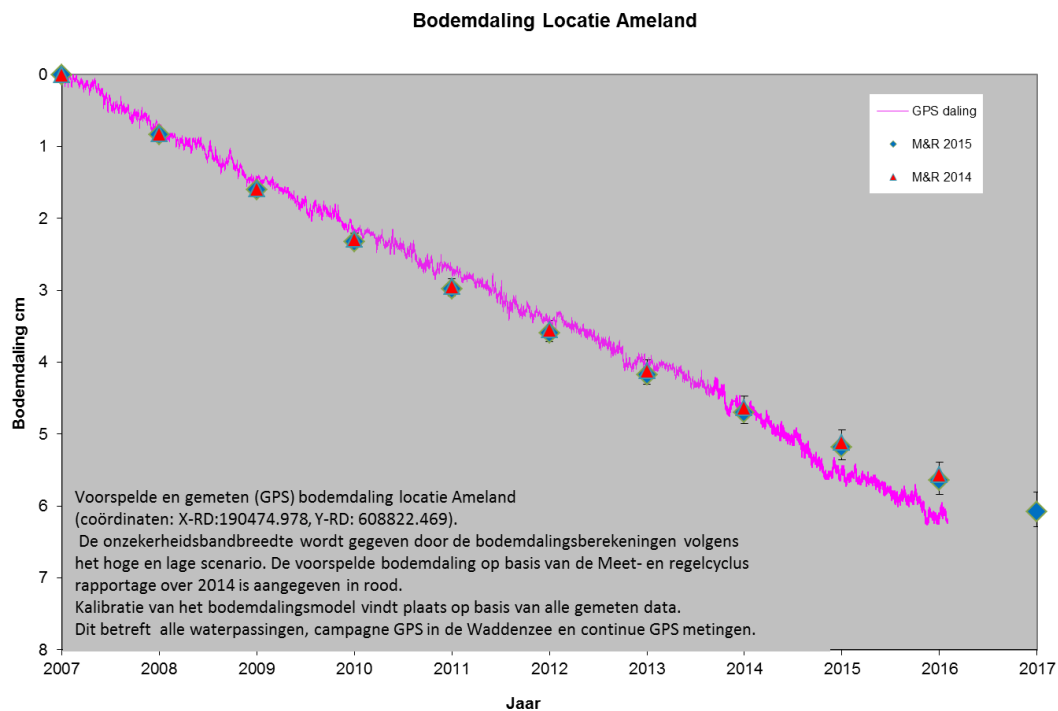
**Figuur 16** Voorspelde belasting inclusief Zeespiegelstijging voor het kombergingsgebied Pinkegat. Voor de modellering van de bodemdaling tengevolge van de gaswinning van Ameland is het meest recente geomechanische model toegepast. De rood gestreepte lijn geeft berekende belasting aan zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclusrapportage over 2014 (gerapporteerd in 2015).



**Figuur 17** 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 over 2014 (gerapporteerd in 2015).

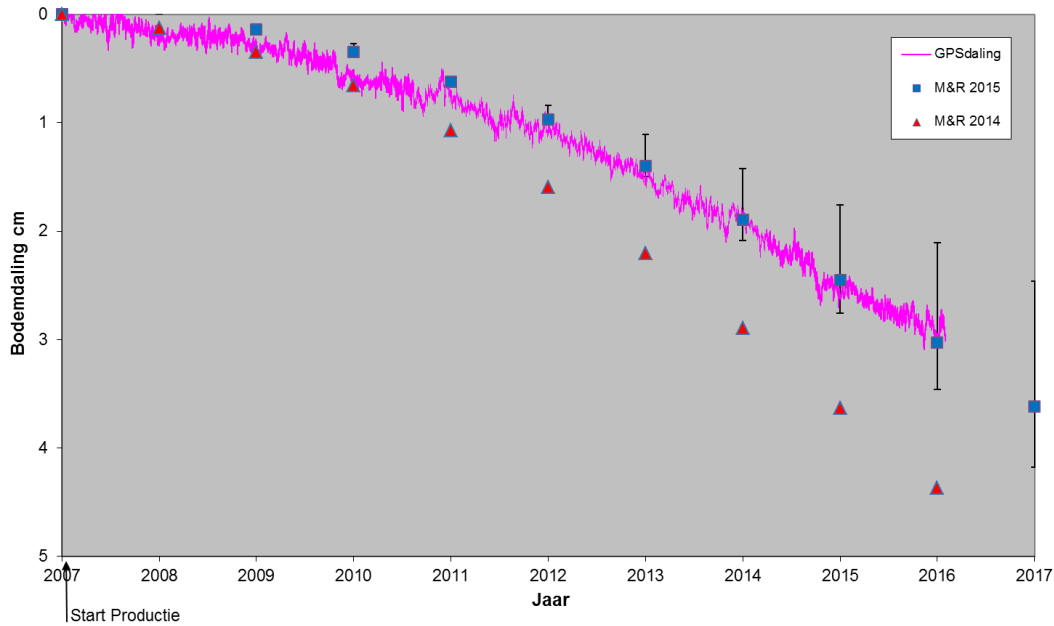
### 2.7.1 Bodemdaling GPS locaties op Moddergat en Ameland

Figuur 18, Figuur 19 en Figuur 20 geven de geprognosticeerde daling tot en met 2017 plus de gemeten daling vanaf begin 2007 op de GPS locaties grafisch weer. Afwijkingen tussen het model en het GPS punt worden voornamelijk veroorzaakt door de keuze om de kalibratie te optimaliseren voor het minimale verschil op basis van alle meetpunten. Volgens het M&R protocol (Referentie 11) dient de continue GPS meting als signaal om een nieuwe vlakdekkende meting uit te voeren als de GPS meting een significant hogere bodemdaling aangeeft dan de prognose. De GPS snelheid op de locatie Ameland (Figuur 18) is gemiddeld voor 2015 (6,4 mm/jaar), lager dan gerapporteerd in de M&R 2014 (9,6 mm/jaar). De waterpassing van 2014 op het eiland Ameland toont aan dat het model goed past met de metingen over een langere periode (Figuur 22). Gemiddeld gezien is passing van het model met de GPS stations op Anjum en Moddergat eveneens verbeterd.



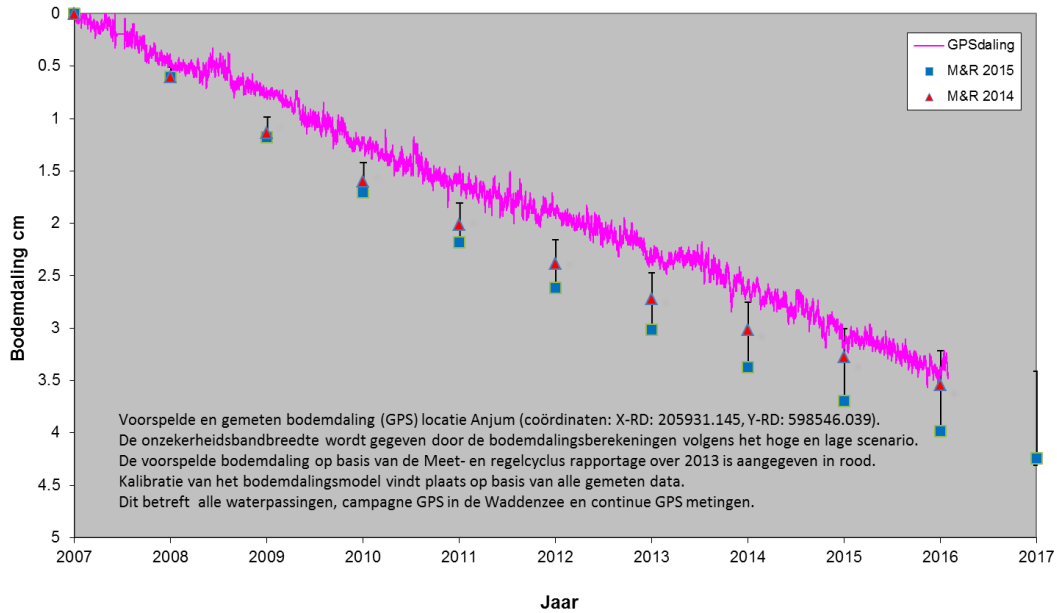
**Figuur 18 Voorspelde en gemeten (GPS) bodemdaling locatie Ameland (coördinaten: X-RD:190474.978, Y-RD: 608822.469). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingsberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2014 is aangegeven in rood.**

### Bodemdaling op Locatie Moddergat



**Figuur 19** Voorspelde en gemeten (GPS) bodemdaling locatie Moddergat (coördinaten: X-RD: 200244.559, Y-RD: 602329.794). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingsberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2014 is aangegeven in rood.

### Bodemdaling op Locatie Anjum



**Figuur 20** Voorspelde en gemeten bodemdaling (GPS) locatie Anjum (coördinaten: X-RD: 205931.145, Y-RD: 598546.039). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingsberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2014 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 2014 uitgevoerd:

System-eis	Uitgevoerde en geplande activiteiten
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 2015 in de Asset Land uitgevoerd.

