

Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen

Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2020

NAM B.V

EP Document Number:	EP202104200793	Owner:	NAM-UPC/T
Document Date:	1/5/2021	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 over het jaar 2020 worden hieronder samengevat:

Aanpak:

- De meet- en regelcyclus is uitgevoerd volgens de Long Term Subsidence studie II (LTS-II) methode;
- De bodemdaling voor alle voorkomens is berekend volgens het bodemdalingsmodel zoals beschreven in deze studie (Referentie 13);
- Dertien 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 2020 zijn negen reservoirdrukken gemeten in de Wadden voorkomens.
- Op basis van het meetplan Waddenzee zijn in 2020 GNSS-metingen (Global Navigation Satellite System, GPS) in de Waddenzee uitgevoerd op zeven clusters van peilmerken in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag.
- De continue GNSS-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 2020 voortgezet. Het AGRS (GNSS) station Ameland (Nes) en het in 2016 geplaatste GNSS-station Ternaard zijn ook onderdeel van de monitoring.
- In de periode januari-februari 2020 is op het eiland Ameland een nauwkeurigheidswaterpassing uitgevoerd.

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

Modellen:

- Na het kalibreren van de dynamische reservoirmodellen van de Ameland, Wadden en Anjum velden met de gemeten reservoirdrukken is de grootste resterende onzekerheid de druk in de 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 2020 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 vergelijkbaar is met de belasting volgens de M&R-cyclus 2019 en wederom binnen de gebruiksruijmt blijft. Daarom worden er geen maatregelen genomen om de productie bij te stellen.

Inhoud

Samenvatting	2
Inhoud	4
1 Inleiding	5
2 Deelprocessen	7
2.1 Meten (stap 1)	7
2.1.1 Geodetische metingen	7
2.1.2 Reservoirdrukmetingen	7
2.2 Analyseren meetgegevens (stap 2)	8
2.2.1 Analyseren van GNSS-metingen en referentie	8
2.2.2 Campagne GNSS-metingen op de Waddenzee	9
2.2.3 Continue GNSS-metingen	9
2.2.4 Waterpassen en InSAR	9
2.2.5 Ruimte-tijd analyse	10
2.3 Verifiëren prognose (stap 3)	10
2.3.1 Overzicht ondergrondmodellering	10
2.3.2 Verifiëren reservoirmodellen (stap 3a)	11
2.3.3 Verifiëren bodemdalingsscenario's (stap 3b)	16
2.3.4 Vergelijking van gemodelleerde bodemdaling met resultaten van campagne GNSS ..	33
2.4 Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4)	36
2.4.1 Bepaling volume en gemiddelde daling	36
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)	41
2.6 Actualiseren (stap 6)	41
2.7 Remwegscenario	42
3 Kwaliteitsborging	43
4 Conclusies	44
5 Referenties	45
6 Bijlage 1: Gemodelleerde en gemeten bodemdaling sinds 1986 en 2006	47
7 Bijlage 2: Verwachte bodemdaling in het jaar 2050	49
8 Bijlage 3: Mogelijke gevolgen van aardbevingen op bodemdaling en milieu	50
9 Bijlage 4: Tijdseries Waddenzee	54
10 Bijlage 5: Controle reservoirmodellen met 2020 drukmetingen	56
10.1 Moddergat	56
10.2 Nes	56
10.3 Lauwersoog Oost	57
10.4 Lauwersoog Centraal	58
10.5 Lauwersoog West	58
10.6 Vierhuizen Oost	58

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 2020 is een Meet- en regelcyclus uitgevoerd zoals beschreven in het Meet- en regelprotocol. Dit document bevat een beschrijving van de resultaten van de zes 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 van de productie
6. Actualiseren

Hierna volgt een hoofdstuk over de kwaliteitsborging, zoals eveneens beschreven in het Meet- en regelprotocol. Als laatste worden de conclusies van de Meet- en regelcyclus 2020 samengevat.

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 2-18 en Figuur 2-17).
2. Tabellen met de jaarlijkse toename van het bodemdalingssnelheid (inclusief onzekerheid) per voorkomen per kombergingsgebied voor de jaren 2005 t/m 2022 (Tabel 2-11 en Tabel 2-12). Een tabel met de bodemdalingssnelheid (per jaar; S) en belasting (gemiddelde bodemdalingssnelheid per zes jaar; B) per kombergingsgebied (Zoutkamperlaag en Pinkegat) tot 2042 (Tabel 2-13 en Tabel 2-14). De in een bepaald jaar gerapporteerde belasting B wordt berekend voor de situatie op 1 januari van dat jaar. Voor de rapportage in 2021 (over het jaar 2020) wordt op deze manier een B voor 1 januari 2020 berekend.

3. Grafieken met de bodemdalingsbelasting voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag vanaf start productie op de locatie Moddergat tot 2042 (Figuur 2-21 en Figuur 2-22).
4. Overzicht monitoring met continue GNSS-hoogtemetingen (Global Navigation Satellite System, GPS) (Tabel 2-3).
5. 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).
6. Geplande productie per voorkomen (jaarprofiel, Tabel 2-6).
7. Gemeten en gemodelleerde bodemdaling op de permanente GNSS-locaties (Ameland, Moddergat en Anjum), inclusief onzekerheid (Figuur 2-11 tot en met Figuur 2-15).

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 het LTS-I onderzoek (Referentie 10), 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 13). 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 2020 verzamelde data is opnieuw een Meet- en regelcyclus doorlopen. Bij de uitvoering van deze Meet- en regelcyclus worden de volgende deelprocessen uitgevoerd:

1. Meten
2. Analyseren van de meetgegevens
3. Verifiëren van de prognose van de bodemdaling
4. Berekenen van het volume en de gemiddelde daling
5. Indien nodig aanpassen van de gasproductie
6. Actualiseren van de prognose van de bodemdaling.

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van deze deelprocessen voor het rapportagejaar 2020.

2.1 Meten (stap 1)

2.1.1 Geodetische metingen

In januari-februari 2020 is op het eiland Ameland een nauwkeurigheidswaterpassing uitgevoerd. Deze is gerapporteerd als meetregister (Referentie 19).

Volgens het goedgekeurde meetplan (aangepast naar aanleiding van de COVID-19 situatie) voor de Waddenzee zijn in 2020 ook GNSS-metingen uitgevoerd op 7 clusters van peilmerken in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. De GNSS-metingen zijn in Referentie 7 beschreven en ook gerapporteerd als meetregister (Referentie 19). De resultaten van de permanente GNSS-metingen zijn maandelijks aan SodM gerapporteerd in 2020. Naast de stations AME1, Moddergat en Anjum, zijn hier in 2016 het AGRS-station Ameland (bij Nes), welke operationeel is sinds 2014, en het station Ternaard aan toegevoegd.

De frequentie voor vlakdekkende metingen op land is 3 jaar. Volgens het goedgekeurde meetplan 2021 zal dit jaar (2021) de vlakdekkende meting in het Lauwersmeergebied middels InSAR uitgevoerd worden. In deze Meet- en Regelcyclus worden de meeste recente metingen op het vasteland van 2018 gebruikt.

2.1.2 Reservoirdrukmetingen

Als gevolg van zes-jaarlijks onderhoud van de installaties in het najaar van 2020 zijn de Waddenvelden 44 dagen lang ingesloten geweest. Dit heeft geresulteerd in een lange drukopbouw in de putten en representatieve metingen van de reservoirdrukken voor de grootste Waddenvelden: Nes, Moddergat, Lauwersoog West en Lauwersoog Oost. In Tabel 2-1 worden deze reservoirdrukken getoond. Drukmetingen genomen op reservoirniveau (SPG) in putten MGT-1 en MGT-2 zijn in goede overeenstemming met drukmetingen genomen aan het oppervlakte als de put voor meerdere dagen dichtstaat, en vervolgens geconverteerd naar reservoirniveau ('Closed-in Tubing Head Pressure'; CITHP).

De kleinere Waddenvelden, Vierhuizen en Lauwersoog Centraal, hebben niet tot nauwelijks geproduceerd in 2020 door technische problemen met de putten, en hebben geen drukmetingen in 2020. Tabel 2-2 toont de cumulatieve gasproductie per voorkomen tot en met 31 december 2020 en hoeveel gas is geproduceerd alleen in 2020.

Tabel 2-1; Reservoirdrukmetingen in 2020 voor de MLV-voorkomens op basis van Closed-in Tubing Head Pressure (CITHP) metingen en SPG-metingen. In de laatste kolom is aangegeven hoe lang de put ingesloten was toen de reservoirdruk werd gemeten.

Voorkomen	Putnaam	Datum	Gemeten druk (op reservoirniveau, bara)	Type meting
Moddergat	MGT-1B	17-09-2020	142,12 @ 3860 m	SPG (23 dagen)
	MGT-1B	8-10-2020	144 @ 3860 m	CITHP (44 dagen)
Nes	MGT-2	11-09-2020	132,99 @ 3700 m	SPG (17 dagen)
	MGT-2	8-10-2020	135 @ 3700 m	CITHP (44 dagen)
	MGT-3	8-10-2020	129 @ 3700 m	CITHP (44 dagen)
	MGT-4A	10-09-2020	144,88 @ 3700 m	SPG (337 dagen)
	MGT-5	8-10-2020	129 @ 3700 m	CITHP (44 dagen)
Lauwersoog-Oost	LWO-1B	8-10-2020	140 @ 4050 m	CITHP (44 dagen)
Lauwersoog-West	LWO-3	8-10-2020	113 @ 4060 m	CITHP (44 dagen)

Tabel 2-2; Productie per voorkomen tot en met 31/12/2020.

Voorkomen	Cumulatieve productie t/m 2020 (10 ⁶ Nm ³)	Productie volgens winningsplan in 2020 (10 ⁶ Nm ³)	Actuele productie in 2020 (10 ⁶ Nm ³)
Nes	11330	753	431
Moddergat	4711	161	167
Lauwersoog-C	137	26	1
Lauwersoog-West	1647	62	68
Lauwersoog-Oost	2334	73	90
Vierhuizen-Oost	1628	0	0
Totaal*	21787	1075	757

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

2.2 Analyseren meetgegevens (stap 2)

2.2.1 Analyseren van GNSS-metingen en referentie

De GNSS-metingen worden volgens de in Referentie 7 beschreven GNSMART-methodiek geanalyseerd. Hierbij wordt een twaalfstal permanente stations als referentie gebruikt.

Sinds de Meet- en Regel cyclus 2018 worden de GNSS-dubbel-differenties ruimtelijk ten opzichte van dit referentienetwerk gebruikt in de confrontatie met bodemdalingsscenario's, conform de LTS-procedure. GNSS-dubbel-differenties ten opzichte van een referentienetwerk zijn namelijk robuuster voor kleine veranderingen in individuele stations.

De referentiestations worden jaarlijks op stabiliteit gecontroleerd (Referentie 8). Vanaf 2020 wordt de volgende procedure gehanteerd:

1. Berekening van de coördinaten van de stations Borkum, Ballum, Drachten, Schiermonnikoog en Terschelling; terwijl de coördinaten van de overige referentiestations vastgehouden worden. De coördinaten worden aangepast indien zij meer dan 0,5 mm afwijken van de voorgaande.
2. Berekening van de coördinaten van alle referentiestations, waarbij zij worden aangepast indien ze meer dan 2 mm afwijken van de voorgaande.

De aanleiding voor deze 'tweetraps' procedure is dat bij de 5 GNSS-stations (genoemd onder stap 1) kleine bewegingen zijn geconstateerd in het project dat alternatieve GNSS processing methodologieën heeft geëvalueerd (Referentie 33). Dit project is uitgevoerd door TU Delft in opdracht van NAM in het kader van het 'Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen' behorende bij het Winningsplan Groningen.

2.2.2 Campagne GNSS-metingen op de Waddenzee

De ellipsoïdische hoogteverschillen van de wadpunten worden sinds 2006 met GNSS bepaald. Voor het omrekenen naar orthometrische hoogteverschillen wordt sinds 2006 gebruik gemaakt van het NLGEO2004 geoïdemodel (Referentie 9). Echter, in de confrontatie workflow met bodemdalingsscenario's worden GNSS dubbel-differenties in ruimte en tijd berekend, wat direct op de ellipsoïdische hoogtes zou kunnen worden toegepast.

Voor de interpretatie van Figuur 2-17 moet voor de in 2006 door NAM nieuwgeplaatste 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.

2.2.3 Continue GNSS-metingen

Als onderdeel van het Meet- en regelprotocol worden behalve campagne GNSS-metingen ook continue GNSS-metingen uitgevoerd. Deze bevinden zich op de locaties Ameland, Moddergat, Ameland-Nes, Ternaard en Anjum. Deze metingen hebben een signaalfunctie om veranderingen in het verloop van de bodembeweging tijdig te kunnen signaleren binnen het interval (3 jaar) van de vlakdekkende metingen.

Tabel 2-3 geeft de analyse van de continue GNSS-metingen op de locaties Ameland, Moddergat en Anjum, alsmede het 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 GNSS tijdserie. Het GNSS-sigitaal in tijd wordt in Figuur 2-11 tot en met Figuur 2-15 getoond. Ook zijn er in 2014 GNSS-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 GNSS-metingen.

Locatie	Start Monitoring	Absolute verticale beweging sinds start monitoring t/m 31/12/2020 [mm]	Verticale bewegingssnelheid in 2020 [mm/jaar]
Ameland	05-02-2007	-90	-6,1 [1 σ = 0,7 mm/jaar]
Anjum	05-02-2007	-48	-2,0 [1 σ = 0,5 mm/jaar]
Moddergat	05-02-2007	-49	-3,3 [1 σ = 0,7 mm/jaar]
Ameland-Nes	17-06-2014	-5	-0,3 [1 σ = 1,9 mm/jaar]
Ternaard	19-11-2016	-9	-2,0 [1 σ = 0,6 mm/jaar]

2.2.4 Waterpassen en InSAR

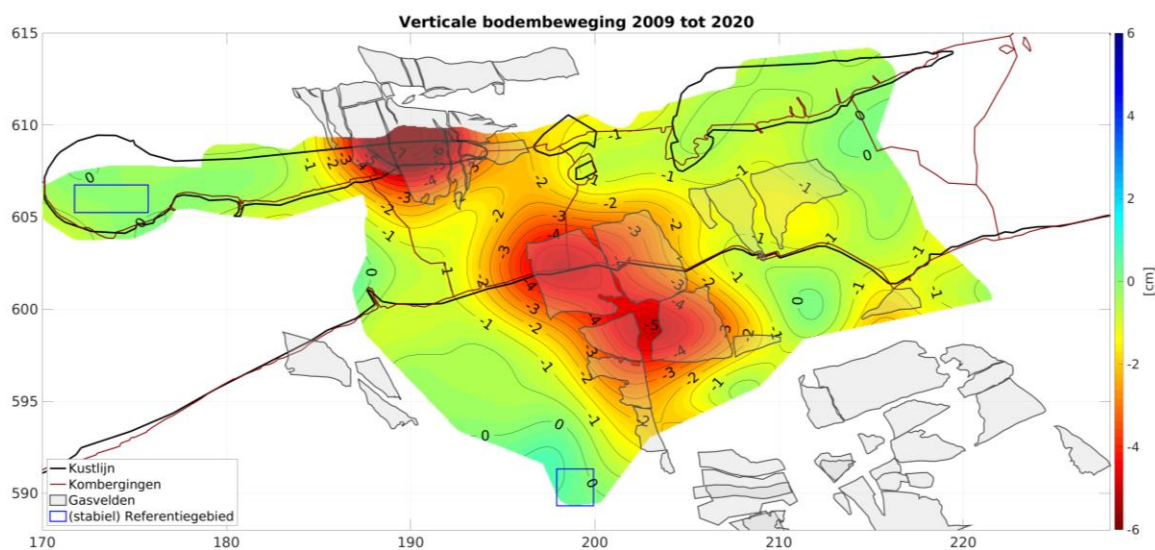
Op het eiland Ameland is een waterpassing uitgevoerd begin 2020, welke is gerapporteerd als meetregister (Referentie 34). Twee nieuwgeplaatste, diepgefundeerde peilmerken in 2019, nabij de NAM-locatie en de strandpaal 002C0082, zijn voor het eerst aangemeten in deze waterpassing. De metingen van deze waterpassing, inclusief de onzekerheidsbeschrijving in de vorm van een volle covariantiematrix, zijn dit jaar meegenomen.

Op het vasteland van het Lauwersmeergebied zijn zowel voor waterpassen als voor InSAR (Satelliet Radar Interferometrie) geen nieuwe metingen in deze cyclus ten opzichte van de Meet- en Regelcyclus 2019. De differentiestaten van het Meetregister Noord-Nederland,

Groningen en Waddenzee 2018 (Referentie 28) rapporteren zowel de deformatiemetingen van de waterpassingen als die van InSAR (van opeenvolgende missies ERS, Envisat en Radarsat-2), berekend op de peilmerk locaties. Als InSAR-tijdserie wordt per peilmerk de mediaan van de tijdseries van alle InSAR meetpunten binnen een 500 meter radius gehanteerd. De InSAR-deformatieschattingen zijn berekend op basis van data over periodes van één jaar.

2.2.5 Ruimte-tijd analyse

Om de residuele verschillen tussen geomechanische modellen en geodetische metingen beter te kunnen visualiseren, is een geodetisch model afgeleid op basis van waterpas en GNSS metingen. Dit model geeft de beste oplossing voor een glad oppervlak door de metingen op basis van een ruimte-tijd analyse (methode Houtenbos, Referentie 17). 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 2020 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 GNSS-metingen in de Waddenzee ook gebruik gemaakt van de metingen op permanente GNSS-stations en de waterpassingen op het vaste land, Ameland en Schiermonnikoog. Interpretatie en visualisatie zijn in ruimte en tijd beperkt tot het gebied oftewel het tijdvak, dat door voldoende betrouwbare metingen is afgedekt.

2.3 Verifiëren prognose (stap 3)

2.3.1 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 12 en voor het Ameland veld in Referentie 13. 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 geologische modellen worden vervolgens gedeeld met de reservoir engineer. Deze combineert deze 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 ook 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 0). 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 worden 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	Gas- en watercompositie, 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* reservoirrealisaties 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 in verticale richting
- Permeabiliteit in horizontale richting
- Permeabiliteit in aquifer(s)
- Relatieve permeabiliteit van gas en water

Op basis van de metingen is voor elke reservoirparameter een bereik bepaald. Dit wordt uitgebreid beschreven in Referentie 12 voor de Wadden en Anjum velden en Referentie 13 voor het Ameland veld.

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.

