

Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen

Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2018

NAM B.V.

EP Document Nummer.:	EP201905200582	Owner:	UIO/T/DL
Document Date:	1/6/2019	Security:	Unrestricted

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 deze winningsplannen (Referentie 2). In 2016 heeft de minister ingestemd met de wijziging instemmingsbesluit winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (kenmerk: DGETM-EO 16110969) met betrekking tot de herziene gebruiksruimte 2016-2021.

Als onderdeel van de voorschriften behorende bij het voornoemde winningsplan is een Meet- en regelprotocol opgesteld¹, 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-Oost in productie genomen, terwijl de voorkomens Lauwersoog-Oost en Lauwersoog-West in het vierde kwartaal van 2008 in productie zijn genomen. Tenslotte is het voorkomen Lauwersoog-Centraal in juni 2012 in productie genomen. Samen vormen deze voorkomens de "Wadden voorkomens".

De belangrijkste punten van deze M&R-rapportage worden hieronder samengevat:

Aanpak

- De meet- en regelcyclus is uitgevoerd volgens de LTS-II methode. Dit betekent dat:
 - de bodemdaling voor alle voorkomens is berekend volgens het bodemdalingsmodel zoals beschreven in de LTS-II studie (Referentie 14);
 - er in totaal 50.000 scenario's zijn geconfronteerd met de geodetische data;
 - de onzekerheid in de geodetische data is gemodelleerd;
 - er een objectieve bepaling van de onzekerheid voor de passing en voorspelling van de bodemdaling, bodemdalingssnelheid en belasting heeft plaatsgevonden.

Metingen

- Op basis van het meetplan Waddenzee zijn in 2018 GPS-metingen in de Waddenzee uitgevoerd op 26 clusters van peilmerken in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. Alle metingen zijn gebruikt in de kalibratie van de modellen.
- In 2018 is er een waterpassing uitgevoerd rondom het Lauwersmeer, zijn in het Lauwersmeer 8 peilmerken met GPS gemeten en zijn er nabij 8 ondergrondse merken rondom het Lauwersmeer GPS-metingen verricht en met waterpassing aangesloten op het ondergrondse merk.
- De continue GPS-metingen op de locaties boven de gasvelden Ameland, Anjum en Moddergat, die in 2007 zijn gestart (nog vóór aanvang van de productie in Nes en Moddergat), zijn in 2018 voortgezet. Het AGRS (GPS) station Ameland (Nes) en het in 2016 nieuw geplaatste GPS-station Ternaard zijn ook onderdeel van de monitoring.
- In 2018 zijn in totaal tien reservoirdrukken gemeten in de Wadden voorkomens.

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

Modellen

- Na het kalibreren van de dynamische reservoirmodellen van de Ameland, Wadden en Anjum velden met de gemeten reservoirdrukken is de grootste resterende onzekerheid de druk in de aquifer die in contact staan met de gasvoorkomens. Op basis van seismische, geologische en productiedata is een goed inzicht aanwezig van de grootte en locatie van de aquifers. Om een maximale spreiding in drukprognoses te krijgen, zijn voor elk voorkomen drie realisaties gemaakt, die elk de historisch gemeten drukken kunnen reproduceren, maar variëren in de mobiliteit en gassaturatie in de aquifers. De drie drukprognoses voor elk veld zijn gebruikt om de bodemdaling te voorspellen.
- De 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 parameterwaarden voor zowel de reservoirmodellen als de bodemdalingsmodellen zijn fysisch realistisch en vallen binnen het bereik van gemeten waarden in het veld en laboratorium.

Resultaten

- Naar aanleiding van het advies van de auditcommissie (Referentie 22) is er een bijlage toegevoegd over mogelijke aardbevingen in het Waddengebied. Geïnduceerde aardbevingen komen sporadisch voor boven de M&R-voorkomens en zijn tot nu toe door niemand gevoeld. Mogelijke aardbevingen in dit gebied zullen geen gevolgen hebben voor de bodemdaling.
- De gepresenteerde resultaten gaan uit van het richtscenario voor de zeespiegelstijging dat in 2016 beschikbaar kwam. Dit vigerende zeespiegelscenario geeft een minder sterke zeespiegelstijging aan dan het vorige scenario.
- De bodemdalingssnelheden in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag zijn iets hoger dan voorspeld in de M&R-cyclus 2017. Mogelijke oorzaken zijn de toepassing van een andere methodiek (LTS-II) en de aanpassing van de GPS-referentie naar het GPS netwerk in plaats van alleen het Schiermonnikoog station.
- 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

Samenvatting	2
Inhoud	4
1 Inleiding	5
2 Deelprocessen	7
2.1 Meten (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 Overzicht ondergrondmodellering	10
2.3.2 Verifiëren reservoirmodellen (stap 3a)	11
2.3.3 Verifiëren bodemdalingsscenario's (stap 3b)	16
2.3.4 Vergelijking van gemodelleerde bodemdaling met resultaten van waterpasmetingen en campagne GPS	32
2.4 Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4)	34
2.4.1 Bepaling volume en gemiddelde daling	34
2.4.2 Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting	36
2.4.3 Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting	38
2.5 Indien nodig aanpassen productie (stap 5)	39
2.6 Actualiseren (stap 6)	39
3 Kwaliteitsborging	41
4 Conclusies	42
Referenties	43
Bijlage 1 Gemodelleerde en gemeten bodemdaling totaal en sinds 2006	45
Bijlage 2 Verwachte bodemdaling in het jaar 2050.....	47
Bijlage 3 Aardbevingen en Waddenecologie	48
Bijlage 4 Tijdseries Waddenzee	50
Bijlage 5 Berekening van benodigde aantal Monte Carlo simulaties	52

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). In 2016 heeft de minister ingestemd met de wijziging instemmingsbesluit winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (kenmerk: DGETM-EO 16110969) met betrekking tot de herziene gebruiksruimte 2016-2021.

Als onderdeel van de voorschriften behorende bij het voornoemde winningsplan is een Meet- en regelprotocol opgesteld (Referentie 3), 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-Oost 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 Centraal in juni 2012 in productie genomen. Samen vormen deze voorkomens de "Wadden voorkomens".

Voor het jaar 2018 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- en regelcyclus 2018 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 17 en Figuur 18).
2. Tabellen met de jaarlijkse toename van het bodemdalingsvolume (inclusief onzekerheid) per voorkomen per kombergingsgebied voor de jaren 2005 t/m 2021 (Tabel 2-8 en Tabel 2-9). Een tabel met de bodemdalingssnelheid (per jaar; *S*) en belasting (gemiddelde bodemdalingssnelheid per 6 jaar; *B*) per kombergingsgebied (Zoutkamperlaag en Pinkegat) tot 2042 (Tabel 2-10 en Tabel 2-11).
3. De in een bepaald jaar gerapporteerde belasting *B* wordt berekend voor de situatie op 1 januari van dat jaar. Voor de rapportage in 2019 (over het jaar 2018) wordt op deze manier een *B* voor 1 januari 2019 berekend.
4. Grafieken met de bodemdalingsbelasting voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag vanaf start productie op de locatie Moddergat tot 2040 (Figuur 21 en Figuur 22).

5. Overzicht monitoring met continue GPS-hoogtemetingen (Tabel 2-3).
6. Voor de voorkomens in het winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen-Oost: drukdata per put op reservoirniveau en productiedata van het rapportagejaar (Tabel 2-1 en Tabel 2-2).
7. Geplande productie per voorkomen (jaarprofiel; Tabel 2-6).
8. Gemeten en gemodelleerde bodemdaling op de permanente GPS-locaties (Ameland, Moddergat en Anjum), inclusief onzekerheid (Figuur 12 tot en met Figuur 16).

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 *gasreservoir* 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.

Deze rapportage gebruikt de methodiek die toegepast is in het LTS-II onderzoek. 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 (Referentie 11), is ook een studie gedaan naar de effecten van deze fysische processen op de gaswinning en gerelateerde bodemdaling in en boven het Ameland veld (deel twee van het onderzoek of LTS-II, Referentie 14). In de huidige M&R-rapportage is dit nu naar alle waddenvelden en Anjum uitgebreid.

2 Deelprocessen

Op basis van de tot en met het jaar 2018 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
6. Actualiseren prognose bodemdaling.

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van deze 6 deelprocessen voor het rapportagejaar 2018.

2.1 Meten (stap 1)

2.1.1 Vlakdekkende metingen

Volgens het meetplan voor de Waddenzee zijn in 2018 GPS-metingen in de Waddenzee uitgevoerd op 26 clusters van peilmerken in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. Tevens is er een waterpassing uitgevoerd rondom het Lauwersmeer, zijn in het Lauwersmeer 8 peilmerken met GPS gemeten en zijn er nabij 8 ondergrondse merken rondom het Lauwersmeer, GPS-metingen verricht en met waterpassing aangesloten op het ondergrondse merk.

De GPS-metingen zijn in Referentie 8 beschreven en ook gerapporteerd in Referentie 20. De resultaten van de waterpassing zijn gerapporteerd in meetregister Noord-Nederland 2018, zie Referentie 21.

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

In Tabel 2-1 worden de reservoirdrukken getoond zoals gemeten in 2018 in de Waddenvelden Nes, Moddergat, Lauwersoog-Centraal, -Oost en -West. Tabel 2-2 toont de cumulatieve gasproductie per voorkomen op 31 december 2018, waarbij door afronding het totaal niet helemaal optelt tot de som der afzonderlijke velden.

Tabel 2-1; Reservoirdrukmetingen in 2018. Bij CITHP (Closed-in Tubing Head Pressure) metingen wordt de druk gemeten aan het oppervlak en geconverteerd naar reservoirniveau. Bij SPG (Static Pressure Gradient) metingen wordt de druk gemeten op reservoirniveau.

Voorkomen	Datum	Put	Gemeten druk (op reservoir niveau, bara)	Type meting
Nes	13/04/2018	MGT-2	165,9 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Nes	13/04/2018	MGT-3	166,3 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Nes	13/04/2018	MGT-4A	165,9 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Nes	26/09/2018	MGT-4A	159,4 (@ 3700 mTVDNAP)	SPG
Nes	13/04/2018	MGT-5	169,2 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Moddergat	13/04/2018	MGT-1B	160,0 (@ 3860 mTVDNAP)	CITHP
Lauwersoog-Centraal	16/04/2018	LWO-2	151,6 (@ 4035 mTVDNAP)	CITHP
Lauwersoog-Oost	13/04/2018	LWO-1B	157,6 (@ 4050 mTVDNAP)	CITHP
Lauwersoog-West	13/04/2018	LWO-3	128,7 (@ 4060 mTVDNAP)	CITHP
Vierhuizen-Oost	18/07/2018	VHN-1C	102,4 (@ 3850 mTVDNAP)	CITHP

Tabel 2-2; Productie per voorkomen tot en met 31/12/2018.

Voorkomen	Cumulatieve productie t/m 2018 (10 ⁶ Nm ³)	Productie volgens 2011 winningsplan in 2018 (10 ⁶ Nm ³)	Actuele productie in 2018 (10 ⁶ Nm ³)
Nes	10320	943	763
Moddergat	4334	184	233
Lauwersoog-C	130	3	7
Lauwersoog-West	1501	60	89
Lauwersoog-Oost	2134	87	125
Vierhuizen-Oost	1628	0	56
Totaal*	20046	1277	1272

*Afwijking van de actuele productie t.o.v. de winningsplan productie valt binnen de toegestane bandbreedte. Voor Vierhuizen-Oost is de periode voor planmatige winning verlengd tot 31 december 2024 voor een totale gasproductie tot maximaal 2605 miljoen Nm³ (zie <https://www.nlog.nl/sites/default/files/2019-02/Productievolumes%2014-1-2019.pdf>).

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 twaalfal permanente stations als vaste (statische) referentie gebruikt. De coördinaten van deze stations zijn voorafgaand aan de 2018 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.

2.2.1.1 GPS-referentie

In voorgaande Meet- en Regel cycli zijn de ondergrondse modellen gekalibreerd aan de hand van een GPS differentiestaat ten opzichte van één referentiepunt (Schiermonnikoog). De referentie-stations worden jaarlijks op stabiliteit gecontroleerd (Referentie 9). Het referentiestation Schiermonnikoog blijkt in opeenvolgende jaren kleine correcties te ondergaan, in totaal in 2018 4,6 mm in de verticaal – dit is meer dan 2-sigma van de GPS-metprecisie (~4 mm). Uit controle waterpassingen is niet gebleken dat het GPS-station Schiermonnikoog lokaal instabiel is en daarmee lijkt de daling van het station bepaald te zijn door oorzaken in de diepere ondergrond.

Aangezien het gebruik van GPS dubbel-differenties ten opzichte van een referentienetwerk robuuster is voor kleine veranderingen in individuele stations en dit ook de LTS-procedure is, zijn vanaf deze Meet- en Regel cyclus de GPS dubbel-differenties ruimtelijk ten opzichte van een referentie netwerk van meerdere stations gebruikt in de confrontatie met bodemdalingsmodellen.

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 18 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 dat:

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

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.

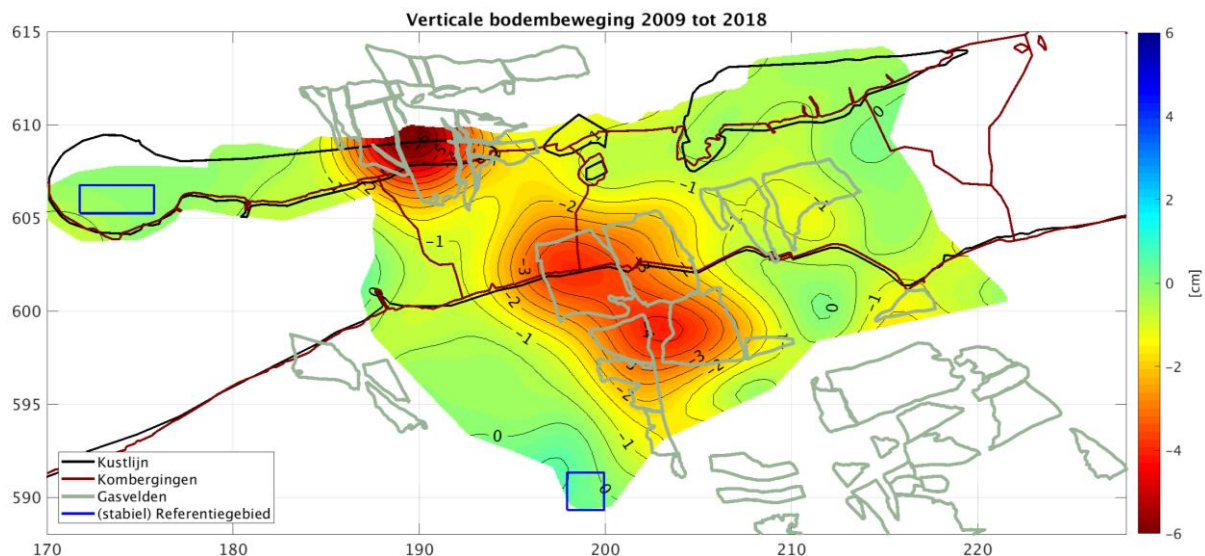
Tabel 2-3 geeft de analyse van de continue GPS-metingen op de locaties Ameland, Moddergat en Anjum, alsmede AGRS-station Ameland (bij Nes) en Ternaard. Voor de bepaling van de snelheid en bijbehorende standaardafwijking wordt rekening gehouden met de correlatie van hoogteschattingen in de GPS tijdserie. Het GPS-sigitaal in tijd wordt in Figuur 12 tot en met Figuur 16 getoond. Tevens zijn er in 2014 GPS-antennes geplaatst op de AWG en AME-productieplatforms. Deze metingen zijn sterk afhankelijk van temperatuurschommelingen, maar laten over de gehele meetperiode wel een licht dalende trend zien.

Tabel 2-3; Gemeten verticale beweging en bewegingssnelheid op de locaties m.b.v. continue GPS-metingen.

Locatie	Start Monitoring	Absolute verticale beweging sinds start monitoring t/m 31/12/2018 [mm]	Verticale bewegingssnelheid in 2018 [mm/jaar]
Ameland	05-02-2007	-78	-6,0 [$1\sigma = 1,0$ mm/jaar]
Anjum	05-02-2007	-43	-3,4 [$1\sigma = 0,7$ mm/jaar]
Moddergat	05-02-2007	-43	-6,3 [$1\sigma = 0,9$ mm/jaar]
Ameland-Nes	17-06-2014	-4	+0,4 [$1\sigma = 1,9$ mm/jaar]
Ternaard	19-11-2016	-5	-2,5 [$1\sigma = 0,6$ 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 18). Als resultaat kan voor elk tijdsinterval tussen 2009 en 2018 een continu oppervlak worden gevisualiseerd, dat de gemeten bodemdaling in dat tijdvak weergeeft (Figuur 1).



Figuur 1; Verticale bodembeweging tussen 2009 en 2018 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.

2.2.2.4 InSAR

Aan de differentiestaten van de waterpassingen zijn de InSAR (satelliet radar interferometrie) deformatie metingen toegevoegd (van opeenvolgende missies ERS, Envisat en Radarsat-2), berekend op de peilmerk locaties. Als InSAR tijdserie wordt per peilmerk de mediaan van de tijdseries van alle InSAR meetpunten binnen een 500 meter radius gehanteerd. De InSAR deformatie schattingen zijn berekend op basis van data over periodes van één jaar. De InSAR deformatiemetingen zijn hierdoor aangesloten op de waterpassingen. Het meenemen van de InSAR data in de LTS-procedure voor deze Meet- en Regel cyclus levert een waardevolle verdichting van bodemdalingsdata in tijd en ruimte op. De onzekerheid in de InSAR data is gemodelleerd als variantiematrix (zie 2.3.3.2.1).

2.3 Verifiëren prognose (stap 3)

2.3.1 Overzicht 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. Een belangrijk aspect van de ondergrondmodellering is het meenemen van de onzekerheden.

Allereerst zijn er de geologische of statische modellen. Deze beschrijven 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. Ook beschrijven de geologische modellen de eigenschappen van de gesteentes, zoals de porositeit en de permeabiliteit, en de diepte van het gas-water contact. Deze informatie komt voort uit petrofysische metingen gedaan in de putten, aangevuld met geologische inzichten (zoals de manier waarop de gesteentes zijn ontstaan). Onzekerheden in de geologische modellen die een rol spelen in voorspellingen van bodemdaling zijn bijvoorbeeld de

grootte van het gasvoorkomen en de doorlaatbaarheid van de breuken. Dit staat voor de Waddenvelden beschreven in Referentie 13 en voor het Ameland veld in Referentie 23. Hierin wordt o.a. beschreven in hoeveel putten er logs genomen zijn en gesteentekernen zijn onderzocht. Ook wordt in meer detail de depositionele omgeving omschreven waarin de sedimenten van het Ameland veld zijn afgezet (zogenaamde “damp en wet sand flats”) en de Waddenvelden zijn afgezet (zogenaamde dry sand flats).

Deze modellen worden vervolgens gedeeld met de reservoir engineer (zie sectie 2.3.2). Deze combineert de geologische modellen met de historische productiegegevens en drukmetingen in dynamische reservoirsimulatiemodellen om de modellen te kalibreren. Na kalibratie kunnen de simulatiemodellen de historische productiegegevens en gemeten drukken reproduceren. Om de onzekerheden mee te nemen die niet gereduceerd kunnen worden met behulp van de historische productiegegevens en drukmetingen, worden er verschillende realisaties van de reservoirmodellen gemaakt. Voorbeelden van resterende onzekerheden die worden meegenomen in de verschillende realisaties zijn de mate van communicatie tussen het gasvoorkomen en het aquifer en de hoeveelheid gas in het aquifer. Op basis van de gekalibreerde modelrealisaties kan vervolgens voorspeld worden hoeveel gas gewonnen kan worden en wat de verwachte drukdaling zal zijn in het gasvoorkomen en in de aquifers.

Deze drukprognoses worden ten slotte in de bodemdalingsmodellen gebruikt om de compactie te berekenen van het gesteente en de daarmee gepaard gaande bodemdaling. Geodetische metingen of bodemdalingsmetingen worden gebruikt om geomechanische modellen te valideren en te kalibreren (zie sectie 2.3.3). Ook in deze stap worden vele scenario's gemaakt om de onzekerheden mee te nemen.

Regelmatig vindt er overleg plaats tussen de disciplines om mogelijke afwijkingen tussen meetresultaten en modellen te verklaren, zodat er een goede integratie is tussen de disciplines en hun modellen.

