

Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen

Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2019

NAM B.V

EP Document Numer.:	EP202002200220	Owner:	NAM-UPC/T/K
Document Date:	1/5/2020	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 (MLV) 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. In 2019 heeft de minister ten slotte ingestemd om het gasveld Vierhuizen-Oost tot 2024 te mogen produceren (DGKE-WO /18270235).

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 “waddenvoorkomens”.

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

Aanpak

- De meet- en regelcyclus is uitgevoerd volgens de LTS-II methode:
 - de bodemdaling voor alle voorkomens is berekend volgens het bodemdalingsmodel zoals beschreven in de LTS-II studie (Referentie 14);
 - 13 reservoirrealisaties met ieder 20.000 scenario's zijn geconfronteerd met de geodetische data, waarbij de onzekerheid in de geodetische data is gemodelleerd;
 - een objectieve bepaling van de onzekerheid voor de passing en voorspelling van de bodemdaling, bodemdalingssnelheid en belasting heeft plaatsgevonden.

Metingen

- In 2019 zijn negen reservoirdrukken gemeten in de Wadden voorkomens.
- Op basis van het meetplan Waddenzee zijn in 2019 GPS-metingen in de Waddenzee uitgevoerd op 16 clusters van peilmerken in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag.
- 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 2019 voortgezet. Het AGRS (GPS) station Ameland (Nes) en het in 2016 geplaatste GPS-station Ternaard zijn ook onderdeel van de monitoring.

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

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

de aquifers die in contact staan met de gasvoorkomens. Op basis van seismische, geologische en productiedata bestaat een goed inzicht in de grootte en locatie van deze aquifers. Om een realistische spreiding in drukprognoses te krijgen, zijn voor elk voorkomen minimaal drie realisaties gemaakt, die elk de historisch gemeten drukken tot en met 2019 kunnen reproduceren, maar variëren in de mobiliteit en gassaturatie in de aquifers. Deze drukprognoses voor elk veld zijn gebruikt om de bodemdaling te voorspellen.

- De reservoir- en geomechanische modellen voor de voorkomens in het Waddenzee gebied 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

Op basis van de evaluatie gepresenteerd in dit rapport wordt geconcludeerd dat de belasting in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag binnen de gebruiksruijme blijft. Daarom worden er geen maatregelen genomen om de productie bij te stellen. De belasting is vergelijkbaar met de belasting volgens de M&R-cyclus 2018 voorspelling. Het remwegscenario laat zien dat de bodemdalingsnelheid, veroorzaakt door productie uit de waddenvoorkomens, bij het stopzetten van de productie significant zal afnemen.

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 bodemdalingberekening	8
2.2.2 Resultaat bodemdalinganalyse	8
2.3 Verifiëren prognose (stap 3).....	12
2.3.1 Overzicht ondergrondmodellering	12
2.3.2 Verifiëren reservoirmodellen (stap 3a)	12
2.3.3 Verifiëren bodemdalingsscenario's (stap 3b)	17
2.3.4 Vergelijking van gemodelleerde bodemdaling met resultaten van campagne GPS	32
2.4 Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4)	35
2.4.1 Bepaling volume en gemiddelde daling	35
2.4.2 Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting	37
2.4.3 Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting	39
2.5 Indien nodig aanpassen productie (stap 5)	40
2.6 Actualiseren (stap 6)	40
2.7 Remwegscenario	41
3 Kwaliteitsborging	42
4 Conclusies	43
5 Referenties	44
Bijlage 1 Gemodelleerde en gemeten bodemdaling sinds 1986 en 2006	47
Bijlage 2 Verwachte bodemdaling in het jaar 2050.....	49
Bijlage 3 Mogelijke gevolgen van aardbevingen op bodemdaling en milieu	50
Bijlage 4 Tijdseries Waddenzee	54
Bijlage 5: Controle reservoirmodellen met 2019 drukmetingen	56
5.1 Moddergat	56
5.2 Nes	56
5.3 Lauwersoog Oost	58
5.4 Lauwersoog Centraal	59
5.5 Lauwersoog West	59
5.6 Vierhuizen Oost.....	60

1 Inleiding

Ten behoeve van de gaswinning vanaf de mijnbouwlocaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (MLV) 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. In 2019 heeft de minister ten slotte ingestemd om het gasveld Vierhuizen-Oost tot 2024 te mogen produceren (DGKE-WO /18270235).

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 2019 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 2019 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 2-19 en Figuur 2-18).
2. Tabellen met de jaarlijkse toename van het bodemdalingsvolume (inclusief onzekerheid) per voorkomen per kombergingsgebied voor de jaren 2005 t/m 2022 (Tabel 2-10 en Tabel 2-11). Een tabel met de bodemdalingssnelheid (per jaar; S) en belasting (gemiddelde bodemdalingssnelheid per 6 jaar; B) per kombergingsgebied (Zoutkamperlaag en Pinkegat) tot 2042 (Tabel 2-12 en Tabel 2-13).
3. De in een bepaald jaar gerapporteerde belasting B wordt berekend voor de situatie op 1 januari van dat jaar. Voor de rapportage in 2020 (over het jaar 2019) wordt op deze manier een B voor 1 januari 2020 berekend.

4. Grafieken met de bodemdalingsbelasting voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag vanaf start productie op de locatie Moddergat tot 2042 (Figuur 2-22 en Figuur 2-23).
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 2-12 tot en met Figuur 2-16).

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 het 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). De modellen die deze fysische processen beschrijven zijn ook toegepast op de overige MLV velden en Anjum.

2 Deelprocessen

Op basis van de tot en met het jaar 2019 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 2019.

2.1 Meten (stap 1)

2.1.1 Vlakdekkende metingen

Volgens het meetplan voor de Waddenzee zijn in 2019 GPS-metingen in de Waddenzee uitgevoerd op 16 clusters van peilmerken in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag.

De GPS-metingen zijn in Referentie 8 beschreven en ook gerapporteerd in Referentie 20.

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 het GPS-station Ternaard aan toegevoegd.

2.1.2 Reservoir monitoring

In Tabel 2-1 worden de reservoirdrukken getoond zoals gemeten in 2019 in de Waddenvelden Nes, Moddergat, Lauwersoog-Centraal, -Oost en -West. Tabel 2-2 toont de cumulatieve gasproductie per voorkomen op 31 december 2019, waarbij door afronding het totaal niet exact optelt tot de som der afzonderlijke velden.

Tabel 2-1; Reservoirdrukmetingen in 2019 voor de MLV-voorkomens op basis van Closed-in Tubing Head Pressure CITHP metingen. Hierbij wordt de druk gemeten aan het oppervlak als de put voor meerdere dagen dichtstaat, en vervolgens geconverteerd naar reservoirniveau. Uit het Vierhuizen-Oost voorkomen is 2019 niet geproduceerd, noch is de druk gemeten.

Voorkomen	Datum	Put	Gemeten druk (op reservoir niveau, bara)	Type meting
Nes	06/04/2019	MGT-2	147,0 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Nes	06/04/2019	MGT-3	143,0 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Nes	12/07/2019	MGT-4A	151,0 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Nes	06/04/2019	MGT-5	147,0 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Moddergat	06/04/2019	MGT-1B	147,0 (@ 3860 mTVDNAP)	CITHP
Lauwersoog-Oost	06/04/2019	LWO-1B	137,9 (@ 4050 mTVDNAP)	CITHP
Lauwersoog-Centraal	06/04/2019	LWO-2	139,0 (@ 4035 mTVDNAP)	CITHP
Lauwersoog-West	06/04/2019	LWO-3	112,0 (@ 4060 mTVDNAP)	CITHP

Tabel 2-2; Productie per voorkomen tot en met 31/12/2019.

Voorkomen	Cumulatieve productie t/m 2019 (10 ⁶ Nm ³)	Productie volgens 2011 winningsplan in 2019 (10 ⁶ Nm ³)	Actuele productie in 2019 (10 ⁶ Nm ³)
Nes	10898	856	579
Moddergat	4544	191	210
Lauwersoog-C	135	16	5
Lauwersoog-West	1579	78	78
Lauwersoog-Oost	2244	82	111
Vierhuizen-Oost	1628	0	0
Totaal*	21029	1233	983

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

2.2 Analyseren meetgegevens (stap 2)

2.2.1 Kwaliteitscontrole en bodemdalingsberekening

De GPS-metingen zijn volgens de in Referentie 8 beschreven GNSMART-methodiek geanalyseerd. Hierbij wordt een twaalfal permanente stations als vaste (statische) referentie gebruikt. De coördinaten van deze stations zijn voorafgaand aan de 2019 campagne in een aparte analyse over een periode van zes weken bepaald. De lange-termijnbeweging 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

Sinds de Meet- en Regel cyclus 2018 worden de GPS dubbel-differenties ruimtelijk ten opzichte van een referentie netwerk van meerdere stations gebruikt in de confrontatie met bodemdalingsmodellen, conform de LTS-procedure. GPS dubbel-differenties ten opzichte van een referentienetwerk zijn robuuster voor kleine veranderingen in individuele stations.

De referentiestations worden jaarlijks op stabiliteit gecontroleerd (Referentie 9). Het voormalige referentiestation Schiermonnikoog ondergaat in opeenvolgende jaren kleine verticale correcties, in totaal in 2019 was dit 5,6 mm.

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 Rijkswaterstaatpunten) 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 2-18 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 2-12 tot en met Figuur 2-16 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.

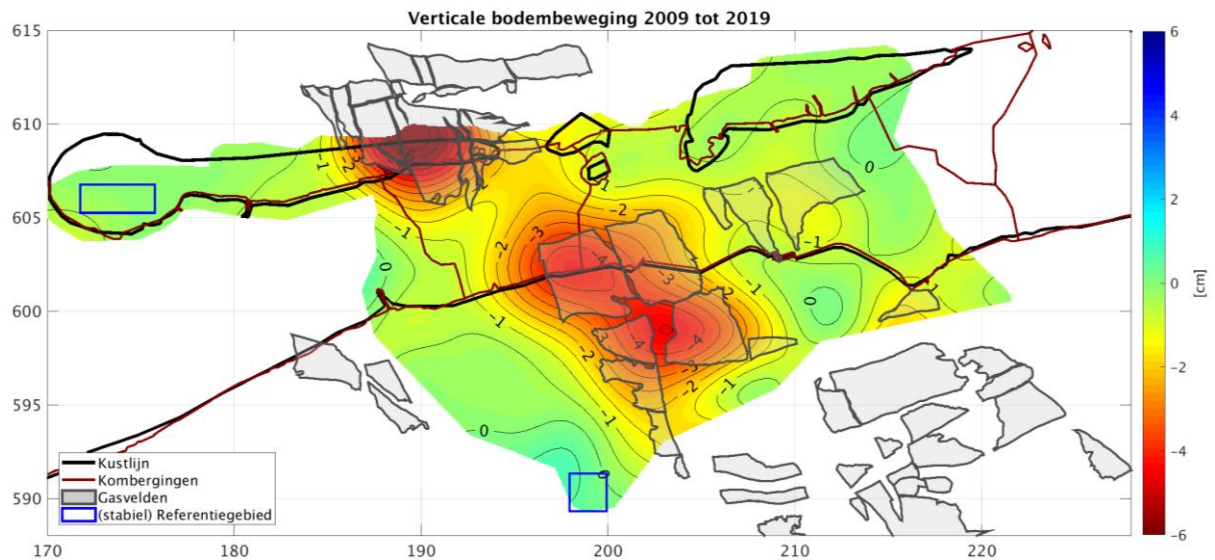
Locatie	Start Monitoring	Absolute verticale beweging sinds start monitoring t/m 31/12/2019 [mm]	Verticale bewegingssnelheid in 2019 [mm/jaar]
Ameland	05-02-2007	-85	-6,2 [1 σ = 0,8 mm/jaar]
Anjum	05-02-2007	-46	-3,2 [1 σ = 0,7 mm/jaar]
Moddergat	05-02-2007	-46	-3,3 [1 σ = 0,9 mm/jaar]
Ameland-Nes	17-06-2014	-6	-1,4 [1 σ = 1,6 mm/jaar]
Ternaard	19-11-2016	-7	-3,1 [1 σ = 0,6 mm/jaar]

2.2.2.3 Waterpassen en InSAR

Voor zowel waterpassen als InSAR (satelliet radar interferometrie) zijn er geen nieuwe metingen in deze Meet- en Regelcyclus ten opzichte van de Meet- en Regelcyclus 2018. De differentiestaten van het Meetregister Noord-Nederland, Groningen en Waddenzee 2018 (Referentie 30) zijn gebruikt, die zowel de deformatie metingen van de waterpassingen als die van InSAR (van opeenvolgende missies ERS, Envisat en Radarsat-2) bevatten, 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 deformatieschattingen zijn berekend op basis van data over periodes van één jaar.

2.2.2.4 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 een continu oppervlak worden gevisualiseerd, dat de gemeten bodemdaling in dat tijdvak weergeeft (Figuur 2-1).



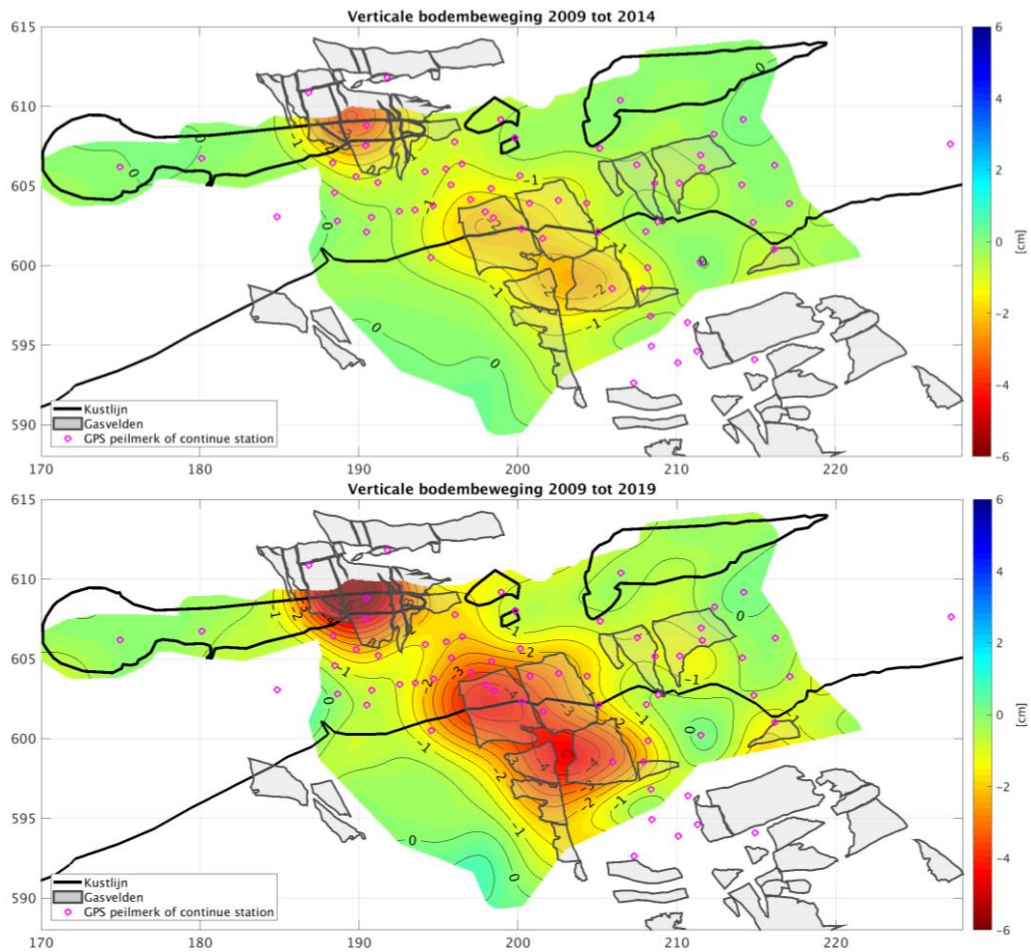
Figuur 2-1; Verticale bodembeweging tussen 2009 en 2019 volgens het geodetische model. De relatieve bodembeweging is hier gevisualiseerd ten opzichte van twee stabiel veronderstelde referentiegebieden bij Driesum (ten oosten van Dokkum) en in het westen van Ameland.

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.

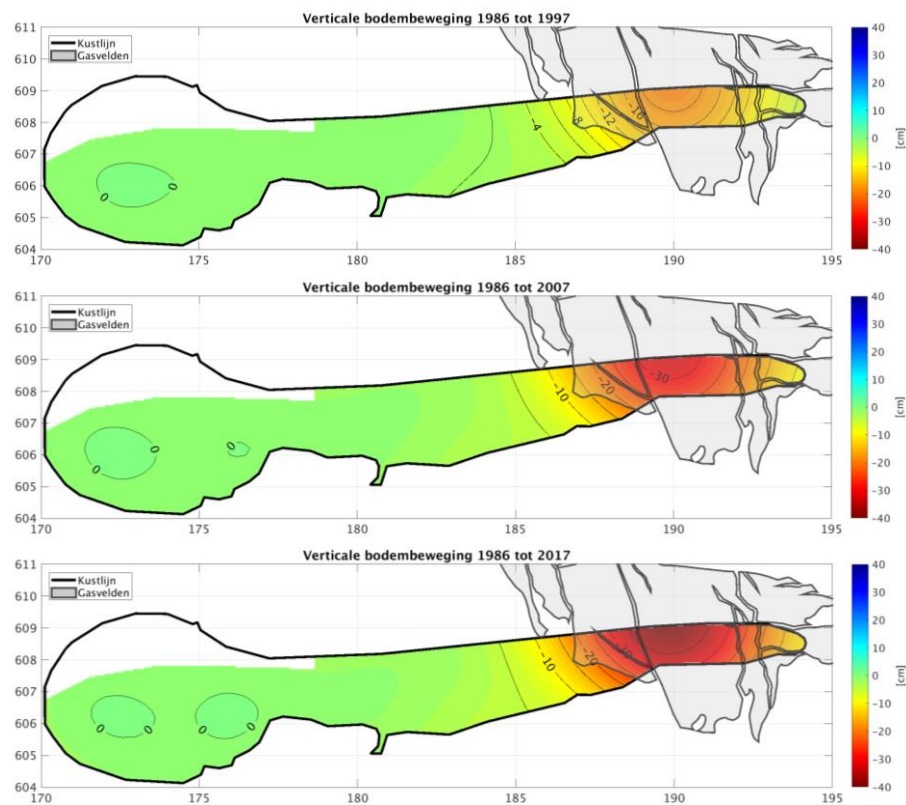
Om de gemeten bodemdaling in tijd te visualiseren zijn in Figuur 2-2 twee resultaten getoond van het geodetisch model voor de periodes 2009-2014 en 2009-2019. Figuur 2-3 toont de door de geodetische ruimte-tijd analyse gemodelleerde bodemdaling op het eiland Ameland voor drie periodes sinds de start van de winning in 1986. Beide figuren tonen aan dat:

- De posities van de bodemdalingskommen stabiel zijn: het centrum van de kom blijft op hetzelfde punt liggen. Dit geldt ook voor de positie van de bodemdalingskom boven het Ameland voorkomen. Laterale verplaatsingen van de kom die worden geconcludeerd door TNO op basis van numerieke modellen (Referentie 31) lijken niet bevestigd te worden door de geodetische analyses.

De vorm van de bodemdalingskommen is stabiel. De bodemdalingskommen worden wel dieper maar veranderen nauwelijks van vorm.



Figuur 2-2; Ruimte-tijd analyse van de gemeten daling in de Waddenzee voor 2 tijdsperiodes.



Figuur 2-3; Ruimte-tijd analyse van de gemeten daling op het eiland Ameland voor 3 tijdsperiodes.

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 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 en eigenschappen van de verschillende aardlagen en de grootte van het reservoir. 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. Door de structuur (inclusief diepte) van de aardlagen te combineren met de diepte van het gas-water contact wordt de grootte van het gasreservoir bepaald. Ook beschrijven de geologische modellen de eigenschappen van de gesteentes, zoals de porositeit en de permeabiliteit. Deze informatie komt voort uit petrofysische metingen gedaan in de putten, aangevuld met geologische inzichten zoals de omgeving waarin de sedimenten zijn afgezet. 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 22. 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 zijn afgezet van het Ameland veld (zogenaamde “damp en wet sand flats”) en de Waddenvelden (zogenaamde “dry sand flats”).

Deze modellen worden vervolgens gedeeld met de reservoir engineer. 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. Een voorbeeld van een geologische onzekerheid die met behulp van productie- en drukgegevens gekalibreerd kan worden is het gasvolume in het compartiment dat verbonden is met een put.

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 paragraaf 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

- Ameland: Ameland-Oost en Ameland-Westgat,
- Wadden: Lauwersoog-Centraal, Lauwersoog-Oost, Lauwersoog-West, Moddergat, Nes en Vierhuizen-Oost,
- Anjum: 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 meer dan 70% van het gas hebben geproduceerd, 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.

Databron	Levert 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, permeabiliteit, relatieve permeabiliteit, compressibiliteit, doorlatendheid van breuken
Hoeveelheden geproduceerd gas en water (jaarlijks)	Porositeit, permeabiliteit, relatieve permeabiliteit, compressibiliteit

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 verschillende voorspellingen van de toekomstige reservoirdrukken 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. Voor het Nes veld wordt dit in meer detail beschreven in Bijlage 5 van dit rapport.