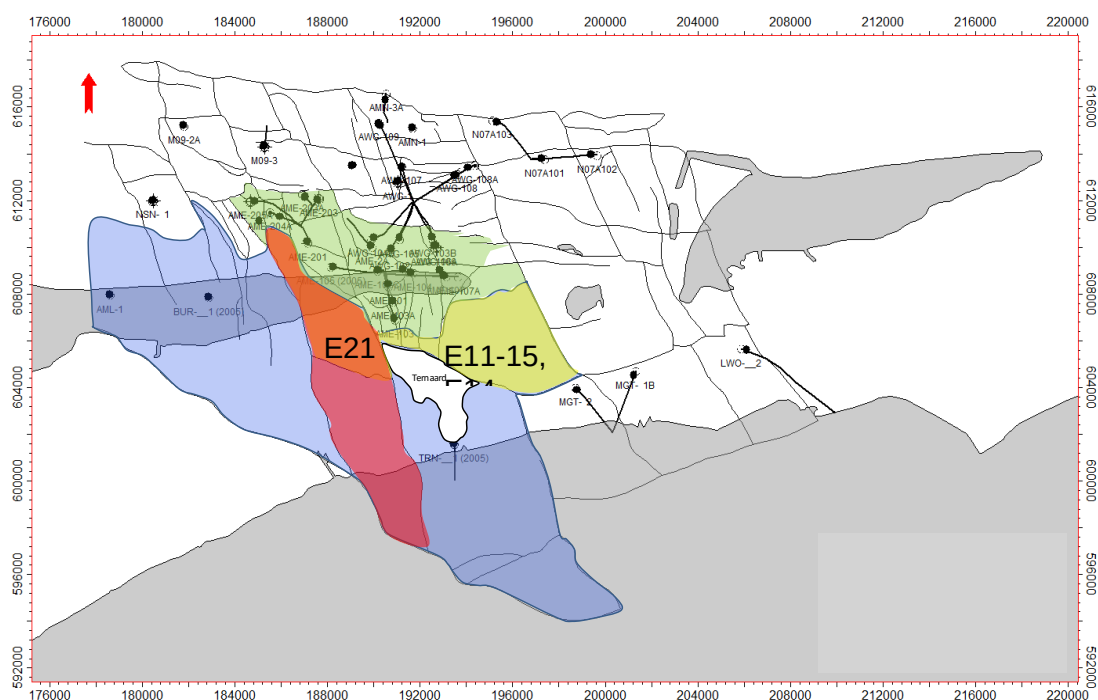
Om de onzekerheden mee te nemen die *in mindere mate* gereduceerd kunnen worden met behulp van de historische productiegegevens en drukmetingen, worden er verschillende realisaties van de reservoirmodellen gemaakt. Resterende onzekerheden die worden meegenomen in de verschillende realisaties zijn:

- 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 18). 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 2-2) gevarieerd om de bodemdaling ten zuiden van Ameland te verklaren. De blauwe aquifers in Figuur 2-2 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.

Uit deze gegevens kan ook afgeleid worden of er communicatie kan zijn tussen bepaalde voorkomens die begrensd worden door breuken. In Referentie 32 is dit in meer detail beschreven voor de Waddenvelden. Voor het merendeel van de randbreuken is het uiterst onwaarschijnlijk dat ze doorlatend zijn. Langs de oostelijke randbreuk bestaat een klein segment waar mogelijk een verbinding kan ontstaan tussen het oostelijke, niet gedepleteerde en watervoerende blok aan de ene kant en het westelijke watervoerende blok dat mogelijk in druk is gedaald door de productie van gas uit het Lauwersoog Oost veld. De mogelijke consequenties voor de bodemdalingsbelasting in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag zijn kwalitatief bepaald. Eventuele belasting van een dergelijk onwaarschijnlijk scenario is beperkt: minder dan 0,2 mm/jaar. Dit valt ruim binnen de gebruiksruimte en wordt gemonitord.

Nu kan men zich afvragen of het mogelijk is dat een breuk plotseling doorlatend wordt in het geval een reservoir door productie al in druk is gedaald. In Referentie 32 is dit in meer detail uitgewerkt voor de velden Nes en Moddergat. Hieruit blijkt dat de drukmetingen in de putten dit duidelijk zullen aangeven. Tevens blijkt hieruit dat de impact op de verwachte belasting zeer klein zou zijn: minder dan 0,1 mm/jaar verandering in bodemdalingssnelheid en een kleine verschuiving van de bodemdalingsskom. De totale belasting blijft ook in geval van plotselinge communicatie tussen de velden ruim binnen de gebruiksruimte. 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 bodemdalingsberekeningen.



Figuur 2-2; Laterale aquifers van het Ameland voorkomen (rood en geel).

Om een goed bereik van de drukvoorspellingen te krijgen worden dus met name de aquiferpermeabiliteit 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 12, Referentie 13 en Bijlage 5. Dit heeft geresulteerd

in modelrealisaties die de historische metingen tot en met 2020 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 goed worden gereproduceerd, zie Bijlage 5. De drukken in de watervoerende lagen verder weg van de putten (waar geen directe metingen zijn) laten tussen de realisaties grotere verschillen zien. 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.

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

Tabel 2-5; Overzicht van de opgestelde realisaties (gelijk aan de rapportage over 2019).

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

Om drukprognoses te maken wordt een gaswinningsprognose gebruikt. Uit Vierhuizen-Oost kan sinds 2018 niet meer worden geproduceerd vanwege technische problemen met de put (zie Bijlage 5 voor meer informatie), vandaar dat de voorgenomen productie op 0 staat.

Tabel 2-6 toont de jaarlijkse productie per voorkomen die is gebruikt om de druk per voorkomen te voorspellen. Uit Vierhuizen-Oost kan sinds 2018 niet meer worden geproduceerd vanwege technische problemen met de put (zie Bijlage 5 voor meer informatie), vandaar dat de voorgenomen productie op 0 staat.

Tabel 2-6; Voorgenomen productie (miljoen Nm3 per jaar) per voorkomen volgens Business Plan 2020.

Jaar	Moddergat	Nes	Lauwersoog-Oost	Lauwersoog-West	Lauwersoog-C	Vierhuizen-Oost
2021	162	401	96	53	2	-
2022	143	336	90	51	3	-
2023	122	272	82	40	1	-
2024	116	253	82	45	1	-
2025	106	223	78	34	-	-
2026	96	197	75	35	-	-
2027	89	163	72	29	-	-
2028	84	108	70	35	-	-

³ GNSS-metingen zijn gebruikt om de drukkaling in het zuidwestelijke aquifer (E21) en zuidoostelijke aquifers (E11-15 en E14 in Figuur 2-2) 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.

Jaar	Moddergat	Nes	Lauwersoog-Oost	Lauwersoog-West	Lauwersoog-C	Vierhuizen-Oost
2029	77	90	67	24	-	-
2030	70	84	63	18	-	-
2031	64	79	61	-	-	-
2032	58	74	58	-	-	-
2033	49	68	55	-	-	-
2034	38	58	53	-	-	-
2035	29	21	44	-	-	-
Totaal	1302	2428	1046	364	7	0

2.3.3 Verifiëren bodemdalingsscenario's (stap 3b)

De bodemdalingberekeningen in deze rapportage zijn op dezelfde wijze uitgevoerd als in de LTS-II studie (Referentie 13). Hierin is het RTCiM model uitgebreid met een extra deel dat het geomechanisch gedrag beschrijft op het moment dat het gasreservoir en/of watervoerende pakket zich in een staat van overdruk bevindt. Overdruk is hier gedefinieerd als een vloeistof- of gasdruk hoger dan de hydrostatische druk volgens een gradiënt van 0,11 bar/m. Op het moment dat de drukdaling het niveau van de hydrostatische druk bereikt zal de compactie zich gedragen volgens het reguliere RTCiM model (Referentie 11). De kruip van het zout boven het compacterende reservoir is gesimuleerd door de toepassing van een "bewegend" rigid basement proxy (Referentie 14). Kalibraties van deze proxie met een numeriek Geomec model zijn beschreven in dezelfde referentie. Door het rigid basement naar boven te bewegen zal de bodemdalingssom smaller worden met de tijd. Eenzelfde gedrag wordt ook gezien wanneer er kruipbeweging in het zout ontstaat door geïnduceerde schuifspanningen in het zout die het gevolg zijn van compactie van het reservoir.

De modelering in de LTS-II studie betrof alleen het Ameland veld. In de M&R cycli die erna volgden worden alle velden (Ameland, de Anjum en de Wadden voorkomens) volgens 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.

2.3.3.1 Autonome diepe-bodemdeling

In het advies van de Auditcommissie over de Meet- en regelcyclus van 2019 (Referentie 30) wordt aanbevolen om de autonome diepe-bodemdeling en de lokale verschillen daarin in de metingen te verdisconteren waarmee de modellen voor de diepe ondergrond worden gekalibreerd. Het betreft de bodemdaling dieper dan de top van de Pleistocene laag, die door andere processen dan de gaswinning wordt veroorzaakt.

Naar aanleiding van deze aanbeveling is onderzocht wat de ordegrrootte en mogelijke lokale verschillen van de autonome diepe-bodemdeling zouden kunnen zijn in het Waddengebied, en of een eventuele correctie past in de procedures van de Meet- en Regelcyclus.

Ten eerste zijn geodetische metingen relatief in ruimte en tijd; zowel waterpassen, InSAR als GNSS. De GNSS-referentiestations rondom het Waddenzee gebied worden jaarlijks gecontroleerd op onderlinge bewegingen. Het is tot dusver niet gebleken dat hier ruimtelijke systematiek in zit. In Leusink, 2003 (Referentie 31) wordt de geologische bodembeweging berekend op basis van waterpasgegevens over heel Nederland. Deze beweging wordt in het Waddengebied geschat op 0,2-0,3 mm/jaar (voornamelijk door postglaciale isostatische aanpassingen). Dit levert ruimtelijk relatieve verschillen (~0,1 mm/jaar) op die ruim binnen de meetonzekerheid liggen.

Ten tweede wordt de verwachte autonome diepe-bodemdeling al meegenomen in de scenario's voor de relatieve zeespiegelstijging. Daarom is besloten de procedure ongewijzigd te laten:

- De confrontatie workflow volgens de LTS-methode is gebaseerd op dubbel-differenties relatief in ruimte en tijd, voor zowel de bodemdaling modellen als de geodetische data. Lokale verschillen

voor de autonome diepe-bodembeweging zijn naar verwachting dusdanig klein dat het de voorkeur heeft om de confrontatie uit te voeren zonder verdere model aannames.

- Voor de meegroeivermogenstoets heeft de kalibratie op basis van relatieve dubbel-differenties geen effect, omdat de autonome diepe-bodemdaling in de relatieve zeespiegel scenario's wordt meegenomen.

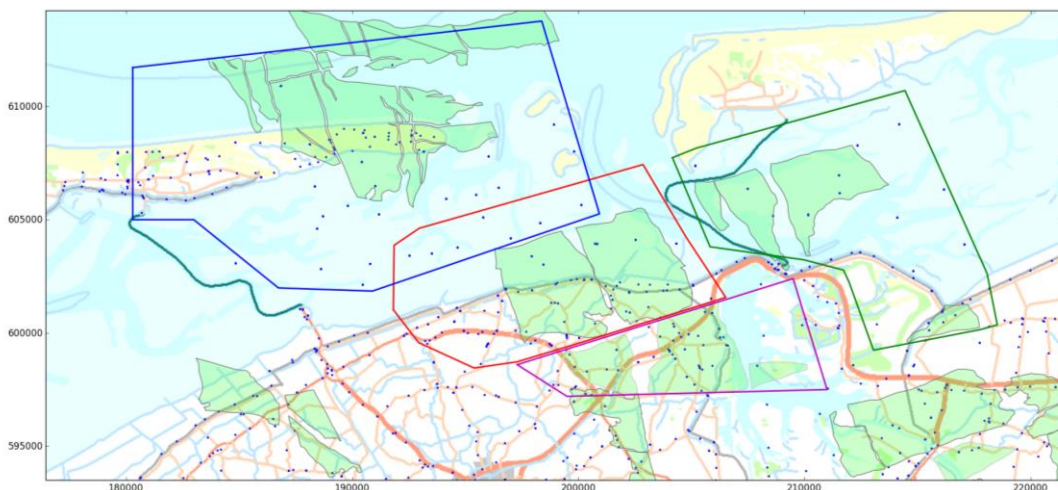
2.3.3.2 Opstellen van bodemdalingsscenario's

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 weer vier kalibratiegebieden gedefinieerd, namelijk Ameland, Anjum, Nes/Moddergat en Lauwersoog/Vierhuizen (Figuur 2-3). De vier kalibratiegebieden liggen binnen het geomechanische model, zodat ook de overlappende bodemdalingsschakels van de velden goed worden meegenomen.

Voor de kalibratiegebieden Lauwersoog/Vierhuizen en Anjum zijn net als voorgaande jaren de combinaties van lage, basis en hoge realisaties gebruikt. Voor Ameland zijn ook dit jaar additionele combinaties en realisaties gebruikt, omdat de gemeten bodemdaling groot genoeg is om onderscheid te maken tussen de grote laterale aquifers onder het Pinkegat. Combinaties van reservoirrealisaties (zie Tabel 2-7) worden gelijktijdig voor alle kalibratiegebieden doorerekend en geconfronteerd met de geodetische dataset. Per kalibratiegebied wordt vervolgens de χ^2 toetsgrootte 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 negen combinaties gemaakt (zie ook Tabel 2-7). Dit betekent dat $9 \times 20.000 = 180.000$ bodemdalingsscenario's met de geodetische metingen binnen dit kalibratiegebied worden geconfronteerd.



Figuur 2-3; 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.

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

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

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

Ameland					
Ameland	laag	interim1	basis	interim2	hoog

2.3.3.3 Geodetische componenten bij het verifiëren van de bodemdalingsscenario's

De geodetische metingen worden in de LTS-studie (Referentie 13) 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 2020 Meet- en Regel cyclus.

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.

2.3.3.3.1 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 2020 (laatste waterpassing).
- Waterpassingen vasteland Noord-Nederland (Lauwersmeergebied): t/m 2018 (laatste waterpassing).
- GNSS-metingen: campagne (Waddenzee) en jaarlijkse sampling van de continue stations (Ameland, productieplatformen en op het vasteland) t/m 2020.
- InSAR: op het vasteland, jaarlijks gesampled op peilmerklocaties, t/m 2018.

Voor de waterpassingen (zowel op Ameland als op het vasteland) en de GNSS-metingen is een volle covariantiematrix bepaald volgens de procedure uit de LTS-studie (Referentie 13). 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 (bijvoorbeeld 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

Om extra gewicht toe te kennen aan de metingen op het Wad, is voor de GNSS-campagne-metingen op de Waddenzeeclusters alleen de meetprecisie gemodelleerd in het stochastisch model.

Voor waterpassingen op Ameland en het vasteland zijn de stochastische componenten toegepast zoals gedefinieerd in de LTS-studie. Naast de meetprecisie en de temporele component van de idealisatieprecisie, is ook de spatio-temporele component toegepast.

Voor de vasteland waterpassingen kunnen voor de spatio-temporele component de parameters aangehouden worden zoals in de LTS-studie is bepaald. Voor de Ameland waterpassingen levert dit een toetsgrootte (χ^2/n , met n het aantal dubbel-differenties) die boven de verwachtingswaarde 1 ligt. In de rapportage van de Meet- en regel cyclus 2019 is dit al gesignaleerd (Referentie 6). De toetsgrootte had een waarde van 1,69 voor het kalibratiegebied Ameland, en daarom is aangegeven dat in de huidige Meet- en regelcyclus nader wordt gekeken of het stochastisch model voor Ameland moet worden bijgesteld. Tevens is opnieuw gekeken naar mogelijke uitschieters in de gevormde dubbel-differenties. Als gevolg hiervan zijn een relatief klein aantal van vijf gemeten hoogteverschillen uit de totale dataset verwijderd. Het aantal dubbel-differenties in het kalibratiegebied Ameland reduceert hierdoor 0.4%.

Omdat de meetprecisie en de temporele component van de idealisatieprecisie (puntstabiliteit) goed bekend zijn, is voor Ameland onderzocht hoe de spatio-temporele component aangepast kan worden. De spatio-temporele component, zoals in de LTS-studie gehanteerd wordt, is een functie van de afstand tussen meetpunten en tijdstippen waarover gemeten worden. In de LTS-studie is al aangegeven dat dit model een overschatting is voor west Ameland (waar geen bodemdaling door gaswinning plaatsvindt) en in het

bodemdalingsgebied tevens de model-imperfecties modelleert. In deze Meet- en regelcyclus is ervoor gekozen om de variantie-factor van de spatio-temporele component aan te passen aan de model-imperfecties die worden geobserveerd in het kalibratiegebied op oost Ameland. De variantie factor is hiervoor verhoogd van 0,465 (LTS-studie) naar 2. Een factor 2 komt overeen met een standaardafwijking van ca. 3 cm over een tijdsperiode van meer dan 30 jaar en een afstand tussen meetpunten van ca. 15 km. Het verhogen van de stochastische component voor model-imperfecties heeft tot gevolg dat de waarden van de toetsgrootheden lager worden, en het betrouwbaarheidsinterval (onzekerheid) van de gemodelleerde bodemdaling groter. In Figuur 2-19 en Figuur 2-20 is bijvoorbeeld te zien dat de lijnen voor de lage en hoge realisatie iets verder uit elkaar liggen vergeleken met de rapportage van vorig jaar.

Voor de InSAR dubbel-differenties is hetzelfde stochastisch model gebruikt als in de voorgaande Meet- en Regelcyclus, i.e. met enkel de varianties van de dubbel-differenties, met een component voor de meetprecisie en de idealisatie precisie. Omdat er geen nieuw InSAR meetregister beschikbaar is gekomen in deze Meet- en regelcyclus, is hetzelfde type stochastisch model gehanteerd. Daarbij zijn wel de toetsgrootheden in de kalibratiegebieden met een vasteland gedeelte (Lauwersmeergebied) specifiek voor InSAR geëvalueerd. Hierbij werden voor InSAR toetsgrootheden van 0,8 en lager geconstateerd. Daaruit kan geconcludeerd worden dat het stochastisch model voor InSAR te conservatief is opgesteld. Het initiële stochastisch model is daarom bijgesteld met een variantiefactor van 0,8:

$$\sigma^2 = 0,8 \cdot 2 \cdot (4^2 \text{ mm}^2 + 4 \text{ mm}^2); \sigma = 5,7 \text{ mm}$$

Toepassing van bovengenoemde aanpassingen in de (co)variantiematrices in de confrontatie met bodemdalingssmodellen in de LTS-procedure levert waarden van de minimale χ^2/n toetsgrootheden op tussen 1,01 (kalibratiegebied Nes/Moddergat) en 1.35 (kalibratiegebied Ameland), zie Tabel 8. Dit is significant beter dan vorig jaar (zie ook kader hieronder).

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.

2.3.3.4 Confrontatie bodemdalingsscenario's en geodetische data

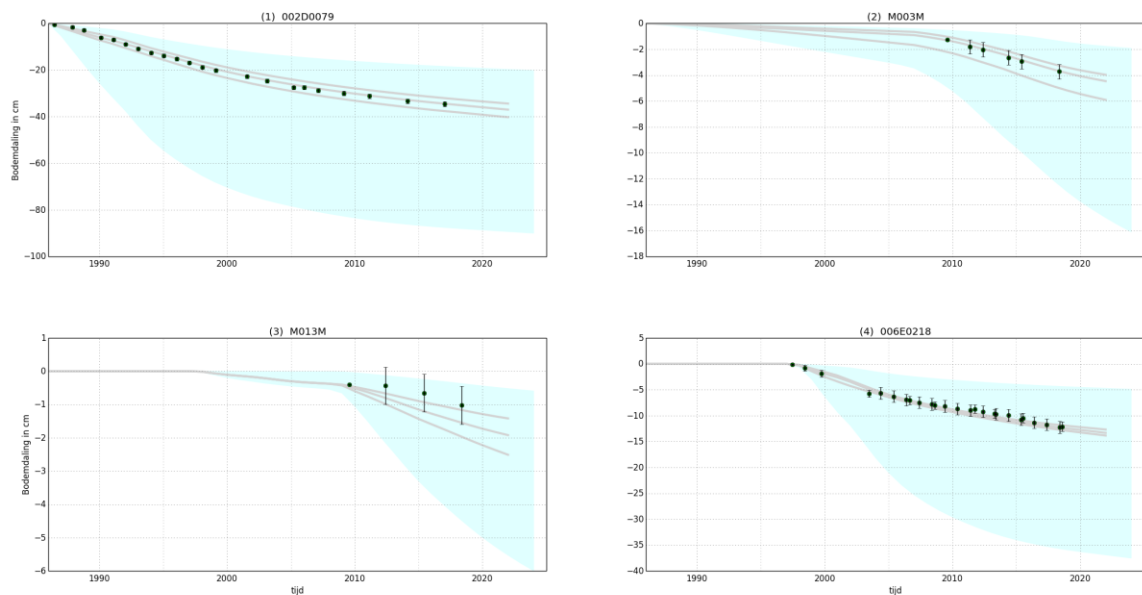
Per kalibratiegebied wordt voor elk scenario de passing van het scenario met de metingen uitgedrukt in een waarde voor de χ^2/n toetsgrootheid. De passing van het model met de data is beter naarmate de waarde voor χ^2/n toetsgrootheid kleiner wordt, waarbij de waarschijnlijkheid van het betreffende scenario groter wordt. Op deze manier kan 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 het gewogen gemiddelde en het betrouwbaarheidsinterval worden afgeleid.

