

**Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en  
Vierhuizen**

**Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2017**

**NAM B.V.**

EP Document Nummer.:	EP201802200641	Owner:	UIO/T/DL
Revision No.:		Status:	
Document Date:	1/5/2018	Security:	

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, tenminste elke 3 jaar, geodetische GPS-metingen uitgevoerd op peilmerken van de peilmerkclusters in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. In verband met 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 2017 zijn er in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag op 22 peilmerkclusters metingen uitgevoerd.

De continue GPS-metingen op de locaties boven de gasvelden Ameland, Anjum en Moddergat, die in 2007 zijn gestart (nog voor aanvang van de productie in Nes en Moddergat), zijn in 2017 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 sinds 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 1-1-2018. 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 geomechanische modellen.

Het geomechanisch model, dat gebruikt wordt voor de bodemdalingsvoorspellingen, bevat dezelfde aannames voor het fysisch gedrag van het reservoir en het bovenliggende gesteentepakket als het model dat gebruikt is in de "Long-term subsidence study" (LTS-II) voor het Ameland veld.

De onzekerheid in de uitkomsten van de geomechanische modellering is bepaald middels een Monte Carlo analyse. Op basis van deze analyse zijn een basis, laag en een hoog scenario gekozen, waarbij voor het laag en hoog scenario vooral is gekeken naar de bodemdalingssnelheid van de afgelopen 8 jaar en de passing met de GPS-punten in de Waddenzee. Het basisscenario wordt in de M&R-rapportage beschouwd als het verwachtingsscenario. De onzekerheid is tevens inzichtelijk

---

<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

gemaakt in de grafieken die de belasting tonen voor de twee kombergingsgebieden. Daarbij dient opgemerkt te worden dat het basisscenario leidend is voor mogelijke productiebijsturing volgens het Meet- en regelprotocol.

Samenvattend wordt voor deze rapportage het volgende geconcludeerd:

- De beschikbare reservoir- en geomechanische 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 dan het vorige scenario.
- Op basis van het meetplan Waddenzee zijn in 2017 GPS-metingen in de Waddenzee uitgevoerd op 22 clusters van peilmerken in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. 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 2007 zijn gestart (nog vóór aanvang van de productie in Nes en Moddergat), zijn in 2017 voortgezet. Het AGRS (GPS) station Ameland (Nes) en het in 2016 nieuw geplaatste GPS-station Ternaard zijn ook onderdeel van de monitoring. De modellen beschrijven deze metingen goed, waarbij opgemerkt dient te worden dat de kalibratie van het model wordt gedaan op basis van alle beschikbare metingen.
- Voor de modellering van de bodemdaling ten gevolge van gasproductie van de Ameland velden is in de rapportage uitgegaan van de geomechanische modellering zoals beschreven in de LTS-II studie (Referentie 18).
- De voorspelde bodemdalingssnelheid in het kombergingsgebied Pinkegat over de komende 20 jaar is lager dan voorspeld in de M&R-cyclus 2016. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door een realisatie van de Ameland reservoirdruk die minder depletie geeft in het westelijke aquifer en daarmee, via het geomechanische model, beter past bij de gemeten bodemdaling in dit gebied.
- De bodemdalingssnelheid in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag komt goed overeen met de voorspelling in de M&R-cyclus 2016.
- Bij het opstellen van de realisaties van de dynamische reservoir modellen voor Anjum, Ameland en de Wadden voorkomens is de mobiliteit van de aquifers gevarieerd. Voor de Anjum en de Wadden voorkomens zijn 3 realisaties gemaakt, alle met een andere mobiliteit als functie van de saturatie van het residuele gas en de permeabiliteit van het aquifergesteente. Voor Ameland is een keuze gemaakt uit de 58 realisaties die gemaakt zijn voor de LTS-II studie.
- Een combinatie van deze realisaties heeft geleid tot de definitie van een laag, basis (verwacht) en hoog bodemdalingsscenario.
- Volgens het basisscenario zal de bodemdalingssnelheid de gebruiksruimte, binnen de tijd waarvoor de voorspellingen zijn uitgevoerd, de natuurgrens voor Zoutkamperlaag en Pinkegat niet overschrijden.
- De meet- en regelcyclus stuurt op basis van de verwachtingswaarde voor de belasting volgens het basisscenario. Aangezien de bodemdaling volgens dit scenario binnen de gebruiksruimte valt, worden er geen maatregelen genomen om de productie bij te stellen.

## Inhoud

1	Inleiding .....	5
2	Deelprocessen .....	7
2.1	Metten (stap 1) .....	7
2.1.1	Vlakdekkende metingen .....	7
2.1.2	Reservoir monitoring .....	7
2.2	Analyseren meetgegevens (stap 2) .....	8
2.2.1	Kwaliteitscontrole en bodemdalingsberekening .....	8
2.2.2	Resultaat bodemdalingsanalyse .....	8
2.3	Verifiëren prognose (stap 3).....	10
2.3.1	Ondergrondmodellering .....	10
2.3.2	Overzicht veranderingen reservoirsimulatiemodellen t.o.v. 2016 .....	10
2.3.3	Kalibratie reservoirsimulatiemodellen .....	10
2.3.4	Ameland realisaties .....	13
2.3.5	Gaswinningsprognose .....	16
2.4	Modellering bodemdaling .....	16
2.4.1	Opstellen van bodemdalingsscenario's: laag, basis en hoog .....	17
2.4.2	Vergelijking van het de bodemdalingsscenario's met het geodetisch model .....	19
2.4.3	Bodemdaling GPS-locaties op Ameland, Moddergat, Anjum, Ternaard en Ameland Nes	23
2.4.4	Vergelijking van de gemodelleerde bodemdaling met de metingen .....	27
2.4.5	Belangrijkste overeenkomsten en verschillen tussen de M&R 2016 en M&R 2017 bodemdalingsmodellen .....	28
2.5	Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4) .....	29
2.5.1	Bepaling volume en gemiddelde daling .....	29
2.5.2	Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting rapportagejaar 2017 met onzekerheid	31
2.5.3	Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting .....	33
2.6	Indien nodig aanpassen productie (stap 5).....	34
2.7	Actualiseren (stap 6) .....	34
3	Kwaliteitsborging .....	36
4	Conclusies.....	37
5	Referenties .....	38
	Bijlage 1. Gemodelleerde en gemeten bodemdaling totaal en sinds 2006 .....	40
	Bijlage 2 Verwachte bodemdaling in het jaar 2050.....	42
	Bijlage 3 Resultaten Long Term Subsidence Fase II (LTS-II) .....	43
	Bijlage 4. Reservoirrealisaties selectie via de LTS-II methode.....	44

# 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 17), 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 2017 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 2017 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 14 en Figuur 15).
2. Tabellen met de jaarlijkse toename van het bodemdalingsvolume (inclusief onzekerheid) per voorkomen per kombergingsgebied voor de jaren 2005 t/m 2018 (Tabel 2-7 en Tabel 2-8).
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 2-9).

De in een bepaald jaar gerapporteerde belasting B wordt berekend voor de situatie op 1 januari van dat jaar. Voor de rapportage in 2018 (over het jaar 2017) wordt op deze manier een B voor 1 januari 2018 berekend.

4. Grafieken met de bodemdalingsbelasting voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag vanaf start productie op de locatie Moddergat tot 2040 (Figuur 18 en Figuur 19).
5. Overzicht monitoring 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).

Geplande productie per voorkomen (jaarprofiel;

7. Tabel 2-5).
8. Gemeten en gemodelleerde bodemdaling op de permanente GPS-locaties (Ameland, Moddergat en Anjum), inclusief onzekerheid (Figuur 9, Figuur 10, Figuur 11, Figuur 12 en Figuur 13).

#### Terminologie

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

- 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 (aquifer) zal leiden.
- Bij *scenario* wordt bedoeld op een combinatie van een reservoirrealisatie en een geomechanisch model, waarbij specifieke waarden zijn geselecteerd voor de invoerparameters. Deze zullen leiden tot een bepaald *bodemdalingsprofiel* in de twee kombergingsgebieden.

In paragraaf 2.4 wordt beschreven wat de implicaties zijn van de Long-term subsidence study (hierna LTS) op de modelkeuzes voor de reservoirrealisaties en de geomechanische modellen die ten grondslag liggen aan de berekeningen zoals gerapporteerd in de deze Meet- en regel rapportage (M&R 2017).

De LTS-rapportages zijn begin 2018 goedgekeurd door de Inspecteur-generaal der Mijnen. Naast het bestuderen van de mogelijke fysische processen, die bepalend kunnen zijn voor mogelijke vertraagde bodemdaling, zoals bestudeerd in deel 1 van de LTS-onderzoek, is ook een studie gedaan naar de effecten van deze fysische processen op de gaswinning en gerelateerde bodemdaling in en boven het Ameland veld.

## 2 Deelprocessen

Op basis van de tot en met het jaar 2017 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 2017.

### 2.1 Meten (stap 1)

#### 2.1.1 Vlakdekkende metingen

Volgens het meetplan voor de Waddenzee zijn in 2017 GPS-metingen in de Waddenzee uitgevoerd op 22 clusters van peilmerken in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. 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), welke operationeel is sinds 2014 en GPS station Ternaard aan toegevoegd.

#### 2.1.2 Reservoir monitoring

Tabel 2-1 toont de gemeten reservoirdruk in de put op de datum van de meting.

Tabel 2-2 toont de cumulatieve gasproductie per voorkomen op 31 december 2017.

*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 gecompleteerd).*

Velden	Datum	Put	Druk op reservoir niveau (bara)	Type meting
Lauwersoog-Centraal	08/04/2016	LWO-2	188 (@ 4035 mTVDNAP)	CITHP
Lauwersoog-Oost	02/04/2017	LWO-1B	164 (@ 4050 mTVDNAP)	CITHP
Lauwersoog-West	02/04/2017	LWO-3	156 (@ 4060 mTVDNAP)	CITHP
Moddergat	02/04/2017	MGT-1B	176 (@ 3860 mTVDNAP)	CITHP
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)	02/04/2017	MGT-2	204 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Nes (ROSLU1)	02/04/2017	MGT-3	198 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Nes (ROSLU1)	02/04/2017	MGT-5	200 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Vierhuizen-Oost	30/10/2017	VHN-1C	90 (@ 3850 mTVDNAP)	SPG

Tabel 2-2; Productie per voorkomen tot en met 31/12/2017.

Velden	Cumulatieve productie t/m 2017 (10 <sup>6</sup> Nm <sup>3</sup> )	Productie volgens 2011 winningsplan in 2017 (10 <sup>6</sup> Nm <sup>3</sup> )	Actuele productie in 2017 (10 <sup>6</sup> Nm <sup>3</sup> )
Nes	9557	1033	911
Moddergat	4101	144	259
Lauwersoog-C	123	3	10
Lauwersoog-West	1412	47	110
Lauwersoog-Oost	2009	97	143
Vierhuizen-Oost	1572	15	66
Totaal*	18774	1339	1499

\*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 twaalfstal permanente stations als vaste (statische) referentie gebruikt. De coördinaten van deze stations zijn voorafgaand aan de 2017 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

#### 2.2.2.1 Waddenzee voorkomens

De ellipsoïdische hoogteverschillen van de wadpunten worden sinds 2006 met GPS bepaald. Voor het omrekenen naar orthometrische hoogteverschillen wordt sinds 2006 gebruik gemaakt van het NLGEO2004 geoïdemodel (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 15 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 2008, initiële gemiddelde zetting van de NAM peilmerken van gemiddeld 5 mm). Uit het in 2008 en 2009 uitgevoerde stabiliteitsonderzoek (zie Meet- en regelrapportages 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, worden 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.



### 2.2.2.2 Continue GPS-metingen

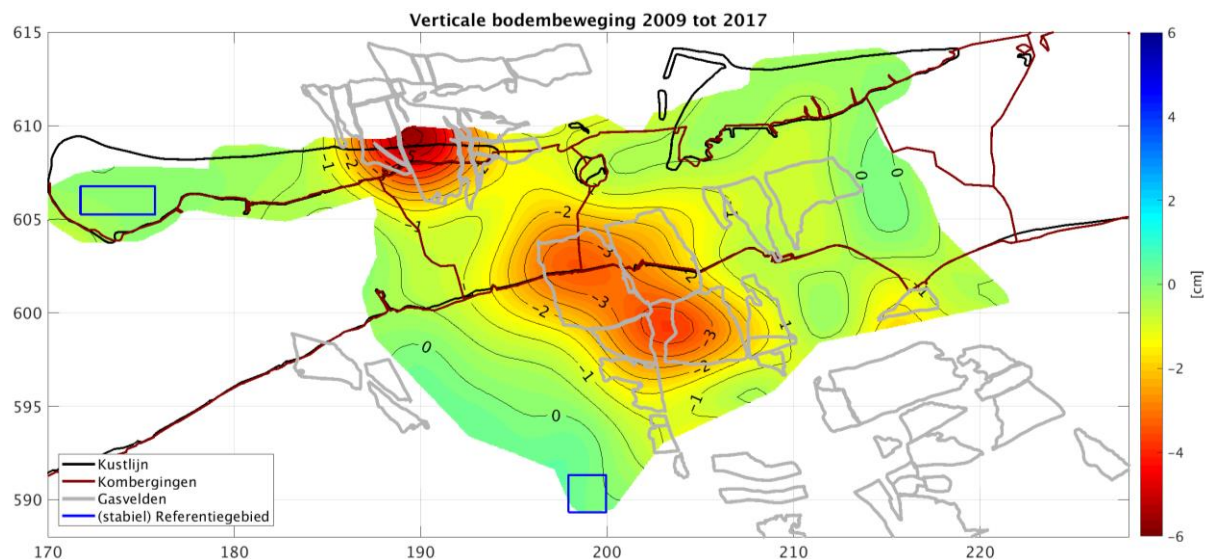
Als onderdeel van het Meet- en regelprotocol worden continue GPS-metingen uitgevoerd op de locaties Ameland, Moddergat, Ameland-Nes, Ternaard en Anjum. Deze metingen hebben een signaalfunctie voor het bepalen van de noodzaak voor aanvullende vlakdekkende metingen. Tabel 2-3 geeft de analyse van de continue 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-sigitaal in tijd wordt in Figuur 9, Figuur 10, Figuur 11 en Figuur 12 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.

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

Locatie	Start Monitoring	Daling van start monitoring t/m 31/12/2017 [mm]	Dalingsnelheid in 2017 [mm/jaar]
Ameland	05-02-2007	73	7,3 [1 $\sigma$ = 1,2 mm/jaar]
Anjum	05-02-2007	40	4,1 [1 $\sigma$ = 0,6 mm/jaar]
Moddergat	05-02-2007	37	4,1 [1 $\sigma$ = 0,9 mm/jaar]
Ameland-Nes	17-06-2014	4	0,8 [1 $\sigma$ = 1,7 mm/jaar]
Ternaard	19-11-2016	2	2,7 [1 $\sigma$ = 0,6 mm/jaar]

### 2.2.2.3 Ruimte-tijd analyse

Om de residuele verschillen tussen geomechanische modellen en geodetische metingen beter te kunnen visualiseren, is een geodetisch model afgeleid. Dit model geeft de beste oplossing voor een glad oppervlak door de metingen op basis van een ruimte-tijd analyse (Methode Houtenbos, Referentie 22). Als resultaat kan voor elk tijdsinterval tussen 2009 en 2017 een continu oppervlak worden gevisualiseerd, dat de gemeten bodemdaling in dat tijdvak weergeeft (Figuur 1).



Figuur 1; Verticale bodembeweging tussen 2009 en 2017 volgens het geodetische model. De relatieve bodembeweging is hier gevisualiseerd ten opzichte van twee stabiel veronderstelde referentiegebieden bij Driesum (ten oosten van Dokkum) en in het westen van Ameland.

In de ruimte-tijd analyse is naast de GPS-metingen in de Waddenzee ook gebruik gemaakt van de metingen op permanente GPS stations en de waterpassingen op het vaste land, Ameland en Schiermonnikoog. Interpretatie en visualisatie zijn in ruimte en tijd beperkt tot het gebied oftewel het tijdvak, dat door voldoende betrouwbare metingen is afgedekt.

## **2.3 Verifiëren prognose (stap 3)**

### **2.3.1 Ondergrondmodellering**

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. Door middel van 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, via interpolatie, 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 of reservoirmodel. Productie uit toekomstige boringen kan worden gesimuleerd met dit model waarmee kennis wordt verkregen over de verwachte 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 reservoirgesteente en de daarmee gepaard gaande bodemdaling. Geodetische metingen of bodemdalingsmetingen 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 verklaren van mogelijke afwijkingen tussen meetresultaten 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 zeer beperkt waren en hier vermeld worden bij de aanpassingen van de reservoirsimulatiemodellen.

### **2.3.2 Overzicht veranderingen reservoirsimulatiemodellen t.o.v. 2016**

Voor de Meet- en regelcyclus van 2016 werden de Wadden en Anjum reservoirmodellen uitgebreid gekalibreerd met de beschikbare productie en drukdata.

Met deze gekalibreerde modellen en de verwachte productie werd voor de cyclus van 2016 een prognose gemaakt van het te verwachten drukverloop in de reservoirs. De dynamische reservoirmodellen en bijbehorende voorspellingen zijn in 2016 uitgebreid beschreven in een technisch rapport (Referentie 16).

Voor de Meet- en regelcyclus van 2017 is een vergelijking gemaakt tussen de Anjum en de Wadden voorspellingen van de reservoirdruk in de verschillende putten en de meest recente drukmetingen zoals gegeven in Tabel 2-1. Hieruit is geconcludeerd dat de nieuwe drukmetingen binnen de marges overeenkomen met de voorspellingen uit de Meet- en regelcyclus van 2016 (Referentie 24). Er is geen nieuwe informatie beschikbaar die aanleiding geeft tot verdere verbetering van de modellen. De prognoses voor de drukdaling zijn daarom niet aangepast voor de Meet- en regelcyclus 2017. Sectie 2.3.3 beschrijft de kalibratie die gedaan is in 2016. Voor de Ameland voorkomens zijn een aantal nieuwe realisaties gekozen op basis van de LTS-II studie. Meer details over deze realisaties zijn te vinden in sectie 2.3.4

### **2.3.3 Kalibratie reservoirsimulatiemodellen in 2016**

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 gebaseerd op variatie van de aquifermobiliteit.

Extra kennis over de hoeveelheid drukdaling in de watervoerende pakketten is verkregen op basis van geodetische informatie rond de Ameland en Anjum velden. Deze informatie geeft aan dat er beperkte bodemdaling plaatsvindt boven deze watervoerende pakketten.

Per voorkomen zijn drie realisaties opgesteld, waarbij de mobiliteit van de aquifer bepalend is. Voor alle velden behalve Nes en Ameland zijn de volgende realisaties beschikbaar:

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

Voor de Nes en Ameland velden zijn de realisaties anders opgesteld, omdat er meer data beschikbaar is voor deze velden.

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 drukdaling dan een hoge verticale permeabiliteit. De doorlaatbaarheid van schalielaag ROSLU2, voorheen als een belangrijke onzekerheid, is vanwege de drukdata uit MGT-4A en MGT-5 minder onzeker; de data geven aan dat de schalielaag waarschijnlijk nagenoeg ondoorlaatbaar is.

Voor het Ameland aquifer is de gemeten bodemdaling bepalend geweest voor de drie drukrealisaties, waarbij een keuze is gemaakt uit de in totaal 58 beschikbare LTS-II realisaties.