Nu kan men zich afvragen of het mogelijk is dat een breuk doorlatend wordt in het geval een reservoir door productie al in druk is gedaald. Dit zou snel bemerkt worden uit de drukmetingen en de productiemetingen. De druk in het gasreservoir zou namelijk hoger worden als er een verbinding ontstaat tussen het blok waaruit geproduceerd wordt en het blok aan de andere kant van de breuk, waar de druk tot voor kort gelijk was aan initiële druk en dat gevuld is met water. Als gevolg van de hogere druk in het gasreservoir zou de productiesnelheid in de put toenemen en ook zal meer water geproduceerd worden. Dit is nog nooit waargenomen in de velden die NAM opereert en daarmee zeer onwaarschijnlijk.

Een ander scenario is de situatie waarbij de breuk tussen twee producerende gasreservoirs met verschillende reservoirdrukken doorlatend wordt tijdens de productieperiode. Als gevolg van de veranderende drukken in de gasreservoirs zouden de productiesnelheden in de putten veranderen, maar kan verwacht worden dat het totale productievolume van beide voorkomens gelijk blijft.

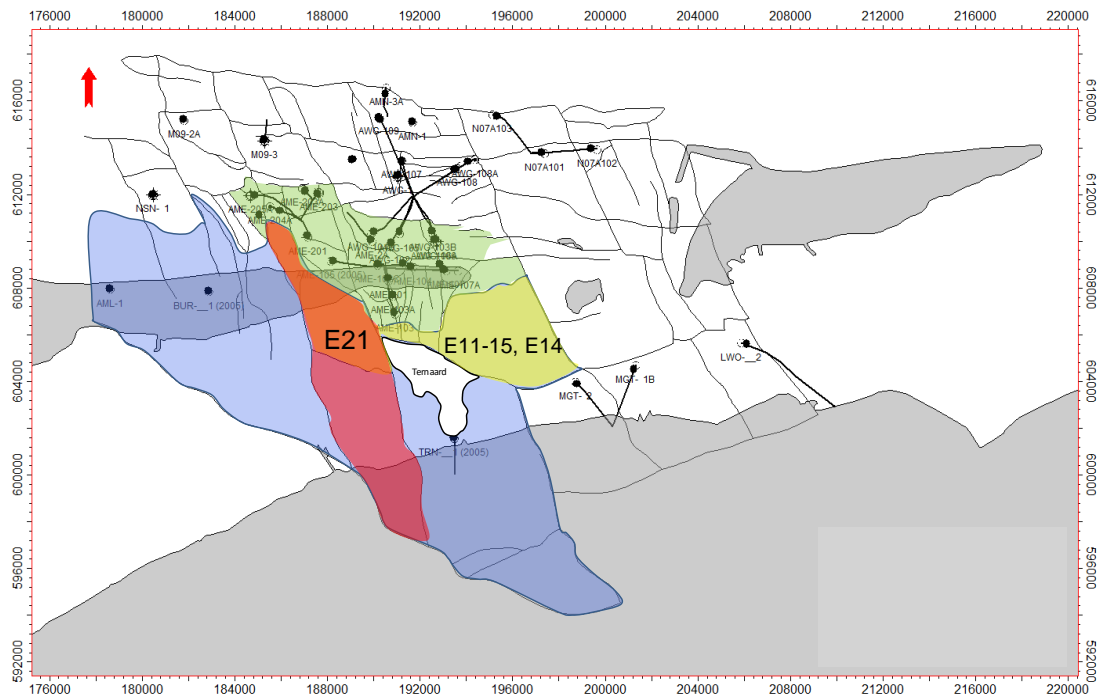
Daarmee zal de uiteindelijke bodemdaling niet veranderen. Ook dit scenario is nog nooit waargenomen in de velden die NAM opereert.

Dit betekent dat de reservoirrealisaties die uitgaan van deze mechanismes onwaarschijnlijk zijn en daarmee a priori een zeer kleine kans krijgen, waardoor ze niet zijn meegenomen in de bodemdalingberekeningen.

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

Om de onzekerheden mee te nemen die *in mindere mate* 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 2-4) gevarieerd om de bodemdaling ten zuiden van Ameland te verklaren. De blauwe aquifers in Figuur 2-4 kunnen niet in druk dalen omdat deze aan alle kanten, dus ook aan de kant waar deze aan het gasveld grenst, begrensd worden door breuken met een dusdanig groot verzet dat er geen contact is tussen de reservoirs aan weerszijden van de breuken.



Figuur 2-4; 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 modelrealisaties die de historische metingen tot en met 2019 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.
- Voor Ameland zijn er twee additionele realisaties meegenomen, zie Tabel 2-5.

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 petrofysische logs en de gesteentekernen, en er zijn geen onfysische porositeiten (van bijv. meer dan 30%) gebruikt om de modellen te kalibreren. Ook de combinaties van parameterwaarden zijn realistisch. De gemodelleerde correlatie tussen bijvoorbeeld de porositeit en de gassaturatie is in overeenstemming met fysische principes en de logmetingen 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 realisaties

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

goed worden gereproduceerd, zie Bijlage 5. De drukken in de watervoerende lagen verder weg van de putten, waar geen directe metingen zijn, laten grotere verschillen zien tussen de realisaties. 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)
	Interim 1 (M91)	10	0,1 (E21) & 1 (E11-15)
	Basis (M96)	5	0,1 (E21) & 1 (E11-15)
	Interim 2 (M10202)	0	0,05 (E21) & 0,1 (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	10	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	5	1
Nes ⁴	Laag	16	0,3
	Basis	16	0,3
	Hoog	16	1,0
Vierhuizen-Oost	Laag/basis	16	0,3
	Hoog	0	1

³ GPS-metingen zijn gebruikt om de drukkaling in het zuidwestelijke aquifer (E21) en zuidoostelijke aquifers (E11-15 en E14 in Figuur 2-4) 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. Tabel 2-6 toont de jaarlijkse productie per voorkomen die is gebruikt om de druk per voorkomen te voorspellen.

Tabel 2-6; Voorgenomen productie (miljoen Nm³ per jaar) per voorkomen volgens Business Plan 2019.

Jaar	Moddergat	Nes	Lauwersoog-Oost	Lauwersoog-West	Lauwersoog-C	Vierhuizen-Oost
2020	172	454	107	74	6	-
2021	169	445	108	68	3	-
2022	152	359	102	57	3	-
2023	132	293	93	53	3	-
2024	119	255	89	42	1	-
2025	105	211	83	39	0	-
2026	93	136	78	37	1	-
2027	83	87	73	31	-	-
2028	74	79	69	21	-	-
2029	66	71	66	-	-	-
2030	59	64	62	-	-	-
2031	48	21	59	-	-	-
2032	35	16	56	-	-	-
2033	32	16	53	-	-	-
2034	30	0	48	-	-	-
2035	10	0	8	-	-	-
Totaal	1379	2506	1153	422	17	0

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 (<https://dianafea.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. Deze analytische modellen zijn tevens geschikt om de compactie met het RTCiM (Rate type compaction model, Referentie 12) door te rekenen. Met het RTCiM kunnen ook de 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 in de LTS-II studie 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 drukkaling 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. Door het rigid basement naar boven te bewegen zal de bodemdalingsskom smaller worden met de tijd. Eenzelfde gedrag wordt ook gezien wanneer er kruipbeweging in het zout ontstaat door compactie van het reservoir.

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 meerdere reservoirrealisaties gebruikt zijn (zie Paragraaf 2.3.2). Deze reservoirrealisaties zijn met elkaar gecombineerd, waarna de bodemdalingsscenario's zijn opgesteld, doorgerekend en geconfronteerd met de metingen. In deze M&R-rapportage zijn meer reservoirrealisaties doorgerekend dan in voorgaande jaren.

2.3.3.1 Opstellen van bodemdalingsscenario's

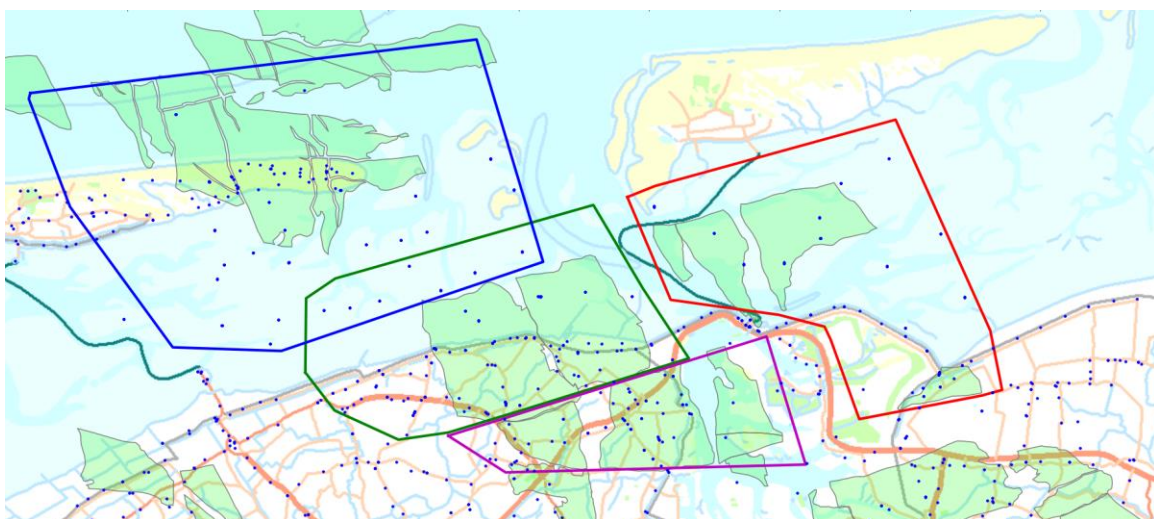
Bij het vinden en opstellen van bodemdalingsscenario's, met als doel de onzekerheid in de modellering te kwantificeren, is gebruik gemaakt van de LTS-II aanpak waarbij er per veld verschillende reservoirrealisaties zijn gemaakt. Voor elk van deze reservoirrealisaties zijn 20.000 bodemdalingsscenario's gemaakt op basis van de onzekerheid in de waarden voor de invoergegevens in de bodemdalingsmodellen.

Voor het beoordelen van de passing tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling zijn er vier kalibratiegebieden gedefinieerd, namelijk Ameland, Anjum, Nes/Moddergat en Lauwersoog/Vierhuizen (Figuur 2-5). Ten opzichte van de M&R-cyclus van vorig jaar is het kalibratiegebied Waddenzee opgesplitst in de gebieden Nes/Moddergat en Lauwersoog/Vierhuizen (LWO/VHN). Dit is gedaan om een betere passing van de gemeten bodemdaling te realiseren in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag (Figuur 2-8 en Figuur 2-11). De opsplitsing in twee gebieden maakt het mogelijk dat de geomechanische parameterwaarden voor de velden Lauwersoog/Vierhuizen onafhankelijk van mogelijke waarden voor de velden Nes en Moddergat kunnen worden gekozen.

In totaal zijn er 18 verschillende combinaties van reservoirrealisaties gebruikt (Tabel 2-7). Voor de kalibratiegebieden Lauwersoog/Vierhuizen en Anjum zijn net als voorgaande jaren de combinaties van alleen lage, basis en hoge realisaties gebruikt. Voor Nes/Moddergat en Ameland zijn dit jaar additionele combinaties en realisaties gebruikt.

De vier kalibratiegebieden liggen binnen het geomechanische model zodat ook de overlappende bodemdalingssommen van de velden goed worden meegenomen. Combinaties van reservoirrealisaties worden gelijktijdig doorgerekend en geconfronteerd met de geodetische dataset. Per kalibratiegebied wordt vervolgens de χ^2 bepaald.

Ook binnen de kalibratiegebieden gelden dus combinaties van reservoirrealisaties, waar voor iedere combinatie in een kalibratiegebied 20.000 bodemdalingsscenario's zijn gemaakt. Als voorbeeld: het kalibratiegebied Lauwersoog/Vierhuizen bevat vier voorkomens. Hiervan zijn drie combinaties gemaakt (zie ook Tabel 2-7). Dit betekent dat $3 \times 20.000 = 60.000$ bodemdalingsscenario's met de metingen binnen dit kalibratiegebied worden geconfronteerd.



Figuur 2-5; Vier kalibratiegebieden met gebruikte geodetische metingen. De meetpunten in het overlapgebied tussen de Waddenvelden en Ameland worden bij de confrontatie voor beide modellen gebruikt.

Tabel 2-7: Gebruikte combinaties (kolommen in de tabel) van reservoirrealisaties voor de verschillende deelgebieden.

	Lauwersoog/Vierhuizen		
LWOC	hoog	laag	basis
LWOW	hoog	laag	basis
VHN	hoog	laag/basis	laag/basis
LWOO	hoog	laag	basis

	Nes/Moddergat						
MGT	basis	laag	hoog	laag	basis	laag	hoog
NES	hoog	basis	hoog	hoog	basis	laag	basis

	Ameland				
Ameland	interim1	basis	laag	iterim2	hoog

	Anjum		
MET	basis	laag	hoog
EZU	basis	laag	hoog
ANJ	basis	laag	hoog

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 2019 Meet- en Regel cyclus:

- de constructie van de covariantiematrix van de geodetische dubbel-differenties voor de vier 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 bepaald 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 2019.
- InSAR: op het vasteland, jaarlijks gesampled op peilmerklocaties, t/m 2018.

Voor de waterpassingen (zowel op Ameland als nu ook op het vasteland) en de GPS-metingen is een volle 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 en de vasteland waterpassingen zijn de stochastische parameters toegepast zoals gedefinieerd in de LTS-studie. Naast de meetprecisie en de temporele component van de idealisatie precisie, is 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 InSAR dubbel-differenties is hetzelfde (vereenvoudigde) stochastisch model gebruikt als in de voorgaande Meet- en Regelcyclus, met enkel de varianties van de dubbel-differenties, waarbij de meetprecisie en de temporele component (potentiële peilmerkinstabiliteit) als volgt zijn gemodelleerd:

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

De geodetische studie in het kader van het winningsplan Groningen op het gebied van het InSAR stochastisch model, die de TU Delft heeft uitgevoerd, is begin 2020 afgerond (Referentie 29). Deze studie heeft een efficiënte en pragmatische methode opgeleverd om een volle covariantie-matrix inclusief correlaties tussen de deformatie metingen voor (gereduceerde) InSAR datasets te maken. Voor een volgende evaluatie kan onderzocht worden hoe deze methode geïmplementeerd kan worden.

Toepassing van de (co)variantiematrices in de confrontatie met bodemdalingsmodellen in de LTS-procedure leverde waarden van de minimale χ^2 toetsgrootheid op in de orde van de verwachtingswaarde 1, zie Tabel 8. Alleen de minimale χ^2 toetsgrootheid voor het kalibratiegebied Ameland is wat groter, 1,69 (in de Meet- en Regel cyclus van 2018 1,30), zie ook de volgende paragraaf. Een toetsgrootheid boven de verwachtingswaarde zou kunnen betekenen dat het stochastisch model moet worden bijgesteld. In de volgende Meet- en Regelcyclus zal daarom nader naar de spatio-temporele component van idealisatie precisie en model imperfecties worden gekeken.

χ^2/n 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/n toetsgrootheid) tussen de modelberekening en de geodetische dubbel-differenties berekent, waarbij n het aantal dubbel-differenties is. Indien de modelberekening overeenkomt met de geodetische dubbel-differenties binnen de gemodelleerde onzekerheden is de verwachte waarde van de χ^2/n toetsgrootheid 1. In het document wordt vaker de χ^2 zonder n genoemd. Hiermee wordt in alle gevallen χ^2/n bedoeld.

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 kalibratiegebied een rangschikking worden gemaakt van de waarschijnlijkheid van de bodemdalingsscenario's. Per jaar en per parameter (zoals bv. bodemdaling op een punt, de Cm waarde en bodemdalingsvolume) kunnen hiermee de statistische waarden zoals gewogen gemiddelde en betrouwbaarheidsinterval worden afgeleid. Met de keuzes voor constructie van de covariantiematrix zoals beschreven in de vorige paragraaf, zijn de minimale χ^2 toetsgrootheden in de confrontatie met de bodemdalingsmodellen voor de kalibratiegebieden zoals gedefinieerd in paragraaf 2.3.3.1 als volgt:

Kalibratiegebied	Minimale χ^2 toetsgrootheid confrontatie
Ameland	1,69
Nes/Moddergat	1,05
Lauwersoog/Vierhuizen	1,16
Anjum	1,19

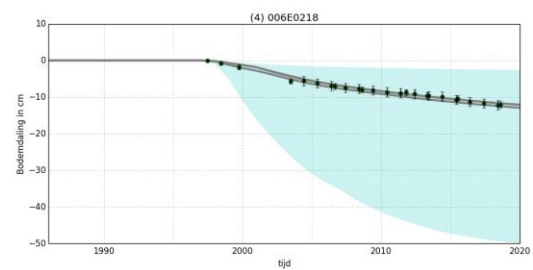
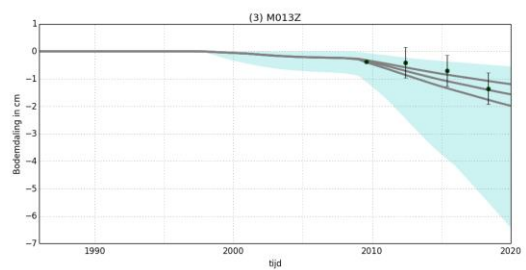
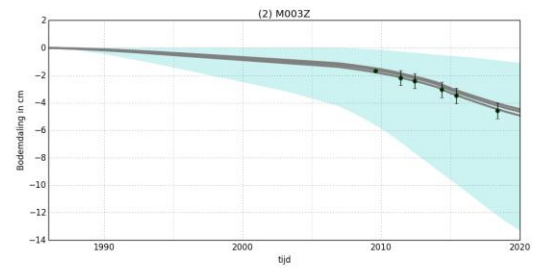
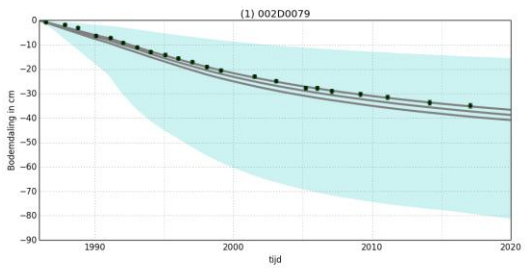
Tabel 2-8: Minimale χ^2 toetsgrootheid voor de vier kalibratiegebieden.

Voor Ameland geldt dat de gebruikte toetsingsmethode en de methode die gebruikt is om meer gewicht aan de GPS-punten in de Waddenzee toe te kennen hetzelfde zijn als gedocumenteerd in de M&R-cyclus over 2018.

Uit de analyse volgt dat het Ameland bodemdalingsscenario met de laagste χ^2 waarde gebaseerd is op de Ameland Interim 1 reservoirrealisatie. Deze realisatie heeft minder drukkaling in de Waddenzee en berekent in vergelijking met de gemeten daling te weinig bodemdaling in de Waddenzee. Minder drukkaling in de aquifers geeft een betere passing met de meetpunten op het oostelijk deel van het eiland waardoor de χ^2 lager wordt. In de M&R-cyclus ligt de focus op de passing met de meetpunten in de Waddenzee en om deze reden is gekozen voor de basisrealisatie, net als in de M&R-cyclus 2018.

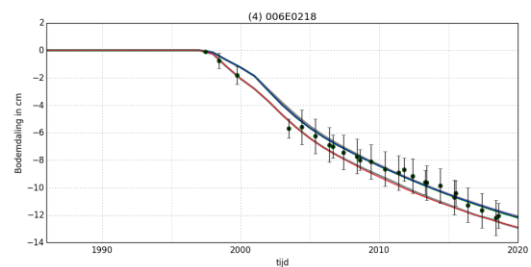
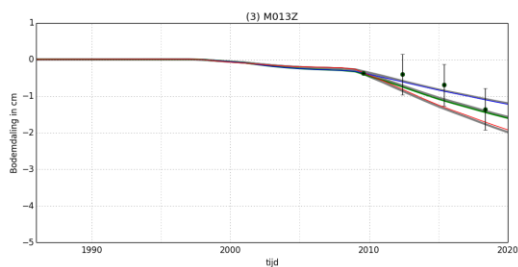
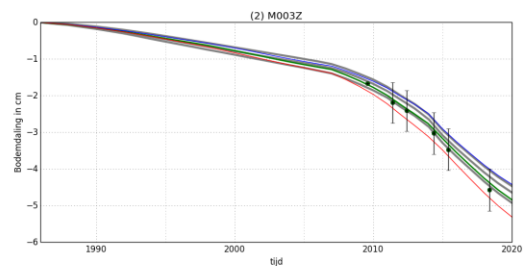
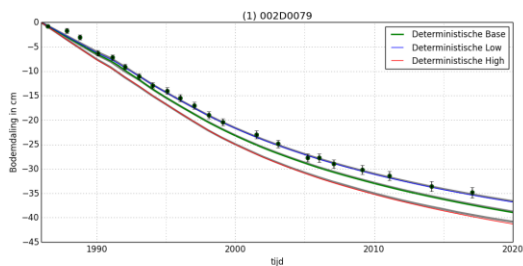
De minimale χ^2 voor Ameland is hoger dan in de M&R-cyclus over 2018. Eén van de oorzaken hiervan kan zijn dat het kalibratiegebied nu minder ver naar het westen van het eiland loopt. Veel van deze punten in het westen vallen niet in de gemodelleerde bodemdalingsskom van Ameland. Voor de punten buiten de bodemdalingsskom geldt dat de modeldeformatie in het westen van Ameland eiland (=0) beter past bij de gemeten daling (=0) waardoor de χ^2 voor de gehele dataset kunstmatig lager wordt.