Met de keuzes voor constructie van de covariantiematrices zoals beschreven in de vorige paragraaf, zijn de minimale χ^2/n toetsgrootheden in de confrontatie met de bodemdalingsmodellen voor de kalibratiegebieden zoals gedefinieerd in paragraaf 2.3.3.2 weergegeven in Tabel 2-8.

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

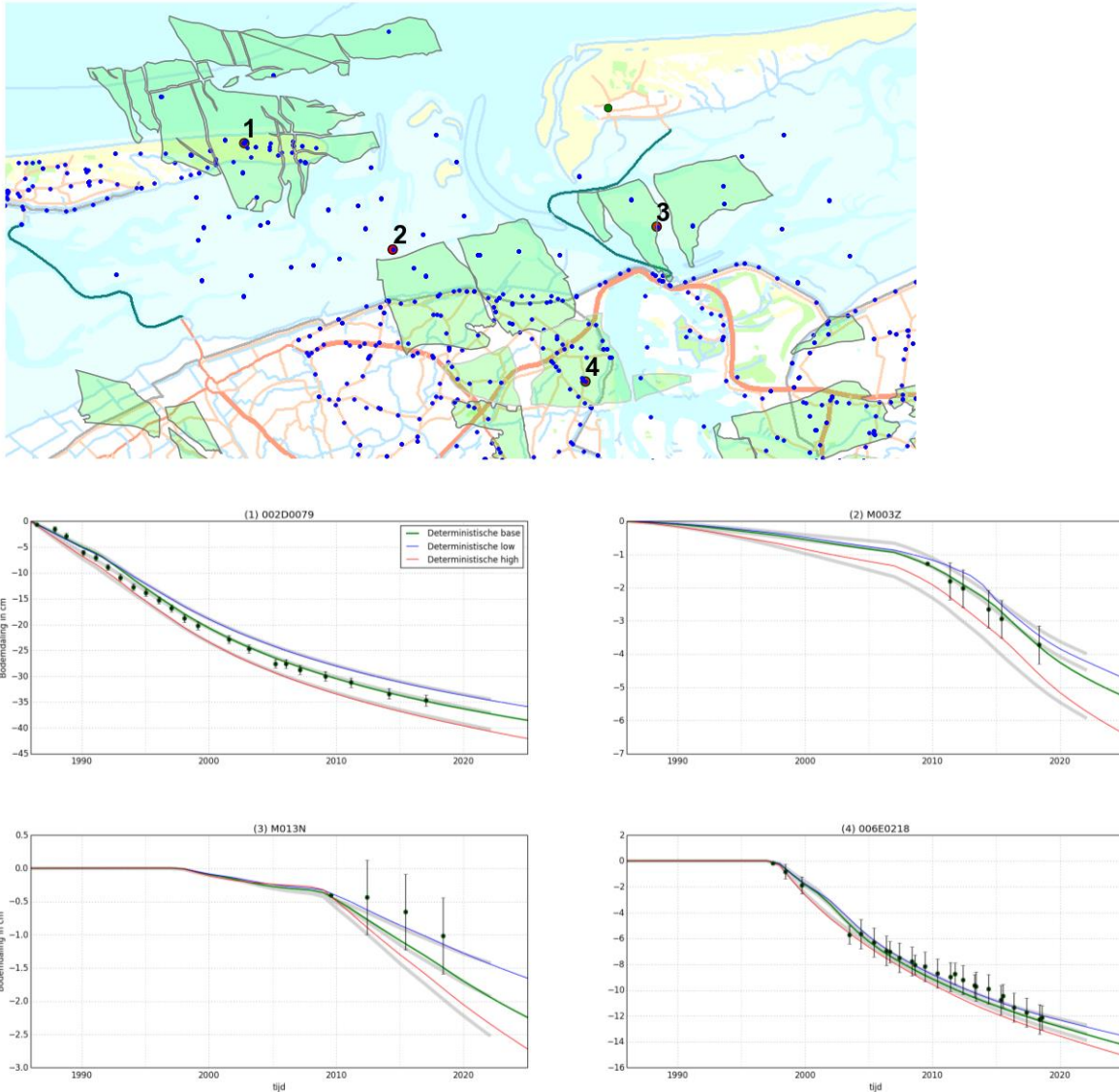
Kalibratiegebied	Minimale χ^2/n toetsgrootheid confrontatie
Ameland	1,35
Nes/Moddergat	1,01
Lauwersoog/Vierhuizen	1,16
Anjum	1,28

Figuur 2-4 toont met grijze lijnen de statistische bodemdalingslijnen voor de 2,5% overschrijdingskans, het gewogen gemiddelde en de 97,5% overschrijdingskans. Deze statistische waarden worden per dubbel-differentie en per jaar bepaald en zijn dus niet toe te kennen aan een uniek bodemdalingsscenario. Het blauwe vlak toont de onzekerheidsruimte die a priori is aangenomen. Ook is de gemeten bodemdaling (inclusief onzekerheid) als punten weergegeven in de grafieken.



Figuur 2-4; Bodemdaling op 4 punten (let op verschillende schaal op de y-as). 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 deterministische scenario's, zijn er scenario's gekozen die zo dicht mogelijk in tijd en plaats bij de drie statistische waarden liggen (gewogen gemiddelde, 2,5% en 97,5% overschrijdingskans). Dit maakt de koppeling naar parameterwaarden inzichtelijker en het vergelijk met bijvoorbeeld een geodetische ruimte-tijd analyse eenvoudiger. Voor deze deterministische scenario's is gekozen voor diegenen die het beste passen bij de recentere bodemdalingssnelheden op basis van geodetische metingen, want deze zullen resulteren in betere voorspellingen. De gekozen deterministische lijnen zijn met blauw, groen en rood aangegeven (Figuur 2-5) en komen goed overeen met drie statistische waarden (let op de verschillende waarden op de y-assen). Zie Bijlage 4 voor additionele punten.



Figuur 2-5; Bodemdaling versus tijd voor 4 meetpunten op Ameland (1), Nes (2), Vierhuizen (3) and Anjum (4). In de grafieken zijn zowel de statistisch afgeleide waarden (grijze lijnen) te zien als de deterministische scenario's (groen, blauw en rood). De punten zijn de geodetische waarnemingen met hun onzekerheden (2-sigma).

2.3.3.5 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 2-5). Bij het selecteren van deze scenario's is 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. Deze parameterwaarden zijn vergelijkbaar met die van vorig jaar.

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

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 [-].

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 verschillen is nog 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 13.

Tabel 2-9: Geomechanische parameterwaarden voor respectievelijk het laag, basis en hoog bodemdalingsscenario.

RTCiM	Ameland	Anjum	Nes Moddergat	Lauwersoog Vierhuizen
C_{mref} (factor) [-]	2,57 - 3,19 - 3,54	1,55 - 1,38 - 1,62	1,19 - 1,44 - 1,51	1,11 - 1,97 - 1,94
C_{md} (factor) [-]	0,45 - 0,46 - 0,68	0,36 - 0,38 - 0,52	0,16 - 0,31 - 0,41	0,23 - 0,32 - 0,49
b [-]	0,03 - 0,03 - 0,029	0,023 - 0,019 - 0,029	0,012 - 0,019 - 0,021	0,028 - 0,028 - 0,022
Zoutgedrag				
$C/k(0)$ [-]	0,84 - 0,8 - 0,77	0,77 - 0,76 - 0,79	0,84 - 0,8 - 0,77	0,76 - 0,76 - 0,77
$d(c/k)$ [-]	0,29 - 0,22 - 0,24	0,2 - 0,3 - 0,27	0,18 - 0,2 - 0,26	0,29 - 0,2 - 0,28
T_{salt} [jaar]	20,8 - 18,3 - 27,5	19,7 - 29,4 - 25,1	34,2 - 16,6 - 12,9	4,2 - 4,1 - 12,5

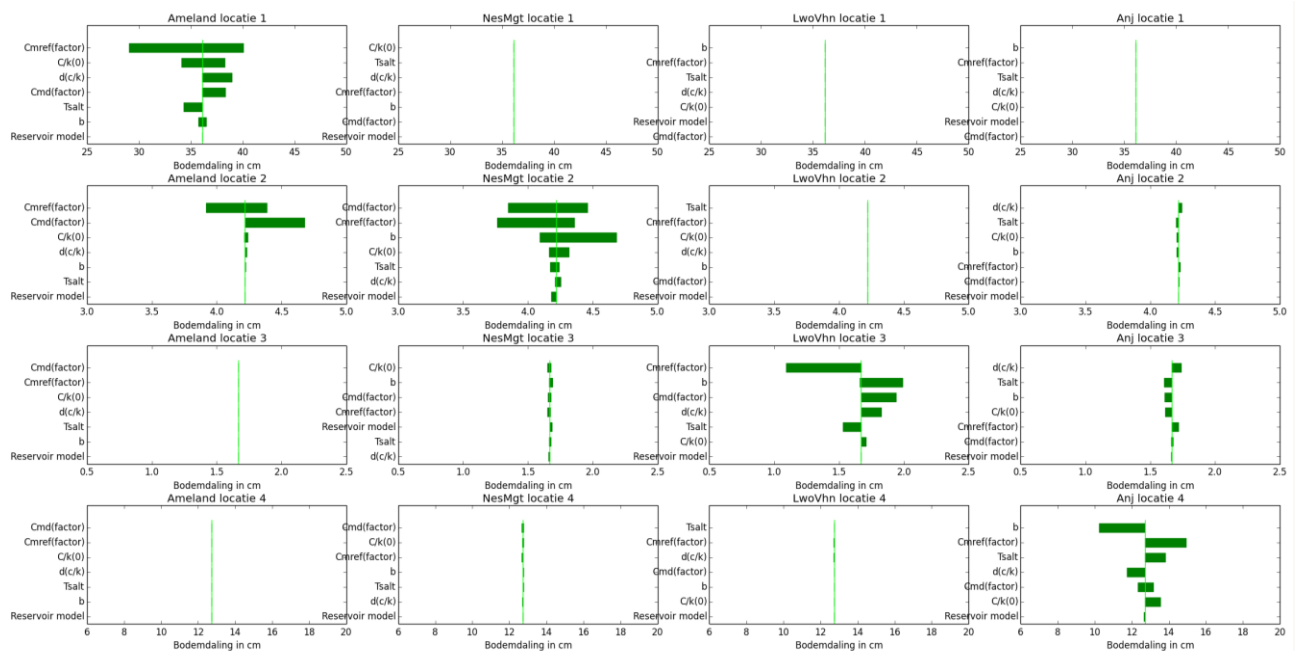
De gebruikte reservoirrealisaties voor het laag, basis en hoog bodemdalingsscenario zijn getabuleerd in Tabel 2-10.

Tabel 2-10: Reservoirrealisaties voor respectievelijk het laag, basis en hoog reservoir scenario.

Veldnaam	Reservoirrealisatie voor laag, basis en hoog bodemdalingsscenario
Ameland	Basis - basis - basis
Nes	Laag - basis - basis
Moddergat	Hoog - basis - basis
Lauwersoog Centraal	Basis - basis - basis
Lauwersoog West	Basis - basis - basis
Lauwersoog Oost	Basis - basis - basis
Vierhuizen	Basis - basis - basis
Anjum	Basis - basis - basis
Metslawier	Laag - laag - laag
Ezumazijl	Laag - hoog - hoog

Om de gevoeligheid van de geomechanische parameterwaarden op de gemeten data inzichtelijk te maken is een Tornado chart gemaakt (Figuur 2-6). Met behulp van dit figuur kan de parameter gevonden worden die de sterkste invloed op de bodemdaling heeft voor het betreffende punt (zie Figuur 2-4 voor de locatie van de punten). De gevoeligheid voor de parameters kan verschillen per locatie. Hoe breder de balk in dit figuur, hoe groter de invloed is van de betreffende parameter op de bodemdaling op een bepaald punt. In de Tornado chart zijn de parameters gebruikt zoals getabuleerd in Tabel 2-9. De invloed van de uiterste waarden volgens het lage en hoge scenario is getest per parameter terwijl de overige waarden constant zijn volgens het basis scenario. Per locatie is een Tornado chart gemaakt

waarbij de invloed is getoond op het betreffende punt per kalibratiegebied. Bijvoorbeeld: de bodemdaling op locatie 1 op Ameland wordt alleen beïnvloed door de parameters in het Ameland kalibratiegebied (bovenste rij in Figuur 2-6). De Anjum en Nes-Moddergat en Lauwersoog-Vierhuizen kalibratiegebieden hebben voor dit punt geen effect op de bodemdaling. Op locatie 1 heeft de C_{mref} het meeste invloed en de reservoirrealisaties het minste invloed op de bodemdaling. Deze laatste observatie kent een logische verklaring, omdat voor alle bodemdalingsscenario's de basis reservoirrealisatie is gevonden. Op de Waddenzee (Nes-Moddergat en Lauwersoog-Vierhuizen kalibratiegebieden, locaties 2 en 3 in Figuur 2-5) wordt de bodemdaling, naast de beïnvloeding door de Waddenzeevelden, mede beïnvloed door de Ameland en Anjum kalibratiegebieden. In locatie 4 wordt de bodemdaling bijna alleen door het Anjum kalibratiegebied veroorzaakt.

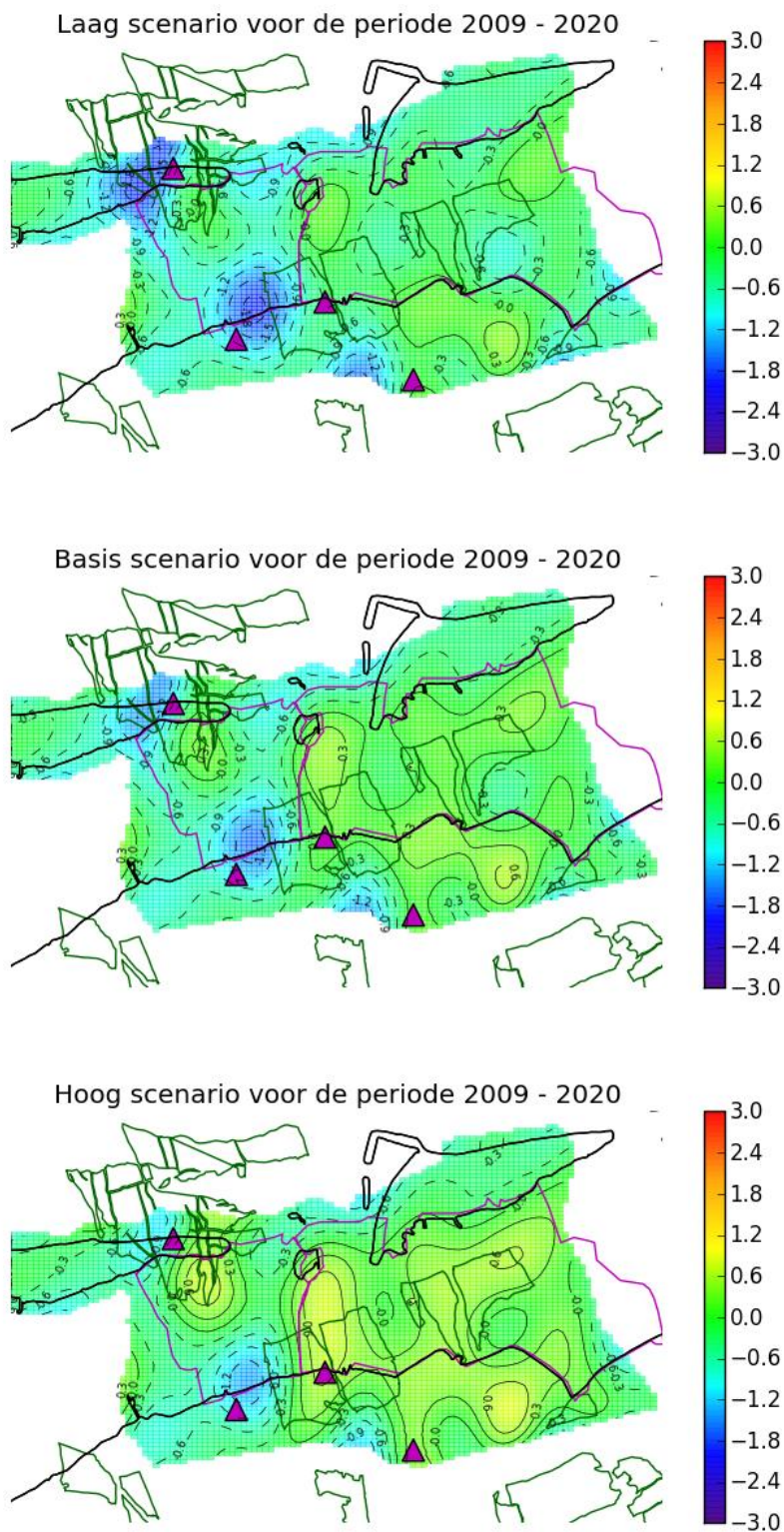


Figuur 2-6; Tornado charts die de invloed van de parameterwaarden toont op de bodemdaling in 4 locaties (zie Figuur 2-5 voor de locatie van de punten). Voor elke locatie is separaat een Tornado-chart gemaakt voor elk van de vier kalibratiegebieden. De naamgeving boven de charts laten het effect zien van het betreffende kalibratiegebied op het punt. De bodemdaling is berekend van start winning tot 2020. De lichtgroene lijn laat de bodemdaling volgens het basisscenario zien.

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

Het vergelijkt met de metingen is in deze rapportage ook gevisualiseerd met behulp van een geodetisch model (paragraaf 2.1) berekend uit waterpas en GNSS metingen, 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 2-7.