Conform het M&R protocol zijn de bijbehorende relevante documenten bewaard in de 'livelink' omgeving van Shell/NAM

Registratie	Bewaarplaats NAM	Vastgelegd in
Winningsplan	<a href="https://sww-knowledge-epe.shell.com/teamepns/livelink.exe?func=ll&amp;objId=712211&amp;objAction=browse&amp;sort=name">https://sww-knowledge-epe.shell.com/teamepns/livelink.exe?func=ll&amp;objId=712211&amp;objAction=browse&amp;sort=name</a>	P.04 Aanvraag en beheer van project of inrichtingsvergunning-NL
Meetplan	<a href="https://sww-knowledge-epe.shell.com/teamepns/livelink.exe?func=ll&amp;objId=61252138&amp;objAction=browse&amp;sort=name">https://sww-knowledge-epe.shell.com/teamepns/livelink.exe?func=ll&amp;objId=61252138&amp;objAction=browse&amp;sort=name</a>	P.04 Aanvraag en beheer van project of inrichtingsvergunning-NL
Productiedata	<a href="https://wrfm-ssw-uie.sharing.shell.com/App/Dream/Home.aspx">https://wrfm-ssw-uie.sharing.shell.com/App/Dream/Home.aspx</a>	P.71
Meetregister	<a href="https://sww-knowledge-epe.shell.com/teamepns/livelink.exe?func=ll&amp;objId=61251921&amp;objAction=browse&amp;sort=name">https://sww-knowledge-epe.shell.com/teamepns/livelink.exe?func=ll&amp;objId=61251921&amp;objAction=browse&amp;sort=name</a>	P.18

## 4 Conclusies

- De beschikbare modellen voor de voorkomens onder en rondom de Waddenzee zijn grondig geëvalueerd en gekalibreerd met de beschikbare metingen. De resultaten van metingen en modellen komen goed met elkaar overeen.
- De gepresenteerde resultaten gaan uit van een richtscenario voor de zeespiegelstijging. Het nieuwe zeespiegelscenario dat op 1-1-2016 beschikbaar zou moeten zijn is op het moment van schrijven niet beschikbaar voor NAM. Vooralsnog gaat NAM ervan uit dat het richtscenario een conservatieve (overschatting) voorspelling geeft van de zeespiegelstijging voor de gegeven periode.
- Op basis van het meetplan Waddenzee zijn in 2015 GPS metingen in de Waddenzee uitgevoerd op 28 peilmerken van de clusters in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag, is er een waterpassing uitgevoerd rondom het Lauwersmeer en zijn op een zestal ondergrondse merken GPS metingen verricht. De resultaten hiervan zijn gerapporteerd in Referentie 14. Tevens zijn er GPS metingen verricht in het Lauwersmeer. Verder zijn er 5 nieuwe peilmerkclusters geplaatst in de Waddenzee. Alle metingen zijn gebruikt in de kalibratie van de modellen.
- De continue GPS metingen op de locaties boven de gasvelden Ameland, Anjum en Moddergat, die respectievelijk in juni en december 2006 zijn gestart (nog vóór aanvang van de productie in Nes en Moddergat), zijn in 2015 voortgezet. De modellen volgen deze metingen redelijk tot goed, waarbij opgemerkt dient te worden dat de kalibratie van het model wordt gedaan op basis van alle beschikbare metingen. Een betere kalibratie aan de GPS metingen kan worden gerealiseerd maar dit zou met de huidige modellen betekenen dat andere meetpunten een groter verschil zullen laten zien t.o.v. de modelresultaten.
- Voor de modellering van de bodemdaling ten gevolge van gasproductie 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" (Referentie 8). Dit geomechanisch model wordt in meer detail beschreven in Referentie 3 en Referentie 13. Het model inclusief de geomechanische parameters is ongewijzigd t.o.v. het model dat voor de M&R 2014 rapportage is gebruikt.
- De voorspelde bodemdalingssnelheid over de komende 20 jaar is lager dan voorspeld in de M&R cyclus 2014. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de aanname van residueel gas in de aquifers. Deze aanname zorgt ervoor dat er minder drukdaling plaatsvindt en zal plaatsvinden in de aquifers. Deze verminderde aquiferdepletie en daarmee gepaarde verminderde bodemdaling rond het veld Vierhuizen heeft de grootste invloed op de verminderde bodemdalingssnelheid in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag.
- Een verbeterde procedure voor het overbrengen van de druinformatie naar de geomechanische modellen heeft eveneens tot gevolg dat de bodemdalingssnelheid lager is dan getoond in de M&R 2014 rapportage.
- Er is geen integrale onzekerheidsanalyse uitgevoerd voor de gehele keten van de modellering maar wel een analyse voor componenten binnen deze keten. Er zijn een aantal realisaties geleverd van mogelijke reservoirdrukken per voorkomen en er is een Monte-Carlo onzekerheidsanalyse doorgevoerd op basis van de geomechanische parameters.
- Bij het opstellen van de realisaties van de dynamische reservoir modellen voor Anjum, Ameland en de Wadden voorkomens is de mobiliteit van de aquifer gevarieerd. Voor alle voorkomens zijn 3 realisaties gemaakt, allen met een andere mobiliteit die een functie is van de saturatie van het residuele gas en de permeabiliteit van het gesteente in de aquifer.

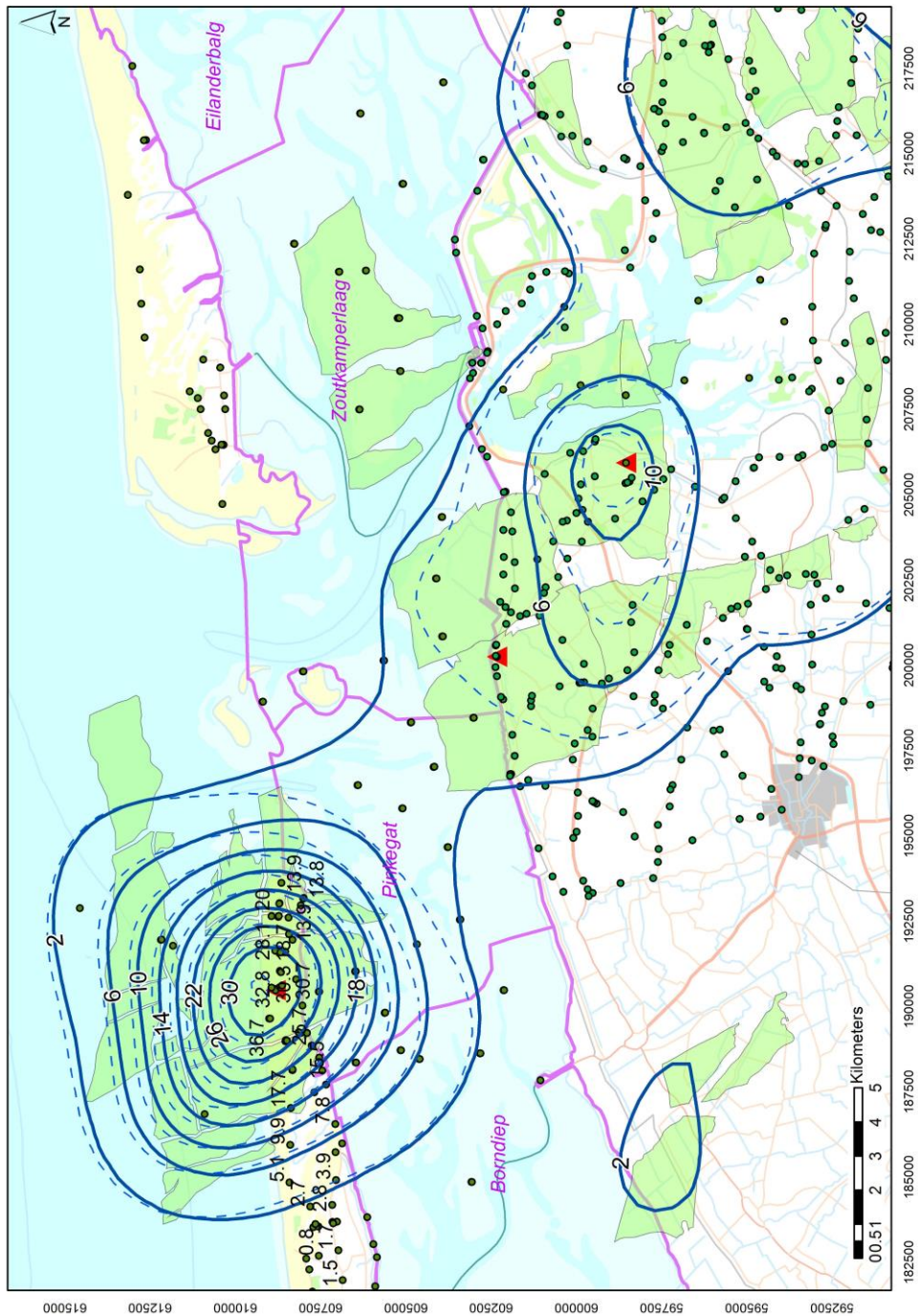
- Een combinatie van deze realisaties toegepast op verschillende voorkomens heeft geleid tot de definitie van een laag, basis en hoog bodemdalingsscenario.
- Volgens het basisscenario zal de bodemdaling de gebruikruimte rond het jaar 2035 in Zoutkamperlaag overschrijden. Dit scenario past het best met de beschikbare metingen. In Pinkegat wordt de gebruikruimte volgens het verwachte scenario na 2036 overschreden.
- De meet- en regelcyclus stuurt op basis van de verwachtingswaarde voor de belasting dat uitgaat van het basisscenario. Aangezien de bodemdaling volgens het basisscenario binnen de gebruikruimte valt (in ieder geval voor de komende 18 jaar), worden er geen maatregelen genomen om de productie bij te stellen.