Figuur 2-6 toont als grijze lijnen de statistische bodemdalingsslijnen voor de 2,5% overschrijdingskans, het gewogen gemiddelde en de 97,5% overschrijdingskans. Het blauwe vlak toont de onzekerheidsruimte die a priori is aangenomen. Tevens is de gemeten bodemdaling, met onzekerheid, als punten weergegeven in de grafieken.



Figuur 2-6; Bodemdaling op 4 punten. De grijze lijnen geven de statistische waarden voor de 2,5% overschrijdingskans, het gewogen gemiddelde en de 97,5% overschrijdingskans voor de bodemdaling weer. Het lichtblauwe gebied geeft de a priori gemodelleerde bodemdalingsruimte aan. De punten geven de waarden voor de waterpasmetingen aan, inclusief de onzekerheid (2-sigma).

Om ervoor te zorgen dat de probabilistische resultaten gekoppeld kunnen worden aan vergelijkbare deterministische scenario's, zijn er scenario's gekozen die zo dicht mogelijk, in tijd en plaats, bij de statistische waarden (gewogen gemiddelde, 2,5%, 97,5% overschrijdingskansen) liggen. Dit maakt de koppeling naar parameterwaarden inzichtelijker en het vergelijk met bijvoorbeeld een geodetische ruimte-tijd analyse eenvoudiger. De deterministische lijnen zijn met blauw, groen en rood aangegeven (Figuur 2-7).



Figuur 2-7; 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 punten zijn de geodetische waarnemingen met hun onzekerheden (2-sigma).

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

De geomechanische parameters per kalibratiegebied voor het lage, basis en hoge bodemdalingsscenario (Tabel 2-9) volgen uit de deterministische scenario's (Figuur 2-7). Bij het selecteren van deze scenario's is tevens nagestreefd dat de variatie voor de parameterwaarden tussen de gebieden beperkt blijft. In Bijlage 4 zijn de resultaten van de scenario's getoond als tijdseries voor meerdere punten in de Waddenzee.

De C_{mref} , C_{md} en b in Tabel 2-9 zijn RTCiM parameters die het compactiegedrag van het reservoir beschrijven. De $C/k(0)$, $d(c/k)$ en T_{salt} parameters zijn bepalend voor het zoutgedrag boven het compacterend reservoir of aquifer. Voor alle velden is de relatie tussen kernplug C_m metingen met de

porositeit⁵ gebruikt om een spatiële C_m kaart te maken die als a priori informatie gebruikt wordt in de berekeningen. De C_{mref} en C_{md} zijn vermenigvuldigingsfactoren op deze kaarten. De waarden voor de C_{mref} voor Ameland liggen aan de bovenkant van de gemeten C_m waarden. 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. Een duidelijke verklaring voor de grote verschillen is niet gevonden. Het is mogelijk dat naast de C_m van het gesteente bijvoorbeeld depletie in andere lagen een rol kan spelen. 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 vorige M&R-cycli in Geomec zijn gebruikt. Voor een verdere beschrijving van de RTCiM- en zoutparameters wordt verwezen naar Referentie 14.

Tabel 2-9; gebruikte geomechanische parameters voor respectievelijk het laag, basis en hoog bodemdalingsscenario (alle scenario's maken gebruik van de basis reservoirrealisatie).

RTCiM	Ameland	Anjum	Nes Moddergat	Lauwersoog Vierhuizen
C_{mref} (factor) [-]	2,96 - 3,21 - 3,35	1,2 - 1,2 - 1,08	1,13 - 1,3 - 1,41	0,89 - 0,95 - 1,19
C_{md} (factor) [-]	0,6 - 0,65 - 0,73	0,26 - 0,26 - 0,39	0,24 - 0,28 - 0,39	0,21 - 0,22 - 0,41
b [-]	0,03 - 0,029 - 0,027	0,015 - 0,015 - 0,015	0,014 - 0,012 - 0,017	0,022 - 0,016 - 0,011
Zoutgedrag				
$C/k(0)$ [-]	0,78 - 0,78 - 0,8	0,75 - 0,75 - 0,8	0,8 - 0,77 - 0,78	0,82 - 0,79 - 0,82
$d(c/k)$ [-]	0,24 - 0,23 - 0,21	0,32 - 0,32 - 0,23	0,15 - 0,18 - 0,2	0,23 - 0,17 - 0,21
T_{salt} [jaar]	19,88 - 23,28 - 21,91	24,04 - 24,04 - 16,47	26,19 - 25,92 - 27,39	18,18 - 4,88 - 12,1

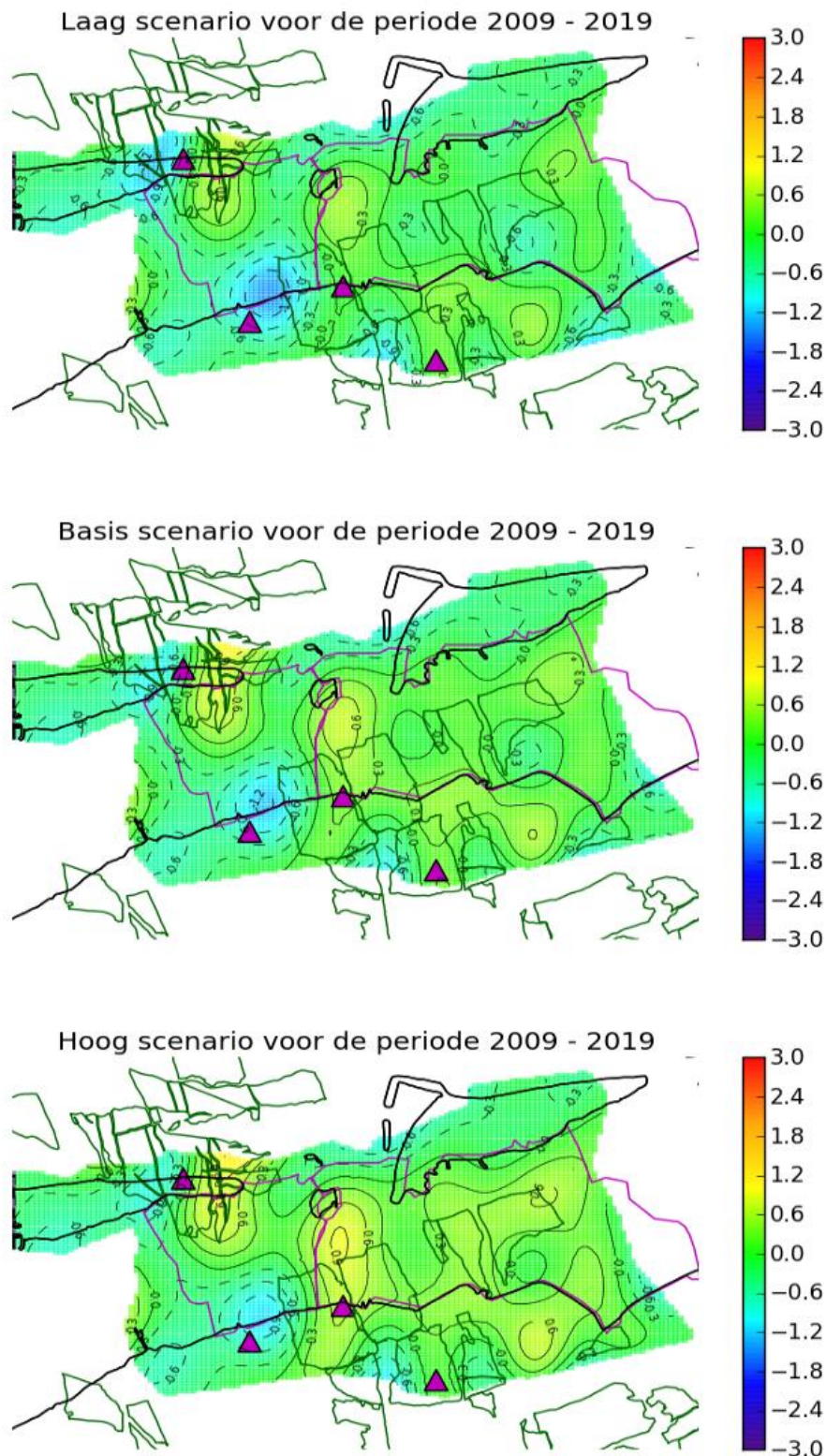
2.3.3.5 Vergelijking van het de bodemdalingsscenario's met het geodetisch model

Het vergelijk met de metingen is in deze rapportage ook 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 2-8.

Omdat 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 drukkaling in de laterale aquifers onder de Waddenzee is gevarieerd. Ook is er meer gewicht toegekend aan de waddenpunten (campagne GPS).

Uit dit figuur blijkt dat het basisscenario goed past met het geodetische model voor de periode 2009-2019. Voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag geeft het bodemdalingsmodel iets meer daling dan het geodetisch model (enkele mm's in 10 jaar). De variatie in verschillen in het Pinkegat kombergingsgebied zijn iets groter, maximaal ongeveer 1 cm in 10 jaar. 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 2-8 laat zien dat de gemeten bodemdaling in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag volgens het geodetische model wordt overschat door de gemodelleerde daling in het hoge scenario en onderschat in het lage scenario.

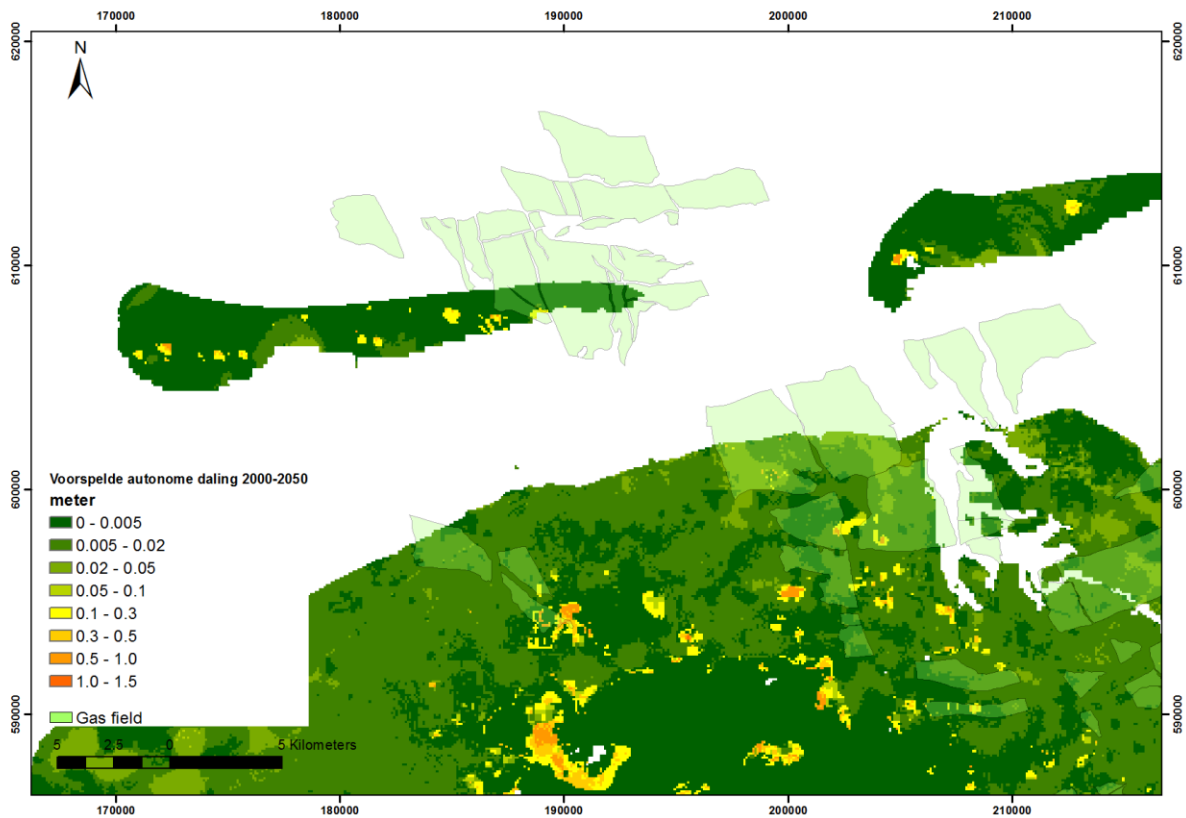
⁵ De gebruikte porositeits (Φ) - C_m relatie is $C_m = 273 \Phi^3 - 68,72 \Phi^2 + 9,85 \Phi + 0,21$ waarbij de C_m in 10^{-5} bar^{-1} is en de porositeit (Φ) in [-].



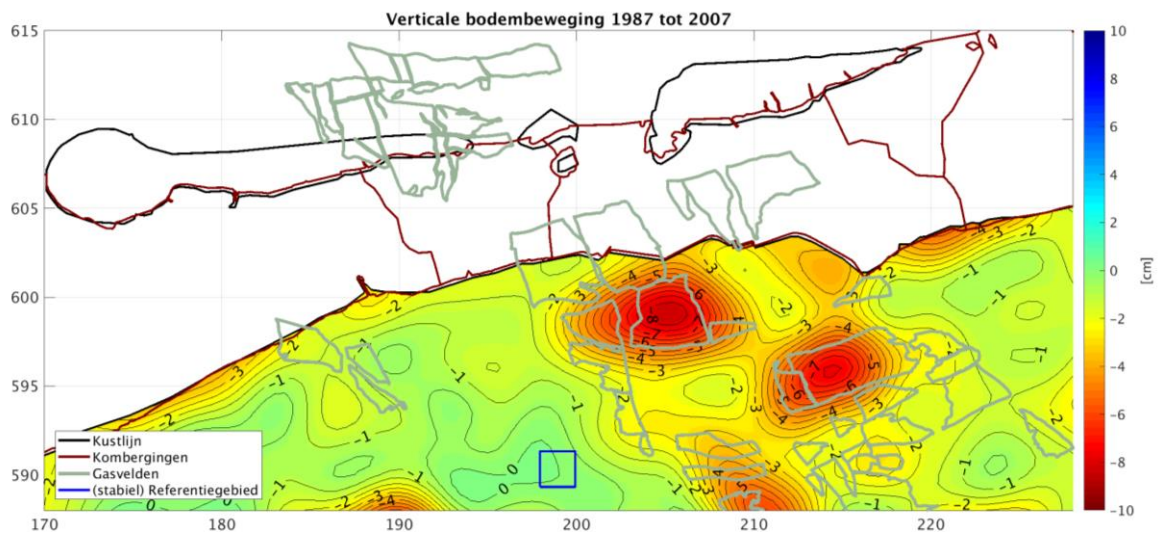
Figuur 2-8; Verschil (in cm) tussen de gemodelleerde bodemdaling volgens het laag (bovenste figuur), basis (middelste figuur), hoog scenario (onderste figuur) en het geodetische model voor de periode 2009-2019. In de blauwe gebieden, met negatieve afwijkingen, is de gemeten bodemdaling groter dan de 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. Meerdere 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 2-9 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 Waddenzegebied 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 0,05 m 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 bijvoorbeeld dijklichamen. Figuur 2-10 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 20 jaar (gemiddeld 1 mm per jaar), ook in de gebieden waar geen gaswinning plaatsvond in deze tijdsperiode.



Figuur 2-9; Maaiveldddaling (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.

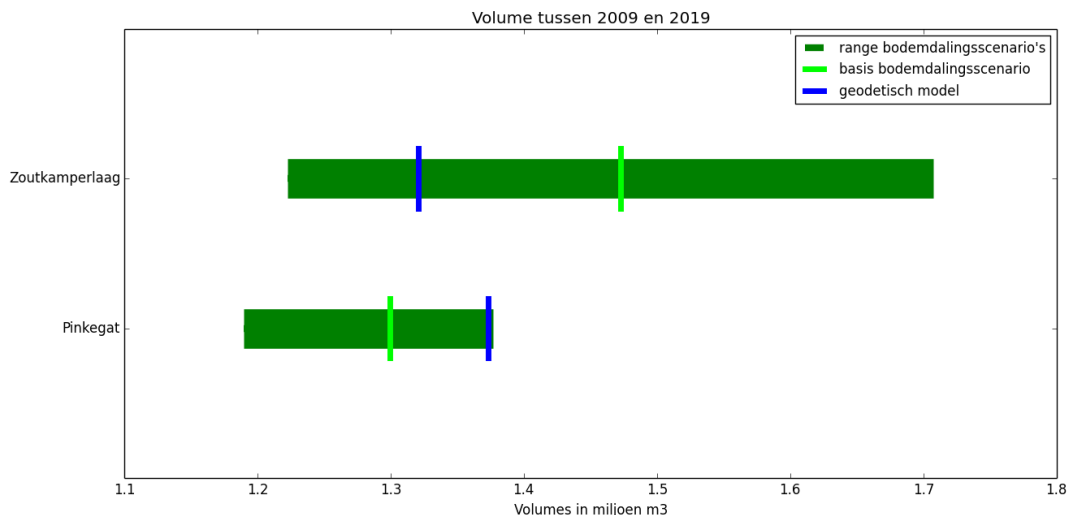


Figuur 2-10; Geodetisch model voor de metingen tussen 1987 en 2007 (in cm), waarbij aangetoond wordt dat er relatief veel bodemdaling plaatsvond onder de zeedijk, ook in de gebieden waar geen gaswinning plaatsvond.

Met het geodetisch model is ook het bodemdalingvolume berekend voor de periode tussen 1/1/2009 en 1/1/2019. Dit volume is vergeleken met de uitkomsten voor het lage, basis en hoge bodemdalingsscenario (Figuur 2-11).

De gemodelleerde bodemdaling voor Zoutkamperlaag wordt minder overschat dan in de M&R 2018. Dit is het gevolg van de splitsing van het Waddenzee kalibratiegebied in Nes/Moddergat en Lauwersoog/Vierhuizen, waardoor de geomechanische parameters van de Lauwersoog velden onafhankelijk van Nes/Moddergat worden gekalibreerd (Tabel 2-9). Hierdoor past de gemodelleerde bodemdaling beter bij de metingen boven met name de Lauwersoog velden.

Het volume volgens het basisscenario in Pinkegat is lager dan het geodetisch berekende volume. Het geodetisch bepaalde volume ligt net binnen de range van de geomechanisch gemodelleerde volumes. Dit verschil wordt voornamelijk veroorzaakt door de daling ten westen van Nes volgens het geodetische model. Mogelijke verklaringen voor dit verschil zijn gegeven in de vorige paragraaf.



Figuur 2-11; Vergelijking van de breedte aan bodemdalingsvolumes volgens de geomechanische modellen (groene balk) met het volume volgens het geodetisch model voor de periode 2009-2019 (blauwe streep in groene balk),

Bodemdalingsmodellen voor Ameland (inclusief LTS-II)

Het Ameland veld kent een lange historie van bodemdalingvoorspellingen 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 gemiddeld lagere C_m waarden aangaven dan, wat later bleek, nodig in latere kalibraties;
2. De gedachten over de mobiliteit van de aquifers varieerden in de tijd. Gedurende de eerste jaren van productie werd rekening gehouden met een volledig mobiel aquifer terwijl de gemeten smalle bodemdalingsskom juist erop wees dat de mobiliteit van de aquifer en daarmee gepaarde drukkaling waarschijnlijk gering was.

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

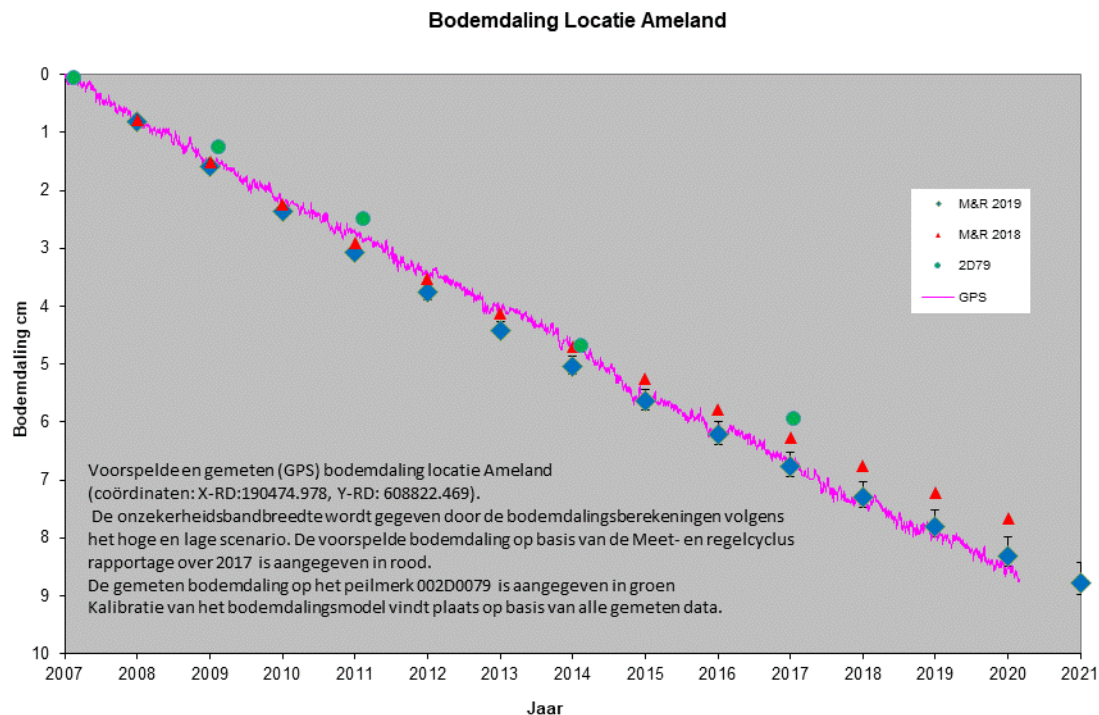
De LTS-II studie laat zien dat het best passende geomechanische model gebaseerd is op een reservoirrealisatie waarbij weinig tot geen aquiferdepletie plaatsvindt. De reden waarom de LTS-confrontatie methode naar deze oplossing convergeert, wordt voornamelijk veroorzaakt door de geodetische metingen boven de oostkant van Ameland eiland. Sinds de start van de winning wordt de gemeten bodemdaling in dit gebied overschat door de geomechanische modellen. Zelfs in het geval dat er geen drukkaling kan plaatsvinden in de aquifers, wordt de bodemdaling nog steeds overschat. Het toelaten van drukkaling in de aquifers ten zuidoosten van het gasveld zou ervoor

zorgen dat de bodemdalingskom 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 alle metingen en model zal de methode juist die reservoirscenario's selecteren die deze overschatting beperkt houden en dit zijn de realisaties zonder drukkaling in de aquifers van Ameland.