Een overzicht van de alle opgestelde realisaties is weergegeven in

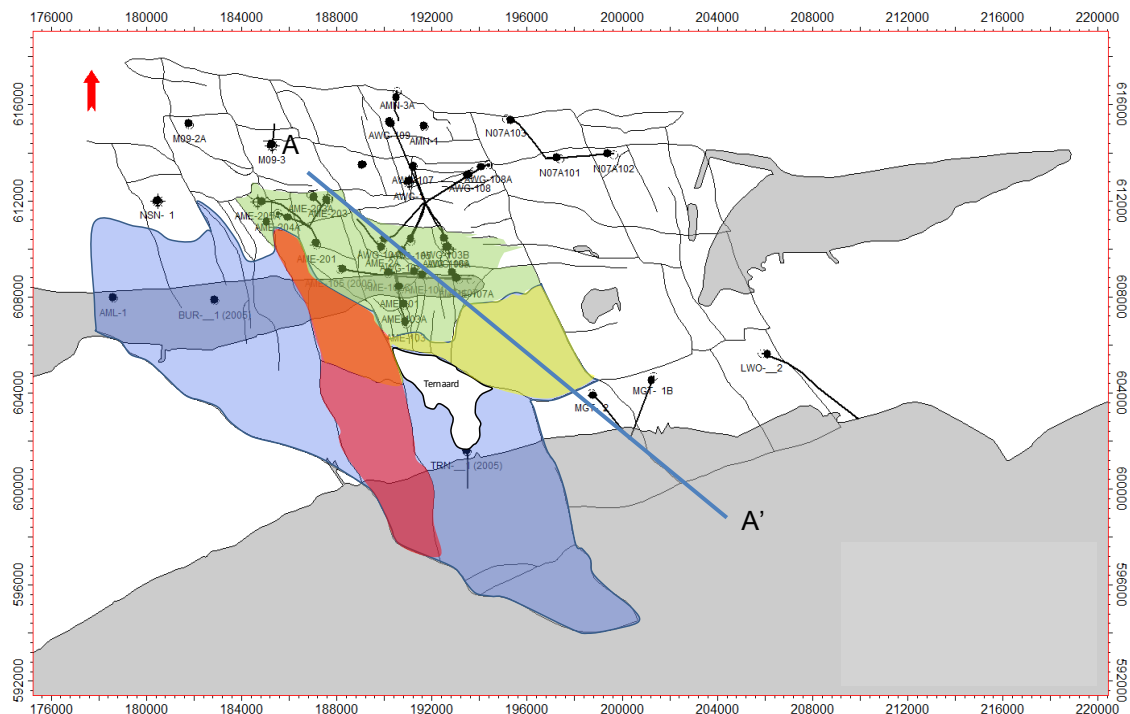
Tabel 2-4.

Tabel 2-4; Overzicht van de opgestelde realisaties.

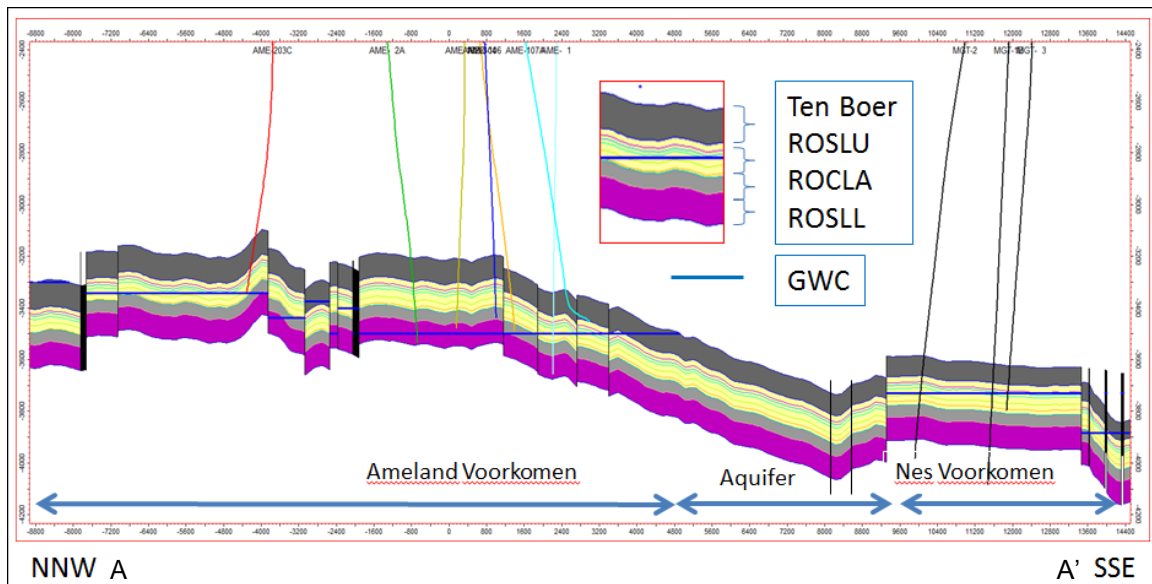
Voorkomen	Realisatie	Paleo-residueel gas (%)	Permeabiliteitsfactor aquifer t.o.v. permeabiliteit reservoir	Vermenigvuldigingsfactor verticale permeabiliteit in ROSLU3	Aquiferdruk gepast op meting
Ameland	Laag	Zie paragraaf 0		nvt	GPS Waddenzee
Ameland	Basis			nvt	GPS Waddenzee
Ameland	Hoog			nvt	GPS Waddenzee
Anjum	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	Geen data beschikbaar
Anjum	basis	6	0,1	nvt	Geen data beschikbaar
Anjum	hoog	0	1	nvt	Geen data beschikbaar
Ezumazijl	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	Geen data beschikbaar
Ezumazijl	basis	17	0,1	nvt	Geen data beschikbaar
Ezumazijl	hoog	0	1	nvt	Geen data beschikbaar
Lauersoog-C	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	Geen data beschikbaar
Lauersoog-C	basis	24	0,1	nvt	Geen data beschikbaar
Lauersoog-C	hoog	0	1	nvt	Geen data beschikbaar
Lauersoog-Oost	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	Geen data beschikbaar
Lauersoog-Oost	basis	23	0,1	nvt	Geen data beschikbaar
Lauersoog-Oost	hoog	0	1	nvt	Geen data beschikbaar
Lauersoog-West	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	Geen data beschikbaar
Lauersoog-West	basis	21	0,3	nvt	Geen data beschikbaar
Lauersoog-West	hoog	0	1	nvt	Geen data beschikbaar
Metslawier	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	Geen data beschikbaar
Metslawier	basis	8	0,1	nvt	Geen data beschikbaar
Metslawier	hoog	0	1	nvt	Geen data beschikbaar
Moddergat	laag	0	10 <sup>-4</sup>	nvt	Geen data beschikbaar
Moddergat	basis	20	0,3	nvt	Geen data beschikbaar
Moddergat	hoog	0	1	nvt	Geen data beschikbaar
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	Geen data beschikbaar
Vierhuizen	hoog	0	1	nvt	Geen data beschikbaar

### 2.3.4 Ameland realisaties

Bodemdalingsmetingen in de Waddenzee tussen de voorkomens 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 bruine aquifers in Figuur 2 tonen de in de modellen aangenomen actieve aquifers die begrensd worden door breuken met een groot verzet. De blauwe aquifers kunnen niet in druk dalen omdat deze aan alle kanten, dus ook aan de kant waar deze aan het gasveld grenst, begrensd worden door breuken met een dusdanig groot verzet dat er geen contact is tussen de reservoirs aan weerszijden van de breuken. Figuur 3 toont een dwarsdoorsnede van structuur rond de gele, zuidoostelijke, 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 kan ontstaan door de gaswinning uit het Ameland veld en niet door de gaswinning van het Nes veld. Deze interpretatie wordt verder ondersteund door het gemeten verschil in gas-water-contacten in Nes en Ameland en de meting van de oorspronkelijke (dus geen beïnvloeding van de druk door de gaswinning uit het Ameland veld) druk in het Nes veld in 2006.



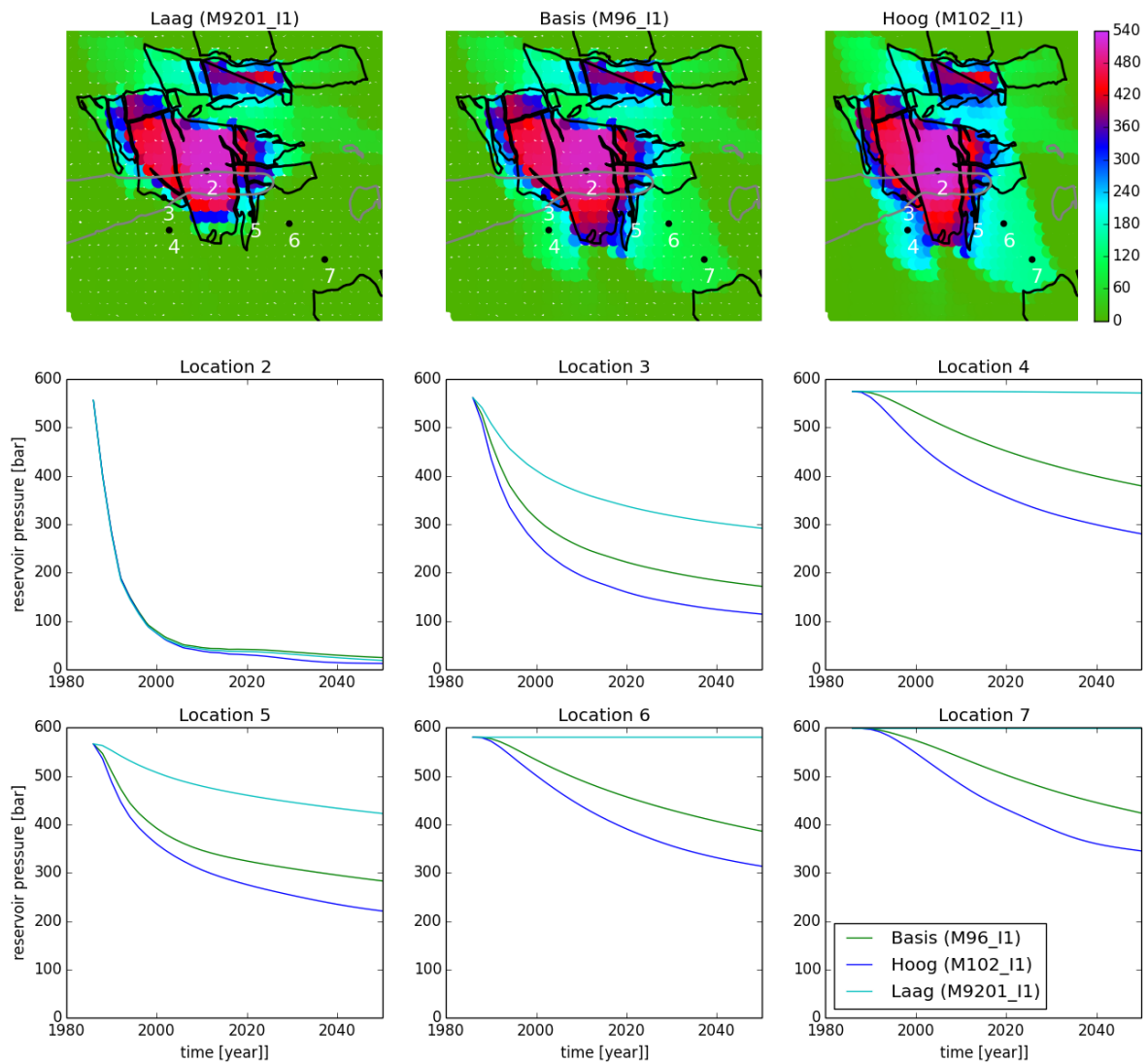
Figuur 2; Laterale aquifers van het Ameland voorkomen (rood en geel). De blauwe stippellijn geeft het traject van de doorsnede getoond in Figuur 3 aan.



Figuur 3; Verticale doorsnede van de in Figuur 2 getoonde lijn.

In vorige Meet- en regelrapportages is de onzekerheid voor mogelijke depletie in de aquifers ten zuiden van het Ameland veld meegenomen door o.a. de permeabiliteit van het gesteente te variëren. De resultaten van de LTS-II studie maken het nu mogelijk om de onzekerheid in mogelijke drukdaling veel beter te bestuderen. Naast de onzekerheid in permeabiliteit is, in deze studie, ook de onzekerheid meegenomen van de hoeveelheid residueel gas in het water. Het meenemen van de onzekerheid van meerdere parameters heeft tot gevolg dat in de LTS-studie 58 reservoirrealisaties zijn gegenereerd die alle een goede “history match” hadden met de druk- en productiedata van het gasveld. Dat wil zeggen dat de passing van de modeldata met de gemeten data in de ondergrond voor alle 58 realisaties goed was. Het belangrijkste verschil tussen deze realisaties uitte zich door een ander verloop van de drukdaling in de watervoerende lagen. Door een vergelijk te maken van de uitkomsten voor het gecombineerde reservoir model en geomechanisch model met de gemeten geodetische data in het Pinkegat kombergingsgebied zijn er 3 realisaties geselecteerd uit de 58 beschikbare reservoirrealisaties (Figuur 4).

Het doel van de Meet- en regelcyclus is om een goede schatting te geven van de bodemdaling in de Waddenzee. Om deze reden is voor de basis realisatie voor Ameland een reservoirrealisatie gekozen met enige depletie in de watervoerende lagen om zorg te dragen voor een goede passing met de metingen in de Waddenzee. Deze is vergelijkbaar met de reservoirrealisatie die gebruikt is bij de vorige Meet- en regelcycli. De lage en hoge reservoirrealisaties zijn ook uit deze 58 realisaties geselecteerd en hebben respectievelijk weinig en veel depletie in de watervoerende lagen. De geselecteerde reservoirrealisaties zijn: M96 voor de basis realisatie, M102 voor de hoge realisatie en M9201 voor de lage realisatie. Voor een uitgebreide beschrijving van de totstandkoming van de keuze voor deze realisaties wordt verwezen naar Bijlage 4. Figuur 4 toont het drukverloop met de tijd voor een aantal punten in het model voor de lage, basis en hoge realisatie. Locatie 2 ligt in het gasvoerend gedeelte en daar is, zoals verwacht, de druk gelijk voor alle realisaties. Voor de overige locaties is duidelijk dat de lage realisatie de minste drukdaling geeft en de hoge realisatie de meeste drukdaling. Paragraaf 2.4 gaat in op de Monte Carlo berekeningen waarbij de geomechanische parameters zijn gevarieerd en waarmee, op basis van hiervan, bodemdalingsvoorspellingen zijn gemaakt.



*Figuur 4; gebruikte reservoirrealisaties voor Ameland (basis realisatie: M96, hoge realisatie: M102 en lage realisatie: M9201). De kleuren in de bovenste rij figuren geven de depletie aan het eind van de productieperiode weer; de lijnen in de onderste twee rijen geven de reservoirdruk op verschillende locaties in tijd weer.*



### 2.3.5 Gaswinningsprognose

De gaswinningsprognose blijft ongewijzigd ten opzichte van de M&R 2016 rapportage. 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
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 zijn inclusief de verwachte profielen van mogelijke toekomstige putten in Lauwersoog-Oost en Moddergat.

## 2.4 Modelling bodemdaling

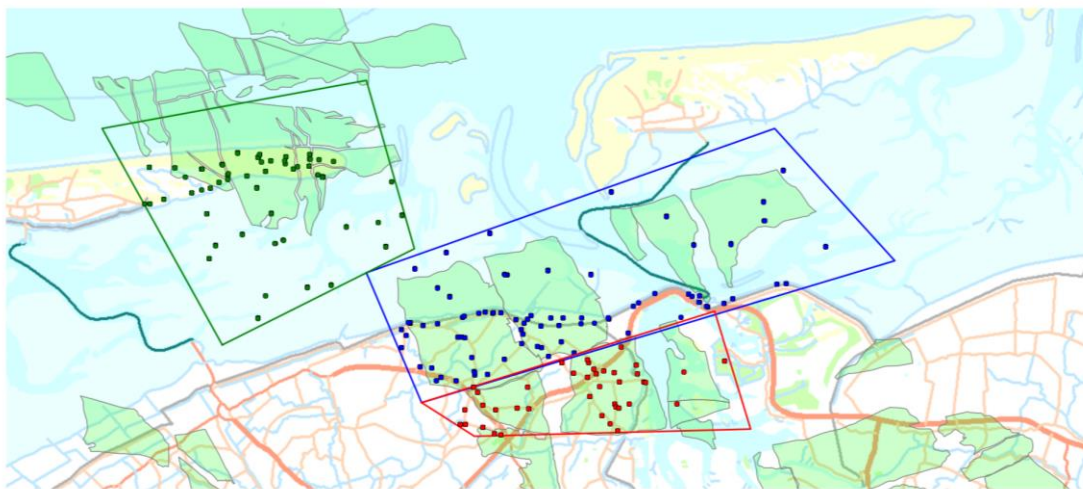
De bodemdalingsberekeningen werden tot en met het rapportagejaar 2016 uitgevoerd met het eindige elementen programma "Geomec", een Shell-applicatie die gebaseerd is op DIANA (<http://tnodiana.com>). In de LTS-II studie is aangetoond (Referentie 18) dat analytische modellen zeer goed overeenkomen met Geomec, met als grote voordeel dat deze analytische modellen een veel kortere rekentijd hebben met als bijkomend voordeel dat ze ook geschikt zijn om ook de compactie met het RTCiM (Rate type compaction model, Referentie 15) door te rekenen. Met het RTCiM kunnen alle compactiemodellen beschreven worden die in vorige edities van de M&R-rapportage zijn gebruikt en het is daarmee het meest flexibele model dat gebruikt kan worden om een passing te zoeken tussen geodetische metingen en geomechanische modellen.

De bodemdalingsberekeningen zijn op dezelfde wijze uitgevoerd als in de LTS-II studie. (Referentie 18). Het RTCiM model is uitgebreid met een extra deel dat het geomechanisch gedrag beschrijft op het moment dat het gasreservoir en/of watervoerende pakket zich in een staat van overdruk bevindt. Overdruk is hier gedefinieerd als een vloeistof- of gasdruk hoger dan de hydrostatische druk volgens een gradiënt van 0,11 bar/m. Op het moment de drukdaling het niveau van de hydrostatische druk bereikt zal de compactie zich gedragen volgens het reguliere RTCiM model (Referentie 15). De kruip van het zout boven het compacterende reservoir is gesimuleerd door de toepassing van een "bewegend" rigid basement proxy (Referentie 19), gekalibreerd aan de Geomec parameters.

De modelering in de LTS-II studie betrof alleen het Ameland veld waarbij vele reservoirrealisaties werden gebruikt. In deze M&R-studie zijn alle velden (Ameland, de Anjum en de Wadden voorkomens) met de LTS-II methode doorgerekend waarbij voor elk veld 3 reservoirrealisaties gebruikt zijn (laag, basis en hoog).

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

Bij het vinden en opstellen van de drie bodemdalingsscenario's om de onzekerheid in de modellering aan te geven, wordt gebruik gemaakt van drie kalibratiegebieden, nl. Ameland, Anjum en Waddenzee (Figuur 5) waar per kalibratiegebied de geomechanische parameters apart worden bepaald. In de vorige Meet- en regelcycli waren er slechts twee gebieden, Ameland en Anjum, waarbij de Waddenzee velden tezamen met het "Anjum" gebied gekalibreerd werd. In de huidige rapportage is uitbreiding naar drie separate kalibratiegebieden mogelijk, omdat boven de Waddenzeevelden inmiddels voldoende bodemdalingmetingen zijn uitgevoerd en er ook voldoende drukdaling heeft plaatsgevonden.



Figuur 5; Kalibratiegebieden met gebruikte geodetische metingen.

Het geomechanische model omvat de drie gebieden als geheel zodat ook de overlappende bodemdalingsschakels goed in de kalibratie worden meegenomen. Bij de kalibratie van het bodemdalingssmodel, worden drie RMS-waarden berekend: 1 per kalibratiegebied (zie hieronder). Hoewel elke RMS enigszins wordt beïnvloed door de bodemdaling van een aangrenzend gebied, vindt de beïnvloeding slechts plaats in een klein gebied en heeft dit geen significante invloed. De RMS wordt met name bepaald door de meest dalende punten boven het centrum van de velden.

#### Keuze van de reservoirrealisaties

- Het lage bodemdalingsscenario is gebaseerd op de reservoirrealisaties met een immobiel aquifer voor de Wadden, Ameland en Anjum velden, In dit scenario dalen de laterale watervoerende lagen (specifiek voor Ameland) weinig in druk.
- Het basis bodemdalingsscenario gaat uit van de basisrealisaties voor de Wadden en Anjum velden. Voor het Ameland is een keuze gemaakt uit de 58 beschikbare LTS-II realisaties waarbij een aangepaste LTS-II methode is gebruikt om de realisatie te kiezen die het best past bij de metingen in de Waddenzee (Zie bijlage 4). Reservoirrealisatie M96 is gekozen als basisrealisatie. De combinatie van deze realisatie met de bodemdaling, veroorzaakt door het Nes en Moddergat gasveld, laat een goede passing zien op de meetpunten in de Waddenzee tussen Ameland en Nes. Deze realisatie ligt dicht bij de M&R 2016 basis reservoirrealisatie.

- Eenzelfde redenering geldt voor het hoge scenario. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de reservoirrealisaties die uitgaan van een mobiel aquifer, dus de realisaties waarbij de aquifers het meest in druk dalen. Hierbij geldt één uitzondering: voor Metslawier is de basisrealisatie gebruikt. Het is gebleken dat het hoge drukdalingsscenario van Metslawier in alle gevallen (dwz binnen het bereik van de a priori geomechanische parameterset) leidt tot een significante overschatting van de gemeten bodemdaling. Voor Ameland wordt wederom op basis van de LTS-II realisaties, een reservoirrealisatie gekozen die goed past bij de meetpunten in de Waddenzee maar nu met de (niet waarschijnlijke) aanname dat de meetpunten niet beïnvloed worden door mogelijke daling vanuit het Nes- en Moddergat gasveld.

