

# Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen

## Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2016

NAM B.V.

<i>EP Document Nummer.:</i>	EP201702245479	<i>Owner:</i>	UIO/T/DL
<i>Revision No.:</i>		<i>Status:</i>	
<i>Document Date:</i>	1/5/2017	<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 2).

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 3 en Referentie 4).

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 5) 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 2016 zijn er in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag op 12 peilmerkclusters metingen uitgevoerd, inclusief 3 nieuw geplaatste peilmerkclusters.

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 2016 voortgezet. Sinds 2014 is er een GPS station operationeel nabij Nes (Ameland). Het betreft een AGRS station (Actief GNSS Referentie Systeem). Tevens is er bij Ternaard in 2016 een nieuw GPS station geplaatst. Beide zijn in 2016 in de maandelijkse rapportage opgenomen.

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 productiegegevens. De gedetailleerde dynamische reservoirsimulatiemodellen zijn ook bijgewerkt op basis van deze nieuwe geologische modellen en gekalibreerd met de gemeten gasproductie en reservoirdrukgegevens t/m 1-1-2017. Vervolgens zijn ook de geomechanische modellen 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 het richtscenario voor de zeespiegelstijging dat in 2016 beschikbaar kwam. Het nieuwe zeespiegelscenario geeft een minder sterke zeespiegelstijging aan.
- Op basis van het meetplan Waddenzee zijn in 2016 GPS metingen in de Waddenzee uitgevoerd op 12 peilmerken van de clusters in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. Verder zijn er 3 nieuwe peilmerkclusters geplaatst in het Pinkegat. 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 2016 voortgezet. AGRS (GPS) station Ameland (Nes) en nieuw geplaatst GPS station Ternaard zijn nu ook onderdeel van de monitoring. De modellen volgen deze metingen 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 11). Dit geomechanisch model wordt in meer detail beschreven in Referentie 4 en Referentie 13. Het model inclusief de geomechanische parameters is ongewijzigd t.o.v. het model dat voor de M&R 2014 en 2015 rapportage is gebruikt.
- De voorspelde bodemdalingssnelheid over de komende 20 jaar is lager dan voorspeld in de M&R cyclus 2015. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de drukmeting in Nes aanleiding gaf tot aanpassing van reservoir model. Hierdoor is het waarschijnlijker dat de schalielaag (ROSLU2) ondoorlaatbaar is en er minder drukdaling zal plaatsvinden in de aquifers. Als gevolg hiervan zal de bodemdalingssnelheid in Pinkegat afnemen.
- 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 gebruiksruimte binnen de tijd waarvoor de voorspellingen zijn uitgevoerd, de natuurgrens in Zoutkamperlaag en Pinkegat niet overschrijden.
- 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 gebruiksruijnte valt (in ieder geval voor de komende 23 jaar), worden er geen maatregelen genomen om de productie bij te stellen.

# Inhoud

1	Inleiding .....	7
2	Deelprocessen .....	9
2.1	Metten (stap 1).....	9
2.1.1	Vlakdekkende metingen.....	9
2.1.2	Reservoir monitoring.....	9
2.2	Analyseren meetgegevens (stap 2).....	10
2.2.1	Kwaliteitscontrole en bodemdalingsberekening.....	10
2.2.2	Resultaat bodemdalingsanalyse .....	10
2.2.3	Waddenzee voorkomens .....	10
2.2.4	Continue GPS metingen .....	11
2.3	Verifiëren prognose (stap 3).....	11
2.3.1	Ondergrond modellering .....	11
2.3.2	Overzicht veranderingen reservoirsimulatiemodellen t.o.v. M&R2015.....	12
2.3.3	Kalibratie reservoirsimulatiemodellen.....	12
2.3.4	Ameland realisaties.....	14
2.3.5	Gaswinningsprognose .....	15
2.4	Modellering bodemdaling .....	16
2.4.1	Opstellen van bodemdalingsscenario's: minimum, laag, basis, hoog en maximum .....	16
2.4.2	Modellering bodemdaling Ameland .....	18
2.4.3	Modellering bodemdaling Anjum en Wadden voorkomens.....	19
2.4.4	Belangrijkste overeenkomsten en verschillen tussen de M&R 2015 en M&R 2016 bodemdalingssmodellen .....	21
2.4.5	Onzekerheid van de geomechanische parameters in de gemodelleerde bodemdaling .....	22
2.5	Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4).....	26
2.5.1	Bepaling volume en gemiddelde daling.....	26
2.5.2	Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting rapportagejaar 2016 met onzekerheid .....	29
2.5.3	Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting .....	30
2.6	Indien nodig aanpassen productie (stap 5) .....	32
2.7	Actualiseren (stap 6).....	32
2.7.1	Bodemdaling GPS locaties op Moddergat en Ameland.....	34
3	Kwaliteitsborging.....	36
4	Conclusies .....	37
5	Referenties .....	38
	Bijlage 1. Gemodelleerde en gemeten bodemdaling totaal en sinds 2006.....	39
	Bijlage 2. bodemdaling per punt.....	41
	Bijlage 3 Verwachte bodemdaling in het jaar 2050 .....	42
	Bijlage 4 Resultaten Long Term Subsidence Fase II (LTS-II) .....	43
	Bodemdaling door gaswinning.....	43
	Tijdsafhankelijke bodemdaling.....	43
	Metten en modelleren van bodemdaling .....	44
	Bodemdaling Waddenzee.....	44
	Studie naar het na-ijleffect van bodemdaling .....	45
	Toetsen van de remweg.....	47
	Conclusies .....	48

# 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 2).

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 3 en Referentie 4).

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 2016 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 2016 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 4 en Figuur 5).
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).

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 2016) wordt op

deze manier een B voor 1 januari 2016 berekend.

4. Grafieken met de bodemdalingsbelasting voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag vanaf start productie op de locatie Moddergat tot 2040 (Figuur 13 en Figuur 14).
5. Overzicht bewakingsfunctie met continue GPS hoogtemetingen (Tabel 2-3)
6. Voor de voorkomens in het winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen: drukdata per put op reservoirniveau en productiedata 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 15, Figuur 16, Figuur 17).

#### 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 2016 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 2016.

### 2.1 Meten (stap 1)

#### 2.1.1 Vlakdekkende metingen

Volgens het meetplan voor de Waddenzee zijn in 2016 GPS metingen in de Waddenzee uitgevoerd op 12 peilmerken van de clusters in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. Tevens zijn er 3 nieuwe peilmerkclusters geplaatst. De GPS metingen op het Wad zijn in Referentie 8 beschreven.

De resultaten van de permanente GPS metingen zijn maandelijks aan SodM gerapporteerd. Naast de stations AME1, Moddergat en Anjum, zijn hier in 2016 het AGRS station Ameland (bij Nes) en GPS station Ternaard aan toegevoegd.

#### 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 2016.

**Tabel 2-1 Meest recente resultaten van reservoirdrukmetingen. (CITHP = ingesloten put aan oppervlak gemeten en geconverteerd naar reservoirniveau, SPG = ingesloten put op reservoirniveau meten, RFT = druk gemeten in open put voordat hij is compleet).**

Velden	Datum	Put	Druk op reservoir niveau (bara)	Type meting
Lauwersoog-Centraal	08/04/2016	LWO-2	188 (@ 4035 mTVDNAP)	CITHP
Lauwersoog-Oost	08/04/2016	LWO-1B	173 (@ 4050 mTVDNAP)	CITHP
Lauwersoog-West	08/04/2016	LWO-3	166 (@ 4060 mTVDNAP)	CITHP
Moddergat	07/04/2016	MGT-1B	188 (@ 3860 mTVDNAP)	SPG
Nes (ROSLU3)	08/12/2015	MGT-4A	454-478 (in watervoerende laag)	RFT
Nes (ROSLU3)	13/02/2016	MGT-5	483 (in watervoerende laag)	RFT
Nes (ROSLU1)	13/02/2016	MGT-5	239 (@ 3700 mTVDNAP)	RFT
Nes (ROSLU1)	08/04/2015	MGT-2	233 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Nes (ROSLU1)	08/04/2015	MGT-3	230 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Nes (ROSLU1)	08/04/2015	MGT-5	216 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Vierhuizen-Oost	09/08/2014	VHN-1C	114 (@ 3850 mTVDNAP)	CITHP

**Tabel 2-2 Productie per voorkomen tot en met 31/12/2016.**

<i>Velden</i>	<i>Cumulatieve productie t/m 2016 (10<sup>6</sup> Nm<sup>3</sup>)</i>	<i>Productie volgens 2011 winningsplan in 2016 (10<sup>6</sup> Nm<sup>3</sup>)</i>	<i>Actuele productie in 2016 (10<sup>6</sup> Nm<sup>3</sup>)</i>
<i>Nes</i>	<i>8646</i>	<i>1180</i>	<i>902</i>
<i>Moddergat</i>	<i>3842</i>	<i>174</i>	<i>265</i>
<i>Lauwersoog-C</i>	<i>113</i>	<i>3</i>	<i>6</i>
<i>Lauwersoog-West</i>	<i>1302</i>	<i>79</i>	<i>96</i>
<i>Lauwersoog-Oost</i>	<i>1866</i>	<i>114</i>	<i>137</i>
<i>Vierhuizen-Oost</i>	<i>1506</i>	<i>15</i>	<i>72</i>
<i>Totaal*</i>	<i>17275</i>	<i>1824</i>	<i>1478</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 8 beschreven GNSMART methodiek geanalyseerd. Hierbij wordt een twaalftal permanente stations als vaste (statische) referentie gebruikt. De coördinaten van deze stations zijn voorafgaand aan de 2016 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 9.

### **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 10).

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 5 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, alsmede AGRS station Ameland (bij Nes) en Ternaard. Voor de bepaling van de snelheid en bijbehorende standaardafwijking wordt rekening gehouden met de correlatie van hoogteschattingen in de GPS tijdserie. Het GPS-signaal in tijd wordt in Figuur 15, Figuur 16 en Figuur 17 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	Start Monitoring	Daling van start monitoring t/m 31/12/2016 [mm]	Dalingssnelheid in 2016 [mm/jaar]
Ameland	05-02-2007	66	6,1 [ $1\sigma = 1,3$ mm/jaar]
Anjum	05-02-2007	36	3,5 [ $1\sigma = 0,7$ mm/jaar]
Moddergat	05-02-2007	33	5,2 [ $1\sigma = 0,8$ mm/jaar]
Ameland-Nes	17-06-2014	4	2,7 [ $1\sigma = 0,5$ mm/jaar]
Ternaard	19-11-2016	2	-

## 2.3 Verifiëren prognose (stap 3)

### 2.3.1 Ondergrond modellering

Het begrip van de ondergrond wordt gevormd door beoordelingen van experts uit diverse disciplines. Deze kennis komt uiteindelijk terecht in verschillende modellen binnen de NAM die gegevens met elkaar uitwisselen. Het geologische of statische model beschrijft de structuur van de verschillende aardlagen. Veel van deze aardlagen zijn onderbroken door breuken die gedurende de lange geologische geschiedenis zijn ontstaan. Dmv geluidsgolven (seismiek) zijn deze lagen en breuken zichtbaar gemaakt waarbij boringen aanvullende gegevens verschaffen over kenmerken van het gesteente zoals bv de porositeit. Het geologische model van de ondergrond bestaat uit 3D structuurkaarten met daartussen cellen die informatie bevatten over de kenmerken die worden verkregen uit de boringen.

Dit statische model wordt vervolgens doorgegeven aan de reservoir engineer die deze informatie combineert met de plannen voor de ontwikkeling en de productie van het gasveld in een reservoirsimulatiemodel. Productie uit toekomstige boringen kan worden gesimuleerd met dit model waarmee kennis wordt verkregen over de mogelijke drukdaling van het gas en mogelijke aangrenzende watervoerende pakketten. In het geval van een bestaande winning worden productiegegevens en drukmetingen gebruikt om het model te kalibreren en daarmee de onzekerheid over de drukdaling in het gehele veld te reduceren.

Deze drukgegevens worden vervolgens door de geomechanicus gebruikt om de compactie te berekenen van het gasveld en de daarmee gepaarde bodemdaling. Geodetische metingen of bodemdalingmetingen worden gebruikt om geomechanische modellen te valideren en te kalibreren. Sinds 2011 is de integratie van modellen duidelijk verbeterd binnen NAM waarbij alle disciplines bijdragen in het mogelijk verklaren van afwijkingen tussen resultaten en modellen.

Hieronder volgt een opsomming van de belangrijkste wijzigingen in de verschillende modellen sinds de vorige rapportage waarbij opgemerkt wordt dat de veranderingen van het geologische model beperkt zijn en vermeld worden bij de aanpassingen van de reservoirsimulatiemodellen.

### 2.3.2 Overzicht veranderingen reservoirsimulatiemodellen t.o.v. M&R2015

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

- De meest recent geboorde putten MGT-4A en MGT-5, beiden in het Nes veld geboord, hebben nieuwe informatie met zich meegebracht. Dit heeft geleid tot enkele veranderingen zowel in het statische (geologische) model als in het dynamische (reservoir) model:
  - De topstructuur is naar beneden bijgesteld, omdat het reservoir bij de geboorde putten dieper inkwam dan van tevoren werd aangenomen. Met een van tevoren bekend gas-watercontact heeft dit tot een afname van het GIIP geleid.
  - De gemiddelde porositeit van de ROSLU1 laag (meest ondiepe laag van het reservoir) is naar boven bijgesteld van 13,6% naar 15,0%, op basis van de logdata in de nieuwe putten.
  - De drukmetingen (RFT) in de nieuwe putten hebben bevestigd dat de ROSLU2 (schalie)laag een zeer hoog (~240bar) drukverschil houdt. Derhalve kunnen de diepere lagen (ROSLU3-6) niet op grote schaal gedepleteerd worden door productie uit de ondiepere laag ROSLU1.
  - De gemiddelde gassaturatie van ROSLU1 is omhoog bijgesteld, waarbij de saturatie-hoogtefunctie van de MGT-3 leidend is. Deze verandering is gedaan om twee redenen: i) met een toename van de gemiddelde porositeit, neemt de gassaturatie ook toe, en ii) de productie- en drukdata geven aanleiding tot het verhogen van de voorspelde GIIP in het Nes-veld om het reservoirmodel passend te krijgen.
  - De hierboven genoemde punten hebben geleid tot een bijstelling van de P50

#### 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.

GIIP van 19,4 bcm naar 16,7 bcm voor het gehele veld.

- Vanwege de vele drukmetingen in de waterlaag van Nes, is de opstelling van de drie realisaties voor het Nes veld veranderd. De realisaties zijn gedefinieerd door het variëren van verticale permeabiliteit.
- Productieprognoses worden jaarlijks bijgesteld. De productieprognose van 2016 heeft tot kleine veranderingen geleid in de voorspelde toekomstige drukdaling.
  - De potentiële toekomstige put TRN-2 heeft mogelijk gevolgen voor de productieduur van het Anjumsysteem zorgt. Het in productie nemen van TRN-2 heeft een verlengend effect op de putten MGT-1B, -2, -3 en ANJ-4B. De productie van deze putten duurt volgens dit verwachte scenario t/m 2035, t.o.v. 2028 vorig jaar.
  - De prognose voor VHN-1C is verlengd van tot 2017 naar tot 2019.
  - De prognose voor ANJ-3 is verlengd van tot 2016 naar tot 2021.
  - De hermodellering van Lauwersoog-Oost in 2015, heeft tot een kleine vermeerdering van toekomstige productie geleid.

### 2.3.3 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 reservoirmodellen 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 drukkaling 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 drukkaling 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 effectieve 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 drukkaling) gaat uit van een immobiele aquifer.
- Bij de tweede realisatie (verwachte drukkaling) is paleo-residueel gas expliciet gesimuleerd en zorgt daarmee voor een geringere aquifermobiliteit vanwege de geringe relatieve permeabiliteit.
- Een derde realisatie (hoge drukkaling) 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 in het geval van een interne breuk 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.

Vanwege de drukmetingen in de Nes putten MGT-3, -4A en -5 in de watervoerende lagen, nadat er al uit het veld werd geproduceerd, zijn voor Nes de realisaties anders opgesteld. De verticale permeabiliteit van de diepere ROSLU3-6 laag is gevarieerd. Een lagere verticale permeabiliteit leidt tot minder drukkaling dan een hoge verticale permeabiliteit. De doorlaatbaarheid van schalielaag ROSLU2, wat voorheen als een belangrijke onzekerheid werd aangemerkt, is vanwege de drukdata uit MGT-4A en MGT-5 minder onzeker: Deze data geven aan dat het waarschijnlijk is dat de schalielaag nagenoeg ondoorlaatbaar is.