In de M&R-cyclus over de rapportagejaren sinds 2018 is meer gewicht toegekend aan de GPS-metingen in de Waddenzee. Dit is gedaan door alleen de meetprecisie van de metingen mee te nemen. Voor de meetpunten op het eiland, de waterpaspunten, wordt ook de idealisatie precisie meegenomen. Door deze aanpassingen in de covariantie matrix selecteert de LTS-II methode modellen die beter passen met de metingen in de Waddenzee.

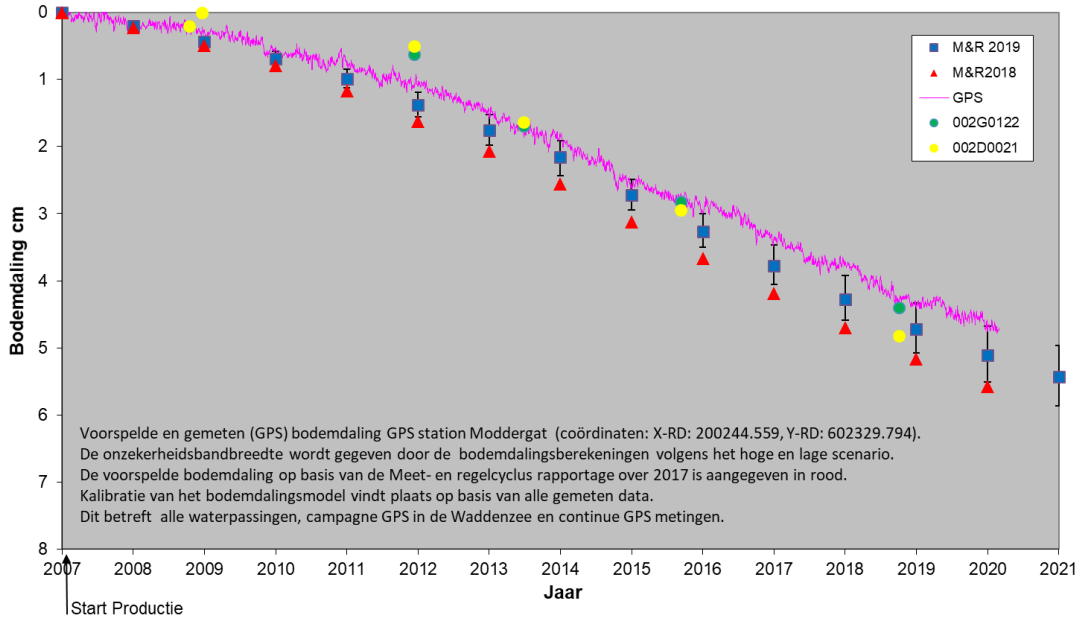
2.3.3.6 Bodemdaling GPS-locaties

Figuur 2-12 tot en met Figuur 2-16 tonen zowel de gemodelleerde daling tot en met 2019 als 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 gekalibreerde gemodelleerde daling. Uit de vergelijkingen wordt geconcludeerd dat dit niet het geval is. Voor het Ameland GPS punt in Figuur 2-12 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 GPS-punt Moddergat valt iets lager uit t.o.v. de M&R 2018 (Figuur 2-13). Echter in vergelijking met GPS en waterpasmetingen, de laatste in de figuren getoond als cirkels, is de passing beter.



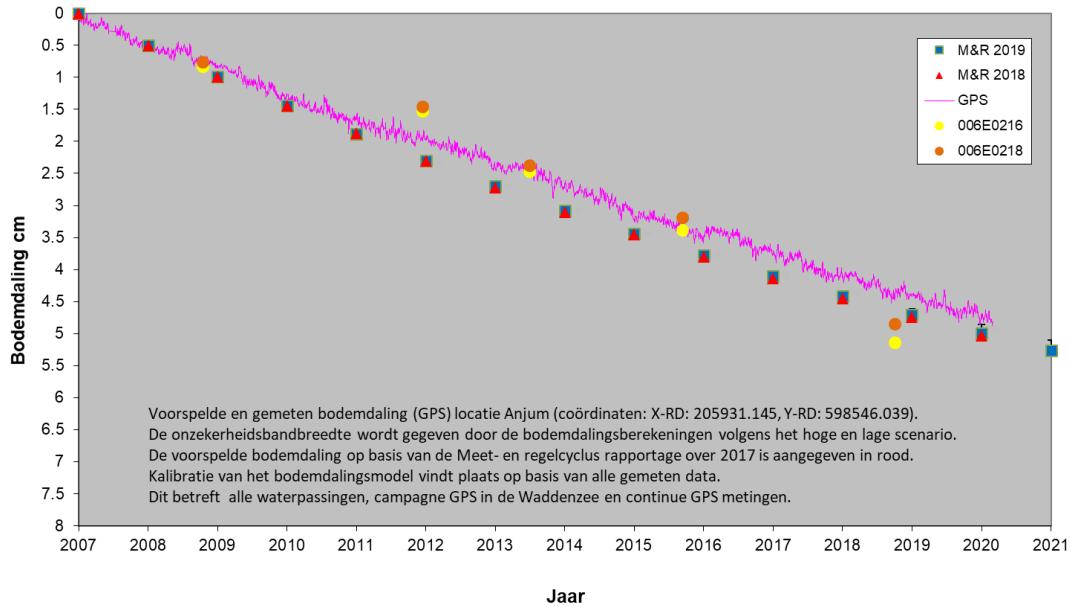
Figuur 2-12; Voorspelde en gemeten (GPS) bodemdaling locatie Ameland (coördinaten: X-RD:190474.978, Y-RD: 608822.469). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2018 is aangegeven in rood. In groen is de gemeten bodemdaling op peilmerk 002D0079 (dichtbij het GPS-punt) middels waterpassing aangegeven.

Bodemdaling op GPS station Moddergat



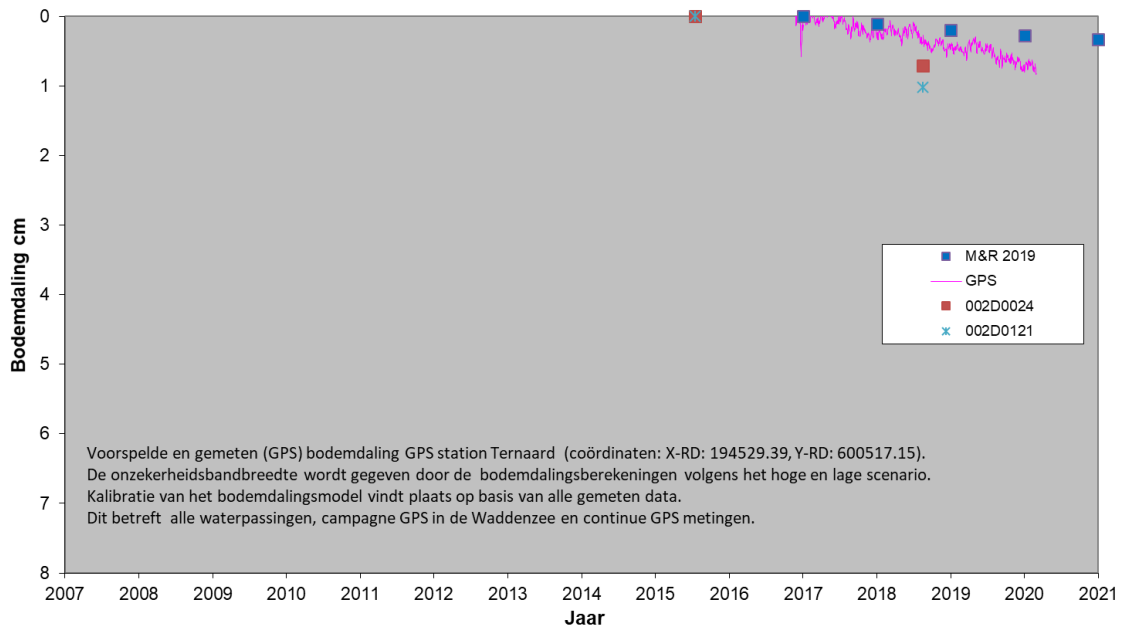
Figuur 2-13; Voorspelde en gemeten (GPS) bodemdaling op de GPS-locatie Moddergat (coördinaten: X-RD: 200244.559, Y-RD: 602329.794). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus 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.

Bodemdaling op Locatie Anjum



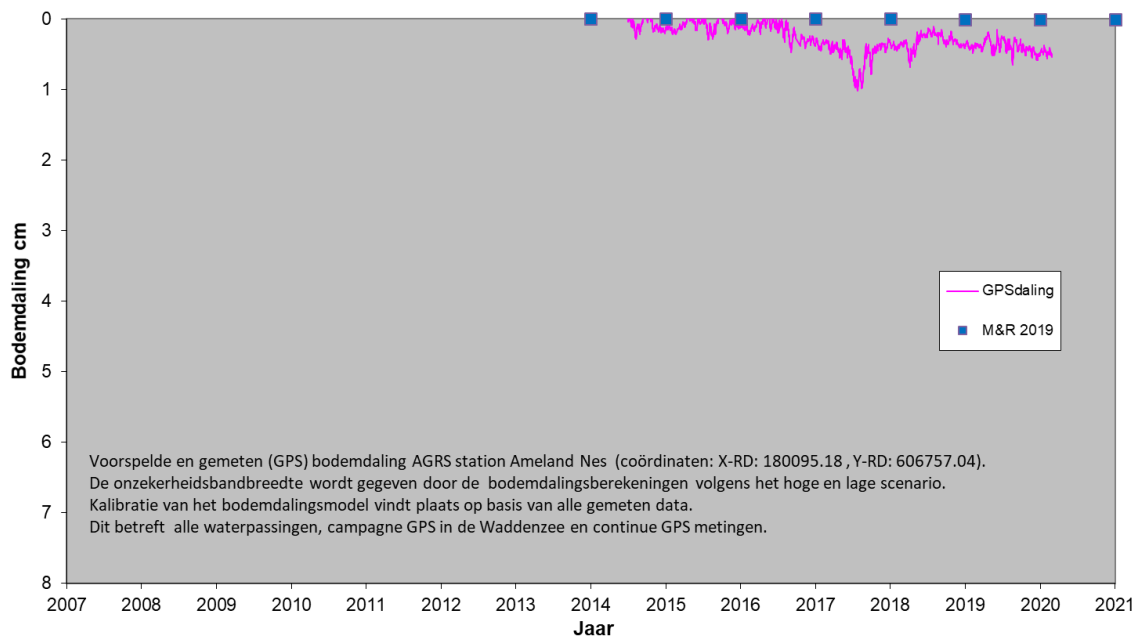
Figuur 2-14; Voorspelde en gemeten bodemdaling (GPS) op de GPS-locatie Anjum (coördinaten: X-RD: 205931,145, Y-RD: 598546,039). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage 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 2-15; Voorspelde en gemeten bodemdaling (GPS) op de GPS-locatie Ternaard (coördinaten: X-RD: 194529,39, Y-RD: 600517,15). Alle scenario's geven nauwelijks bodemdaling op dit punt waardoor de onzekerheidsbandbreedte zeer gering is. Hierdoor vallen de resultaten van de scenario's op elkaar.

Bodemdaling op AGRS station Ameland Nes



Figuur 2-16; Voorspelde en gemeten bodemdaling (GPS) op het AGRS-station Ameland Nes (coördinaten: X-RD: 180095,18, Y-RD: 606757,04). Alle scenario's voor Ameland geven nauwelijks bodemdaling op dit punt waardoor de onzekerheidsbandbreedte zeer gering is. Hierdoor vallen de resultaten van de scenario's op elkaar.

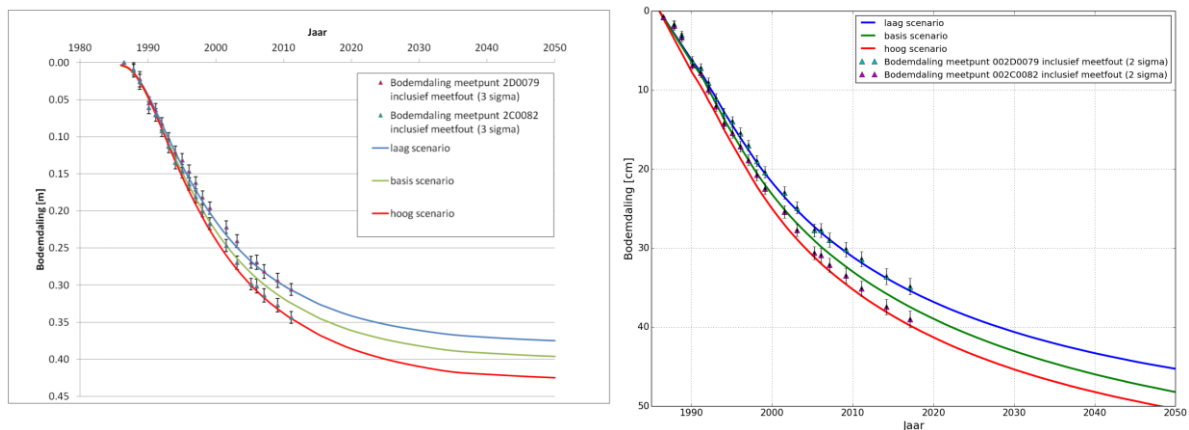
2.3.3.7 Ameland bodemdaling

In het winningsplan Ameland (Referentie 28) wordt de onzekerheid beschreven van de toekomstige bodemdaling volgens de modellen uit 2011. Hierbij werd de volgende kanttekening gemaakt:

“In de komende jaren zal aandacht worden besteed aan een verdere kwantificering van bovengenoemde onzekerheid. Eventuele veranderingen met betrekking tot het geschatte onzekerheidsbereik dan wel de verwachte bodemdaling zullen worden opgenomen in de jaarlijkse rapportage.”

Sinds het winningsplan is een aantal inzichten m.b.t. de bodemdaling boven Ameland veranderd. De metingen na 2011 maken het duidelijk dat de bodemdaling in het diepste punt hoger is dan verwacht werd in 2011. Om de bovenstaande kanttekening uit het winningsplan te adresseren is een vergelijk gemaakt tussen het oorspronkelijke figuur in het winningsplan en eenzelfde figuur met daarin de meest recente meetgegevens en het modelresultaat van het M&R 2019 model.

Figuur 2-17 toont dit vergelijk met links de geschatte bodemdaling volgens het winningsplan 2011 en rechts de geschatte bodemdaling volgens het huidige model. De onzekerheidsbandbreedte van de voorspelling in 2011 en nu is vergelijkbaar. Het huidige model verwacht echter in 2050 ongeveer 8 cm meer bodemdaling in het diepste punt van de kom.

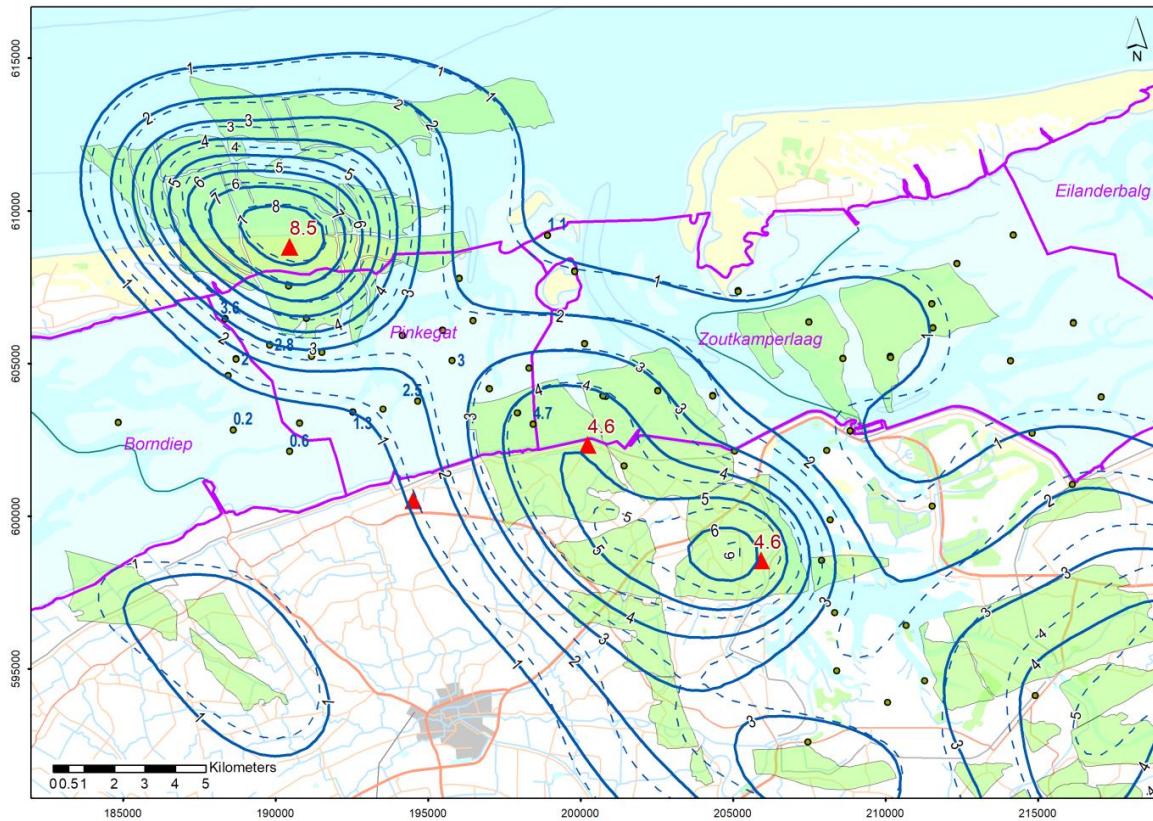


Figuur 2-17; Links; bodemdaling en metingen volgens het winningsplan Ameland uit 2011 (Referentie 28). Rechts; Maximale bodemdaling volgens het laag, basis en hoog scenario in vergelijking met de meetpunten 2D0079 en 2C0082.

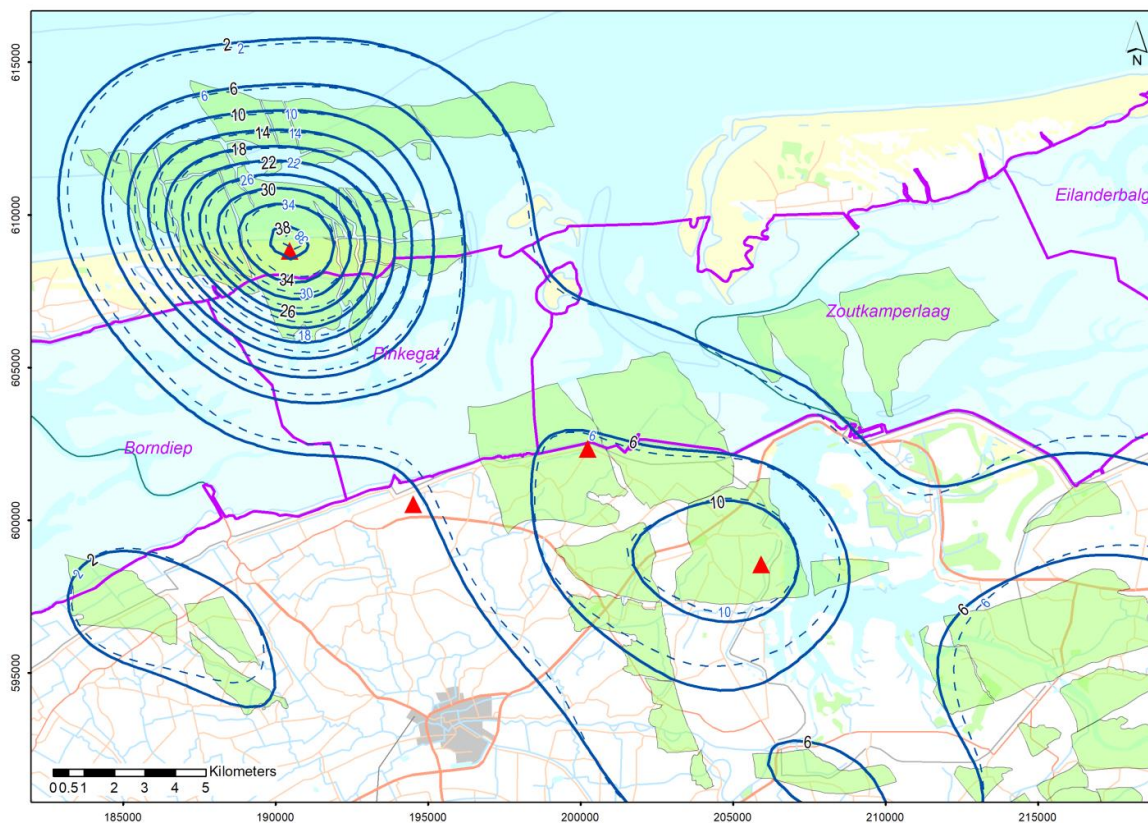
2.3.4 Vergelijking van gemodelleerde bodemdaling met resultaten van campagne GPS

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 campagne GPS-metingen getoond in Figuur 2-18. De modelcontouren (doorgetrokken blauwe lijnen) 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 campagne gps-metingen in de Waddenzee die in mei 2019 zijn uitgevoerd. Ter vergelijking zijn de contouren (onderbroken lijn) weergegeven die het berekende resultaat weergeven voor het jaar 2019 zoals gerapporteerd in de Meet- en regelrapportage van 2018 (M&R 2018, Referentie 7).