### Selectie van de geomechanische parameters op basis van de confrontatie met de gemeten data

De geomechanische parameters voor het laag, basis en hoog bodemdalingsscenario zijn bepaald middels een Monte Carlo analyse. Hierbij is de a priori geomechanische onzekerheidsruimte begrensd door gekozen realistische waarden (zie Referentie 18 voor verdere uitleg over de gekozen ranges). Als voorbeeld: de gebruikte compressibiliteit waarden ( $C_m$  waarden) in de analytische berekeningen passen in alle scenario's binnen de bandbreedte van de gemeten waarden op basis van experimenten gedaan op gesteentekernen.

Voor de bepaling hoe goed de mogelijke scenario's bij de metingen passen wordt de root mean square (RMS) waarde gebruikt. Deze methode is vergelijkbaar met de  $\chi^2$  methode in de LTS-studie, echter in de RMS-berekening is geen Variantie-Covariantie matrix van de metingen (een maat voor de onzekerheid) gebruikt omdat deze niet beschikbaar was voor de metingen boven de Wadden en Anjum velden.

Het basisscenario wordt in eerste instantie bepaald door het model met de geomechanische parameterwaarden die de laagste RMS-waarde geeft en daarmee zo goed mogelijk bij de gemeten bodemdaling past. Omdat het belangrijk is dat de bodemdalingssnelheid in het model klopt met de continue GPS-metingen is een kleine correctie van de  $C_{mref}$  (<10%) toegepast voor een zo goed mogelijke passing van het model met deze meetpunten.

Voor de lage en hoge reservoirrealisaties is niet gekozen voor de laagste RMS-waarde, immers, in de Monte Carlo procedure zal in dat geval de parameterwaarden worden geselecteerd die het beste bij de geodetische metingen passen. In het geval van meer drukdaling in de hoge reservoirrealisaties zal dit leiden tot een verlaging voor bv de  $C_m$  waarde om een goede passing te verkrijgen. Daarom wordt in het hoge scenario vooral gekeken naar de bodemdalingssnelheid tussen 2009 en nu, waarbij dusdanige waarden zijn gekozen in het geomechanische model zodat deze, in bijna alle gebieden, de gemeten daling zal overschatten.

Op basis van bovenstaande redenering zijn parameterwaarden geselecteerd voor de drie scenario's (zie Tabel 2-6). De  $C_{mref}$ ,  $C_{md}$  en  $b$  zijn RTCiM parameters en de  $C/k$  (0),  $d(c/k)$  en  $T_{salt}$  parameters zijn bepalend voor het zoutgedrag boven het compacterend reservoir of aquifer.

De  $C_{mref}$  en  $C_{md}$  zijn vermenigvuldigingsfactoren op de relatie tussen de coreplug  $C_m$  metingen met de porositeit<sup>2</sup>. De waarden voor de  $C_{mref}$  voor Ameland liggen binnen de bandbreedte van de gemeten  $C_m$  waarden, maar zijn duidelijk hoger dan de berekende waarden in Anjum en de Waddenzee. Deze waarden liggen dicht bij de gemiddelde  $C_m$  – porositeitsrelatie. Dit opnieuw waargenomen verschil in waarden voor de passende  $C_m$  tussen Ameland en de overige gasvelden bestaat al sinds de start van de M&R-rapportages.

<sup>2</sup> De gebruikte porositeit ( $\Phi$ ) -  $C_m$  relatie is  $C_m = 273 \Phi^3 - 68,72 \Phi^2 + 9,85 \Phi + 0,21$  waarbij de  $C_m$  in  $10^{-5} \text{ bar}^{-1}$  is en de porositeit ( $\Phi$ ) in [-].

Voor de beschrijving van het zoutgedrag liggen de waarden voor  $C/k(0)$ ,  $d(c/k)$  en  $T_{\text{salt}}$  dicht bij elkaar en komen goed overeen met vergelijkbare parameterwaarden die in de vorige M&R-cycli in Geomec zijn gebruikt.

Voor een verdere beschrijving van de RTCiM- en zoutparameters wordt verwezen naar Referentie 18.

Tabel 2-6; gebruikte geomechanische parameters voor het laag, basis en hoge bodemdalingsscenario

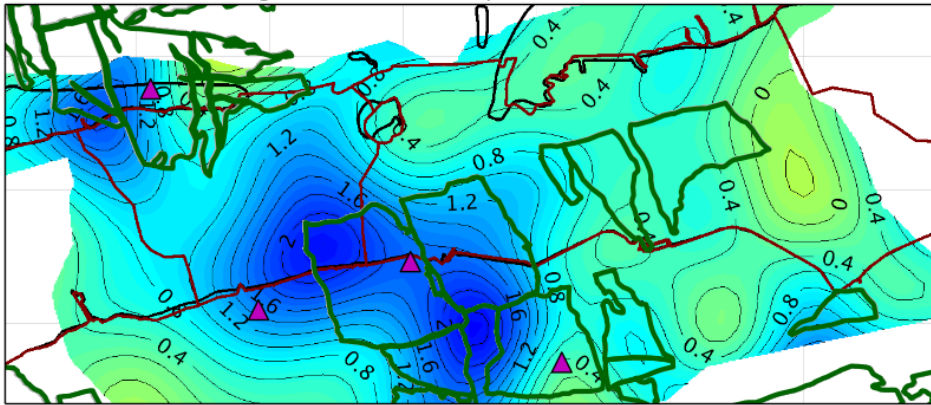
<b>RTCiM</b>	Ameland	Anjum	Waddenzee
$C_{\text{mref}}$ (factor)	2,8 – 2,85 – 2,93	1,00 – 1,37 – 1,23	0,95 – 0,99 – 1,26
$C_{\text{md}}$ (factor)	0,49 – 0,48 – 0,39	0,26 – 0,44 – 0,41	0,2 – 0,24 – 0,27
b	0,02 – 0,027 – 0,024	0,017 – 0,022 – 0,026	0,022 – 0,016 – 0,014
<b>Zoutgedrag</b>			
$C/k(0)$	0,81 – 0,85 – 0,85	0,81 – 0,79 – 0,8	0,8 – 0,75 – 0,79
$d(c/k)$	0,21 – 0,22 – 0,23	0,2 – 0,22 – 0,2	0,2 – 0,2 – 0,21
$T_{\text{salt}}$	7,2 – 18,4 – 27,1	7,4 – 22,5 – 22,5	7,6 – 21,2 – 13,3

#### 2.4.2 Vergelijking van het de bodemdalingsscenario's met het geodetisch model

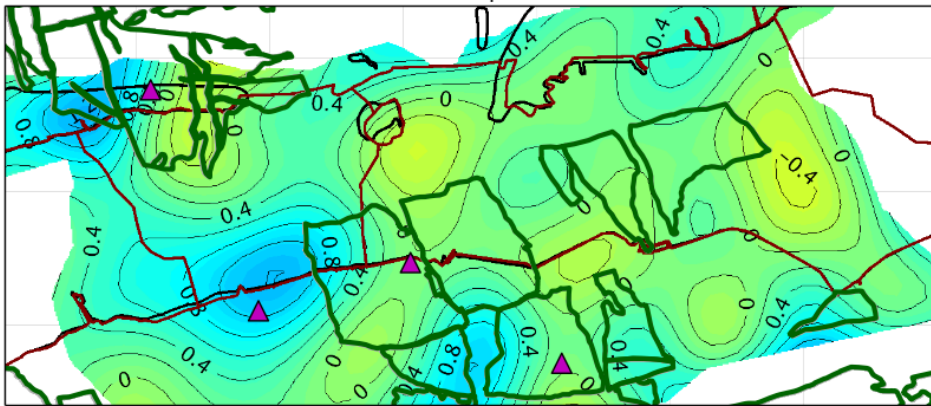
Omdat juist de bodemdalingssnelheid in de Waddenzee belangrijk is voor de gebruiksruimte is vooral gekeken naar de passing van het model aan de metingen in de Waddenzee. Het vergelijk met de metingen is in deze rapportage gevisualiseerd met behulp van een geodetisch model (paragraaf 0). De verschillen tussen het geomechanische model en het geodetisch model op basis van de metingen kunnen ook weer worden gevisualiseerd als een oppervlak welke zijn weergegeven in Figuur 6.

Uit dit figuur blijkt dat het basisscenario het best past met de gemeten bodemdaling voor de periode 2009-2017. Voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag zijn de verschillen met het geodetische model nagenoeg 0 cm. De verschillen in het Pinkegat kombergingsgebied zijn iets groter, tot ongeveer 1 cm, maar er zijn zowel gebieden waar de bodemdaling wordt overschat en gebieden waar de bodemdaling wordt onderschat, waarmee netto gezien het gemodelleerde bodemdalingvolume past bij het gemeten volume.

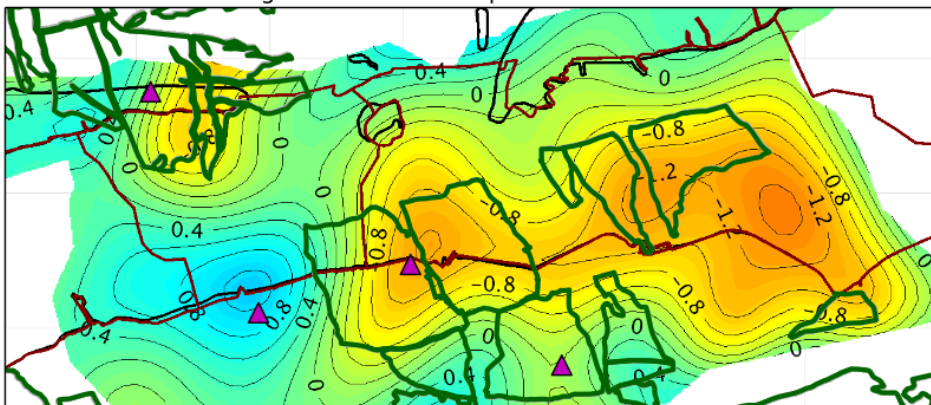
Laag scenario voor de periode 2009 - 2017



Basis scenario voor de periode 2009 - 2017



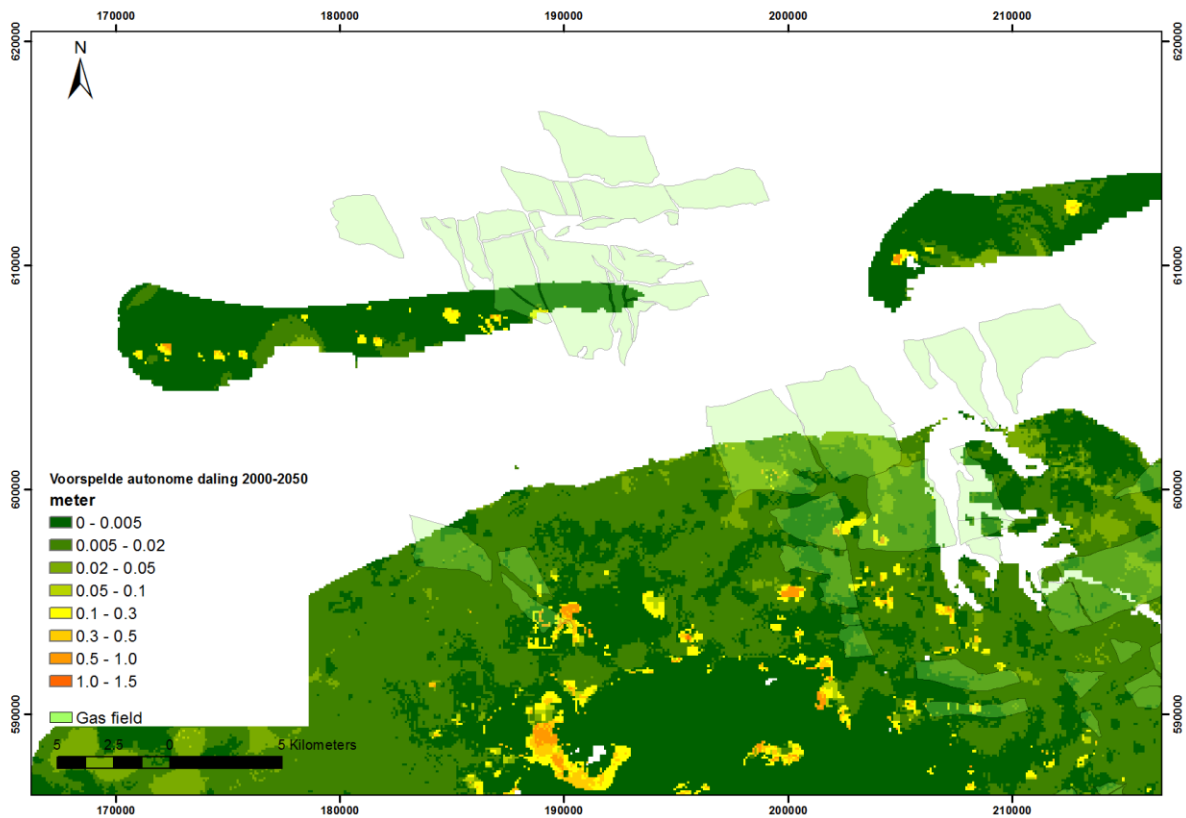
Hoog scenario voor de periode 2009 - 2017



Figuur 6; Verschil (cm) van de gemodelleerde bodemdaling van het laag (bovenste figuur), basis (middelste figuur) en hoog scenario (onderste figuur) met het geodetische model voor de periode 2009-2017. In de blauwe gebieden met positieve afwijkingen is de gemeten bodemdaling groter dan de gemodelleerde; in de rode gebieden met negatieve afwijkingen is meer bodemdaling gemodelleerd dan gemeten. De driehoeken geven de locaties van de continue GPS-stations aan.

Verschillen tussen de gemeten en gemodelleerde daling zijn te zien boven het Ameland eiland en boven de zeedijk in het noorden van Friesland. Verschillende oorzaken kunnen ten grondslag liggen aan deze kleine verschillen zoals:

1. Bodemdaling door natuurlijke processen; naast de bodemdaling ten gevolge van gas- of oliewinning zijn er ook andere oorzaken die leiden tot bodemdaling, samengevat onder de term autonome bodemdaling. Dit kan natuurlijke bodemdaling zijn of bodemdaling door drainage van veen- en kleigebieden. Veenoxidatie en veen/klei inklinking zijn de twee meest voorkomende oorzaken van autonome bodemdaling. De mate van autonome daling kan worden bepaald aan de hand van metingen en/of modelvoorspellingen. In deze modellen wordt oxidatie en inklinking berekend waarbij gebruik wordt gemaakt van laboratoriumgegevens en het voorkomen van bepaalde grondsoorten in de ondiepe ondergrond. Tegelijkertijd worden deze modellen gevalideerd en gekalibreerd door bodemdalingsmetingen. Voorspellingen van autonome bodemdaling gaan uit van bepaalde grondwaterscenario's. Dit zijn aannames over het toekomstig waterpeilbeheer door de waterschappen. Figuur 7 toont een voorspelling voor de autonome daling in het betreffende gebied voor de periode 2000-2050 (Referentie 20 en Referentie 21). De voorspelling geeft een eerste orde schatting van de autonome daling wanneer het grondwaterpeil meebeweegt met de bodemdaling in deze periode. Voor het Waddenzeegebied zijn deze berekeningen niet uitgevoerd. Voor Ameland en Noord Friesland kan worden geconcludeerd dat er lokaal significante autonome bodemdaling voorkomt. Deze mogelijke autonome bodemdaling wordt niet door de modellen meegenomen of voor gecorrigeerd in de metingen, waarmee de modelresultaten conservatief genoemd kunnen worden.
2. Imperfecties in de diepe ondergrondmodellen; ieder model van de ondergrond is een vereenvoudiging van de werkelijkheid waarbij de bodemdalingsvoorspelling uiteindelijk berekend wordt via een keten van modellen. De schakels van deze keten bestaan uit een geologisch model van de ondergrond, het reservoir model en als laatste het geomechanisch model. In al deze modellen bestaat een onzekerheid over de heterogeniteit van de invoergegevens en de benadering van het werkelijk fysisch gedrag. Aan deze onzekerheden is zoveel als mogelijk gehoor gegeven in de LTS-II studie, maar ook deze studie toonde aan dat niet ieder klein verschil verklaard kan worden.

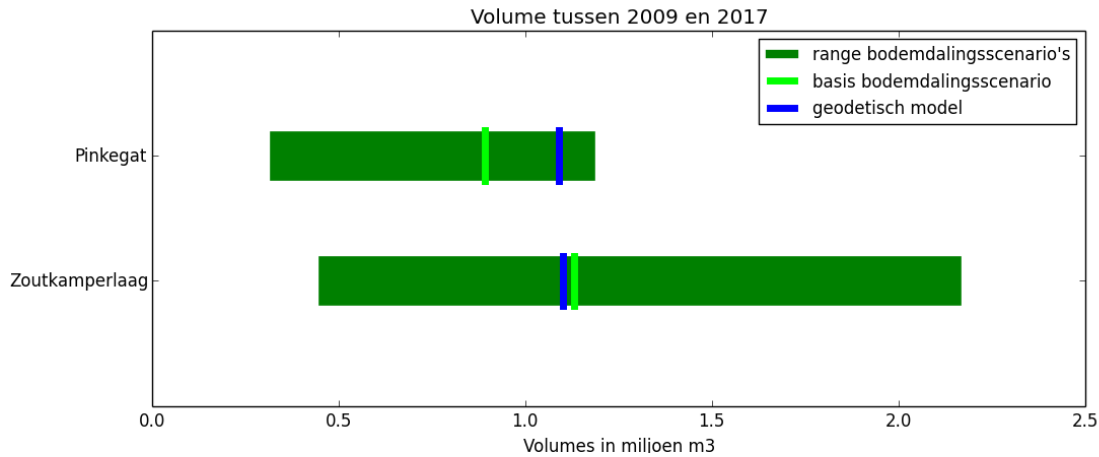


*Figuur 7; Maaiveld daling (m) over een periode van 50 jaar bij handhaving van huidige drooglegging bij huidig klimaat. De waarden op deze kaart geven slechts een eerste orde schatting van de mogelijke autonome daling. NB de kaart heeft een witte ondergrond voor het Waddenzegeebied omdat voor dit gebied geen modeluitkomsten zijn gegenereerd.*

Het hoge en lage scenario in Figuur 6 laten duidelijk zien dat de gemeten bodemdaling volgens het geodetische model wordt overschat door de gemodelleerde daling in het hoge scenario en onderschat in het lage scenario.

Met het geodetisch model is ook het bodemdalingsvolume berekend voor de periode tussen 1/1/2009 en 1/1/2017. Dit volume is vergeleken met de uitkomsten voor het lage, basis en hoge bodemdalingsscenario (Figuur 8). Dit figuur laat zien dat het bodemdalingsvolume in de kombergingen zoals berekend is met het geodetisch model (blauw) altijd tussen het laag en hoog bodemdalingsscenario (groene bar) zit. Het M&R 2017 basisscenario wordt aangegeven door de lichtgroene lijn. De mogelijke redenen dat het geodetisch model meer bodemdalingsvolume berekent dan het basis bodemdalingsscenario worden uitgelegd in de vorige paragraaf.





Figuur 8; Vergelijking van de bodemdalingsvolumes voor de verschillende modellen en scenario's, De groene balk geeft het volume tussen het laag en hoog scenario aan volgens de geomechanische modellering, waarbij de lichtgroene lijn het basis scenario aangeeft. Het geodetische model wordt door de blauwe lijn aangegeven.

### **Bodemdalingsmodellen voor Ameland (inclusief LTS-II)**

Het Ameland veld kent een lange historie van bodemdalingsvoorspellingen die sterk varieerden in de tijd. Deze variatie had twee oorzaken:

1. De  $C_m$  waarde is in het begin van de productie (tot 2003) onderschat. Deze onderschatting was met name ingegeven door de kernmetingen die lagere  $C_m$  waarden aangaven dan, wat later bleek, nodig in latere kalibraties;
2. De gedachten over de mobiliteit van de aquifers varieerden in de tijd. Gedurende de eerste jaren van productie werd rekening gehouden met een volledig mobiel aquifer terwijl de gemeten smalle bodemdalingsskom juist erop wees dat de mobiliteit van de aquifer en daarmee gepaarde drukkaling waarschijnlijk gering was.

De metingen na 2011 laten echter bodemdaling ten zuidwesten en zuidoosten van het gasveld zien, waarvoor de meest waarschijnlijke verklaring beperkte drukkaling in de aquifer onder deze meetpunten is.