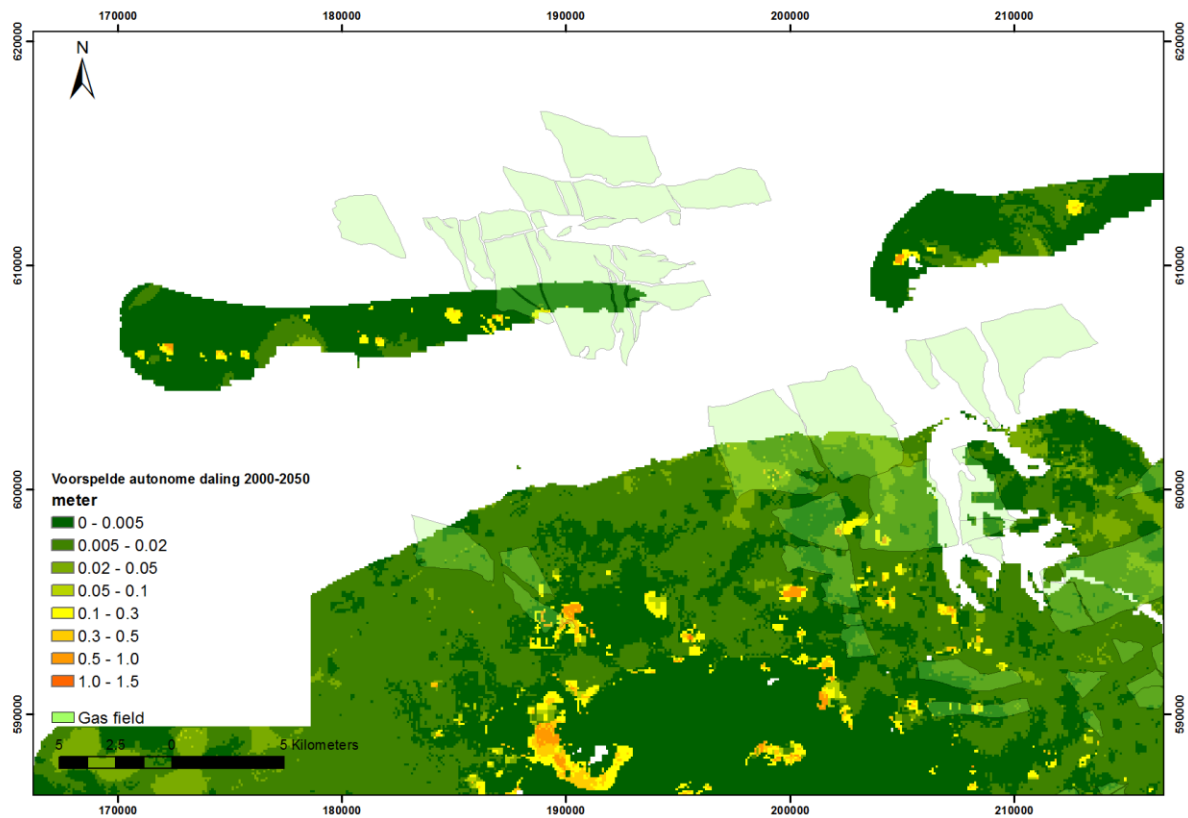
Uit de vergelijking blijkt dat het basisscenario goed past met het geodetische model voor de periode 2009-2020. Voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag geeft het bodemdalingsmodel iets meer daling dan het geodetisch model (enkele mm's over een periode van 11 jaar). De variatie in verschillen in het Pinkegat kombergingsgebied zijn iets groter, maximaal ongeveer 1 cm in 11 jaar (i.e. minder dan 1 mm per jaar). Er zijn zowel gebieden waar de bodemdaling licht wordt overschat en gebieden waar de bodemdaling licht wordt onderschat.



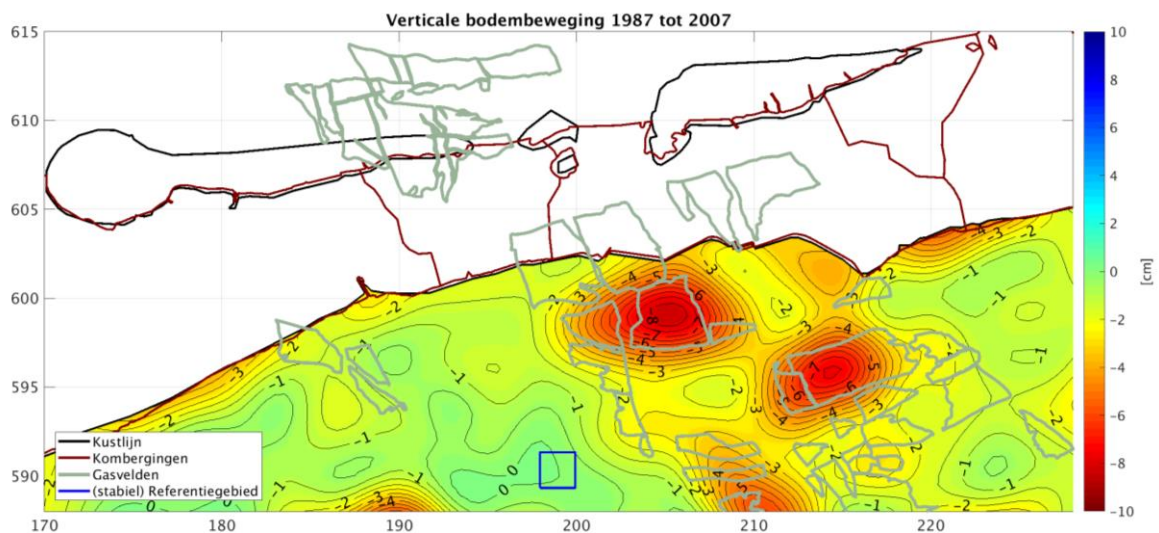
Figuur 2-7; Verschil (in cm) tussen de gemodelleerde bodemdaling volgens het laag (bovenste figuur), basis (middelste figuur), hoog scenario (onderste figuur) en het geodetische model voor de periode 2009-2020. In de blauwe gebieden, met negatieve afwijkingen, is de gemeten bodemdaling groter dan de gemodelleerde. In de gele gebieden, met positieve afwijkingen, is meer bodemdaling gemodelleerd dan gemeten. De driehoeken geven de locaties van de continue GNSS-stations aan.

Verschillen tussen de gemeten en gemodelleerde daling zijn vooral te zien boven het Ameland eiland en ter hoogte van 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 (voornamelijk boven de top van de Pleistocene laag; voor autonome diepe bodemdaling zie paragraaf 2.3.3.1). 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 2-8 toont een voorspelling voor de autonome daling in het betreffende gebied voor de periode 2000-2050 (Referentie 15 en Referentie 16). De voorspelling geeft een eerste orde schatting van de autonome daling wanneer het grondwaterpeil meebeweegt met de bodemdaling in deze periode. Voor het Waddenzeegebied zijn deze berekeningen niet uitgevoerd. Voor Ameland en Noord-Friesland kan worden geconcludeerd dat er lokaal significante autonome bodemdaling voorkomt. Rond de Waddenvoorkomens loopt dit op tot 5 cm over een periode van 50 jaar, wat neerkomt op gemiddeld 1 mm per jaar. Deze mogelijke autonome bodemdaling wordt niet verdisconteerd in de metingen waaraan de huidige geomechanische modellen (voor de diepe ondergrond) worden gekalibreerd. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat de geodetische meetpunten in het algemeen goed gefundeerde objecten betreffen, terwijl Figuur 2-8 de maaiveldaling toont.
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 2-9 toont een geodetisch model voor de periode van voor de gaswinning. Duidelijk waarneembaar zijn de gebieden met relatief veel daling bij de zeedijk van 2 cm in een periode van 20 jaar (gemiddeld 1 mm per jaar), ook in de gebieden waar geen gaswinning plaatsvond in deze tijdsperiode.



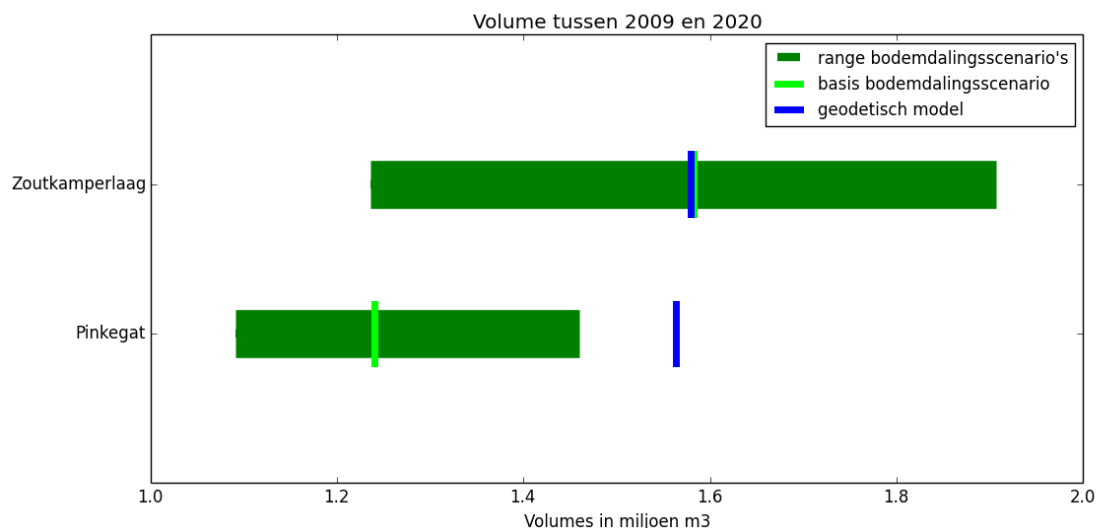
Figuur 2-8; Maaiveld daling (m) over een periode van 50 jaar bij handhaving van huidige drooglegging bij huidige klimaat. De waarden op deze kaart geven een eerste orde schatting van de mogelijke autonome daling. N.B., de kaart heeft een witte ondergrond voor het Waddenzeegebied, omdat voor dit gebied geen modeluitkomsten zijn gegenereerd.



Figuur 2-9; Geodetisch model voor de metingen tussen 1987 en 2007 (in cm), waarbij aangetoond wordt dat er relatief veel bodemdaling plaatsvond onder de zeedijk, ook in de gebieden waar geen gaswinning plaatsvond.

Met het geodetisch model is ook het bodemdalingsvolume berekend voor de periode tussen 1/1/2009 en 1/1/2020. Dit volume is vergeleken met de uitkomsten voor het lage, basis en hoge bodemdalingsscenario (Figuur 2-10).

De gemodelleerde bodemdalingsvolumes voor Zoutkamperlaag zit binnen de range en wordt minder overschat dan in de M&R 2019. De volumes volgens het laag-, basis- en hoog scenario in Pinkegat zijn allen lager dan het geodetisch berekende volume. Dit verschil wordt met name veroorzaakt door de daling ten westen van Nes volgens het geodetische model. Mogelijke verklaringen voor dit verschil zijn gegeven in de vorige paragraaf.



Figuur 2-10; Vergelijking van de bandbreedte aan bodemdalingsvolumes volgens de geomechanische modellen (groene balk) met het volume volgens het geodetisch model voor de periode 2009-2020 (blauwe streep in groene balk).

Bodemdalingsmodellen voor Ameland (inclusief LTS-II)

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

1. De C_m waarde is in het begin van de productie (tot 2003) onderschat. Deze onderschatting was met name ingegeven door de kernmetingen die 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 bodemdalingssom juist erop wees dat de mobiliteit van de aquifer en daarmee gepaarde drukdaling waarschijnlijk gering was.

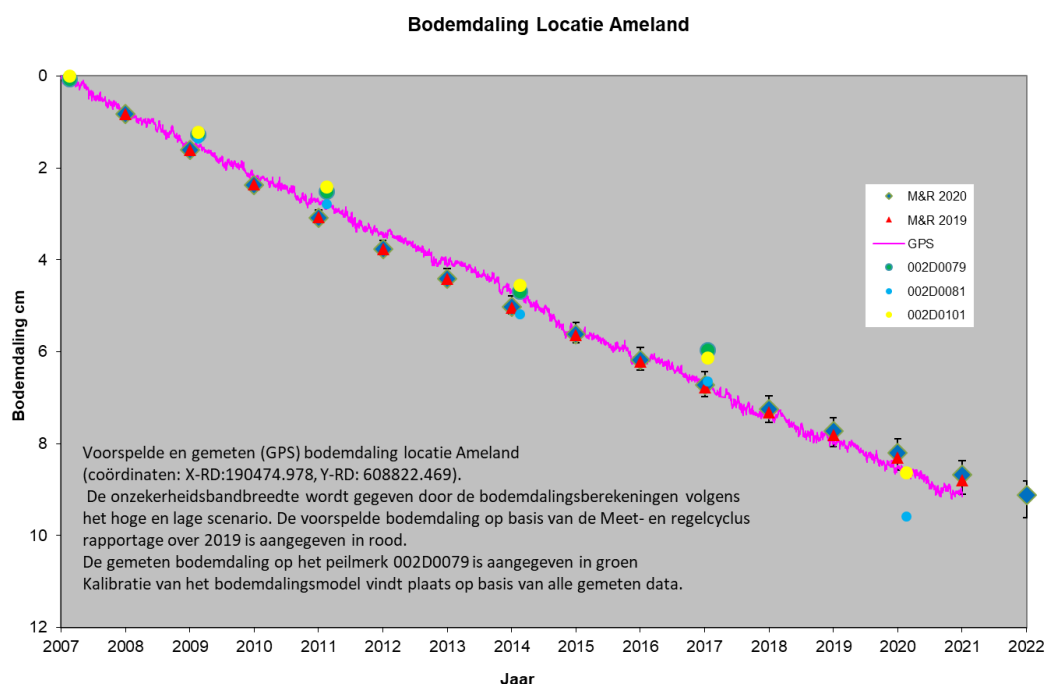
De metingen na 2011 laten echter bodemdaling ten zuidwesten en zuidoosten van het gasveld zien, waarvoor de meest waarschijnlijke verklaring beperkte drukdaling in de aquifer onder deze meetpunten is.

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

In de M&R-cyclus over de rapportagejaren sinds 2018 is meer gewicht toegekend aan de GNSS-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.

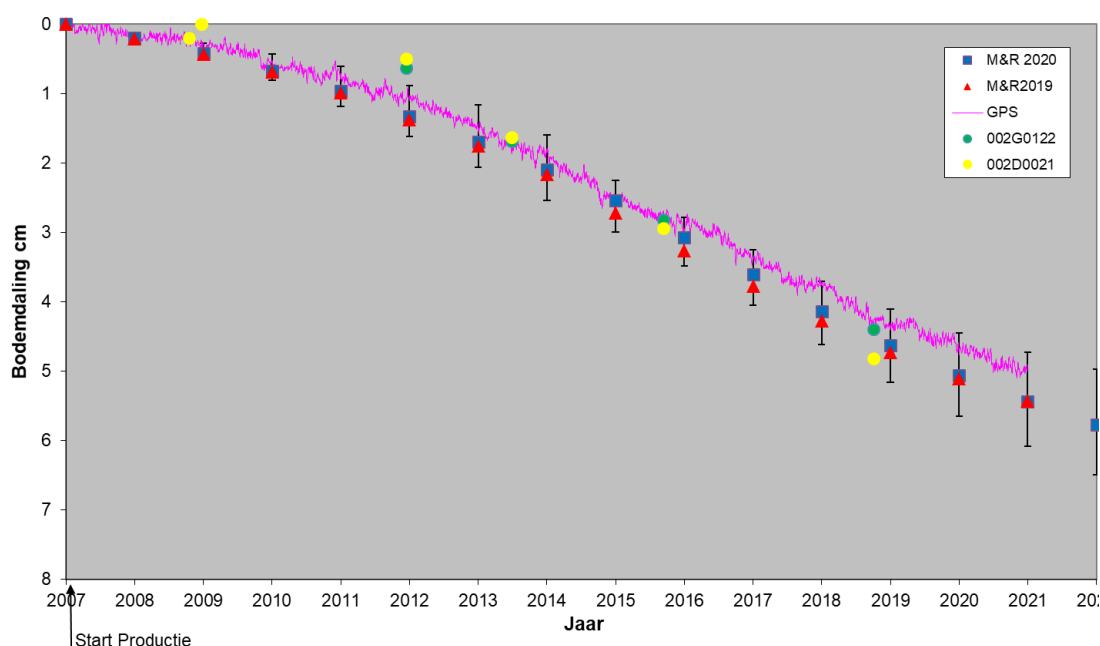
2.3.3.7 Bodemdaling GNSS-locaties

Figuur 2-11 tot en met Figuur 2-15 tonen de gemodelleerde en gemeten daling van 2007 tot en met 2020 op de continue GNSS-locaties. Volgens het M&R-protocol (Referentie 3) dient de continue GNSS-meting als signaal om een nieuwe vlakdekkende meting uit te voeren als de GNSS-meting een significant hogere bodemdaling aangeeft dan de gekalibreerde gemodelleerde daling. Uit de vergelijkingen wordt geconcludeerd dat dit niet het geval is. Figuur 2-11 toont naast de gemeten daling volgens de GNSS-tijdserie ook de tijdserie van enkele waterpaspeilmerken. Hierbij moet opgemerkt worden dat peilmerk 002D0079 in 2019 is afgebroken. Deze is in 2019 vervangen door een nieuw diepgefundeerd peilmerk, 002D0081, nabij deze locatie en is in 2020 voor het eerst aangemeten.



Figuur 2-11; Voorspelde en gemeten (GNSS) bodemdaling locatie Ameland (coördinaten: X-RD:190474.978, Y-RD: 608822.469). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingsberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2019 is aangegeven in rood. In groen en geel is de gemeten bodemdaling op de peilmerken 002D0079 en 002D0081 middels waterpassing aangegeven.

Bodemdaling op GPS station Moddergat

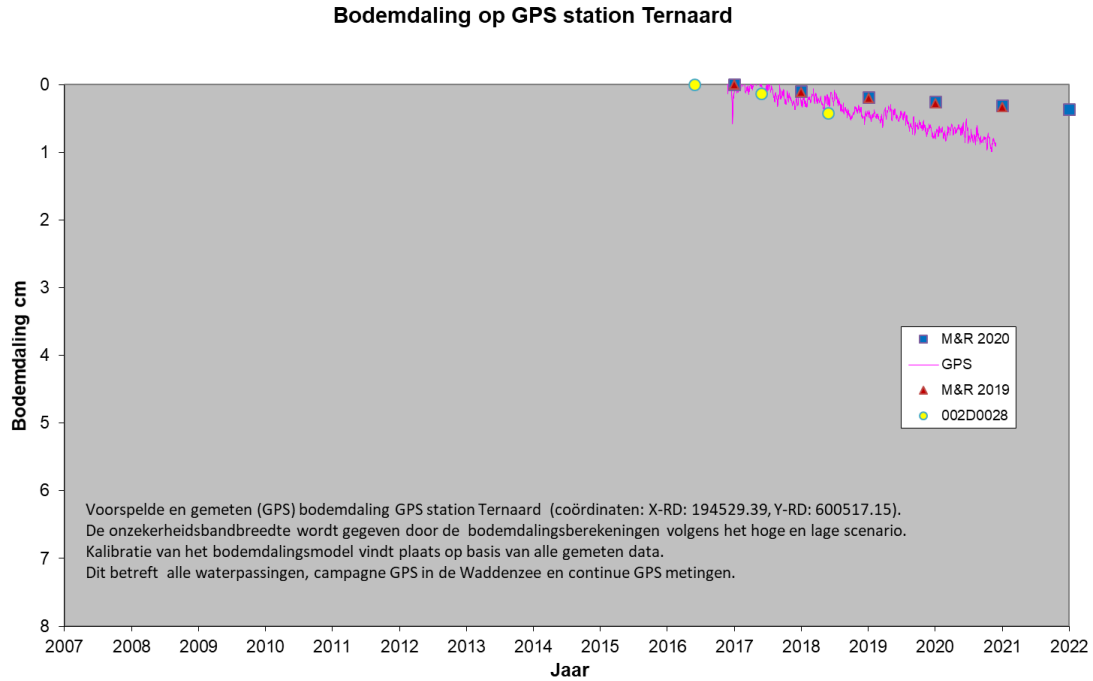


Figuur 2-12; Voorspelde en gemeten (GNSS) bodemdaling op de GNSS-locatie Moddergat (coördinaten: X-RD: 200244.559, Y-RD: 602329.794). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2019 is aangegeven in rood. In groen en geel is de gemeten bodemdaling op peilmerk 002G0122 en 002D0021 (dicht bij het GNSS-punt) middels waterpassing aangegeven.