In Figuur 2-19 is de gemodelleerde daling vanaf de start van winning tot en met 1 januari 2020 getoond. Er is geen vergelijking met gemeten bodemdaling, omdat er in deze periode geen metingen gedaan zijn. Zoals verwacht is de bodemdaling in 2020 over het algemeen iets dieper door de doorgaande bodemdaling.



Figuur 2-18; Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2019) door gaswinning sinds de nulmeting in de Waddenzee in 2006. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens de aangepaste/gekalibreerde geomechanische modellen. De gestreepte contouren geven de bodemdaling van 2018 weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2018. 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 2019. De rode waarden geven de daling aan van de permanente GPS-stations in de periode feb. 2007- jan. 2020. Er is geen bodemdaling aangegeven voor het Ternaard GPS-station omdat deze nog niet in bedrijf was in 2006.



Figuur 2-19; Totale bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2020) door gaswinning sinds de start van de Ameland, Anjum en Waddenzeeproductie. In blauw: contouren van de gemodelleerde bodemdaling. De gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2019 volgens de M&R-rapportage over 2018. Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 4 posities continue GPS-metingen uitgevoerd sinds 2007 (rode driehoek).

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 2.

2.3.4.1 Belangrijkste overeenkomsten en verschillen tussen M&R 2018 en M&R 2019 bodemdalingsscenario's

Hieronder volgt een beschrijving van de belangrijkste overeenkomsten en veranderingen die aangebracht zijn in de huidige M&R 2019 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.
- Ten opzichte van de M&R 2018 zijn extra reservoirrealisaties geëvalueerd, zoals additionele modellen voor Ameland en Nes. Extremere realisaties zijn a priori afgewezen op basis van geologische waarschijnlijkheid en productiegegevens.
- Voor de waterpassingen op het land in de M&R 2019 cyclus een volle covariantie matrix gebruikt.
- Om een betere passing in Zoutkamperlaag gebied te krijgen is het kalibratiegebied Waddenzee opgesplitst in Nes/Moddergat en Lauwersoog/Vierhuizen.
- De hoge, basis en lage bodemdalingsscenario's zijn gebaseerd op de basis reservoirrealisatie, met uitzondering van het lage bodemdalingsscenario in het

Nes/Moddergat kalibratiegebied. Dit scenario is gebaseerd op een combinatie van de hoge reservoirrealisatie van Nes en de basis realisatie van Moddergat.

- De resultaten van de modellering in de M&R 2019 cyclus liggen dichtbij de resultaten zoals gerapporteerd in de M&R 2018 rapportage.

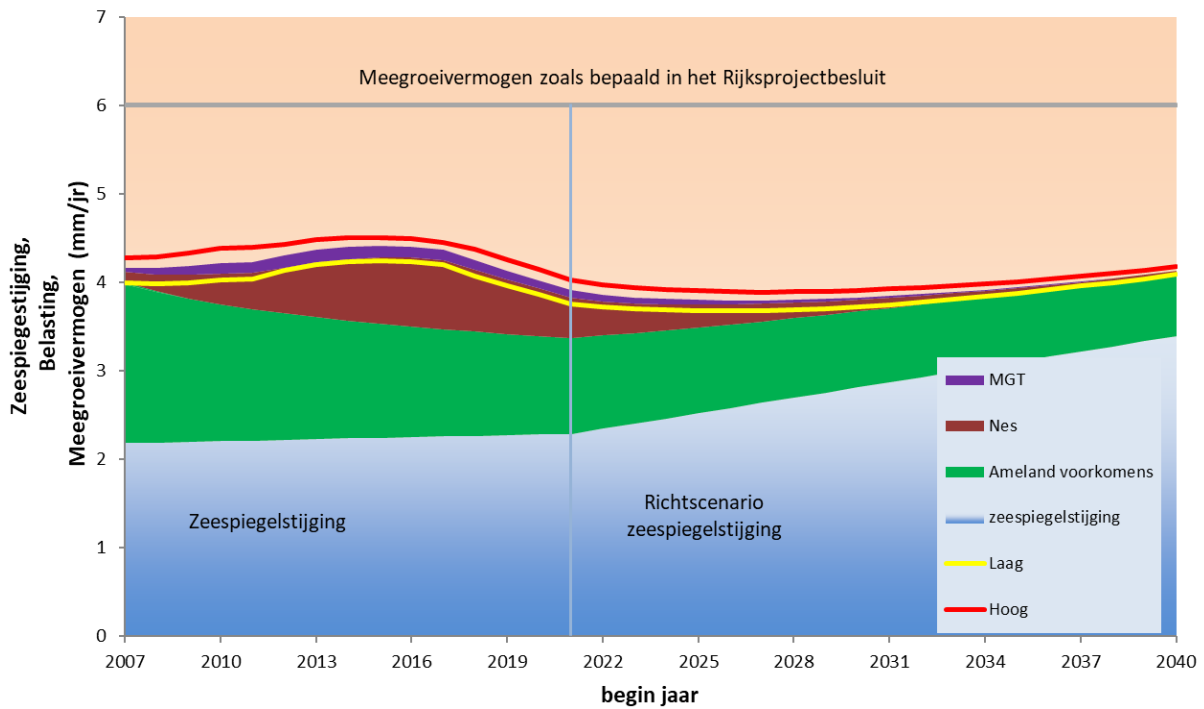
2.4 Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4)

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 Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 toegepast. Hierbij zijn de oppervlakten voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag respectievelijk $61,3 \times 10^6 \text{ m}^2$ en $148,0 \times 10^6 \text{ m}^2$. Uit de bodemdalingssnelheid S wordt de belasting B , d.w.z. de bodemdalingssnelheid gemiddeld over 6 jaar, bepaald. De in een bepaald jaar gerapporteerde waarde van de belasting B geldt op 1 januari van dat jaar en is het zesjaarlijks gemiddelde over de periode die zich uitstrekt van drie jaar daarvoor tot drie jaar daarna.

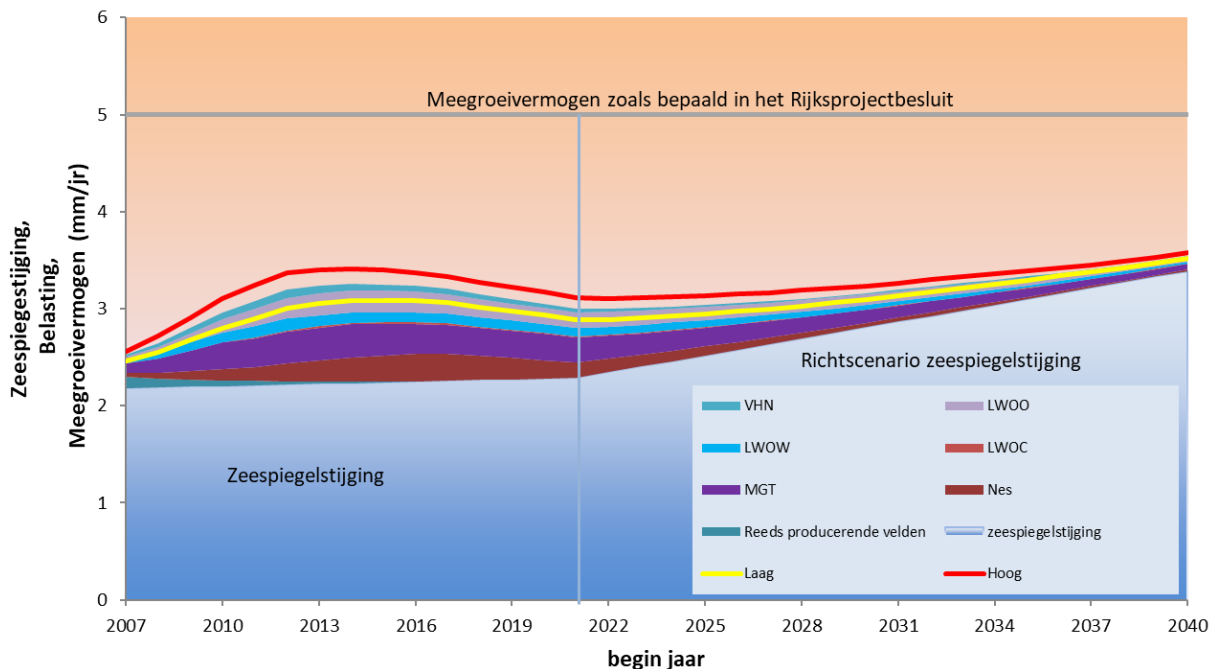
De belasting van de gebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag is respectievelijk getoond in Figuur 2-20 en Figuur 2-21. Voor het basisscenario is onderscheid gemaakt in de bijdrage van de individuele voorkomens d.m.v. de gekleurde vlakken. Voor de hoge en lage scenario's, zoals bepaald uit de onzekerheidsanalyse, is de belasting getoond d.m.v. de rode en gele lijnen.

Pinkegat



Figuur 2-20; 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).

Zoutkamperlaag



Figuur 2-21; 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 2-10 t/m Tabel 2-13).

2.4.2 Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting

Tabel 2-10 en Tabel 2-11 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 (2019) is. Voor de volledigheid zijn ook de resultaten voor het jaar 2005 tot en met 2022 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
VHN:	Vierhuizen-Oost

Tabel 2-10; 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			
Jaar	Anjum/Ameland voorkomens Volume (onzekerheid)	NES Volume (onzekerheid)	MGT Volume (onzekerheid)
2005	123 (114 - 128)		
2006	112 (104 - 117)		
2007	107 (99 - 112)	10 (8 - 12)	3 (3 - 7)
2008	101 (94 - 106)	15 (12 - 18)	3 (3 - 6)
2009	97 (90 - 102)	18 (14 - 21)	3 (3 - 8)
2010	91 (85 - 96)	25 (19 - 29)	3 (3 - 8)
2011	88 (83 - 94)	31 (24 - 37)	3 (3 - 10)
2012	85 (79 - 90)	29 (24 - 35)	3 (3 - 10)
2013	83 (77 - 88)	33 (31 - 37)	3 (3 - 10)
2014	79 (74 - 84)	57 (47 - 59)	3 (3 - 9)
2015	77 (73 - 83)	56 (49 - 56)	3 (3 - 7)
2016	74 (70 - 79)	51 (45 - 54)	3 (3 - 7)
2017	73 (68 - 78)	49 (42 - 52)	3 (3 - 7)
2018	70 (65 - 74)	43 (37 - 46)	3 (3 - 6)
2019	68 (64 - 73)	34 (30 - 38)	3 (3 - 6)
2020	67 (63 - 72)	26 (22 - 29)	3 (3 - 5)
2021	66 (62 - 71)	24 (20 - 27)	3 (3 - 5)
2022	63 (59 - 67)	22 (18 - 24)	3 (3 - 4)

Tabel 2-11; Jaarlijks bodemdalingvolume (in duizend m³) in Zoutkamperlaag voor de Anjum en Wadden voorkomens, met tussen haakjes de bandbreedte tussen het hoge en lage scenario.

Kombergingsgebied Zoutkamperlaag							
Jaar	Anjum voorkomen	NES	MGT	LWO-C	LWO-W	LWO-O	VHN
2005	22 (17 - 22)						
2006	17 (12 - 17)						
2007	13 (10 - 13)	9 (7 - 10)	30 (23 - 36)				
2008	11 (8 - 11)	13 (10 - 15)	26 (20 - 31)		6 (4 - 8)	3 (2 - 4)	5 (4 - 7)
2009	8 (6 - 8)	15 (12 - 17)	36 (28 - 43)		26 (17 - 37)	23 (16 - 32)	12 (7 - 16)
2010	6 (4 - 6)	20 (16 - 24)	38 (33 - 45)		20 (15 - 27)	27 (18 - 37)	16 (10 - 21)
2011	5 (3 - 5)	25 (20 - 30)	58 (56 - 58)		19 (14 - 24)	33 (21 - 46)	13 (10 - 17)
2012	4 (2 - 4)	25 (21 - 30)	54 (48 - 57)	3 (2 - 4)	16 (11 - 21)	35 (22 - 48)	12 (9 - 16)
2013	3 (1 - 3)	29 (28 - 33)	54 (48 - 58)	4 (3 - 6)	16 (10 - 21)	36 (23 - 47)	11 (8 - 15)
2014	1 (0 - 1)	48 (40 - 50)	50 (46 - 54)	4 (3 - 5)	16 (11 - 21)	35 (24 - 46)	11 (8 - 14)
2015	1 (0 - 1)	48 (42 - 48)	44 (42 - 47)	3 (2 - 3)	14 (10 - 19)	31 (23 - 41)	9 (7 - 12)
2016	0 (0 - 0)	44 (39 - 47)	42 (40 - 45)	2 (1 - 2)	15 (11 - 19)	29 (22 - 38)	9 (6 - 11)
2017	0 (0 - 0)	42 (36 - 44)	43 (42 - 45)	2 (1 - 2)	16 (12 - 21)	28 (22 - 37)	8 (6 - 10)
2018	0 (0 - 0)	37 (32 - 39)	43 (41 - 44)	2 (1 - 2)	15 (12 - 20)	27 (22 - 35)	8 (5 - 10)
2019	2 (0 - 2)	29 (26 - 32)	42 (39 - 43)	2 (1 - 2)	14 (11 - 18)	25 (20 - 32)	6 (4 - 7)
2020	2 (0 - 2)	22 (19 - 25)	39 (36 - 40)	2 (1 - 2)	14 (11 - 18)	24 (19 - 31)	5 (4 - 6)
2021	2 (0 - 2)	21 (18 - 23)	37 (33 - 39)	1 (1 - 2)	13 (10 - 17)	23 (19 - 30)	5 (3 - 6)
2022	2 (0 - 2)	19 (16 - 21)	35 (31 - 37)	1 (1 - 2)	12 (10 - 16)	22 (18 - 29)	4 (3 - 5)

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

Onderstaande Tabel 2-12 geeft de bodemdalingssnelheid *S* voor het rapportagejaar 2019 en belasting *B* op 1-1-2020. 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 2-20 en Figuur 2-21).

Tabel 2-12; Bodemdalingssnelheid (mm/jr) voor het rapportagejaar 2019 en belasting *B* (mm/jr) op 1-1-2020 met onzekerheid (bandbreedte) per kombergingsgebied.

Zoutkamperlaag		Pinkegat	
<i>S</i> (laag-hoog)	<i>B</i> (laag-hoog)	<i>S</i> (laag-hoog)	<i>B</i> (laag-hoog)
0,79 (0,68 - 0,91)	0,76 (0,65 - 0,89)	1,81 (1,65 - 1,95)	1,73 (1,58 - 1,86)

2.4.3 Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting

Tabel 2-13 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

$B(J) = (S(J-3) + S(J-2) + \dots + S(J+2))/6$. Tenslotte is G weergegeven in de tabel, waarbij G de Gebruiksruimte is die beschikbaar is voor belasting ten gevolge van de gasproductie, getalsmatig bepaald door het meegroeivermogen verminderd met de (autonome) relatieve zeespiegelstijging.

Tabel 2-13; Bodemdalingssnelheid, Belasting en Gebruiksruimte (mm/jr) met onzekerheid (bandbreedte) per kombergingsgebied per jaar.

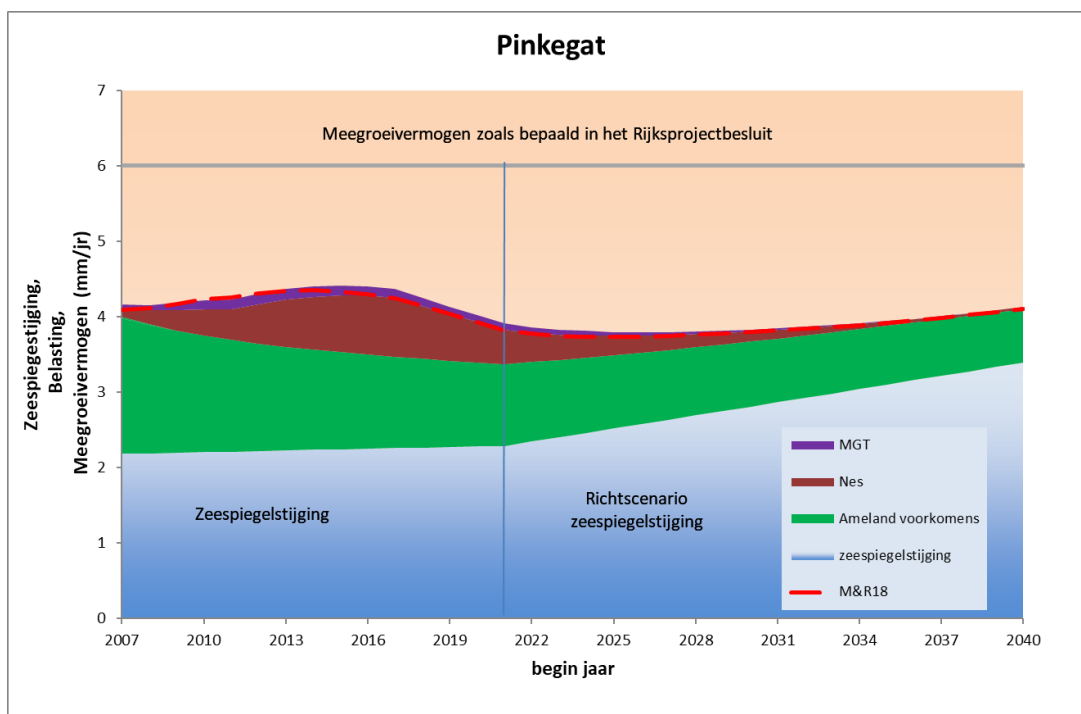
Jaar	Zoutkamperlaag			Pinkegat		
	S (onzekerheid)	B (onzekerheid)	G	S (onzekerheid)	B (onzekerheid)	G
2004	0,19 (0,15 - 0,19)		2,84	2,14 (1,98 - 2,22)		3,84
2005	0,15 (0,11 - 0,15)		2,83	2,05 (1,90 - 2,14)		3,83
2006	0,12 (0,09 - 0,12)		2,83	1,88 (1,74 - 1,96)		3,83
2007	0,36 (0,30 - 0,39)	0,34 (0,28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

2.5 Indien nodig aanpassen productie (stap 5)

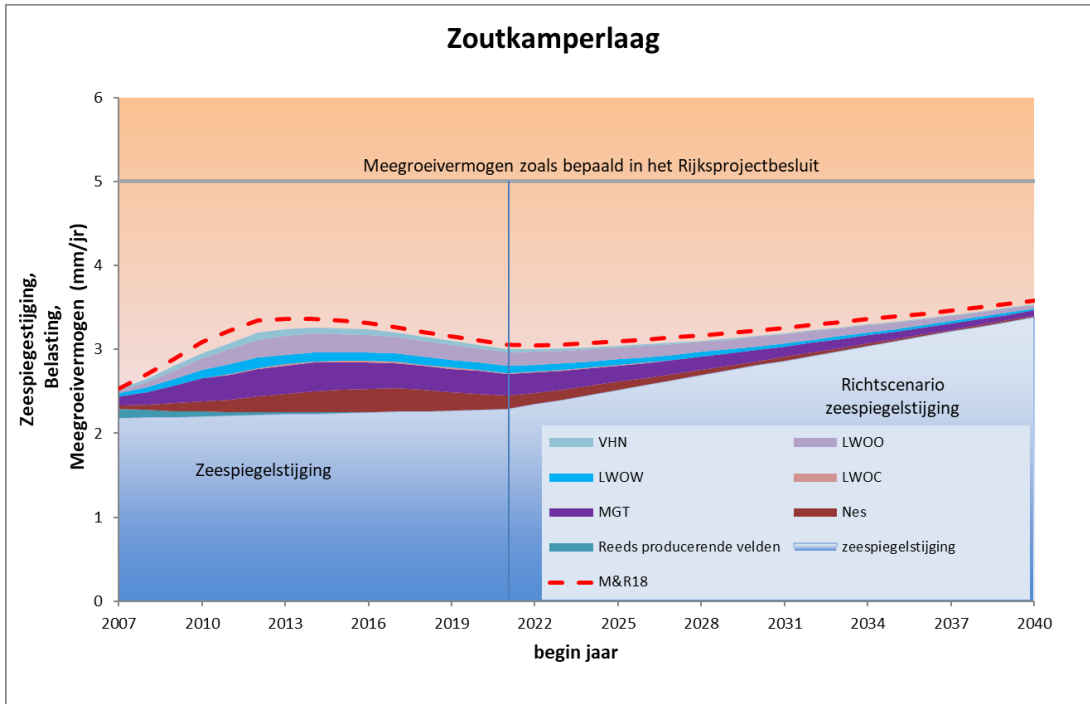
Uitgaande van het basisscenario en de productie volgens Referentie 1, volgen waarden voor de bodemdalingssnelheid S en de resulterende belasting B die niet leiden tot overschrijding van de gebruiksruimte (zie Tabel 2-13). Dit geldt ook voor het hoge scenario. In ieder geval zal de gebruiksruimte niet voor 1-1-2021 (de geldige periode voor het zeespiegelscenario) worden overschreden. Na deze tijd geldt het richtscenario van de zeespiegelstijging. Per 2021 zal er een nieuw beleidsscenario voor zeespiegelstijging worden vastgesteld.