Voor het Ameland aquifer is de gemeten bodemdaling bepalend voor de drukrealisaties.

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

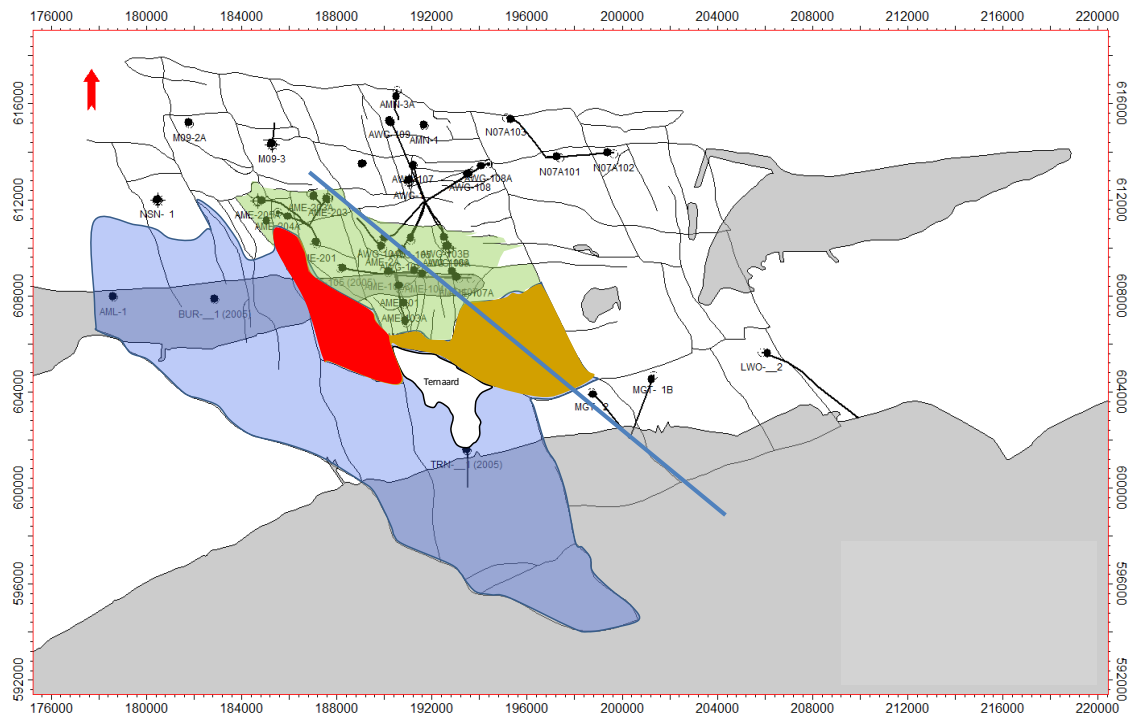
**Tabel 2-4** Overzicht van de opgestelde realisaties

Voorkomen	realisatie #	Paleo-residueel gas (%)	Permeabiliteits-factor aquifer t.o.v. permeabiliteit reservoir	Vermenigvuldigingsfactor verticale permeabiliteit in ROSLU3	Aquiferdruk 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>
Lauersoog-C	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauersoog-C	basis	24	0,1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauersoog-C	hoog	0	1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauersoog-Oost	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauersoog-Oost	basis	23	0,1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauersoog-Oost	hoog	0	1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauersoog-West	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauersoog-West	basis	21	0,3	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Lauersoog-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	16	0,3	0,03	RFT MGT-3, -4A, -5
Nes	basis	16	0,3	0,3	RFT MGT-3, -4A, -5
Nes	hoog	16	1,0	1,0	RFT MGT-3, -4A, -5
Vierhuizen	laag/basis	16	0,3	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>
Vierhuizen	hoog	0	1	nvt	<i>Geen data beschikbaar</i>

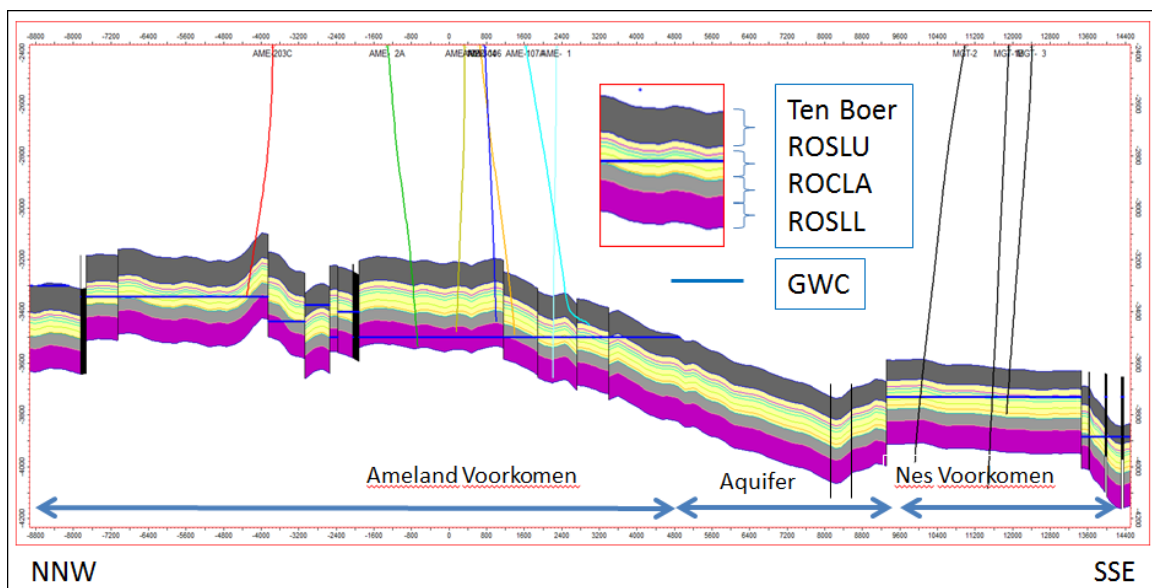
Voor meer details en figuren van alle dynamische data en modelpassingen voor de voorkomens in Tabel 2-4 wordt verwezen naar Referentie 17.

### 2.3.4 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.

De onzekerheid in aquifergedrag onder en rondom het Ameland gasveld 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%).

### 2.3.5 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 winningsplannen (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
2017	254	847	143	106	6	80
2018	234	749	134	95	14	66
2019	200	612	103	68	12	49
2020	152	429	159	56	-	11
2021	154	404	241	70	-	-
2022	398	329	220	59	-	-
2023	199	302	192	60	-	-
2024	155	263	168	56	-	-
2025	108	237	149	54	-	-
2026	98	210	134	52	-	-
2027	86	194	117	44	-	-
2028	86	212	-	-	-	-
2029	79	185	-	-	-	-
2030	73	168	-	-	-	-
2031	66	152	-	-	-	-
2032	60	130	-	-	-	-
2033	56	109	-	-	-	-
2034	52	102	-	-	-	-
2035	49	92	-	-	-	-
Totaal	2559	5726	1760	720	32	207

De getallen van Tabel 2-5 bevatten ook 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 4. In eerdere M&R rapportages 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 en Ezumazijl (hoge drukdaling in deze velden) en een immobiele aquifer voor de overige voorkomens (lage drukdaling in de overige velden). Voor Metslawier is echter een realistische met een geringe aquifer mobiliteit gebruikt (basis scenario). Het hoge drukdalingsscenario leidt tot significante afwijkingen met de gemete bodemdaling. 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 en Ezumazijl 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 geringe 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 is door NAM een vervolg 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 de meet- en regelrapportage over 2015. De studie is inmiddels afgerond en een publieksvriendelijke samenvatting van de resultaten is te vinden in bijlage 4. Het belangrijkste doel van de LTS-2 studie was het testen van een stochastische workflow op Ameland waarbij duizenden mogelijke bodemdalingsscenario's zijn geconfronteerd met de gemeten data. Een betere passing van een bepaald scenario resulteerde in een hogere weging van dat scenario. Hieruit ontstond een kansdistributie waaruit het gewogen gemiddelde bepaald kan worden.

---

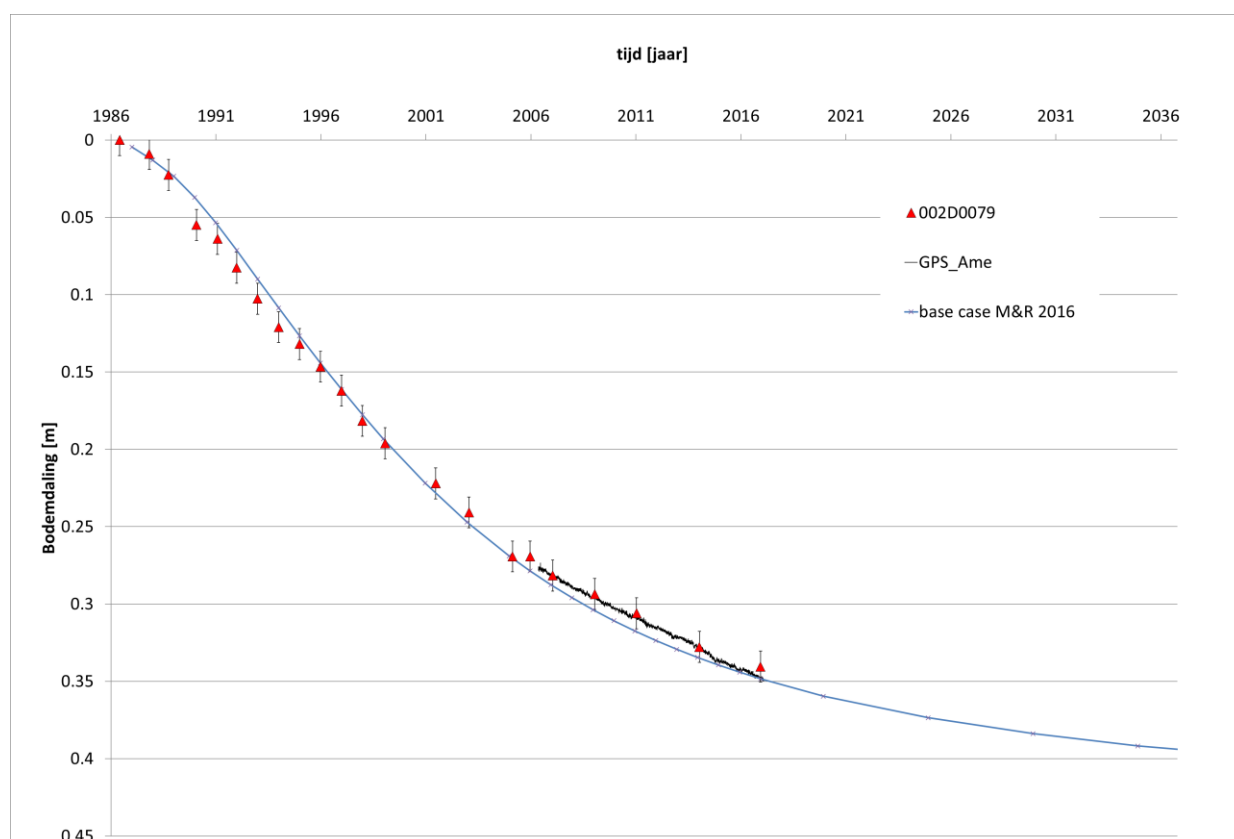
<sup>2</sup> Voor een overzicht van de LTS-1 rapporten zie <http://www.nam.nl/nl/downloads/reports-wadden/long-term-study-reports.html>. Voor een overzicht van de LTS-2 rapporten zie <http://www.nam.nl/feiten-en-cijfers/onderzoeksrapporten.html#iframe=L2VtYmVkl2NvbXBvbmVudC8/aWwQ9b25kZXJ6b2Vrc3JhcHBvcnRlbiN0YWltd2FkZGVu>

Dit gemiddelde oftewel de verwachte waarde ligt dicht bij de base case die voor deze Meet- en Regelrapportage gebruikt wordt.

## 2.4.2 Modelling bodemdaling Ameland

De GPS metingen in de Waddenzee tussen Nes en Ameland tonen sinds 2014 een significante bodemdaling. In 2011 was de gedachte om deze mobiliteit te reduceren op basis van bodemdalingsmetingen ten zuidwesten van het gasreservoir. De metingen voor 2011 toonden aan dat de mobiliteit van de aquifer en daarmee gepaarde drukdaling waarschijnlijk gering is/was. De huidige metingen (na 2011) laten bodemdaling ten zuiden van het gasveld zien, waarvoor de meest waarschijnlijke verklaring drukdaling in de aquifer onder deze meetpunten is.

De laatste waterpasmetingen op het eiland dateren van februari 2017 (Figuur 3) en laten zien dat de gemeten bodemdaling op de Ameland productielocatie lager is dan de gemeten daling volgens de GPS. Deze GPS meting ligt echter binnen de onzekerheidsbandbreedte van de waterpasmetingen. Het model, dat de afgelopen 3 jaar niet gewijzigd is, laat in de nabijheid van het diepste punt van de bodemdalingssom een goede passing zien met de metingen.



**Figuur 3; Bodemdaling op de productielocatie Ameland eiland volgens het verwachte model (blauwe lijn) vergeleken met de continue GPS metingen (zwarte lijn) en waterpassing op punt 002D0079 (rode driehoeken).**

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 en M&R

2015. De stijfheid van het reservoirgesteente is gelijk gebleven en wanneer deze wordt vertaald in een compressibiliteit, komt de waarde via de  $C_m$ -porositeitsrelatie op het gemiddelde van de core plug experimenten. Figuur 4 toont ook de bodemdaling boven Ameland en laat zien dat de passing van het model met de metingen goed is aan de westkant van de kom. Het model overschat de bodemdaling aan de oostkant van het eiland, waarvoor meerdere redenen de oorzaak kunnen zijn zoals een andere compressibiliteit van het gesteente in dit deel van het veld, een variërende viscositeit van het zout of verschillen in autonome bodemdaling (Referentie 14). Door de overschatting aan de oostkant van de bodemdaling kan worden geconcludeerd dat de huidige base case conservatief is voor de inschatting van bodemdalingsvolumes.

### 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) en Time decay constante (5 jaar) gelijk aan die zoals vermeld in de M&R 201 en 2015. 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 201 en 2015.

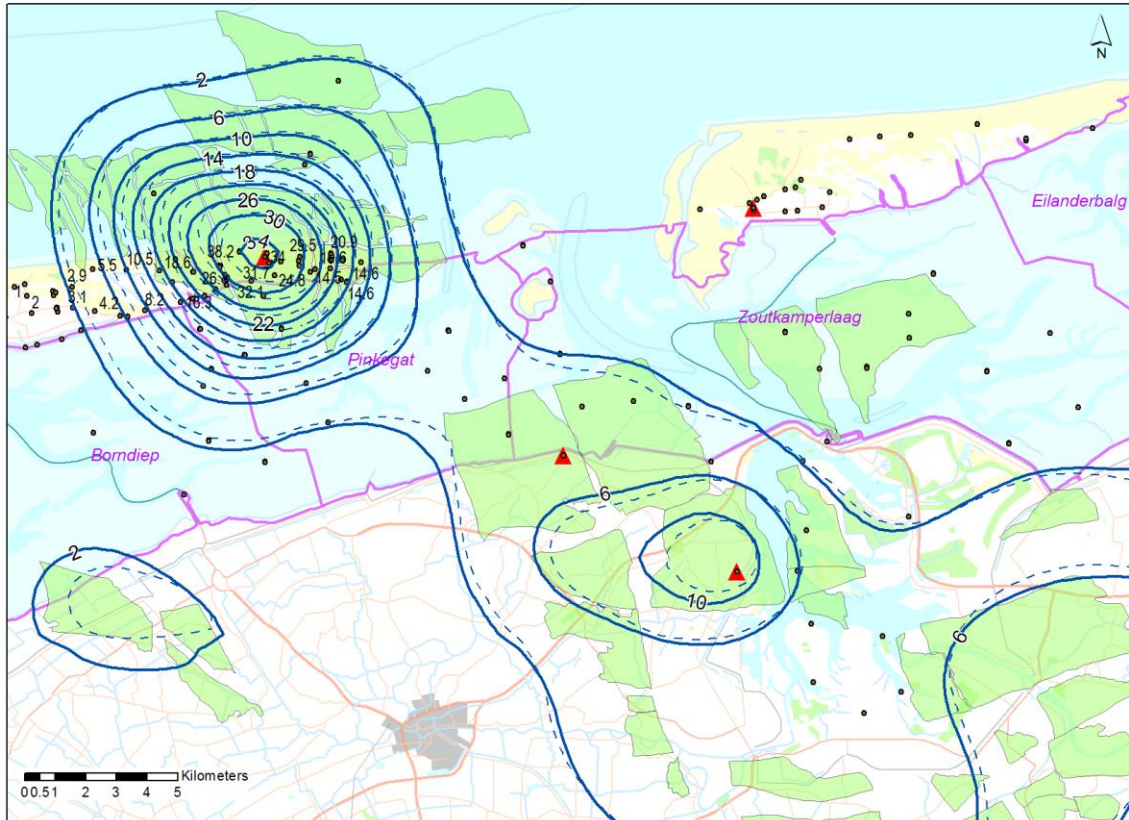
De passing van de gemeten daling en gemodelleerde daling is, in een eerste orde benadering, vergelijkbaar voor de verschillende compactiemodellen en rekenwijzen (analytisch en eindige elementen/geomec) wanneer de modellen optimaal worden gekalibreerd. Door de geringe verschillen is er niet één beste model of rekenwijze aan te wijzen. De belangrijkste observaties voor de M&R 2016 rapportage worden hieronder weergegeven:

- Het Geomec model zoals gebruikt in deze M&R 2016 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. Het zeer waarschijnlijk dat de bijdrage van het zout in het geomec model zorgt voor dit verschil.
- 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. Ook dit is waarschijnlijk het gevolg van het visceus gedrag van zout dat ervoor zorgt dat de bodemdaling 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 201 en 2015 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.