De LTS-II studie laat zien dat het best passende geomechanische model gebaseerd is op een reservoirrealisatie waarbij weinig tot geen aquiferdepletie plaatsvindt. De reden waarom de LTS-confrontatie methode naar deze oplossing convergeert wordt voornamelijk veroorzaakt door de geodetische metingen boven de oostkant van Ameland eiland. Sinds de start van de winning wordt de gemeten bodemdaling in dit gebied overschat door de geomechanische modellen. Zelfs in het geval dat er geen drukkaling kan plaatsvinden in de aquifers zal de bodemdaling nog steeds overschat worden. Het toelaten van drukkaling in de aquifers ten zuidoosten van het gasveld zal ervoor zorgen dat de bodemdalingsskom wijder wordt en daarmee de gemeten bodemdaling in de oostkant van het eiland nog meer wordt overschat. Omdat de LTS-II confrontatie streeft naar een zo klein mogelijk totaalverschil tussen metingen en model zal de methode juist die reservoirscenario's selecteren die deze overschatting beperkt houden en dit zijn de realisaties zonder drukkaling in de aquifers van Ameland.

### **2.4.3 Bodemdaling GPS-locaties op Ameland, Moddergat, Anjum, Ternaard en Ameland Nes**

Figuur 9, Figuur 10, Figuur 11, Figuur 12 en Figuur 13 geven de geprognoseerde daling tot en met 2018 plus de gemeten daling vanaf begin 2007 op de continue GPS-locaties grafisch weer. Volgens het M&R-protocol (Referentie 3) dient de continue GPS-meting als signaal om een nieuwe



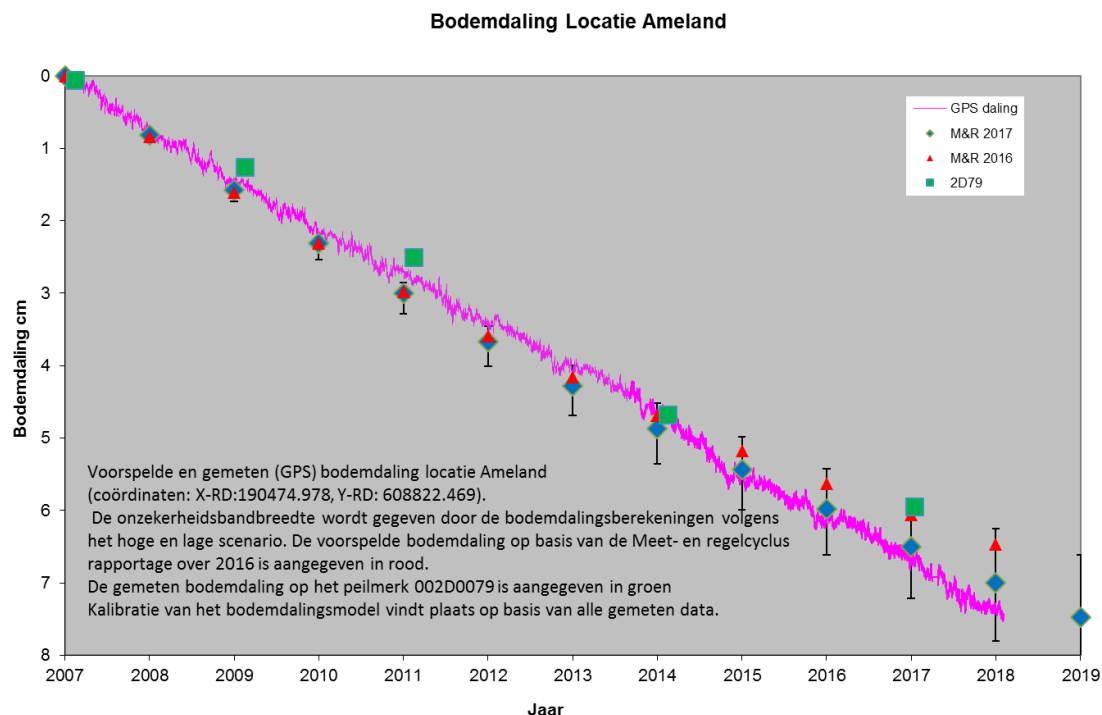
vlakdekkende meting uit te voeren als de GPS-meting een significant hogere bodemdaling aangeeft dan de prognose. Uit de vergelijkingen valt waar te nemen dat dit niet het geval is.

Ten opzichte van de M&R 2016 rapportage valt op dat de passing van het model met de GPS-stations op Anjum, Ameland en Moddergat is verbeterd. Tevens valt in Figuur 9 waar te nemen dat de laatste waterpasmetingen uit februari 2017 op punt 002D0079, dicht bij de GPS-antenne, een mindere daling geeft dan de gemeten daling volgens de GPS. Deze GPS-meting ligt echter binnen de onzekerheidsbandbreedte van de waterpasmetingen.

De onzekerheidsbandbreedte voor het Moddergat GPS-station is groter dan voor de overige GPS-punten (Figuur 10). De grotere onzekerheid voor dit GPS-punt wordt veroorzaakt door relatief grote verschillen in reservoirdepletie tussen het immobiele en mobiele aquifer voor het Nes en Moddergat veld. Het lage en hoge scenario zijn gekalibreerd voor respectievelijk een lage en hoge bodemdalingssnelheid, waardoor deze bandbreedte groter wordt, waarmee automatisch de grotere onzekerheid in drukdaling zichtbaar wordt in de bodemdaling(snelheid).

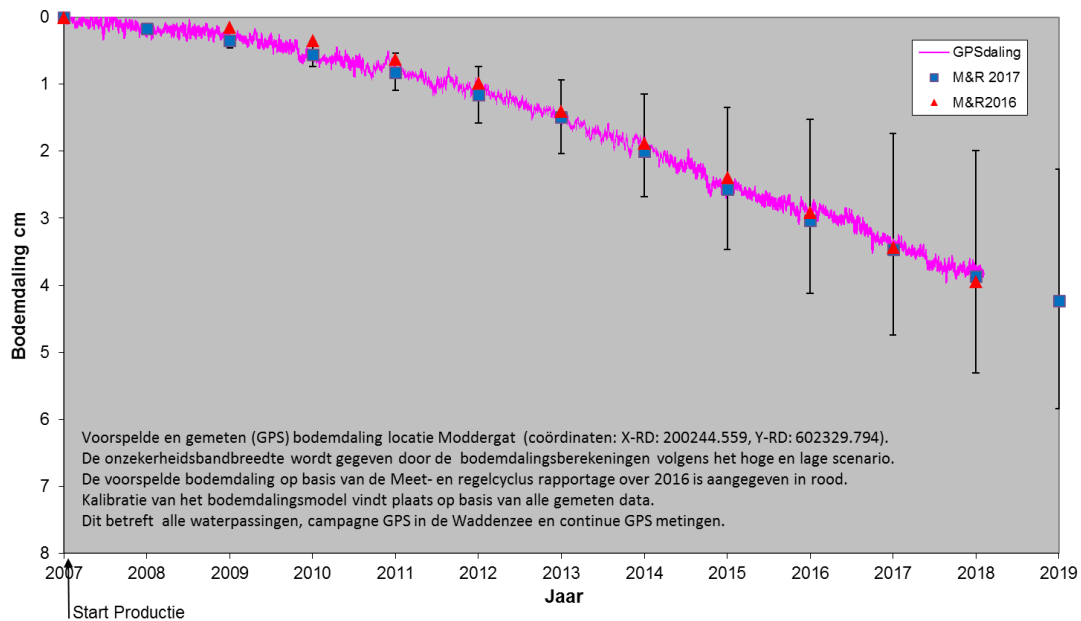
Voor het Ameland GPS-station is deze bandbreedte minder groot omdat dit GPS station zich boven het gasvoerend gedeelte van het veld bevindt en de invloed van de depletie van het aquifer hier waar minder onzekerheid heerst over de mogelijke drukdaling. Voor het Anjum GPS-station is hetzelfde beeld te zien. Dit veld produceert langer dan Nes en Moddergat en het reservoirmodel is dus beter begrensd door metingen, waardoor er minder verschillen in depletie zijn tussen het lage en hoge scenario met als gevolg een kleine onzekerheidsbandbreedte.

De GPS-stations Ameland Nes en Ternaard liggen verder weg van de velden en mogelijke depleterende aquifers waardoor de bandbreedte gering is in deze punten.



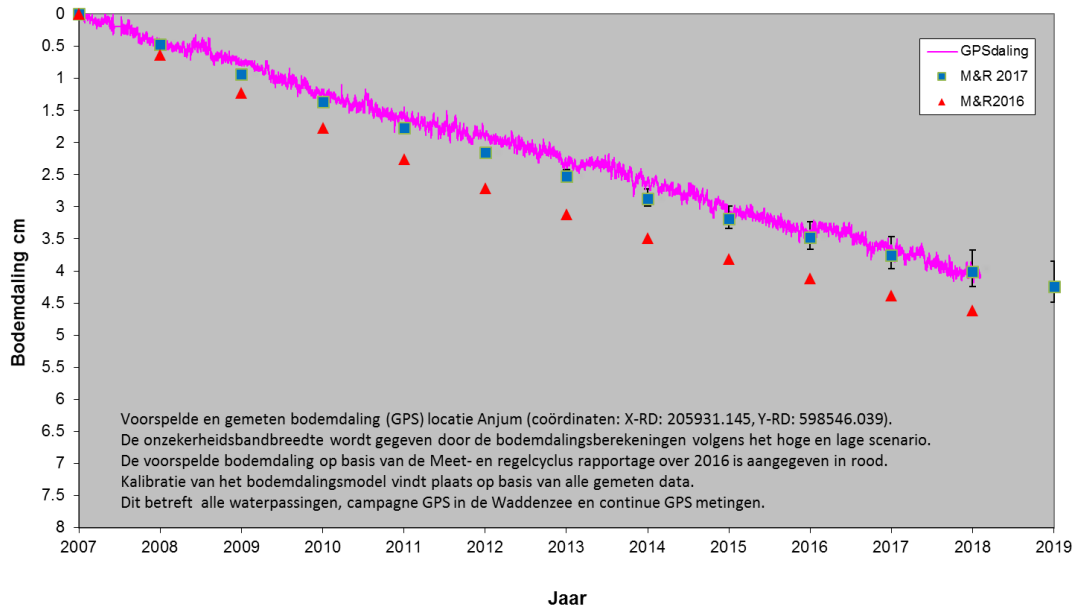
*Figuur 9; Voorspelde en gemeten (GPS) bodemdaling locatie Ameland (coördinaten: X-RD:190474.978, Y-RD: 608822.469). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2016 is aangegeven in rood. In groen is de gemeten bodemdaling op peilmerk 002D0079 (dichtbij het GPS-punt) middels waterpassing aangegeven.*

### Bodemdaling op Locatie Moddergat



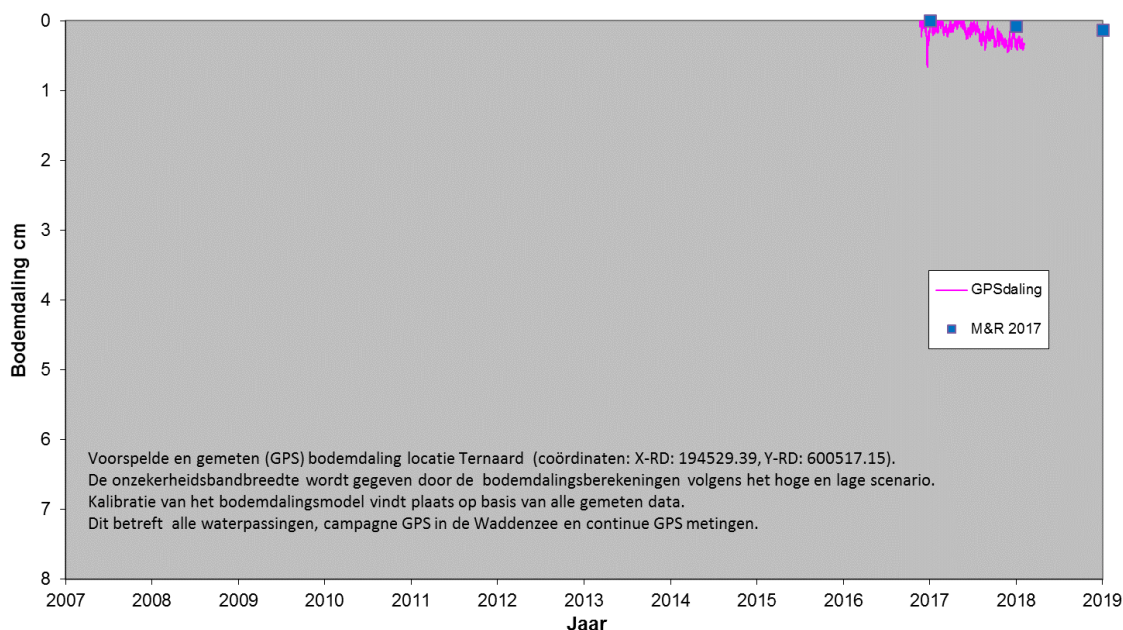
Figuur 10; Voorspelde en gemeten (GPS) bodemdaling locatie Moddergat (coördinaten: X-RD: 200244.559, Y-RD: 602329.794). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingsberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2016 is aangegeven in rood.

### Bodemdaling op Locatie Anjum



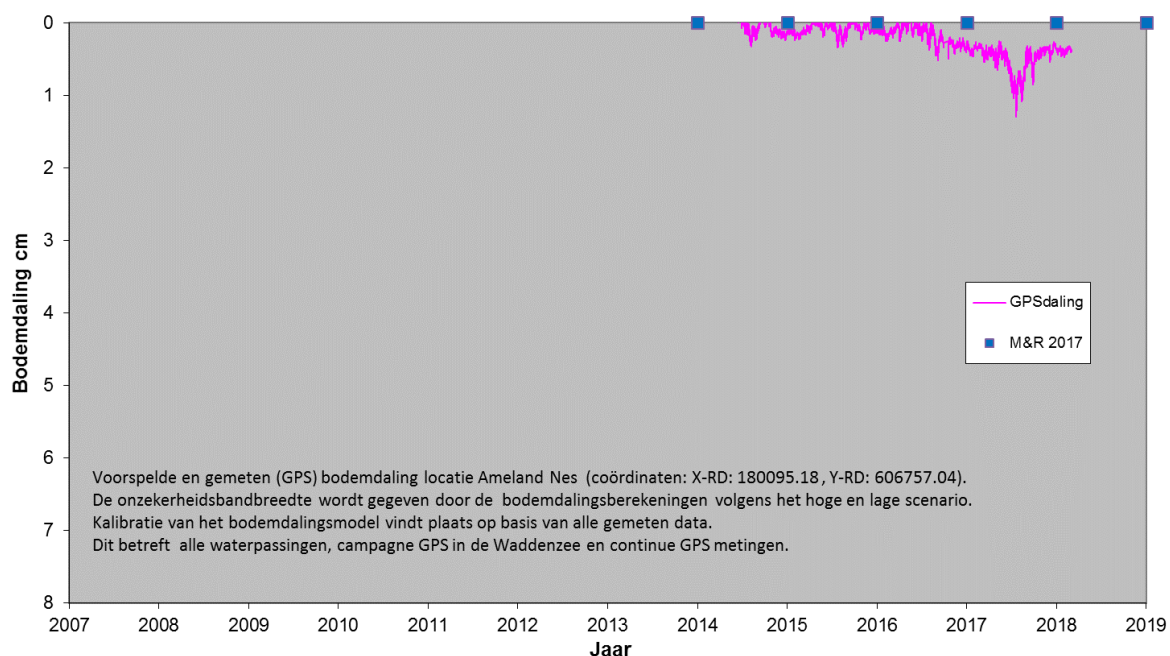
Figuur 11; Voorspelde en gemeten bodemdaling (GPS) locatie Anjum (coördinaten: X-RD: 205931.145, Y-RD: 598546.039). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingsberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2016 is aangegeven in rood.

### Bodemdaling op Locatie Ternaard



Figuur 12; Voorspelde en gemeten bodemdaling (GPS) locatie Ternaard (coördinaten: X-RD: 194529.39, Y-RD: 600517.15). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingsberekeningen volgens het hoge en lage scenario. Alle scenario's geven nauwelijks bodemdaling op dit punt waardoor de onzekerheidsbandbreedte zeer gering is.

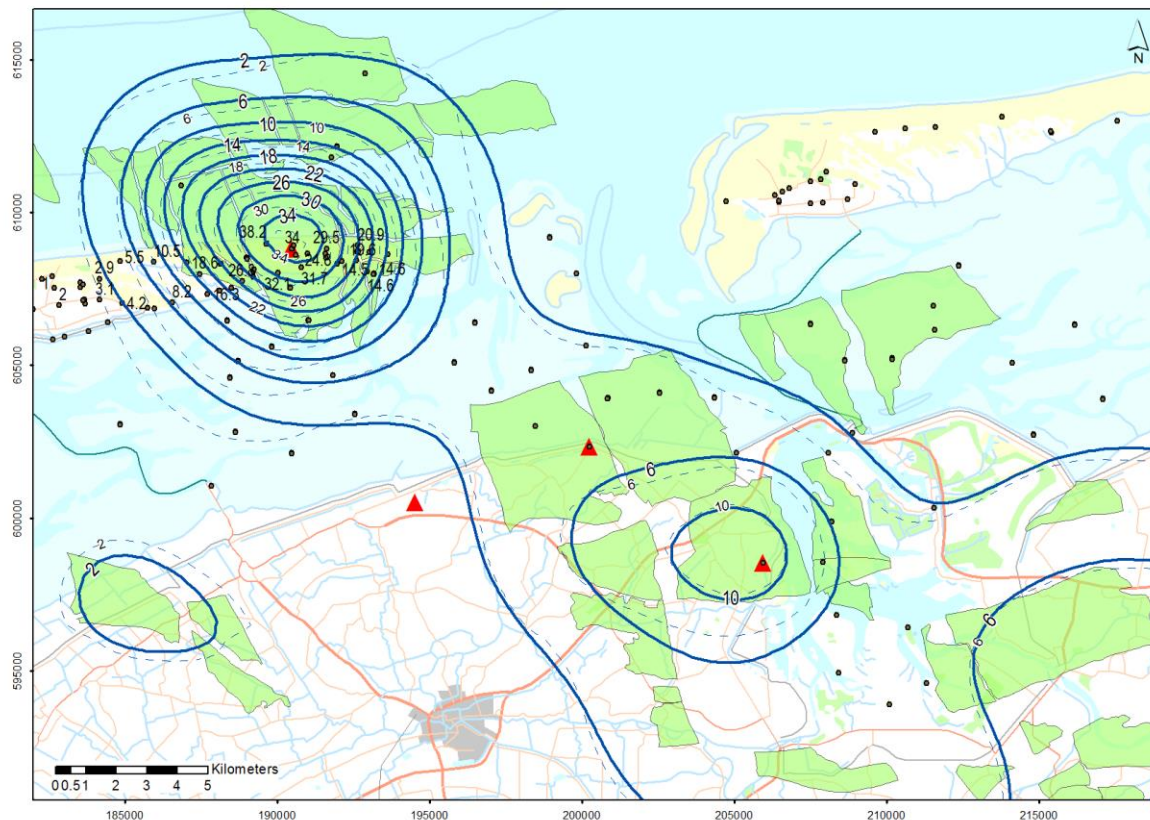
### Bodemdaling op Locatie Ameland Nes



Figuur 13; Voorspelde en gemeten bodemdaling (GPS) locatie Ameland Nes (coördinaten: X-RD: 180095.18, Y-RD: 606757.04). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingsberekeningen volgens het hoge en lage scenario. Alle scenario's geven nauwelijks bodemdaling op dit punt waardoor de onzekerheidsbandbreedte zeer gering is.

#### 2.4.4 Vergelijking van de gemodelleerde bodemdaling met de overige geodetische metingen

Naast een vergelijking van de resultaten van het geomechanisch model met het geodetisch model en de continue GPS-metingen, wordt ook een vergelijking van het model (volgens het basisscenario) met de waterpassingsmetingen en de campagne GPS-metingen getoond in Figuur 14. De modelcontouren worden per jaar berekend op de eerste dag van elk jaar. De contouren zijn gepresenteerd voor 1-1-2017 omdat deze datum het beste overeenkomt met het tijdstip van de waterpassmetingen op Ameland die in februari 2017 zijn uitgevoerd. De contouren, volgens de doorgetrokken blauwe lijnen, geven de bodemdaling weer die is gemodelleerd met de vernieuwde modellen en parameterwaarden. Ter vergelijking zijn de contouren (onderbroken lijn) weergegeven die het berekende resultaat weergeven voor het jaar 2016 zoals gerapporteerd in de Meet- en regelrapportage van 2016 (M&R 2016, Referentie 7). Zoals verwacht is de bodemdaling in 2017 over het algemeen iets wijder, behalve in het gebied ten zuidwesten van het Ameland gasveld. Gedurende de LTS-II studie kwam naar voren dat het M&R 2016 bodemdalingsmodel de bodemdaling in dit gebied overschat door de aanname van veel drukkaling in de aquifer ten zuidwesten van het gasveld. De toepassing van de LTS-II werkwijze en met name het beschikbaar hebben van meer reservoirrealisaties heeft ervoor gezorgd dat de passing met de gemeten data in dit gebied nu beter is (zie ook Figuur 6).