2.3.2 Verifiëren reservoirmodellen (stap 3a)

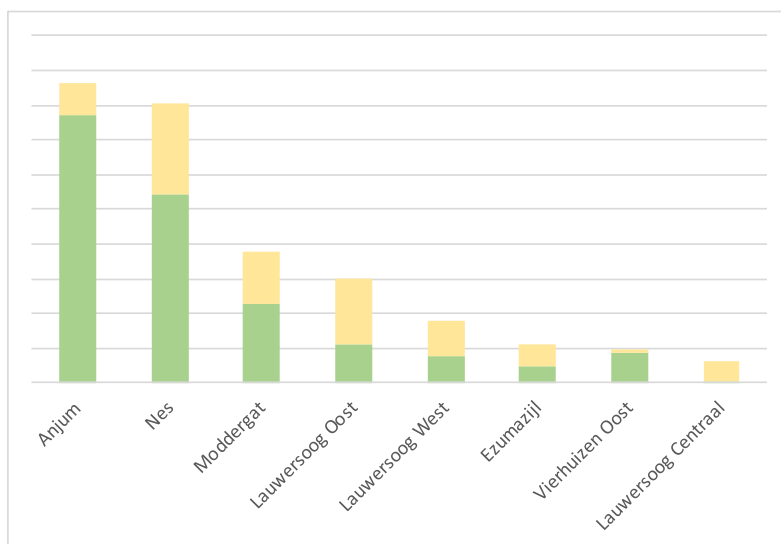
Om de drukdaling in de diepe ondergrond als gevolg van gasproductie te voorspellen zijn gedetailleerde driedimensionale modellen gemaakt voor de

- Ameland voorkomens (Ameland-Oost en Ameland-Westgat),
- Wadden voorkomens (Lauwersoog-Centraal, Lauwersoog-Oost, Lauwersoog-West, Moddergat, Nes en Vierhuizen-Oost), en
- Anjum voorkomens (Anjum, Ezumazijl, Metslawier).

In deze modellen wordt alle beschikbare data geïntegreerd. Een overzicht van de data en welke informatie ze geven is gepresenteerd in Tabel 2-4. Vervolgens wordt met deze reservoirmodellen gesimuleerd hoe de druk als gevolg van gasproductie verloopt in de tijd. De gemeten drukken kunnen dan vergeleken worden met de drukken die berekend zijn door de modellen en zo nodig kunnen de modellen worden aangepast (i.e. gekalibreerd). Omdat bijvoorbeeld de Wadden en Anjum velden gemiddeld al 70% van het gas hebben geproduceerd (zie Figuur 2), is er veel data beschikbaar en daarom kan verwacht worden dat de drukvoorspellingen die zijn gegenereerd door de modellen niet veel zullen variëren van jaar op jaar.

Tabel 2-4; Overzicht van de data die zijn gebruikt om de modellen te maken die de drukvoorspellingen geven.

Data ...	... geven informatie over ...
Seismische en geologische data	Geometrie, gesteentelagen, locatie van breuken, regionale variaties in eigenschappen
Gesteentekernen (24)	Porositeit, absolute en relatieve permeabiliteit, compressibiliteit
Logs gemeten in putten (~60)	Porositeit, saturatie en gas-watercontact, capillaire druk, druk per reservoir eenheid
Gas en water PVT-analyse	Compositie, gas expansiefactor
Reservoirdrukken (jaarlijks)	Porositeit, perm, relatieve permeabiliteit, compressibiliteit, doorlatendheid van breuken
Hoeveelheden geproduceerd gas en water (jaarlijks)	Porositeit, perm, relatieve permeabiliteit, compressibiliteit



Figuur 2; Geproduceerde gasvolume (groen) t.o.v. initieel aanwezige gasvolume (totale lengte van de kolom).

Om de onzekerheden mee te nemen, zijn voor elk veld *meerdere* reservoirmodellen gemaakt, die elk het historische gedrag zoals de historisch gemeten drukken kunnen voorspellen, maar zeer verschillende voorspellingen van de toekomstige drukken geven. Reservoirparameters waarvan de onzekerheid wordt meegenomen zijn:

- Reservoirvolume en -geometrie (incl. porositeit en saturatie)
- Breukdoorlatendheden
- Gas-Water contact
- Hoeveelheid gas in aquifer(s)
- Permeabiliteit verticaal
- Permeabiliteit horizontaal
- Permeabiliteit in aquifer(s)
- Relatieve permeabiliteit

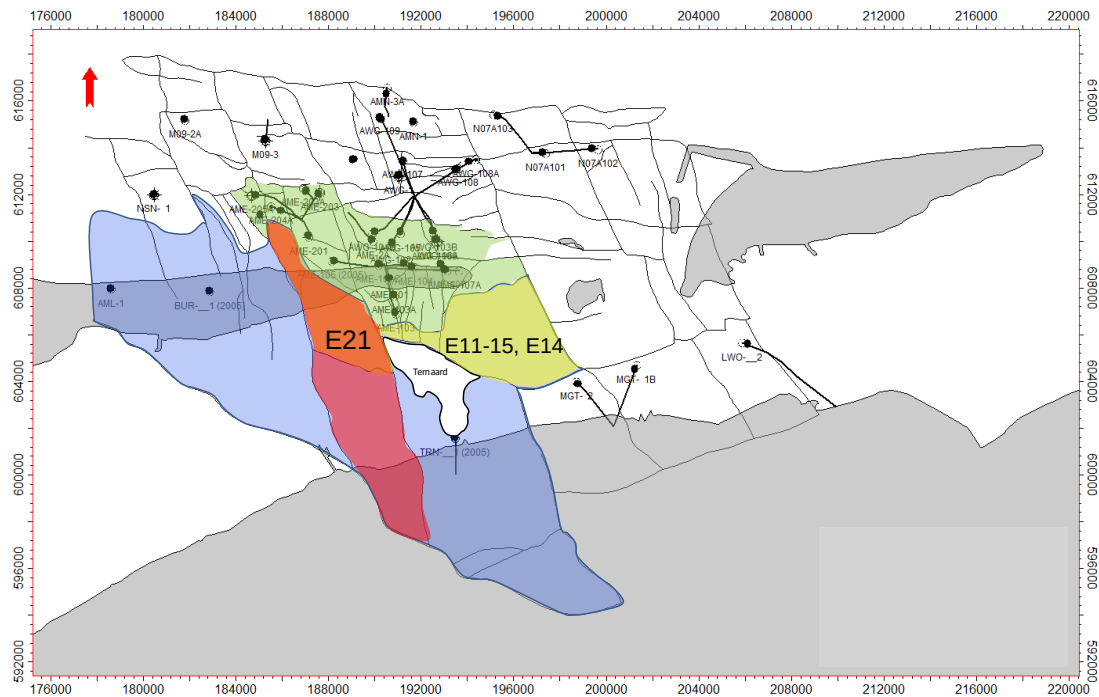
Op basis van de metingen is voor elke reservoirparameter een range bepaald. Dit wordt uitgebreid beschreven in Referentie 13 voor de Wadden en Anjum velden en Referentie 14 voor het Ameland veld.

Uit deze gegevens kan ook afgeleid worden of er communicatie kan zijn tussen bepaalde voorkomens die begrensd worden door breuken. Als bijvoorbeeld voorkomens hun eigen initiële gas-water contact en initiële druk hebben, kan afgeleid worden dat in de geologische tijd er geen communicatie was tussen de voorkomens. Ook een groot verzet van een breuk kan voorkomen dat er communicatie mogelijk is tussen reservoirs aan weerszijden van de breuken. Als vervolgens, na jarenlange productie van een voorkomen, de reservoirdruk gelijk blijft in een naastgelegen voorkomen dat nog niet in productie genomen is, wordt ook bevestigd dat er geen communicatie is tussen de voorkomens tijdens de productiefase.

Onzekerheden die gereduceerd kunnen worden met de historische drukmetingen zijn voornamelijk de grootte van het gasvoorkomen en de permeabiliteit in het gasvoorkomen zelf. Dit zijn met andere woorden de parameters die gevoelig zijn voor de historische drukmetingen. Design of Experiments (DoE) in combinatie met Monte Carlo is de methode die is toegepast om modelrealisaties te vinden die maximaal van elkaar verschillen in de ongevoelige parameterwaarden en toch de historische metingen kunnen reproduceren.

Om de onzekerheden mee te nemen die *niet* gereduceerd kunnen worden met behulp van de historische productiegegevens en drukmetingen, worden er verschillende realisaties van de reservoirmodellen gemaakt. Resterende onzekerheden die worden meegenomen in de verschillende realisaties zijn:

- De hoeveelheid gas in het aquifer, zogenaamd paleo-residueel gas. Deze parameter beïnvloedt hoe de druk in het aquifer reageert. Bij de aanwezigheid van meer paleo-residueel gas in de aquifer zal de druk minder dalen na gasproductie, omdat het gas in de aquifer uitzet bij drukdaling.
- De mate van communicatie tussen het gasvoorkomen en het aquifer. De permeabiliteit in de aquifer bepaalt hoe de druk kan dalen in de aquifer(s). Voor de Anjum en Wadden velden is de locatie van de aquifers eenduidiger door de seismische, geologisch en drukdata (zie hierboven en Referentie 19). Voor het Ameland veld is de permeabiliteit in de zuidwestelijke aquifer E21 en zuidoostelijke aquifer E11-15 en E14 (zie de rode en gele gebieden in Figuur 3) gevarieerd om de bodemdaling ten zuiden van Ameland te verklaren. De blauwe aquifers in Figuur 3 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. Hieruit zijn drie LTS-II realisaties voortgekomen, uitgebreider beschreven in Referentie 14 en Referentie 7. Dit jaar zijn de drukmetingen uit 2018 vergeleken met de drukprognoses en hieruit blijkt dat er geen aanpassingen in de modellen nodig zijn.



Figuur 3; Laterale aquifers van het Ameland voorkomen (rood en geel).

Om een goed bereik van de drukvoorspellingen te krijgen wordt met name de permeabiliteit van de aquifer en de paleo-gassaturatie gevarieerd. Andere parameters zijn zodanig aangepast dat de drukmetingen in overeenstemming zijn met de gesimuleerde drukken. Dit is uitgebreid beschreven in Referentie 13, Referentie 14 en Referentie 19. Dit heeft geresulteerd in drie modelrealisaties die de historische metingen tot en met 2018 kunnen reproduceren en verschillende drukvoorspellingen van met name de aquiferdruk geven (zie ook Tabel 2-5):

- een aquifer waarvan het water niet mobiel is, waardoor vooral de druk daalt in het gasreservoir en nauwelijks in de aquifer. Dit is de lage modelrealisatie².
- een aquifer waarvan het water beperkt mobiel is en daardoor de druk in de aquifer minder snel daalt, ook door de aanwezigheid van paleo-residueel gas. De waarden van paleo-residueel gas zijn in overeenstemming met de waarden zoals gemeten in de putten. Dit resulteert in de basis modelrealisatie.
- een aquifer die volledig mobiel is, waardoor zowel de druk daalt in het gasreservoir en in de aquifer, resulterend in meer bodemdaling. Dit is de hoge modelrealisatie.

De parameterwaarden van deze realisaties vallen binnen de gemeten waarden en hun onzekerheidsbereik. De waarden van bijvoorbeeld de porositeit vallen binnen de grenzen van de gemeten porositeiten in de petrophysische logs en de gesteentekernen, en er zijn geen onfysische porositeiten (van bijv. meer dan 30%) gebruikt om de modellen te kalibreren. Ook de combinatie van parameterwaarden zijn realistisch. De gemodelleerde correlatie tussen bijvoorbeeld de porositeit en de gassaturatie zijn in overeenstemming met fysische principes en de metingen in de putten. Daarmee zijn de parameterwaarden fysisch goed onderbouwd.

Zoals gezegd, de drukmetingen in de putten (zie Tabel 2-1) zeggen iets over de drukken in het gasvoorkomen in voornamelijk de bovenste reservoirlagen. Deze drukken kunnen door de drie realisaties goed worden gereproduceerd. De drukken in de watervoerende lagen verder weg van de putten, waar geen directe metingen zijn, laten grotere verschillen zien tussen de drie realisaties. Voor

² De termen hoog en laag worden gekozen op basis van de invloed dat het betreffende scenario op het totale bodemdalingsvolume

alle velden zijn de drukvoorspellingen in de aquifers voor de lage modelrealisatie het hoogst en voor de hoge modelrealisatie het laagst. Zie bijvoorbeeld voor Moddergat in hoofdstuk 2 in Referentie 19 de drukken zoals voorspeld in de put en ook als voorspeld in de diepere lagen die water bevatten. Als de gemodelleerde aquiferdrukken nog lager zouden worden, dan zouden ofwel de drukken zoals gemeten in de put niet meer gereproduceerd kunnen worden, ofwel de parameterwaarden zouden niet meer fysisch te onderbouwen zijn.

Tabel 2-5; Overzicht van de opgestelde realisaties.

Voorkomen	Realisatie	Paleo-residueel gas (%)	Permeabiliteits-factor aquifer
Ameland ³	Laag (M9201)	10	0,01 (E21) & 0,001 (E11-15)
	Basis (M96)	5	0,1 (E21) & 1 (E11-15)
	Hoog (M102)	0	0.1 (E21) & 1 (E11-15)
Anjum	Laag	0	0,0001
	Basis	6	0,1
	Hoog	0	1
Ezumazijl	Laag	0	0,0001
	Basis	17	0,1
	Hoog	0	1
Lauwersoog-C	Laag	0	0,0001
	Basis	24	0,1
	Hoog	0	1
Lauwersoog-Oost	Laag	0	0,0001
	Basis	23	0,1
	Hoog	0	1
Lauwersoog-West	Laag	0	0,0001
	Basis	21	0,3
	Hoog	0	1
Metslawier	Laag	0	0,0001
	Basis	8	0,1
	Hoog	0	1
Moddergat	Laag	0	0,0001
	Basis	20	0,3
	Hoog	0	1
Nes ⁴	Laag	16	0,3
	Basis	16	0,3
	Hoog	16	1,0
Vierhuizen-Oost	Laag/basis	16	0,3
Vierhuizen-Oost	Hoog	0	1

³ GPS-metingen zijn gebruikt om de drukdaling in het zuidwestelijke aquifer (E21) en zuidoostelijke aquifers (E11-15 en E14 in Figuur 3) te kalibreren (Referentie 14).

⁴ De aquiferdruk voor Nes is ook gekalibreerd aan de RFT-drukmetingen in MGT-3, MGT-4A & MGT-5 op het moment dat deze putten geboord werden. De vermenigvuldigingsfactor van de verticale permeabiliteit tussen gasreservoir en aquifer is respectievelijk 0.03, 0.3 en 1 voor de lage, basis en hoge realisatie.

Om drukprognoses te maken wordt een gaswinningsprognose gebruikt. Deze is dit jaar voor enkele velden naar beneden bijgesteld, doordat nieuwe putten zoals in Moddergat en Lauwersoog niet meer in het plan zitten. Ook loopt de productie van enkele velden zoals het Nes veld sneller terug dan verwacht. Tabel 2-6 toont de jaarlijkse productie per voorkomen die is gebruikt om per voorkomen de druk te voorspellen.

Tabel 2-6; Voorgenomen productie (miljoen Nm³ per jaar) per voorkomen.

Jaar	Moddergat	Nes	Lauwersoog-Oost	Lauwersoog-West	Lauwersoog-C	Vierhuizen-Oost
2019	200	611	115	73	6	10
2020	174	483	108	70	5	-
2021	159	389	104	62	3	-
2022	144	324	99	57	3	-
2023	128	275	92	52	2	-
2024	117	237	88	48	1	-
2025	106	208	83	44	1	-
2026	96	184	79	41	1	-
2027	86	140	74	37	-	-
2028	76	85	70	23	-	-
2029	68	68	66	-	-	-
2030	60	61	63	-	-	-
2031	54	54	59	-	-	-
2032	49	49	57	-	-	-
2033	44	23	54	-	-	-
2034	39	15	51	-	-	-
2035	34	12	44	-	-	-
Totaal	1634	3217	1307	507	21	10

2.3.3 Verifiëren bodemdalingsscenario's (stap 3b)

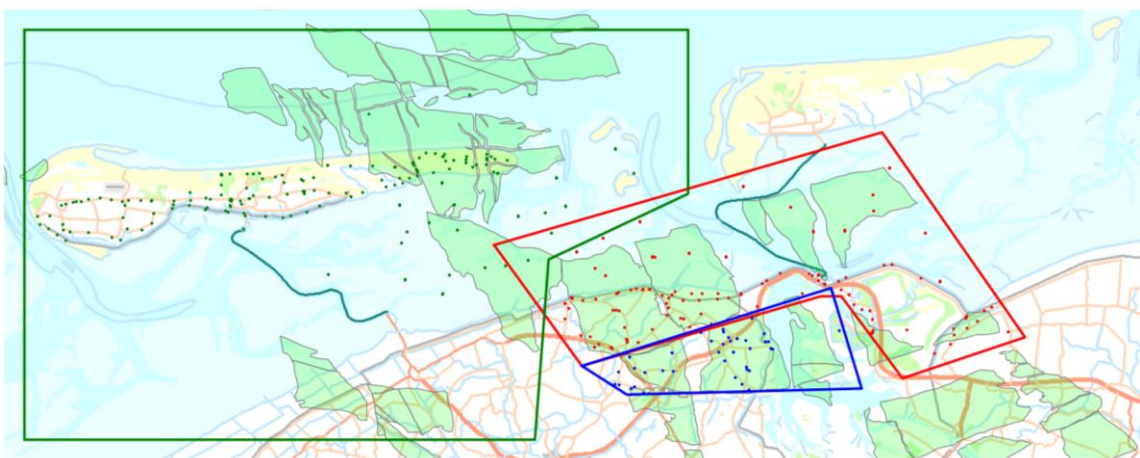
De bodemdalingberekeningen werden tot en met het rapportagejaar 2016 uitgevoerd met het eindige elementen programma "Geomec", een Shell-applicatie die gebaseerd is op DIANA (<http://tnodiana.com>). In de LTS-II studie is aangetoond (Referentie 14) dat resultaten van de analytische modellen zeer goed overeenkomen met de resultaten die berekend worden door Geomec, met als grote voordeel dat deze analytische modellen een veel kortere rekentijd hebben met als bijkomend voordeel dat ze ook geschikt zijn om de compactie met het RTCiM (Rate type compaction model, Referentie 12) 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 bodemdalingberekeningen zijn op dezelfde wijze uitgevoerd als in de LTS-II studie. (Referentie 14). 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 dat de drukdaling het niveau van de hydrostatische druk bereikt zal de compactie zich gedragen volgens het reguliere RTCiM model (Referentie 12). De kruip van het zout boven het compacterende reservoir is gesimuleerd door de toepassing van een "bewegend" rigid basement proxy (Referentie 15), gekalibreerd aan de Geomec parameters.

De modelering in de LTS-II studie betrof alleen het Ameland veld. 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, zie Sectie 2.3.2).

2.3.3.1 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, is gebruik gemaakt van de LTS-II aanpak waarbij er 50.000 scenario's (zie ook Bijlage 5 Berekening van benodigde aantal Monte Carlo simulaties) zijn doorgerekend op basis van de reservoirrealisaties en de onzekerheid in de waarden voor de invoergegevens in de bodemdalingsmodellen. Net zoals in de vorige M&R-cyclus zijn er drie kalibratiegebieden, nl. Ameland, Anjum en Waddenzee (Figuur 4) gedefinieerd waar per kalibratiegebied de geomechanische parameters zijn gevarieerd.



Figuur 4; Kalibratiegebieden met gebruikte geodetische metingen. De meetpunten in het overlapgebied tussen de Waddenzee velden en Ameland worden bij de confrontatie voor beide modellen gebruikt.

Het geomechanische model omvat de drie gebieden als geheel zodat ook de overlappende bodemdalingssommen goed in de kalibratie worden meegenomen. Volgens de LTS-II methode worden, voor de velden in ieder deelgebied, willekeurige waarden gekozen voor de invoerparameters per bodemdalingsscenario in combinatie met de drie reservoirrealisaties. Deze procedure wordt dan 50.000 keer herhaald waarbij elk scenario vergeleken wordt met de geodetische waarnemingen in elk kalibratiegebied.

2.3.3.2 Geodetische componenten bij het verifiëren van de bodemdalingsscenario's

De geodetische metingen worden in de LTS-studie (Referentie 14) geconfronteerd met bodemdalingsmodellen op het niveau van dubbel-differenties ('double-differences'): dubbele verschilmetingen in ruimte en tijd. Deze paragraaf geeft uitleg over de toepassing van LTS-componenten op geodetisch gebied in de 2018 Meet- en Regel cyclus:

- de constructie van de covariantiematrix van de geodetische dubbel-differenties voor de drie deelgebieden zoals gedefinieerd in paragraaf 2.3.3.1;
- de keuze betreffende het gewicht van de GPS-punten in de Waddenzee.