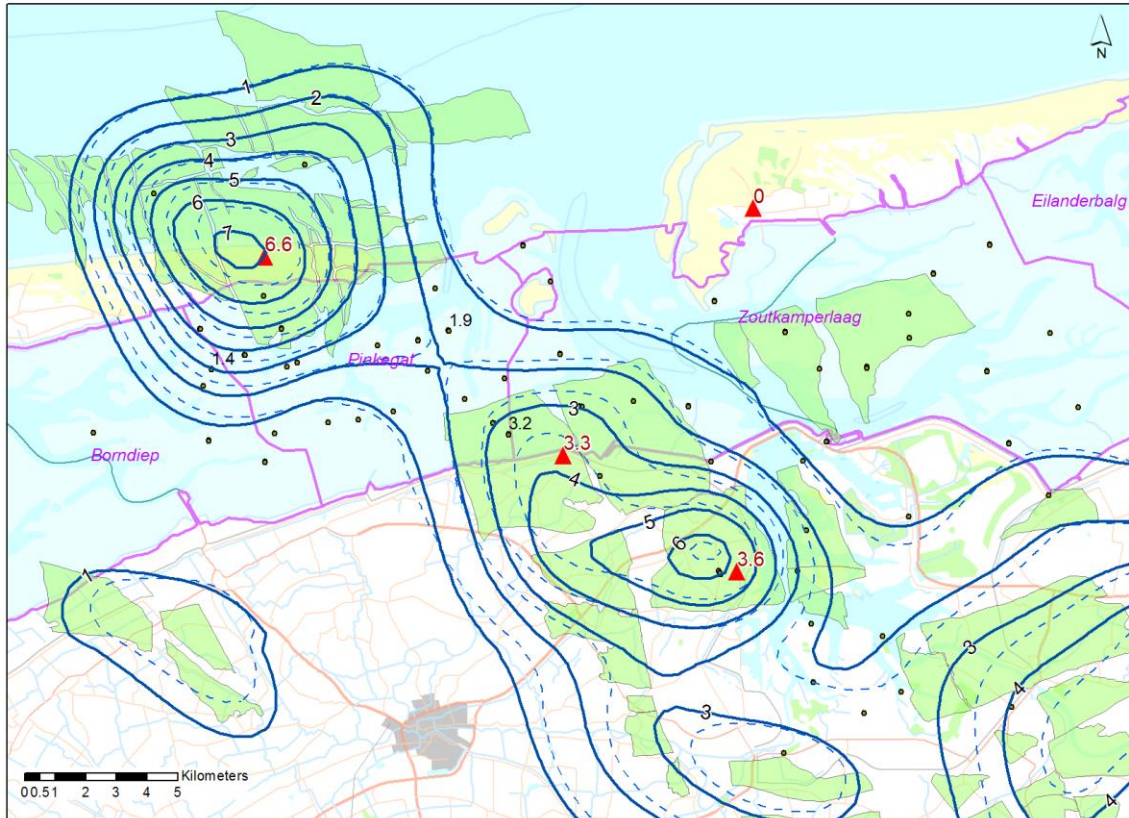
De geomechanische onzekerheid die volgt uit verschillende compactiemodellen en geomechanische parameters wordt m.b.v. deze analytische modellen geschat.

Figuur 4 toont de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens het basis scenario. De contouren zijn gepresenteerd voor 1-1-2017 omdat dit tijdstip het beste overeenkomt met het tijdstip van de waterpasmetingen op Ameland die in februari 2017 uitgevoerd zijn. De contouren, weergegeven met een doorgetrokken lijn, geven de bodemdaling weer die is gemodelleerd met de beperkt vernieuwde modellen en parameterwaarden. Ter vergelijking zijn de contouren (onderbroken lijn) weergegeven die het berekende resultaat weergeven voor het jaar 2015 zoals gerapporteerd in de Meet- en regelrapportage van 2015 (Referentie 7).



**Figuur 4; Totale bodemdaling (status contour 1-1-2017) door gaswinning sinds de start van de Ameland en Anjum productie. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling (gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1- 2015 zoals beschreven in de M&R rapportage over 2015). Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 3 posities continue GPS metingen uitgevoerd sinds 2007 (rode driehoek).**

Figuur 5 toont de gemeten en gemodelleerde daling in 2016 sinds de nulmetingen van 2006. De contouren zijn gepresenteerd voor 1-1-2016 omdat dit tijdstip het dichtst bij het tijdstip van de meeste 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 2015 zoals gepresenteerd in het M&R rapport 2015 weer.



**Figuur 5 Bodemdaling (status contour 1-1-2016) 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 van 2015 weer zoals getoond in de M&R rapportage over 2015). De punten met label representeren de peilmerken met de gemeten hoogteverschillen vanaf 2006 (nulmeting Waddenzee) tot de laatst uitgevoerde meting in mei 2016. Rode waarden geven de daling aan van de permanente GPS stations in de periode feb. 2007- feb. 2017. 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 overeenkomsten en verschillen tussen de M&R 2015 en M&R 2016 bodemdalingsmodellen**

Hieronder volgt een beschrijving van de belangrijkste veranderingen die aangebracht zijn in de huidige M&R 2015 rapportage en die een gevolg hebben op de resultaten voor de bodemdalingsberekeningen.

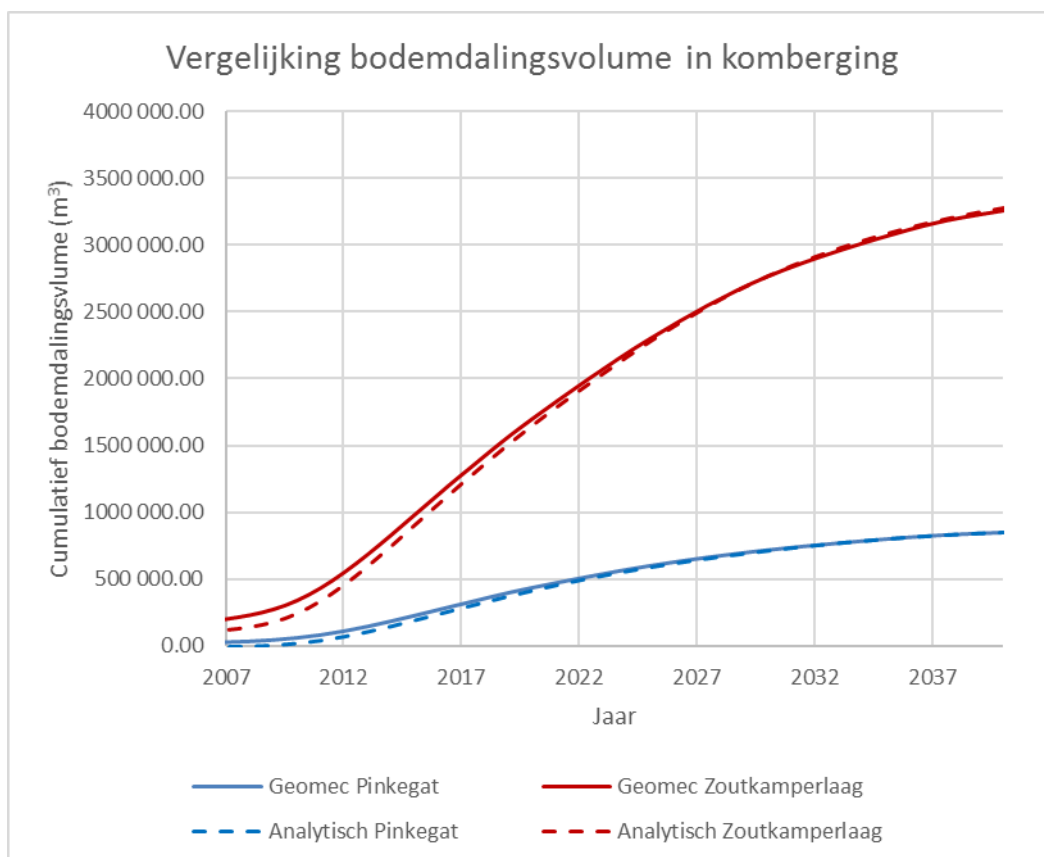
- De combinaties van realisaties (scenario's) om tot het hoge en het basis bodemdalingsscenario te komen, zijn vergelijkbaar met die in M&R2015.
- Om een goede passing tussen model en meting te kunnen krijgen boven zowel Anjum als Metslawier in het lage bodemdalingsscenario, is hier het verwachte drukdalingscenario van Metslawier gebruikt in plaats van het hoge depletie scenario, zoals dat in M&R2015 was. Het gevolg van deze keuze is een betere passing op de bodemdalingsmetingen, zonder een significant effect te hebben op de bodemdalingsvolumes van Pinkegat en Zoutkamerlaag.
- Het vernieuwde reservoir model van Nes laat een lagere doorlaatbaarheid van het aquifer zien waardoor de bodemdalingssnelheid iets lager is.

- Net zoals in de M&R 2015 is om een goede passing tussen meting en model te krijgen ervoor 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 dichter bij de in het laboratorium gemeten waarden.
- De geomechanische parameters die in de modellen gebruikt worden zijn gelijk gebleven.
- Het hoge scenario is vergelijkbaar met hoge scenario zoals gebruikt in de M&R 2015.

#### 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).

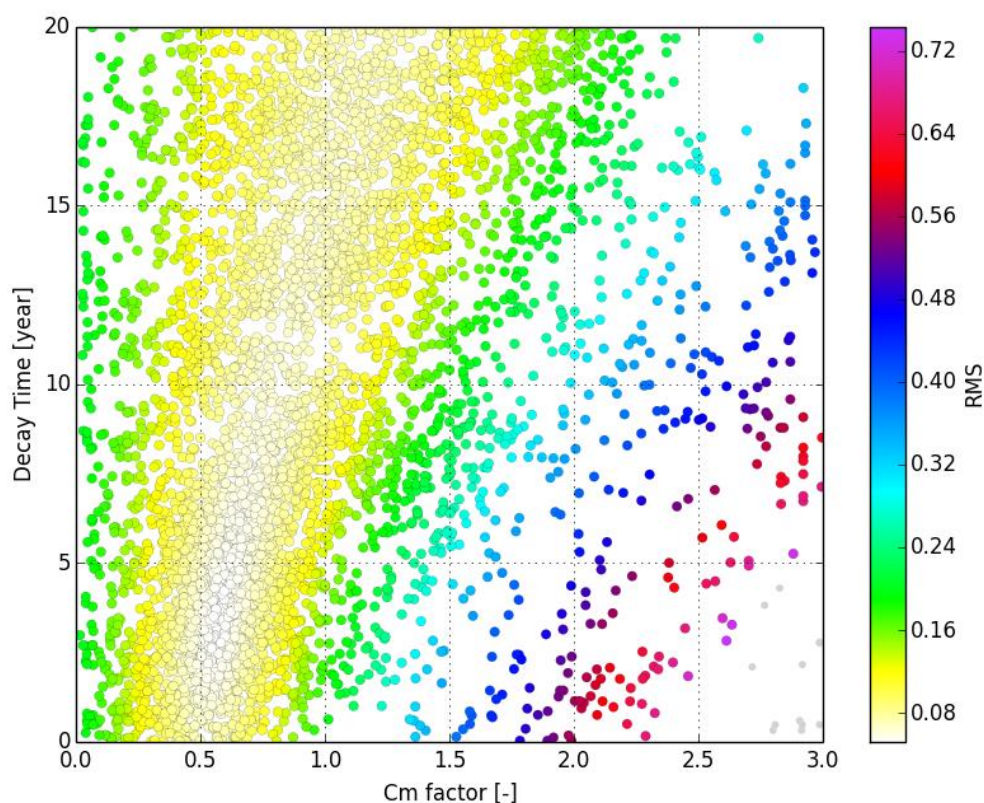
In de meet en regelrapportage 2013 is voor het eerst een vergelijking gemaakt tussen de numerieke en de Geertsma en van Opstal berekeningen. Ook voor de huidige rapportage geldt dat de verschillen in bodemdalingsvolumes die resulteren uit deze twee rekenmethodes zeer klein zijn (Figuur 6).



**Figuur 6** 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 parametervariatie 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 7. 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 parametervariatiestudie is gekozen om deze polynoom te variëren door middel van een vermenigvuldigingsfactor, de  $C_m$ -factor, die op de x-as in Figuur 7 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 0,3 tot 0,7 en een Time decay constante van 1 tot 15 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).

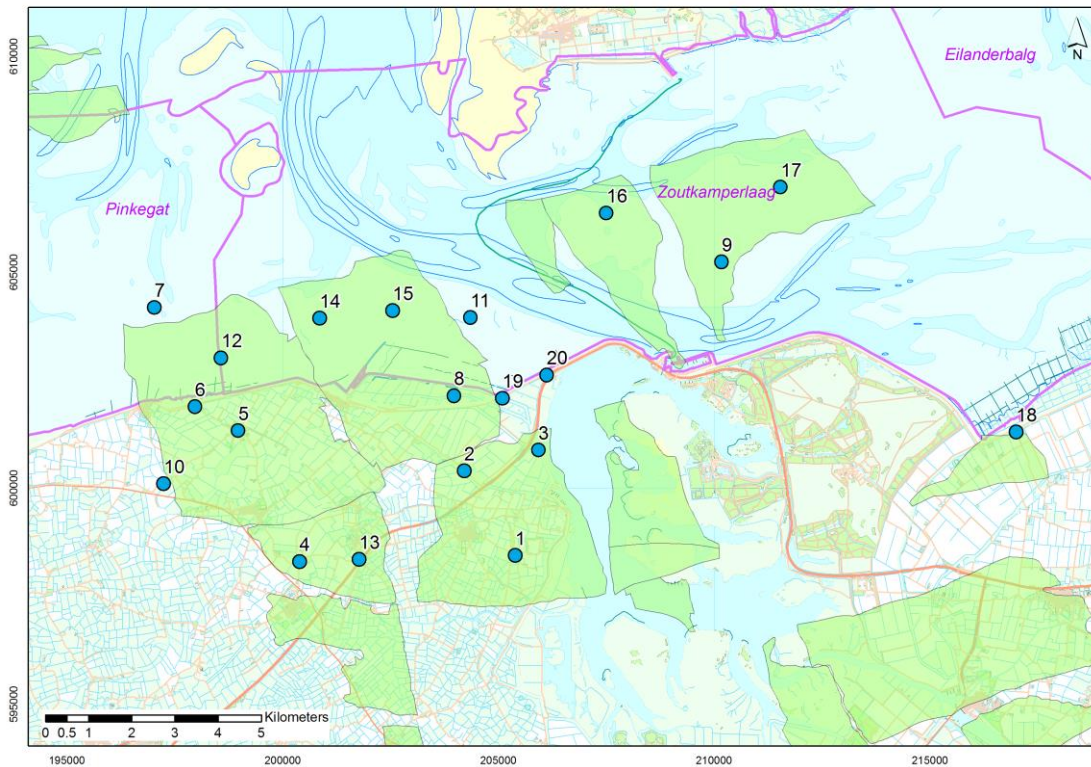


**Figuur 7, RMS versus  $C_m$  factor en Time decay constante voor het hoge scenario, de witte punten geven de beste passing met de metingen aan**