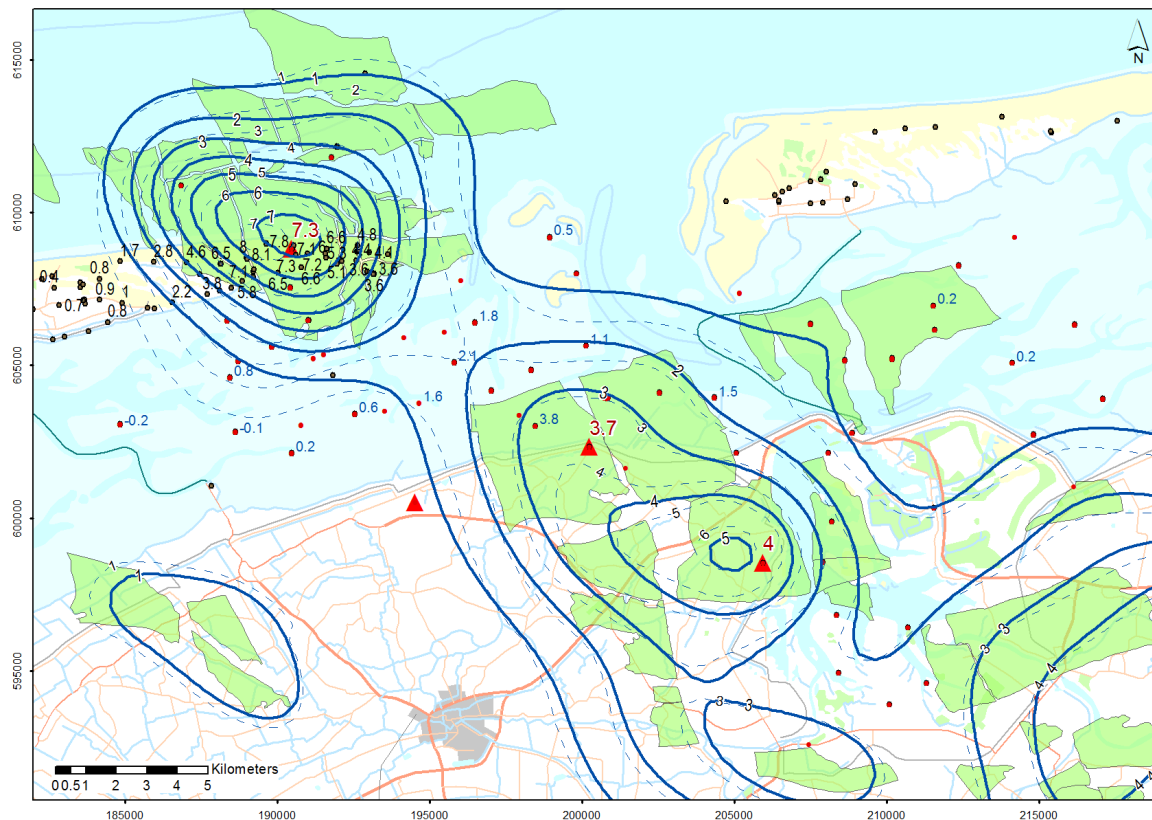


*Figuur 14; Totale bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2017) door gaswinning sinds de start van de Ameland en Anjum productie. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling (gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2017 volgens de M&R-rapportage over 2016). De punten met label representeren de peilmerken met de gemeten hoogteverschillen tussen juni 1986 en januari 2017. Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 4 posities continue GPS-metingen uitgevoerd sinds 2007 (rode driehoek).*

Figuur 15 toont de gemeten en gemodelleerde daling in 2017 sinds de nulmetingen in de waddensee in 2006. De contouren zijn gepresenteerd voor 1-1-2017 omdat dit tijdstip gemiddeld 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 2016 zoals gepresenteerd in het M&R 2016 rapport weer.



Figuur 15; Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2017) door gaswinning sinds de nulmeting in de Waddenzee in 2006. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens de aangepaste/gekalibreerde geomechanische modellen (gestreepte contouren geven de bodemdaling van 2016 weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2016). De punten met label in de Waddenzee representeren de peilmerken met de gemeten hoogteverschillen vanaf 2006 (nulmeting Waddenzee) tot de laatst uitgevoerde meting in mei 2017. De gemeten hoogteverschillen op het eiland Ameland geven de hoogteverschillen tussen 01-2006 en 01-2017 aan. De rode waarden geven de daling aan van de permanente GPS-stations in de periode feb. 2007- jan. 2018. Er is geen bodemdaling aangegeven voor het Ternaard GPS-station omdat deze nog niet in bedrijf was in 2006.

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

#### 2.4.5 Belangrijkste overeenkomsten en verschillen tussen de M&R 2016 en M&R 2017 bodemdalingsmodellen

Hieronder volgt een beschrijving van de belangrijkste overeenkomsten en veranderingen die aangebracht zijn in de huidige M&R 2017 rapportage en die een gevolg hebben op de resultaten voor de bodemdalingberekeningen.

- De gebruikte reservoirrealisaties voor de Anjum en Waddenzee velden zijn gelijk aan de realisaties die gebruikt zijn in de M&R 2016
- De reservoirrealisaties voor Ameland zijn geselecteerd uit de LTS-II studie. De basis reservoirrealisatie is vergelijkbaar met het M&R 2016 model. De hoge en lage realisaties tonen respectievelijk meer en minder depletie in de watervoerende lagen dan de M&R 2016 hoge en lage realisaties.

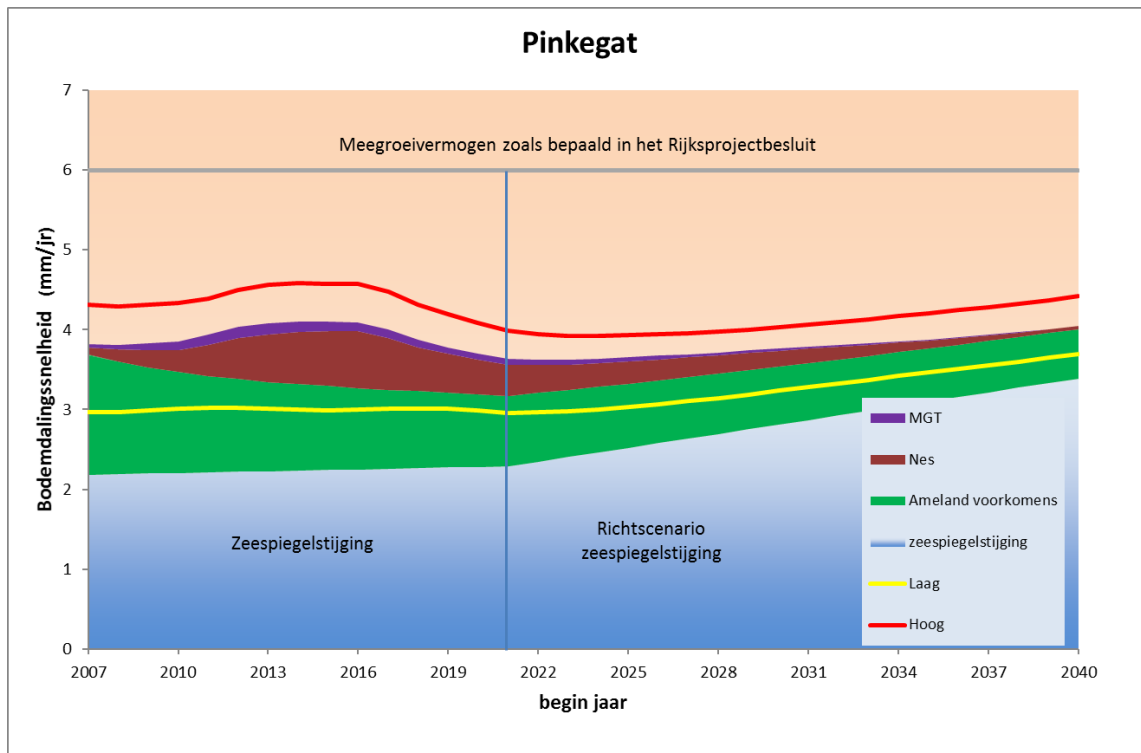
- Er wordt nu gebruik gemaakt van dezelfde bodemdalingsmodellering zoals gebruikt in de LTS-II studie.
- De resultaten van de modellering liggen dicht bij de resultaten zoals gerapporteerd in de M&R 2016 rapportage.
- De passing met de gemeten bodemdaling in het gebied boven de zuidwestelijke aquifer van Ameland is verbeterd door de toepassing van de in LTS-II gebruikte modellen voor de ondergrond. Dit zorgt ervoor dat de bodemdalingssnelheid in Pinkegat is afgenomen t.o.v. de Meet- en regelcyclusrapportage over 2016.

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

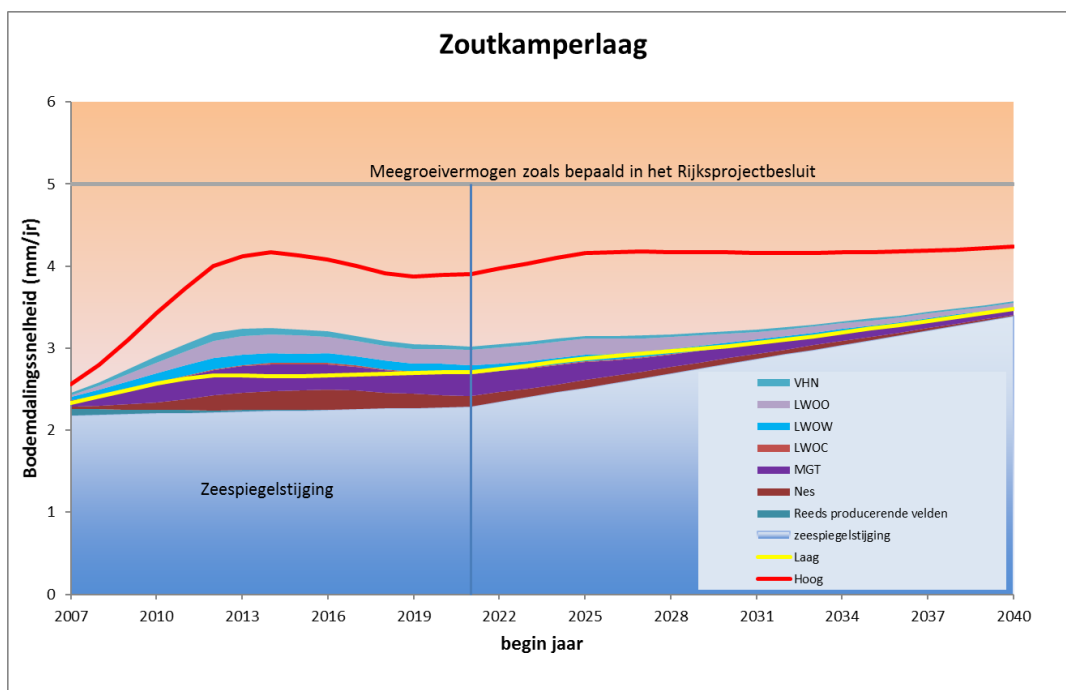
### 2.5.1 Bepaling volume en gemiddelde daling

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 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 is respectievelijk getoond in Figuur 18 en Figuur 19. Voor het basis scenario is onderscheid gemaakt in de bijdrage van de individuele voorkomens d.m.v. de gekleurde vlakken. Figuur 16 en Figuur 17 tonen de belasting ten gevolge van de depletie voor de hoge en lage scenario's (rode en gele lijnen) zoals bepaald uit de onzekerheidsanalyse.



Figuur 16; Belasting in Pinkegat ten gevolge van gasproductie voor de verschillende scenario's. Het verwachtingsscenario is weergegeven als de bovengrens van de gekleurde vlakken die de bijdrage per voorkomen weergegeven. Het lage en hoge scenario zijn getoond als lijnen (geel: laag scenario, rood: hoog scenario).



Figuur 17; Belasting in Zoutkamperlaag ten gevolge van gasproductie voor de verschillende scenario's. Het verwachtingsscenario is weergegeven als de bovengrens van de gekleurde vlakken die de bijdrage per voorkomen weergegeven. Het lage en hoge scenario zijn getoond als lijnen (geel: laag scenario, rood: hoog scenario).

Voor de berekening van de verwachte bodemdaling in de toekomst en de bijbehorende volumes en bodemdalingssnelheden is uitgegaan van het basisscenario. 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 2-7 t/m Tabel 2-2-10).

## 2.5.2 Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting rapportagejaar 2017 met onzekerheid

Tabel 2-7 en Tabel 2-8 tonen de door gaswinning veroorzaakte bodemdalingsvolumes met bijbehorende onzekerheid per voorkomen voor de jaren J-3 t/m J+2 waarbij J-1 het rapportagejaar (2017) is. Voor de volledigheid zijn ook de resultaten voor het jaar 2005 tot en met 2020 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 2-7; Jaarlijks bodemdalingsvolume in Pinkegat voor de Ameland, Anjum voorkomens en 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>.

Kombergingsgebied Pinkegat			
	Anjum/Ameland voorkomens	NES	MGT
Jaar	Volume (onzekerheid)	volume(onzekerheid)	volume(onzekerheid)
2005	103 (50 - 133)		
2006	94 (43 - 123)		
2007	88 (39 - 117)	8 (7 - 10)	5 (3 - 6)
2008	83 (36 - 109)	12 (10 - 14)	4 (3 - 5)
2009	80 (33 - 104)	14 (11 - 17)	5 (3 - 7)
2010	75 (31 - 97)	19 (16 - 24)	8 (3 - 8)
2011	72 (30 - 93)	24 (20 - 31)	11 (3 - 14)
2012	69 (28 - 89)	23 (19 - 29)	9 (2 - 11)
2013	67 (27 - 87)	51 (19 - 53)	9 (2 - 10)
2014	65 (26 - 83)	58 (16 - 76)	8 (3 - 10)
2015	63 (25 - 81)	44 (14 - 57)	7 (3 - 8)
2016	61 (24 - 78)	40 (18 - 52)	7 (2 - 7)
2017	60 (23 - 77)	36 (23 - 47)	6 (2 - 6)
2018	57 (22 - 74)	32 (26 - 42)	6 (2 - 6)
2019	57 (22 - 73)	28 (23 - 35)	5 (2 - 6)
2020	54 (21 - 71)	23 (19 - 28)	4 (2 - 5)



Tabel 2-8; Jaarlijks bodemdalingsvolume Zoutkamperlaag voor de Anjum en Wadden voorkomens met tussen haakjes de bandbreedte tussen het hoge en lage scenario (onzekerheid). Volume en bandbreedte (onzekerheid) in duizend m<sup>3</sup>.

Kombergingsgebied Zoutkamperlaag							
Jaar	Anjum voorkomen	NES	MGT	LWO-C	LWO-W	LWO-O	VHZ
2005	15 (5 - 15)						
2006	13 (2 - 13)						
2007	10 (0 - 11)	7 (5 - 8)	22 (16 - 31)				
2008	9 (0 - 11)	10 (8 - 12)	19 (14 - 31)		5 (4 - 6)	2 (2 - 3)	5 (4 - 7)
2009	7 (0 - 9)	11 (9 - 14)	28 (20 - 43)		28 (15 - 45)	17 (17 - 30)	14 (7 - 29)
2010	5 (0 - 8)	16 (13 - 20)	44 (20 - 55)		20 (10 - 40)	24 (19 - 46)	19 (8 - 46)
2011	4 (0 - 7)	20 (16 - 25)	57 (21 - 89)		21 (12 - 41)	34 (19 - 82)	16 (7 - 41)
2012	3 (0 - 6)	19 (15 - 24)	46 (17 - 78)	3 (2 - 5)	20 (10 - 40)	39 (16 - 100)	13 (7 - 37)
2013	2 (0 - 5)	44 (17 - 46)	48 (18 - 77)	6 (2 - 14)	19 (9 - 40)	37 (14 - 93)	12 (7 - 36)
2014	1 (0 - 3)	49 (13 - 64)	48 (20 - 73)	4 (1 - 10)	17 (8 - 41)	34 (13 - 82)	12 (7 - 35)
2015	0 (0 - 2)	37 (11 - 49)	44 (20 - 65)	3 (1 - 7)	16 (6 - 42)	30 (13 - 72)	10 (6 - 33)
2016	0 (0 - 1)	34 (15 - 44)	44 (20 - 61)	2 (1 - 6)	15 (6 - 44)	27 (14 - 64)	9 (6 - 33)
2017	0 (0 - 0)	30 (19 - 40)	43 (20 - 60)	2 (1 - 5)	16 (7 - 47)	26 (15 - 61)	8 (5 - 34)
2018	0 (0 - 0)	27 (21 - 35)	41 (19 - 59)	2 (1 - 5)	16 (8 - 50)	26 (16 - 59)	8 (5 - 36)
2019	0 (0 - 0)	23 (19 - 30)	38 (18 - 57)	2 (2 - 5)	15 (7 - 50)	24 (16 - 55)	7 (5 - 38)
2020	0 (0 - 0)	19 (16 - 23)	33 (16 - 53)	2 (1 - 4)	14 (6 - 49)	25 (18 - 55)	6 (4 - 40)

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

Onderstaande Tabel 2-9 geeft de bodemdalingssnelheid S voor het rapportagejaar 2017 en belasting B op 1-1-2018. 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 rode lijn in Figuur 16 en Figuur 17).

Tabel 2-9; Bodemdalingssnelheid (mm/jr) voor het rapportagejaar 2017 en belasting B (mm/jr) op 1-1-2018 met onzekerheid (bandbreedte) per kombergingsgebied.

Zoutkamperlaag		Pinkegat	
S (laag-hoog)	B (laag-hoog)	S (laag-hoog)	B (laag-hoog)
0,85 (0,44 – 1,67)	0,81 (0,42 – 1,65)	1,70 (0,82 - 2,18)	1,60 (0,74 - 2,05)

### 2.5.3 Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting

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

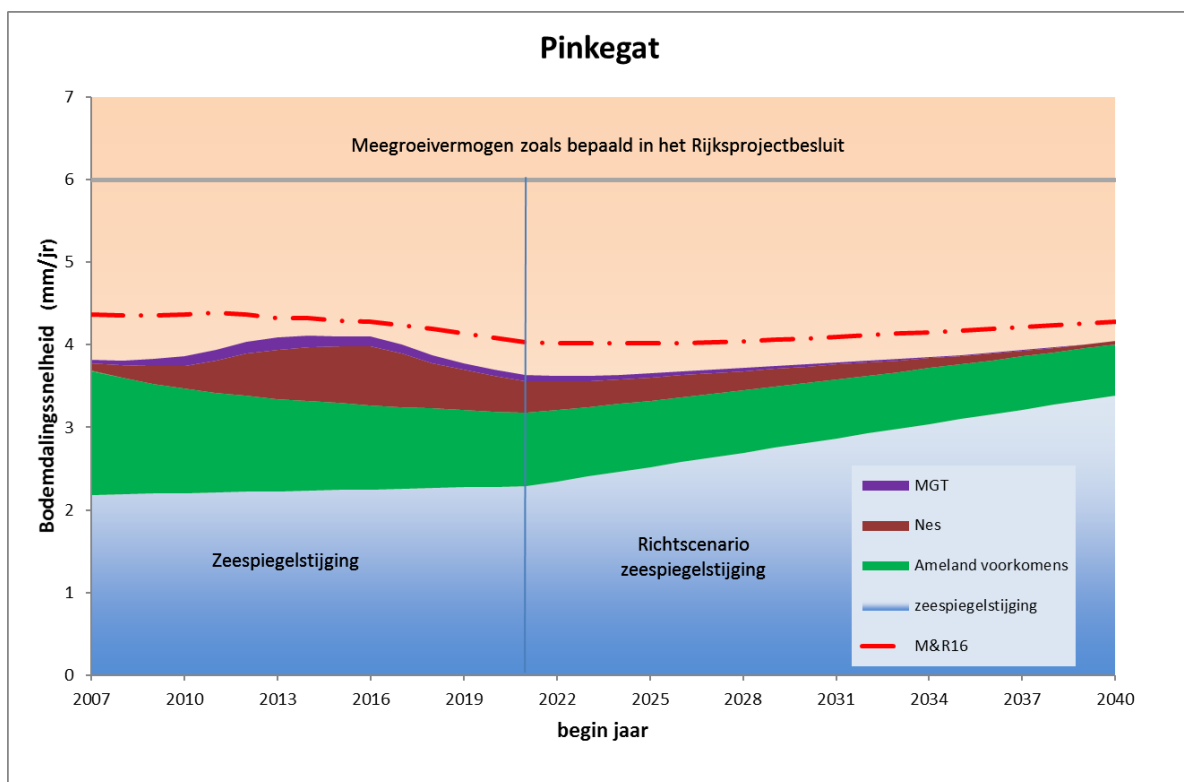
## 2.6 Indien nodig aanpassen productie (stap 5)

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 gebruiksruimte (zie Tabel 2-2-10). Dit geldt ook voor het hoge scenario. In ieder geval zal de gebruiksruimte niet voor 1-1-2021 worden overschreden. Na deze tijd geldt het richtscenario van de zeespiegelstijging, waarbij ook in dit scenario de gebruiksruimte niet wordt overschreden.