2.6 Actualiseren (stap 6)

Figuur 2-22 en Figuur 2-23 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 2018 (gerapporteerd in 2019), weergegeven. De berekende belasting in de kombergingen is vergelijkbaar met die berekend in de M&R-cyclus 2018.



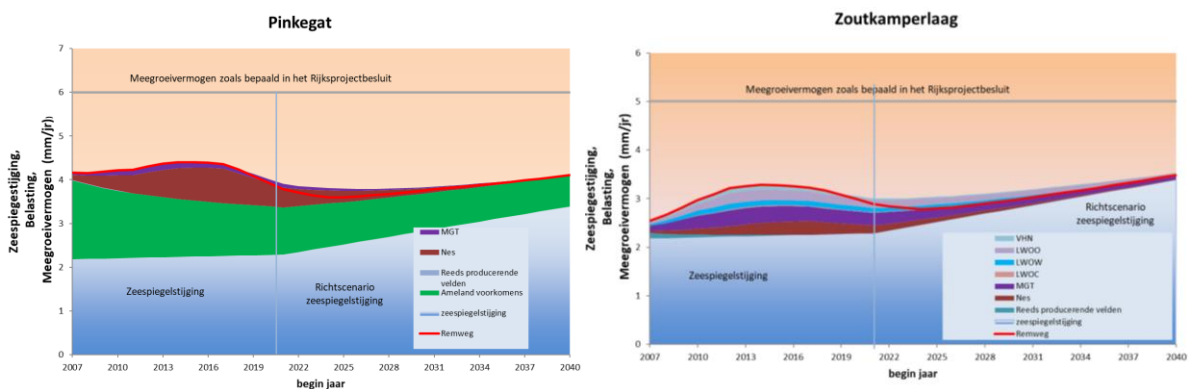
Figuur 2-22; Voorspelde belasting inclusief zeespiegelstijging voor het kombergingsgebied Pinkegat. De rood gestreepte lijn geeft berekende belasting aan zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclusrapportage over 2018.



Figuur 2-23; 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 2018.

2.7 Remwegscenario

Om het effect van de “hand aan de kraan” systematiek inzichtelijk te maken is in deze rapportage ook een remwegscenario opgenomen. Voor het basisscenario is het effect op de bodemdalingssnelheid in de kombergingen berekend wanneer de productie van de Waddenvelden (NES/MGT/LWO-C,O,W/VHN) op 1 januari 2021 zou stoppen, zie de rode lijn in Figuur 2-24. Te zien is dat de belasting veroorzaakt door de Waddenvelden snel vermindert. Ook is te zien dat de snelheid al voor 2021 vermindert doordat de bodemdalingssnelheid berekend wordt als een 6-jarlijks gemiddelde (3 jaar vooruit en 3 jaar achteruit). Eerder is getoond dat de onzekerheid in de uitkomsten van de bodemdalingssnelheid voor de MLV velden beperkt is. Daarmee zal ook de onzekerheid voor de remweg beperkt zijn.



Figuur 2-24; Remwegscenario (rode lijn) indien de Waddenvelden op 1/1/2021 worden ingesloten, geprojecteerd op het verwachtingsscenario voor de belasting waarbij niet wordt ingesloten (Figuur 2-21 en Figuur 2-22).

3 Kwaliteitsborging

De beheersing van de milieuaspecten gerelateerd aan de winningsactiviteiten van het Waddengas is volledig geïntegreerd in de bedrijfsvoering van de NAM (het Business Management System - BMS). 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 2019 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/f:r/sites/AAFAA0995/SharePoint%20NAM%20winningsplannen/01.%20Vigerende%20winningsplannen?csf=1&e=93TRCi	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://wrfmssw-europe.shell.com/App/Dream/Home.aspx	Database per veld
Meetregister	Sharepoint: Published Subsidence Documents / Survey / Registers	P.18

4 Conclusies

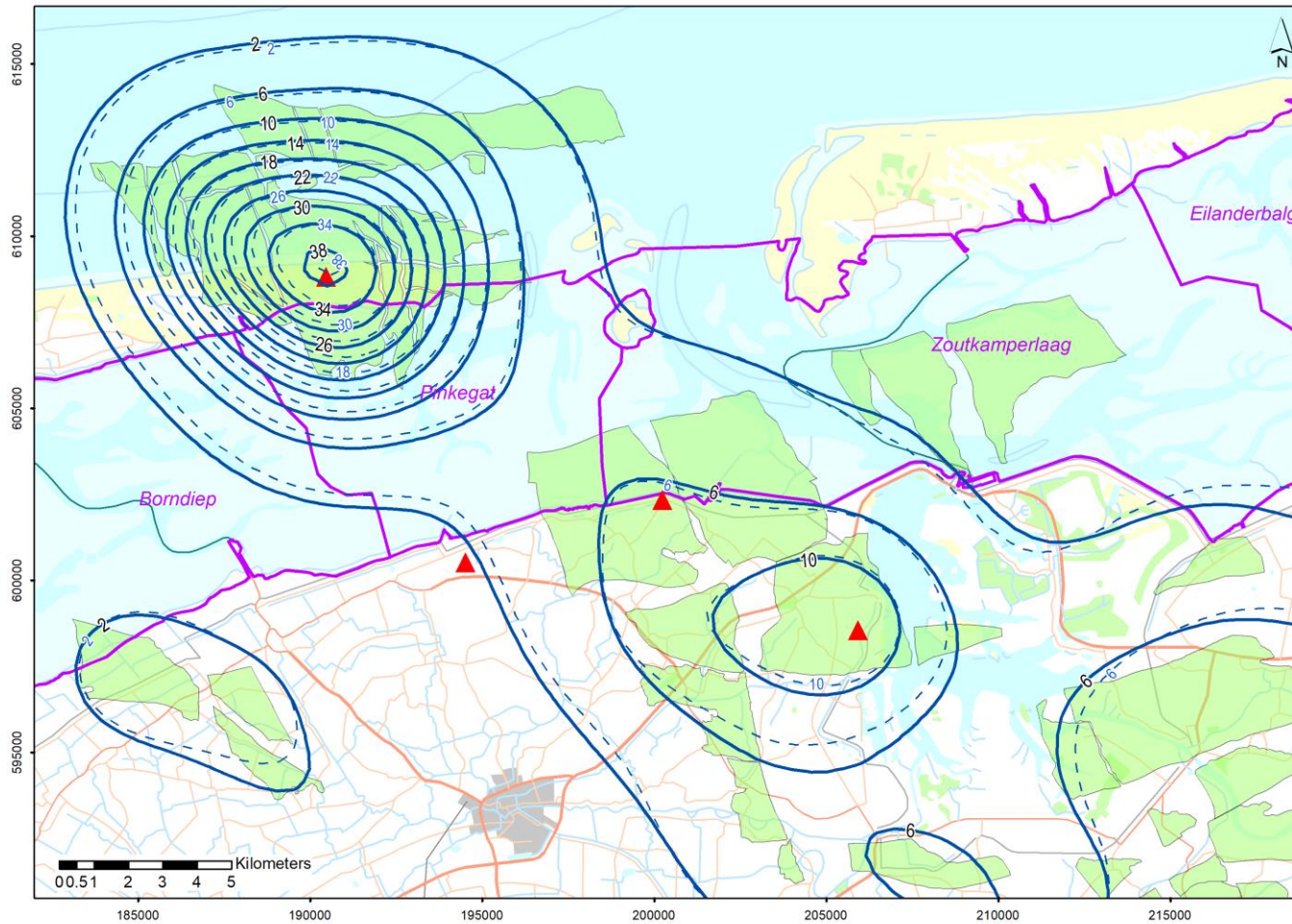
Op basis van de evaluatie gepresenteerd in dit rapport wordt geconcludeerd dat de belasting in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag binnen de gebruiksruijnte blijft. Daarom worden er geen maatregelen genomen om de productie bij te stellen. De belasting is vergelijkbaar met de belasting volgens de M&R-cyclus 2018 voorspelling. Het remwegscenario laat zien dat de bodemdalingssnelheid, veroorzaakt door productie uit de waddenvelden, bij het stopzetten van de productie significant zal afnemen.

5 Referenties

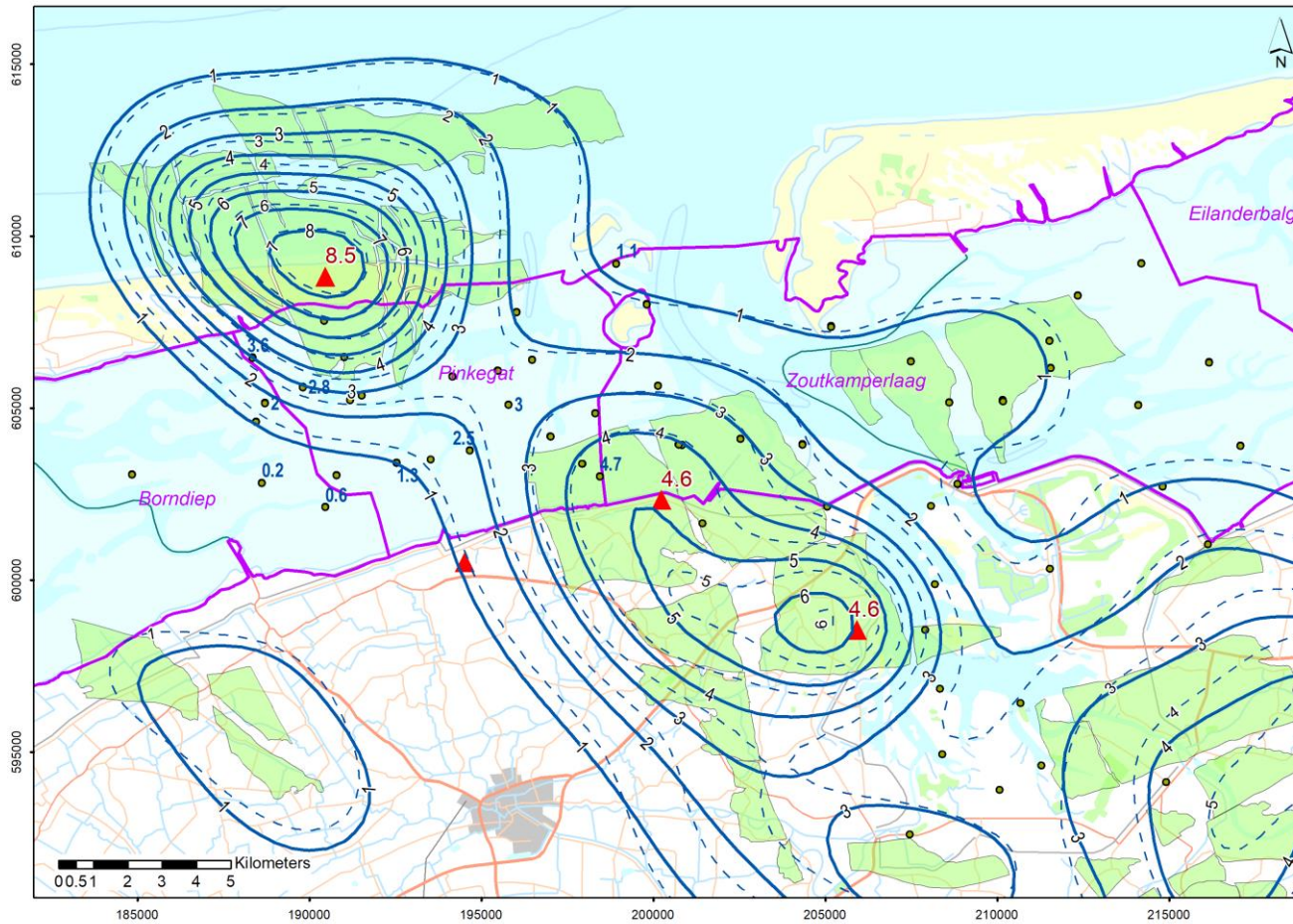
- Referentie 1 NAM (30/09/2011) Wijziging winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen.
- Referentie 2 Staatscourant (2013) Kennisgeving besluiten gaswinning Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, Ministerie van Economische Zaken.
URL: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2013-7384.html?zoekcriteria=%3fzkt%3dEenvoudig%26pst%3d%26vrt%3dmoddergat%2binstemming%26zkd%3dinDeGeheleText%26dpr%3dAfgelopenDag%26sdt%3dDatumBrief%26ap%3d%26pnr%3d1%26rpp%3d10&resultIndex=0&sorttype=1&sortorder=4>.
- Referentie 3 NAM (2012) Gaswinning Moddergat, Lauwersoog, Vierhuizen: Actualisering meet- en regelprotocol n.a.v. wijziging winningsplannen 2011 NAM EP200612202112.
- Referentie 4 NAM (2012) Gaswinning Moddergat/Lauwersoog/Vierhuizen: Technische bijlage (bijlage 3) behorend bij het geactualiseerde Meet- en regelprotocol d.d. 1 april 2012. EP201201210893.
- Referentie 5 (NAM 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 NAM (2019) Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2018; Rapport EP201905200582, juni 2019. <https://www.commissiener.nl/projectdocumenten/00006230.pdf>.
- Referentie 8 GPS Survey NAM Waddenzee v. 1.24. 06-GPS B.V., 01/2020.
- 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.rdnap.nl/algemeen/hoopte/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/bodemdeling>.
- 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 2019, 10/2019.
- Referentie 21 Auditcommissie Waddenzee (2019) Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2018.
<https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2019/12/19/monitoring-aardgaswinning-onder-de-waddenzee-vanaf-de-locaties-moddergat-lauwersoog-en-vierhuizen/bijlage-monitoring-aardgaswinning-onder-de-waddenzee-vanaf-de-locaties-moddergat-lauwersoog-en-vierhuizen.pdf>.
- Referentie 22 Subsurface Technical Report (2010): Static Reservoir Modelling of Ameland Fields for Subsidence Prediction.
- Referentie 23 Staatstoezicht op de Mijnen (2016). Methodiek voor risicoanalyse omtrent geïnduceerde bevingen door gaswinning tijdelijke leidraad voor adressering mbb. 24.1.p, versie 1.2, SodM, 1 februari 2016.
https://www.nlog.nl/sites/default/files/fdb3cd42-ecba-49ce-969f-44318e9d1272_tijdelijke%20leidraad%20sra%20v1-2.pdf.
- Referentie 24 Deltares (2010) Schade aan buisleiding door aardbeving. fase 1 inventarisatie.
<https://docplayer.nl/16931137-Schade-aan-buisleiding-door-aardbeving.html>.
- Referentie 25 GRGeo (2019) Estimate of seismic activity of the Ternaard gas field and deformation risk assessment for the adjacent primary levee, The Netherlands. Project No. P2019.0002.
- Referentie 26 NAM (2019) Review and update of: Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen. <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/8693b0f8-fd9f-49d6-8be6-f1759b9803be>.
- Referentie 27 NAM (2015) Neotectonic Stresses in the Permian Slochteren Formation of the Groningen Field. <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/b7a3cb12-46c3-4783-86f0-5905882cb0f6>.
- Referentie 28 NAM (2011) Winningsplan Ameland 2011 (WP 2011) Verzoek om instemming wijziging winningsplan.
<https://www.nlog.nl/nlog/requestDocument?id=1363502161&type=fieldPubAsset>.
- Referentie 29 Van Leijen, F. J., Samiei-Esfahany, S., Van der Marel, H., en Hanssen, R. F. (2020) Improving the Functional and Stochastic Model of InSAR, Delft University of Technology, 2020.
- Referentie 30 NAM (2019) Meetregister bij het meetplan Noord-Nederland, Groningen en Waddenzee 2018 – Addendum InSAR.
- Referentie 31 TNO (2018) Langetermijneffecten van gaswinning op bodemdaling; Evaluatie van de LTS-II model systematiek toegepast op het Ameland gasveld. TNO 2018 R10859.

Bijlage 1 Gemodelleerde en gemeten bodemdaling sinds 1986 en 2006

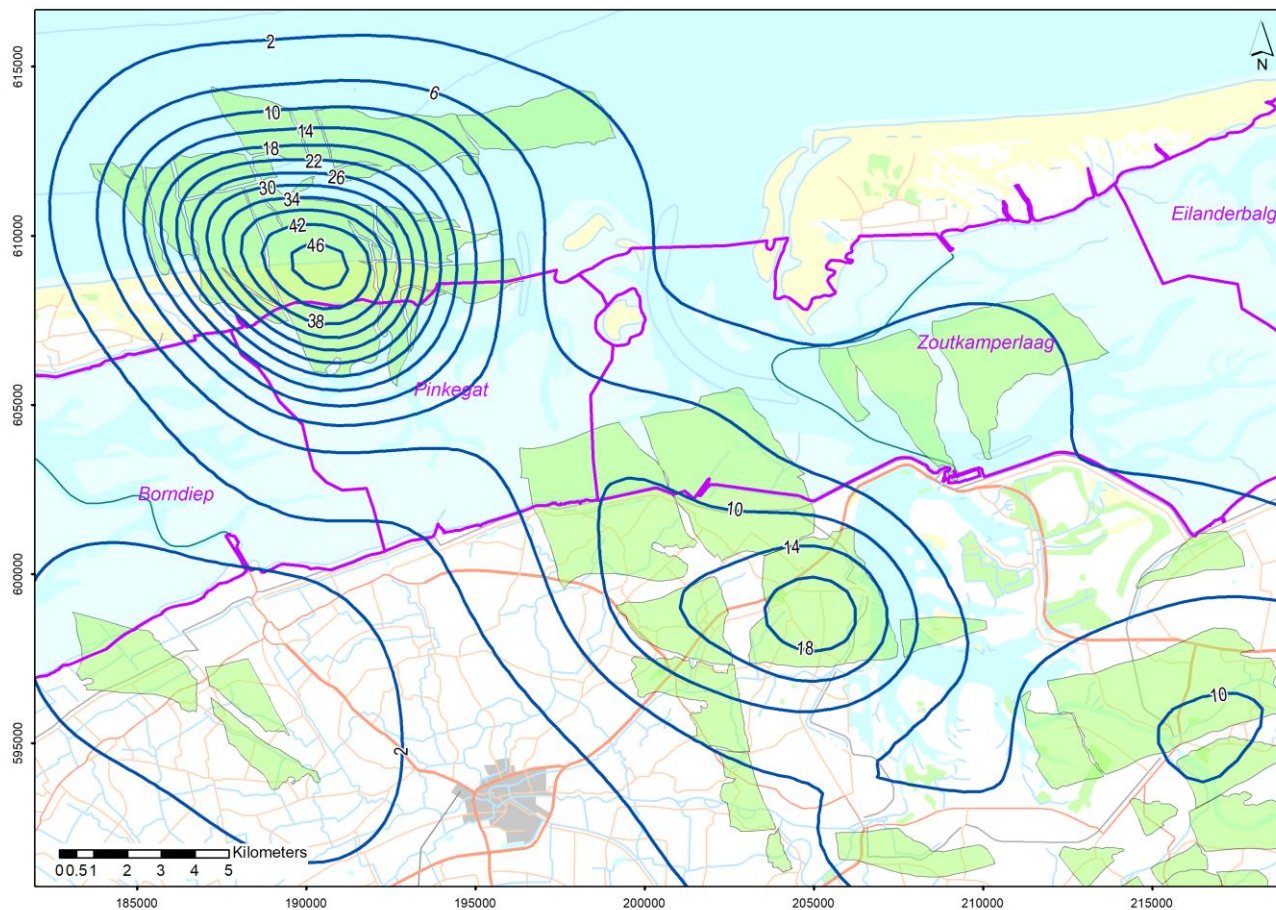


Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2020) door gaswinning sinds de start van productie in Ameland en Anjum (1986). In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling (gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2019 volgens de M&R-rapportage over 2018). Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 3 posities continue GPS-metingen uitgevoerd sinds 2007 (rode driehoek).



Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2019) 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 2018 weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2018). 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 2019. De rode waarden geven de daling aan van de permanente GPS-stations in de periode feb. 2007- jan. 2020.