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

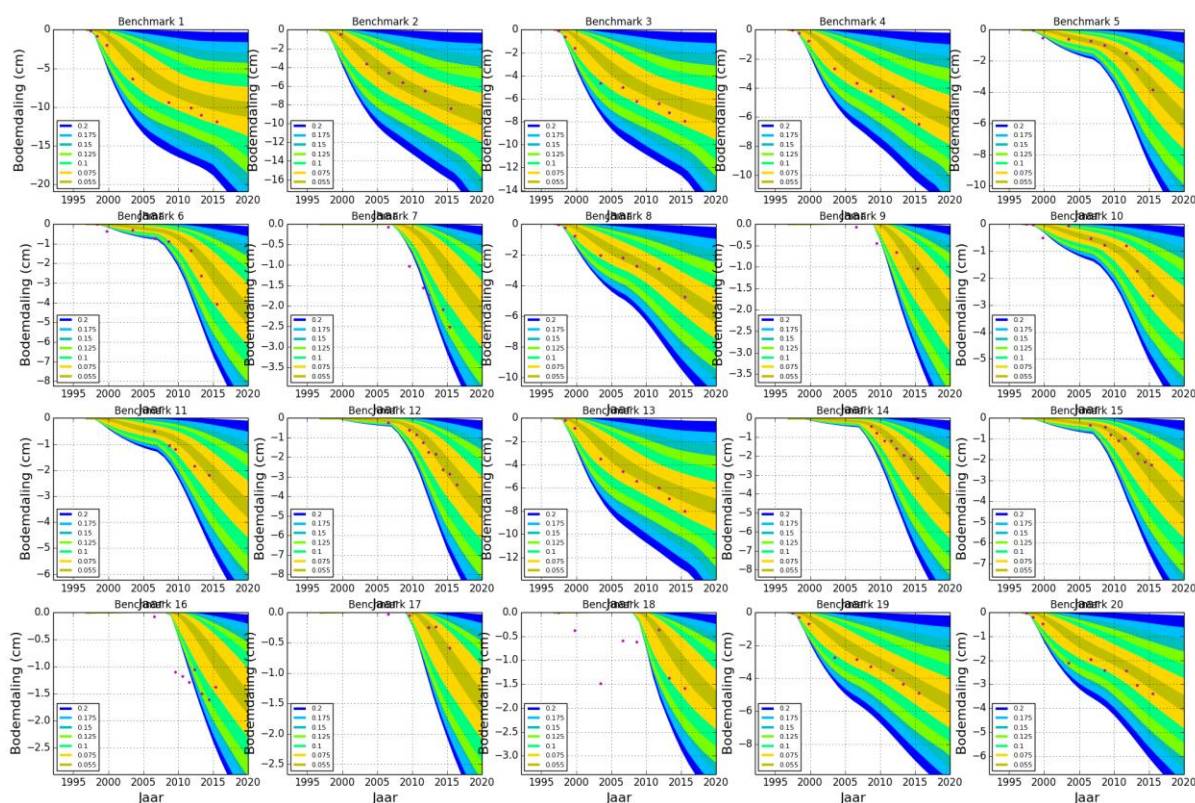
Figuur 8) is getoond in Figuur 9 ter illustratie. Voor de leesbaarheid is dit figuur in A4 formaat tevens in bijlage 2 getoond.

Deze peilmerken zijn geselecteerd op basis van de geografische spreiding boven de voorkomens en de hoeveelheid gemeten data per peilmerk. De combinaties van de  $C_m$  factor en Time decay constante zijn zo gekozen dat ze op de begrenzing vallen van de RMS gebieden om de invloed van de verschillende waarden zo goed mogelijk weer te geven. Bijvoorbeeld de buitengrenzen van de groene banden in Figuur 9 komen overeen met een RMS waarde van 0,1.



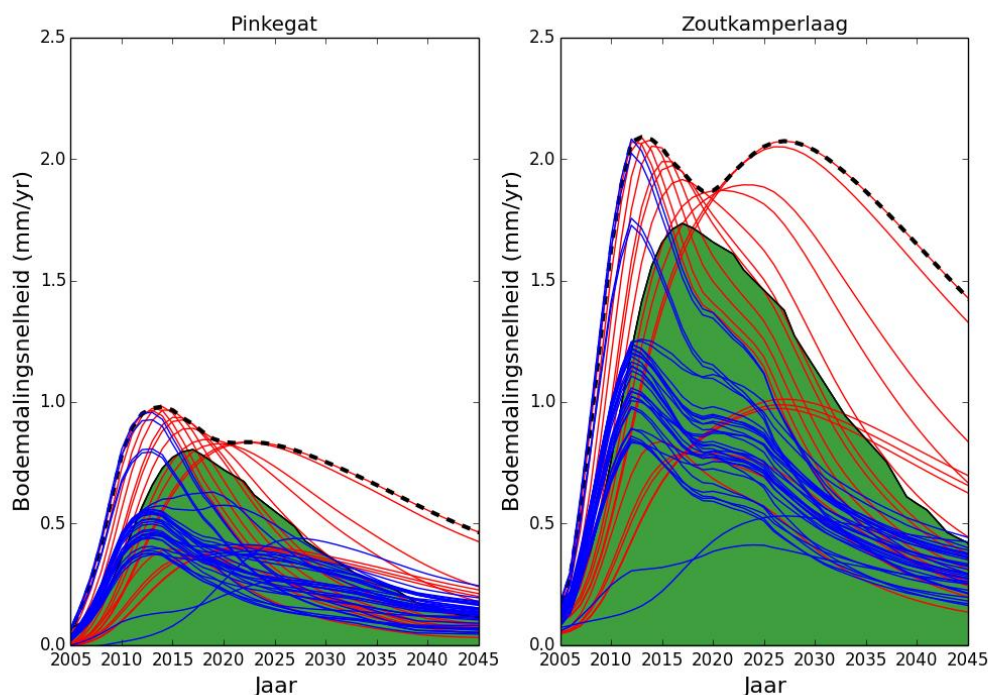
**Figuur 8** Peilmerk locaties die geselecteerd zijn voor de vergelijking met de Monte Carlo uitkomsten (Figuur 9).





**Figuur 9 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 7. Het grafieknnummer geeft de locatie van het peilmerk weer in Figuur 8.**

Figuur 9 laat zien dat alle combinaties van Cm factor en Time decay met een RMS <0,10 (geel/groen gebied) binnen de bandbreedte van de meeste metingen blijven. Vervolgens zijn deze parametercombinaties gebruikt om de variatie van de bodemdalingssnelheid voor 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 10. 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 stippelijijn in Figuur 10). 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.



**Figuur 10** Bodemdalingssnelheden met hun onzekerheden voor een RMS afsnijding van 0,1 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  $RMS < 0,1$  vallen. De zwart geblokte lijn geeft de bodemdalingssnelheden aan die in het maximum scenario gebruikt zijn.

Omdat de bodemdalingssnelheid tussen de analytische en eindige elementen modellen vergelijkbaar is, zijn de begrenzingen van de rode lijnen in Figuur 10 gebruikt als geomechanische onzekerheid in de bodemdalingssnelheid. Dezelfde geomechanische onzekerheidsanalyse is ook uitgevoerd voor het lage 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 twee lage scenario's. Het effect van de scenarios op de bodemdalingssnelheid voor de twee kombergingsgebieden is te zien in Figuur 11 en Figuur 12.

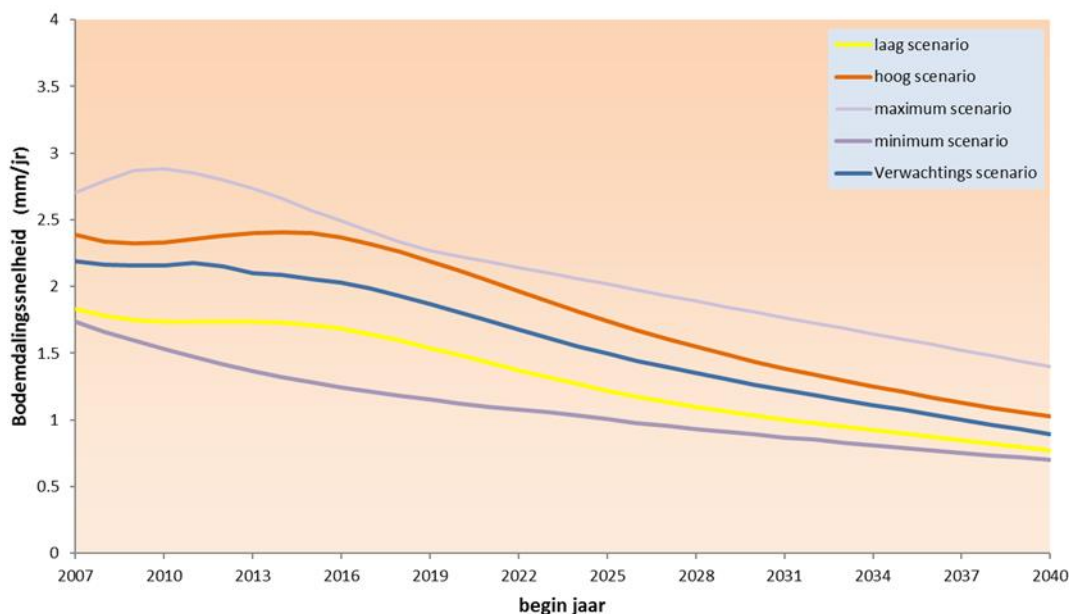
## 2.5 Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4)

### 2.5.1 Bepaling volume en gemiddelde daling

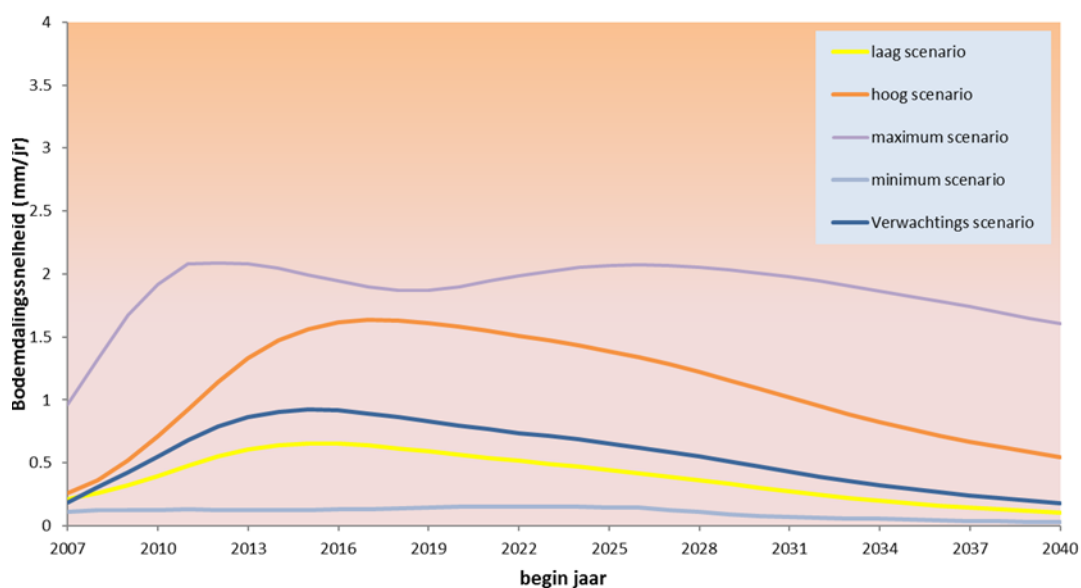
Met behulp van de gekalibreerde geomechanische modellen zijn zowel het reeds opgetreden dalingsvolume in de betreffende kombergingsgebieden als de nog in de toekomst te verwachten jaarlijkse toename bepaald. Door de jaarlijkse volumetoename te delen door het kombergingsoppervlak wordt de gemiddelde bodemdalingssnelheid  $S$  (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 6) Deze grenzen zijn door RIKZ voor de Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 toegepast. Hierbij zijn de oppervlakten voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag respectievelijk  $61,3 \times 10^6 \text{ m}^2$  en  $148,0 \times 10^6 \text{ m}^2$ .

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 13 en Figuur 14. Voor het basis scenario is onderscheid gemaakt in de bijdrage van de individuele voorkomens. Figuur 11 en Figuur 12 tonen de belasting ten gevolge van de depletie voor de hoge en lage scenario's (oranje en gele lijnen) en de maximum en minimum scenario's zoals bepaald uit de onzekerheidsanalyse.



**Figuur 11; Bodemdalingssnelheid in Pinkegat ten gevolge van gasproductie voor de verschillende scenarios. Het verwachtingscenario is in blauw weergegeven. 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.**



**Figuur 12; Bodemdalingssnelheid in Zoutkamperlaag ten gevolge van gas productie voor de verschillende scenarios. Het verwachtings scenario is in blauw weergegeven. 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 bodemdalingssnelheden 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 Bodemdalingenvolume voor bepaling belasting rapportagejaar 2016 met onzekerheid

Tabel 2-6 en Tabel 2-7 tonen de door gaswinning veroorzaakte bodemdalingenvolumes met bijbehorende onzekerheid per voorkomen voor de jaren J-3 t/m J+2 waarbij J-1 het rapportagejaar (2016) is. Voor de volledigheid zijn ook de resultaten voor het jaar 2005 tot en met 2019 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 bodemdalingenvolume 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>.

Kobergingsgebied Pinkegat			
	Anjum/Ameland voorkomens	NES	MGT
Jaar	volume(onzekerheid)	volume(onzekerheid)	volume(onzekerheid)
2005	128 (110 - 146)		
2006	122 (105 - 139)		
2007	116 (99 - 124)	6 (4 - 8)	3 (3 - 3)
2008	111 (95 - 117)	12 (10 - 14)	4 (3 - 4)
2009	106 (90 - 115)	27 (12 - 27)	3 (3 - 3)
2010	101 (86 - 112)	21 (15 - 21)	4 (3 - 4)
2011	97 (82 - 108)	26 (18 - 27)	4 (3 - 4)
2012	94 (79 - 105)	26 (22 - 34)	4 (3 - 5)
2013	90 (76 - 101)	31 (25 - 39)	4 (3 - 4)
2014	87 (73 - 97)	34 (28 - 43)	4 (3 - 4)
2015	84 (71 - 94)	35 (28 - 44)	4 (3 - 4)
2016	82 (69 - 92)	35 (28 - 44)	4 (2 - 4)
2017	79 (67 - 89)	34 (28 - 44)	3 (2 - 3)
2018	77 (64 - 86)	34 (28 - 44)	3 (1 - 3)
2019	74 (62 - 83)	32 (26 - 42)	3 (1 - 3)

**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	15 (15 - 15)						
2006	14 (14 - 14)						
2007	13 (13 - 13)	2 (2 - 3)	10 (7 - 12)				
2008	12 (12 - 12)	7 (6 - 9)	23 (16 - 28)		2 (2 - 3)	1 (1 - 1)	1 (1 - 2)
2009	11 (11 - 11)	10 (9 - 14)	31 (22 - 37)		9 (7 - 13)	8 (7 - 12)	4 (4 - 8)
2010	10 (9 - 10)	14 (11 - 18)	37 (26 - 43)		14 (12 - 23)	17 (16 - 27)	7 (6 - 18)
2011	9 (8 - 9)	18 (15 - 23)	43 (29 - 50)		15 (13 - 29)	24 (22 - 38)	8 (7 - 26)
2012	8 (7 - 8)	22 (18 - 30)	46 (31 - 55)	1 (1 - 1)	16 (13 - 32)	28 (25 - 46)	9 (8 - 33)
2013	7 (6 - 7)	26 (21 - 36)	47 (31 - 57)	2 (2 - 4)	16 (12 - 34)	30 (26 - 51)	9 (8 - 39)
2014	7 (6 - 7)	29 (24 - 42)	48 (30 - 58)	2 (2 - 5)	16 (12 - 35)	30 (25 - 53)	10 (9 - 44)
2015	6 (5 - 6)	29 (25 - 44)	47 (29 - 58)	2 (2 - 6)	16 (11 - 36)	30 (24 - 54)	10 (9 - 47)
2016	5 (4 - 5)	29 (25 - 46)	46 (28 - 60)	2 (2 - 7)	15 (10 - 35)	29 (23 - 53)	10 (9 - 49)
2017	5 (4 - 5)	29 (27 - 47)	44 (25 - 58)	2 (2 - 8)	15 (10 - 35)	28 (21 - 52)	10 (9 - 49)
2018	4 (3 - 4)	28 (27 - 47)	42 (24 - 57)	2 (2 - 8)	15 (9 - 34)	27 (21 - 53)	10 (8 - 49)
2019	2 (2 - 4)	27 (26 - 45)	40 (23 - 56)	2 (1 - 8)	14 (8 - 32)	26 (22 - 56)	10 (8 - 48)

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 2016 en belasting B op 1-1-2017. 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 11 en Figuur 12).