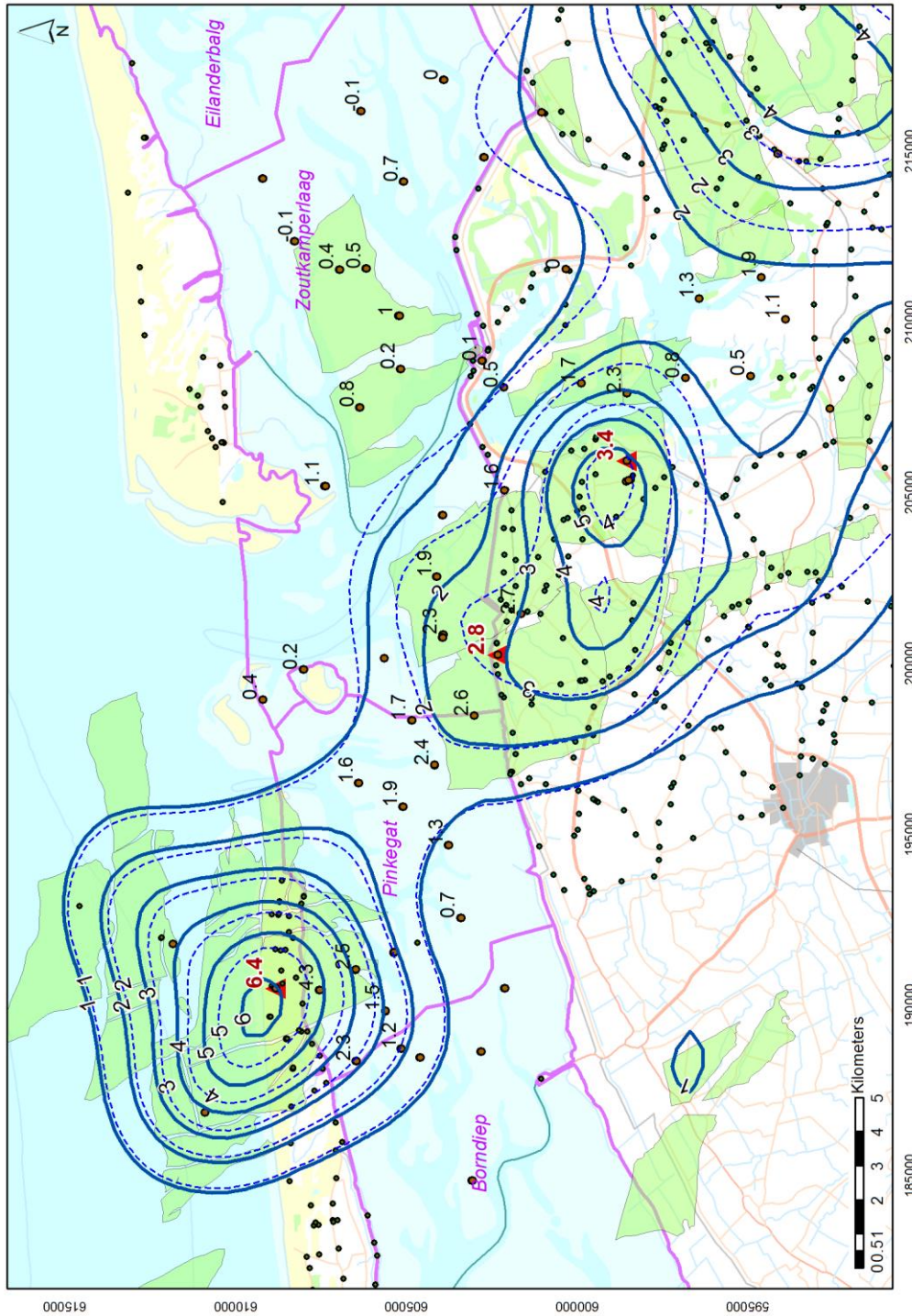
## 5 Referenties

- Referentie 1 NAM (30/09/2011) Wijziging winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen
- Referentie 2 Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 – Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. Rapport RIKZ / 2004.025.
- Referentie 3 NAM (2012) Gaswinning Moddergat/Lauwersoog/Vierhuizen: Technische bijlage (bijlage 3) behorend bij het geactualiseerde Meet- en Regelprotocol d.d. 1 april 2012. EP201201210893
- Referentie 4 Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. resultaten uitvoering Meet- en Regelcyclus 2013; Rapport EP201403202106, mei 2014
- Referentie 5 GPS Survey NAM Waddenzee v. 1.20. 06-GPS B.V., 01/2016.
- Referentie 6 Check reference station coordinates NAM v.1.7. 06 GPS B.V., 06/2015.
- Referentie 7 NLGEO2004: het geoïdemodel voor Nederland. Data-ICT-Dienst, Rijkswaterstaat, URL: <http://www.rdnap.nl/algemeen/hoochte/geoide.html>
- Referentie 8 NAM (30/09/2011) Wijziging winningsplan Ameland-Oost, Ameland-Westgat en Ameland-N07
- Referentie 9 Advies actualisering beleidsscenario zeespiegelstijging voor bepaling gebruiksruimte voor gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, brief aan Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie, dd 7 januari 2011
- Referentie 10 (NAM 29/10/2014) Meetplan Waddenzee 2015 (EP Report No: EP201410243483)
- Referentie 11 NAM (2012) Gaswinning Moddergat, Lauwersoog, Vierhuizen: Actualisering meet- en regelprotocol n.a.v. wijziging winningsplannen 2011 NAM EP200612202112
- Referentie 12 Staatscourant (2013) Kennisgeving besluiten gaswinning Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, Ministerie van Economische Zaken. URL: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2013-7384.html?zoekcriteria=%3fzkt%3dEenvoudig%26pst%3d%26vrt%3dmoddergat%2binstemming%26zkd%3dInDeGeheleText%26dpr%3dAfgelopenDag%26sdt%3dDatumBrief%26ap%3d%26pnr%3d1%26rpp%3d10&resultIndex=0&sorttype=1&sortorder=4>
- Referentie 13 NAM (2014) Subsurface Technical Report. Subsidence Modelling of Anjum, Ameland and Waddenzee Fields. EP Report No: EP201403205558
- Referentie 14 Meetregister bij het meetplan Waddenzee 2015 - Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Lauwersmeer 2015 . EP Report No: EP201509205046
- Referentie 15 NAM (2005) Methodology of predicting gas- and aquifer pressures in the proposed Waddenzee development area. EP Report No: EP200512206995
- Referentie 16 TNO (2013) A general framework for rate dependent compaction models for reservoir rock. TNO 2013 R11405
- Referentie 17 Dynamic Reservoir Modelling of Wadden Fields for subsidence. Meet&Regel 2015
- Referentie 18 Meet- en regelprotocol Winning Waddenzeegas vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Nederlandse Aardolie Maatschappij BV. EP200612202122.

## Bijlage 1. Gemodelleerde en gemeten bodemdaling 2014



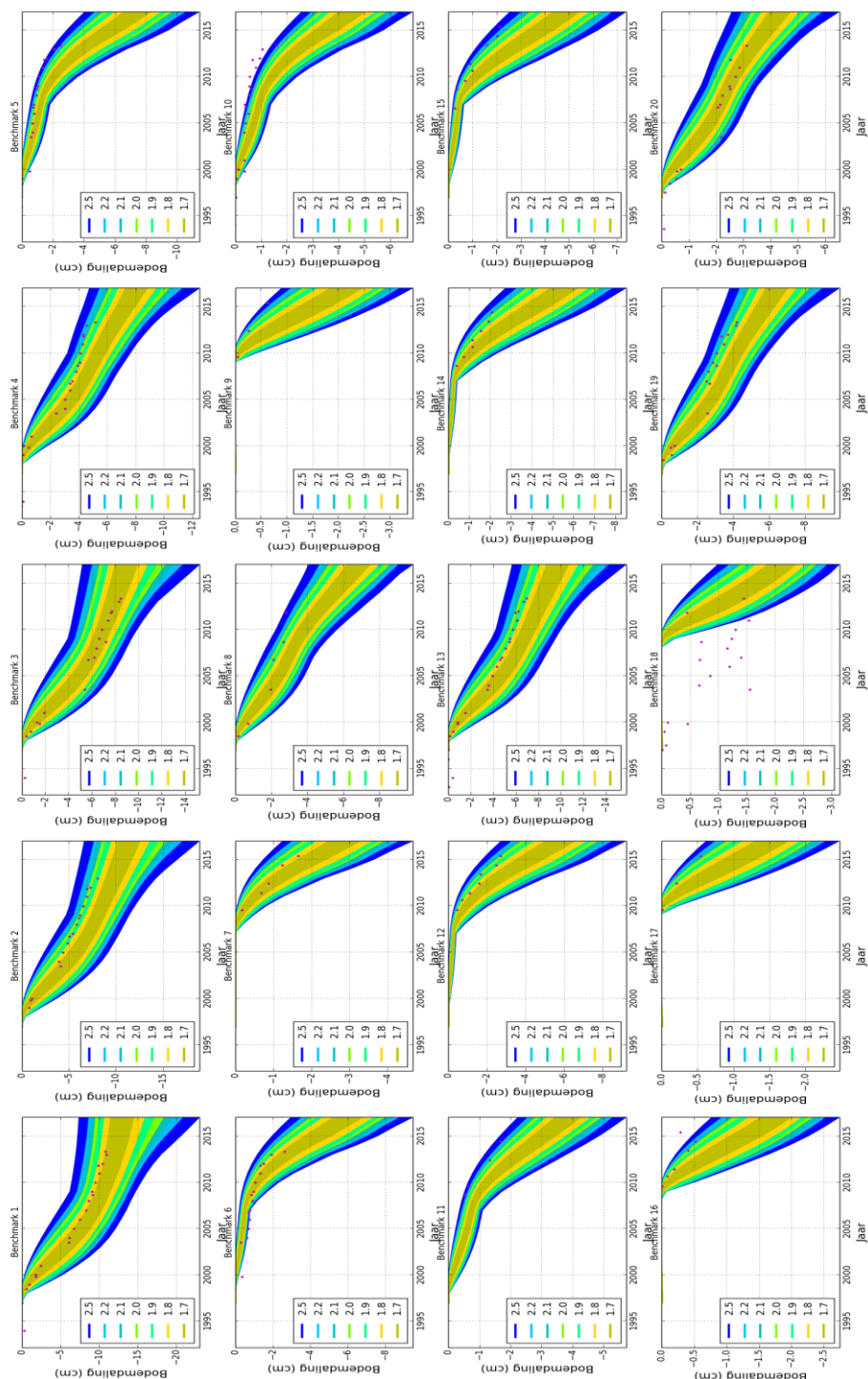
**Figuur 21** Totale bodemdaling (status 1-1-2014) door gaswinning sinds de start van de productie. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling (gestreepte contouren geven de bodemdaling in 2013 zoals beschreven in de M&R rapportage over 2013). Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 3 posities continue GPS metingen uitgevoerd (rode driehoek). Bodemdaling in cm.



**Figuur 22** Bodemdaling (status contour 1-1-2014) door gaswinning sinds de nulmeting Waddenzee in 2006. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens de aangepaste/gekalibreerde geomechanische modellen (gestreepte contouren geven de bodemdaling 2013 weer zoals getoond in de M&R rapportage over 2013). De punten met label representeren de peilmerken met de gemeten hoogteverschillen vanaf 2006 (nulmeting Waddenzee) tot de laatst uitgevoerde meting in mei 2014. Rode waarden geven de daling aan van de permanente GPS stations in de periode feb. 2007- jan. 2015. Bodemdaling in cm.