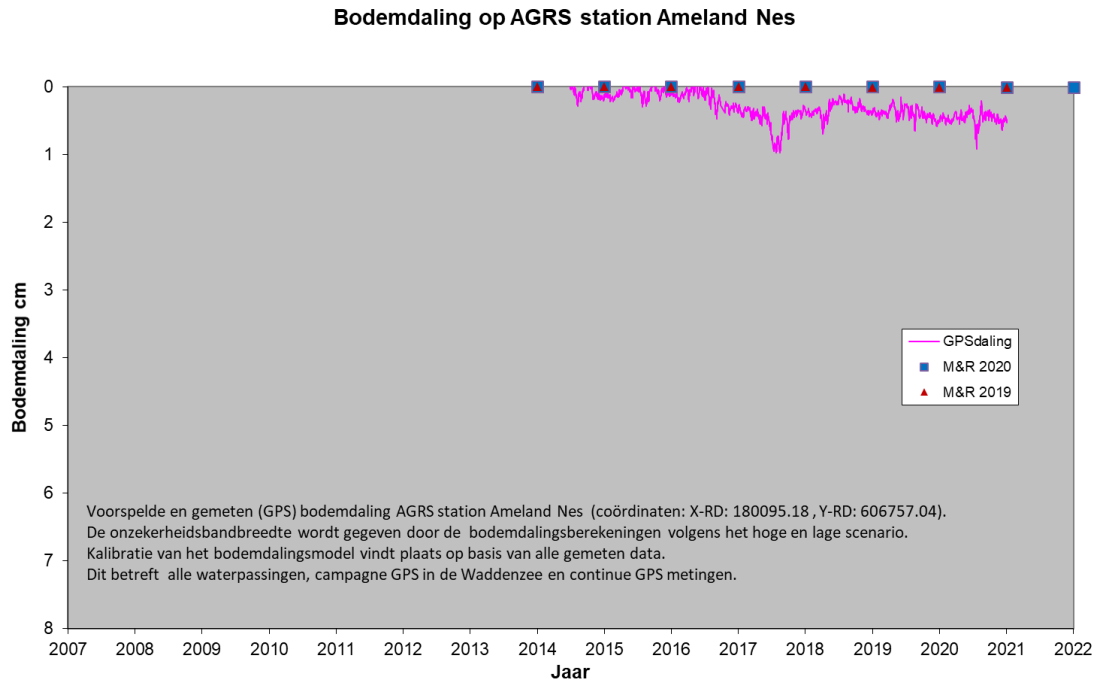
Bodemdaling op Locatie Anjum



Figuur 2-13; Voorspelde en gemeten bodemdaling (GNSS) op de GNSS-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 2019 is aangegeven in rood. In oranje en geel is de gemeten bodemdaling op peilmerk 006G0216 en 006G0218 (dicht bij het GNSS-punt) middels waterpassing aangegeven.



Figuur 2-14; Voorspelde en gemeten bodemdaling (GNSS) op de GNSS-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.



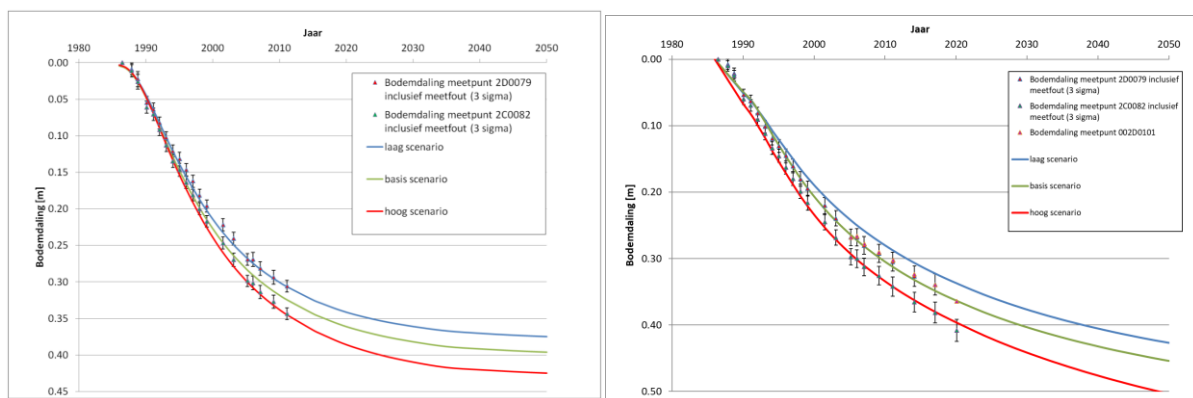
Figuur 2-15; Voorspelde en gemeten bodemdaling (GNSS) op het AGRS-station Ameland Nes (coördinaten: X-RD: 180095,18, Y-RD: 606757,04). Alle scenario's voor Ameland geven nauwelijks bodemdaling op dit punt waardoor de onzekerheidsbandbreedte zeer gering is. Hierdoor vallen de resultaten van de scenario's op elkaar.

2.3.3.8 Ameland bodemdaling

In het winningsplan Ameland (Referentie 27) 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 duidelijk dat de bodemdaling in het diepste punt hoger is dan verwacht 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 2020 model, zie Figuur 2-16. De onzekerheidsbandbreedte van de voorspelling in 2011 en nu is vergelijkbaar. Het huidige model verwacht echter in 2050 ongeveer 5 cm meer bodemdaling in het diepste punt van de kom, waarbij de bodemdaling na 2050 nog doorgaat.

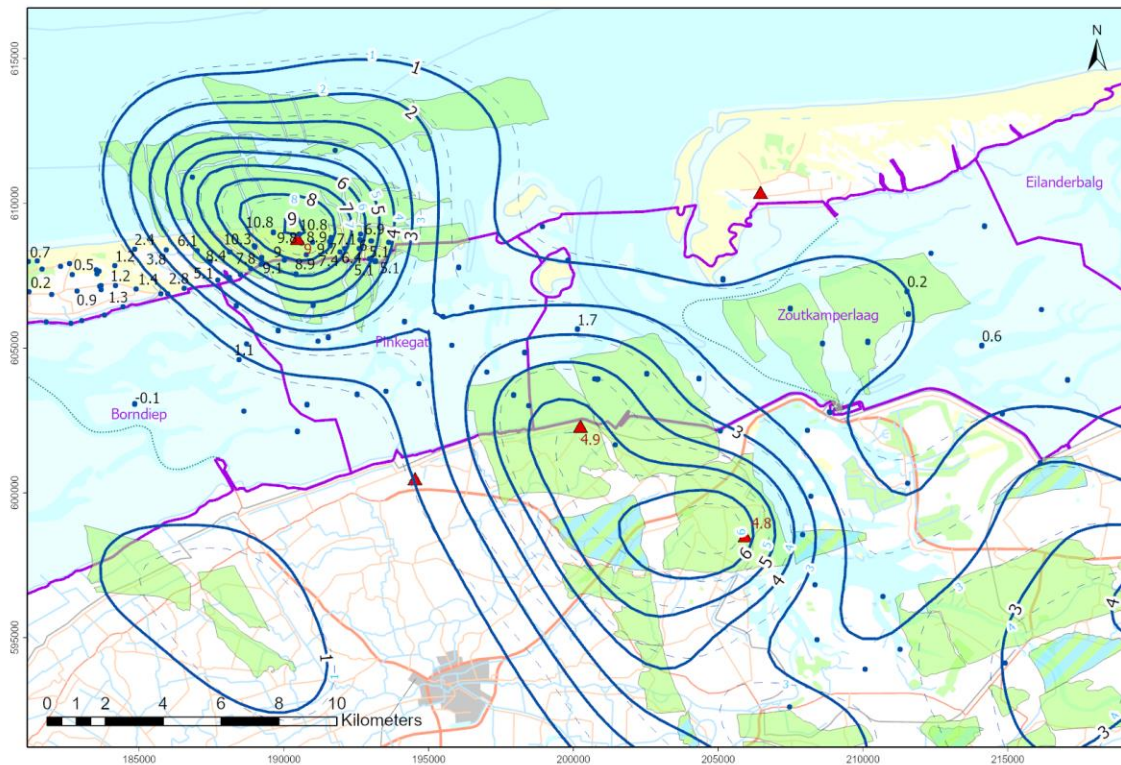


Figuur 2-16; Links; bodemdaling en metingen volgens het winningsplan Ameland uit 2011 (Referentie 27). Rechts; Maximale bodemdaling volgens het laag, basis en hoog scenario uit deze M&R rapportage in vergelijking met de meetpunten 2D0079 en 2C0082.

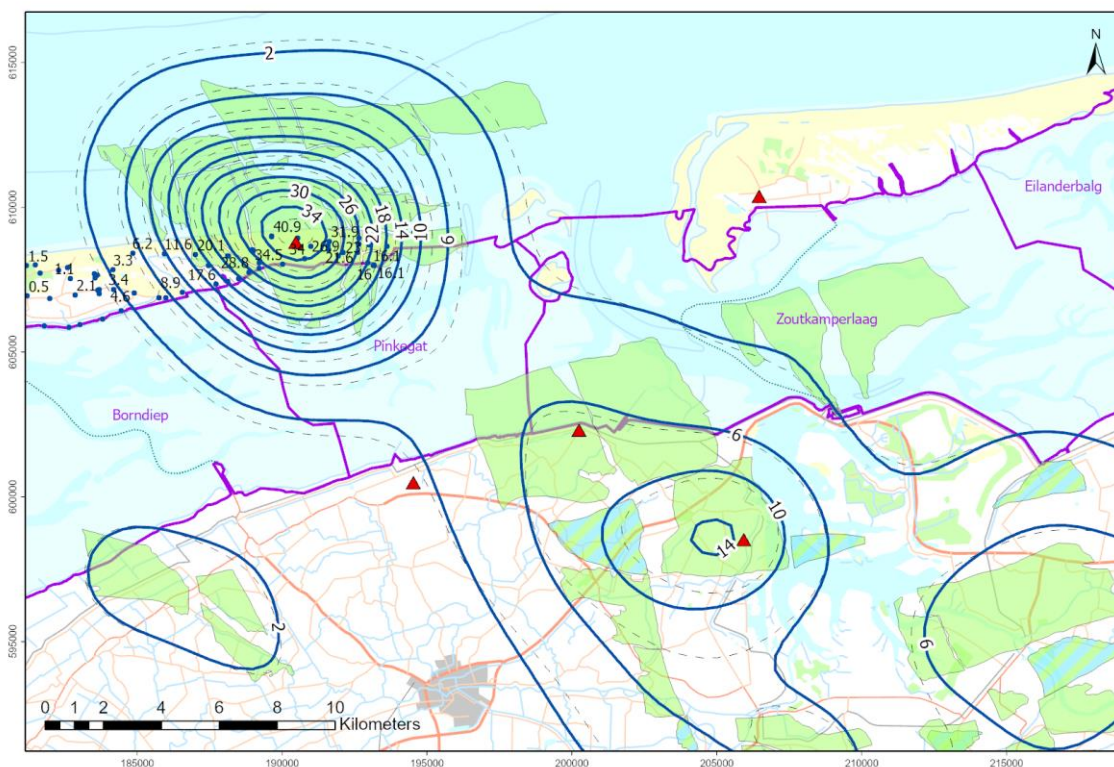
2.3.4 Vergelijking van gemodelleerde bodemdaling met resultaten van campagne GNSS

Naast een vergelijking in de vorige paragraaf van de resultaten van het geomechanisch model met het geodetisch model en de continue GNSS-metingen, wordt ook een vergelijking van het model (volgens het basisscenario) met de campagne GNSS-metingen getoond in Figuur 2-17. De modelcontouren (doorgetrokken blauwe lijnen) worden per jaar berekend op de eerste dag van elk jaar. De contouren zijn gepresenteerd voor 1-1-2020. 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 2019 (M&R 2019, Referentie 6).

In Figuur 2-18 is de gemodelleerde daling vanaf de start van winning tot en met 1 januari 2021 getoond. Deze bodemdaling is vergeleken met de waterpassing op Ameland gedaan in 2020.



Figuur 2-17; Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2020) 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 2019 weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2019. 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 2020. De rode waarden geven de daling aan van de permanente GNSS-stations in de periode feb. 2007- jan. 2021. Er is geen bodemdaling aangegeven voor het Ternaard GNSS-station omdat deze nog niet in bedrijf was in 2006.



Figuur 2-18; Totale bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2021) 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 1-1-2020 volgens de M&R-rapportage over 2019. Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 4 posities continue GNSS-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 Vergelijking tussen M&R 2019 en M&R 2020 bodemdalingsscenario's

Hieronder volgt een beschrijving van de belangrijkste overeenkomsten en veranderingen die aangebracht zijn in de huidige M&R 2020 rapportage en die een gevolg hebben op de resultaten voor de bodemdalingsberekeningen.

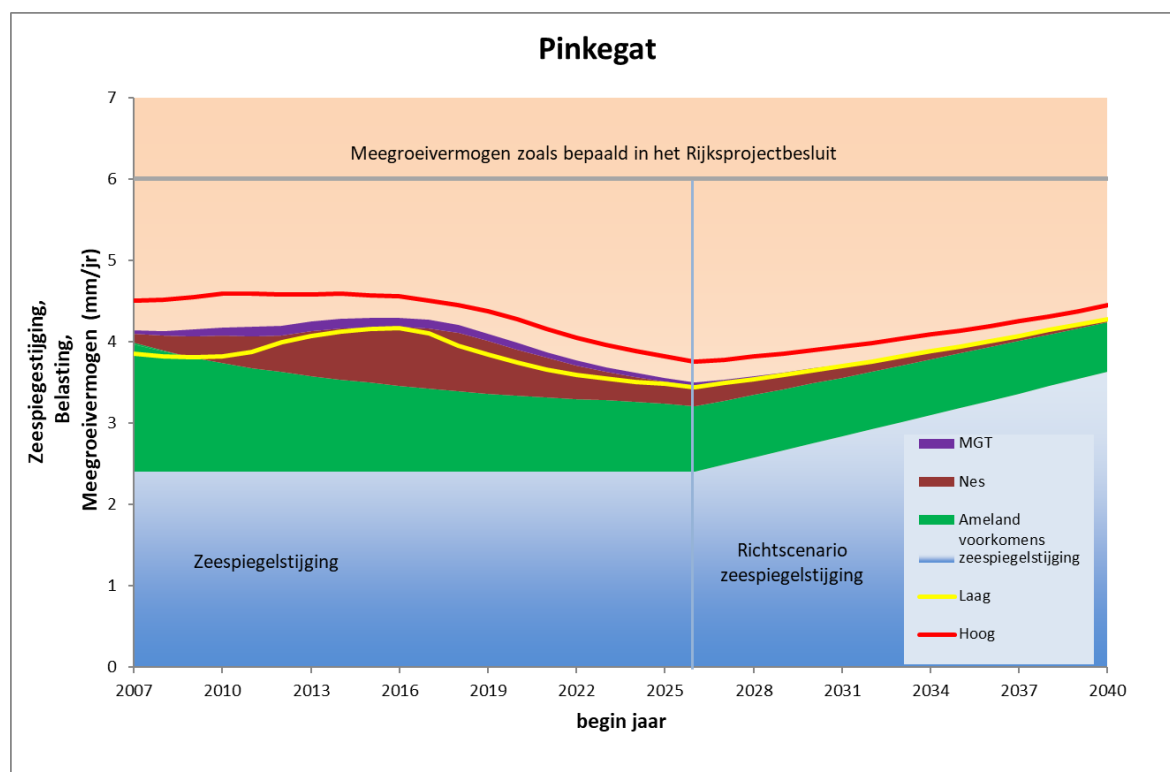
- Het bodemdalingsmodel is voor beide M&R-rapportages gelijk aan het LTS-II bodemdalingsmodel en er is extra aandacht besteed aan de covariantiematrix (zie paragraaf 2.3.3.3.1).
- De hoge, basis en lage bodemdalingsscenario's zijn gebaseerd op de basis reservoirrealisatie, met uitzondering van het lage 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 2020 cyclus liggen dichtbij de resultaten zoals gerapporteerd in de M&R 2019 rapportage. De gemodelleerde bodemdaling in Pinkegat is iets minder dan in 2019, maar past goed bij de meeste recente metingen.

2.4 Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4)

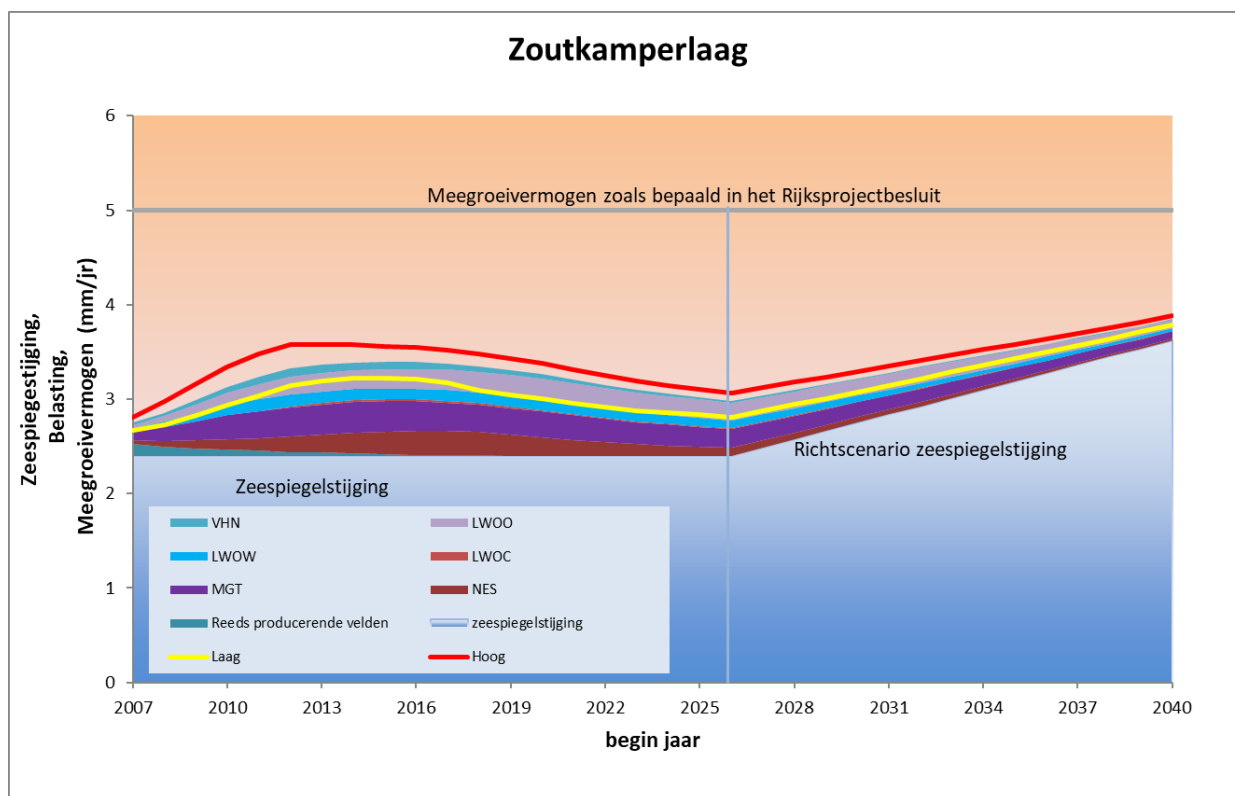
2.4.1 Bepaling volume en gemiddelde daling

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 het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) aan NAM zijn geleverd (Referentie 5). 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 bepaald, d.w.z. de bodemdalingssnelheid gemiddeld over zes jaar. 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 2-19 en Figuur 2-20. 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.