Dubbel-differentie (“double-difference”)

Bodemdaling, of *subsidence*, wordt gemeten door de hoogte van peilmerken ten opzichte van elkaar in millimeters te meten. In de LTS procedure wordt gebruikt gemaakt van dubbele verschilmetingen, ook aangeduid met “double-differences”. Het dubbele verschil is de verandering van hoogteverschil tussen twee peilmerken over een bepaalde tijdsperiode ten opzichte van elkaar.

2.3.3.2.1 Constructie van de covariantiematrix van geodetische dubbel-differenties

In de LTS-toepassing voor deze Meet- en Regel cyclus is de volgende geodetische data gebruikt:

- Waterpassingen Ameland eiland: t/m 2017.
- Waterpassingen vasteland Noord-Nederland: t/m 2018.
- GPS-metingen: campagne (Waddenzee) en jaarlijkse sampling van de continue stations (Ameland, productieplatformen en op het vasteland): t/m 2018.
- InSAR: op het vasteland, jaarlijks gesampled op peilmerklocaties.

Voor de waterpassingen op Ameland eiland en de GPS-metingen is een volle (waarden anders dan nul op alle plaatsen in de matrix) covariantiematrix bepaald volgens de procedure uit de LTS-studie (Referentie 14). In de bepaling van deze covariantiematrix wordt rekening gehouden met de volgende stochastische componenten:

- Meetprecisie,
- Idealisatie precisie – temporele component (potentiële peilmerkinstabiliteit),
- Idealisatie precisie – spatio-temporele component (bv. bodembeweging door ondiepe processen),
- Model-imperfecties – spatio-temporele component.

Variantie

De variantie is in de statistiek een parameter die aangeeft wat de spreiding is van de waarde van een variabele (bijvoorbeeld een gemeten hoogteverschil). De variantie is het kwadraat van de standaardafwijking van de variabele.

Covariantie

De covariantie is in de statistiek een parameter die aangeeft in hoeverre twee variabelen, bijvoorbeeld twee metingen van de bodemdaling, met elkaar samenhangen. Bij een meting van de bodemdaling neemt de samenhang af, als de afstand tussen twee metingen toeneemt. Ook neemt de samenhang tussen twee metingen aan hetzelfde peilmerk af, als de tijd tussen twee metingen toeneemt.

Idealisatieprecisie

De mate waarin de beweging van de peilmerken het onderzochte signaal beschrijft. In deze studie gaat het om het signaal van bodemdaling door gasproductie. Ondiepe signalen door bijvoorbeeld grondwater extractie kunnen de beweging van een peilmerk beïnvloeden, maar deze beweging is niet gerelateerd aan het onderzochte signaal.

Model-imperfecties

Het model beschrijft hoe drukdaling door gasproductie bodemdaling veroorzaakt. Een model is echter altijd een vereenvoudiging van de complexe werkelijkheid. De elementen die niet in het model zijn opgenomen kunnen leiden tot een andere voorspelling van de bodemdaling

Voor de Ameland waterpassingen zijn de stochastische parameters exact toegepast zoals gedefinieerd in de LTS-studie. Het is gebleken dat naast de meetprecisie en de temporele component

van de idealisatie precisie, ook de spatio-temporele component nodig is om toetsgrootheden in de orde van de verwachtingswaarde (χ^2 is ongeveer 1) te behalen in de confrontatie met bodemdalingsmodellen.

Voor de waterpassing en InSAR dubbel-differenties op het vasteland zijn keuzes gemaakt voor de covariantiematrix in deze Meet- en Regel cyclus, op basis van de volgende overwegingen:

- Voor InSAR is nog geen procedure beschikbaar om een volle covariantiematrix te construeren voor jaarlijks gesampelde deformatieschattingen op basis van InSAR meetpunten in de nabijheid van peilmerklocaties. Dit is onderdeel van een geodetische studie in het kader van het Groningen winningsplan die NAM in 2018/2019 uitvoert in samenwerking met TU Delft.
- De peilmerk stabiliteitsanalyse van de waterpasdata van Noord-Nederland tot en met de meetcampagne van 2018 is ten tijde van deze Meet- en Regel cyclus nog niet afgerond. Terwijl de meest recente waterpassingen in de LTS-procedure van deze Meet- en Regelcyclus wél zijn meegenomen, is de selectie van betrouwbare peilmerken gebaseerd op een eerdere stabiliteitsanalyse, die in het kader van het meetregister Noord-Nederland 2014 is gepubliceerd.

Voor de dubbel-differenties op het vasteland van zowel InSAR als waterpassing is een vereenvoudigd stochastisch model gebruikt met enkel de varianties van de dubbel-differenties, waarbij de meetprecisie en de temporele component (potentiële peilmerkinstabiliteit) als volgt zijn gemodelleerd:

Variantiemodel voor dubbel-differenties waterpassing (met ds de afstand tussen de twee meetpunten):

$$\sigma^2 = 2 \cdot \left(0,8^2 \frac{\text{mm}^2}{\text{km}} \cdot ds + 4 \text{ mm}^2 \right)$$

Variantiemodel voor dubbel-differenties InSAR:

$$\sigma^2 = 2 \cdot (4^2 \text{ mm}^2 + 4 \text{ mm}^2); \sigma = 6,3 \text{ mm}$$

Voor de idealisatie precisie is een vaste variantie van 4 mm^2 voor een meetpunt aangehouden (corresponderend met een standaardafwijking van 2 mm). Toepassing van de vereenvoudigde (co)variantiematrix in de confrontatie met bodemdalingsmodellen in de LTS-procedure leverde voor het deelgebied dat het vasteland bestrijkt (deelgebied Anjum), een waarde van de minimale χ^2 toetsgrootheid in de orde van de verwachtingswaarde 1.

χ^2 toetsgrootheid

Iedere modelberekening van de bodemdaling wordt vergeleken met de geodetische dubbel-differenties. Deze confrontatie wordt gedaan door een computerprogramma dat een score voor de mate van overeenkomst (de χ^2 toetsgrootheid) tussen de modelberekening en de geodetische dubbel-differenties berekent. Indien de modelberekening overeenkomt met de geodetische dubbel-differenties binnen de gemodelleerde onzekerheden is de verwachte waarde van de χ^2 toetsgrootheid 1.

2.3.3.2.2 Toetsing en het gewicht van GPS-punten in de Waddenzee

Omdat de GPS-punten in de Waddenzee essentieel zijn voor de bepaling van de bodemdaling in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag, is in deze Meet- en Regelcyclus extra aandacht besteed aan de toetsing en het gewicht van GPS-punten in de Waddenzee.

In de LTS-studie (Referentie 14) is een geodetische toetsing uitgevoerd van de GPS-waarnemingen op basis van de relatieve hoogtes tussen de peilmerken in een GPS-cluster. In deze meet- en regelcyclus is dezelfde geodetische toetsing uitgevoerd, maar dan met inachtneming van statistisch

verklaarbare autonome peilmerkbewegingen. Dit heeft geleid tot minder verwerpingen van GPS-waarnemingen. Naast de 45 waarnemingen uit 2006 van de toen net nieuw geplaatste 'M'-punten (bekende initiële instabiliteit), zijn slechts 13 waarnemingen over het tijdvak 2006-2018 verworpen (nog geen 2% van het totaal). In de LTS-procedure van deze Meet- en Regel cyclus zijn dus vrijwel alle waarnemingen van de GPS wadpunten meegenomen.

Vervolgens is een selectieve modelconfrontatie gedaan op enkel de waarnemingen van de GPS-wadpunten. Dit leidde tot een minimale χ^2 toetsgrootheid waarde van 0,31, ver beneden de verwachtingswaarde van 1. Dit duidt op een te pessimistisch gekozen kansmodel: m.a.w. de metingen hebben in werkelijkheid een hogere precisie dan gemodelleerd in de covariantiematrix. Deze lage verwachtingswaarde van de minimale χ^2 toetsgrootheid is ook te zien in Bijlage 4 van de rapportage van de Meet- en Regel cyclus 2017, voor de toetsgrootheden uit de selectieve confrontatie voor de Ameland bodemdalingsscenario's op basis van alleen de GPS-wadpunten. In de Meet- en Regelcyclus over 2018 is voor de GPS dubbel-differenties daarom een confrontatie uitgevoerd met alleen de meetprecisie gemodelleerd in de covariantiematrix. Dit leverde een minimale χ^2 toetsgrootheid van 1,2 die dicht bij de verwachtingswaarde van 1 ligt. Door alleen de meetprecisie te modelleren in de covariantiematrix voor de GPS dubbel-differenties, wordt impliciet meer gewicht gegeven aan deze punten.

Met de keuzes voor constructie van de covariantiematrix zoals beschreven in deze bijlage, zijn de minimale χ^2 toetsgrootheden in de confrontatie met de bodemdalingsmodellen voor de deelgebieden zoals gedefinieerd in paragraaf 2.3.3.1 als volgt:

Deelgebied	Minimale χ^2 toetsgrootheid confrontatie
Ameland	1,30
Waddenzee	1,22
Anjum	0,96

Ter vergelijking, de minimale χ^2 toetsgrootheid in de LTS-studie voor Ameland (Referentie 14) was 1,23.

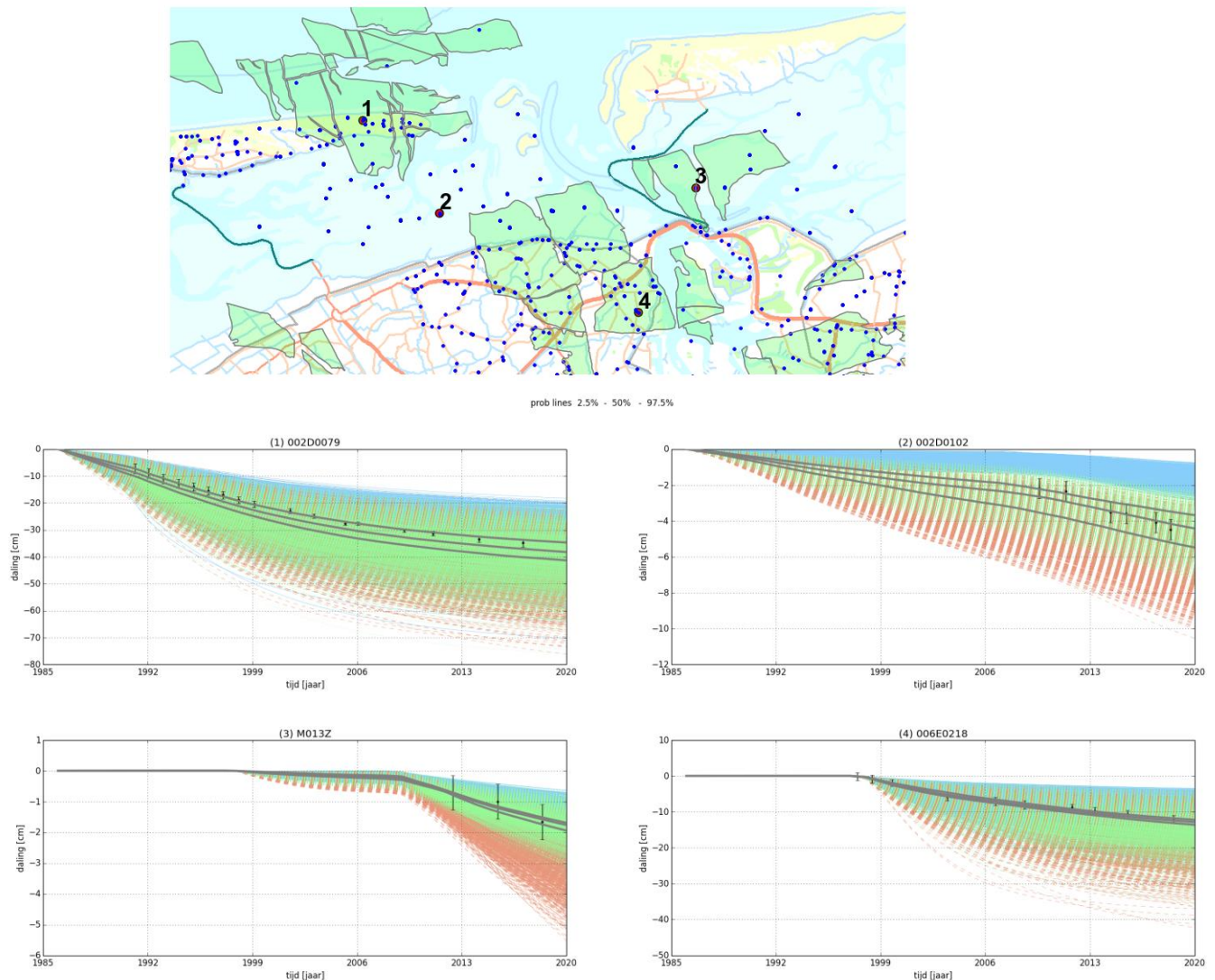
2.3.3.3 Confrontatie bodemdalingsscenario's en geodetische data

Per kalibratiegebied wordt voor elk scenario de passing van het scenario met de metingen uitgedrukt in een waarde voor de χ^2 toetsgrootheid. De passing van het model met de data is beter naarmate de waarde voor χ^2 toetsgrootheid kleiner wordt waarbij de waarschijnlijkheid van het betreffende scenario groter wordt. Op deze manier kan er per deelgebied een rangschikking worden gemaakt van de waarschijnlijkheid van de scenario's. Per jaar en per parameter (zoals bv. bodemdaling op een punt, de Cm waarde en bodemdalingvolume) kunnen hiermee de statistische waarden zoals gewogen gemiddelde en betrouwbaarheidsinterval worden afgeleid.

Het nadeel van deze methodiek is dat de statistische waarden uit een compositie bestaan van vele deterministische scenario's, waardoor deze niet gekoppeld kunnen worden aan individuele sets van parameterwaarden. Om ervoor te zorgen dat de probabilistische resultaten gekoppeld kunnen worden aan deterministische scenario's, zijn er scenario's gekozen die zo dicht mogelijk, in tijd en plaats, bij de statistische waarden (gewogen gemiddelde, P2,5, P97,5) liggen. Dit maakt de koppeling naar parameterwaarden inzichtelijker en het vergelijk met bijvoorbeeld een geodetische ruimte-tijd analyse eenvoudiger (Figuur 6).

Figuur 5 laat zien hoe de methodiek werkt voor een viertal punten. Op elk van de punten worden alle mogelijke (a priori) bodemdalingsscenario's weergegeven, waarbij de kleur van de lijnen aangeeft welke reservoirrealisatie gebruikt is, i.e. groen voor de basis, blauw voor de lage en rood voor de hoge realisatie. Omdat de lijnen, die gebaseerd zijn op de basisrealisatie, als laatste zijn geplot, zijn

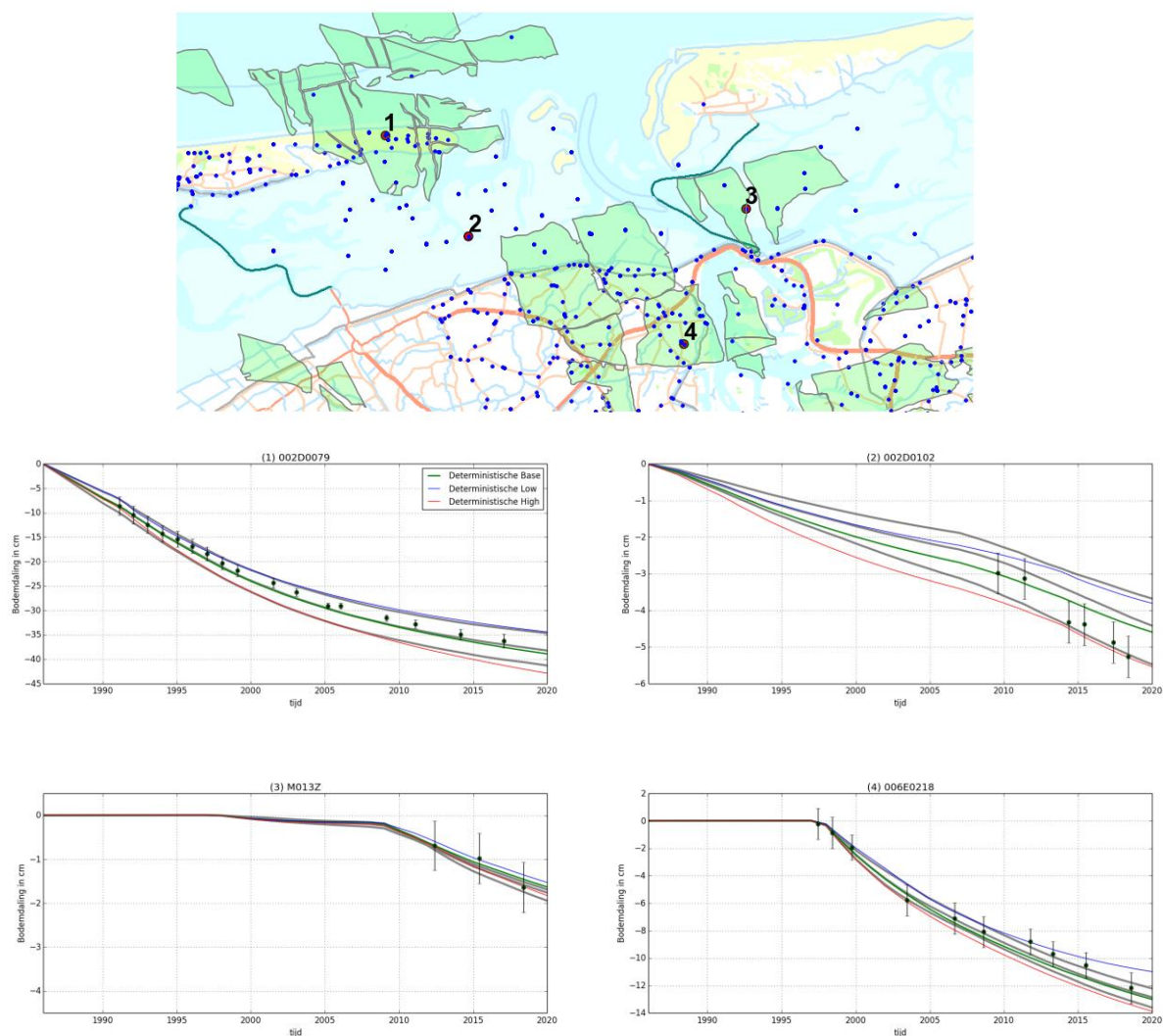
er in de figuren sommige onderliggende blauwe en rode lijnen minder goed zichtbaar. In dit figuur zijn ook de statistische bodemdalingslijnen voor de 2,5%, het gewogen gemiddelde en 97,5% kans geplot. Tevens is de gemeten bodemdaling, met onzekerheid, als punten weergegeven in de grafieken.



Figuur 5; Bodemdaling op 4 punten voor alle a priori scenario's. De groene lijnen geven de bodemdaling, berekent volgens de basis reservoirrealisatie weer, de blauwe volgens de lage realisatie en de rode volgens de hoge realisatie. De grijze lijnen geven de statistische waarden 2,5% gewogen gemiddelde en 97,5% voor de bodemdaling weer. De punten geven de waarden voor de waterpasmetingen aan, inclusief de onzekerheid (2-sigma).

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

De geomechanische parameters voor het laag, basis en hoog bodemdalingsscenario volgen uit de deterministische scenario's die dicht bij de 2,5%, gewogen gemiddelde en 97,5% statistische waarden liggen. Bij het selecteren van deze scenario's is nagestreefd dat de variatie voor de parameterwaarden tussen de gebieden beperkt blijft. Figuur 6 toont de gekozen deterministische scenario's ten opzichte van de statistische lijnen voor de punten die ook in Figuur 5 zijn gebruikt. In Bijlage 4 Tijdseries Waddenzee) zijn de tijdseries in de Waddenzee getoond voor meerdere punten.



Figuur 6; Bodemdaling versus tijd voor 4 meetpunten. In de grafieken zijn zowel de statistisch afgeleide waarden (grijze lijnen) te zien als de deterministische gekozen scenario's. (groen, blauw en rood). De groene punten zijn de geodetische waarnemingen met hun onzekerheden (2-sigma).