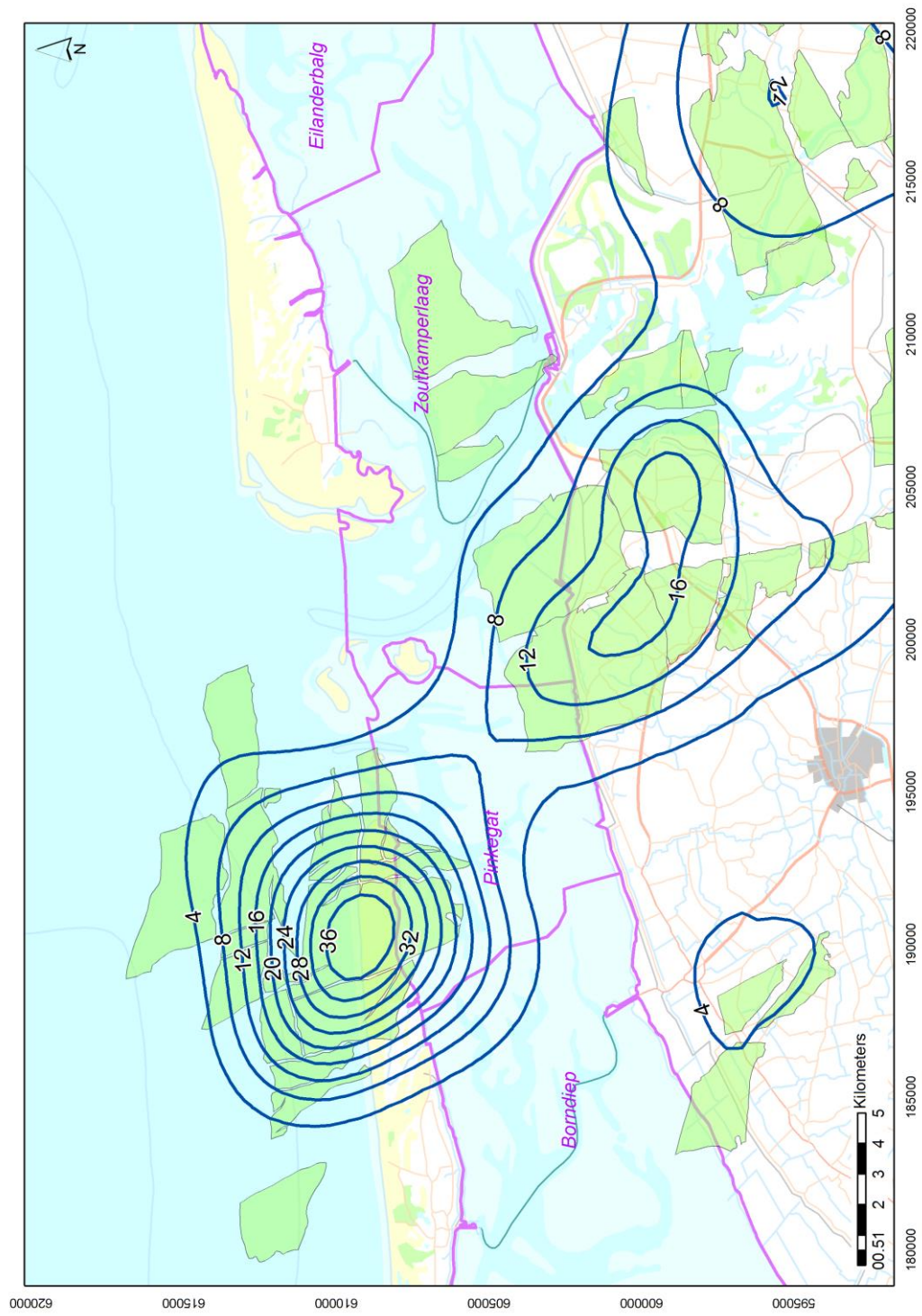


## Bijlage 2



Gemodelleerde variatie in bodemdaling voor het hoge reservoir scenario vergeleken met de metingen op de peilmerken (rode punten). De kleuren van de lijnen horen bij de RMS categorieën zoals getoond in Figuur 8. Het grafieknnummer geeft de locatie van het peilmerk weer in Figuur 10.

### Bijlage 3 Verwachte bodemdaling in het jaar 2050



## Bijlage 4 Werkplan Long Term Subsidence Fase II (LTS-II)

### Introductie

Het gasveld Ameland wordt sinds 1986 geproduceerd. Het veld is op twee na grootste gasveld in Nederland en ligt onder delen van Ameland, de Waddenzee en de Noordzee. Al voor de start van de winning werd er rekening gehouden met bodemdaling en de mogelijke ecologische gevolgen daarvan. Het monitoren van de bodemdaling en de voorspelling van toekomstige bodemdaling boven de aanwezige kwetsbare gebieden is daarom een belangrijke activiteit voor de NAM. De bodemdalingprognoses zijn in de jaren na de start van de winning bijgesteld op basis van nieuwe metingen en inzichten. Deze variatie is gedocumenteerd en bekritiseerd door externe partijen (zie Figuur 23), waarbij de betrouwbaarheid van deze berekeningen in twijfel werd getrokken.

Bron	Einddatum [jaar]	Einddaling [cm]	+/- [cm]	Volume [Mm <sup>3</sup> ]
NAM 1998.09.000394, prognose 1985	2005	26	5	28
Basis monitoring programma 1987	?	31	-	-
NAM 1998.09.000394, prognose 1991	2025	18	4	18
NAM 1998.09.000394, prognose 1996	2020	18	4	-
NAM 1998.09.000394, prognose 1998	2020	28	6	18
Winningplan Ameland 22-12-2003	2020	34	3	-
Monitoring rapport mei 2005	2013	33		22
Winningplan Ameland 01-05-2006	2020	34	3	-
Winningplan Ameland 27-02-2007	2021	35	3	?
Winningplan Ameland 24-05-2007	-	-	-	?
Winningplan Ameland 09-2011	2035	39.5	2.5	20

**Figuur 23** overzicht van historische geomechanische voorspellingen voor Ameland (Houtenbos, 2011)

De variatie in resultaten komt voort uit de onzekerheid in de bestaande kennis van de ondergrond en voortschrijdend inzicht met betrekking tot de hoeveelheid te winnen gas, waarbij diverse partijen waaronder NGO's zoals de Waddenvereniging zich zorgen maken of deze onzekerheid niet leidt tot een consistente onderschatting van de bodemdaling en daarmee een onderschatting van het risico op het verstoren van ecologische processen in het gebied. Vragen die in dit licht opkomen zijn:

- Hoe staat het met de onzekerheid in bodemdaling die blijkt uit de variatie aan voorspellingen?
- Is er een objectieve manier om met inachtneming van alle beschikbare kennis, de onzekerheid in bodemdalingvoorspellingen boven Ameland en de Waddenvelden in te schatten?
- is beïnvloeding/sturing van het bodemdalingsproces door aanpassing van het productieniveau mogelijk, als dit nodig mocht zijn (Hand aan de Kraan)?

In de onderstaande alinea's staat een algemene beschrijving hoe modellen die gemaakt zijn voor de ondergrond tot stand zijn gekomen en hoe deze modellen gebruikt worden om bodemdaling te berekenen.

Voorafgaand aan de productie van een gasveld wordt de kennis van de ondergrond ingevuld door het doen van seismische metingen en metingen in boorgaten. De interpretatie van deze metingen wordt gebruikt om tot een beschrijving van de geologische structuur van de

ondergrond te komen, die resulteert in een geologisch model. Tijdens de productiefase van het gasveld worden voortdurend metingen verricht aan de gasdrukken en de hoeveelheid productie. Deze gegevens geven een steeds beter inzicht in het volume gas dat zich in de ondergrond bevindt en de stroming van het gas naar de productieputten. Op basis hiervan wordt een zogenaamd dynamisch reservoir model gemaakt waarin deze gegevens worden verwerkt, in combinatie met kennis van de fysische processen die betrekking hebben op de stroming van gas en water in de ondergrond.

Boven het gasveld en in de omgeving er omheen worden geodetische metingen uitgevoerd die de bodemdaling meten. Samen met gesteentemechanische metingen worden deze gegevens gebruikt om alternatieve geomechanische modellen te kalibreren en te valideren waarna prognoses kunnen worden gemaakt van toekomstige bodemdaling. De geomechanische modellen zijn sterk afhankelijk van de reservoirmodellen omdat drukdaling de bron is voor samendrukking van het gesteente met bodemdaling als gevolg.

De bovengenoemde interpretaties van metingen in de ondergrond en de daaraan gekalibreerde modellen kennen een onzekerheid. Dit geldt ook voor de gemodelleerde fysische processen en voor de waarden van de variabelen die in de modellen gebruikt worden. Voortdurend meten en monitoren zorgt ervoor dat modellen kunnen worden gevalideerd en gekalibreerd. Als gevolg van deze continue validatie en kalibratie is aangetoond dat bodemdaling als gevolg van gaswinning zich niet lineair proportioneel ontwikkelt met de drukdaling in het gasveld, iets dat in de bodemdalingprognoses tot 2003 door NAM wel werd aangenomen.

In de jaren na 2003 werd een doorgaande bodemdaling geconstateerd boven het Ameland gasveld terwijl de verdere drukdaling beperkt was, iets dat in latere modellen werd meegenomen. Echter, de fysische achtergrond van dit proces was niet duidelijk en daarom heeft de NAM in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en SodM de studie "Long Term Subsidence" (Fase I) uitgevoerd, die als doel had de mechanismen achter dit niet-lineaire gedrag van bodemdaling nader te onderzoeken. Deze studie liep van 2013 t/m 2015.

Na kennis te hebben genomen van de resultaten van dit onderzoek heeft SodM de NAM opgedragen de onderzoekresultaten van deze LTS Fase I studie toe te passen op de modellering van de Amelandproductie (LTS Fase II). Tevens heeft SodM aan de NAM gevraagd inzichtelijk te maken wat het resultaat van de Fase II studie (LTS-II) betekent voor de overige Waddenwinningen en dan met name voor de effectiviteit van het Hand Aan de Kraan principe: om het verloop van het na-ijlen van bodemdaling, volgend op een eventuele insluiting van gasproductie op een betrouwbare manier inzichtelijk te maken.

Met LTS-II dient de onzekerheidsruimte van de modellen op een objectieve manier in kaart te worden gebracht waarbij de voorspellingen van de bodemdaling die voortkomen uit deze studie worden vergeleken met voorspellingen die gedaan zijn in voorgaande studies. Het werkplan voor LTS-II wordt in dit document verder beschreven.