Figuur 2-19; Belasting in Pinkegat ten gevolge van gasproductie voor de verschillende scenario's. Het verwachtingsscenario is weergegeven als de bovengrens van de gekleurde vlakken die de bijdrage per voorkomen weergegeven. Het lage en hoge scenario zijn getoond als lijnen (geel: laag scenario, rood: hoog scenario).



Figuur 2-20; Belasting in Zoutkamperlaag ten gevolge van gasproductie voor de verschillende scenario's. Het verwachtingsscenario is weergegeven als de bovengrens van de gekleurde vlakken die de bijdrage per voorkomen weergegeven. Het lage en hoge scenario zijn getoond als lijnen (geel: laag scenario, rood: hoog scenario).

Voor de berekening van de verwachte bodemdaling in de toekomst en de bijbehorende volumes en bodemdalingssnelheden is uitgegaan van het basisscenario. Om de onzekerheid voor de volumes en bodemdalingssnelheden te bepalen voor de individuele voorkomens is gebruik gemaakt van het hoge en lage scenario (zie Tabel 2-11 t/m Tabel 2-14).

2.4.2 Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting

Tabel 2-11 en Tabel 2-12 tonen de door gaswinning veroorzaakte bodemdalingssnelheden met bijbehorende onzekerheid per voorkomen voor de jaren J-3 t/m J+2 waarbij J-1 het rapportagejaar (2020) is. Voor de volledigheid zijn ook de resultaten voor het jaar 2005 tot en met 2023 getoond.

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 2-11; 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	107 (93 - 128)		
2006	98 (85 - 118)		
2007	93 (81 - 112)	10 (5 - 13)	3 (3 - 8)
2008	88 (76 - 106)	15 (7 - 19)	3 (3 - 6)
2009	84 (73 - 102)	17 (8 - 22)	3 (3 - 8)
2010	79 (69 - 96)	24 (12 - 31)	3 (3 - 8)
2011	76 (67 - 93)	30 (15 - 39)	3 (3 - 8)
2012	73 (64 - 90)	28 (16 - 37)	3 (3 - 8)
2013	70 (62 - 87)	38 (30 - 38)	3 (3 - 8)
2014	67 (60 - 84)	38 (36 - 64)	3 (3 - 8)
2015	66 (58 - 82)	50 (43 - 52)	3 (3 - 6)
2016	63 (56 - 79)	52 (43 - 52)	3 (3 - 6)
2017	61 (55 - 77)	50 (42 - 53)	3 (3 - 6)
2018	58 (53 - 74)	45 (36 - 48)	3 (3 - 5)
2019	57 (52 - 72)	37 (28 - 40)	3 (3 - 5)
2020	56 (51 - 72)	29 (21 - 33)	3 (3 - 4)
2021	56 (50 - 71)	25 (18 - 29)	3 (3 - 4)
2022	54 (49 - 69)	22 (18 - 25)	3 (3 - 3)
2023	53 (49 - 68)	19 (18 - 22)	3 (3 - 3)

Tabel 2-12; Jaarlijks bodemdalingssnelheid (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	24 (17 - 25)						
2006	18 (14 - 19)						
2007	15 (12 - 16)	8 (4 - 11)	29 (16 - 38)				
2008	13 (11 - 14)	12 (6 - 16)	25 (15 - 33)		6 (4 - 10)	3 (2 - 5)	6 (4 - 9)
2009	10 (8 - 11)	14 (7 - 18)	35 (20 - 46)		22 (15 - 35)	24 (17 - 37)	11 (8 - 18)
2010	8 (6 - 9)	19 (9 - 25)	37 (23 - 48)		21 (13 - 29)	27 (20 - 42)	13 (9 - 21)
2011	7 (5 - 8)	24 (12 - 32)	52 (47 - 53)		22 (14 - 29)	29 (21 - 44)	14 (8 - 20)
2012	6 (4 - 7)	24 (13 - 31)	51 (51 - 51)	3 (2 - 4)	19 (12 - 24)	28 (20 - 43)	14 (8 - 19)
2013	4 (3 - 6)	31 (26 - 34)	53 (52 - 57)	3 (2 - 5)	17 (11 - 22)	29 (19 - 42)	13 (8 - 18)
2014	3 (2 - 4)	33 (31 - 54)	50 (47 - 55)	4 (2 - 5)	16 (10 - 21)	30 (19 - 42)	12 (7 - 17)
2015	2 (1 - 3)	42 (36 - 44)	44 (40 - 48)	3 (2 - 4)	14 (9 - 19)	30 (18 - 41)	11 (6 - 15)
2016	1 (1 - 3)	44 (36 - 44)	42 (37 - 46)	3 (2 - 3)	15 (10 - 20)	31 (18 - 41)	10 (6 - 14)
2017	0 (0 - 2)	42 (35 - 45)	43 (36 - 46)	3 (2 - 3)	17 (11 - 23)	34 (20 - 43)	9 (6 - 13)
2018	0 (0 - 1)	38 (30 - 40)	43 (34 - 45)	3 (2 - 3)	18 (11 - 23)	35 (20 - 43)	8 (5 - 12)
2019	1 (0 - 2)	31 (24 - 34)	42 (32 - 44)	2 (1 - 3)	18 (11 - 22)	35 (20 - 41)	6 (4 - 9)
2020	1 (0 - 2)	25 (18 - 28)	39 (29 - 40)	2 (1 - 2)	17 (10 - 21)	33 (19 - 38)	5 (3 - 8)
2021	1 (0 - 2)	22 (15 - 24)	38 (27 - 39)	2 (1 - 2)	16 (10 - 19)	32 (19 - 37)	5 (3 - 7)
2022	1 (0 - 2)	19 (14 - 21)	36 (26 - 38)	1 (1 - 2)	15 (9 - 18)	31 (18 - 36)	4 (3 - 6)
2023	1 (0 - 2)	17 (14 - 19)	33 (24 - 35)	1 (1 - 1)	14 (9 - 17)	30 (18 - 34)	4 (2 - 5)

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

Onderstaande Tabel 2-13 geeft de bodemdalingssnelheid *S* voor het rapportagejaar 2020 en belasting *B* op 1-1-2021. 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 2-19 en Figuur 2-20).

Tabel 2-13; Bodemdalingssnelheid (mm/jr) voor het rapportagejaar 2020 en belasting *B* (mm/jr) op 1-1-2021 met onzekerheid (bandbreedte) per kombergingsgebied.

Zoutkamperlaag		Pinkegat	
S (laag-hoog)	B (laag-hoog)	S (laag-hoog)	B (laag-hoog)
0,81 (0,55 - 0,91)	0,80 (0,56 - 0,91)	1,50 (1,26 - 1,80)	1,46 (1,26 - 1,76)

2.4.3 Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting

Tabel 2-14 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. Voor het nieuwe zeespiegelscenario geldt een onzekerheid van +/- 1,5 mm/jaar. Deze is niet verdisconteerd in de gebruiksruimte, omdat het protocol uitgaat van het verwachte zeespiegelscenario.

Tabel 2-14; Bodemdalingssnelheid, Belasting en Gebruiksruimte (mm/jr) met onzekerheid (bandbreedte) per kombergingsgebied per jaar.

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

2.5 Indien nodig aanpassen productie (stap 5)

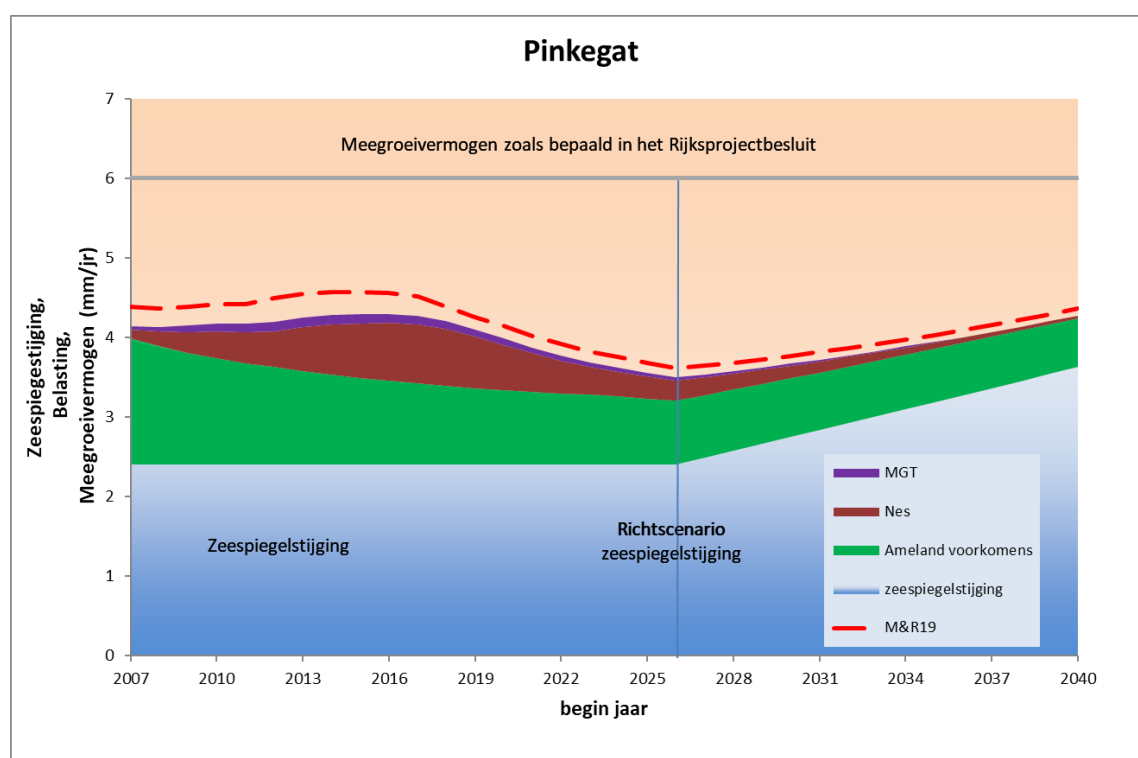
Uitgaande van het basisscenario en de verwachte productie volgen waarden voor de bodemdalingssnelheid S en de resulterende belasting B die niet leiden tot overschrijding van de gebruiksruijnte (zie Tabel 2-14). Dit geldt ook voor het hoge scenario. In ieder geval zal de gebruiksruijnte niet voor 1-1-2026 (de geldige periode voor het zeespiegelscenario) worden overschreden. Na deze tijd geldt het richtscenario van de zeespiegelstijging (Figuur 2-19 en Figuur 2-20).

2.6 Actualiseren (stap 6)

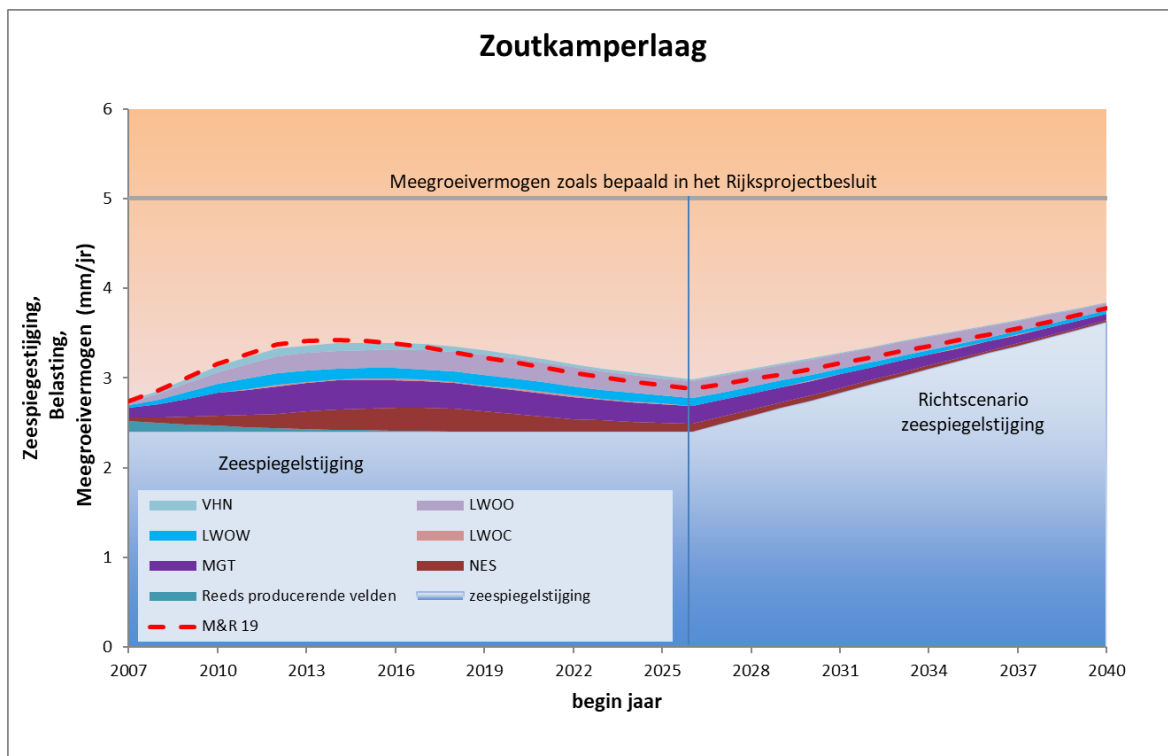
Figuur 2-21 en Figuur 2-22 tonen de geactualiseerde berekeningen van de belastingen voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag volgens het in Uit Vierhuizen-Oost kan sinds 2018 niet meer worden geproduceerd vanwege technische problemen met de put (zie Bijlage 5 voor meer informatie), vandaar dat de voorgenomen productie op 0 staat.

Tabel 2-6 getoonde productiescenario. In de figuren is tevens de belasting, zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclus rapportage over 2019 (gerapporteerd in 2020), weergegeven.

De berekende belasting in de kombergingen is vergelijkbaar met die berekend in de M&R-cyclus 2019: ongeveer 0,1 mm/jaar verschil voor Pinkegat en nog minder voor Zoutkamperlaag.



Figuur 2-21; Voorspelde belasting inclusief zeespiegelstijging voor het kombergingsgebied Pinkegat. De rood gestreepte lijn geeft berekende belasting aan zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclusrapportage over 2019.



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

2.7 Remwegscenario

Om het effect van de “hand aan de kraan” systematiek inzichtelijker te maken, is in de vorige rapportage een remwegscenario opgenomen. De nieuwe berekeningen in de 2020 rapportage tonen een vergelijkbaar bodemdalingsmodel en daarmee zullen de conclusies voor het remwegscenario onveranderd blijven.

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
Winningsplannen	https://eu001-sp.shell.com/:f:/r/sites/AAFAA0995/SharePoint%20NAM%20winningsplannen/01.%20Vigerende%20winningsplannen?csf=1&e=93TRCj
Meetplan	Sharepoint: Published Subsidence Documents / Survey / Plans
Productiedata en reservoirdrukdata	https://wrfmssw-europe.shell.com/App/Dream/Home.aspx
Meetregister	Sharepoint: Published Subsidence Documents / Survey / Registers

4 Conclusies

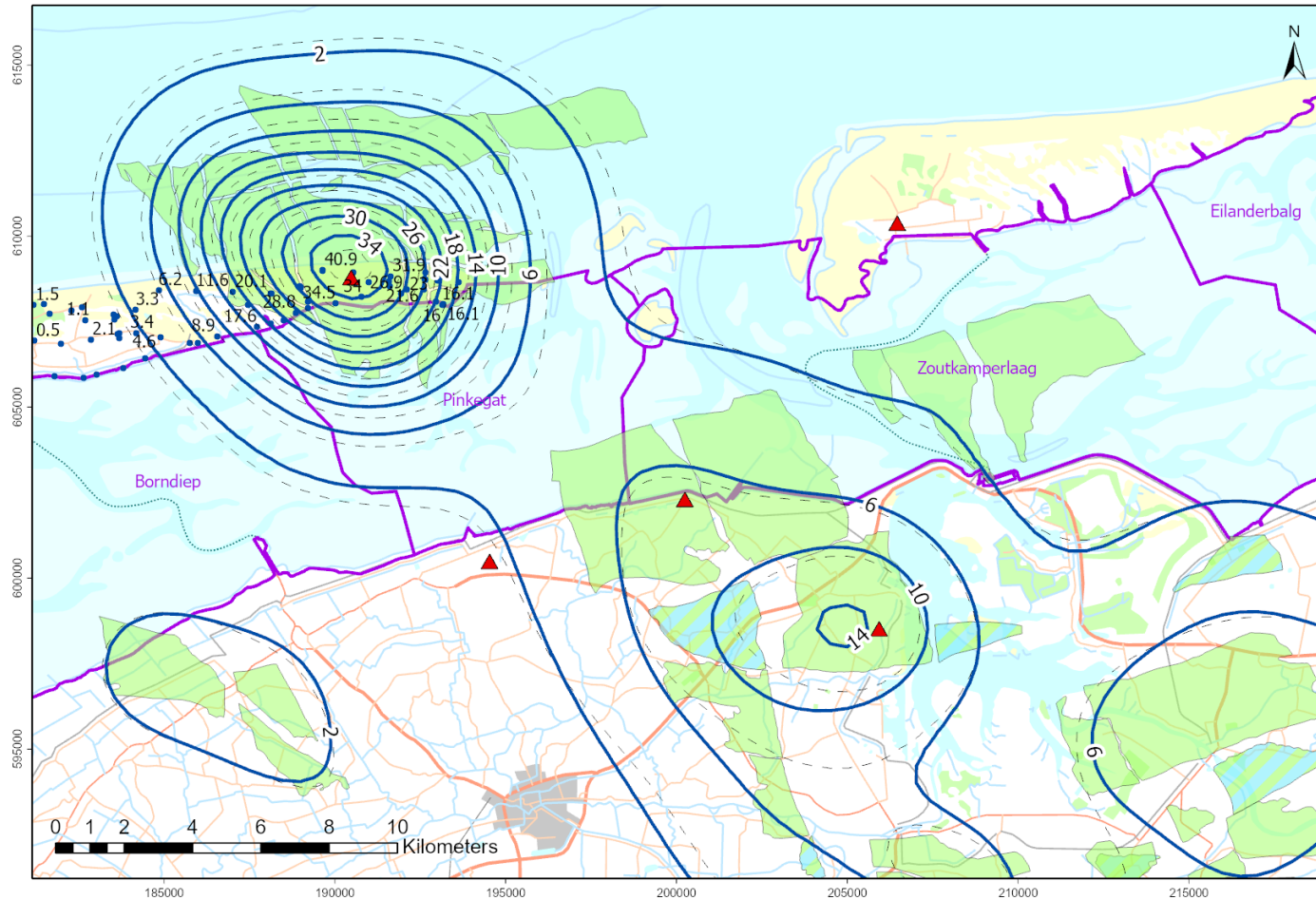
Op basis van de evaluatie gepresenteerd in dit rapport wordt geconcludeerd dat de belasting in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag vergelijkbaar is met de belasting volgens de M&R-cyclus 2019 voorspelling en wederom binnen de gebruiksruijnte blijft. Daarom worden er geen maatregelen genomen om de productie bij te stellen.