Op basis van deze methodologie zijn de parameterwaarden geselecteerd voor de drie scenario's (zie Tabel 2-7). De C_{mref} , C_{md} en b zijn RTCiM parameters die het compactiegedrag van het reservoir beschrijven 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 porositeit⁵. 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. De waarden voor Anjum en de Waddenzee velden liggen dicht bij de gemiddelde C_m – porositeitsrelatie. Dit verschil in waarden voor de passende C_m tussen Ameland en de overige gasvelden bestaat al sinds de start van de M&R-rapportages, zonder dat er een verklaring voor gevonden is.

Voor de beschrijving van het zoutgedrag liggen de waarden voor $C/k(0)$, $d(c/k)$ en T_{salt} dicht bij elkaar en komen goed overeen met de 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 14.

⁵ De gebruikte porositeits (Φ) - 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} bar^{-1} is en de porositeit (Φ) in [-].

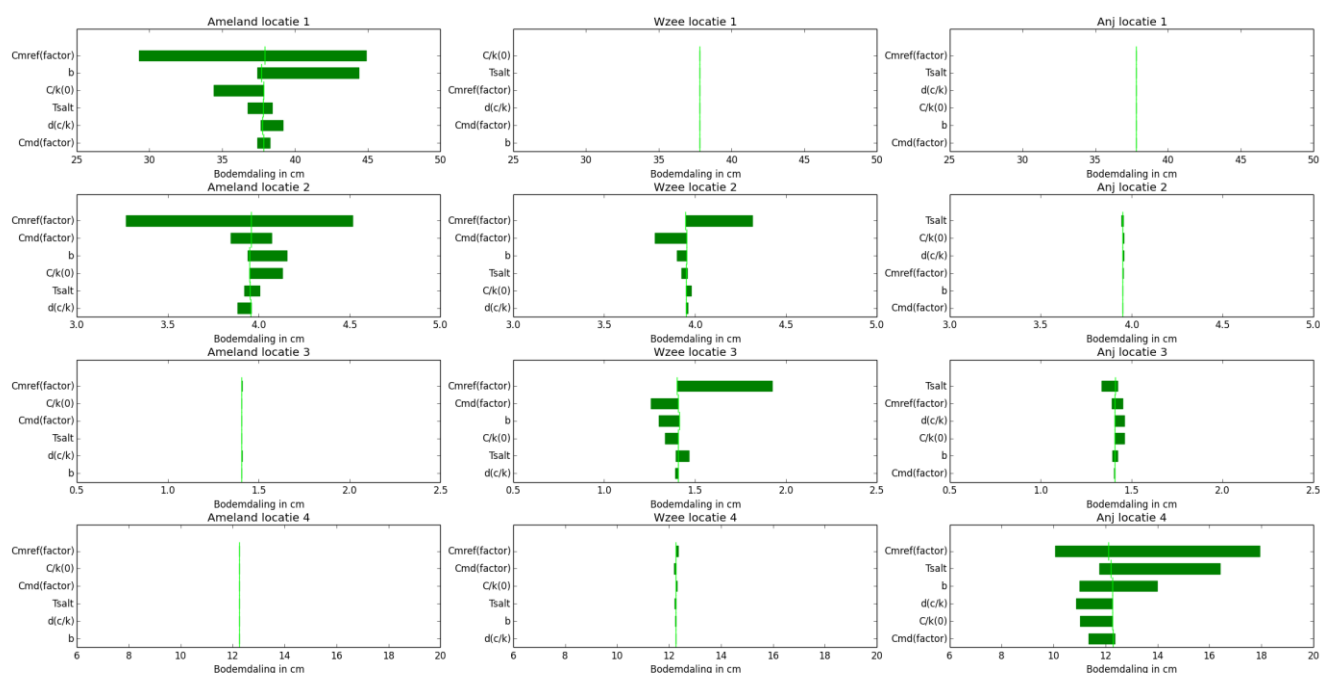
Tabel 2-7; gebruikte geomechanische parameters voor respectievelijk het laag, basis en hoge bodemdalingsscenario.(alle scenario's maken gebruik van het basis reservoirrealisatie)

RTCiM	Ameland	Anjum	Waddenzee
C_{mref} (factor) [-]	2,2 – 2,82 – 3,3	0,84 – 1,01 – 1,45	1,17 – 1,17 – 1,62
C_{md} (factor)[-]	0,50 – 0,62 – 0,71	0,38 – 0,44 – 0,51	0,26 – 0,41 – 0,34
b [-]	0,018 – 0,026 – 0,026	0,015 – 0,022 – 0,029	0,014 – 0,013 – 0,015
Zoutgedrag			
$C/k(0)$ [-]	0,83 – 0,83 – 0,77	0,79 – 0,84 – 0,83	0,75 – 0,80 – 0,77
$d(c/k)$ [-]	0,22 – 0,20 – 0,24	0,19 – 0,30 – 0,28	0,19 – 0,25 – 0,21
T_{salt} [jaar]	19 – 21 – 27,2	6,3 – 21 – 25,2	13,1 – 25 – 30

Om het effect van de waarden, voor verschillende geomechanische parameters, op de passing met de gemeten data inzichtelijk te maken is een Tornado chart gemaakt (Figuur 7). Met behulp van dit figuur kan de parameter gevonden worden die de sterkste invloed op de bodemdaling heeft voor het betreffende punt (zie Figuur 6 voor de locatie van de punten). Hoe breder de balk in dit figuur, hoe groter de invloed op de bodemdaling op een bepaald punt. In de Tornado chart zijn de parameters gebruikt zoals getabuleerd in Tabel 2-7. De invloed van de uiterste waarden volgens het lage en hoge scenario is getest per parameter terwijl de overige waarden constant zijn volgens het basis scenario.

Per locatie is een Tornado chart gemaakt waarbij de invloed is getoond op het betreffende punt per kalibratiegebied. Bijvoorbeeld: de bodemdaling op locatie 1 (bovenste rij in Figuur 6), die zich bevindt op het eiland, wordt alleen beïnvloed door de parameters in het Ameland kalibratiegebied. De Anjum en Waddenzee kalibratiegebieden hebben voor dit punt geen effect op de bodemdaling. Op locatie 1 heeft de C_{mref} de meeste, en de C_{md} de minste invloed op de bodemdaling.

Op de Waddenzee (locaties 2 en 3 in Figuur 6) wordt de bodemdaling, naast de beïnvloeding door de Waddenzeevelden, mede beïnvloed door de Ameland en Anjum kalibratiegebieden. In locatie 4 wordt de bodemdaling bijna alleen door het Anjum kalibratiegebied veroorzaakt.



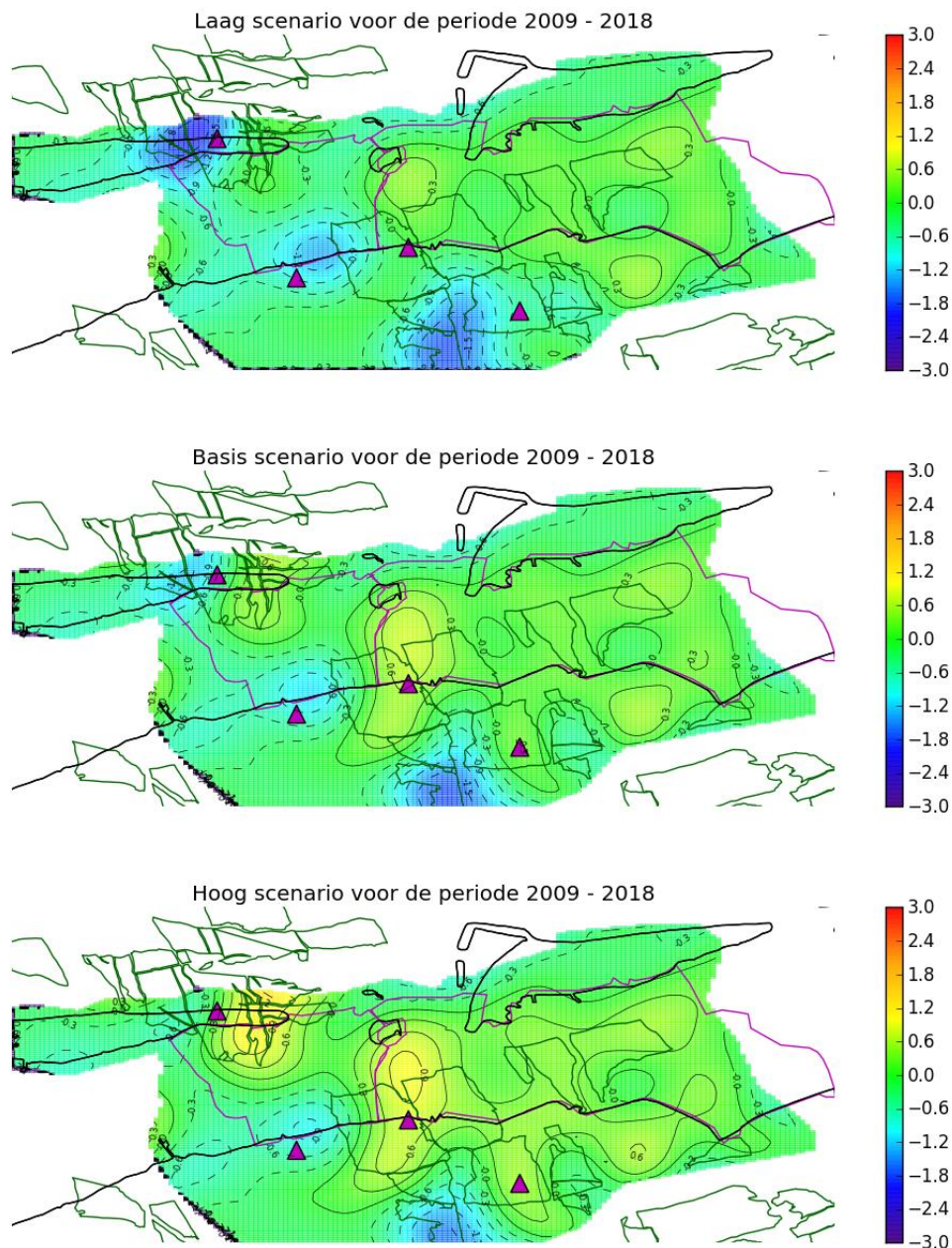
Figuur 7; Tornado charts die de invloed van de parameterwaarden toont op de bodemdaling in 4 locaties. Voor elke locatie is separaat een Tornado chart gemaakt voor elk van de vier kalibratiegebieden. De bodemdaling is berekend van start winning tot 2018. De lichtgroene lijn laat de bodemdaling volgens het basisscenario zien.

2.3.3.5 Vergelijking van het de bodemdalingsscenario's met het geodetisch model

Omdat met name 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. Om dit te bewerkstelligen zijn er alleen drukrealisaties voor Ameland meegenomen waarbij de drukdaling in de laterale aquifers boven de Waddenzee zijn gevarieerd. Ook is er meer gewicht toegekend aan de waddenpunten (campagne GPS).

Het vergelijk met de metingen is in deze rapportage gevisualiseerd met behulp van een geodetisch model (paragraaf 2.1), waarbij de verschillen tussen het geomechanische model en het geodetisch model gevisualiseerd worden als een gekleurd oppervlak. Dit is voor de verschillende bodemdalingsscenario's weergegeven in Figuur 8.

Uit dit figuur blijkt dat het basisscenario het best past met geodetische model voor de periode 2009-2018. Voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag geeft het bodemdalingsmodel iets meer daling dan het geodetisch model (enkele mm's). De variatie in verschillen in het Pinkegat kombergingsgebied zijn iets groter, tot ongeveer 1 cm, maar er zijn zowel gebieden waar de bodemdaling licht wordt overschat en gebieden waar de bodemdaling licht wordt onderschat, waarmee netto gezien het bodemdalingsvolume volgens het geodetische model past bij de volumes die volgen uit het bodemdalingsmodel. Het vergelijk met het hoge en lage scenario in Figuur 8 laat zien dat de gemeten bodemdaling in het kombergingsgebied Pinkegat volgens het geodetische model wordt overschat door de gemodelleerde daling in het hoge scenario en onderschat in het lage scenario. In het kombergingsgebied Zoutkamperlaag wordt de gemeten bodemdaling in alle scenario's overschat.



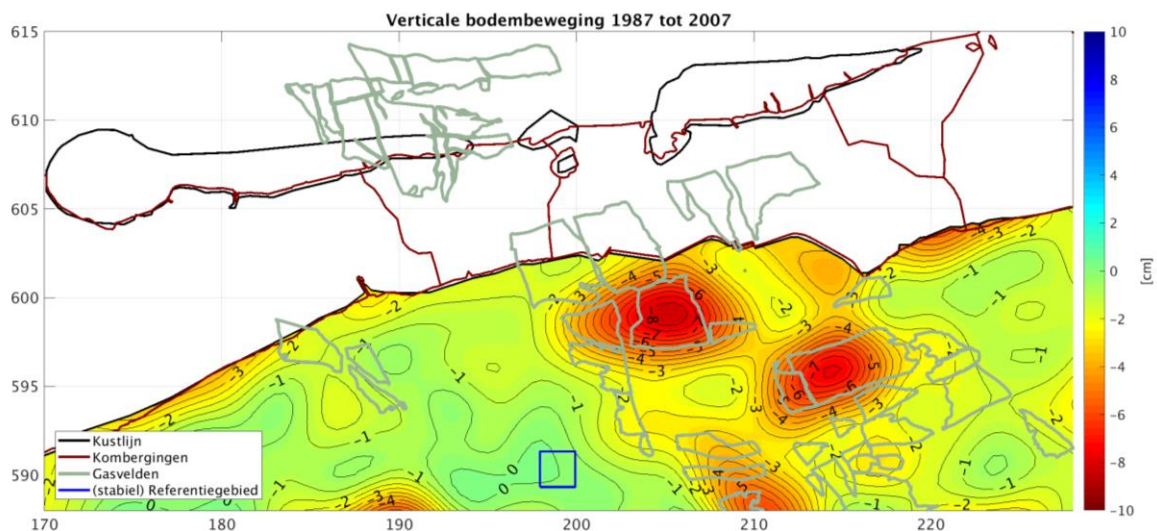
Figuur 8; Verschil (in cm) van de gemodelleerde bodemdaling volgens het laag (bovenste figuur), basis (middelste figuur) en hoog scenario (onderste figuur) met het geodetische model voor de periode 2009-2018. In de blauwe gebieden, met negatieve afwijkingen, is de gemeten bodemdaling groter dan de gemodelleerde; in de gele gebieden, met positieve 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:

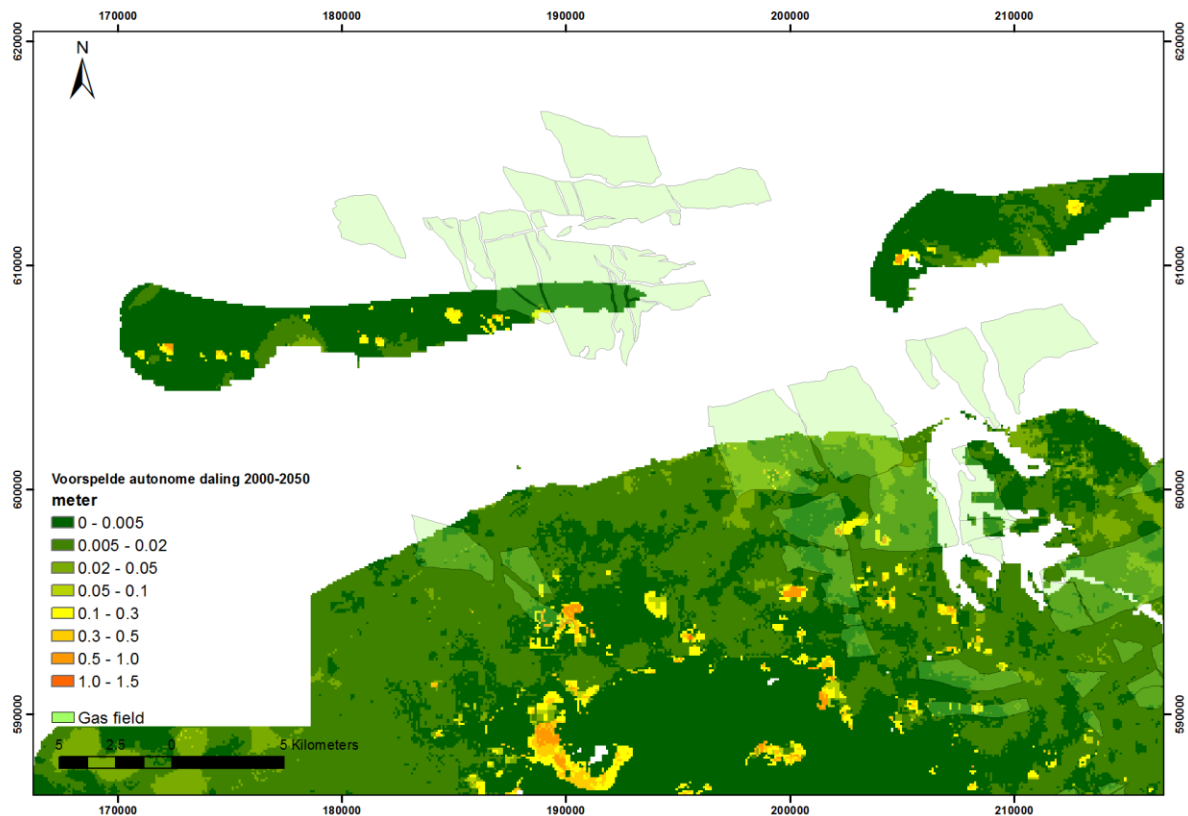
1. Bodemdaling door natuurlijke processen; naast de bodemdaling ten gevolge van gas- of oliewinning zijn er ook andere oorzaken die leiden tot bodemdaling, samengevat onder de term autonome bodemdaling. Dit kan natuurlijke bodemdaling zijn of bodemdaling door drainage van veen- en kleigebieden. Veenoxidatie 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 10 toont een voorspelling voor de autonome daling in het betreffende gebied voor de periode 2000-2050 (Referentie 16 en Referentie 17). 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. Rond de Waddenvoorkomens loopt dit op tot 5 cm over een periode van 50 jaar, wat neerkomt op gemiddeld 1 mm per jaar. Deze mogelijke autonome bodemdaling wordt niet verdisconteerd in de metingen waaraan de huidige geomechanische modellen (voor de diepe ondergrond) worden gekalibreerd. De modelresultaten kunnen daarom conservatief genoemd 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.
3. Bodemdaling veroorzaakt door bebouwing; een derde mogelijke oorzaak is de daling die kan ontstaan door het aanbrengen en gewicht van infrastructuur zoals bv dijklichamen. Figuur 9 toont een geodetisch model voor de periode van voor de gaswinning. Duidelijk waarneembaar zijn de gebieden met relatief veel daling bij de zeedijk van 2 cm in een periode van 2 jaar (gemiddeld 1 mm per jaar), ook in de gebieden waar geen gaswinning plaatsvond in deze tijdsperiode.

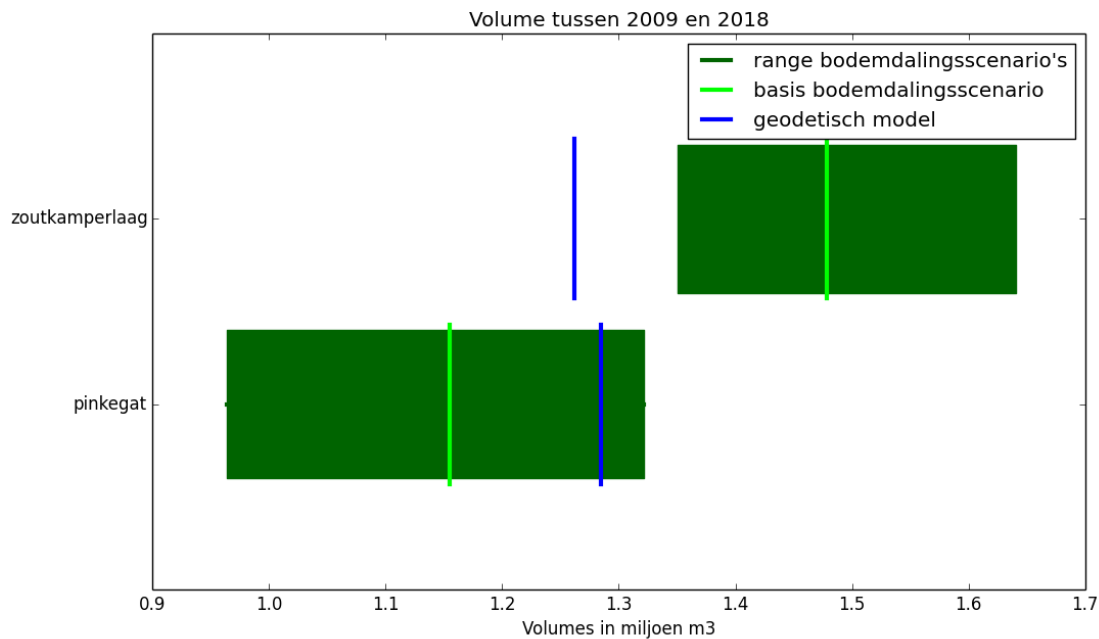


Figuur 9; Geodetisch model voor de metingen tussen 1987 en 2007 (in cm), waarbij aangetoond wordt dat er relatief veel bodemdaling plaatsvond onder de zeedijk, ook in de gebieden waar geen gaswinning plaatsvond.