### **LTS-II en de Meet- & Regelcyclus**

Op het vaste land en in de kustgebieden waar bodemdaling door gaswinning optreedt, voert de NAM hoogteverschilmetingen uit. Hiervoor worden naast waterpassingen ook moderne technieken zoals GPS- en InSAR-(Interferometric Synthetic Aperture Radar) gebruikt. De meetresultaten worden gebruikt om de bodemdalingmodellen te kalibreren cq te valideren. De modellen dienen vervolgens om te voorspellen hoe de bodemdaling zich ontwikkelt in tijd en ruimte. Voor de gasvelden in het Waddenzeegebied (Nes, Moddergat, Lauwersoog, Vierhuizen, Anjum en Ameland) wordt een jaarlijkse cyclus van de geodetische monitoring en de geomechanische modellering gerapporteerd aan de Minister van Economische Zaken. Deze procedure is wettelijk vastgesteld en beter bekend als de Meet- & Regelrapportage. Alle nieuwe inzichten op het gebied van het meten en modelleren van bodemdaling worden in deze rapportage meegenomen. Het is dan ook de bedoeling dat het resultaat van deze LTS-II studie onderdeel wordt van de onderbouwing van de Meet- & Regelrapportage. Als



zodanig wordt het onderhavige werkplan als bijlage bij de Meet- & Regelrapportage over 2015 gevoegd. De rapportage over 2015 wordt in april 2016 met belanghebbenden gedeeld en in mei aan het Ministerie van Economische zaken aangeboden.

Dit werkplan betreft hoofdzakelijk de toepassing van onderzoekresultaten uit de LTS-I studie op het gasveld Ameland. Hiertoe dient een workflow ontwikkeld te worden die vervolgens ook voor de andere Waddenwinningen kan en zal worden ingezet als onderdeel van de Meet- & Regelcyclus.

## **Samenwerking**

Voorafgaand aan dit werkplan heeft de NAM in overleg met belanghebbenden uitgebreid gesproken over werkvormen, projectstructuur en de mogelijke betrokkenheid van externe specialisten. De gekozen projectstructuur wordt nader toegelicht in hoofdstuk 6. In “Long Term Subsidence” fase I (LTS-I) werd gewerkt met een begeleidingscommissie onder regie van de Waddenacademie. Deze internationale groep specialisten heeft bij de afronding van de studie uitgebreid geadviseerd over de implementatie van de onderzoekresultaten. Deze adviezen zijn gebundeld in een lijst die wordt gebruikt om sturing te geven aan dit werkplan. Tevens heeft NAM onderzoekers van TNO, de TU Delft en Shell Global Solutions betrokken bij het uitwerken van dit werkplan. Samen met NAM-specialisten op het gebied van geodesie, reservoir engineering en geomechanica, vormen deze onderzoekers de Technische Begeleidingcommissie (TB) voor LTS-II. SodM en TNO-AGE zullen als waarnemer in de TB plaatsnemen. Deze TB stuurt het onderzoek aan en interpreteert de resultaten. Tevens informeert de TB de belanghebbenden (zie ook hoofdstuk 6).

## **Basis voor het werkplan**

Dit werkplan is een product van de NAM voor LTS-II en is geschreven op grond van de volgende elementen:

- 1) Onderzoekresultaten LTS-I
- 2) Opdrachtbrief van SodM voor LTS-II
- 3) Aanbevelingen van de internationale begeleidingscommissie voor LTS-I zoals verwoord door de Waddenacademie
- 4) Gedetailleerde aanvullende lijst met suggesties van de begeleidingscommissie voor LTS-I voor vervolgonderzoek en implementatie van de LTS-I studieresultaten, zoals geïnventariseerd door de NAM

Deze documenten zijn te vinden op:

[www.nam.nl/nl/downloads/reports-wadden/long-term-study-reports.html](http://www.nam.nl/nl/downloads/reports-wadden/long-term-study-reports.html)

Daarnaast is er een eerste workshop met de TB voor LTS-II georganiseerd op 7 en 8 december 2015, waarin de aanbevelingen uit bovenstaande documenten zijn meegenomen om tot een afgewogen werkplan voor LTS-II te komen. Later in december 2015 en in januari 2016 heeft in samenspraak met de leden van de TB dit werkplan verder gestalte gekregen.

## **De opdracht voor LTS-II**

In reactie op de door NAM ingediende rapporten van LTS-I heeft SodM aan de NAM een brief gestuurd (SodM, 2015). In deze brief staan de volgende vier voorwaarden voor LTS-II opgenomen.

1 *“De tot nu toe door NAM aangeleverde resultaten van de studie hebben meerdere aannemelijke hypothesen opgeleverd voor de verklaring van de waargenomen tijdsafhankelijke effecten in het bodemdalingsgedrag. In het werkplan, dat NAM uiterlijk 1 februari 2016 bij SodM zal indienen, verwacht ik dat NAM nader aangeeft hoe de (combinatie van) hypothesen getest gaan worden en welke methodiek zal worden toegepast om de voorspelde en de waargenomen bodemdaling onder de verschillende scenario’s te vergelijken. Ook dient de methodiek beschreven te worden die zal worden gebruikt om de lange termijn effecten onder de diverse scenario’s te berekenen. Dit onderzoek moet niet onnodig veel tijd in beslag nemen. Ik verwacht van NAM dat het werkplan zodanig wordt ingericht, dat het onderzoek voor februari zal worden voltooid.”*

2 *“In overeenstemming met het advies van de wetenschappelijke stuurgroep van nationale en internationale deskundigen die de eerste fase van het onderzoek heeft begeleid dient deze toetsing te worden*



uitgevoerd tegen de historische productie en bodemdalingsdata van het Ameland veld. Daarbij moet onderzocht worden welke range (van combinaties) van aannemelijke hypothesen het waargenomen bodemdalingsgedrag van het Ameland veld kan verklaren. Hierbij is van belang om te bezien hoe de gevonden relatie zich —op hoofdlijnen- verhoudt tot het waargenomen bodemdalingsgedrag van andere velden die door de NAM in Nederland worden geopereerd.“

3 “De studie dient aannemelijk te maken dat —op grond van de nieuwe inzichten de verwachte bodemdaling van de gasvelden Anjum, Moddergat, Nes, Lauwersoog en Vierhuizen, niet zal leiden tot overschrijding van de vastgestelde veilige gebruiksruimte. Ik ga er ervan uit dat NAM in deze analyse gebruik maakt van het nieuwe, voor 1-1-2016 vast te stellen Zeespiegelscenario, dat tot 2021 een vastgestelde Gebruiksruimte geeft.”

4 “De studie dient tevens aannemelijk te maken dat een ingreep op basis van het ‘Hand aan de Kraan’ principe effectief is wanneer metingen —en de daarop gebaseerde prognoses- onverhoopt aangeven dat er een reële kans is dat de gebruiksruimte overschreden is of zal worden overschreden (remwegscenario).”

## Workshop LTS-II

Ten behoeve van LTS-II heeft de NAM op 7 en 8 december 2015 een workshop georganiseerd voor de TB. Deze workshop heeft geleid tot een stappenplan voor LTS-II, dat in vervolvergaderingen nader is ingevuld. Het stappenplan dat aan het einde van dit document wordt getoond bestaat uit de volgende hoofdcomponenten.

- 1) Ondergrondse gegevens, modellen en onzekerheid
- 2) Geodetische gegevens en onzekerheid
- 3) Confrontatie en combinatie van de ondergrondse kennis met de bovengrondse geodetische informatie
- 4) Projectmanagement en communicatie naar belanghebbenden

Deze hoofdcomponenten worden hieronder in meer detail uitgewerkt.

## Hoofdcomponenten van het werkplan

### Ondergrondse gegevens, modellen, metingen en onzekerheid

De component “Ondergrondse gegevens, modellen en onzekerheid” gaat over het beschrijven van de range aan mogelijke modellen, modelcombinaties en de onzekerheid van parameterwaarden die in die modellen worden ingezet. Hoe breed deze range aan modelcombinaties is blijkt uit de modelketen (Geologisch model → Reservoirmodel → Geomechanisch model) zoals die schematisch is weergegeven in Figuur 24. Per model zal een overzicht worden gegeven van de invoergegevens (Figuur 24) die gevarieerd worden in het onderzoek. Combinaties van parameters en hun onzekerheid zullen resulteren in discrete scenario’s die vergeleken zullen worden met de geodetische waarnemingen (Figuur 24).

#### reservoir en geologisch model

- porositeit en permeabiliteit
- ligging gas -water contact
- aquifer grootte
- aquifer drukrespons in tijd (residueel gas, gereduceerde permeabiliteit, relatieve permeabiliteit)
- volume
- doorlatendheid breuken
- productie data, druk data, W/G ratios



#### geomechanisch model

- compactiemodellen
- invoerwaarden compactiemodellen
- overburden structuur
- zoutgedrag
- heterogeniteit overburden
- geodetische data

**Figuur 24** schematische weergave van de modelketen. In wit, de invoergegevens voor de modellen. In oranje zijn de meetgegevens vermeld die gebruikt kunnen worden voor modelvalidatie/kalibratie.

### **Reservoir/geologisch model**

Het geologisch model voor Ameland wordt als basis gebruikt voor het reservoir model. De structuur van het model (ligging breuken, dieptes van de lagen) ligt in dit model vast. Binnen de modelomgeving kunnen de waarden van parameters die invloed hebben op de druk en productiegeschiedenis worden gevarieerd. De belangrijkste parameters zijn de porositeit en permeabiliteit van het gesteente, diepteligging van het gas/water contact, doorlatendheid van de breuken, diepte van de bovenkant van het reservoir en de grootte van de aquifers (Figuur 25).