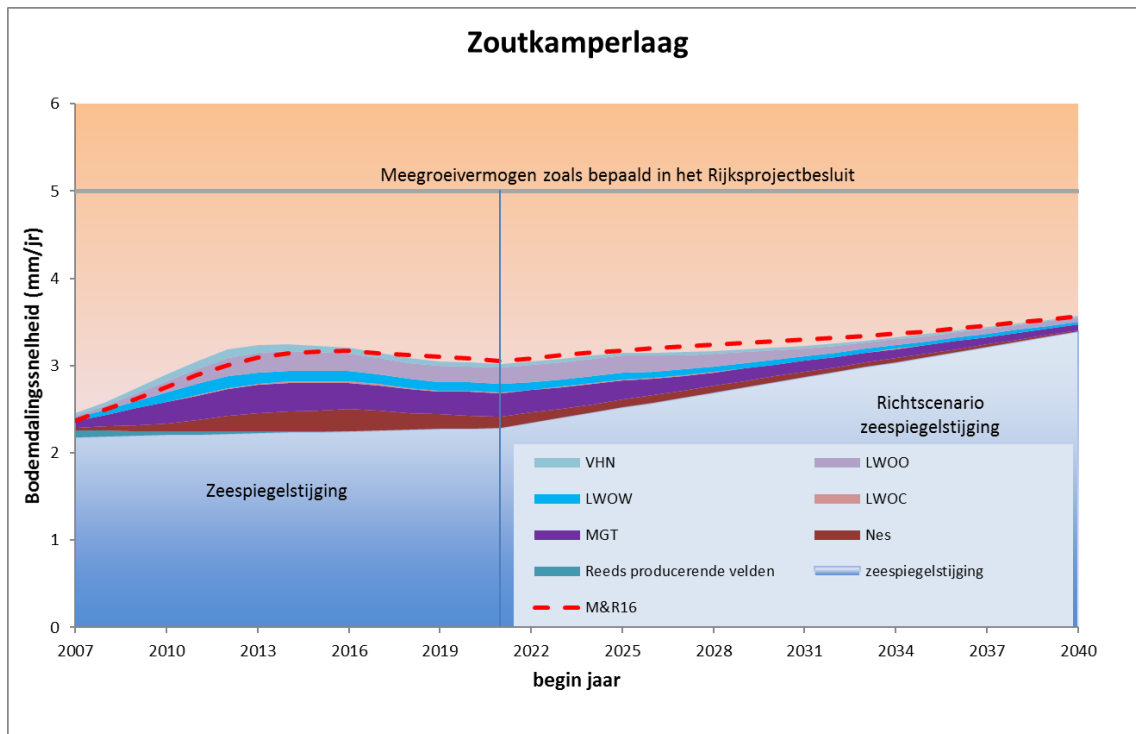
## 2.7 Actualiseren (stap 6)

Figuur 18 en Figuur 19 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 gebruiksruimte 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 2016 (gerapporteerd in 2017) weergegeven.

Het verschil in Pinkegat wordt voornamelijk veroorzaakt door het Ameland voorkomen, waar het westelijke aquifer minder in druk daalt dan aangenomen in de M&R 2016 rapportage. De passing met de gemeten daling is boven deze aquifer is beter dan in de vorige M&R-cycli.



Figuur 18; Voorspelde belasting inclusief Zeespiegelstijging voor het kombergingsgebied Pinkegat. De rood gestreepte lijn geeft berekende belasting aan zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclusrapportage over 2016.



*Figuur 19; 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 2016.*

### 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 2017 uitgevoerd:

Systeem-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 2017 in de Asset Land uitgevoerd.

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

Registratie	Bewaarplaats NAM	Vastgelegd in
Winningsplan	<a href="https://eu001-sp.shell.com/sites/AAFAA0995/Documents/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=%2Fsites%2FAFAA0995%2FDocuments%2F01%2E%20Vigering%20winningsplannen&amp;">https://eu001-sp.shell.com/sites/AAFAA0995/Documents/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=%2Fsites%2FAFAA0995%2FDocuments%2F01%2E%20Vigering%20winningsplannen&amp;</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-uie.sharing.shell.com/App/Dream/Home.aspx">https://wrfm-ssw-uie.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 belangrijkste conclusies van dit rapport worden hieronder weergegeven.

- Volgens het basisscenario, dat leidend is voor de M&R-rapportage, zal de bodemdalingssnelheid de gebruiksruimte, binnen de tijd waarvoor de voorspellingen zijn uitgevoerd, de natuurgrens voor Zoutkamperlaag en Pinkegat niet overschrijden.
- De meet- en regelcyclus stuurt op basis van de verwachtingswaarde voor de belasting volgens het basisscenario. Aangezien de bodemdaling volgens dit scenario binnen de gebruiksruimte valt, worden er geen maatregelen genomen om de productie bij te stellen.
- Voor de modellering van de bodemdaling ten gevolge van gasproductie van de Ameland velden is in de rapportage uitgegaan van de geomechanische modellering zoals beschreven in de LTS-II studie (Referentie 18).
- De voorspelde bodemdalingssnelheid in het kombergingsgebied Pinkegat over de komende 20 jaar is lager dan voorspeld in de M&R-cyclus 2016. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door een realisatie van de Ameland reservoirdruk die minder depletie geeft in het westelijke aquifer en daarmee, via het geomechanische model, beter past bij de gemeten bodemdaling in dit gebied.

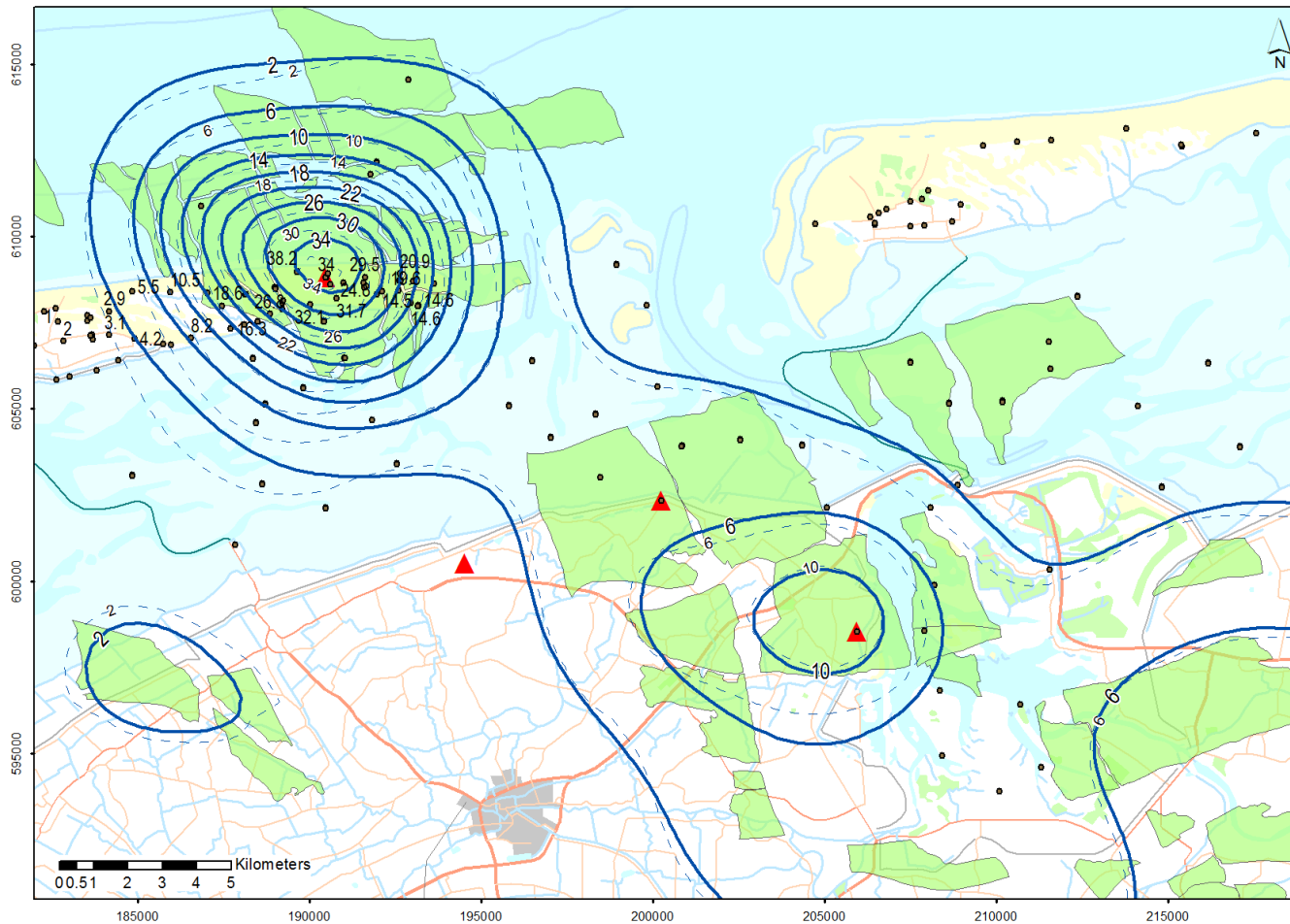
## 5 Referenties

- 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 2017 (EP Report No: EP201610206204).
- 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. 1.22. 06-GPS B.V., 01/2018.
- Referentie 9 Check reference station coordinates NAM v.1.9. 06 GPS B.V., 06/2017.
- Referentie 10 NLGEO2004: het geoïdemodel voor Nederland. Data-ICT-Dienst, Rijkswaterstaat, URL: <http://www.rdnap.nl/algemeen/hooqte/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 Deltares (2009) Differentiele bodemdaling als gevolg van compactie in een ondiepe tot matigdiepe ondergrond van Ameland-oost rapport nr. 2009-U-R91011.  
URL: <http://feitenencijfers.namplatform.nl/download/rapport/f80895da-8555-4511-9f18-ccd42234c6be?open=true>.
- Referentie 14 NAM (2015) Wadden Sea Long term Subsidence Studies – Overview report. EP201506209625  
URL: <https://nam-feitenencijfers.data-app.nl/download/rapport/2ca6c8d8-c0d4-4c10-8460-672f93b4cdaa?open=true>

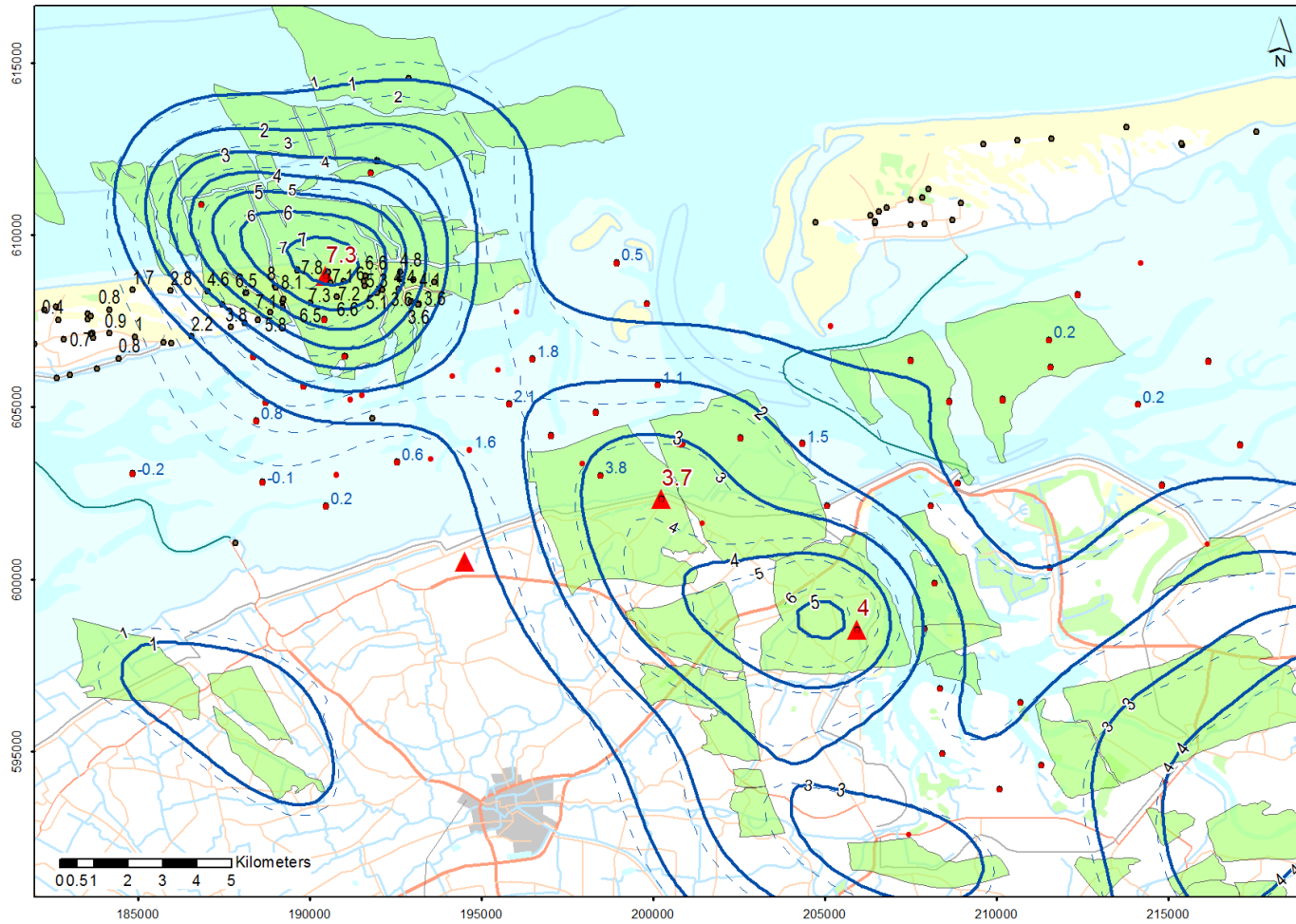
- Referentie 15 TNO (2013) A general framework for rate dependent compaction models for reservoir rock. TNO 2013 R11405.
- Referentie 16 Dynamic Reservoir Modelling of Wadden Fields for subsidence. Meet&Regel 2016. EP201703201178
- Referentie 17 Meet- en regelprotocol Winning Waddenzeegas vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Nederlandse Aardolie Maatschappij BV. EP200612202122.
- Referentie 18 NAM (2017) Ensemble Based Subsidence application to the Ameland gas field – long term subsidence study part two (LTS-II) continued study.  
<https://nam-feitenencijfers.data-app.nl/download/rapport/b2bb2626-2cf8-4d7f-994d-04a9995e9d?open=true>
- Referentie 19 TNO (2011) Toetsing van de belasting op de gebruiksruimte in de kombergingsgebieden in Pinkegat en Zoutkamperlaag door bodemdaling ten gevolge van gaswinning onder de Waddenzee. TNO-060-ur2011-020351c  
<http://nlog.nl/bodemdeling>
- Referentie 20 Deltares en PBL (2011) Deltascenario's Verkenning van mogelijke fysieke en sociaaleconomische ontwikkelingen in de 21ste eeuw op basis van KNMI'06 en WLO-scenario's, voor gebruik in het Deltaprogramma 2011 – 2012, Deltares rapport 1205747-000
- Referentie 21 Victor Hopman, Ger de Lange, Laura Vonhogen, Pauline Kruiver, Freek van Leijen, Raluca Ianoshi, Report on pilot service Rhine-Meuse Delta, Subcoast report D3.2.3, May 2013
- Referentie 22 Technische Commissie Bodemdaling (2009) Van Meting naar Daling. Bodemdaling door delfstofwinning. November 2009  
<https://www.tcbb.nl/pdf/Van-Meting-naar-Daling.pdf>
- Referentie 23 NAM (2017) Long Term Subsidence vervolgstudie. Doc nr. EP201710200509
- Referentie 24 NAM (2018) Controle van de reservoirmodellen met de nieuwe drukmetingen van 2017. EP201803212301.



## Bijlage 1. Gemodelleerde en gemeten bodemdaling totaal en sinds 2006

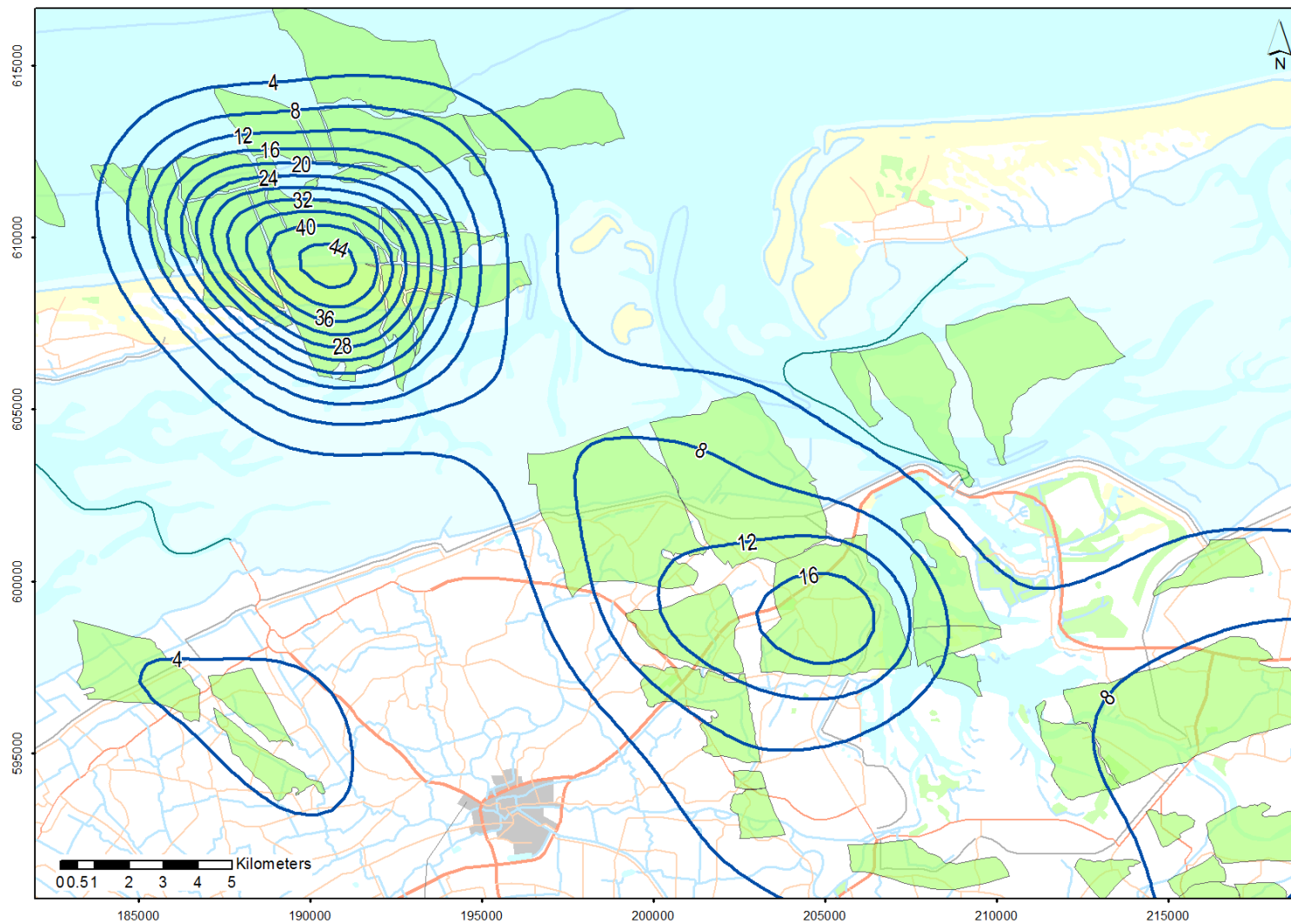


Totale bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2017) door gaswinning sinds de start van de Ameland en Anjum productie. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling (gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2017 volgens de M&R-rapportage over 2016). De punten met label representeren de peilmerken met de gemeten hoogteverschillen tussen juni 1986 en januari 2017. Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 3 posities continue GPS-metingen uitgevoerd sinds 2007 (rode driehoek).



*Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2017) door gaswinning sinds de nulmeting in de Waddenzee in 2006. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens de aangepaste/gekalibreerde geomechanische modellen (gestreepte contouren geven de bodemdaling van 2016 weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2016). De punten met label in de Waddenzee representeren de peilmerken met de gemeten hoogteverschillen vanaf 2006 (nulmeting Waddenzee) tot de laatst uitgevoerde meting in mei 2017. De gemeten hoogteverschillen op het eiland Ameland geven de hoogteverschillen tussen 01-2006 en 01-2017 aan. De rode waarden geven de daling aan van de permanente GPS-stations in de periode feb. 2007- jan. 2018.*

## Bijlage 2 Verwachte bodemdaling in het jaar 2050



## Bijlage 3 Resultaten Long Term Subsidence Fase II (LTS-II)

Hieronder volgt een kopie van de samenvatting het rapport “Long Term Subsidence vervolgstudie” (Referentie 23)

Het rapport “Long Term Subsidence vervolgstudie” markeert het eindresultaat van een uitgebreide studie naar tijdafhankelijkheid in het gedrag van de bodemdaling in de Waddenzee: de “Long Term Subsidence” (LTS) studie. Vooral de langetermijneffecten zijn onderzocht om een beter inzicht te krijgen in het gedrag van de bodemdaling.

Het eerste deel van de studie (LTS-I) onderzocht de mogelijke fysische verklaringen voor tijdafhankelijkheid in het bodemdalingsgedrag. Het tweede deel van de studie (LTS-II) richtte zich op het verwerken van de meest aannemelijke verklaringen in modellen, om hiermee de bodemdaling beter te kunnen voorspellen. Deze modellen zijn nu integraal getoetst tegen de historische gegevens van productie en bodemdaling van het Ameland gasveld. De betrouwbaarheid van voorspellingen van de bodemdaling was hierbij een belangrijk aandachtspunt.

In de recente LTS-II vervolgstudie heeft NAM de nadruk gelegd op het verbeteren van de passing van de modellen aan de historische metingen en het verhelderen van de betrouwbaarheid en de waarschijnlijkheid van de voorspellingen van de toekomstige bodemdaling. Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) noemde in haar brief van 3 juli 2017 een aantal punten die verbeterd moesten worden. Al deze punten zijn geadresseerd in deze vervolgstudie en hebben geleid tot een betere passing van de modellen aan de data. Tevens is de betrouwbaarheid van de modeluitkomsten sterk toegenomen. Dit heeft geleid tot een scherper gedefinieerd betrouwbaarheidsinterval van de voorspelling van de bodemdalingssnelheid in het Pinkegat gebied.

De resultaten bevatten een aantal belangrijke conclusies over bodemdaling:

- (1) De studie laat zien dat met de ontwikkelde workflow de verwachte bodemdaling op de lange termijn in beeld gebracht wordt, evenals de waarschijnlijkheid van de voorspelling.
- (2) Het meegroeivermogen van de Waddenzee is nooit overschreden door bodemdaling als gevolg van de productie van gas uit de Ameland velden;
- (3) De strikte gebruiksruiimte grens aan de bodemdaling zal ook in de toekomst veilig zijn.
- (4) De studie bevestigt de effectiviteit van het “hand aan de kraan principe” om de grens te bewaken van de toelaatbare bodemdaling door gasproductie. De studie toont aan dat bij een dreigende overschrijding van de grens, een vermindering in de productie snel en effectief de bodemdaling zal verminderen.

De geldende regels en de praktijk van de Meet- & Regelcyclus, met onafhankelijk toezicht, bewaken al 10 jaar effectief de grens aan de bodemdaling. Tevens zijn er effectieve middelen om in te grijpen. Naar de opvatting van NAM is met de recente aanpassingen aan de modellen en de methode, en de hiermee gerealiseerde resultaten voldaan aan de doelstelling zoals die was gesteld bij de aanvang van de studie in 2013, om een beter inzicht te krijgen in het tijdsafhankelijke gedrag en de mogelijke consequenties voor de bodemdaling op de langere termijn.

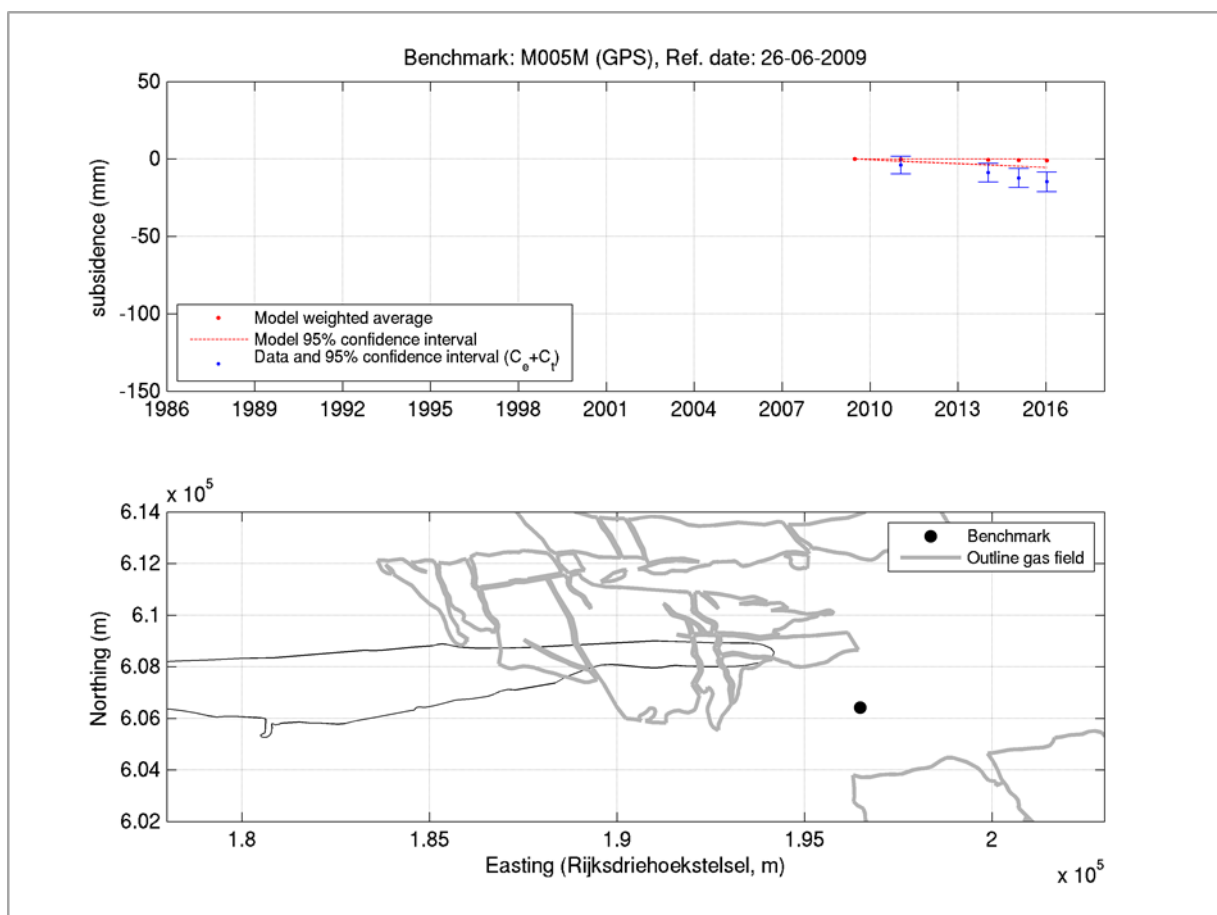
Deze studie is beoordeeld door TNO-AGE en Professor Teatini (Università di Padova - Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering), waarna een positief advies volgde van SodM.

<https://www.sodm.nl/actueel/nieuws/2018/02/08/nam-studie-over-de-voorspelling-van-de-bodemdaling-waddenzee-nu-wel-bruikbaar>

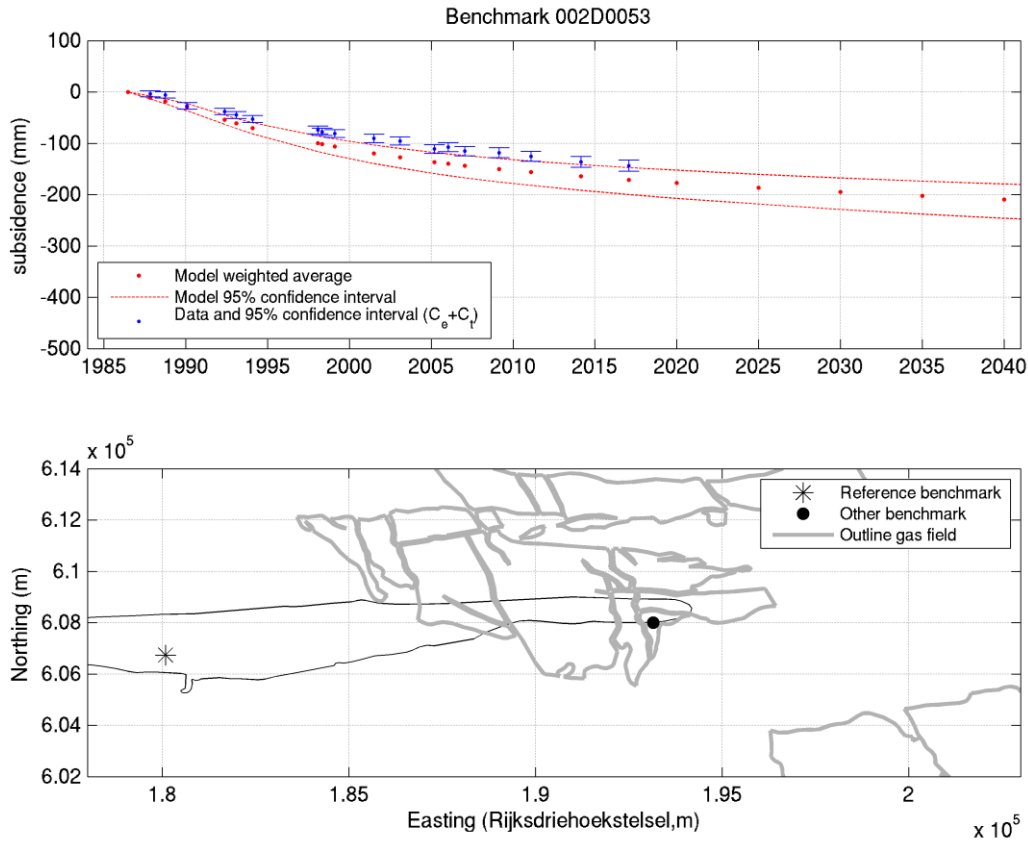
## Bijlage 4. Reservoirrealisaties selectie via de LTS-II methode

In de LTS-II studie is een toetsing gedaan van de voorspelling van een groot aantal modellen voor de bodemdaling door het Ameland veld, met de beschikbare bodemdalingsdata zowel op het Ameland eiland als in de Waddenzee. De LTS-II toetsgrootte is een globale maat voor de match tussen de metingen en de bodemdalingsmodellen, waarbij opgemerkt moet worden dat de datadichtheid, zowel ruimtelijk als in de tijd, het hoogst is op het eiland. [Referentie 18].

De bodemdalingsmodellen die in de LTS-II studie het beste bij de metingen passen, d.w.z. de grootste kans krijgen, zijn gebaseerd op reservoirrealisaties met weinig drukdaling in de laterale aquifers. Deze modellen hebben een goede passing op het eiland maar geven een onderschatting van de bodemdaling in de Waddenzee (zie als voorbeeld Figuur 20). Echter de modellen gebaseerd op reservoirrealisaties met meer depletie in de laterale aquifers tonen een betere passing met de metingen in de Waddenzee, maar de passing met de metingen op het eiland wordt iets slechter (Figuur 21).



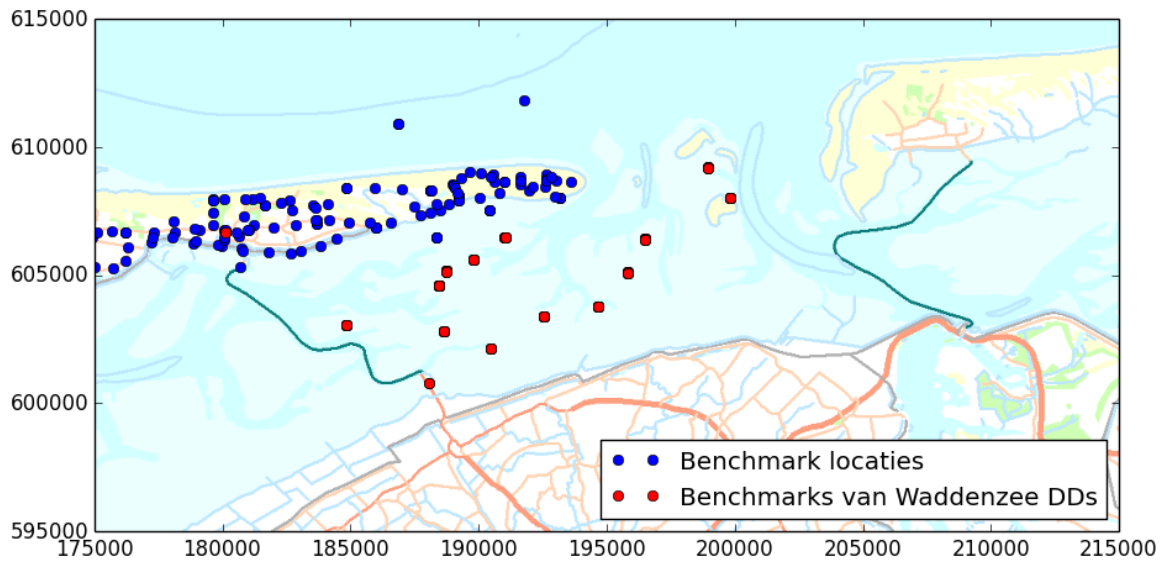
Figuur 20; Modelresultaten LTS-II voor punt M005M in de Waddenzee. Het 95% betrouwbaarheidsinterval van de modellen ligt aan de bovenkant het betrouwbaarheidsinterval van de metingen.



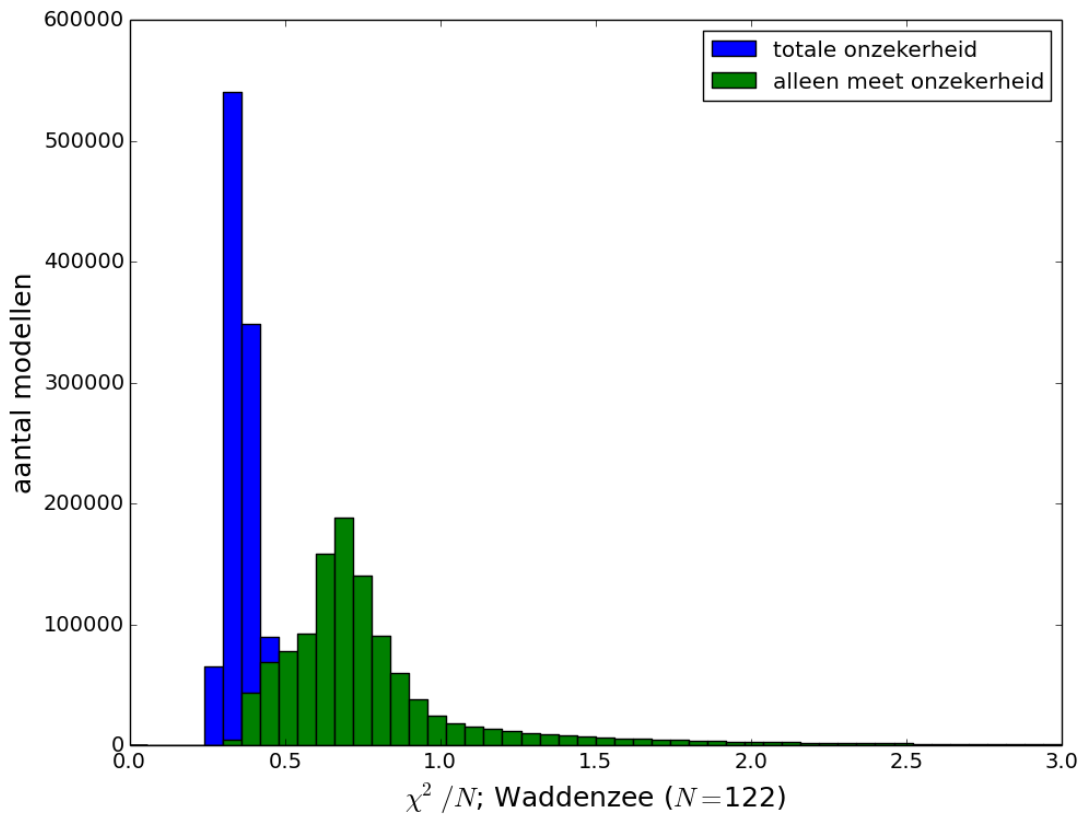
Figuur 21; Modelresultaten LTS-II voor punt 002D0053 bij Ameland. Het 95% betrouwbaarheidsinterval van de modellen ligt aan de onderkant het betrouwbaarheidsinterval van de metingen.

Voor de bodemdalingsmodellering zoals gebruikt in de M&R-cycli is een goede passing in de Waddenzee van belang om de gebruikruimte zo realistisch mogelijk in te schatten. De volgende methode is gebruikt om een reservoir model te vinden dat zowel goed past bij de Waddenzee metingen als op het eiland. Om geschikte reservoirrealisaties voor een basis en hoog bodemdalingssnelheid scenario in Pinkegat te selecteren, gebruiken we de LTS-II toetsingsmethode, maar kijken we zowel naar de algehele passing op alle bodemdalingsdata rond Ameland, als de passing en hoeveelheid daling in Pinkegat. De rode peilmerken in Figuur 22 zijn gebruikt binnen het toetsingsgebied voor het Waddengebied. Double differences met een 'van' en/of 'naar' locatie binnen dit gebied zijn mee genomen om voor alle 1,2 miljoen bodemdalingsmodellen uit de LTS-II studie een  $\chi^2$  waarde te bepalen, als maat voor de passing op de Waddenzee. Om ook het effect van de Waddenvelden, mee te nemen in de confrontatie, zijn de double differences van deze velden volgens het basis bodemdalingsscenario bij die van de 1,2 miljoen Ameland modellen opgeteld. De resulterende  $\chi^2$  verdeling is weergegeven in Figuur 23.





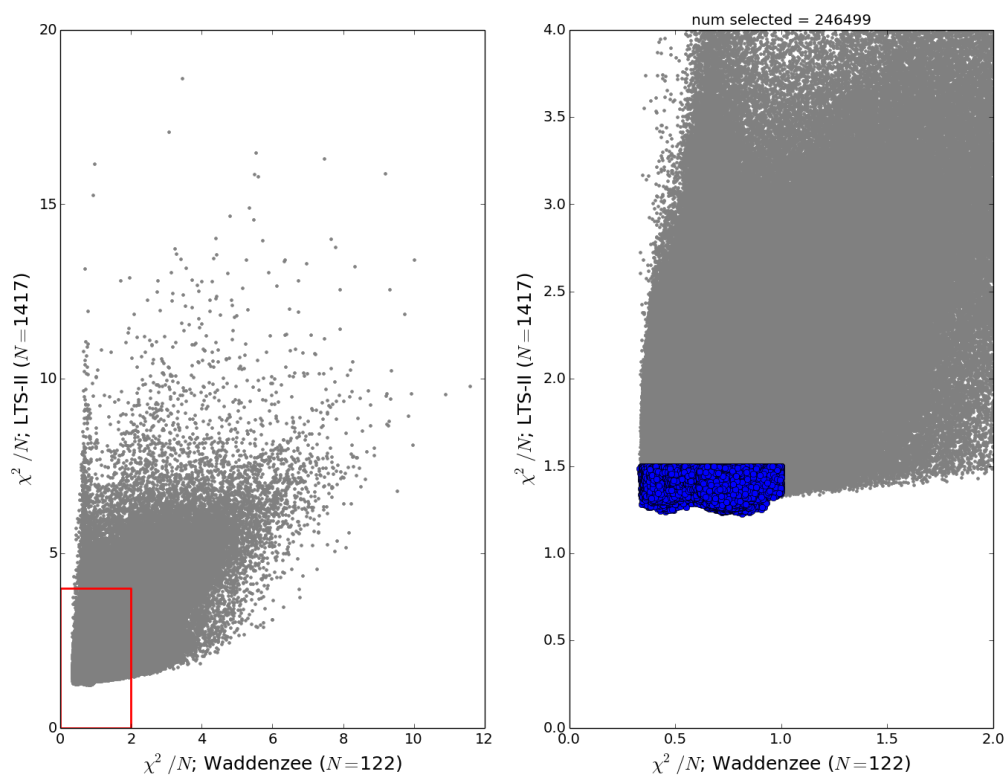
Figuur 22: Benchmark locaties waarvan de data gebruikt is om de passing van de modellen op de Waddenzee te kwantificeren (rode punten) en alle data locaties die gebruikt zijn op te totale passing te bepalen (rode en blauwe punten).