Figuur 10; Maaiveld daling (m) over een periode van 50 jaar bij handhaving van huidige drooglegging bij huidig klimaat. De waarden op deze kaart geven een eerste orde schatting van de mogelijke autonome daling. N.B., de kaart heeft een witte ondergrond voor het Waddenzeegebied omdat voor dit gebied geen modeluitkomsten zijn gegenereerd.

Met het geodetisch model is ook het bodemdalingsvolume berekend voor de periode tussen 1/1/2009 en 1/1/2018. Dit volume is vergeleken met de uitkomsten voor het lage, basis en hoge bodemdalingsscenario (Figuur 11). Dit figuur laat zien dat de gemodelleerde bodemdaling voor Zoutkamperlaag in alle scenario's een hoger volume geeft dan het volume volgens het geodetische model. Deze observatie kan verklaard worden door het verschil in de vorm van de bodemdalingen. De bodemdalingen volgens het geomechanische model is iets wijder dan de kom volgens het geodetische model. Belangrijk te melden is dat elke mm bodemdaling een volume van 0,15 miljoen m³ (oppervlakte Zoutkamperlaag is 150 miljoen m² maal 0,001 m) veroorzaakt in Zoutkamperlaag. Gemiddeld was de bodemdalingssnelheid in Zoutkamperlaag dus volgens het geodetisch model minder dan 1 mm/jaar. Het volume volgens het basisscenario in Pinkegat is lager dan het geodetisch berekende volume. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de daling ten westen van Nes volgens het geodetische model, een daling die niet door het model voor het basis bodemdalingsscenario verwacht wordt. De meest waarschijnlijke verklaring is autonome daling onder het dijklichaam.



Figuur 11; 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 drukdaling waarschijnlijk gering was.

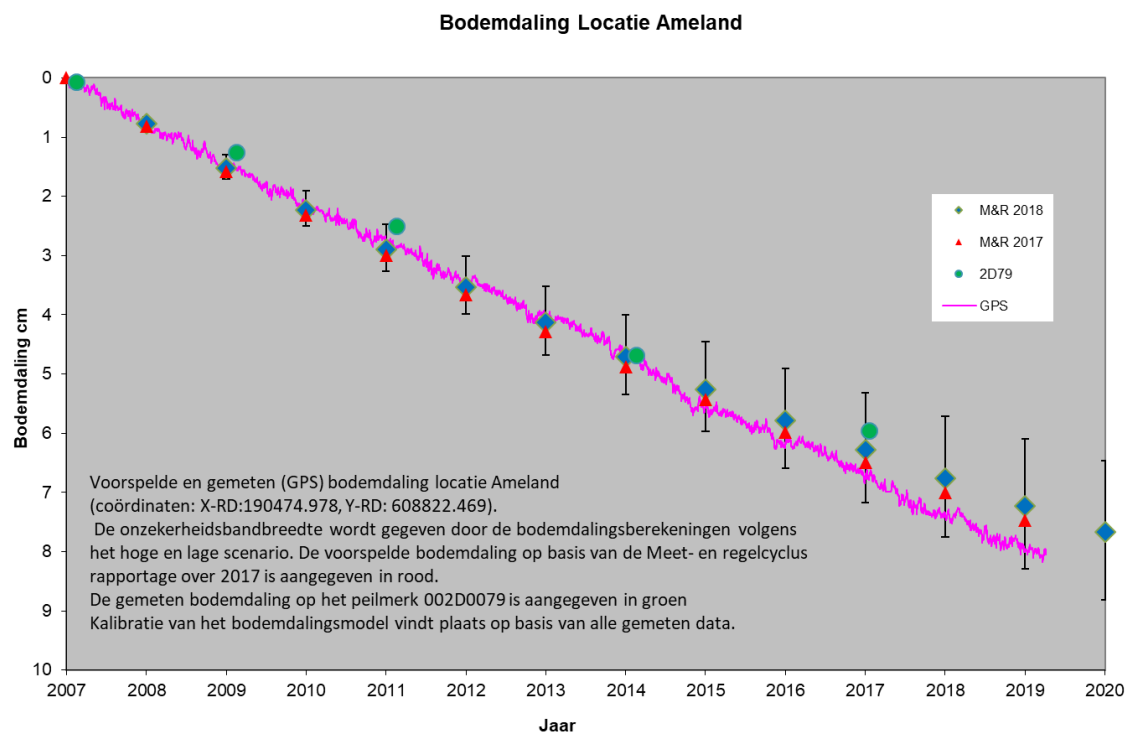
De metingen na 2011 laten echter bodemdaling ten zuidwesten en zuidoosten van het gasveld zien, waarvoor de meest waarschijnlijke verklaring beperkte drukdaling in de aquifer onder deze meetpunten is.

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 drukdaling kan plaatsvinden in de aquifers, wordt de bodemdaling nog steeds overschat. Het toelaten van drukdaling in de aquifers ten zuidoosten van het gasveld zou 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 drukdaling in de aquifers van Ameland.

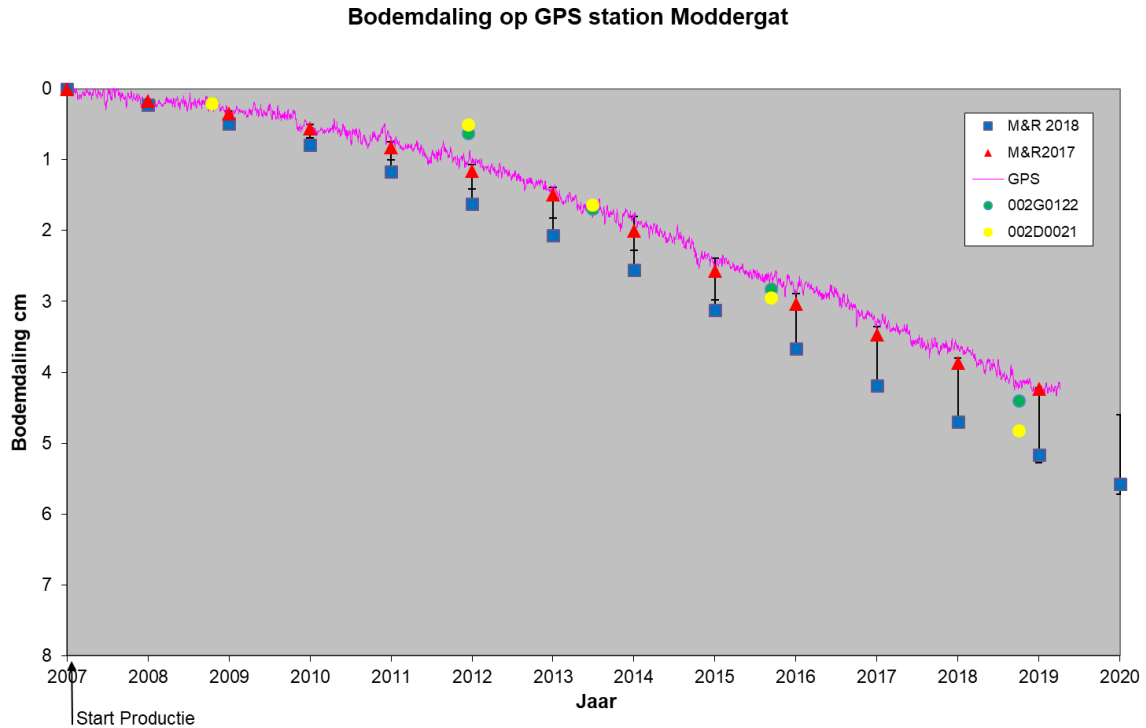
In deze M&R-cyclus is er meer gewicht toegekend op de GPS-metingen in de Waddenzee. Dit is gedaan door alleen de meetprecisie van de metingen mee te nemen. Op het eiland, de waterpaspunten, wordt ook de idealisatie precisie meegenomen. Door deze aanpassingen in de co-variantie matrix selecteert de LTS-II methode modellen die beter passen met de metingen in de Waddenzee.

2.3.3.6 Bodemdaling GPS-locaties

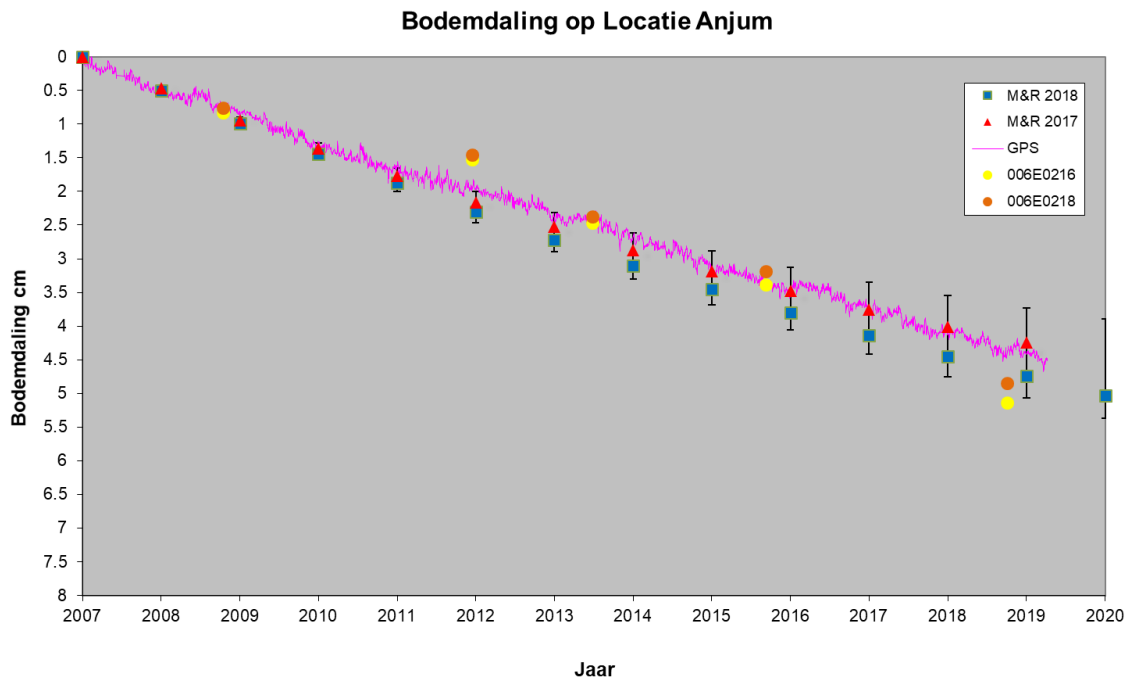
Figuur 12, Figuur 13, Figuur 14, Figuur 15 en Figuur 16 tonen de gemodelleerde daling tot en met 2019 evenals de gemeten daling vanaf begin 2007 op de continue GPS-locaties. Volgens het M&R-protocol (Referentie 3) dient de continue GPS-meting als signaal om een nieuwe vlakdekkende meting uit te voeren als de GPS-meting een significant hogere bodemdaling aangeeft dan de gemodelleerde daling. Uit de vergelijkingen wordt geconcludeerd dat dit niet het geval is. Voor het Ameland GPS punt in Figuur 12 valt waar te nemen dat de laatste waterpasmeting uit februari 2017 op punt 002D0079, dicht bij de GPS-antenne, een mindere daling aangeeft dan de gemeten daling volgens de GPS. Echter de GPS-meting op dezelfde datum valt nog steeds binnen de onzekerheid van de waterpassingsmeting. De modeluitkomst op de locatie van de GPS-punten Moddergat en Anjum vallen iets hoger uit t.o.v. de M&R 2017. Echter in vergelijking met de waterpasmetingen, in de figuren getoond als cirkels, is de passing beter.



Figuur 12; Voorspelde en gemeten (GPS) bodemdaling locatie Ameland (coördinaten: X-RD:190474.978, Y-RD: 608822.469). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingsberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2017 is aangegeven in rood. In groen is de gemeten bodemdaling op peilmerk 002D0079 (dichtbij het GPS-punt) middels waterpassing aangegeven.

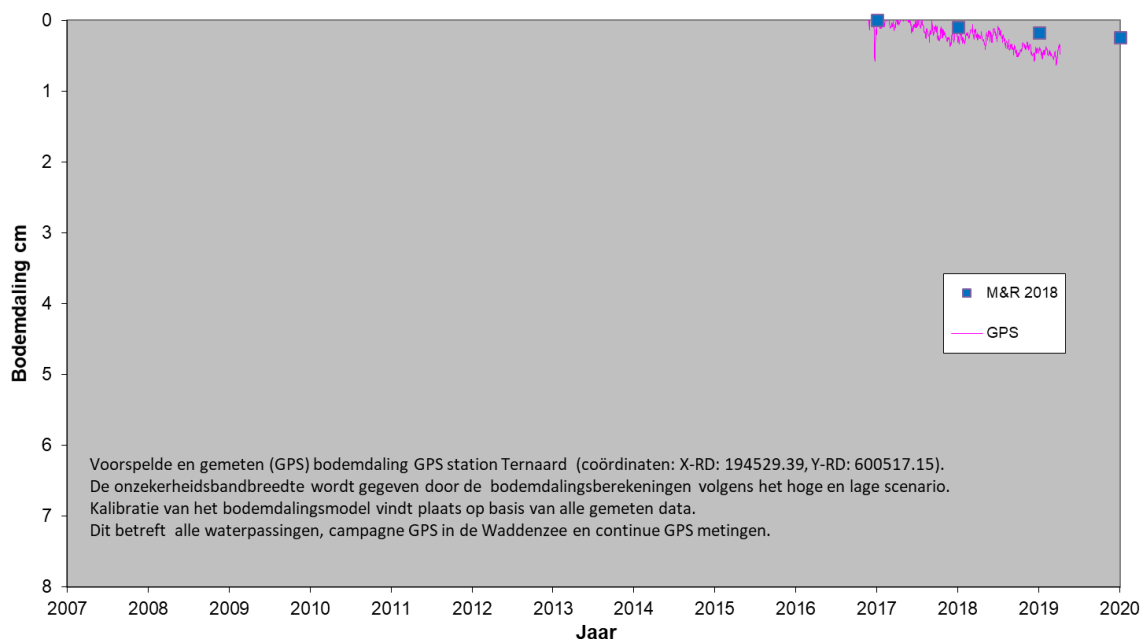


Figuur 13; Voorspelde en gemeten (GPS) bodemdaling op de GPS-locatie Moddergat (coördinaten: X-RD: 200244.559, Y-RD: 602329.794). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2017 is aangegeven in rood. In groen en geel is de gemeten bodemdaling op peilmerk 02G0122 en 02G0121 (dichtbij het GPS-punt) middels waterpassing aangegeven.



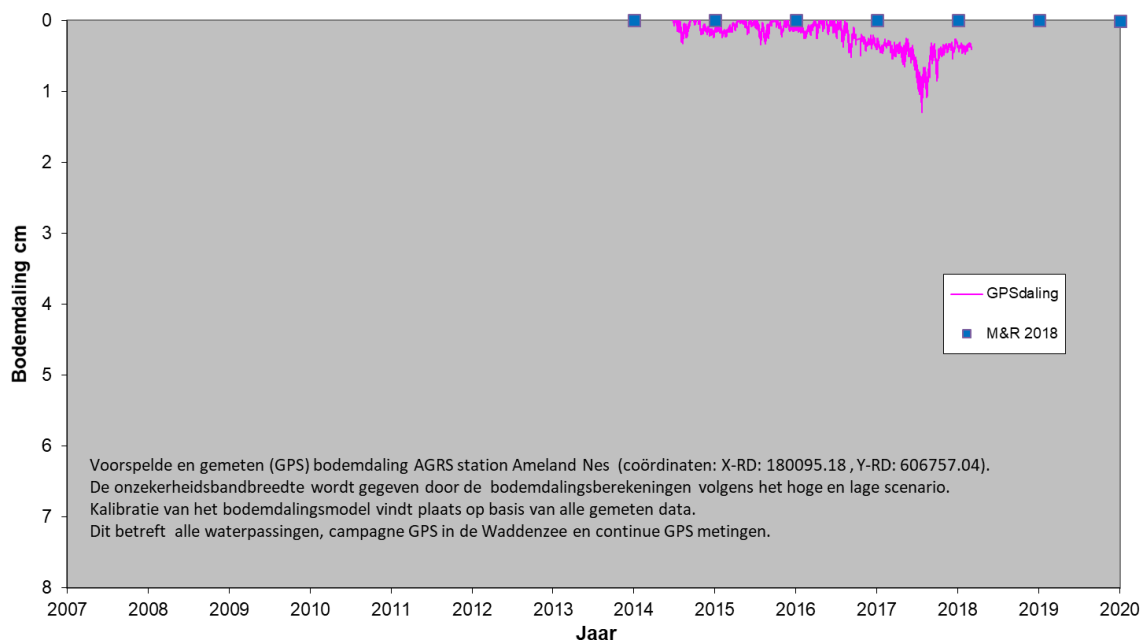
Figuur 14; Voorspelde en gemeten bodemdaling (GPS) op de GPS-locatie Anjum (coördinaten: X-RD: 205931.145, Y-RD: 598546.039). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2017 is aangegeven in rood. In oranje en geel is de gemeten bodemdaling op peilmerk 06G0216 en 06G0218 (dichtbij het GPS-punt) middels waterpassing aangegeven.

Bodemdaling op GPS station Ternaard



Figuur 15; Voorspelde en gemeten bodemdaling (GPS) op de 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.

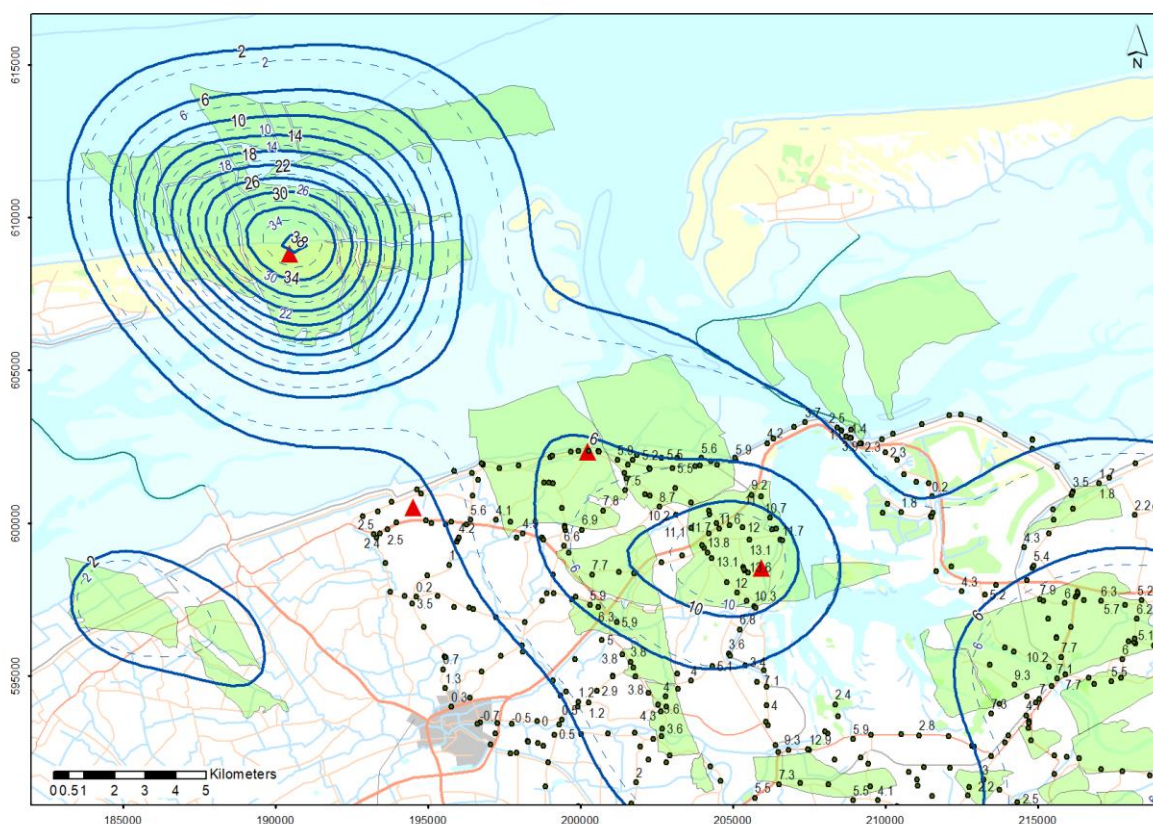
Bodemdaling op AGRS station Ameland Nes



Figuur 16; Voorspelde en gemeten bodemdaling (GPS) op het AGRS-station 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.