**Tabel 2-8 Bodemdalingssnelheid en belasting (mm/jr) met onzekerheid (bandbreedte) per kombergingsgebied in het rapportagejaar 2016.**

Zoutkamperlaag		Pinkegat	
S (laag-hoog)	B (laag-hoog)	S (laag-hoog)	B (laag-hoog)
0,92 (0,68 – 1,72)	0,89 (0,67 – 1,69)	2,01 (1,66 – 2,32)	1,97 (1,63 – 2,28)

### 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 en belasting (mm/jr) met onzekerheid (bandbreedte) per kombergingsgebied per jaar.**

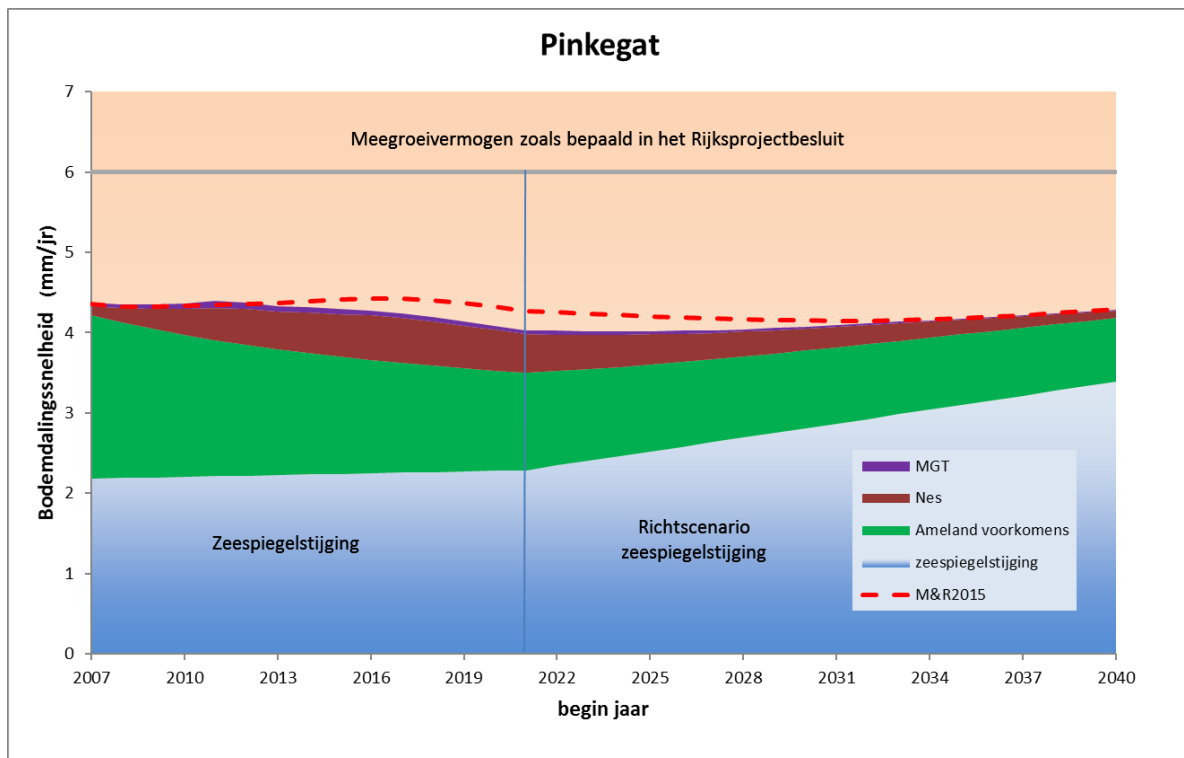
Jaar	Zoutkamperlaag			Pinkegat		
	S (onzekerheid)	B (onzekerheid)	G	S (onzekerheid)	B (onzekerheid)	G
2004	0,11(0,11 - 0,11)		2,84	2,25(1,94 - 2,55)		3,84
2005	0,10(0,10 - 0,10)		2,83	2,14(1,84 - 2,43)		3,83
2006	0,11(0,10 - 0,11)		2,83	2,03(1,75 - 2,34)		3,83
2007	0,19(0,15 - 0,19)	0,22(0,19 - 0,25)	2,82	2,03(1,76 - 2,26)	2,15(1,80 - 2,35)	3,82
2008	0,31(0,25 - 0,36)	0,31(0,26 - 0,38)	2,81	2,14(1,78 - 2,24)	2,13(1,77 - 2,30)	3,81
2009	0,50(0,40 - 0,63)	0,43(0,35 - 0,57)	2,80	2,33(1,75 - 2,33)	2,13(1,75 - 2,28)	3,80
2010	0,67(0,55 - 0,93)	0,56(0,45 - 0,78)	2,80	2,10(1,73 - 2,28)	2,13(1,75 - 2,29)	3,80
2011	0,79(0,64 - 1,18)	0,68(0,54 - 1,01)	2,79	2,13(1,73 - 2,33)	2,14(1,75 - 2,32)	3,79
2012	0,88(0,69 - 1,39)	0,79(0,62 - 1,22)	2,78	2,06(1,74 - 2,38)	2,13(1,74 - 2,34)	3,78
2013	0,93(0,72 - 1,54)	0,86(0,67 - 1,40)	2,77	2,08(1,74 - 2,41)	2,08(1,73 - 2,36)	3,77
2014	0,96(0,73 - 1,65)	0,90(0,70 - 1,53)	2,77	2,08(1,73 - 2,41)	2,07(1,72 - 2,37)	3,77
2015	0,95(0,71 - 1,69)	0,92(0,70 - 1,62)	2,76	2,05(1,70 - 2,37)	2,04(1,70 - 2,36)	3,76
2016	0,92(0,68 - 1,72)	0,92(0,69 - 1,67)	2,75	2,01(1,66 - 2,32)	2,01(1,67 - 2,33)	3,75
2017	0,90(0,66 - 1,71)	0,89(0,67 - 1,69)	2,74	1,96(1,61 - 2,27)	1,97(1,63 - 2,28)	3,74
2018	0,87(0,63 - 1,70)	0,86(0,65 - 1,66)	2,74	1,90(1,56 - 2,21)	1,92(1,58 - 2,23)	3,74
2019	0,74(0,61 - 1,68)	0,83(0,62 - 1,63)	2,73	1,83(1,50 - 2,13)	1,86(1,52 - 2,16)	3,73
2020	0,79(0,58 - 1,45)	0,80(0,59 - 1,60)	2,72	1,76(1,44 - 2,05)	1,80(1,47 - 2,09)	3,72
2021	0,76(0,55 - 1,54)	0,77(0,57 - 1,55)	2,71	1,69(1,38 - 1,97)	1,73(1,41 - 2,01)	3,71
2022	0,73(0,52 - 1,50)	0,73(0,54 - 1,51)	2,65	1,63(1,32 - 1,89)	1,67(1,36 - 1,93)	3,65
2023	0,70(0,50 - 1,46)	0,72(0,51 - 1,46)	2,60	1,57(1,27 - 1,82)	1,60(1,30 - 1,86)	3,60
2024	0,67(0,47 - 1,42)	0,69(0,48 - 1,43)	2,54	1,51(1,22 - 1,74)	1,54(1,25 - 1,78)	3,54
2025	0,64(0,44 - 1,37)	0,65(0,45 - 1,39)	2,48	1,45(1,18 - 1,67)	1,49(1,20 - 1,71)	3,48
2026	0,61(0,41 - 1,32)	0,62(0,43 - 1,34)	2,42	1,40(1,13 - 1,61)	1,43(1,16 - 1,65)	3,42
2027	0,57(0,39 - 1,27)	0,59(0,40 - 1,29)	2,36	1,36(1,09 - 1,55)	1,38(1,12 - 1,58)	3,36
2028	0,53(0,35 - 1,20)	0,55(0,37 - 1,23)	2,31	1,31(1,06 - 1,49)	1,34(1,08 - 1,52)	3,31
2029	0,49(0,32 - 1,13)	0,51(0,34 - 1,16)	2,25	1,27(1,03 - 1,44)	1,29(1,05 - 1,47)	3,25
2030	0,45(0,29 - 1,06)	0,47(0,30 - 1,09)	2,19	1,23(1,00 - 1,38)	1,25(1,02 - 1,41)	3,19
2031	0,41(0,26 - 0,98)	0,43(0,27 - 1,02)	2,13	1,19(0,97 - 1,34)	1,21(0,99 - 1,36)	3,13
2032	0,37(0,23 - 0,91)	0,39(0,25 - 0,95)	2,07	1,16(0,94 - 1,29)	1,18(0,96 - 1,32)	3,07
2033	0,33(0,20 - 0,85)	0,36(0,22 - 0,89)	2,02	1,12(0,92 - 1,25)	1,14(0,93 - 1,27)	3,02
2034	0,30(0,18 - 0,79)	0,32(0,20 - 0,83)	1,96	1,08(0,89 - 1,21)	1,10(0,91 - 1,23)	2,96
2035	0,27(0,16 - 0,74)	0,29(0,18 - 0,77)	1,90	1,04(0,87 - 1,17)	1,06(0,88 - 1,19)	2,90
2036	0,25(0,15 - 0,69)	0,27(0,16 - 0,72)	1,84	1,01(0,85 - 1,13)	1,02(0,86 - 1,15)	2,84
2037	0,23(0,13 - 0,64)	0,24(0,14 - 0,67)	1,78	0,97(0,82 - 1,09)	0,99(0,83 - 1,11)	2,78
2038	0,21(0,12 - 0,60)	0,22(0,13 - 0,63)	1,73	0,93(0,80 - 1,06)	0,95(0,81 - 1,08)	2,73
2039	0,19(0,11 - 0,56)	0,20(0,12 - 0,59)	1,67	0,89(0,77 - 1,02)	0,92(0,78 - 1,04)	2,67
2040	0,17(0,10 - 0,53)	0,18(0,11 - 0,55)	1,61	0,86(0,74 - 0,98)	0,88(0,76 - 1,01)	2,61
2041	0,15(0,09 - 0,49)	0,16(0,10 - 0,51)	1,55	0,83(0,72 - 0,95)	0,85(0,74 - 0,98)	2,55
2042	0,14(0,08 - 0,46)	0,15(0,09 - 0,48)	1,49	0,81(0,70 - 0,93)	0,83(0,72 - 0,95)	2,49

## 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 niet leiden tot overschrijding van de gebruiksruijme (zie Tabel 2-9). Dit geldt ook voor het hoge scenario. In ieder geval zal de gebruiksruijme niet voor 1-1-2021 worden overschreden. Na deze tijd geldt het richtscenario van de zeespiegelstijging.

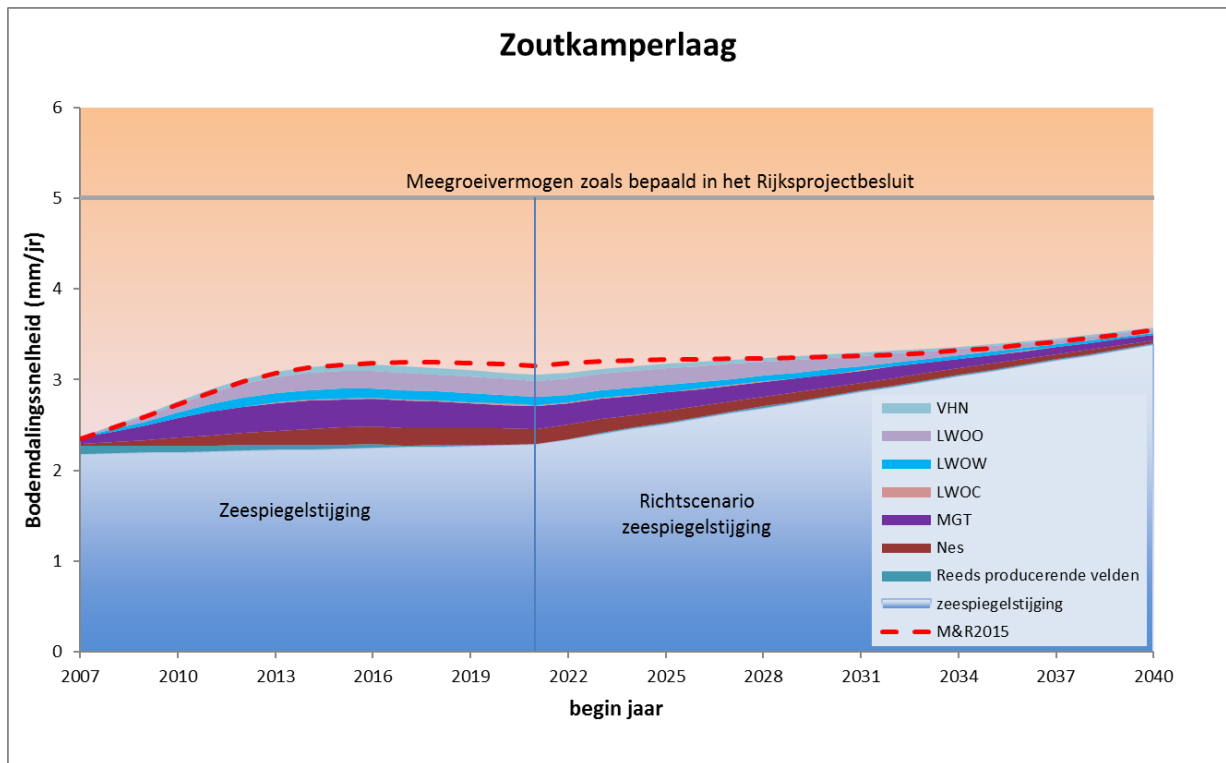
## 2.7 Actualiseren (stap 6)

Figuur 13 en Figuur 14 tonen de geactualiseerde berekeningen van de belastingen voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag volgens het in Tabel 2-5 getoonde productiescenario. De belasting inclusief relatieve zeespiegelstijging (actualisatie 2016) zal de gebruiksruijme van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag niet overschrijden binnen de gerapporteerde jaren. In de figuren is tevens de belasting zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclus rapportage over 2015 (gerapporteerd in 2016) weergegeven.



**Figuur 13** Voorspelde belasting inclusief Zeespiegelstijging voor het kombergingsgebied Pinkegat. De rood gestreepte lijn geeft berekende belasting aan zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclusrapportage over 2015 (gerapporteerd in 2016).

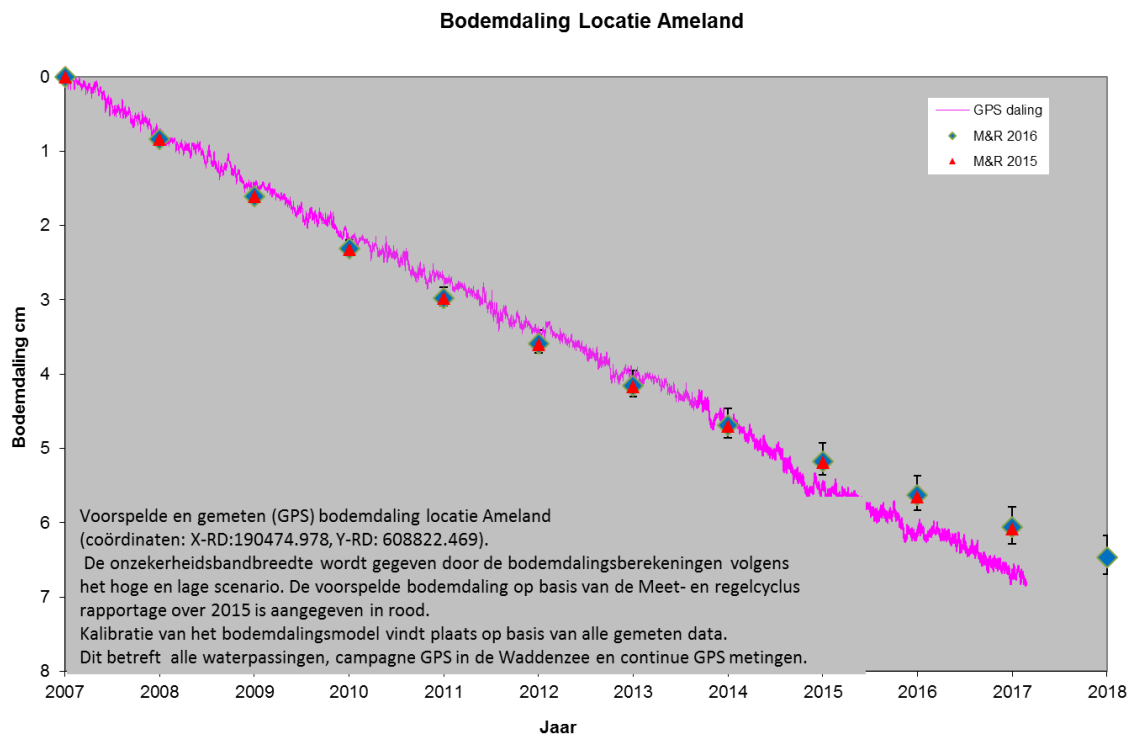




**Figuur 14** Voorspelde belasting inclusief Zeespiegelstijging + autonome daling voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. De rood gestreepte lijn geeft berekende belasting aan zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclusrapportage over 2015 (gerapporteerd in 2016).