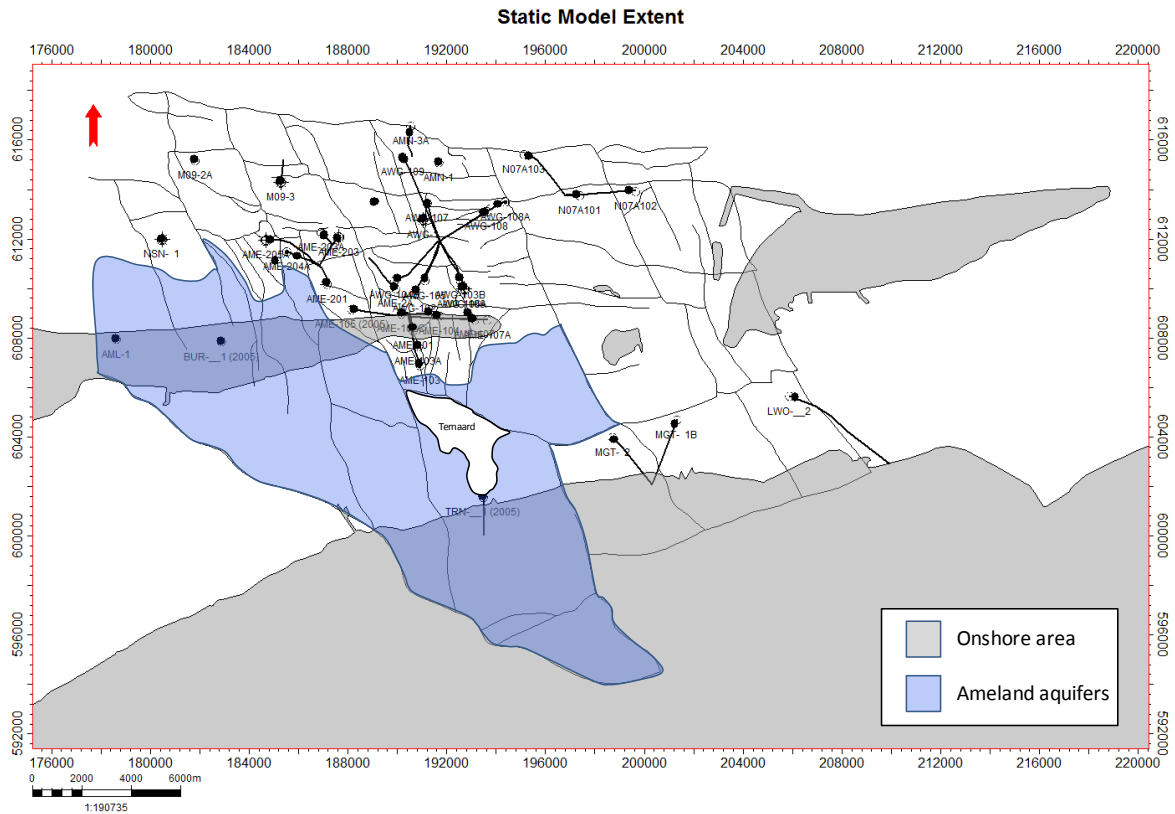
#### *Aquifers*

Ameland produceert sinds het jaar 1986 en gedurende de productietijd zijn er voortdurend metingen genomen die de onzekerheidsbandbreedte in voorspellingen van GIIP (Gas Initially In Place), productie, doorlatendheid van de breuken in het gasveld, de gas/water ratio en de ligging van het gas-water contact hebben gereduceerd. Deze reductie in onzekerheid geldt slechts in beperkte mate voor de extensie van de aangrenzende aquifers en de drukontwikkeling daarbinnen, omdat gegevens hiervoor slechts in beperkte mate aanwezig zijn. Mogelijke beweging van water richting het gasgedeelte (mobiliteit) van het reservoir heeft een gering effect op de drukontwikkeling in het gasgedeelte door het verschil tussen water- en gascompressibiliteit. Alleen in het geval van een zeer mobiel aquifer zal het effect zichtbaar zijn op de drukontwikkeling van het gasveld en een verlaging van de gas/water ratio's in de putten. Geringe mobiliteit kan echter gepaard gaan met een sterk effect op de drukdaling in een aquifer waardoor deze compacteert, met bodemdaling als gevolg. Het aantal scenario's dat bepaald gaat worden voor de reservoir modellen zal daarom sterk afhangen van de variatie in drukontwikkeling en locatie van de aangrenzende aquifers. Hierbij zal worden gekeken naar de breukdoorlatendheid, het effect van residueel gas in de aquifer en mogelijke verschillen tussen gasveld- en aquiferpermeabiliteit.

#### *Onzekerheden*

De onzekerheid over het gasvolume wordt sterk begrensd door de grote hoeveelheid gemeten data. Deze onzekerheid zal daarom niet nader getoetst worden binnen de nieuw te ontwikkelen workflow. LTS-II zal een hoog, midden en laag scenario voor het gasvolume gebruiken zoals reeds gehanteerd door NAM.

Op basis van beschikbare water/gas ratio metingen aan de productiestroom zal toetsing van het reservoirmodel een zekere begrenzing van de mogelijke aquifermobiliteit opleveren. De overgebleven onzekerheid in aquifermobiliteit in combinatie met de mogelijke grootte van de aquifers zal naar verwachting de belangrijkste factor blijken in de bepaling van de onzekerheid van het totale bodemdalingsvolume.



**Figuur 25**      **Overzicht van de laterale aquifers die mogelijk communiceren met het Ameland gasveld**

**Geomechanisch model**

Het geomechanische model vertaalt de drukverandering die volgt uit het reservoirmodel naar compactie. Compactie wordt vertaald naar bodemdaling via invloedfuncties waarbij de gemodelleerde bodemdaling vergeleken kan worden met de gemeten bodemdaling. In de studie LTS-I is geconcludeerd dat mogelijke tijdeffekten die zichtbaar zijn in de bodemdaling boven Ameland veroorzaakt kunnen worden door zowel tijdafhankelijk compactie gedrag van het reservoir als tijdafhankelijk gedrag dat wordt veroorzaakt door het zout boven het reservoir. Een combinatie van deze twee processen is ook mogelijk. In LTS-II wordt de geomechanische onzekerheid bepaald door onzekerheid over:

- Compactiemodellen. Drie compactiemodellen zullen daarom worden gebruikt in de berekeningen, namelijk: een rate-type model (RTCiM), een bilineair en een Time-Decay compactiemodel.
- Invoerwaarden compactiemodellen. Alle compactiemodellen kennen een aantal variabelen waarvan de waarden gevarieerd worden. Compactie metingen aan kernen (bv. Hol et al, 2015) kunnen gebruikt worden om deze onzekerheid te begrenzen.
- Heterogeniteit van de overburden. De lagen boven het reservoir kunnen opgedeeld worden in verschillende lagen met verschillende waarden voor de geomechanische eigenschappen. Deze waarden kunnen dicht bij elkaar liggen (homogeen) dan wel ver uit elkaar (heterogeen). Heterogeniteit heeft een invloed op de doorvertaling van compactie naar bodemdaling en de mate van heterogeniteit wordt meegenomen als een variabele in de bodemdaling scenario's.
- Zoutgedrag. De zoutlaag boven het reservoir reageert op een andere manier op spanningsverandering dan de overige lagen. Zout gedraagt zich als een visceuze

vloeistof waarbij het gedrag kan worden beschreven met een lineair visceus (kruip) model. De viscositeit van het zout wordt gevarieerd in LTS-II waarbij de variatie begrensd wordt door observaties uit laboratorium experimenten en indirecte waarnemingen van zoutkruip in de cavernes van de nabijgelegen Barradeel zoutmijn.

- Overburden structuur. De zoutlaag boven het reservoir wordt gekenmerkt door een grote variatie in de dikte. Uniforme diktevariatiën kunnen worden meegenomen in sommige beschikbare analytische modellen, echter dit geldt niet voor de laterale variatie in de zoutdikte. In LTS-II zal de invloed van de laterale variatie worden onderzocht door de uitkomsten van analytische modellen met een uniforme dikte voor het zout te vergelijken met numerieke modellen waarbij de zoutdikte lateraal is gevarieerd op basis van de bestaande ondergrond kartering voor Ameland.

### **Geodetische gegevens en onzekerheid**

Beschikbare geodetische meetgegevens worden verzameld en in de vorm van ruimtelijke en temporele relatieve hoogteverschillen beschikbaar gesteld. Daarnaast worden verschillende covariantiematrices opgesteld, die de precisie in verschillende scenario's modelleren. Naast de meetprecisie wordt daarbij ook rekening gehouden met de zogenoemde idealisatieprecisie, die met versturende effecten zoals autonome bewegingen van meetpunten rekening houdt. Gezien de schaarse bedekking van het oostelijke deel van Ameland met InSAR waarnemingen, worden in LTS-II alleen waterpassing en GPS metingen meegenomen.

Optische waterpassingen op het eiland zijn voor de hele productieperiode beschikbaar. Daarnaast zijn tot 2001 ook hydrostatische waterpassingen naar peilmerken in de Waddenzee en getijpalen in de Noordzee uitgevoerd (met behulp van een met vloeistof gevulde slang). In het bijzonder bij de optische waterpassingen wordt in LTS-II een aantal grove uitschieters onderzocht en wordt het effect daarvan op de geomechanische modellering onderzocht.

Jaarlijkse GPS meetcampagnes zijn in de Waddenzee beschikbaar sinds 2006. Sinds dat jaar bestaat ook het permanente GPS station AME1 op de NAM locatie "Ameland Oost". In 2015 kwamen de permanente stations AME2 en AWG1 op de platforms "Ameland Oost 2" en "Ameland Westgat" erbij. Op de platforms zijn in 2006, 2009 en 2011 ook campagnemetingen uitgevoerd. Bij de verwerking van de GPS metingen zal nog de autonome beweging van meetpunten op de wadplaten moeten worden onderzocht.

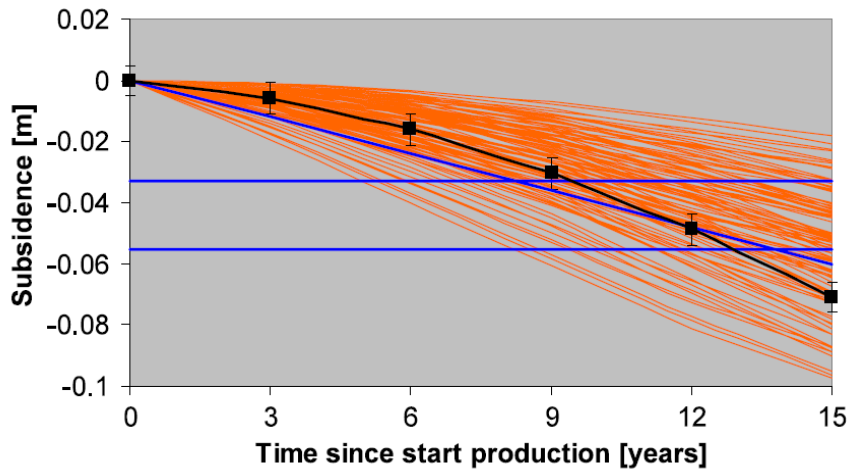
### **Confrontatie en combinatie van de ondergrondse kennis met de bovengrondse geodetische informatie**

De onzekerheid die hierboven is beschreven voor de ondergrondse modellen zal zich uiteindelijk vertalen naar een onzekerheid in de bodemdalingsprognose. Het kwantificeren van deze onzekerheid vereist een probabilistische aanpak waarbij diverse statistische methodes bestaan die de onzekerheid van de gemodelleerde bodemdaling kunnen kwantificeren m.b.v. de gemeten bodemdaling. De totale verzameling modellen, modelparameters en voorspellingen wordt de modelruimte genoemd. In de TB zijn diverse confrontatiemogelijkheden besproken en deze zullen verder worden uitgewerkt in de beginfase van het LTS-II project. Tevens is voorgesteld om een generieke workflow op te zetten die getest kan worden op een synthetische dataset voordat deze ingezet gaat worden op de Ameland scenario's. Het voorstel voor een generieke workflow wordt hieronder gepresenteerd.