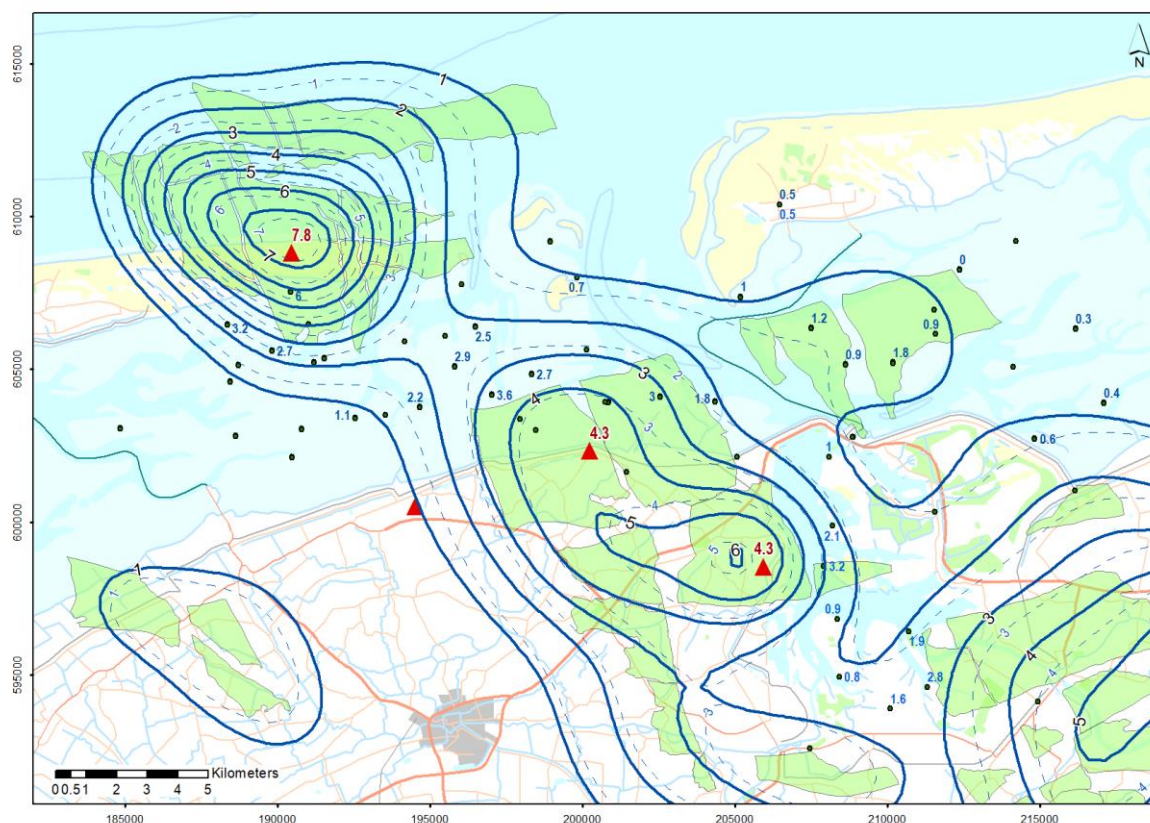
2.3.4 Vergelijking van gemodelleerde bodemdaling met resultaten van waterpassmetingen en campagne GPS

Naast een vergelijking in de vorige paragraaf 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 17 en Figuur 18. De modelcontouren worden per jaar berekend op de eerste dag van elk jaar. De contouren zijn gepresenteerd voor 1-1-2019 omdat deze datum het beste overeenkomt met het tijdstip van de waterpassmetingen op het vaste land die in augustus 2018 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 2017 zoals gerapporteerd in de Meet- en regelrapportage van 2017 (M&R 2017, Referentie 7). Zoals verwacht is de bodemdalingssom in 2019 over het algemeen iets wijder door de doorgaande bodemdaling.



Figuur 17; Totale bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2019) door gaswinning sinds de start van de Ameland, Anjum en Waddenzeeproductie. In blauw: contouren van de gemodelleerde bodemdaling (gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2017 volgens de M&R-rapportage over 2017). De punten met label representeren de peilmerken met de gemeten hoogteverschillen tussen juni 1997 en augustus 2018. Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 4 posities continue GPS-metingen uitgevoerd sinds 2007 (rode driehoek).

Figuur 18 toont de gemeten en gemodelleerde daling in 2018 sinds de nulmetingen in de Waddenzee in 2006. De contouren zijn gepresenteerd voor 1-1-2018 omdat dit tijdstip gemiddeld het dichtst bij het tijdstip van de meeste metingen ligt (de metingen in de Waddenzee werden in mei 2018 uitgevoerd). 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 2017 zoals gepresenteerd in het M&R 2017 rapport weer.



Figuur 18; Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2018) 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 2017 weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2017). 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 2018. De rode waarden geven de daling aan van de permanente GPS-stations in de periode feb. 2007- jan. 2019. 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.

2.3.4.1 Belangrijkste overeenkomsten en verschillen tussen de M&R 2017 en M&R 2018 bodemdalingsscenario's

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.

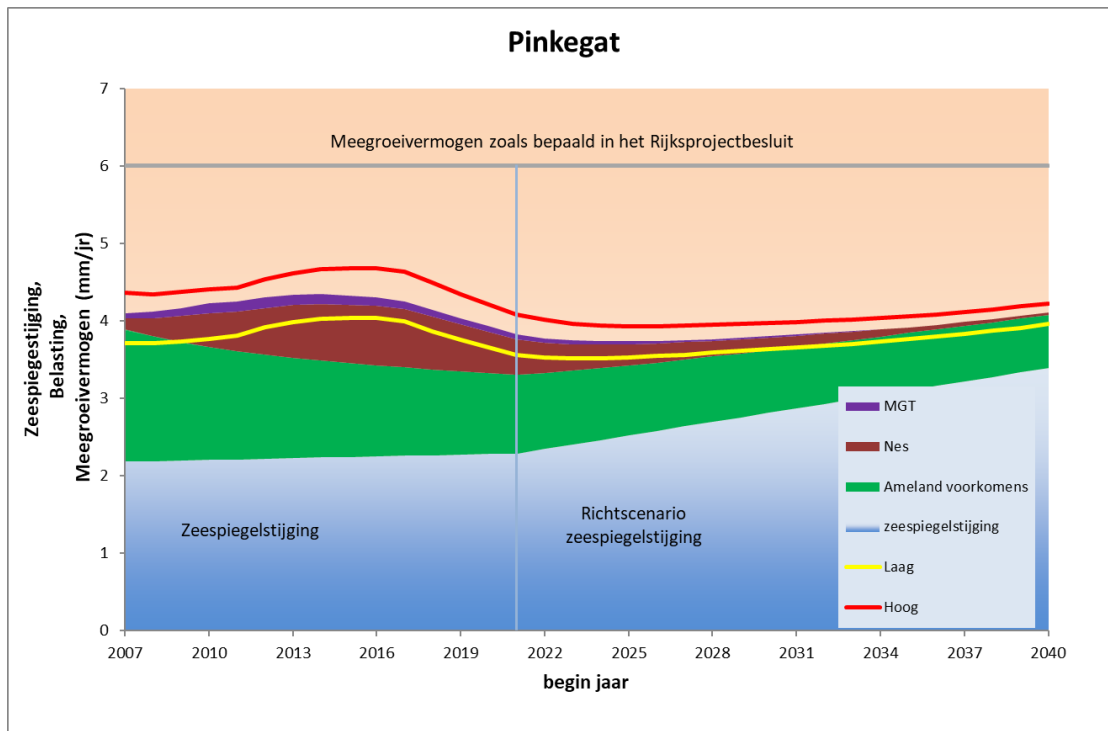
- Het bodemdalingsmodel is voor beide M&R-rapportages gelijk aan het LTS-II bodemdalingsmodel.
- In de M&R 2017 rapportage zijn drie deterministische bodemdalingsscenario's gekozen op basis van expert kennis. De deterministische scenario's gekozen in de M&R 2018 rapportage liggen dicht bij de statistisch bepaalde waarden volgens de LTS-II methode.
- De gekozen bodemdalingsscenario's zijn alle gebaseerd op de basis reservoirrealisatie.
- De resultaten van de modellering in de M&R 2018 cyclus liggen dicht bij de resultaten zoals gerapporteerd in de M&R 2017 rapportage.

2.4 Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4)

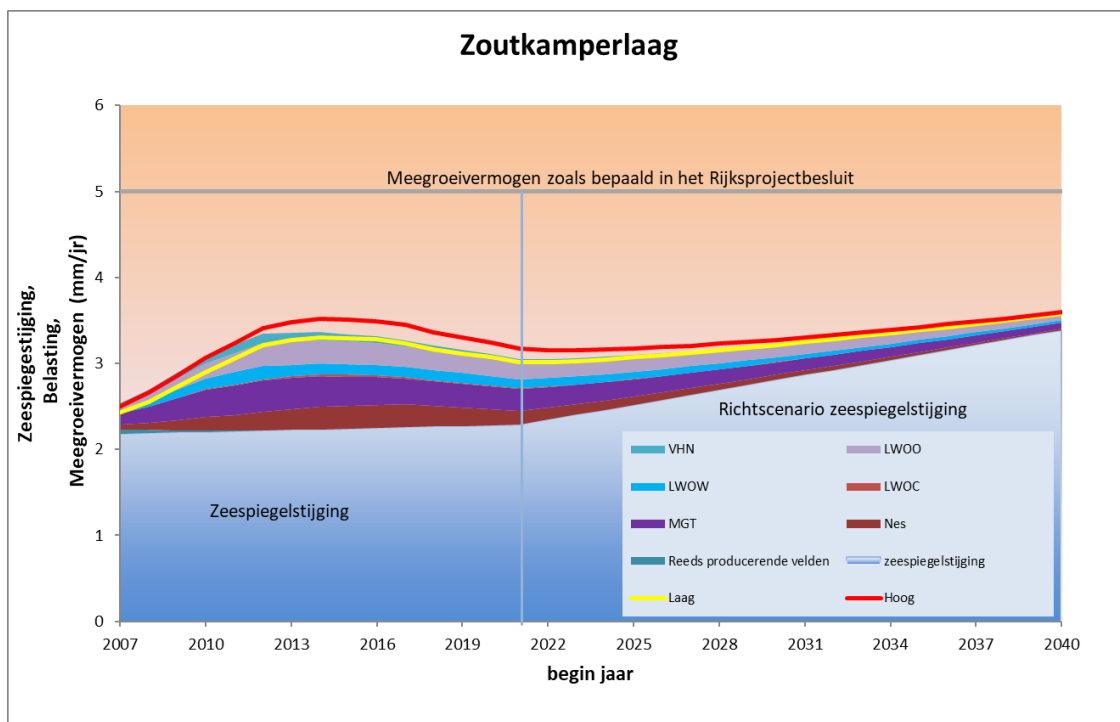
2.4.1 Bepaling volume en gemiddelde daling

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 Bodemdalingssstudie 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 21 en Figuur 22. Voor het basisscenario is onderscheid gemaakt in de bijdrage van de individuele voorkomens d.m.v. de gekleurde vlakken. Figuur 19 en Figuur 20 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 19; 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 20; 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 2-8 t/m Tabel 2-11).

2.4.2 Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting

Tabel 2-8 en Tabel 2-9 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 (2018) 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 2-8; 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 m³.

Kombergingsgebied Pinkegat			
	Anjum/Ameland voorkomens	NES	MGT
Jaar	Volume (onzekerheid)	volume(onzekerheid)	volume(onzekerheid)
2005	115 (95 - 136)		
2006	106 (87 - 124)		
2007	100 (82 - 118)	13 (8 - 13)	3 (3 - 6)
2008	95 (77 - 111)	19 (12 - 19)	3 (3 - 5)
2009	91 (74 - 107)	22 (14 - 22)	3 (3 - 7)
2010	86 (69 - 101)	31 (20 - 31)	3 (3 - 7)
2011	83 (67 - 98)	39 (24 - 39)	3 (3 - 12)
2012	80 (64 - 94)	37 (24 - 37)	3 (3 - 11)
2013	78 (62 - 91)	40 (37 - 40)	3 (3 - 11)
2014	75 (60 - 88)	52 (52 - 71)	3 (3 - 10)
2015	73 (58 - 86)	52 (49 - 64)	3 (3 - 9)
2016	70 (56 - 82)	49 (44 - 58)	3 (3 - 8)
2017	69 (55 - 81)	47 (42 - 55)	3 (3 - 8)
2018	66 (53 - 78)	41 (37 - 48)	3 (3 - 7)
2019	65 (52 - 76)	34 (31 - 40)	3 (3 - 7)
2020	62 (49 - 72)	29 (25 - 33)	3 (3 - 6)
2021	61 (48 - 71)	24 (21 - 27)	3 (3 - 5)

Tabel 2-9; 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 m³.

Kombergingsgebied Zoutkamperlaag							
Jaar	Anjum voorkomen	NES	MGT	LWO-C	LWO-W	LWO-O	VHZ
2005	11 (10 - 13)						
2006	8 (7 - 10)						
2007	6 (5 - 8)	11 (7 - 11)	39 (24 - 39)				
2008	5 (4 - 8)	16 (10 - 16)	33 (20 - 33)		8 (5 - 8)	4 (3 - 4)	7 (5 - 7)
2009	3 (3 - 5)	18 (12 - 18)	46 (28 - 46)		34 (30 - 35)	31 (19 - 31)	15 (13 - 15)
2010	2 (2 - 4)	25 (16 - 25)	49 (35 - 49)		25 (21 - 27)	36 (26 - 36)	20 (20 - 23)
2011	1 (1 - 3)	32 (20 - 32)	62 (58 - 69)		23 (20 - 24)	42 (41 - 44)	17 (16 - 20)
2012	0 (0 - 3)	31 (21 - 31)	58 (49 - 62)	4 (2 - 4)	19 (19 - 21)	43 (43 - 51)	16 (14 - 17)
2013	0 (0 - 2)	35 (32 - 35)	57 (49 - 60)	5 (5 - 6)	18 (18 - 22)	42 (42 - 53)	15 (13 - 16)
2014	0 (0 - 0)	45 (45 - 61)	52 (47 - 57)	4 (4 - 5)	18 (18 - 22)	41 (41 - 52)	14 (12 - 15)
2015	0 (0 - 0)	44 (42 - 55)	46 (43 - 51)	3 (3 - 4)	17 (17 - 20)	37 (37 - 46)	12 (10 - 13)
2016	0 (0 - 0)	42 (38 - 50)	43 (42 - 49)	2 (2 - 2)	17 (17 - 20)	35 (34 - 42)	11 (9 - 11)
2017	0 (0 - 0)	40 (36 - 47)	44 (43 - 51)	2 (2 - 3)	19 (18 - 22)	34 (33 - 41)	10 (8 - 10)
2018	0 (0 - 0)	35 (32 - 41)	43 (43 - 51)	2 (2 - 2)	18 (17 - 21)	32 (32 - 39)	10 (8 - 10)
2019	2 (0 - 2)	29 (26 - 34)	40 (40 - 49)	2 (2 - 2)	16 (16 - 19)	30 (30 - 36)	8 (6 - 8)
2020	2 (1 - 2)	25 (21 - 28)	38 (38 - 46)	2 (2 - 2)	16 (15 - 18)	29 (28 - 35)	7 (5 - 7)
2021	2 (1 - 2)	21 (18 - 23)	36 (35 - 43)	1 (1 - 2)	15 (14 - 17)	28 (27 - 33)	6 (5 - 6)

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

Onderstaande Tabel 2-10 geeft de bodemdalingssnelheid *S* voor het rapportagejaar 2018 en belasting *B* op 1-1-2019. 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 19 en Figuur 20).

Tabel 2-10; Bodemdalingssnelheid (mm/jr) voor het rapportagejaar 2018 en belasting *B* (mm/jr) op 1-1-2019 met onzekerheid (bandbreedte) per kombergingsgebied.

Zoutkamperlaag		Pinkegat	
S (laag-hoog)	B (laag-hoog)	S (laag-hoog)	B (laag-hoog)
0,92 (0,90 - 1,10)	0,87 (0,84 - 1,03)	1,87 (1,59 - 2,22)	1,76 (1,48 - 2,07)

2.4.3 Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting

Tabel 2-11 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 2-11; Bodemdalingssnelheid en belasting (mm/jr) met onzekerheid (bandbreedte) per kombergingsgebied per jaar.

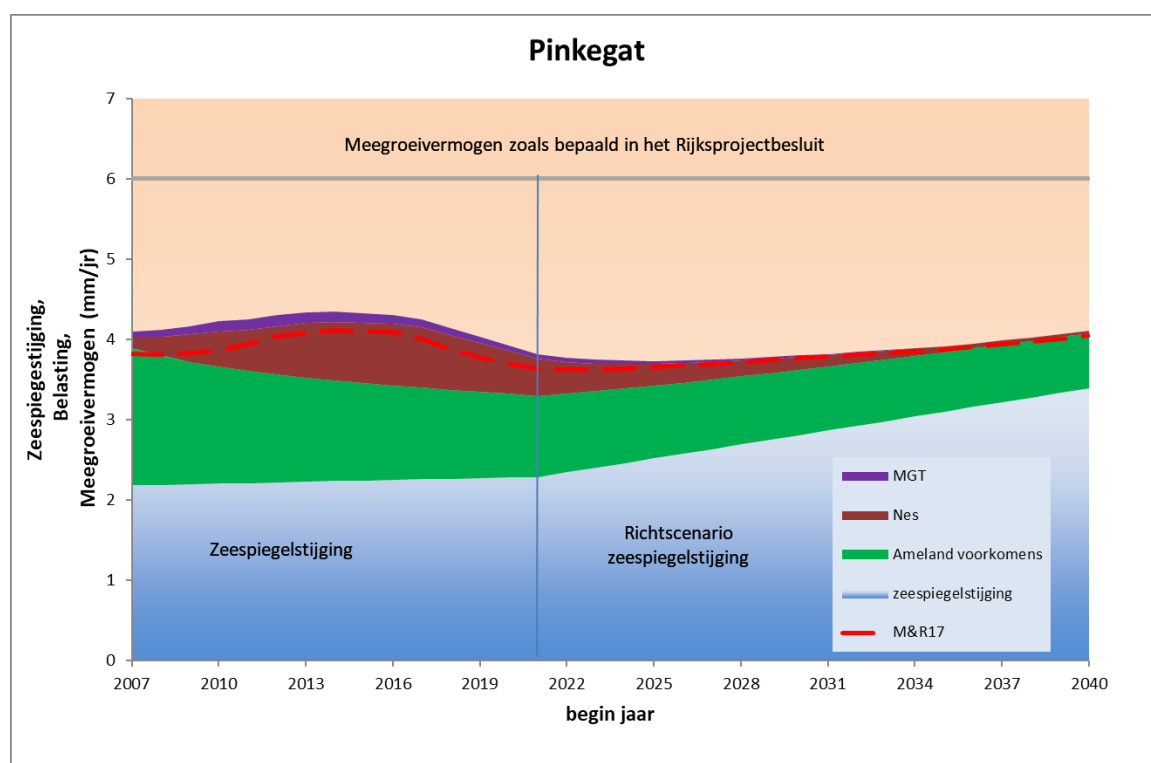
	Zoutkamperlaag			Pinkegat		
Jaar	S (onzekerheid)	B (onzekerheid)	G	S (onzekerheid)	B (onzekerheid)	G
2004	0,10 (0,10 - 0,11)		2,84	2,00 (1,65 - 2,35)		
2005	0,07 (0,07 - 0,09)		2,83	1,92 (1,58 - 2,26)		
2006	0,06 (0,05 - 0,08)		2,83	1,76 (1,44 - 2,07)		
2007	0,38 (0,25 - 0,38)	0,35 (0,25 - 0,35)	2,82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