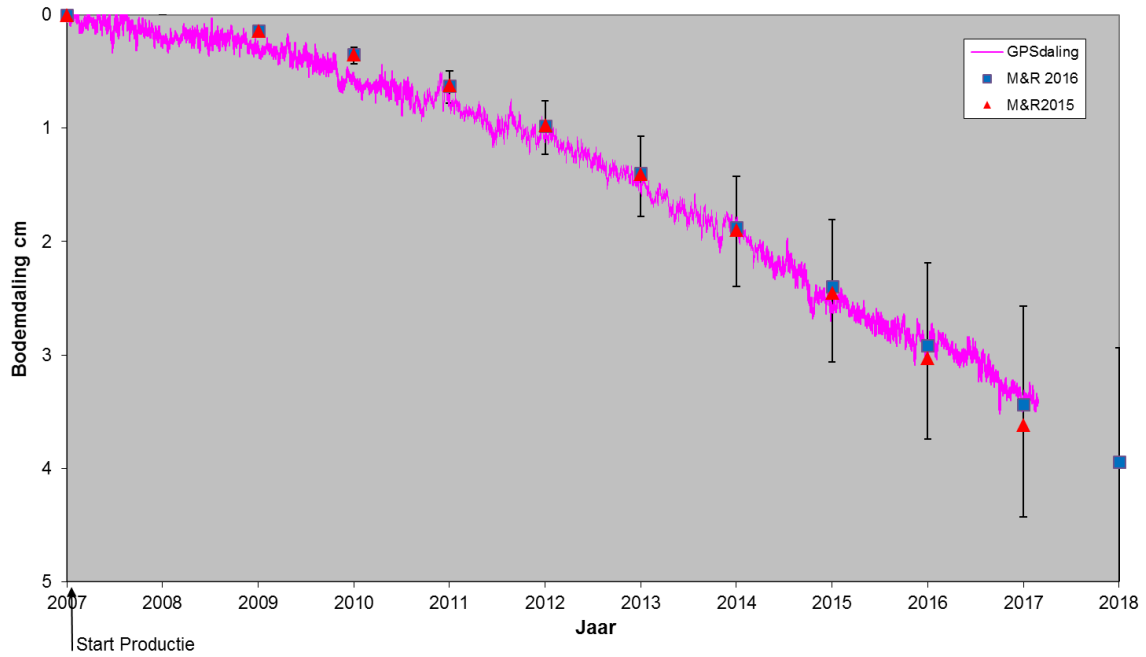
### 2.7.1 Bodemdaling GPS locaties op Moddergat en Ameland

Figuur 15, Figuur 16 en Figuur 17 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 3) 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 15) is gemiddeld voor 2016 (6,1 mm/jaar), iets lager dan gerapporteerd in de M&R 2015 (6,4 mm/jaar). De waterpassing van 2017 op het eiland Ameland toont aan dat het model goed past met de metingen over een langere periode (zie Figuur 3). Gemiddeld gezien is passing van het model met de GPS stations op Anjum en Moddergat eveneens verbeterd.



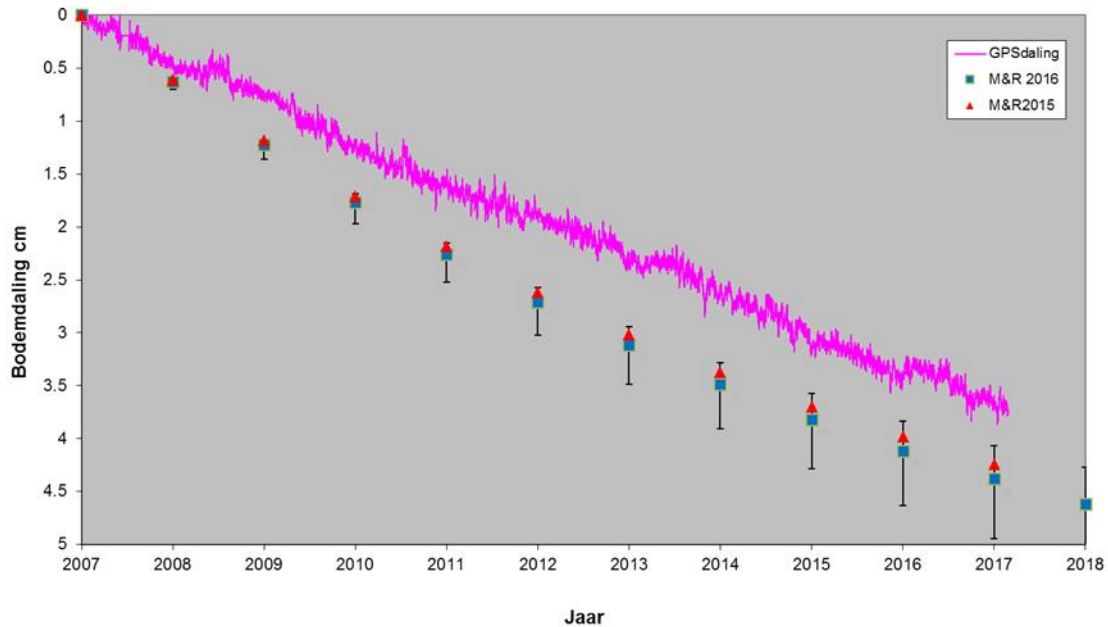
**Figuur 15; Voorspelde en gemeten (GPS) bodemdaling locatie Ameland (coördinaten: X-RD:190474.978, Y-RD: 608822.469). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2015 is aangegeven in rood.**

### Bodemdaling op Locatie Moddergat



**Figuur 16** 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 2015 is aangegeven in rood.

### Bodemdaling op Locatie Anjum



**Figuur 17** 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 2015 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:

Stelsel-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 2016 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	Sharepoint: <a href="#">Published Subsidence Documents / Survey / Plans</a>	P.04 Aanvraag en beheer van project of inrichtingsvergunning-NL
Productiedata	<a href="https://wrfm-ssw-ue.sharing.shell.com/App/Dream/Home.aspx">https://wrfm-ssw-ue.sharing.shell.com/App/Dream/Home.aspx</a>	P.71
Meetregister	Sharepoint: <a href="#">Published Subsidence Documents / Survey / Registers</a>	P.18

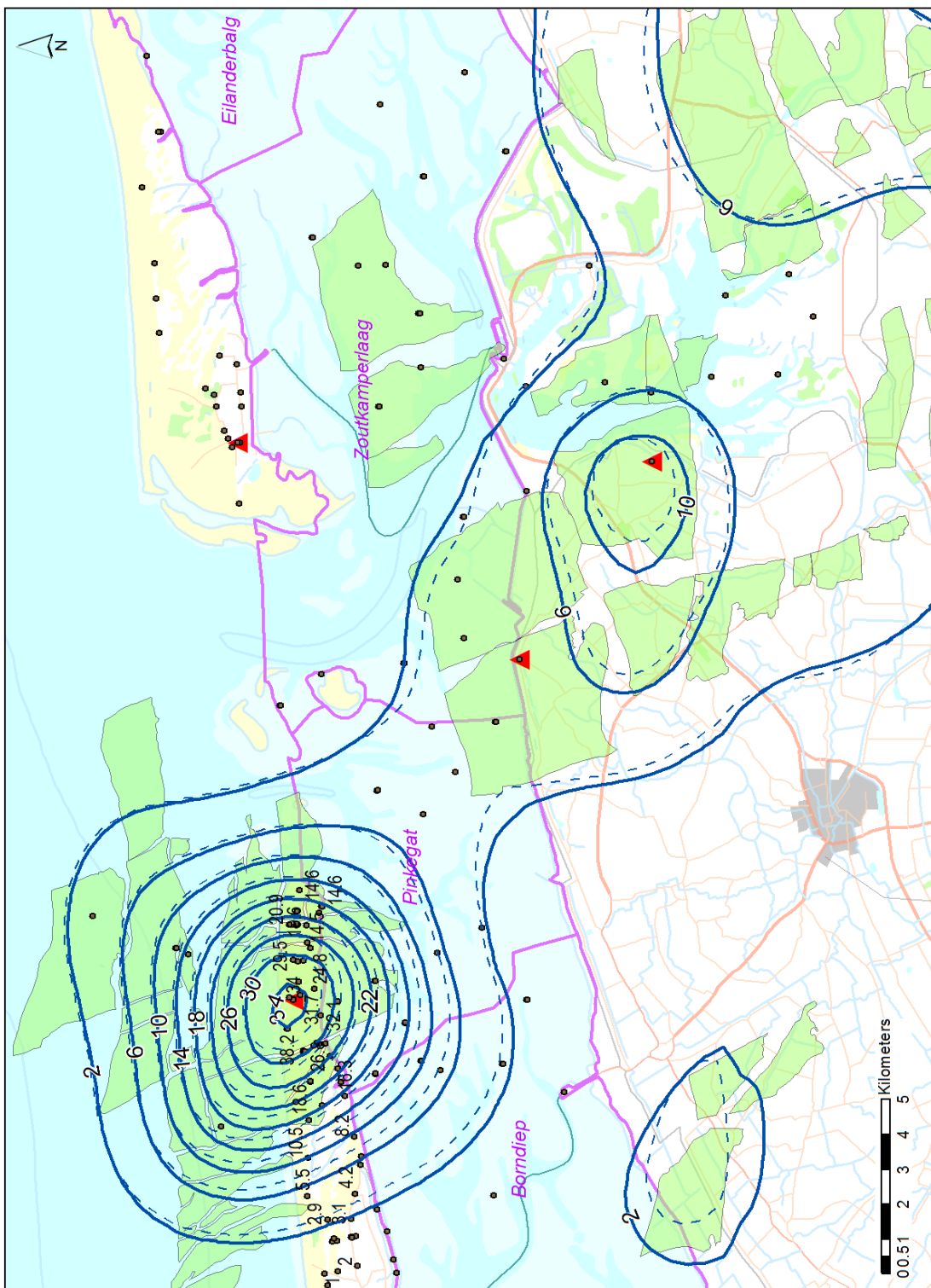
## 4 Conclusies

- 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 het richtscenario voor de zeespiegelstijging dat in 2016 beschikbaar kwam. Het nieuwe zeespiegelscenario geeft een minder sterke zeespiegelstijging aan.
- Op basis van het meetplan Waddenzee zijn in 2016 GPS metingen in de Waddenzee uitgevoerd op 12 peilmerken van de clusters in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. Verder zijn er 3 nieuwe peilmerkclusters geplaatst in het Pinkegat. 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 2016 voortgezet. AGRS (GPS) station Ameland (Nes) en nieuw geplaatst GPS station Ternaard zijn nu ook onderdeel van de monitoring. De modellen volgen deze metingen 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 11). Dit geomechanisch model wordt in meer detail beschreven in Referentie 4 en Referentie 13. Het model inclusief de geomechanische parameters is ongewijzigd t.o.v. het model dat voor de M&R 2014 en 2015 rapportage is gebruikt.
- De voorspelde bodemdalingssnelheid over de komende 20 jaar is lager dan voorspeld in de M&R cyclus 2015. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de drukmeting in Nes aanleiding gaf tot aanpassing van reservoir model. Hierdoor is het waarschijnlijker dat de schalielaag (ROSLU2) ondoorlaatbaar is en er minder drukdaling zal plaatsvinden in de aquifers. Als gevolg hiervan zal de bodemdalingssnelheid in Pinkegat afnemen.
- 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 gebruiksruimte binnen de tijd waarvoor de voorspellingen zijn uitgevoerd, de natuurgrens in Zoutkamperlaag en Pinkegat niet overschrijden.
- 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 23 jaar), worden er geen maatregelen genomen om de productie bij te stellen.

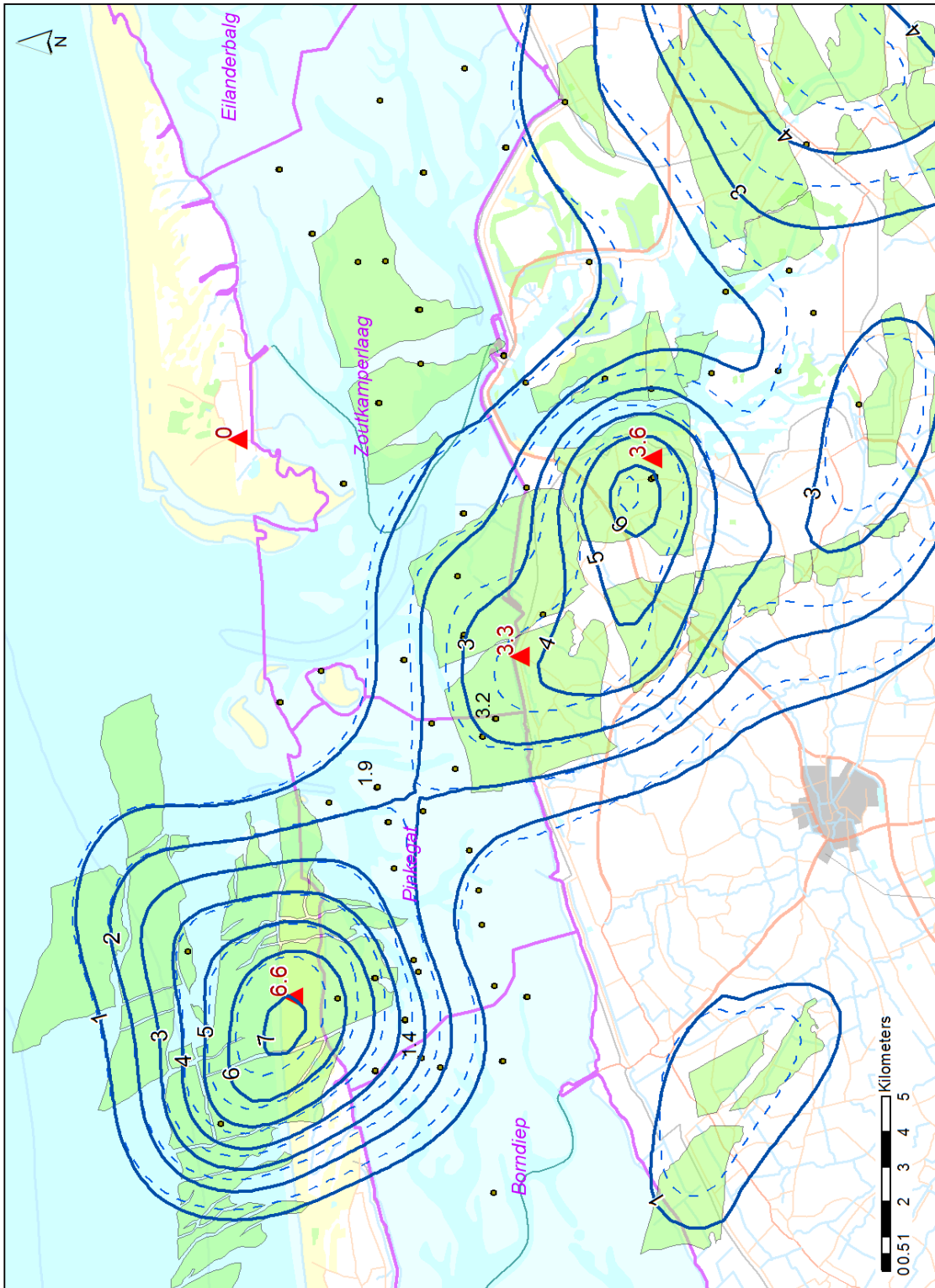
## 5 Referenties

- Referentie 1 NAM (30/09/2011) Wijziging winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen
- Referentie 2 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 3 NAM (2012) Gaswinning Moddergat, Lauwersoog, Vierhuizen: Actualisering meet- en regelprotocol n.a.v. wijziging winningsplannen 2011 NAM EP200612202112
- Referentie 4 NAM (2012) Gaswinning Moddergat/Lauwersoog/Vierhuizen: Technische bijlage (bijlage 3) behorend bij het geactualiseerde Meet- en Regelprotocol d.d. 1 april 2012. EP201201210893
- Referentie 5 (NAM 29/10/2015) Meetplan Waddenzee 2016 (EP Report No: EP201510211259)
- Referentie 6 Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 – Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. Rapport RIKZ / 2004.025.
- Referentie 7 Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. resultaten uitvoering Meet- en Regelcyclus 2013; Rapport EP201403202106, mei 2014
- Referentie 8 GPS Survey NAM Waddenzee v. 1.21. 06-GPS B.V., 01/2017.
- Referentie 9 Check reference station coordinates NAM v.1.8. 06 GPS B.V., 06/2016.
- Referentie 10 NLGEO2004: het geoidemodel voor Nederland. Data-ICT-Dienst, Rijkswaterstaat, URL: <http://www.rdnap.nl/algemeen/hoochte/geoide.html>
- Referentie 11 NAM (30/09/2011) Wijziging winningsplan Ameland-Oost, Ameland-Westgat en Ameland-N07
- Referentie 12 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 13 NAM (2014) Subsurface Technical Report. Subsidence Modelling of Anjum, Ameland and Waddenzee Fields. EP Report No: EP201403205558
- Referentie 14 Deltares (2009) Differentiele bodemdaling als gevolg van compactie in e ondiepe tot matigdiepe ondergrond van Ameland-oost rapport nr. 2009-U-R91011. <http://feitenencijfers.namplatform.nl/download/rapport/f80895da-8555-4511-9f18-ccd42234c6be?open=true>
- 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 2016
- 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 totaal en sinds 2006