#### **Stap 1 selecteren statistische methode en type modellen**

De keuze van de probabilistische aanpak vereist een gefundeerd inzicht in de verschillende mogelijke modellen en de consequenties voor het geheel van de studie. De keuze zal worden gemaakt in nauw overleg met de TB. In de tweede plaats moet er ook een keuze

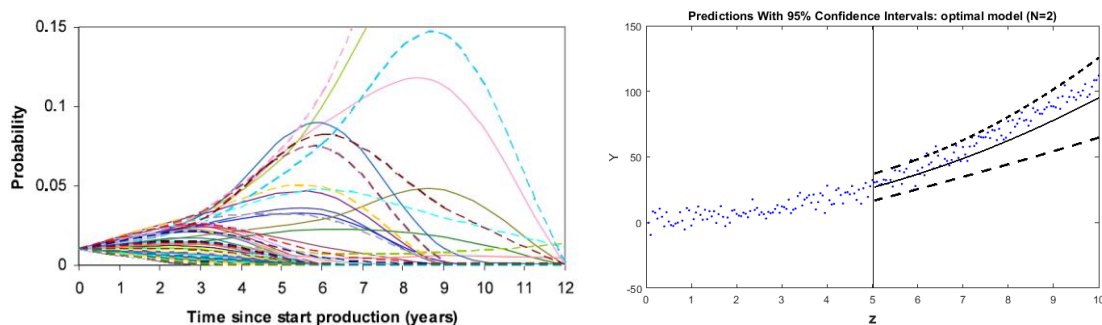
worden gemaakt over de te gebruiken geomechanische modellen (compactie model in combinatie met de invloedfuncties die compactie van het reservoir vertalen naar bodemdaling). Elk model is omgeven met een eigen onzekerheid. Deze onzekerheid kan worden beschreven/geschat door een ensemble van mogelijke scenario's te realiseren en te vergelijken met de geodetische data (Figuur 26).



**Figuur 26** Voorbeeld van een ensemble van bodemdalingsscenario's vergeleken met de gemeten data (Nepveu et al., 2010)

Hoe beter het scenario past bij de waarnemingen, hoe hoger de waarschijnlijkheid van het scenario is. Het belangrijkste doel van deze studie is de objectieve bepaling van de waarschijnlijkheid van mogelijke bodemdalingsscenario's met een toepassing op het Ameland veld. Hierbij is het belangrijk om a priori alle mogelijke variaties mee te nemen in de statistische toets.

In de workshop van 7 en 8 december 2015 zijn verschillende statistische methodes voorgesteld (bv Park en Bierman, 2015, Nepveu et al., 2010) om de waarschijnlijkheid voor de verschillende scenario's te bepalen en daarmee ook objectief een onderscheid te maken tussen een hoog, verwacht en laag scenario voor de mogelijke bodemdaling. De methode die door Nepveu et al. (2010) is voorgesteld maakt gebruik van alle data waarbij de cumulatieve waarschijnlijkheid wordt berekend voor elke tijdstap met nieuwe data.



**Figuur 27** Links; de waarschijnlijkheid per scenario als functie van de hoeveelheid metingen in de tijd (Nepveu et al., 2010). Rechts; een methode waarbij de modellen gekalibreerd worden met een deel van de beschikbare data en gevalideerd met het andere deel (Park en Bierman, 2015).

De methode van Park en Bierman (2015) gaat uit van een splitsing van de dataset waarbij een deel wordt gebruikt voor de kalibratie en onzekerheidsschatting van een mogelijk model en een tweede deel gebruikt wordt voor de validatie van het model.

### Stap 2 Software omgeving creëren die de metingen en modelresultaten combineert

De grootste inspanning bij de implementatie van het probabilistische algoritme is de invoer en uitvoer van modelresultaten, modelparameters en modellen en het aansturen van de

modellen. De methode zal worden geïmplementeerd in een softwaretool gecreëerd met behulp van Matlab of Python. Een voorlopige lijst van routines om deze communicatie te faciliteren is terug te vinden in Appendix A.

### **Stap 3 Testen van de workflow met synthetische modellen, documentatie en verdere implementatie**

De correctheid en de robuustheid van de workflow zal worden vastgesteld met een aantal tests op basis van synthetische modellen. Verder is een grondige documentatie van de workflow een vereist resultaat.

### **Verdere uitwerking van de scenario's voor Ameland**

De generieke workflow zal in de tweede fase van het project worden gebruikt om de betreffende modelruimte te onderzoeken, die wordt gegeven door de onzekerheid van de ondergrondse modellen en bijbehorende modelparameters voor Ameland. Tabel 10 presenteert een aanzet voor de mogelijke variaties van parameters die gelden voor de verschillende modellen. Bij aanvang van LTS-II zal een workshop worden gehouden om de tabel verder af te stemmen en volledig te maken.

**Tabel 10 Voorbeeld van mogelijke variaties van de verschillende parameters die behoren bij de ondergrondmodellen voor Ameland**

Model- of parameter	variatie	Aantal variaties
Reservoir model gas gedeelte, volume	Volume via GIIP, GWC en porositeit (hoog, laag, verwacht). Via Dynamo history match	3
Aquifer drukrespons in tijd per blok	<ul style="list-style-type: none"> <li>• residueel gas, 3 percentages (hoog, laag, verwacht)</li> <li>• gereduceerde permeabiliteit, 3 permeabiliteiten (hoog, laag, verwacht)</li> <li>• combinaties mogelijk</li> </ul>	9
doorlatendheid breuken	Doorlatendheid breuken (aan, uit, half)	3
Aquifergrootte	4 Mogelijke aquiferblokken die wel of niet communiceren met het gasveld.	16
Compactie model	<ul style="list-style-type: none"> <li>• time decay; 2 Parameters, 5 variaties per parameter,</li> <li>• RTCiM 4 Parameters, 3 variaties per parameter,</li> <li>• Bilineair 3 Parameters, 5 variaties per parameter,</li> </ul>	25 81 125
Zoutgedrag	5 waarden voor lineaire viscositeit, gebaseerd op bekende distributie van bv Barradeel observaties	5
Heterogene overburden	3 modellen (homogeen, verwacht en hoge mate van heterogeniteit)	3

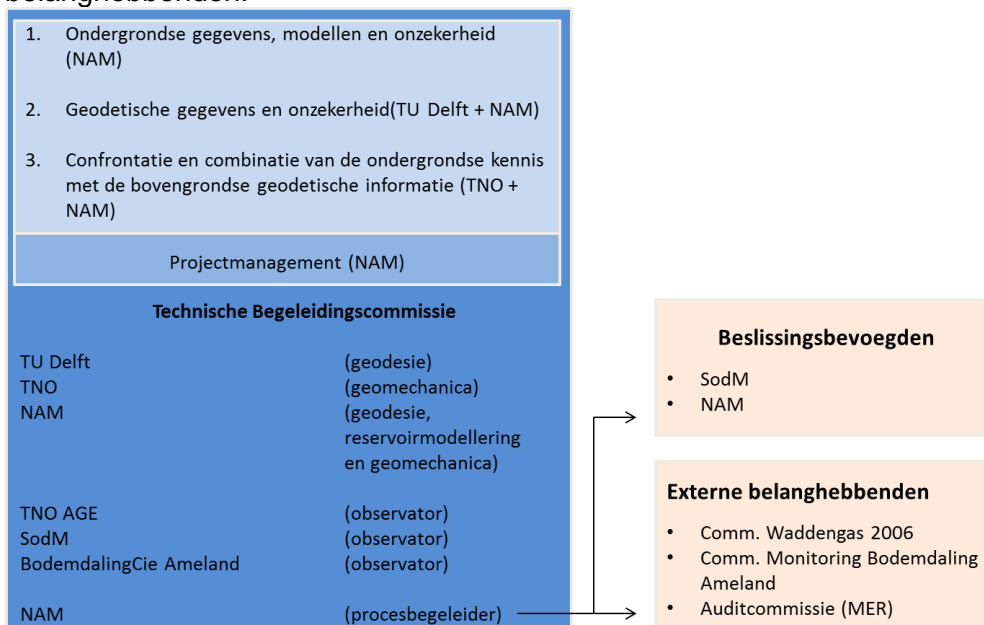
## **Uitkomsten van deze studie**

De volgende uitkomsten worden verwacht na het uitvoeren van deze studie, waarbij tussen haakjes vermeld wordt met welke punten (1 t/m 4) uit de brief van SodM de studieuitkomst gekoppeld is.

- Een workflow die op een objectieve manier de waarschijnlijkheid van mogelijke bodemdalingsmodellen kan testen, waarbij de mogelijke hypothesen die voortvloeien uit de LTS Fase I studie meegenomen worden (1).
- Een aantal meer waarschijnlijke bodemdalingsscenario's met elk een ander gevolg voor de toekomstige bodemdaling boven het Ameland veld. Uit het totaal aan scenario's wordt een distributie afgeleid die onder meer een verwachte (b.v. P50) bodemdalingsprognose genereert (2).
- Een analyse die de nieuwe distributie van bodemdalingsscenario's vergelijkt met de Ameland scenario's die gekozen zijn in de M&R cyclus rapportage over 2015 met daarbij een beschrijving van de discrepanties en de mogelijke gevolgen die dit kan hebben voor de M&R cyclus rapportage over 2016 (3).  
De betekenis van dit resultaat voor de overige gasvelden die onderdeel zijn van de M&R cyclus zal gebeuren op basis van analogieën in kwalitatieve zin, omdat het niet mogelijk is om een vergelijkbaar project op te zetten voor de overige velden binnen de gegeven tijd voor de geplande afronding van LTS-II. NAM zal na het afronden van het LTS-II project in februari 2017 beginnen met de toepassing van de generieke workflow voor de overige Waddenvelden. De eerste resultaten hiervan zullen naar verwachting worden gerapporteerd in de M&R rapportage over het jaar 2017 (3).
- Een analyse van het effect van een hypothetische stop van productie van het Ameland gasveld op een nader te bepalen tijdsmoment(en), met daarbij een uitspraak over de analogie met de overige Waddenvelden en de effectiviteit van het Hand aan de Kraan principe (4).
- Een rapport dat nader ingaat op de effecten van de zoutlaag op de bodemdaling waarin een vergelijking wordt gemaakt tussen de resultaten van analytische modellen met numerieke modellen (3,4).