2.5 Indien nodig aanpassen productie (stap 5)

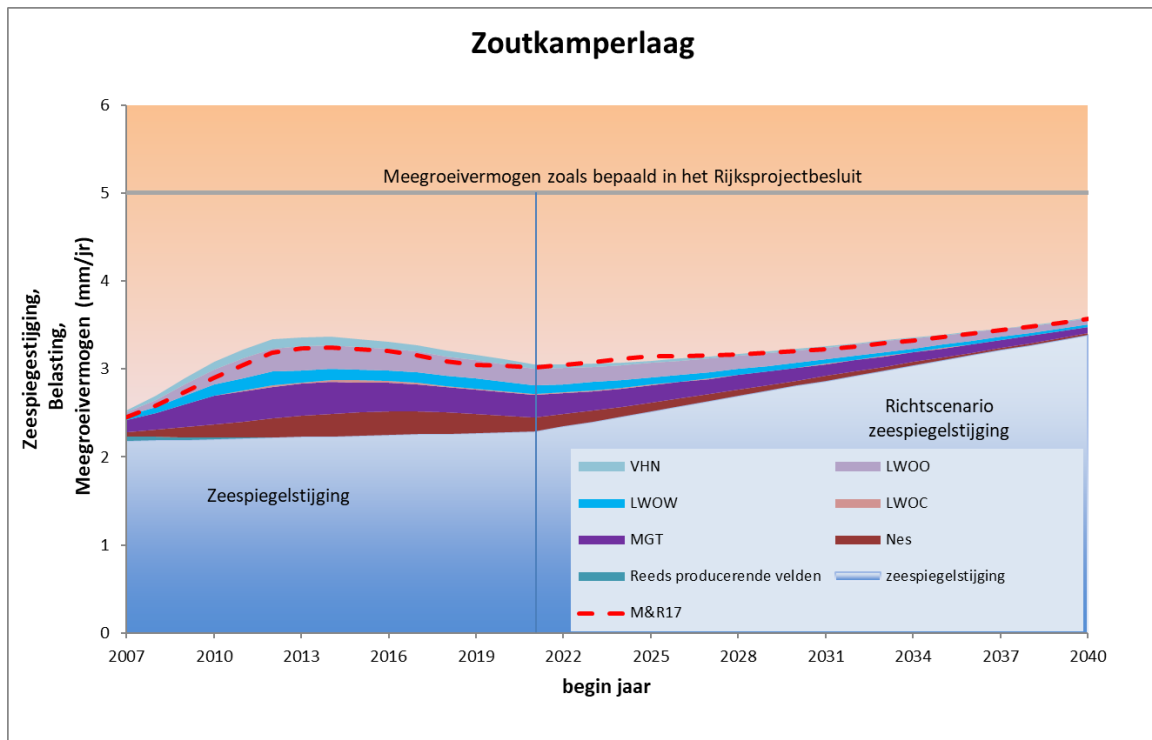
Uitgaande van het basisscenario en de productie volgens Referentie 1, volgen waarden voor de bodemdalingssnelheid S en de resulterende belasting B die niet leiden tot overschrijding van de gebruiksruimte (zie Tabel 2-11). Dit geldt ook voor het hoge scenario. In ieder geval zal de gebruiksruimte niet voor 1-1-2021 (binnen de geldige periode voor het zeespiegelscenario) worden overschreden. Na deze tijd geldt het richtscenario van de zeespiegelstijging, waarbij vastgesteld wordt dat ook in dit scenario de gebruiksruimte niet wordt overschreden.

2.6 Actualiseren (stap 6)

Figuur 21 en Figuur 22 tonen de geactualiseerde berekeningen van de belastingen voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag volgens het in Tabel 2-6 getoonde productiescenario. In de figuren is tevens de belasting, zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclus rapportage over 2017 (gerapporteerd in 2018), weergegeven. De berekende belasting in de kombergingen is iets hoger dan berekend in de M&R-cyclus 2017. Deze verandering komt door de toepassing van een andere methodiek (LTS-II) voor de bodemdalingmodellering en door de aanpassing in de GPS referentie. In de 2018 M&R-cyclus (en de volgende cycli) zijn de GPS-metingen gerefereerd aan een referentienetwerk van meerdere stations, zoals ook toegepast in de LTS-studie.



Figuur 21; Voorspelde belasting inclusief Zeespiegelstijging voor het kombergingsgebied Pinkegat. De rood gestreepte lijn geeft berekende belasting aan zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclusrapportage over 2017.



Figuur 22; 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 2017.

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 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 2018 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
Winningsplannen	https://eu001-sp.shell.com/sites/AAFAA0995/Documents/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=%2Fsites%2FAAFAA0995%2FDocuments%2F01%2E%20Vigerende%20winningsplannen&	P.04 Aanvraag en beheer van project of inrichtingsvergunning-NL
Meetplan	Sharepoint: Published Subsidence Documents / Survey / Plans	P.04 Aanvraag en beheer van project of inrichtingsvergunning-NL
Productiedata en reservoirdrukdata	https://wrfm-ssw-uie.sharing.shell.com/App/Dream/Home.aspx	Database per veld
Meetregister	Sharepoint: Published Subsidence Documents / Survey / Registers	P.18

4 Conclusies

De belangrijkste conclusies van dit rapport worden hieronder weergegeven.

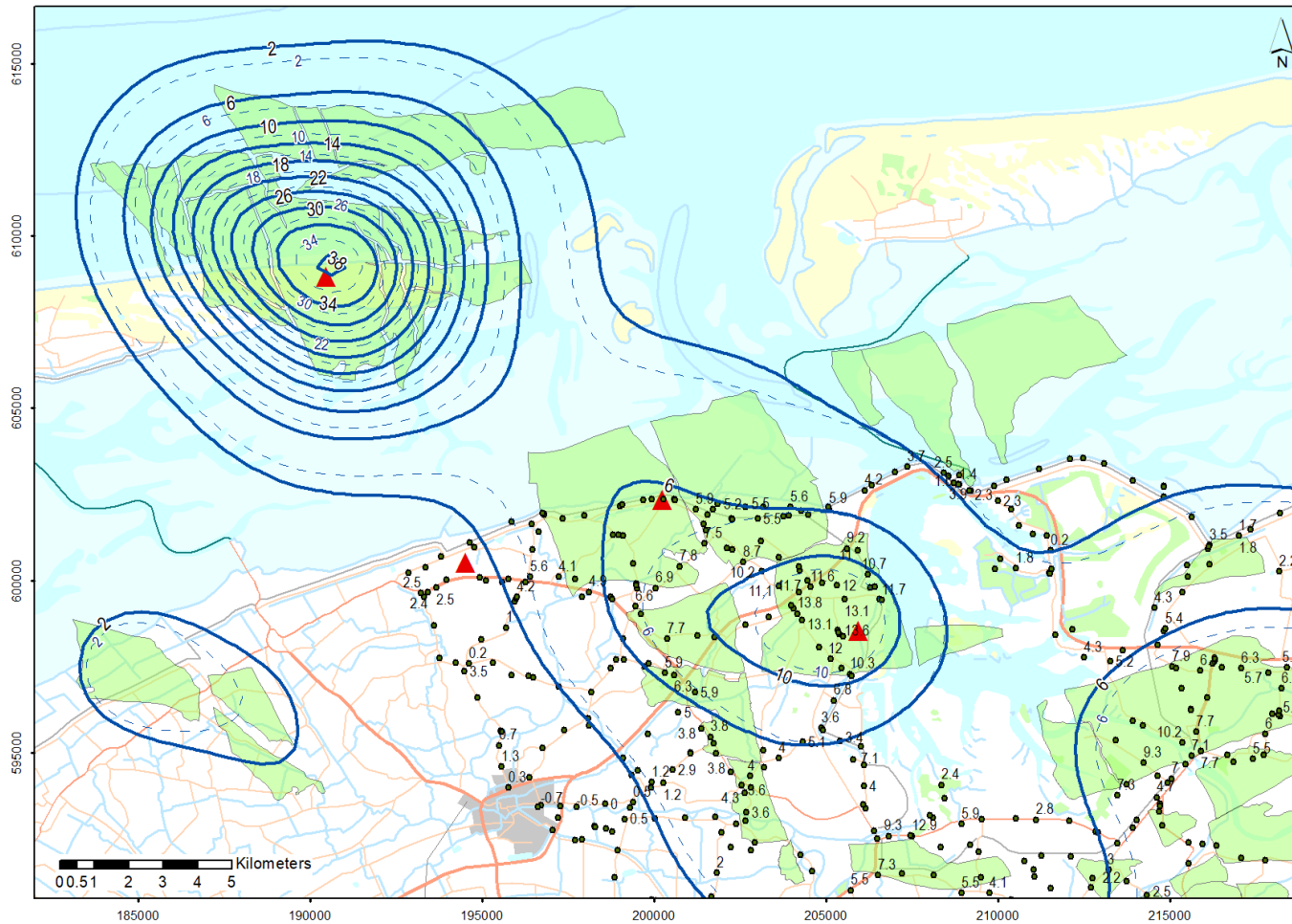
- De reservoir- en geomechanische modellen voor de voorkomens onder en rondom de Waddenzee zijn grondig geëvalueerd en gekalibreerd met de beschikbare metingen. De resultaten van metingen en modellen komen goed met elkaar overeen.
- De meet- en regelcyclus is uitgevoerd volgens de LTS-II methode. Dit betekent dat:
 - de bodemdaling voor alle voorkomens is berekend volgens het bodemdalingsmodel zoals beschreven in de LTS-II studie (Referentie 14),
 - er in totaal 50.000 scenario's zijn geconfronteerd met de geodetische data,
 - de onzekerheid in de geodetische data is gemodelleerd,
 - er een objectieve bepaling van de onzekerheid voor de passing en voorspelling van de bodemdaling, bodemdalingssnelheid en belasting heeft plaatsgevonden
- De parameterwaarden voor zowel de reservoirmodellen als de bodemdalingsmodellen zijn fysisch realistisch en vallen binnen het bereik van gemeten waarden in het veld en laboratorium.
- Naar aanleiding van het advies van de auditcommissie (Referentie 22) is er een bijlage toegevoegd over het mogelijke effect van aardbevingen op het Waddengebied. Geïnduceerde aardbevingen komen sporadisch voor boven de M&R-voorkomens en zijn tot nu toe door niemand gevoeld. Mogelijke aardbevingen in dit gebied zullen geen gevolgen hebben voor de bodemdaling.
- De gepresenteerde resultaten gaan uit van het richtscenario voor de zeespiegelstijging dat in 2016 beschikbaar kwam. Dit vigerende zeespiegelscenario geeft een minder sterke zeespiegelstijging aan dan het vorige scenario.
- De bodemdalingssnelheden in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag zijn iets hoger dan voorspeld in de M&R-cyclus 2017. Mogelijke oorzaken zijn de toepassing van een andere methodiek (LTS-II) en de aanpassing van de GPS-referentie naar het GPS netwerk in plaats van alleen het Schiermonnikoog station.
- De meet- en regelcyclus stuurt op basis van de verwachtingswaarde voor de belasting volgens het basisscenario. Aangezien de belasting volgens dit scenario binnen de gebruiksruimte valt, worden er geen maatregelen genomen om de productie bij te stellen.

Referenties

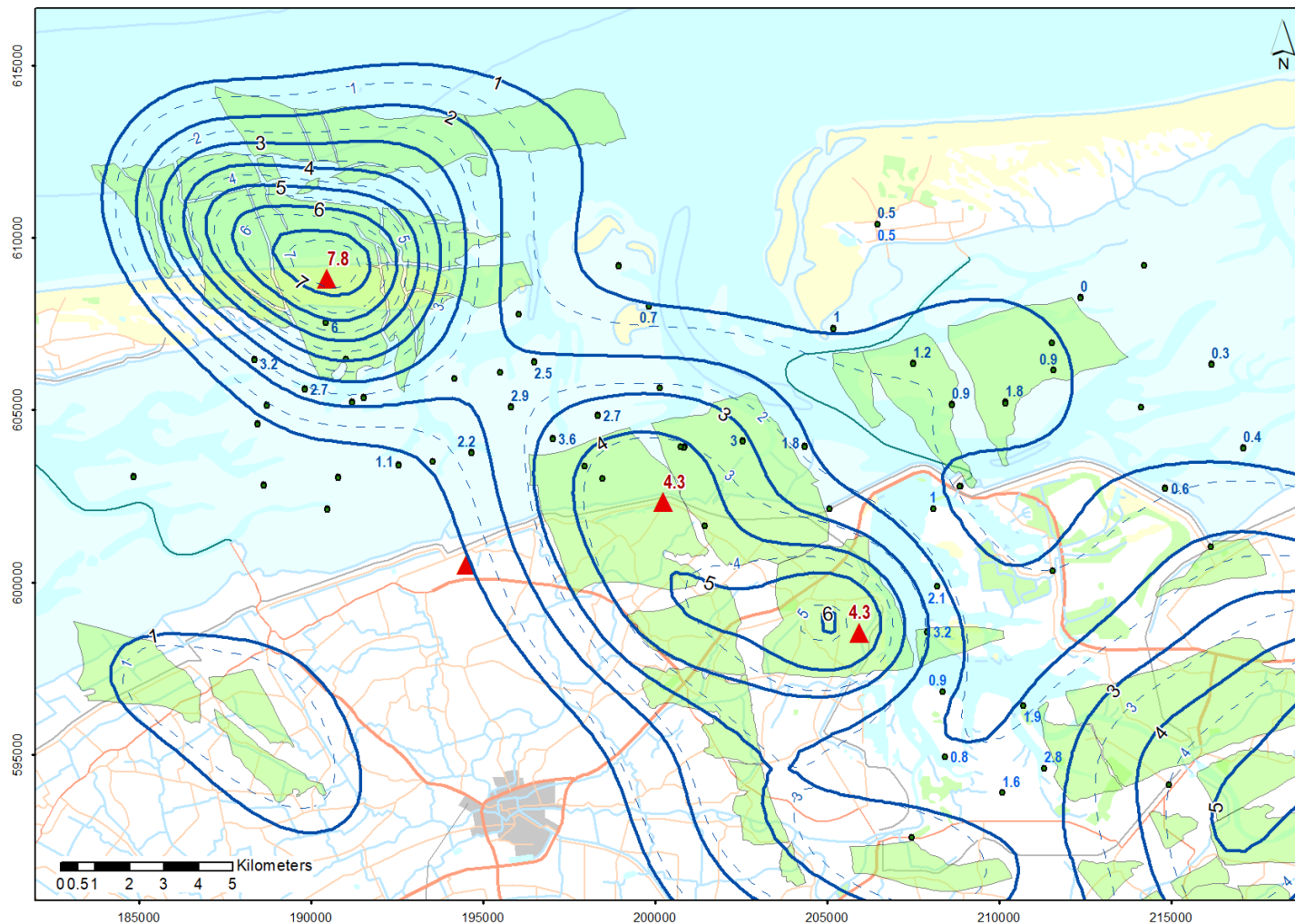
- Referentie 1 NAM (30/09/2011) Wijziging winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen.
- Referentie 2 Staatscourant (2013) Kennisgeving besluiten gaswinning Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, Ministerie van Economische Zaken.
URL: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2013-7384.html?zoekcriteria=%3fzkt%3dEenvoudig%26pst%3d%26vrt%3dmoddergat%2binstemming%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 26/10/2017) Meetplan Waddenzee 2018 (EP Report No: EP201710206407).
- 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 2017; Rapport EP201802200641, mei 2018.
- Referentie 8 GPS Survey NAM Waddenzee v. 1.23. 06-GPS B.V., 01/2019.
- Referentie 9 Check reference station coordinates NAM v.1.10. 06 GPS B.V., 06/2018.
- Referentie 10 NLGEO2004: het geoïdemodel voor Nederland. Data-ICT-Dienst, Rijkswaterstaat, URL: <http://www.rdnapi.nl/algemeen/hooqte/geoide.html>
- Referentie 11 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 12 TNO (2013) A general framework for rate dependent compaction models for reservoir rock. TNO 2013 R11405.
- Referentie 13 Dynamic Reservoir Modelling of Wadden Fields for subsidence. Meet & Regel 2016. EP201703201178
- Referentie 14 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-04a9995ebe9d?open=true>
- Referentie 15 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-ut-2011-02035c
<http://nlog.nl/bodemdaling>

- Referentie 16 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 17 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 18 Technische Commissie Bodemdaling (2009) Van Meting naar Daling. Bodemdaling door delfstofwinning. November 2009
https://www.waddenzee.nl/fileadmin/content/Dossiers/Energie/pdf/Rapport_Van_meting_naar_daling_Tcbb2008.pdf
- Referentie 19 NAM (2019) Controle van de reservoirmodellen met de nieuwe drukmetingen van 2018. EP201904223961.
- Referentie 20 Meetregister bij het meetplan Waddenzee, Rapportage van de GPS campagne Waddenzee/Lauwersmeer 2018, 10/2018
- Referentie 21 Meetregister bij het meetplan Noord-Nederland, Groningen en Waddenzee 2018, q Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Noord-Nederland 2018, 02/2019
- Referentie 22 Auditcommissie Waddenzee (2018) Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2017.
<https://zoek.officielebekendmakingen.nl/blg-881550.pdf>
- Referentie 23 Subsurface Technical Report (2010): Static Reservoir Modelling of Ameland Fields for Subsidence Prediction.

Bijlage 1 Gemodelleerde en gemeten bodemdaling totaal en sinds 2006

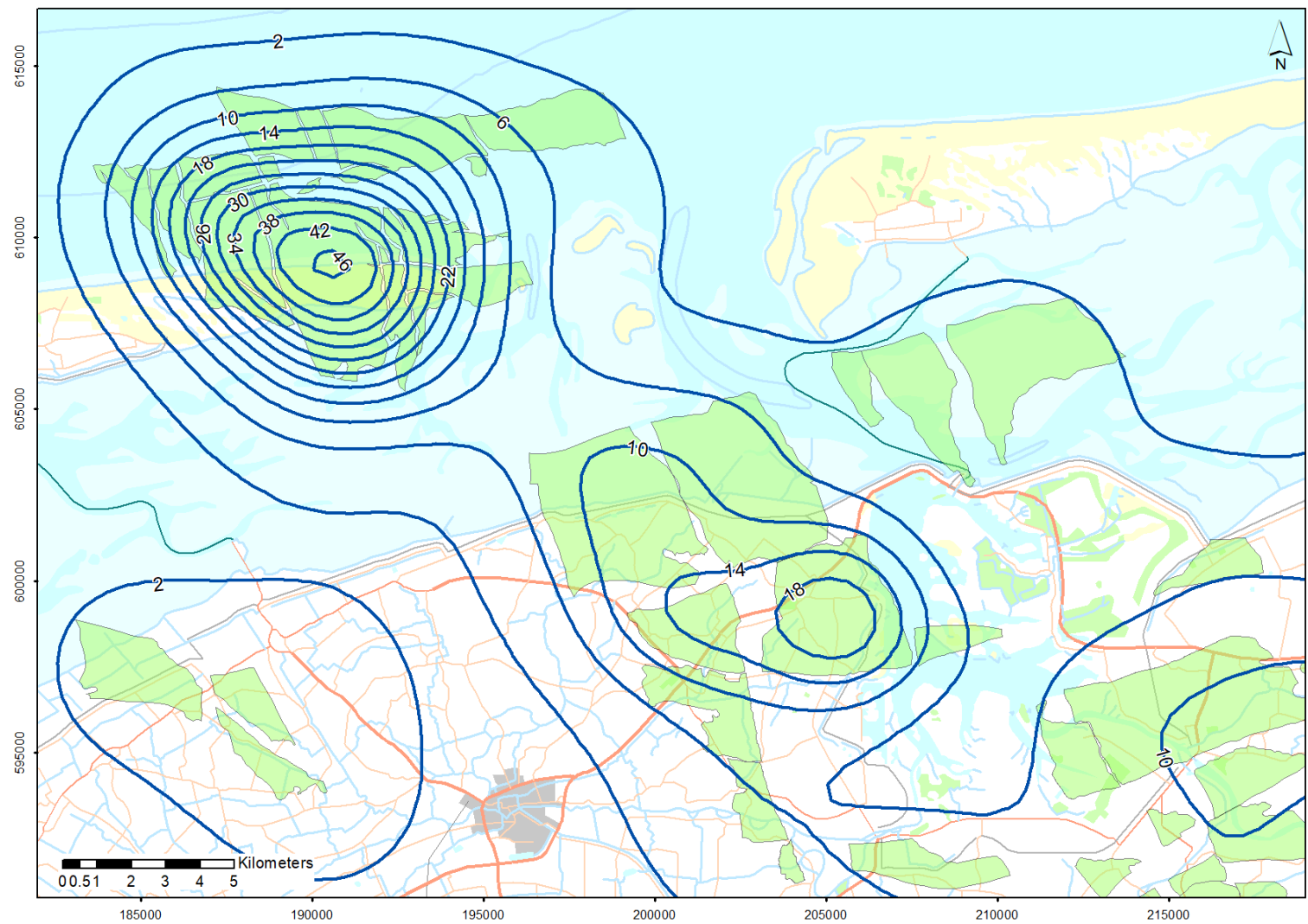


Totale bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2019) door gaswinning sinds de start van de Ameland en Anjum productie. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling (gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2017 volgens de M&R-rapportage over 2017). De punten met label representeren de peilmerken met de gemeten hoogteverschillen tussen juni 1997 en augustus 2018. Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 3 posities continue GPS-metingen uitgevoerd sinds 2007 (rode driehoek).