5 Referenties

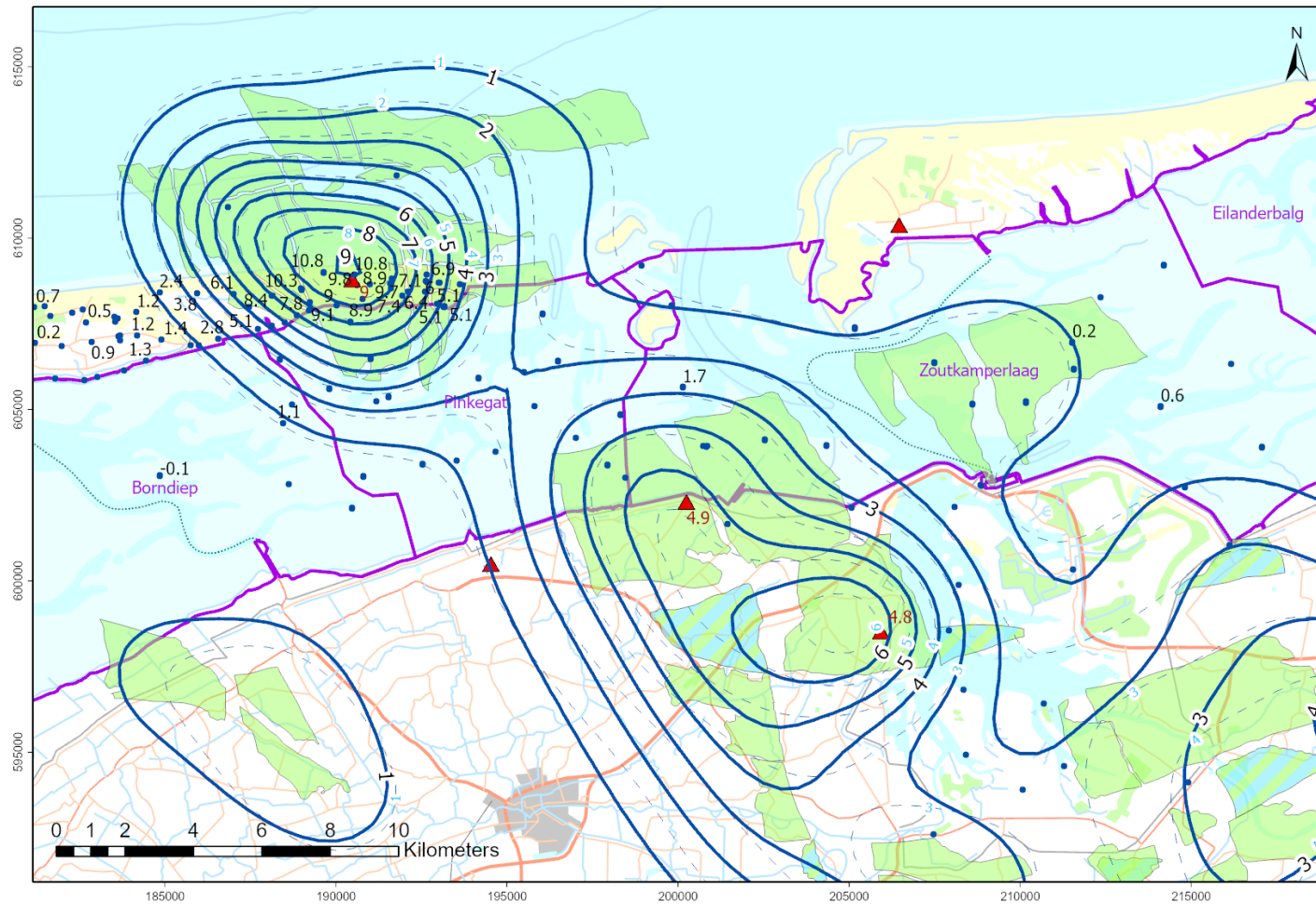
- Referentie 1 NAM (30/09/2011) Wijziging winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen.
- Referentie 2 Staatscourant (2013) Kennisgeving besluiten gaswinning Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, Ministerie van Economische Zaken.
<https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2013-7384.html?zoekcriteria=%3fzkt%3dEenvoudig%26pst%3d%26vrt%3dmoddergat%2binstemming%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 Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 – Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. Rapport RIKZ / 2004.025.
- Referentie 6 NAM (2020a) Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2019; Rapport EP202002200220, mei 2020.
<https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/wadden/nl/31f991f7-0bab-4dd7-9dca-00213c4214f7>
- Referentie 7 GPS Survey NAM Waddenzee v. 1.25. 06-GPS B.V., 01/2021.
- Referentie 8 Check reference station coordinates NAM v.1.12. 06 GPS B.V., 06/2020.
- Referentie 9 NLGEO2004: het geoidemodel voor Nederland. Data-ICT-Dienst, Rijkswaterstaat,
<http://www.rdnap.nl/algemeen/hoogte/geoide.html>.
- Referentie 10 NAM (2015) Wadden Sea Long term Subsidence Studies – Overview report. EP201506209625.
<https://nam-feitenencijfers.data-app.nl/download/rapport/2ca6c8d8-c0d4-4c10-8460-672f93b4cdaa?open=true>.
- Referentie 11 TNO (2013) A general framework for rate dependent compaction models for reservoir rock. TNO 2013 R11405.
- Referentie 12 Dynamic Reservoir Modelling of Wadden Fields for subsidence. Meet & Regel 2016. EP201703201178.
- Referentie 13 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 14 TNO (2011) Toetsing van de belasting op de gebruiksruimte in de kombergingsgebieden in Pinkegat en Zoutkamperlaag door bodemdaling ten gevolge van gaswinning onder de Waddenzee. TNO-060-ut-2011-02035c <http://nlog.nl/bodemdaling>.
- Referentie 15 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 16 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 17 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 18 NAM (2019) Controle van de reservoirmodellen met de nieuwe drukmetingen van 2018. EP201904223961.

- Referentie 19 Meetregister bij het meetplan Waddenzee, Rapportage van de GPS campagne Waddenzee/Lauwersmeer 2020, 11/2020. EP202010203462.
- Referentie 20 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 21 Subsurface Technical Report (2010): Static Reservoir Modelling of Ameland Fields for Subsidence Prediction.
- Referentie 22 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 23 Deltares (2010) Schade aan buisleiding door aardbeving. fase 1 inventarisatie.
<https://docplayer.nl/16931137-Schade-aan-buisleiding-door-aardbeving.html>.
- Referentie 24 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 25 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 26 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 27 NAM (2011) Winningsplan Ameland 2011 (WP 2011) Verzoek om instemming wijziging winningsplan. <https://www.nlog.nl/nlog/requestDocument?id=1363502161&type=fieldPubAsset>.
- Referentie 28 NAM (2019) Meetregister bij het meetplan Noord-Nederland, Groningen en Waddenzee 2018 – Addendum InSAR.
- Referentie 29 NAM (2020d) Meetregister bij het meetplan Waddenzee 2020; Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Ameland 2020. EP 202004300936.
- Referentie 30 Auditcommissie Waddenzee (2020) Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2019.
- Referentie 31 Leusink, J. (2003) Wat waterpasgegevens vertellen over geologische bodemdaling
- Referentie 32 NAM (2020) Evaluatie van de doorlatendheid van breuken van de Waddenzee velden en implicaties voor bodemdaling. EP202007201552.

6 Bijlage 1: Gemodelleerde en gemeten bodemdaling sinds 1986 en 2006

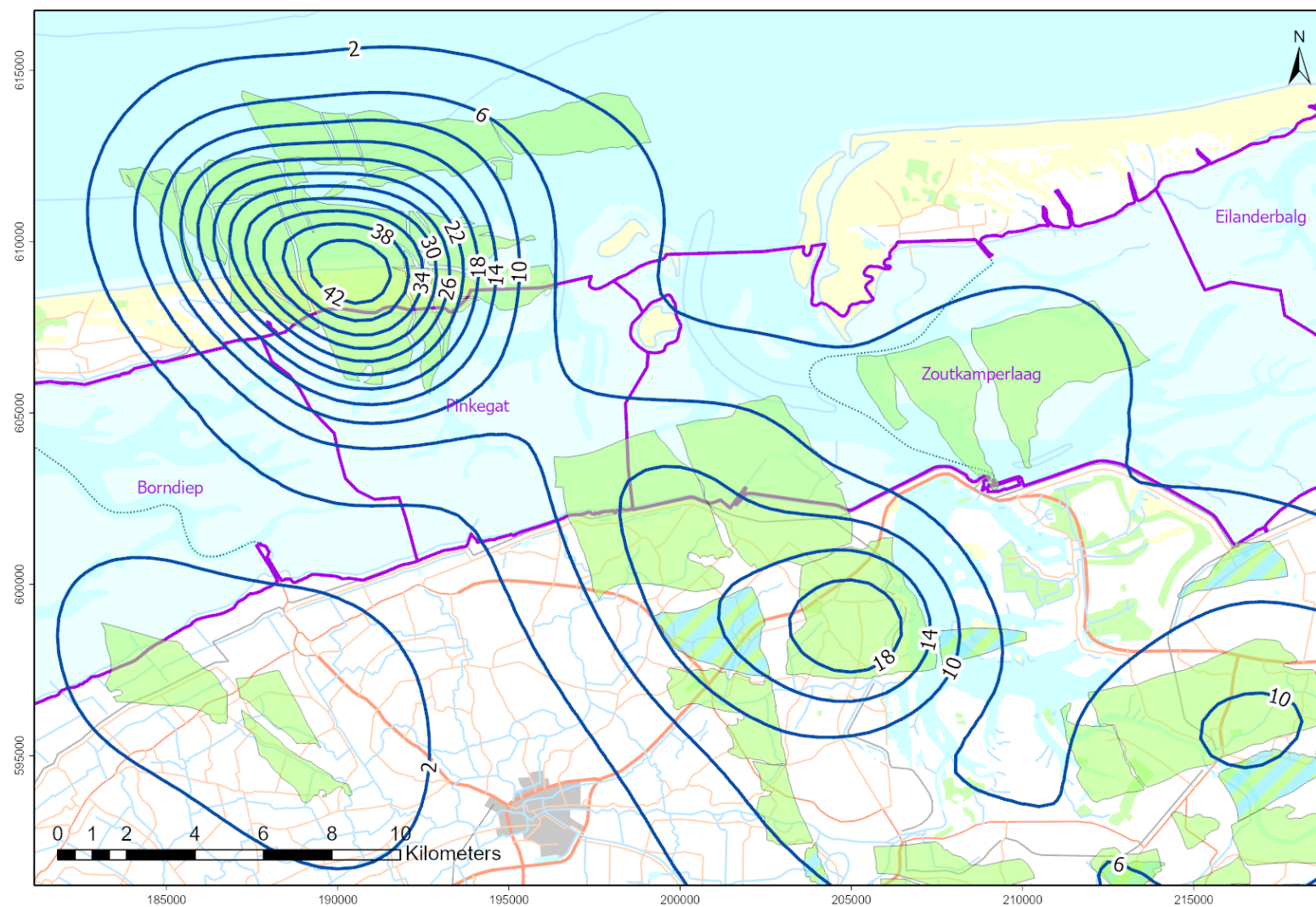


Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2021) door gaswinning sinds de start van productie in Ameland en Anjum (1986). In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling (gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2020 volgens de M&R-rapportage over 2018). Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 3 posities continue GNSS-metingen uitgevoerd sinds 2007 (rode driehoek).



Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2020) 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 2019 weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2019). 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 GNSS-stations in de periode feb. 2007- jan. 2021.

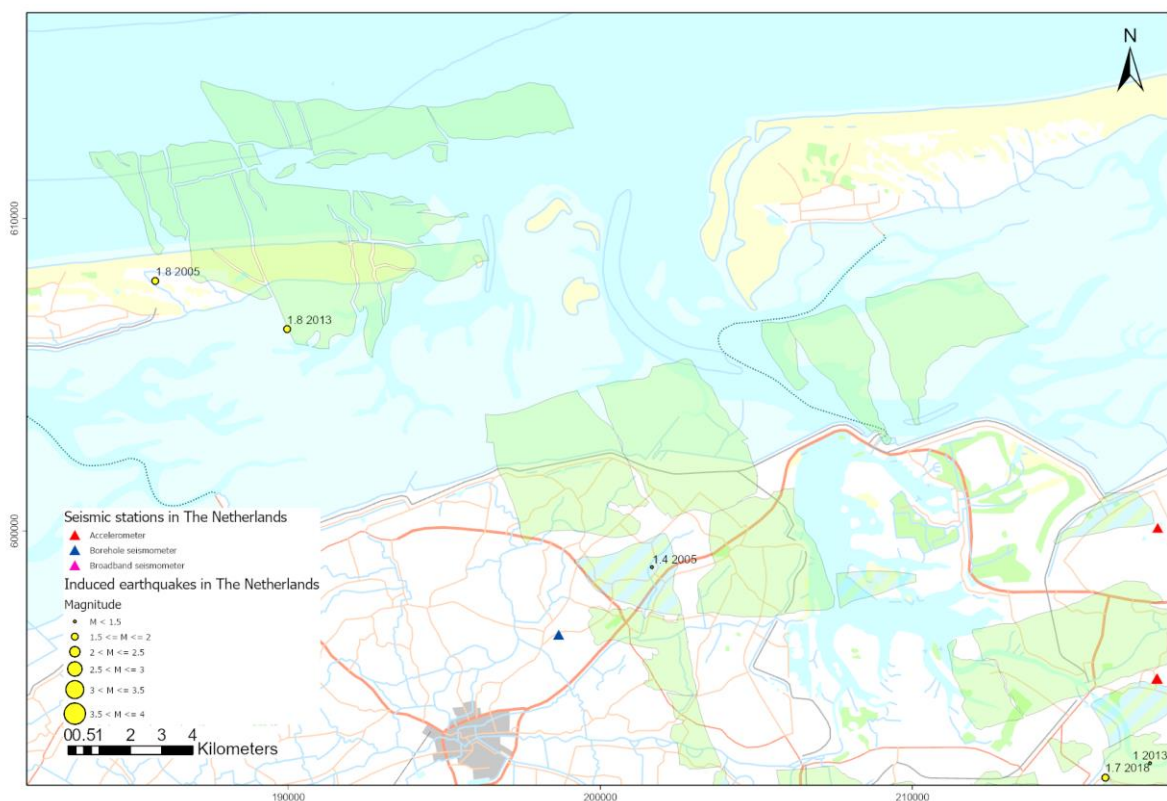
7 Bijlage 2: Verwachte bodemdaling in het jaar 2050



8 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. Deze bevingen zijn door niemand gevoeld en hebben een trillingssnelheid (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 8-1; Geregistreerde aardbevingen in het Waddengebied en omgeving voor de periode 1986 - januari 2021.

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 20) 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 tien kleine aardbevingen met een magnitude van $M=2$ er ongeveer één 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 (drie 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 22.

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 8-1).

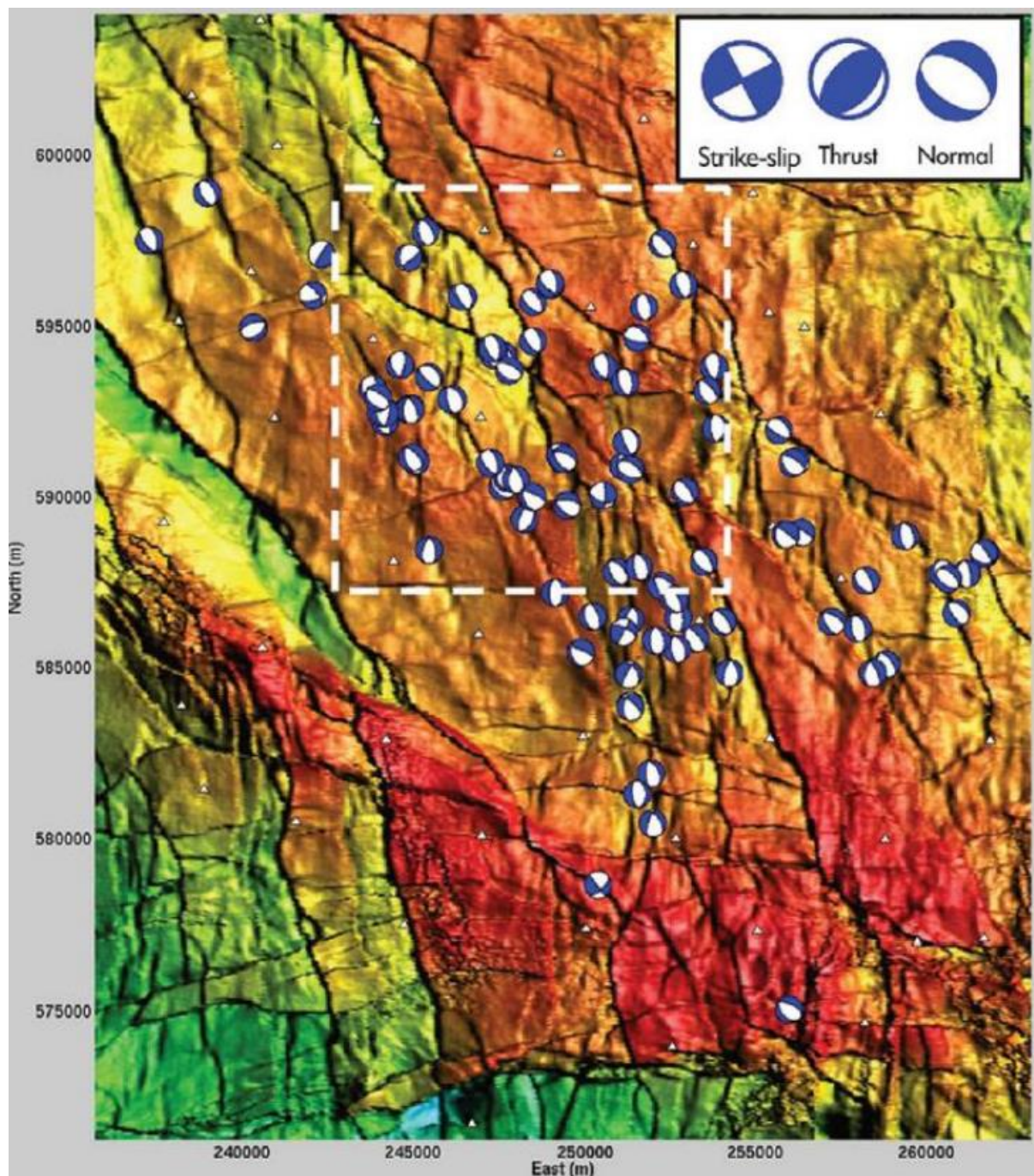
Tabel 8-1: Invoergegevens voor de bepaling van de M_{max} , en de M_{max} waarden volgens de twee methoden.