## Projectmanagement en communicatie naar de stakeholders

Onderstaand figuur geeft de organisatie van de studie weer. Het onderzoek zal worden uitgevoerd door onderzoekers van TNO, de TU-Delft en de NAM. TNO ontwikkelt de generieke workflow, de NAM verzorgt de beschrijving van de modelruimte voor Ameland en de implementatie daarvan in de generieke workflow. De TU-Delft zorgt in samenwerking met de NAM voor het voorbereiden van de gewenste geodetische dataset. De onderzoekers rapporteren aan de TB die besluit over de voortgang en interpretatie van de resultaten. Naast experts binnen NAM bestaat de Technische begeleidingscommissie uit externe specialisten op het gebied van geodesie en geomechanica van TNO en de TU Delft. Tevens zit er een aantal observatoren in de technische begeleidingscommissie van TNO-AGE, SodM en de commissie Monitoring Bodemdaling Ameland. De procesbegeleider heeft als rol het proces te monitoren en er zorg voor te dragen dat externe specialisten voldoende inbreng in het proces en de producten hebben. De procesbegeleider rapporteert aan de beslissingsbevoegden van NAM en SodM over het verloop van het proces op het gebied van samenwerking en communicatie. Daarnaast informeert de procesbegeleider de externe belanghebbenden.



**Figuur 28** Projectstructuur en belangrijkste componenten uit het werkplan LTS-II .

### Communicatie met de stakeholders

Deze studie is van belang voor partijen die zich zorgen maken over eventuele effecten van de bodemdaling in het Waddengebied. Deze partijen zijn vertegenwoordigd in de Commissie Waddengas 2006 en de Commissie Monitoring Bodemdaling Ameland. Het betreft hier overheden zoals de Provincie Fryslân, gemeente Ameland, Rijkswaterstaat, etc. en niet-overheden zoals de Waddenvereniging, Natuurmonumenten, It Fryske Gea, etc.. De bovengenoemde commissies zijn bij uitstek geschikt om, binnen hun commissie en aan de betreffende leden, relevante onderzoekresultaten te presenteren en vragen te beantwoorden. Daarnaast bestaat er een Auditcommissie die jaarlijks de Minister van Economische Zaken adviseert omtrent de monitoringresultaten die in het kader van het Hand Aan de Kraan principe worden opgeleverd. Ook deze commissie wordt op de hoogte gesteld van de ontwikkelingen op het gebied van bodemdalingvoorspellingen. In de onderstaande alinea's wordt beschreven hoe en wanneer er in dit project met deze commissies en de partijen die daarin vertegenwoordigd zijn wordt gecommuniceerd. NAM Website – Op [www.nam.nl](http://www.nam.nl) wordt over de voortgang van het project LTS-II gerapporteerd. Naast het procesverslag dat ten grondslag ligt aan dit werkplan wordt de voortgang halverwege 2016 gerapporteerd.



### **Commissievergaderingen**

Gedurende 2016 zal tijdens de commissievergaderingen van Waddengas 2006 en commissie monitoring bodemdaling Ameland de voortgang van het project worden toegelicht. Deze toelichting zal door de procesbegeleider worden verzorgd. De voorzitter van de Commissie Monitoring Bodemdaling Ameland, dr. J. de Vlas, wordt uitgenodigd om als observator de maandelijkse vergaderingen van de Technische Begeleidingscommissie van LTS-II bij te wonen.

### **Meet- en Regelcyclus rapportage en de AuditCie**

**Jaarlijks** rapporteert de NAM een update van de gemeten- en gemodelleerde bodemdaling voor de gaswinning onder de Waddenzee aan het bevoegd gezag, die dit ter controle aan de onafhankelijke Auditcommissie voorlegt. Deze rapportage vindt plaats rond 1 mei. Eind mei worden de resultaten van monitoring en modellering aan een breed publiek voorgelegd gedurende een jaarlijkse bijeenkomst in Hotel de Zeegser Duinen, te Zeegse. Dit werkplan voor LTS-II wordt als bijlage bij de Meet- & Regelrapportage over 2015 gevoegd. Op de bijeenkomst in Zeegse (mei 2016) zal het plan worden toegelicht voor het brede publiek.



## Referenties

Hol, S., van der Linden, A.J., Zuiderwijk P.M.M., . Marcelis F.H.M & Coorn A.H. (2015) Mechanical characterization of Permian reservoir sandstone from the Moddergat-3 well in the Dutch Wadden Area. Shell report SR.15. 11614 (incl. appendix)

Houtenbos, A.P.E.M. (2011) Precisie en betrouwbaarheid uit metingen.

Nepveu, M., Kroon, I.C., Fokker, P.A. (2010) Hoisting a Red Flag: An Early Warning System for Exceeding Subsidence Limits Math Geosci 42: 187–198

Park, T., Bierman, S. (2015) A Bayesian framework for validating and comparing models for prediction of surface displacements due to reservoir compaction. Shell report SR.15.11680

SodM (2015) Beoordeling SodM van resultaten NAM-studies naar bodemdaling langere termijn. Kenmerk 15159061

## Appendix A

### Algoritme control module.

Het te ontwikkelen software tool zal de workflow faciliteren, welke er globaal als volgt uit zal zien:

- Input van gebruiker
- Inlezen van de model resultaten
- Inlezen van vereffende bodembeweging
- Berekenen van compactie
- Berekenen van bodemdaling
- Confronteren van gemodelleerde (voorspelde) en gemeten (geodetische) bodemdaling
- Bepalen van de waarschijnlijkheid voor de verschillende scenario's
- Bodemdalingsprognose berekenen – gebruikmakend van dezelfde routines als bij berekenen van compactie en bodemdaling voor de confrontatie met historische data
- Output en visualisatie

Om de workflow te kunnen doorlopen zullen een aantal nieuwe modules moeten worden gemaakt, of moeten bestaande modules worden aangepast:

### Input van algoritme control gegevens

In deze module zal de gebruiker kunnen aangeven:

- Welke files moeten worden geselecteerd (reservoir simulaties; gemeten bodembeweging);
- Welke geomechanische modellen (compactie model en invloedfuncties) moeten worden gebruikt
- Wat de a priori verwachtingswaarden en standaarddeviaties van de modelparameters zijn

### Inlezen van MoReS modelresultaten.

De modelresultaten van de reservoirsimulator van belang voor de geomechanische analyse zijn de drukken in de reservoir gridblokken en hun posities.

### Implementatie van compactie modellen.

Een aantal compactiemodellen moeten worden geïmplementeerd zodat zij naadloos samenwerken met de andere componenten in de workflow. Op dit moment zijn de volgende compactiemodellen voorzien:

- Time decay
- Bilineair
- Rate-type

### Generatie van compactiemodelparameters.

Naar aanleiding van de door de gebruiker gegeven input moeten compactiemodelparameters worden gegenereerd. Hierbij moet gebruik worden gemaakt van de verwachtingswaarde, de variantie, en – indien aanwezig – covarianties tussen verschillende parameters.

### Bepalen van compactiegrid.

Met behulp van de compactiemodelparameters, de compactiemodellen en de gegevens van de reservoirsimulaties moet de modelruimte voor de compactie worden gegenereerd. Dit is een ensemble van modellen die worden geacht de a priori onzekerheid van de compactie te omvatten. Mogelijkerwijs zal een middeling worden toegepast omdat het reservoirgrid te gedetailleerd is om als input voor de geomechanische berekeningen te dienen.

### Berekenen van geomechanische invloedfuncties.

Deze functie vertaalt compactie in het reservoir naar bodemdaling. Voor een ondergrond met veronderstelde homogene elasticiteitswaarden, mogelijk met het gebruik van een zogenaamd rigid basement op enige afstand onder het reservoir, zijn analytische functies beschikbaar. Voor een gelaagd model kunnen met behulp van TNO's semi-analytische programma AEsups ook invloedfuncties worden uitgerekend. Hierbij kan ook lineair viscoelastisch gedrag van zout worden meegenomen – dit resulteert dan in tijdsafhankelijke invloedfuncties.

### Toepassen van de geomechanische invloedfuncties op het compactiegrid, voor de volledige modelruimte.

Voor elke meetlocatie van bodembeweging moet van elk compacterend deelvolume de bijdrage aan de bodemdaling worden uitgerekend en geïntegreerd. Voor de tijdsafhankelijke invloedfuncties moet dat verder gebeuren in een convolutie, waarbij de bijdragen van alle voorgaande tijdstappen moeten worden meegenomen. Tenslotte moet dit voor alle scenario's worden uitgevoerd. Het resultaat is de verwachte bodemdaling op basis van de eerder gegeven invoergegevens, met een karakterisatie van de onzekerheid. Voor de onzekerheidskarakterisatie lijkt op dit moment een variantie-covariantie matrix het geëigende middel.

### Confrontatie van de modelresultaten en de metingen om de modelruimte te conditioneren.

Met behulp van de stochastische aanpak die in stap 1 is gedefinieerd wordt aan de bodemdalingsscenario's in het prior model een waarschijnlijkheid of een gewicht toegekend. De precieze invulling van deze module is uiteraard afhankelijk van de gekozen statistische methode (Stap 1). Voor de bepaling van de bodembewegingsvoorspelling hoeft geen nieuwe module worden gemaakt maar kan dezelfde procedure worden gevolgd als voor de modelberekeningen voor het verleden.

### Evaluatie van het modelresultaat (voorspelde daling) in het geval de productie wordt gestopt.

Deze stap evalueert de zgn. remweg van alle scenario's om te onderzoeken wat het effect is op de bodemdalingssnelheid van een mogelijk ingrijpen op het systeem.