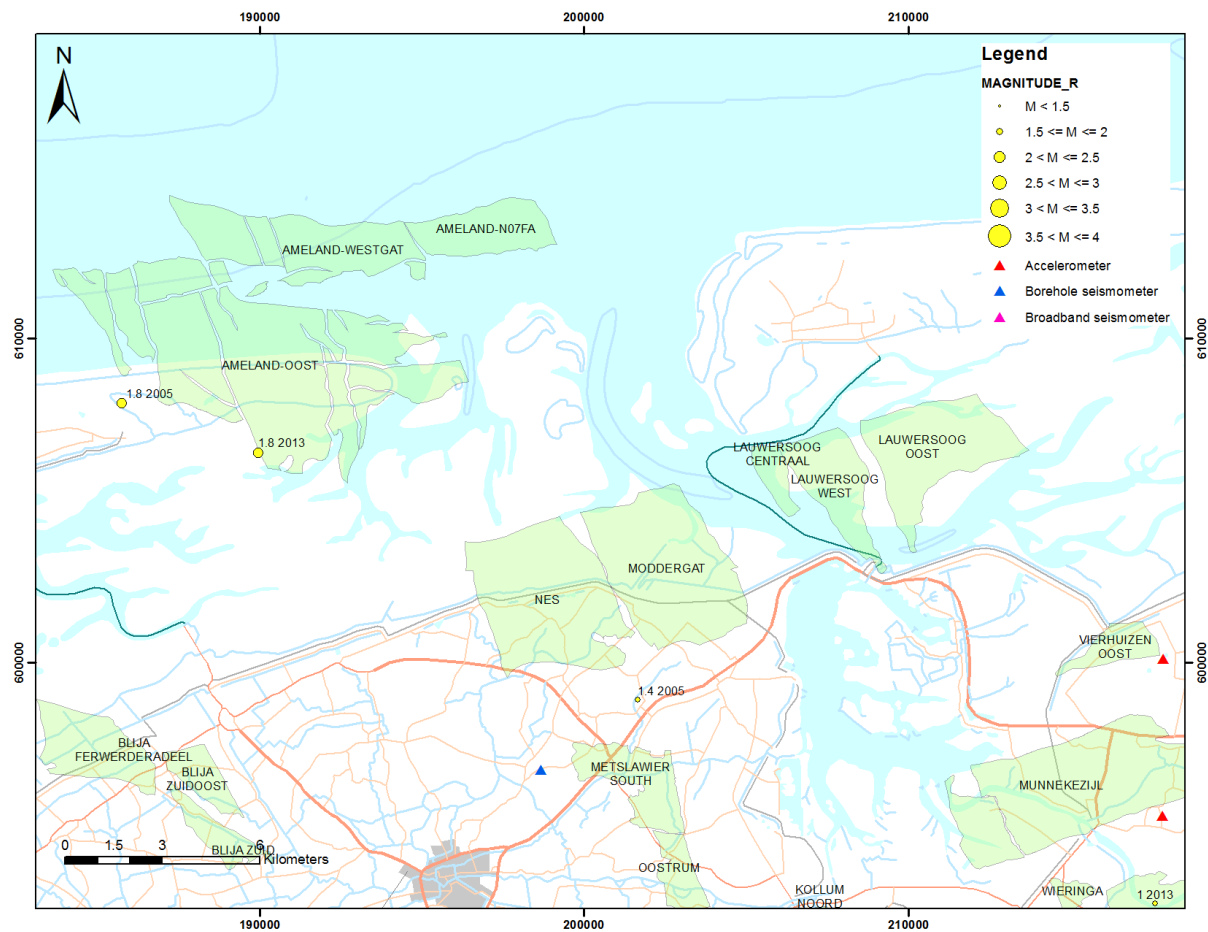
Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2018) door gaswinning sinds de nulmeting in de Waddenzee in 2006. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens de aangepaste/gekalibreerde geomechanische modellen (gestreepte contouren geven de bodemdaling van 2017 weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2017). 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 2018. De gemeten hoogteverschillen op het eiland Ameland geven de hoogteverschillen tussen 01-2006 en 01-2018 aan. De rode waarden geven de daling aan van de permanente GPS-stations in de periode feb. 2007- jan. 2019.

Bijlage 2 Verwachte bodemdaling in het jaar 2050



Bijlage 3 Mogelijke gevolgen van aardbevingen op de bodemdaling

Sinds 1986 zijn er een drietal aardbevingen geregistreerd, waarbij de twee bevingen bij Ameland een magnitude kennen van 1,8 en de beving bij Metslawier een magnitude van 1,4 op de schaal van Richter (Figuur 23). Deze bevingen zijn door niemand gevoeld en hebben een trillingssnelheid die onder schadenormen ligt. Voor geïnduceerde bevingen in Nederland valt bovendien op te merken dat er geen waarnemingen bekend zijn waarbij er extra bodemdaling is opgetreden na een beving, ook niet voor de zwaardere bevingen boven Groningen en Roswinkel. Het is dus onwaarschijnlijk dat een mogelijke zwaardere beving in het Waddengebied een direct gevolg kan hebben op de bodemdaling. In de wetenschappelijke literatuur zijn een aantal studies te vinden waarbij effecten op bodembeweging zijn waargenomen. In al deze gevallen betrof het zeer zware aardbevingen (magnitude 5 en groter) op de schaal van Richter.



Figuur 23; Geregistreerde aardbevingen in het Waddengebied en omgeving voor de periode 1986 - april 2019.

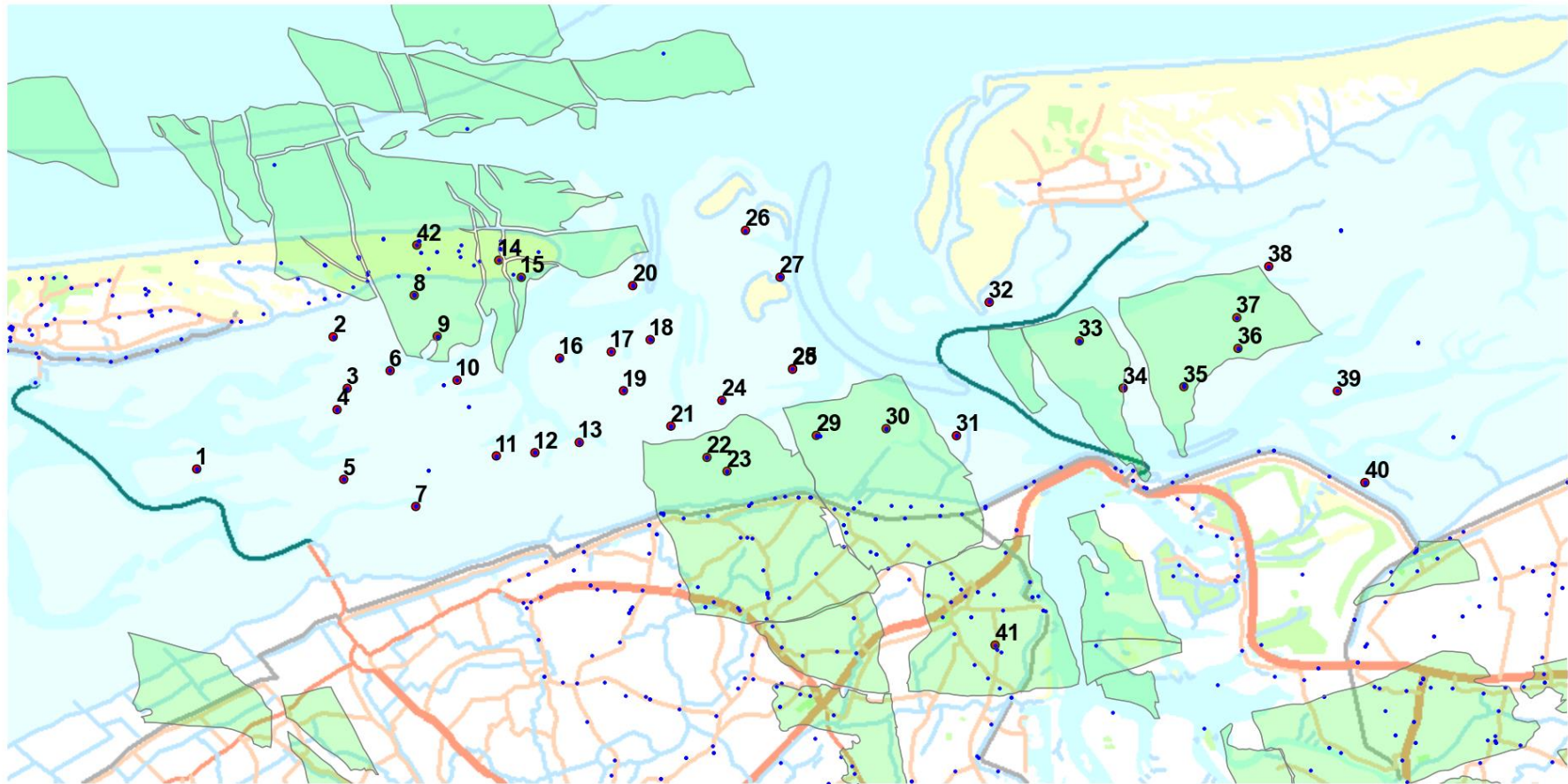
Een mogelijke vervolgvraag kan zijn of de bevingen een invloed kunnen hebben op drukveranderingen of drukcommunicatie binnen en tussen de gasvelden met als gevolg een verandering in druk. Dit zou vervolgens kunnen leiden tot een beving en onvoorziene compactie en daarmee gepaard gaande bodemdaling. Dit is alleen mogelijk wanneer de doorlaatbaarheid van breuken tussen reservoirdelen veranderd wordt door de beving. Er zijn geen gevallen bekend in de literatuur waar dit fenomeen is beschreven en de kans dat dit kan gebeuren is bijzonder klein door de volgende condities:

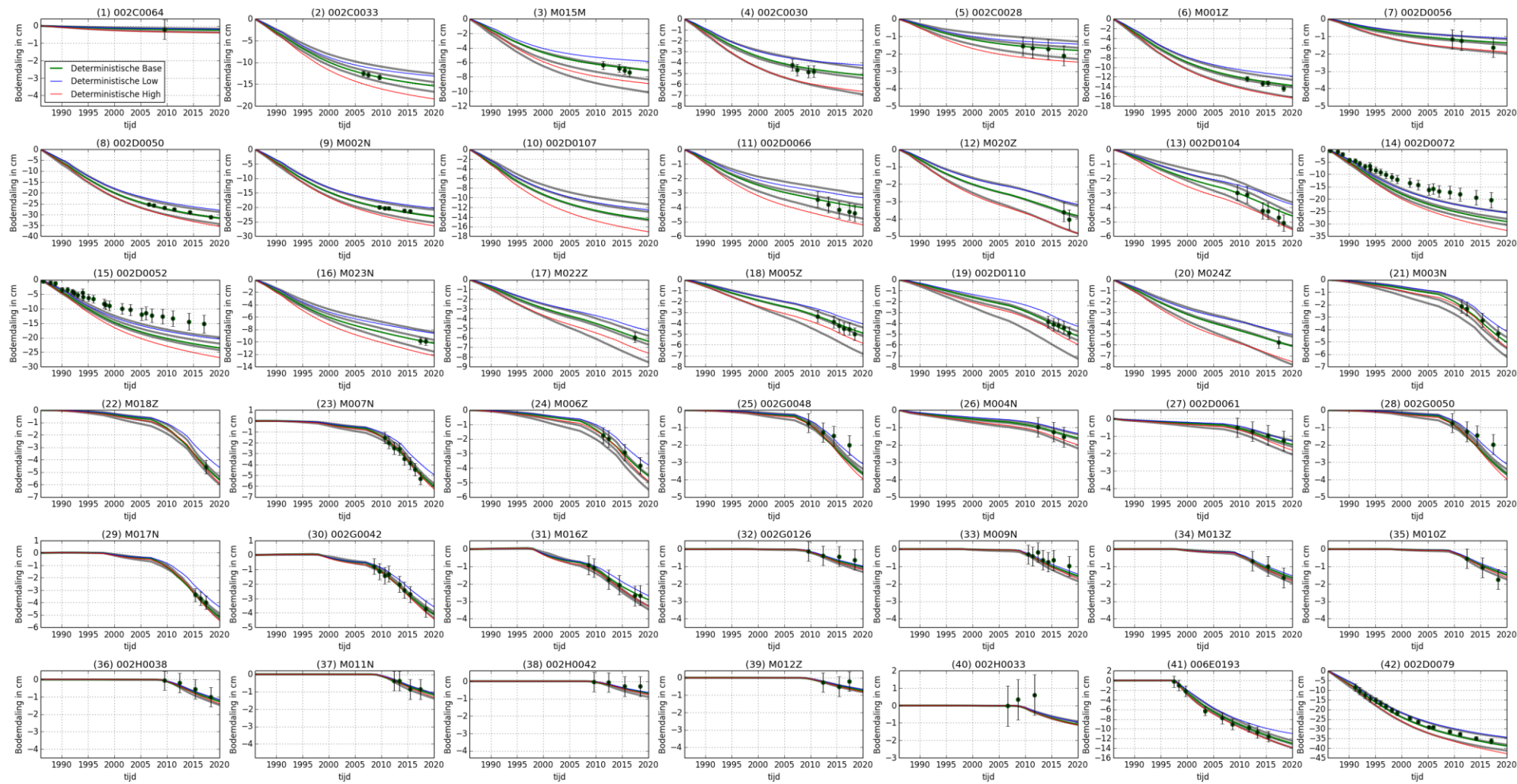
- Lichte aardbevingen volgen uit een zeer kleine verschuiving van slechts een klein oppervlak. Hierbij moet men bij een magnitude 2 à 3 beving denken aan een verschuiving rond de 1 cm over een breuklengte van ongeveer 100 m. De kans dat door deze geringe verschuiving meer doorlaatbare gesteentepakketten tegen elkaar aan komen te liggen is nagenoeg verwaarloosbaar.
- Het is niet vast te stellen wat er met de doorlaatbaarheid van een breuk gebeurt tijdens de beving. De kansen zijn gelijkwaardig voor het meer of minder worden van de doorlaatbaarheid van de breuk, echter de verandering zal slechts plaats kunnen vinden over een beperkt oppervlakte van de breuk.
- De doorlaatbaarheid van het naastliggend gesteente verandert niet tijdens een lichte beving. Of met andere woorden, een gesteente met slechte doorlaatbaarheid zal ook na een kleine beving slecht doorlatend zijn.
- De honderden bevingen die zijn opgetreden in het Groningen veld hebben geen waargenomen effect gehad op de gemeten drukken in het veld.

Samengevat kan er gesteld worden dat mogelijke aardbevingen in dit gebied geen gevolgen hebben voor de bodemdaling. Ook leiden bevingen met deze magnitude niet tot schade aan infrastructuur, waardoor ook indirecte gevolgen worden uitgesloten.

Bijlage 4 Tijdsseries Waddenzee

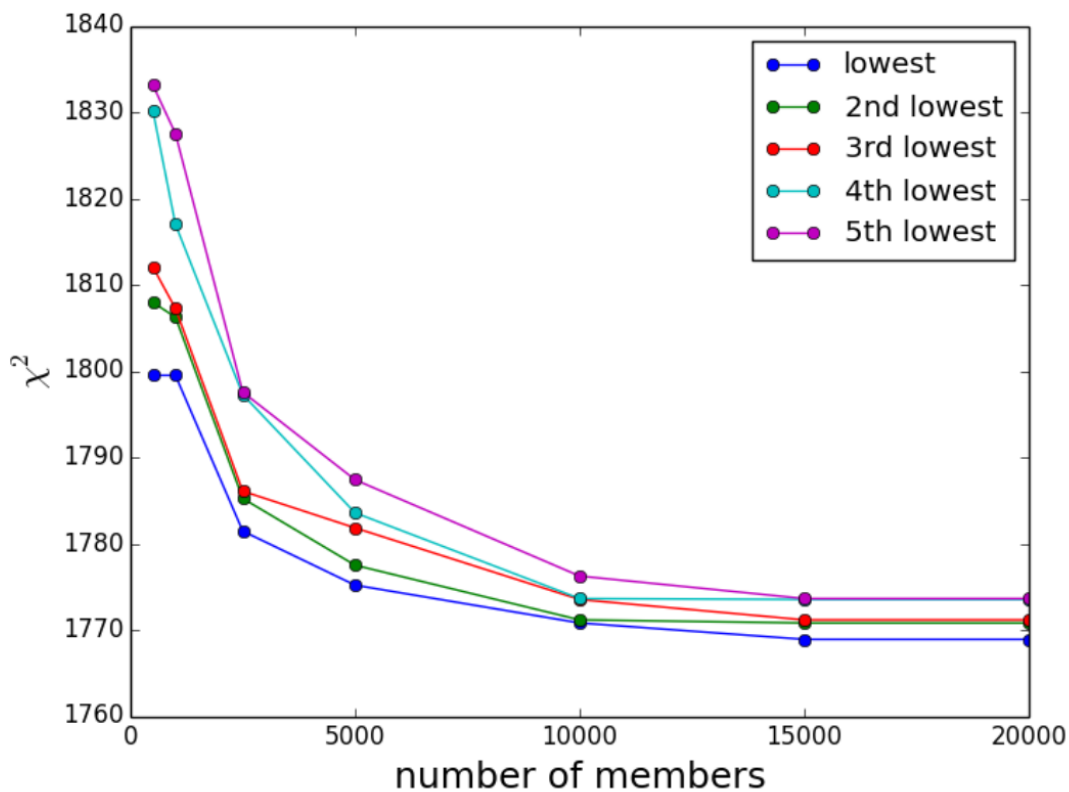
In deze bijlage worden tijdsseries van de bodemdaling op het merendeel van de Waddenzee meetpunten getoond. Het eerste figuur laat de locatie van de punten zien en het tweede de tijdsseries. In deze tijdsseries laten de grijze lijnen de statistische waarden (gewogen gemiddelde, P2,5, P97,5) zien. De blauwe, groene en rode lijnen laten resp. de deterministische laag, basis en hoge scenario zien. De punten laten de gemeten daling in tijd zien met bijbehorende onzekerheid (2-sigma).





Bijlage 5 Berekening van benodigde aantal Monte Carlo simulaties

Om de waarden voor de geomechanische modelparameters te vinden zijn 50000 Monte Carlo simulaties uitgevoerd. Deze zijn verdeeld over het basis scenario (20000 simulaties) en de hoge en lage scenario's (elk 15000 simulaties). Er zijn veel simulaties nodig omdat de oplossingsruimte bepaald wordt door zes geomechanische parameters. De LTS-II studie (Referentie 14) toonde voor een vergelijkbaar model aan dat er 10000 tot 15000 simulaties nodig zijn om een stabiele oplossing te verkrijgen. Deze stabiele oplossing is bepaald door te kijken of de χ^2 waarde kleiner wordt wanneer er meer simulaties worden gedaan. Figuur 24 (overgenomen uit de LTS-II studie) laat de laagste χ^2 waarden zien als functie van het aantal simulaties. Hieruit blijkt dat na 10000 tot 15000 simulaties de χ^2 waarden nauwelijks meer veranderen en de oplossing als stabiel beschouwd kan worden. Daarom is aangenomen dat 15000 à 20000 simulaties voldoende zijn voor het berekenen van een stabiele oplossing.



Figuur 24; Laagste χ^2 waarden als functie van het aantal simulaties. Dit figuur laat zien dat de laagste χ^2 waarden niet wezenlijk veranderen na 10000-15000 simulaties.