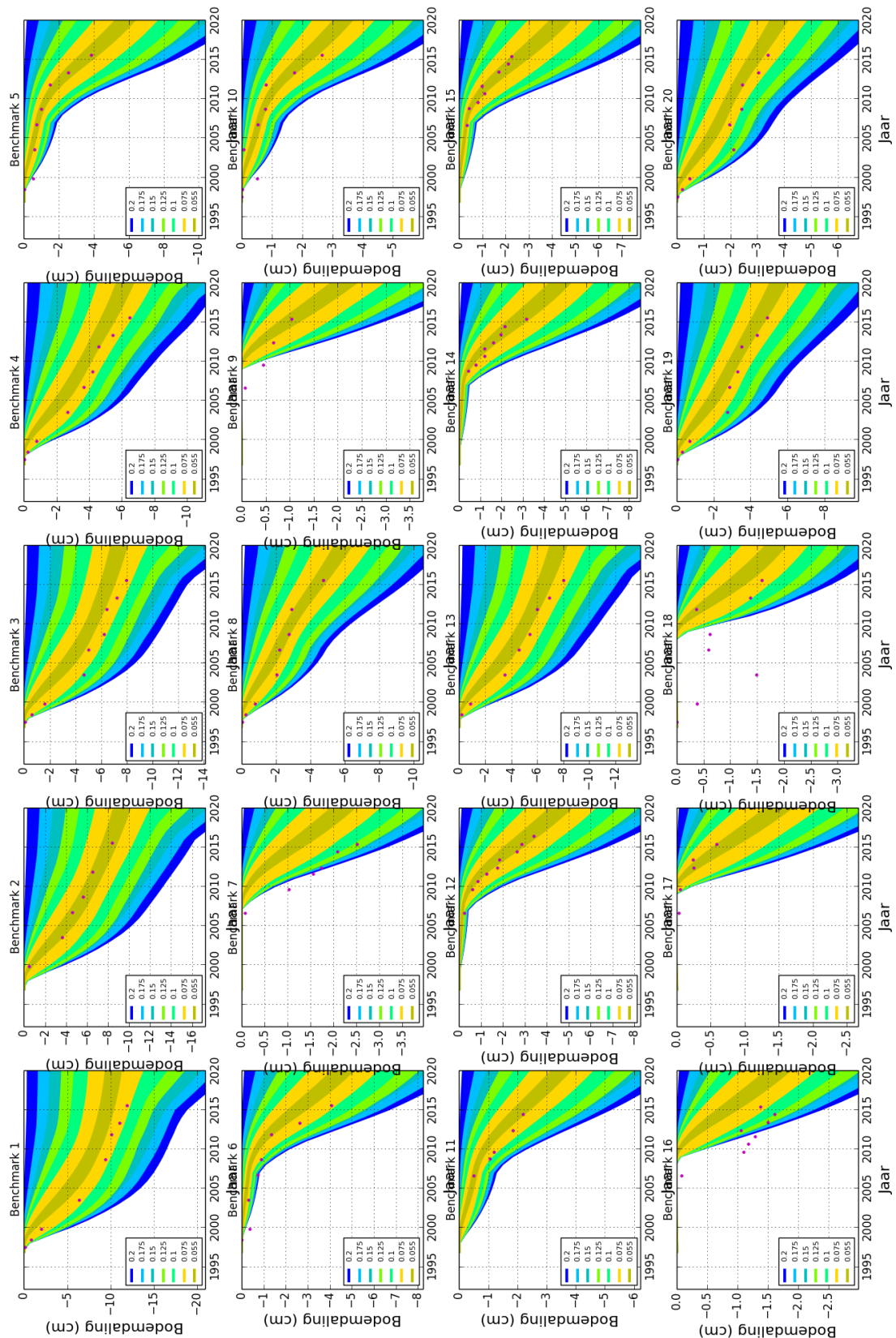
Totale bodemdaling (status contour 1-1-2017) door gaswinning sinds de start van de Ameland en Anjum productie. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling (gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2015 zoals beschreven in de M&R rapportage over 2015). Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 3 posities continue GPS metingen uitgevoerd sinds 2007 (rode driehoek)..



**Bodemdaling (status contour 1-1-2016) 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 van 2015 weer zoals getoond in de M&R rapportage over 2015). De punten met label representeren de peilmerken met de gemeten hoogteverschillen vanaf 2006 (nulmeting Waddenzee) tot de laatst uitgevoerde meting in mei 2016. Rode waarden geven de daling aan van de permanente GPS stations in de periode feb. 2007- feb. 2017. Bodemdaling in cm.**

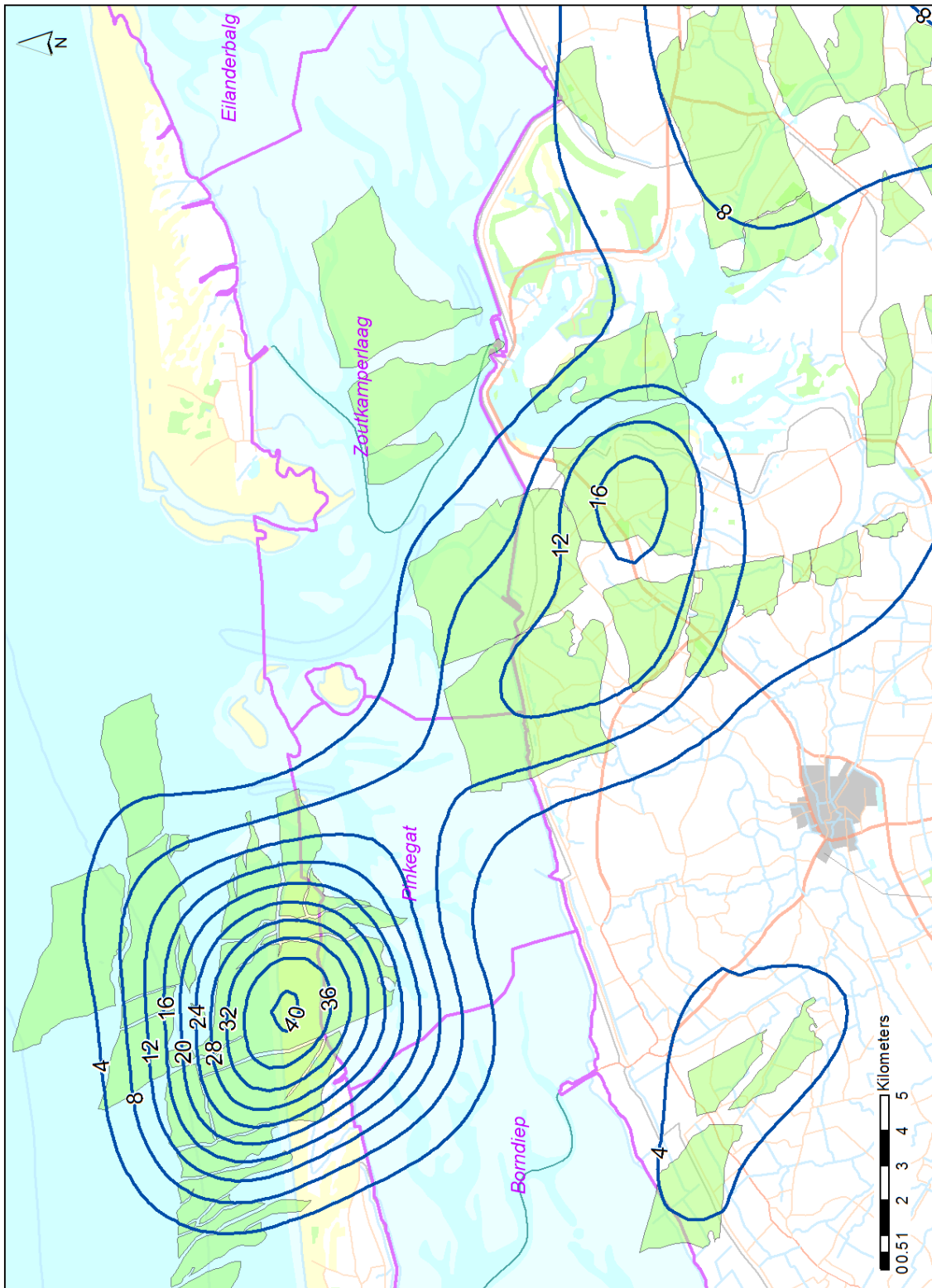


## Bijlage 2. bodemdaling per punt



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 7. Het grafieknnummer geeft de locatie van het peilmerk weer in Figuur 8.

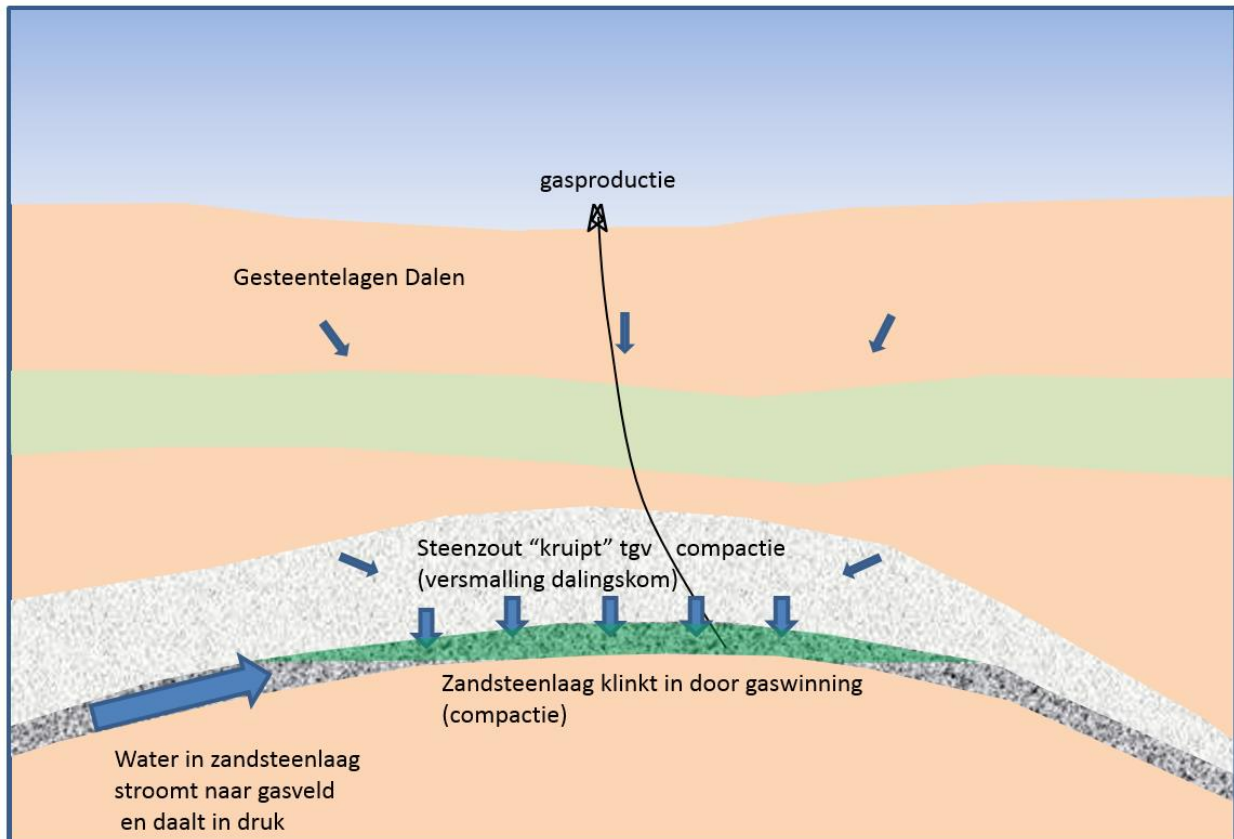
### Bijlage 3 Verwachte bodemdaling in het jaar 2050



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

### Bodemdaling door gaswinning

Op veel plaatsen in de Nederlandse bodem zit aardgas. Dit gas bevindt zich op een diepte van ruim 3.000 meter in de poriën van een miljoenen jaren oude zandsteenlaag. Ingesloten onder ondoordringbaar gesteente, varieert de gasdruk op die diepte tussen de 300 en 600 bar. Wanneer door gaswinning de druk in de poriën van zo'n zandsteenpakket afneemt, wordt het zandsteen samengedrukt. Het 'compacteert'. Deze compactie op drie kilometer diepte leidt tot bodemdaling aan het aardoppervlak. We spreken dan van bodemdaling door gaswinning.



**Figuur 18: Bodemdalingsproces.** In een diepgelegen laag zit gas opgesloten. Het gewicht van het erboven gelegen gesteente zet het gas onder druk. Door de winning van het gas wordt de druk verlaagd waardoor het gesteente compacteert. Ook mogelijke drukdaling in de omringende waterlagen en het vloeien van het zout hebben invloed op de bodemdaling.

### Tijdsafhankelijke bodemdaling

Wanneer met de gaswinning wordt gestart zal dit vrijwel direct leiden tot drukdaling rondom de putten in het zandsteenpakket. Bij alle velden zien we dat de bodemdaling echter vertraagd op gang komt. De exacte oorzaak van dit proces is niet bekend. Wellicht wordt dit veroorzaakt door de drukdaling van het gas en omringende water, door het compactiegedrag van het gesteente zelf of omdat deze compactie in eerste instantie door bovenliggende aardlagen wordt opgenomen of tegengehouden. De winning van zout heeft ons bijvoorbeeld geleerd dat steenzout zich gedraagt als een zeer stroperige vloeistof. Uit ervaring weten we dat na ongeveer 2 tot 5 jaar gasproductie, de bodemdaling zichtbaar wordt in de bodemdalingmetingen aan het aardoppervlak.

Na enkele jaren gaswinning (of tientallen jaren voor een groter veld zoals bijvoorbeeld het Ameland-veld), neemt de drukdaling in het zandsteenpakket significant af. Omdat de snelheid van drukdaling vermindert, verwacht je ook een afname in de snelheid van bodemdaling. Dit is ook wat we observeren, maar ook in deze fase zien we dat de bodem

een periode blijft 'doordalen'. Deze daling wordt zelfs waargenomen nadat de gasproductie helemaal gestopt is, waarschijnlijk vanwege de dezelfde oorzaken die hierboven genoemd zijn. Bij doorgaande bodemdaling spreken we van een na-ijleffect.