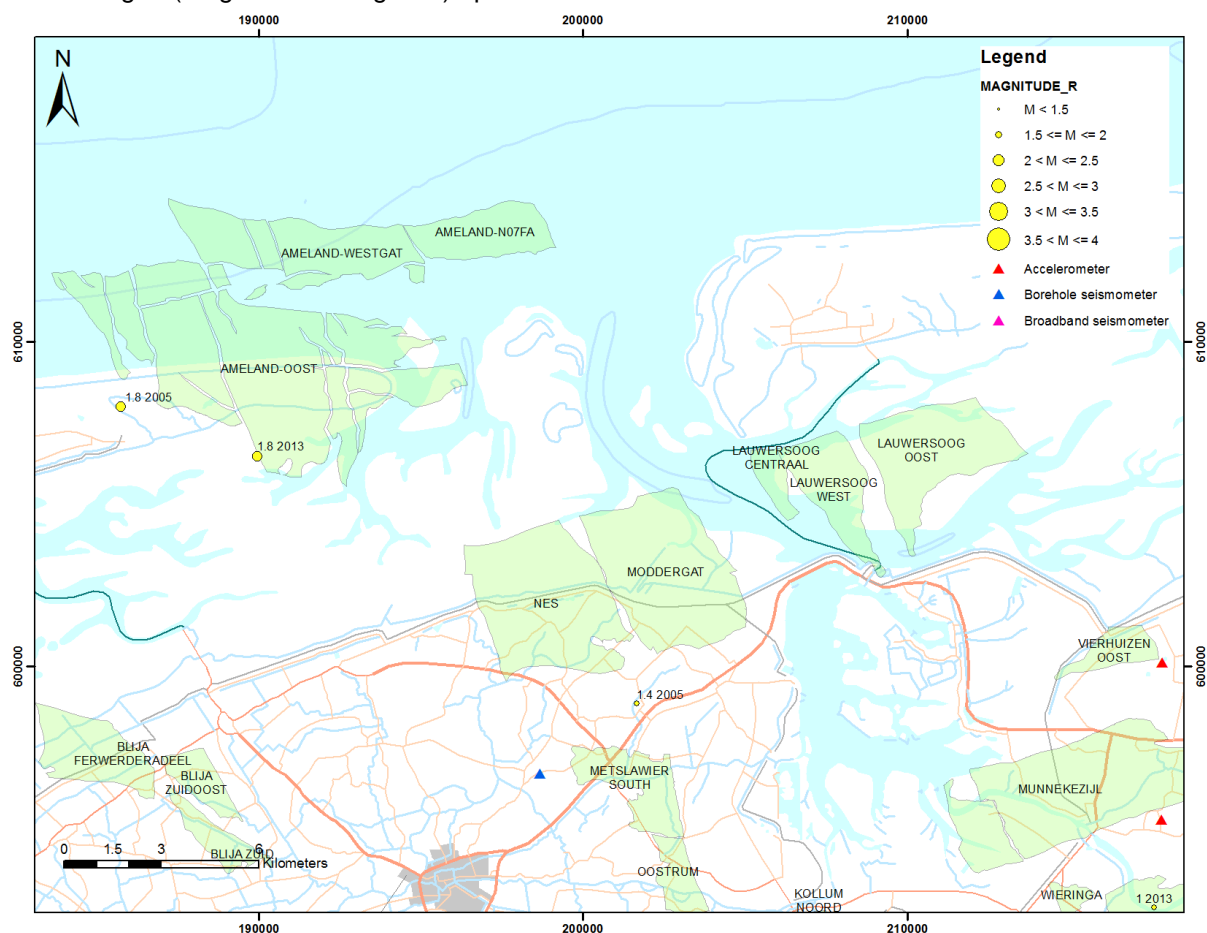
Bijlage 2 Verwachte bodemdaling in het jaar 2050



Bijlage 3 Mogelijke gevolgen van aardbevingen op bodemdaling en milieu

Sinds 1986 zijn er een drietal aardbevingen in het Waddengebied 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 0-1). Deze bevingen zijn door niemand gevoeld en hebben een trillingsnelheid (peak ground velocity) die ver onder mogelijke 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 zoals liquefactie zijn waargenomen. In al deze gevallen betrof het zeer zware aardbevingen (magnitude 5 en groter) op de schaal van Richter.



Figuur 0-1; Geregistreerde aardbevingen in het Waddengebied en omgeving voor de periode 1986 - januari 2020.

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 reservoirdruk. Dit zou vervolgens kunnen leiden tot een beving, onvoorziene compactie en daarmee gepaard gaande bodemdaling. Dit is alleen mogelijk wanneer de doorlaatbaarheid van breuken tussen reservoirdelen verandert door de beving. Er zijn geen gevallen bekend in de literatuur waar dit fenomeen is beschreven. 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 vinden over een beperkte 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 nog steeds 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 gesteld worden dat mogelijke aardbevingen in dit gebied geen gevolgen zullen hebben voor de bodemdaling.

Over de kans op zwaardere aardbevingen in de toekomst

De Auditcommissie schrijft in haar advies over de rapportage van het jaar 2018 (Referentie 21) om specifiek te kijken naar de mogelijkheid dat zwaardere aardbevingen kunnen optreden in de toekomst en/of aardbevingen ook veroorzaakt kunnen worden door horizontale verschuivingen die mogelijk kunnen leiden tot een zwaardere beving.

Aardbevingen gedragen zich over het algemeen volgens een Gutenberg-Richter relatie. Deze relatie houdt in dat er voor 10 kleine aardbevingen met een magnitude van $M=2$ er ongeveer 1 aardbeving met een magnitude van $M=3$ zou kunnen plaatsvinden. In theorie neemt de kans op een beving dus met een factor 10 af voor elke magnitudestap. De kans op een aardbeving met een magnitude tussen 1 en 2 in het Waddengebied is op basis van de historie ongeveer 10% per jaar (3 kleine aardbevingen gedurende 30 jaar productie). Wanneer de Gutenberg-Richter relatie zou worden doorgetrokken wordt de kans op een aardbeving tussen $M=2$ en $M=3$ ongeveer 1% per jaar en voor een aardbeving tussen $M=3$ en $M=4$ ongeveer 0,1% per jaar. Voor geïnduceerde bevingen geldt dat deze relatie niet tot in het oneindige mag worden doorgetrokken.

Maxima voor geïnduceerde bevingen

De veranderingen in de ondergrond door de drukdaling zorgen voor een verandering van de spanningen op de breuk. Deze veranderingen in de spanningen hebben invloed op mogelijke reactivatie van de breuken in het reservoir en de breuken die het reservoir begrenzen. Daarmee is het mogelijke breukoppervlak dat kan schuiven tijdens een aardbeving beperkt tot het bereik van dergelijke breuken. De compactie van het reservoir zorgt er tevens voor dat er energie wordt opgeslagen die mogelijk kan vrijkomen als aardbevingsenergie. Deze opgebouwde compactie-energie kan ook een beperking vormen voor de maximale aardbeving die kan optreden door productie. Deze twee mogelijke begrenzingen kunnen kwantitatief worden beschouwd en de leidraad die door Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) is geschreven geeft twee rekenmethodes voor het

inschatten van de “realistisch sterkste aardbeving”. Voor een beschrijving van deze twee methodes wordt verwezen naar Referentie 23.

Het Ameland veld is het grootste veld in de Waddenzee en daarom is voor dit veld de realistisch sterkste aardbeving ingeschat die kan gelden als een “worst case scenario” voor de Waddenzee (Tabel 0-1).

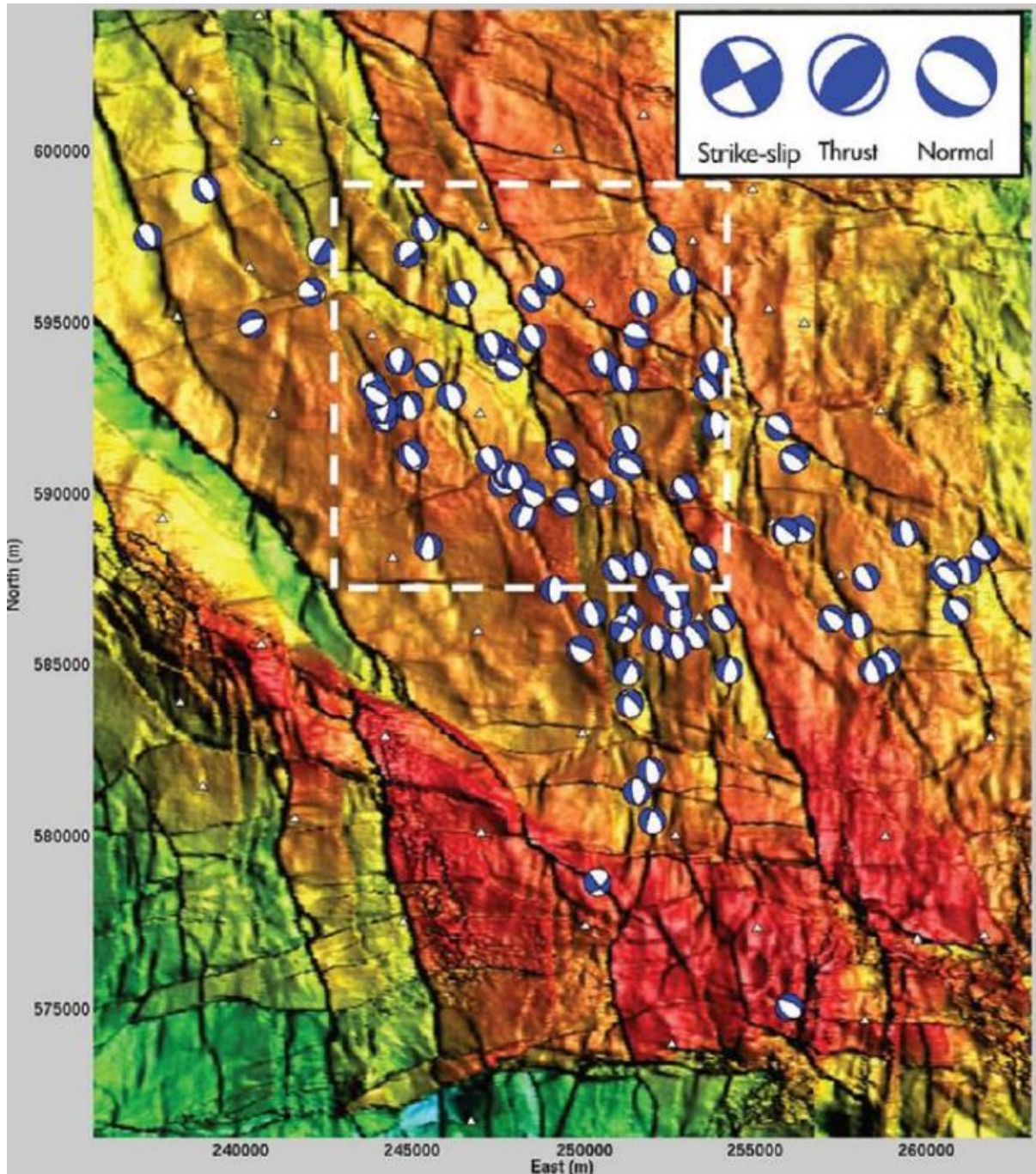
Tabel 0-1: Invoergegevens voor de bepaling van de M_{max} , en de M_{max} waarden volgens de twee methoden.

Voorkomen	Langste breuklengte (km)	Poisson's ratio	Breukhoogte (m)	M_{max} energiebalans	M_{max} breukslip
Ameland-Oost	4,3	0,2	110	4	3,6

Volgens deze berekening ligt de maximale magnitude tussen de $M=3,6$ en $M=4$. Dergelijke aardbevingen kunnen leiden tot schade aan huizen, maar het is onwaarschijnlijk dat deze bevingen verdere gevolgen hebben voor infrastructuur, pijpleidingen en dijken. Voor het effect op pijpleidingen is in 2010 een studie door Deltares (Referentie 24) uitgevoerd die concludeert dat de kans op directe schade door trillingen klein is. Verder is er ook een uitvoerige studie gedaan naar de mogelijke schade aan dijken door aardbevingen (Referentie 25). Deze studie is uitgevoerd voor de Waddendijk tussen Blija en Ternaard en ook deze studie concludeert dat het onwaarschijnlijk is dat een dergelijke beving schade kan veroorzaken aan de Waddendijk.

Bevingen met horizontale verschuivingen

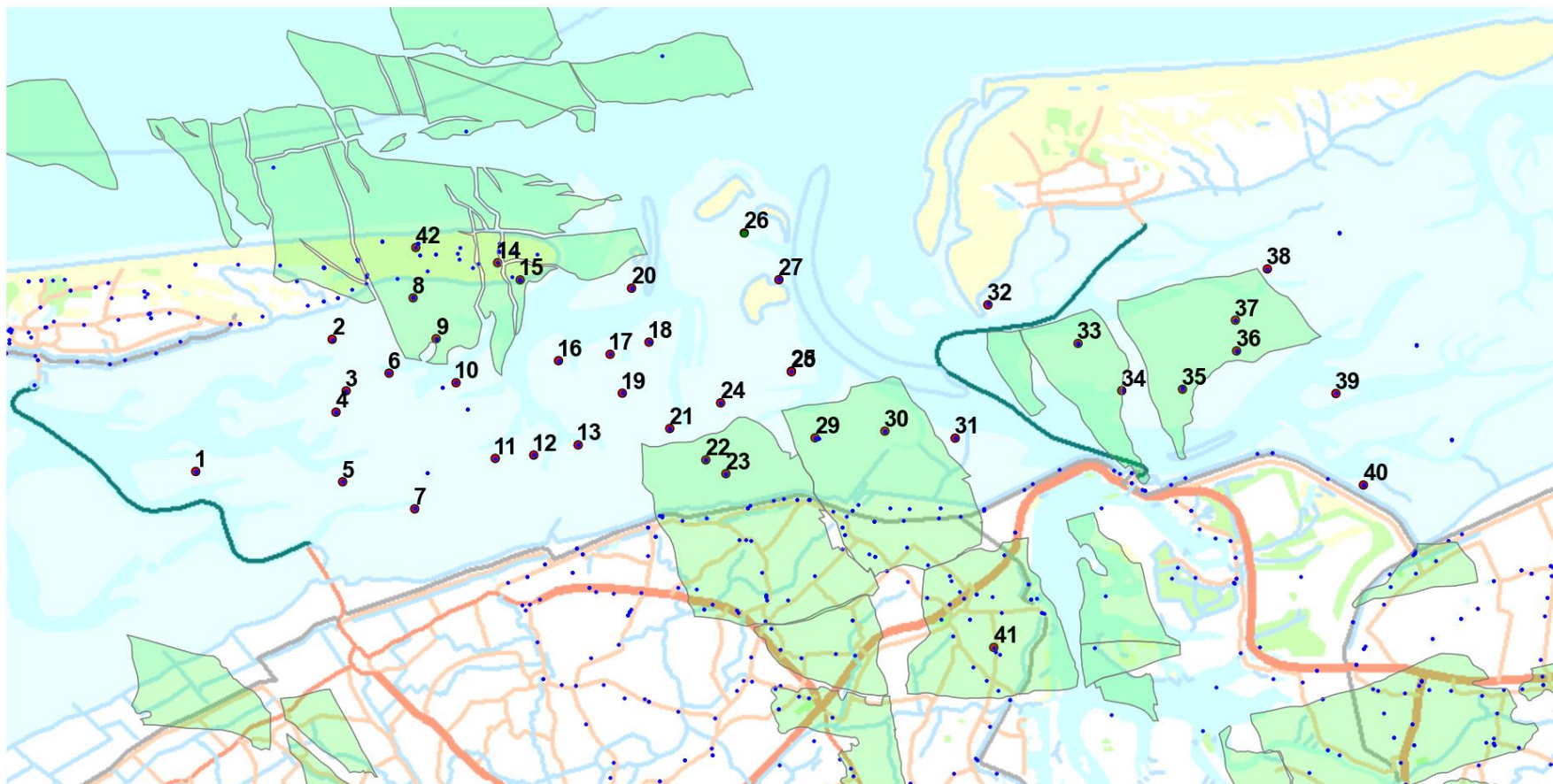
De commissie stelt tevens de vraag of mogelijke horizontale verschuivingen op de breuken een effect kunnen hebben op de maximale magnitude. Hierbij ging de commissie uit van de gedachte dat de huidige aardbevingen veroorzaakt zijn door compactie en daarmee verticale bewegingen. Allereerst moet worden vermeld dat het niet duidelijk is wat de beweging is geweest voor de reeds opgetreden bevingen in het Waddengebied. Om een conclusie te trekken over een aardbevingsbeweging is een “moment tensor” berekening noodzakelijk waarbij een voldoende aantal stations nodig zijn die de bevingen geregistreerd hebben. De aardbevingen in het Waddengebied zijn te licht om te kunnen worden waargenomen door veel stations en daarmee kan een dergelijke berekening niet worden uitgevoerd. Voor de Groningen bevingen kunnen dergelijke berekeningen wel worden gemaakt omdat het netwerk hier veel dichter is dan in de Waddenzee (Figuur 0-2, Referentie 26). De bevingen in Groningen laten zien dat bijna alle bevingen een verticale afschuiving kennen (normal faulting) en dat er bijna geen bevingen zijn waarbij de horizontale component een rol speelt. Dit komt overeen met de bekende informatie over spanning in Nederland waarbij uit metingen blijkt dat de spanningsanisotropie tussen de twee horizontale spanningen klein is (Referentie 27). Over het algemeen wordt aangehouden dat $SH=1,05 * Sh$. Het is dus minder waarschijnlijk dat horizontale bewegingen kunnen ontstaan tijdens aardbevingen. Tevens geldt voor een eventuele horizontale beweging dezelfde beperking t.a.v. het maximale breukvlak. De normaalspanning zal buiten het reservoir groter worden waardoor een eventuele aardbevingsbeweging tot stilstand wordt gebracht. Dit betekent dat ook voor een dergelijke beving de begrenzing wordt bepaald door de grootte van het breukvlak binnen de extensie van het gasreservoir. Met deze redenering zal de berekening volgens de SodM leidraad blijven gelden en kan een aardbeving realistisch gezien niet groter worden dan $M=3,6$.

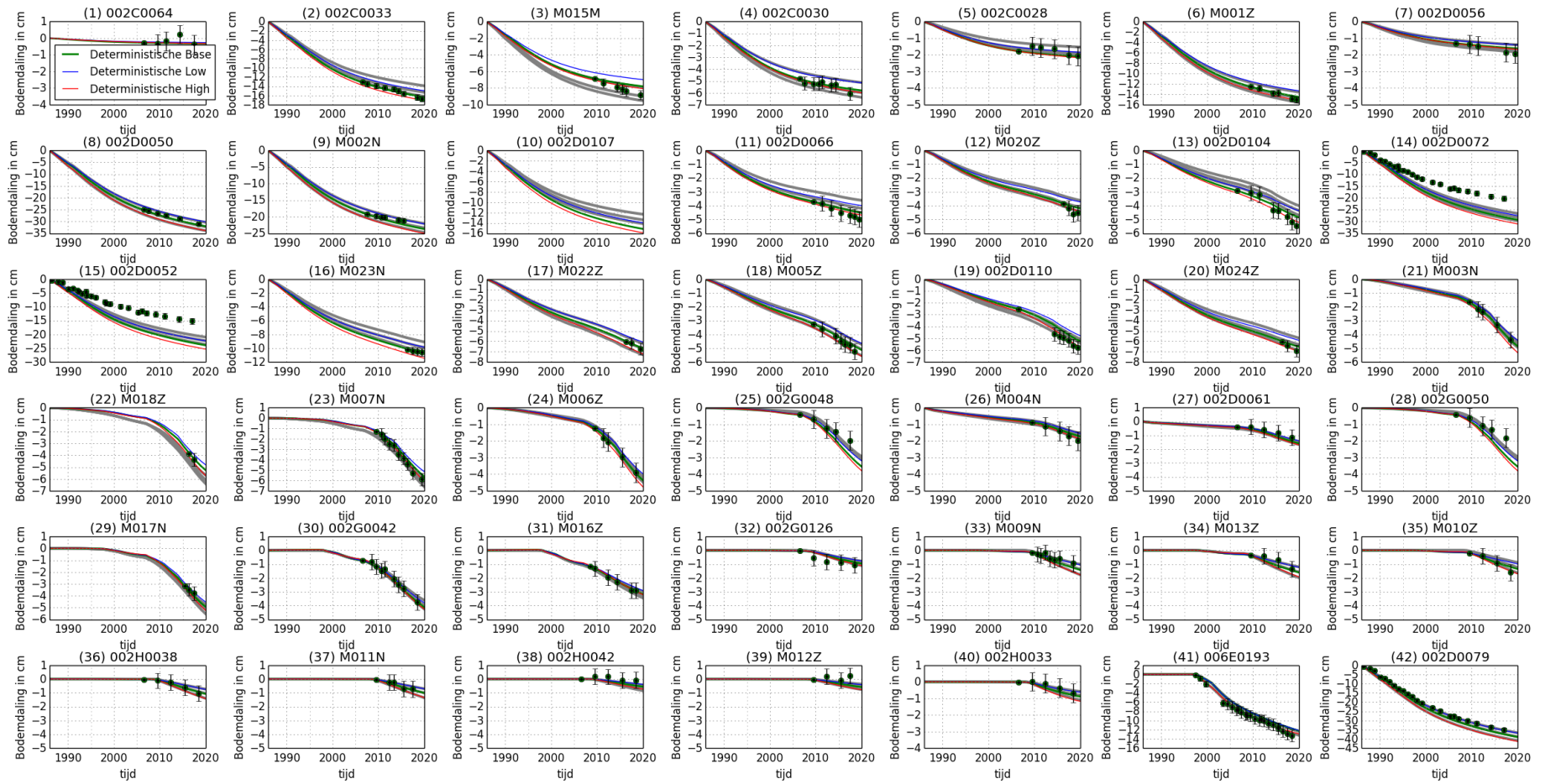


Figuur 0-2; Bron mechanismes van 100 aardbevingen in het Groningen veld tussen 2015 en 2017.