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 23) 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 24). 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

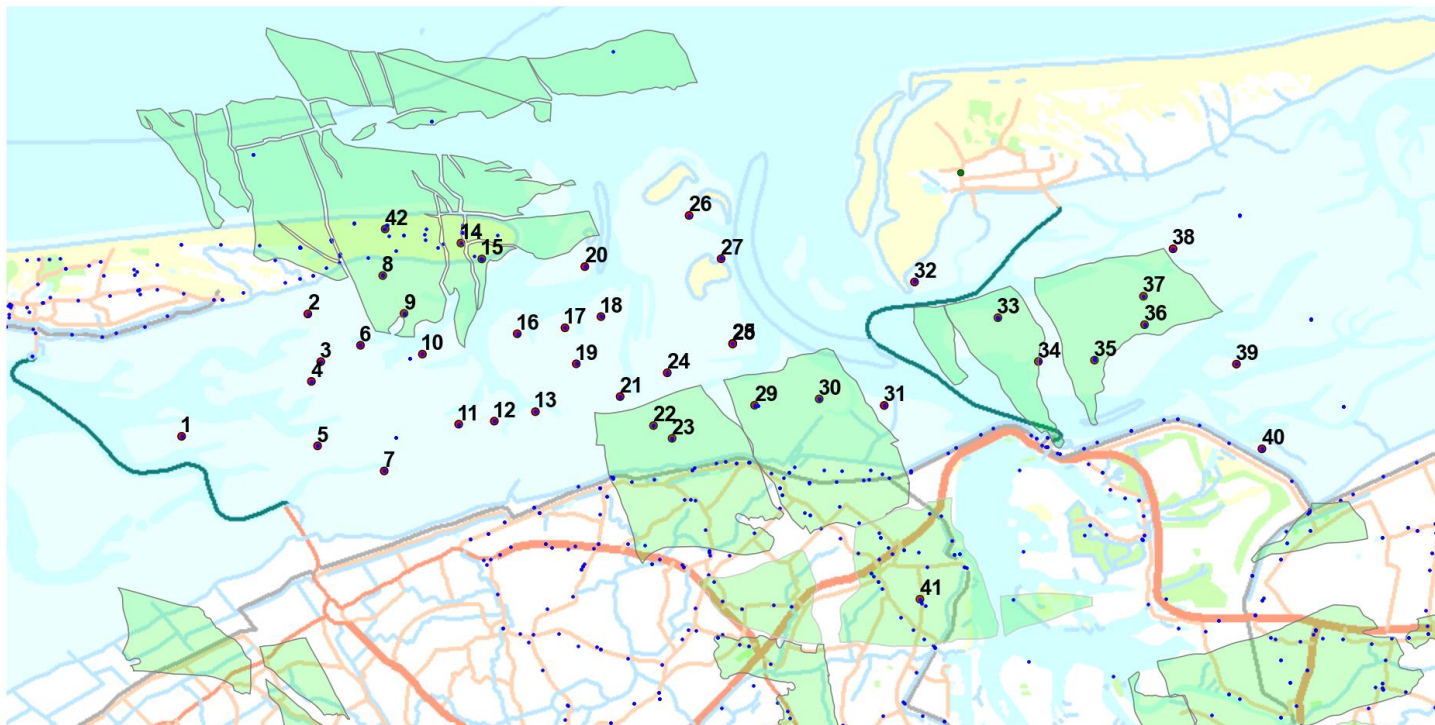
De commissie stelt tevens de vraag of mogelijke horizontale verschuivingen op de breuken een effect kunnen hebben op de maximale magnitude. Hierbij ging de commissie uit van de gedachte dat de huidige aardbevingen veroorzaakt zijn door compactie en daarmee verticale bewegingen. Allereerst moet worden 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 8-2, Referentie 25). 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 26). Over het algemeen wordt aangehouden dat $SH=1,05 \cdot Sh$. 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 $M=3,6$.

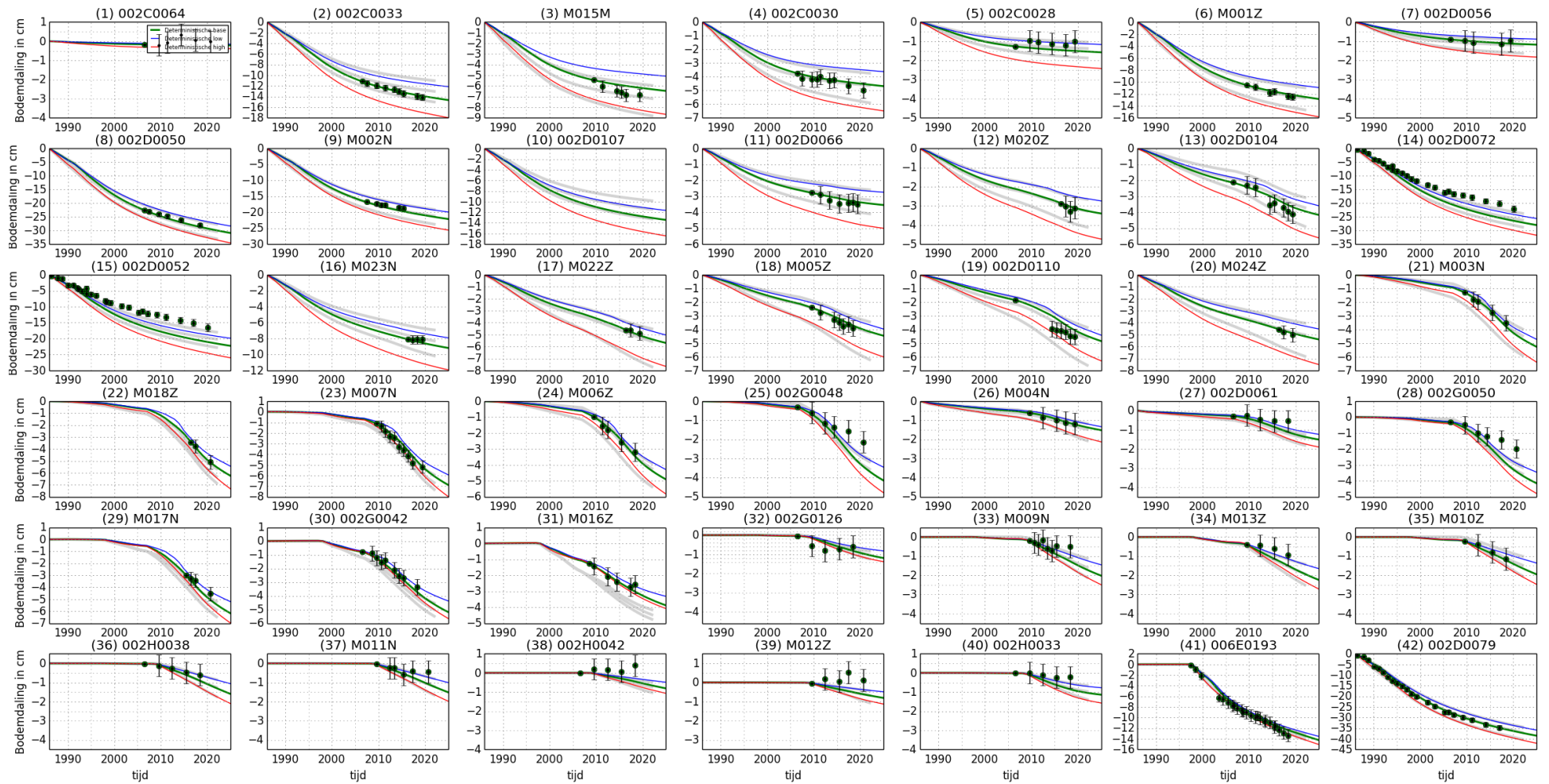


Figuur 8-2; Bron mechanismes van 100 aardbevingen in het Groningen veld tussen 2015 en 2017.

9 Bijlage 4: Tijdseries Waddenzee

In deze bijlage worden tijdseries 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 tijdseries. In deze tijdseries laten de grijze lijnen de statistische waarden zien (gewogen gemiddelde, P2,5, P97,5). 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).



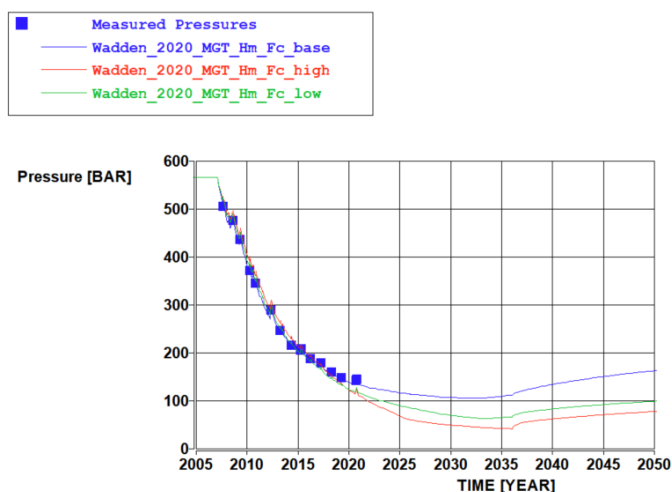


10 Bijlage 5: Controle reservoirmodellen met 2020 drukmetingen

In deze bijlage worden de drukmetingen tot en met 2020 vergeleken met de gesimuleerde drukken in elk van de modellen. Aangezien de waargenomen drukken uit 2020 in lijn waren met de modellen zoals gerapporteerd in de vorige rapportage, was het dit jaar niet nodig om de modellen aan te passen. Verdere details van de modelering zijn te vinden in Referentie 12 en Referentie 18.

10.1 Moddergat

Het gas uit het Moddergat veld wordt geproduceerd met put MGT-1B. De drukken gemeten in 2020 in deze put zijn in overeenstemming met de basis- of mid-realisatie (blauwe lijn in Figuur 10-1). De aquiferdruk daalt minder snel dan voorspeld door de hoge en lage realisatie met lagere gassaturatie in de aquifer, wat gunstig is voor bodemdaling. Indien volgend jaar wederom blijkt dat de gemeten drukken niet meer passen bij de lage en hoge realisaties, dan zullen deze aangepast worden, bijvoorbeeld door het verhogen van de gassaturatie in de aquifer.

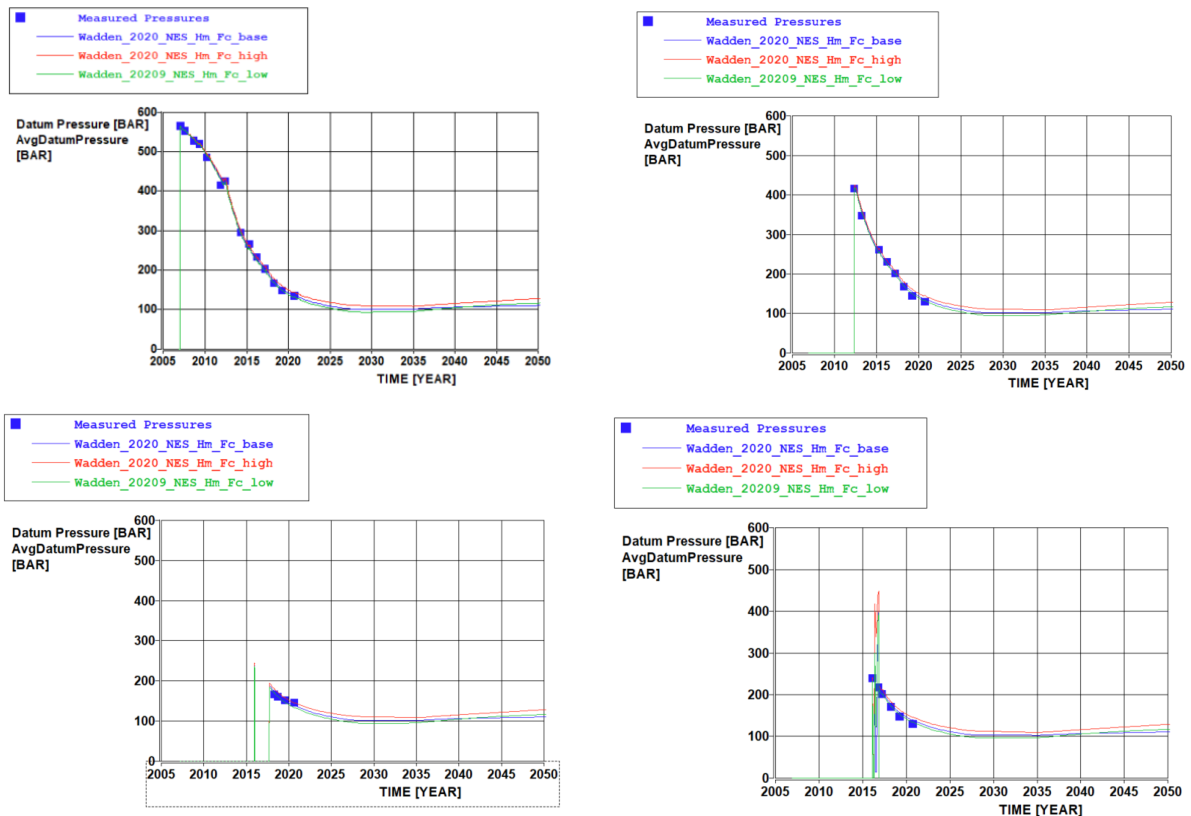


Creation date: Tue 05/01/2021 19:34 Runfile: Wadden_2020_MGT_Hm_Fc_base

Figuur 10-1: MGT-1B gemeten drukken (blauwe blokken) en hoog/mid/laag drukprognoses, waarbij voor hoog de realisatie met de gestreepte lijn is onderzocht voor bodemdalingsvoorspellingen.

10.2 Nes

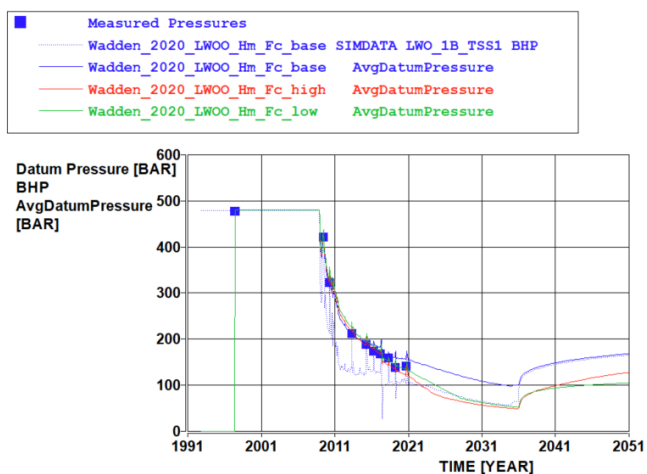
Er zijn vier putten die uit het Nes voorkomen produceren: MGT-2, MGT-3, MGT-4A en MGT-5. De laatste drukmetingen dateren uit september en oktober 2020. Net als in voorgaande jaren passen de nieuwe datapunten goed in de range van drukvoorspellingen. De put MGT-4 heeft afgelopen jaar niet geproduceerd en op dit moment is de verwachting dat die niet gerepareerd kan worden.



Figuur 10-2: 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).

10.3 Lauwersoog Oost

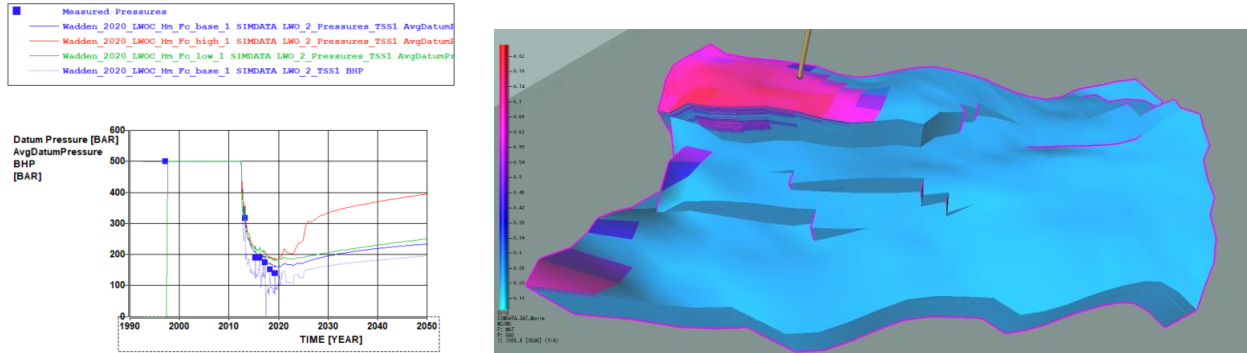
Het gas uit het Lauwersoog Oost veld wordt geproduceerd met put LWO-1B. Voor dit voorkomen is de druk die is gemeten in 2020 in overeenstemming met de modellen zoals gebruikt in voorgaande jaren. Er is dus geen noodzaak om de modellen te herkalibreren.



Figuur 10-3: LWO-1B hoog/mid/laag drukprognoses en gemeten drukken (blauwe blokken).

10.4 Lauwersoog Centraal

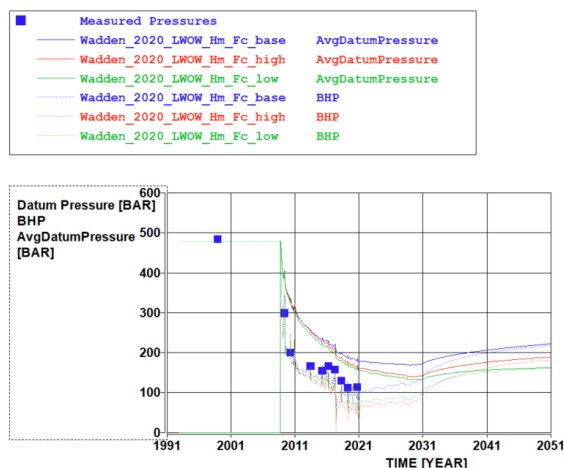
Het gas uit het Lauwersoog Centraal veld wordt geproduceerd met put LWO-2. Dit veld is het kleinste Waddenveld. Omdat er een obstructie in de put zit, de put frequent uit en aan moet worden gezet en vanwege de grote verschillen in permeabiliteit, worden de drukmetingen vergeleken met de bottom-hole drukken uit de modellen. Deze komen goed overeen met de gemodelleerde drukken. In de tweede helft van 2020 is deze put gestopt met produceren en het was niet meer mogelijk om een drukmeting te doen. De verwachting is dat in de loop van 2021 productie herstart kan worden en het ook weer mogelijk is om drukmetingen te doen.



Figuur 10-4: 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 gestreepte lijnen geven de drukken weer onderin de put (bottom-hole drukken). De metingen zijn weergegeven met de blauwe diamantvormen. De rechterfiguur toont het reservoir gevuld met gas (magenta) en water (blauw).

10.5 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 2020 in overeenstemming met de modellen zoals gebruikt in voorgaande jaren. Er is geen noodzaak om de modellen te herkalibreren.

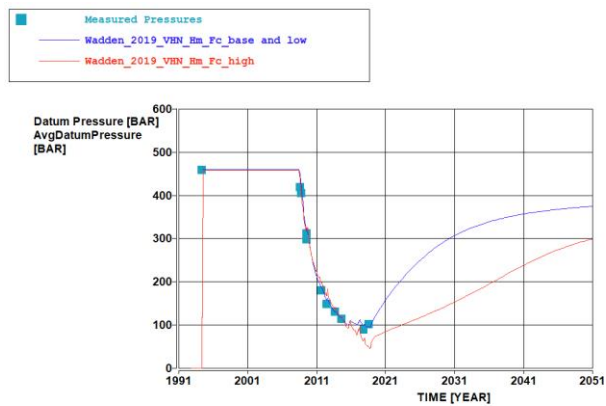


Figuur 10-5: LWO-3: de drukprognoses (laag, mid en hoog) zijn weergegeven met de continue lijnen, terwijl de 'bottom-hole' druk met gestippelde lijnen zijn weergegeven. De metingen zijn weergegeven met de blauwe blokken.

10.6 Vierhuizen Oost

Uit dit voorkomen wordt sinds november 2018 niet meer geproduceerd doordat de put integriteitsproblemen geeft. De laatste drukmeting laat zien dat de druk rondom de put groter

wordt, doordat de druk in het reservoir in evenwicht komt. De gemeten drukken zijn in overeenstemming met de modellen. Er is geen noodzaak om de modellen te herkalibreren. Voor de drukprognose wordt voor deze rapportage 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 10-6: 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.