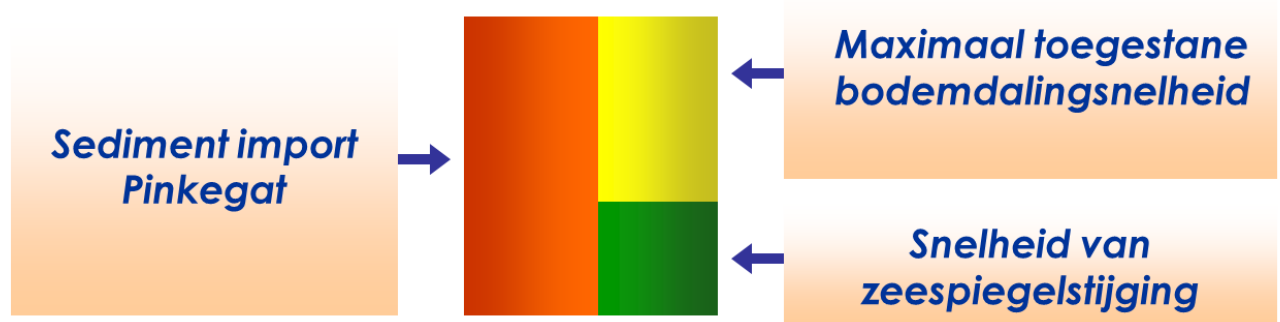
### **Metten en modelleren van bodemdaling**

Voor ieder gasveld in Nederland is het gaswinningsbedrijf verplicht om op basis van de geologische kennis over de diepe ondergrond en het gasproductieverloop een bodemdalingsschotel te berekenen. Daarnaast worden er meetcampagnes uitgevoerd om de daadwerkelijke bodemdaling op een groot aantal punten te meten. De bodemdaling die met een model berekend wordt, wordt bijvoorbeeld in de Waddenzee jaarlijks vergeleken met de gemeten bodemdaling.

De betrouwbaarheid van de modellen wordt getoetst door telkens de berekende bodemdaling te vergelijken met de bodemdaling die is gemeten. Vervolgens kunnen deze modellen worden gebruikt om voorspellingen te doen van de bodemdaling.

### **Bodemdaling Waddenzee**

Er vindt ook gaswinning plaats onder de Waddenzee, met compactie en bodemdaling als gevolg. De effecten van deze bodemdaling zijn echter niet zichtbaar in de Waddenzee. Frequent wordt de oppervlakte van de wadplaten gemeten waarbij we zien dat deze niet van grootte veranderen. Ten eerste omdat de bodemdaling zich beperkt tot enkele millimeters per jaar en ten tweede omdat er onder invloed van de getijdenstroming een constante uitwisseling van sediment is tussen de Waddenzee en de Noordzeekustzone. Het verschil in waterniveau tussen eb en vloed bepaalt vooral de omvang en ligging van de wadplaten en geulen en dit proces overheerst de beperkte invloed van de bodemdaling door gaswinning. De eigenschap dat de wadplaten kunnen meegroeien met de bodemdaling en de stijging van de zeespiegel noemen we het meegroeivermogen.



**Figuur 19:** De optelsom van de snelheid van zeespiegelstijging en bodemdaling mogen de meest conservatieve schatting van de snelheid van sedimentimport niet overschrijden. Voor het kombergingsgebied Pinkegat wordt een minimaal meegroeivermogen van 6 millimeter per jaar aangehouden.

Voor de bodemdaling onder de Waddenzee is een veilige grens bepaald voor dit meegroeivermogen zodat we zeker weten dat we geen schade aan de natuur veroorzaken. Vastgesteld is dat de optelsom van zeespiegelstijging en bodemdaling door gaswinning per jaar niet een bepaalde waarde mag overschrijden. Om deze waarde duiding te geven is het gedeelte van de Waddenzee boven de gasvelden verdeeld in twee zogenaamde kombergingsgebieden, Pinkegat en Zoutkamperlaag. Het kombergingsgebied is een getijdebekken in de Waddenzee, waarin het getijdenwater en het sediment dat via een zeegat naar binnenstroomt geborgen wordt. Voor het kombergingsgebied Pinkegat is vastgesteld dat daling door gaswinning plus de zeespiegelstijging niet meer mag zijn dan 6 millimeter per jaar. Deze grens noemen we de natuurgrens dat de ondergrens van het meegroeivermogen representeert en daarmee zeer conservatief is. Dreigt de 6 millimeter

per jaar te worden overschreden, dat moet de Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) de gasproductie zodanig reduceren dat de overschrijding niet gebeurt of zo kort mogelijk duurt. Dit noemt men het “Hand Aan de Kraan”-principe. Hierover rapporteert NAM jaarlijks aan de Minister van Economische Zaken die de rapporten ter controle voorlegt aan een onafhankelijke Auditcommissie.

Omdat de 6 millimeter per jaar een ondergrens is van het meegroeivermogen van de Waddenzee wordt voor de bodemdalingsnelheid een verwachtingswaarde berekend. De verwachtingswaarde volgt idealiter uit een aantal modelscenario's die allen redelijkerwijs met de bodemdalingsmetingen moeten kloppen. De verwachtingswaarde is dan het gemiddelde van deze scenario's.

De modellen die ten grondslag liggen aan deze rapportages waren vaak te complex om honderden berekeningen mee uit te voeren en daarom werd er op basis van de beste kennis en beste passing met de data een basis scenario geselecteerd, waarmee ook de bodemdaling in de toekomst werd berekend.

Het gevolg hiervan was dat van jaar tot jaar vrij grote verschillen werden getoond in zowel de bodemdalingsnelheid als de voorspelling hiervan, overigens zonder dat de natuurgrens ooit is overschreden.

De hierboven genoemde verschillen in bodemdalingsvoorspellingen hebben het vertrouwen in de voorspelbaarheid van bodemdaling doen afnemen. Tegelijkertijd lieten waarnemingen boven het gasveld Ameland zien dat de bodemdaling niet alleen traag op gang komt, maar ook doorgaat terwijl de productie sterk is verminderd. Deze twee constateringingen vroegen om actie, waarbij de NAM de opdracht heeft gekregen om onderzoek te doen naar processen/ mechanismen die dit na-ijlgedrag kunnen verklaren. Dit onderzoek gaf tevens de mogelijkheid om statistisch beter de onzekerheid in kaart te brengen.

### **Studie naar het na-ijleffect van bodemdaling**

In 2011 startte NAM een groot onderzoek naar het na-ijleffect van bodemdaling. In de eerste fase van het onderzoek lag de nadruk op het bestuderen van mogelijke oorzaken van een na-ijleffect.

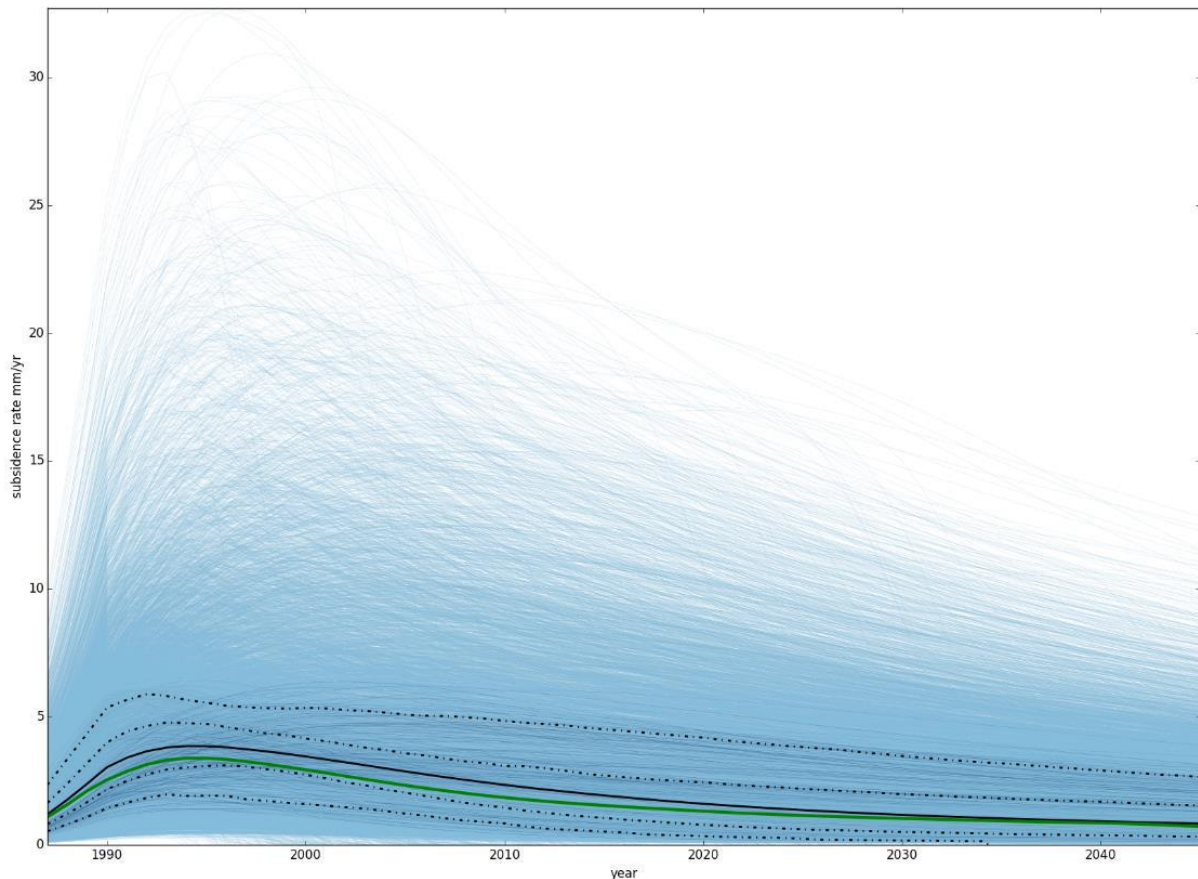
In samenspraak met specialisten en SodM zijn in deel 1 van de studie de onderstaande 6 potentiële oorzaken nader bestudeerd. Aan deze studie namen verschillende universiteiten uit binnen- en buitenland deel. Het werk werd begeleid door een commissie van specialisten. Deze werd voorgezeten door de Waddenacademie.

1. Drukdaling in watervoerende gesteente aangrenzend aan het gasveld. Dit noemen we *aquifer depletie*.
2. Tijdsafhankelijke compactie van het zandsteen. Dit wordt ook wel *gesteentekruip* genoemd.
3. Het vloeien van de dikke zoutlaag boven het compacterende zandsteenpakket. Dit noemen we *zoutkruip*.
4. Het niet gelijkmatig compacteren van het gashoudende zandsteenpakket. Dit noemen we *heterogene compactie*.
5. Kwaliteit en betrouwbaarheid van de landmeetkundige metingen door middel van waterpassing en GPS.
6. In hoeverre de wereldwijd toegepaste, wiskundige formules op correcte wijze de theorie over bodemdaling door gaswinning beschrijven.

De studie leverde veel kennis en inzichten op. Ook werd duidelijk dat er niet één eenduidige factor is aan te wijzen die het na-ijlgedrag van de bodemdaling boven het gasveld Ameland kan veroorzaken. Het bleek om een combinatie van factoren te moeten gaan.

Deel 2 van de studie beoogde daarom een techniek te ontwikkelen waarmee combinaties van factoren/processen in modellen doorgerekend konden worden. Het doel was tot een verbeterde inschatting te komen van de verwachtingswaarde. Deze verwachtingswaarde kan dan vergeleken worden met bodemdalingsvoorspellingen zoals die tot dusver werden

gemaakt. Om hierbij geen factoren/processen uit te sluiten zijn voor duizenden bodemdalingsscenario's voor het gasveld Ameland doorgerekend. Denk hierbij aan combinaties van verschillende compactiemodellen, *aquifer*-scenario's, de snelheid van de zoutkruip, etc. Al deze bodemdalingsscenario's zijn vergeleken met de gemeten bodemdaling. De computer berekende hoe goed ieder scenario de gemeten bodemdaling beschreef. Het scenario dat uitkomsten produceerde die de gemeten bodemdaling het best benaderde, werd het meest waarschijnlijk geacht. De verwachtingswaarde voor de bodemdaling boven het gasveld Ameland kan vervolgens worden berekend door het gemiddelde te nemen van alle bodemdalingsscenario's waarbij scenario's met een betere passing met de metingen aan het aardoppervlak een groter aandeel kregen in deze weging. Een voorbeeld van een resultaat dat volgt uit deze berekeningen is te zien in Figuur 20. In dit figuur is de gemiddelde bodemdalingssnelheid in het kombergingsgebied Pinkegat per jaar weergegeven waarbij elk blauw lijntje een bodemdalingsscenario voorstelt. Scenario's buiten de zwarte stippellijnen in het figuur zijn scenario's die slecht passen bij de metingen en daardoor zeer onwaarschijnlijk zijn. Wat overblijft is een relatief nauwe band van scenario's binnen de zwarte stippellijnen die de begrenzing van de onzekerheid voorstellen en daarbinnen een doorgetrokken lijn die de verwachtingswaarde voorstelt. De groene lijn in dit figuur geeft het resultaat zoals dit vorig jaar gerapporteerd is aan de Minister van Economische Zaken. De zwarte lijn ligt dicht bij deze lijn wat vertrouwen geeft in de modelkeuzes die ten grondslag liggen aan de groene lijn. De zwarte lijn is dus geen scenario meer maar een gewogen gemiddelde van de scenario's. Het is een resultaat dat beter past bij de doelstelling van het "hand aan de kraan" principe maar wat lastiger te begrijpen is. Dit resultaat kan niet eenvoudig visueel worden weergegeven door een directe vergelijking tussen gemeten bodemdaling en een model op een kaart, wat de transparantie en communicatie van de resultaten bemoeilijkt.



**Figuur 20: Gemiddelde bodemdalingssnelheid voor het kombergingsgebied Pinkegat. De zwarte lijn is de zogenaamde verwachtingswaarde. De groene lijn is het verwachte bodemdalingsscenario zoals gerapporteerd aan het Min. Van EZ. De stippellijnen vormen 1 en 2x de standaarddeviatie (onzekerheidsbandbreedte).**

### Toetsen van de remweg

Een belangrijk aspect van het “Hand Aan De Kraan”-principe is dat de bodemdaling afneemt op het moment dat de productie wordt beëindigd, maar niet onmiddellijk stopt. Dit proces noemen we de remweg. Onder meer op basis verwachtingswaarde kan de werking van het “Hand aan de Kraan”-principe worden getoetst. Hiertoe wordt in de scenario’s een productiestop doorgevoerd in verschillende fasen van de productie. Het model laat vervolgens zien hoe de bodemdalingssnelheid zou afnemen als gevolg van de ingreep. De resultaten bevestigen een merkbare werking van het remweg principe maar tonen ook aan dat het gasveld Ameland een relatief groot na-ijleffect heeft. Ook werd duidelijk dat een productiestop in het midden van de productieperiode (als de druk in het veld nog relatief hoog is) tot een sterkere afname van de bodemdalingssnelheid leidt dan wanneer in de eindfase van de productie de gaskraan (geheel of gedeeltelijk) wordt dichtgedraaid. Deze observatie is belangrijk voor een eventuele productiestop in de Waddenvelden zoals Nes en Moddergat. Naast het feit dat deze velden zich vroeger in het productieproces bevinden, kennen deze velden ook een beperkte communicatie met watervoerende pakketten. Voor deze velden zal de remweg dan ook steiler zijn dan de remweg voor het Ameland veld.

## Conclusies

De resultaten van de LTS-studies tonen aan dat het waarschijnlijk is dat het bodemdalingsgedrag boven Ameland verklaard kan worden door een combinatie van fysische processen, zoals drukdaling, compactiegedrag en mechanisch gedrag van de lagen die boven het gasreservoir liggen. In deze studie zijn geen additionele processen gevonden die gemist waren in de modellen die ten grondslag lagen aan de jaarlijkse rapportages aan de Minister van Economische Zaken. Wel is er een workflow ontwikkeld die beter de onzekerheid van de modelresultaten in kaart kan brengen. Het nadeel van deze workflow is de complexiteit en het lastig communiceren en toetsen van de resultaten naar en door derden. Dit nadeel kan ervoor pleiten om de traditionele methode te handhaven in de jaarlijkse rapportages en de complexe LTS workflow in te zetten voor een additionele toets van het langdurige meegroeivermogen van de Waddenzee waarbij ook de onzekerheid kan worden meegenomen van de zeespiegelstijging en sedimentatiesnelheden. NAM zal in overleg met bevoegd gezag en auditcommissie besluiten op welke wijze de verwachtingswaarde toegepast of verbeterd dient te worden.

.....  
Bent u geïnteresseerd in de uitgebreide rapportages van het onderzoek naar het na-ijleffect van diepe bodemdaling, dan kunt u die vinden op de NAM website:

<http://www.nam.nl/gas-en-oliewinning/wadden/onderzoeksrapportages-wadden.html#iframe=L2VtYmVkl2NvbXBvbmVudC8/aWQ9b25kZXJ6b2Vrc3JhcHBvcnRlbi13YWVRkZW4=>