Figuur 23: De  $\chi^2/N$  verdeling van alle 1,2 miljoen bodemdalingsmodellen uit de LTS-II studie (aangevuld met de bodemdalingsmodellen van Nes en Moddergat), voor de double differences ( $n = 122$ ) in de Waddenzee (zie Figuur 22).

Alle modellen krijgen een  $\chi^2/N$  van onder de 1, wat erop duidt dat het stochastisch model in de confrontatie te pessimistisch is (oftewel, de precisie van de metingen en de idealisatie precisie is in werkelijkheid beter, en/of de model imperfecties zijn kleiner). Echter, de modellen met de laagste  $\chi^2/N$  waarden zijn nog steeds de best passende modellen bij de metingen.

De modellen die worden gekozen voor een basis en hoog scenario, moeten dicht bij de punten in de Waddenzee liggen, maar ook nog steeds een goede passing op alle Ameland data hebben, anders is het een minder waarschijnlijk model. Daarom is de  $\chi^2/N$  verdeling van alle modellen bepaald op zowel de hele data set ('LTS-II') als op de Waddenzee, en geplott in Figuur 24. Grenswaarden zijn gekozen om de beste modellen uit beide verdelingen te kiezen. Binnen de blauwe selectie vallen ~250000 modellen uit de ~1,2 miljoen. De waarde van de  $\chi^2/N$  – grenzen zijn hier gekozen om modellen die niet goed bij de data in het LTS-II onderzoeksgebied passen niet mee te nemen. De invloed van deze keuze op het eindresultaat is wel getest, door de grens verder te verlagen (minder modellen mee te nemen), waaruit dezelfde selectie voor basis en hoog reservoir realisatie volgt.



Figuur 24: De  $\chi^2/N$ -waarden uit LTS-II (het hele Ameland gebied), uitgezet op de y-as, en de  $\chi^2/N$  op de double differences in de Waddenzee (rode punten in Figuur 22), langs de x-as. Voor de bepaling van de passing op de Waddenzee is ook het effect van de landvelden mee genomen, volgens het verwachte bodemdalingsscenario. Ook is voor de toetsing op de Waddenzee alleen de meetonzekerheid mee genomen om te voorkomen dat alle  $\chi^2/N$ -waarden ver onder de 1 liggen. De data binnen de rode vierkant is uitvergroot in de rechter plot; in blauw zijn de waarden van de modellen die een beste passing op het volledige LTS-II gebied als op de Waddenzee hebben.

Om te bepalen welke van deze modellen de meeste bodemdaling kunnen genereren, kijken we als tweede stap naar de bodemdaling op een aantal locaties in de Waddenzee, waar de gemeten en gemodelleerde bodemdaling vergeleken wordt. Er is hier een selectie gemaakt van vier double differences, die tussen Ameland en Nes in liggen. De gemodelleerde bodemdaling volgens deze double differences van de modellen ( $dd_m$ ) is dan de som van de voorspellingen van de Ameland



bodemdalingsmodellen, plus die van het basisscenario van de land modellen (Anjum plus Waddenvelden):

$$dd_{m,AME} + dd_{m,land} = dd_m$$

Voor het verwachtingsscenario van Ameland wordt als criterium gesteld dat dit dicht bij de gemeten data moet liggen:

$$dd_{m,AME} = (dd_{gemeten} - dd_{m,land})$$

Als acceptatie wordt een verschil  $\Delta$  gebruikt:

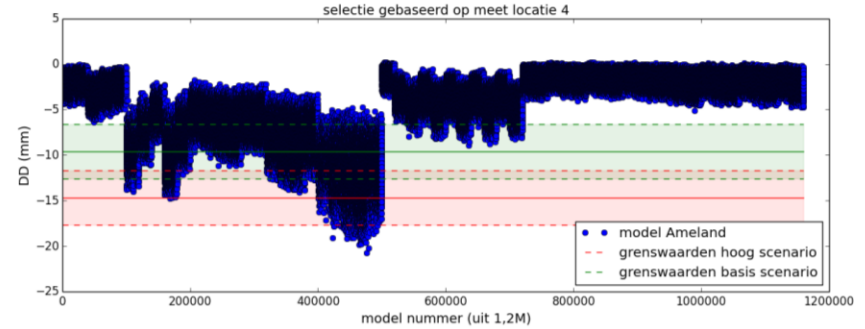
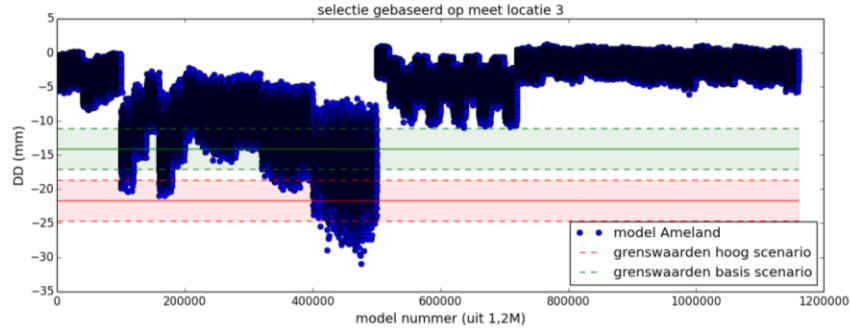
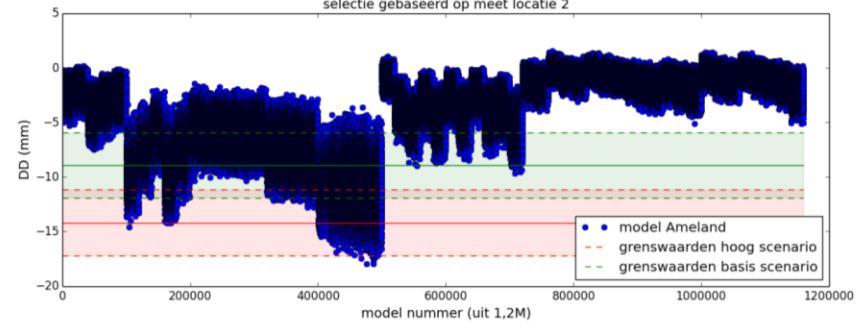
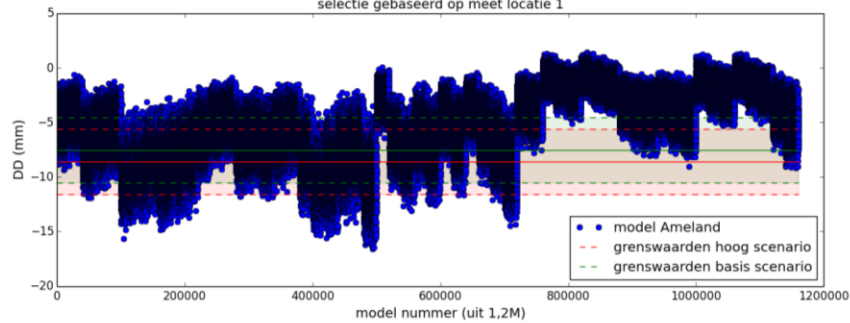
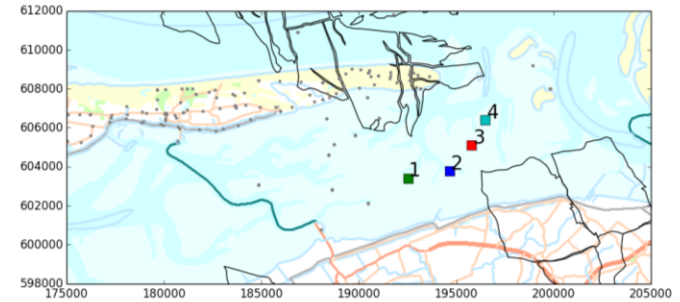
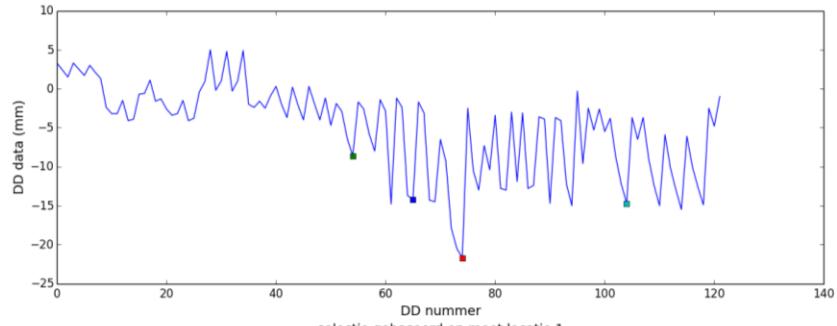
$$abs[dd_{m,AME} - (dd_{gemeten} - dd_{m,land})] \leq \Delta$$

Als criterium voor hoog scenario, wordt gekozen dat de Ameland modellen de data kunnen beschrijven zonder toevoeging van de bodemdaling van de land velden, ofwel  $dd_{m,land} = 0$ :

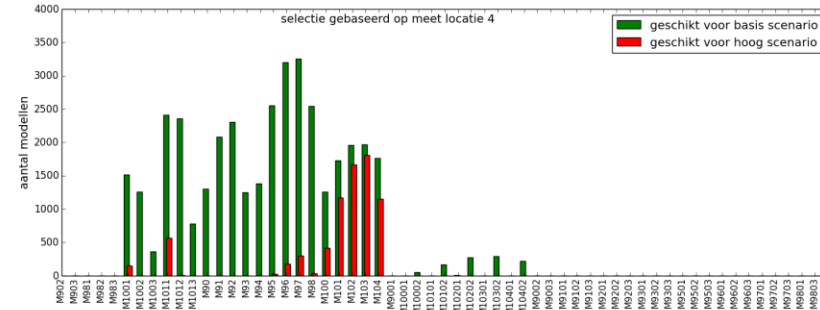
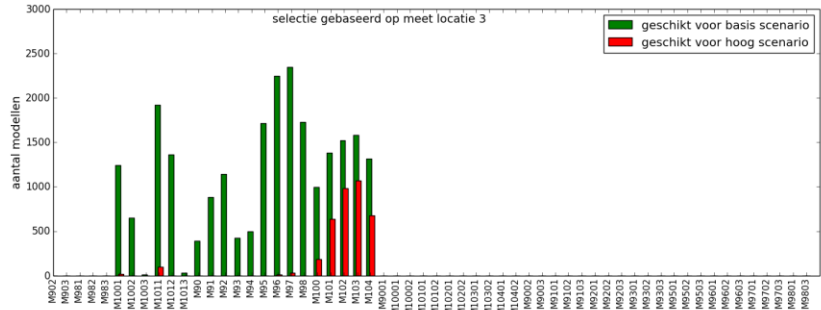
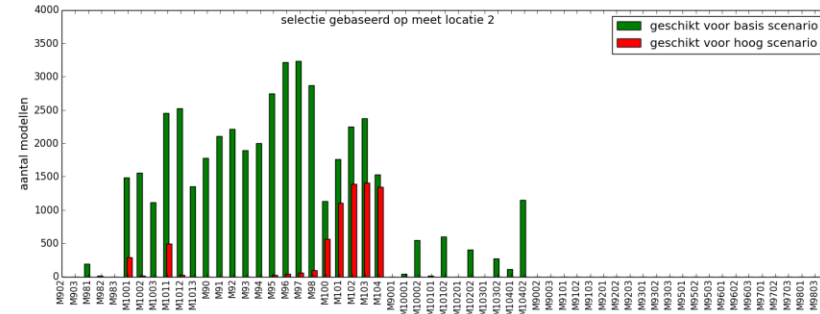
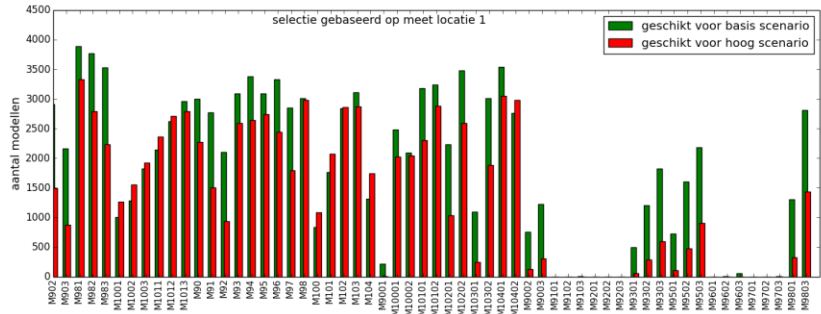
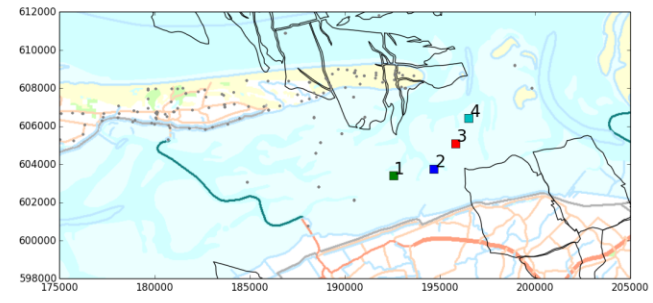
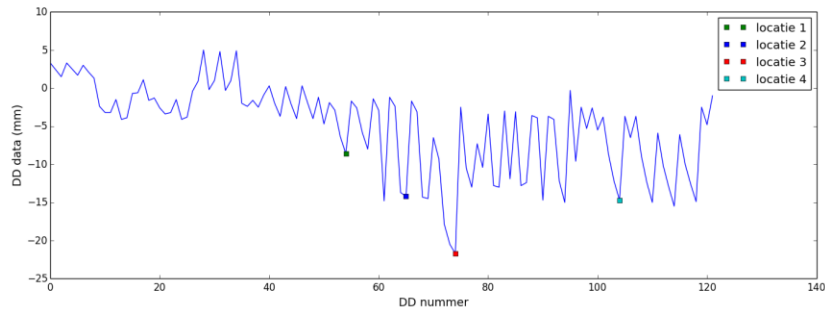
$$abs[dd_{AME} - dd_{gemeten}] \leq \Delta$$

Als acceptatie waarde is hier  $\Delta = 3$  mm gekozen. De gemeten double differences in de Waddenzee zijn weergegeven in de plot linksboven in Figuur 25, waarin de gekozen double differences voor deze stap zijn gemarkeerd, en de locatie van het bijbehorende 'naar' benchmark weergegeven op de kaart rechtsboven in Figuur 25. De vergelijking tussen de gemodelleerde double differences voor de Ameland modellen met de acceptatie levels voor basis en hoog scenario zoals hier gedefinieerd, is voor de vier geselecteerde double differences weergegeven in de overige plots in Figuur 25.

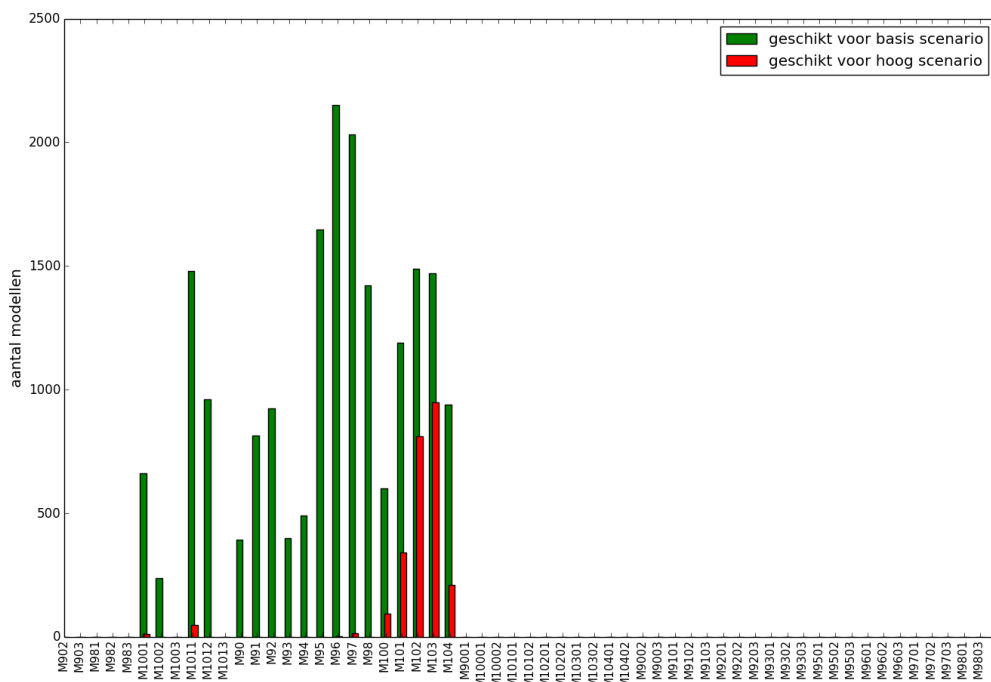
De staafplots in Figuur 26 tonen het aantal modellen, wat per reservoir aan drie condities voldoet: 1)  $\chi^2/N$  voor het LTS-II gebied ligt onder de gekozen grenswaarde, 2) de model  $\chi^2/N$  voor het Waddenzee gebied ligt onder de gekozen grenswaarde, en 3) de gemodelleerde waarde van de geselecteerde double difference ligt binnen de acceptatie waarde voor het basis scenario (groene staven) of hoog scenario (rode staven) zoals hierboven gedefinieerd.



Figuur 25: Linksboven: gemeten double differences in de Waddenzee (rode Benchmarks in Figuur 22). De vier geselecteerde double differences voor de selectie van een hoog en basis reservoir realisatie zijn gemarkeerd met gekleurde vierkanten; de locaties van de 'naar' Benchmarks die bij deze double differences horen zijn rechts boven op de kaart van de Waddenzee geplott. De overige vier plots tonen de ggemodelleerde double differences voor Ameland (blauwe punten) van de modellen met een lage  $\chi^2/N$  voor zowel het LTS-II gebied als de Waddenzee (geselecteerde modellen in Figuur 24), met de acceptatie intervallen voor hoog (rood vlak) en basis (groen vlak) voor de reservoirrealisatie selectie, zoals gedefinieerd in de text.



Figuur 26: Linksonder: gemeten double differences in de Waddenzee (rode Benchmarks in Figuur 22). De vier geselecteerde double differences voor de selectie van een hoog en basis reservoir realisatie zijn gemarkeerd met gekleurde vierkanten; de locaties van de 'naar' Benchmarks die bij deze double differences horen zijn rechts boven op de kaart van de Waddenzee geplott. De vier staafplots tonen het aantal geaccepteerde modellen per reservoir realisatie volgens het basis criterium (groen) en hoog criterium (rood); dit is het aantal modellen per reservoirrealisatie wat in Figuur 25 binnen de acceptatie vlakken valt.



*Figuur 27: Aantal modellen per reservoir scenario dat binnen alle toetscriteria vallen (lage  $\chi^2/N$  voor het LTS-II gebied, lage  $\chi^2/N$  voor het Waddenzee gebied, en binnen de double difference criteria op de vier geselecteerde double differences). Het aantal modellen dat binnen het basis criterium op alle vier de double differences valt is geplot in groen, het aantal dat binnen het hoge criterium op alle vier de double differences valt is geplot in rood.*

Voor de vier geselecteerde double differences zijn de meeste geaccepteerde modellen voor een hoog scenario gebaseerd op de reservoirrealisaties M102 en M103, en voor de selectie van een basis scenario zijn de meeste modellen gebaseerd op reservoirrealisaties M96 en M97. Dit is samengevat in Figuur 27, waar het aantal modellen per reservoir realisatie is geplot dat aan alle criteria voldoet. Realisaties M102 en M96 voorspellen meer depletie in het westelijke aquifer dan respectievelijk M103 en M97 (zie Fig main text). De uiteindelijke keuze van reservoir realisaties is hierom M102 als realisatie voor het hoge bodemdalingsscenario en M96 als realisatie voor het basis bodemdalingsscenario.