Bijlage 4 Tijdsreeks Waddenzee

In deze bijlage worden tijdsreeks 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 tijdsreeks. In deze tijdsreeks 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).



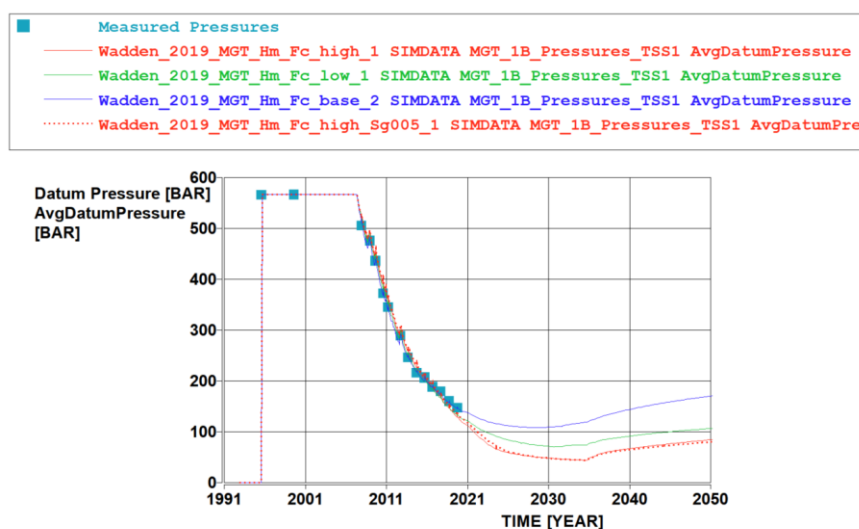


Bijlage 5: Controle reservoirmodellen met 2019 drukmetingen

In de vorige rapportages werd verwezen naar een apart document waarin de gemeten reservoirdrukken tot en met 2018 vergeleken werden met de drukken zoals voorspeld door de reservoirmodellen. Dit jaar is ervoor gekozen om de figuren, die per put de gemeten en op de model gebaseerde drukken laten zien, in dit rapport op te nemen. Verdere details van de modelering zijn te vinden in Referentie 19.

5.1 Moddergat

De druk gemeten in 2019 is in overeenstemming met de basis en lage realisaties zoals gebruikt in voorgaande jaren. Het model hoog (rode lijn) is dit jaar aangepast, omdat de drukken zoals voorspeld door dit model te laag dreigden te worden. Hiertoe is de paleo-residuele gassaturatie verhoogd van 0 naar 5%. Dit betekent dat de aquifer met het gas minder snel daalt in druk. Op de drukvoorspelling in put MGT-1B heeft het weinig invloed, zie het kleine verschil tussen de doorgetrokken en de gestreepte rode lijn in de Figuur 0-1.



Figuur 0-1: MGT-1B gemeten drukken (blauwe blokken) en hoog/mid/laag drukprognoses, waarbij voor hoog de realisatie met de gestreepte lijn is onderzocht voor bodemdalingsvoorspellingen.

5.2 Nes

Er zijn vier putten die uit het Nes voorkomen produceren: MGT-2, MGT-3, MGT-4A en MGT-5. De laatste drukmetingen dateren uit april 2019. Net als in voorgaande jaren passen de nieuwe datapunten goed in de range van drukvoorspellingen.

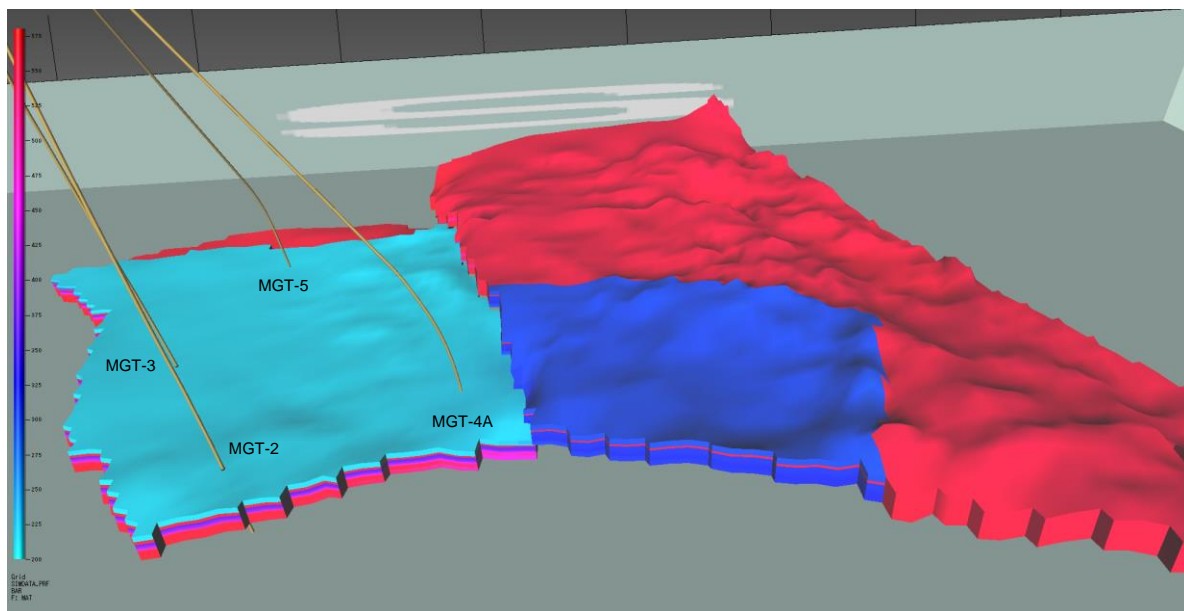
Voor deze rapportage zijn uitgebreid de mogelijkheden onderzocht of de reservoirdruk ten westen van Nes kan dalen als gevolg van de gasproductie in Nes. Ten westen van het producerende Nes veld ligt het voorkomen Ternaard. In 1990 is dit door put TRN-1 aangeboord en is gas aangetoond in het Rotliegend Upper Slochteren (ROSLU) reservoir. Het veld is sindsdien niet geproduceerd vanwege lage productiviteit en de put is gesuspendeerd. Om een inschatting van de connectiviteit tussen Nes en Ternaard te maken, is ten eerste gekeken naar de gas water contacten in beide velden, en ten tweede of de zanden in beide reservoirs met elkaar in contact zijn via de breuk (zogenaamd zand-zand juxtapositie). Het gas water contact in het Nes veld ligt op 3731 m TVDNAP m, ruim dieper dan het contact dat gevonden is in de TRN-1 put (3665 m TVDNAP). Het verschil in contact suggereert al dat de velden op geologische tijdschaal niet met elkaar verbonden zijn. Langs de breuk die beide voorkomens scheidt, is op basis van seismiek te zien dat de zanden tegen elkaar liggen in het noorden en in het zuiden.

Echter, in het Ternaard veld zijn deze zanden gevuld met water vanwege het ondiepere gas-water contact (aangetoond in TRN-1) en in het Nes veld zijn deze zanden gevuld met gas. Dit houdt in dat wanneer de

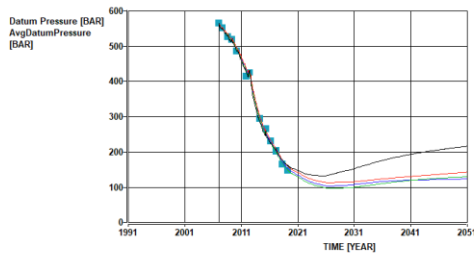
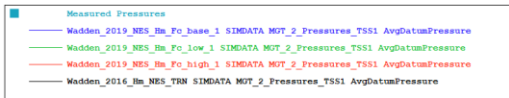
breuk tijdens productie van het Nes veld doorlatend zou worden (bijvoorbeeld vanwege een groot drukverschil) er water in plaats van gas vanuit Ternaard naar Nes zou stromen. Boven het water in het Ternaard veld is een gaskolom aanwezig. Wanneer water uit het Ternaard aquifer onttrokken zou worden via de breuk naar Nes, zal dat gas uitzetten en zal de druk in het water-gas systeem van Ternaard nauwelijks dalen. Vanwege dit zogenaamde "piston effect" van het gas, zouden er dus enorme volumes water verplaatst moeten worden voordat de druk in Ternaard merkbaar daalt. Watervolumes met deze orde van grootte zijn tot nu toe niet gezien in de Nes putten, ook niet in de MGT-4 put die het dichtstbij deze breuk is. Depletie van Ternaard is daarom vanuit geologische oogpunt alleen verklaarbaar wanneer het gedeelte van het Ternaard veld meteen ten westen van het Nes veld sterk gecompartmentaliseerd is, zodat er maar een beperkt volume verbonden kan zijn met het Nes voorkomen. Maar daarvoor zijn geen aanwijzingen op seismiek te zien. Daarbij komt ook dat de breuken binnen het Ternaard voorkomen een kleiner verzet hebben dan de randbreuk met Nes, en het is daarom onwaarschijnlijk dat die afsluitend zijn en de breuk met Nes open is. Het is daarom geologisch zeer onwaarschijnlijk dat er depletie plaatsvindt in Ternaard ten gevolge van de winning van Nes.

Desondanks is ook met dynamische reservoirsimulatiemodellen onderzocht of het Nes voorkomen uitgebreid kan worden met een extra blok ten westen van Nes, zie Figuur 0-2. Om de drukken in dit model in overeenstemming te krijgen met de historisch gemeten drukken, moest de laag ROSLU2 impermeabel worden gemaakt, terwijl uit de recente kernbeschrijving van MGT-3 en de RFT drukken gemeten kort na het boren van de putten bekend is dat deze laag permeabel moet zijn met een zekere grenzende waarschijnlijkheid. Ook is uit de gemodelleerde druk in MGT-4, de put die het dichtstbij dit extra blok is, te zien dat de druk te hoog is voor deze realisatie, zie de zwarte lijn in Figuur 0-3 linksonder. In 2019 zou de druk volgens deze realisatie 30 bar hoger dan de gemeten druk.

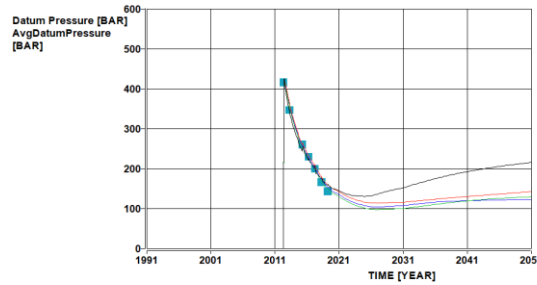
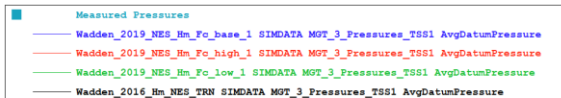
Op basis van deze argumenten wordt het onwaarschijnlijk geacht dat het Nes veld in verbinding staat met een reservoir ten westen van het Nes veld.



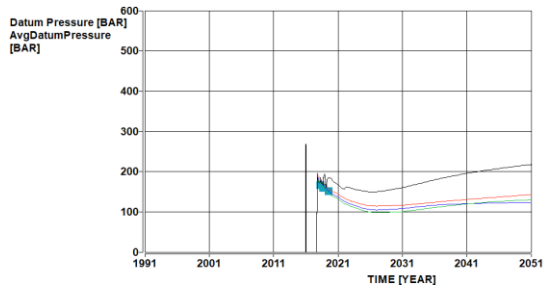
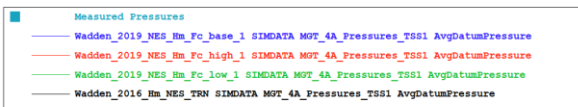
Figuur 0-2: Afbeelding van het Nes voorkomen (cyaan) met de putten MGT-2 tot en met MGT-5 vanuit het noorden gezien. Het extra blok is weergegeven in donkerder blauw.



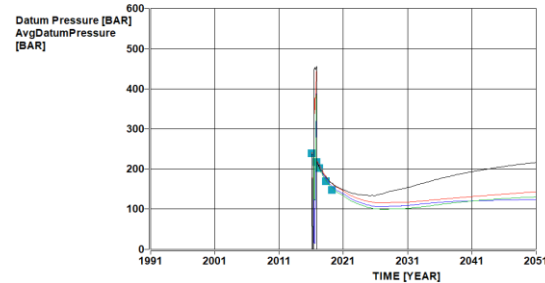
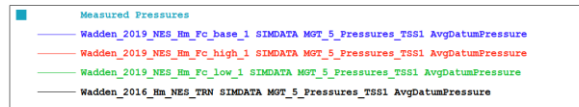
Creation date: Thu 16/01/2020 14:10 Runfile: Wadden_2019_NES_Hm_Fc_base_plots_1.ru



Creation date: Thu 16/01/2020 14:13 Runfile: Wadden_2019_NES_Hm_Fc_base_plots_1.ru



Creation date: Thu 16/01/2020 14:13 Runfile: Wadden_2019_NES_Hm_Fc_base_plots_1.ru



Creation date: Thu 16/01/2020 14:21 Runfile: Wadden_2019_NES_Hm_Fc_base_plots_1.ru

Figuur 0-3: Hoog/Mid/Laag drukprognoses en gemeten drukken (blauwe blokken) voor de putten MGT-2 (linksboven), MGT-3 (rechtsboven), MGT-4A (linksonder) en MGT-5 (rechtsonder). De zwarte lijnen geven de drukken van de extra realisatie weer, waarbij ze zien valt dat de druk in MGT-4A te hoog is.

5.3 Lauwersoog Oost

Het gas uit het Lauwersoog Oost veld wordt geproduceerd met put LWO-1B. Voor dit voorkomen is de druk gemeten in 2019 in overeenstemming met de modellen zoals gebruikt in voorgaande jaren. Er is dus geen noodzaak om de modellen te herkalibreren.

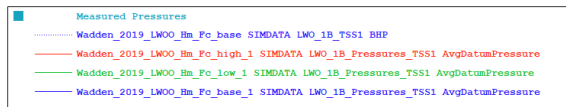
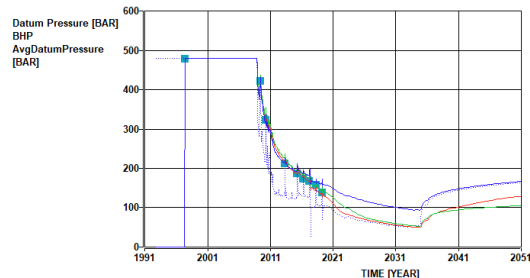


Table Nam

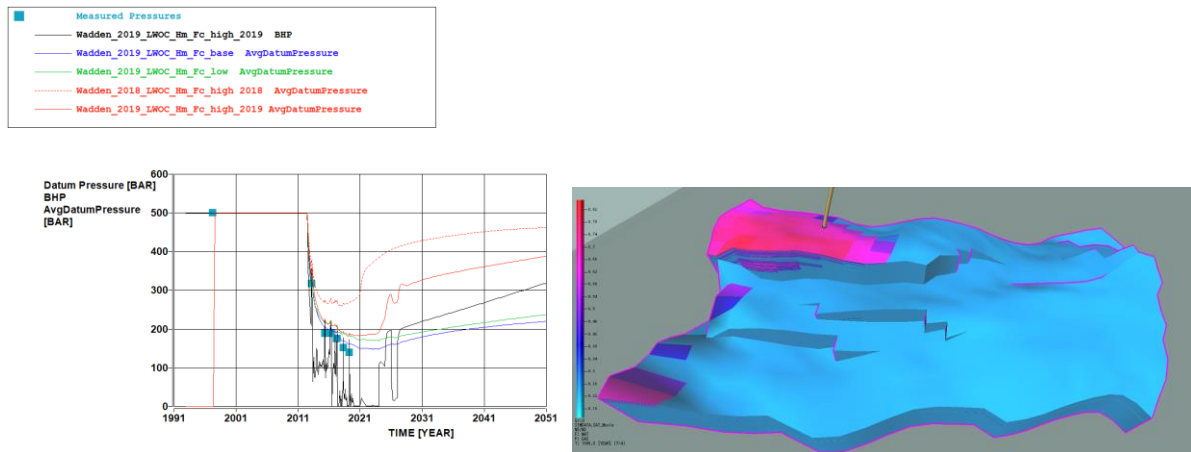


Creation date: Fri 13/12/2019 16:59 Runfile: X:\subsidence_2019\LWOO\Wadden_2019_LWOO_Hm_Fc_plots.run

Figuur 0-4: LWO-1B hoog/mid/laag drukprognoses en gemeten drukken (blauwe blokken).

5.4 Lauwersoog Centraal

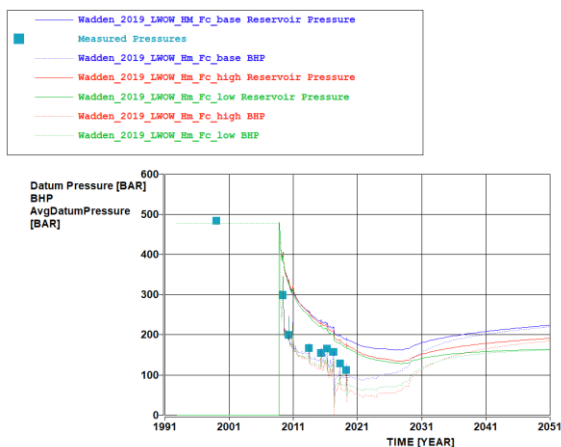
Het gas uit het Lauwersoog Centraal veld wordt geproduceerd met put LWO-2. Dit veld is het kleinste Waddenveld. Omdat er een obstructie in de put zit, de put frequent uit en aan moet worden gezet en vanwege de grote verschillen in permeabiliteit, worden de drukmetingen vergeleken met de bottom-hole drukken uit de modellen. Deze komen goed overeen met die van de lage en basis realisatie. Echter voor de hoge realisatie blijkt dat in het model de druk in de put onvoldoende is om de in 2019 geproduceerde volumes te kunnen produceren. Dit heeft als gevolg dat in het model de reservoirdruk te hoog blijft. Daarom is voor deze realisatie de paleo-residuele gassaturatie verhoogd van 0 naar 10%. Hiermee kunnen de historische volumes wel geproduceerd worden en komt de gemeten druk overeen met de gemodelleerde druk.



Figuur 0-5: LWO-2: de drukprognoses (laag, mid en hoog) in het gasreservoir zijn in de linker figuur weergegeven met de continue lijnen in resp. groen, blauw en rood. De metingen zijn weergegeven met de blauwe diamantvormen. De rood gestreepte lijn geeft de gemiddelde reservoirdruk van de 2018 hoge drukprognose weer, waarvan de 'bottom-hole' druk niet meer in overeenstemming met de gemeten druk in 2019 was. De bottom-hole drukprognose, behorende bij de continue rode lijn, is met de zwarte lijn weergegeven. De rechterfiguur toont het reservoir gevuld met gas (magenta) en water (blauw).

5.5 Lauwersoog West

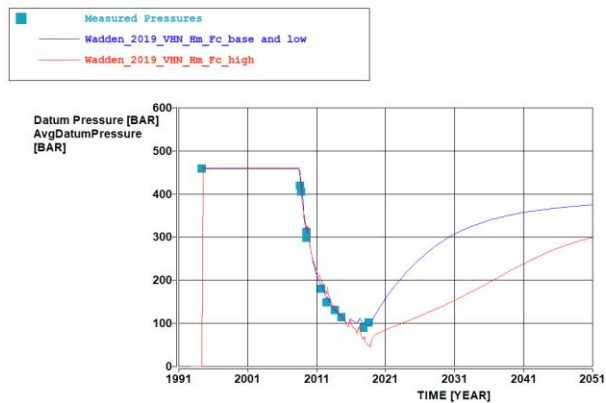
Het gas uit het Lauwersoog West veld wordt geproduceerd met put LWO-3. Omdat de permeabiliteiten in dit voorkomen sterk variëren, is de gemeten druk vergeleken met de bottom-hole drukken. Voor dit voorkomen is de druk gemeten in 2019 in overeenstemming met de modellen zoals gebruikt in voorgaande jaren. Er is geen noodzaak om de modellen te herkalibreren.



Figuur 0-6: LWO-3: de drukprognoses (laag, mid en hoog) zijn weergegeven met de continue lijnen, terwijl de 'bottom-hole' druk met gestippelde lijnen zijn weergegeven. De metingen zijn weergegeven met de blauwe blokken.

5.6 Vierhuizen Oost

Uit dit voorkomen wordt sinds november 2018 niet meer geproduceerd doordat de put integriteitsproblemen geeft. De gemeten drukken zijn in overeenstemming met de modellen. Er is geen noodzaak om de modellen te herkalibreren. Voor de drukprognose is aangenomen dat in de toekomst niet meer uit het voorkomen geproduceerd wordt.



Creation date: Wed 11/12/2019 15:54 Runfile: Wadden_2019_VHN_Hm_Fc_base_1.rur

Figuur 0-7: Vierhuizen Oost: de drukprognoses (laag/mid en hoog) in het gasreservoir zijn weergegeven met de continue lijnen. De metingen zijn weergegeven met de blauwe blokken.