

Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen

Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2021

NAM B.V

EP Document Number:	EP202203203063	Owner:	NAM-UPC/T
Document Date:	1/5/2022	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

Waddenvoorkomens en het meet- en regelprotocol

Op 5 februari 2007 is de gaswinning vanaf de locatie Moddergat uit de voorkomens Nes en Moddergat gestart. In 2008 zijn de voorkomens Vierhuizen-Oost, Lauwersoog-Oost en Lauwersoog-West in productie genomen. Tenslotte is het voorkomen Lauwersoog-Centraal in juni 2012 in productie genomen. Samen vormen deze voorkomens de “waddenvoorkomens”, ook wel “waddenvelden” genoemd.

Als onderdeel van de voorschriften behorende bij het winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (MLV) is een Meet- en regelprotocol opgesteld (Referentie 3 en Referentie 4). Volgens dit protocol dient er jaarlijks een rapportage over de bodemdaling in de Waddenzee te worden overlegd aan het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. De rapportage die voorligt beschrijft de metingen die zijn uitgevoerd tot en met 2021 en de actualisatie van de modellen op basis van deze metingen.

Resultaat

Op basis van de evaluatie van de metingen en modellen zoals gepresenteerd in dit rapport wordt geconcludeerd dat de belasting in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag in de Waddenzee vergelijkbaar is met de belasting volgens de M&R-cyclus 2020 en wederom binnen de toegestane gebruiksruimte blijft. Daarom worden er geen maatregelen genomen om de productie bij te stellen.

Samenvatting metingen

- In 2021 zijn reservoirdrukken gemeten in alle producerende Wadden voorkomens.
- Op basis van het meetplan Waddenzee zijn in 2021 GNSS-metingen (Global Navigation Satellite System, GPS) uitgevoerd op 17 clusters van peilmerken in de Waddenzee, 8 peilmerken in het Lauwersmeer en 1 peilmerk op Ameland.
- De continue GNSS-metingen op de locaties boven de gasvelden Ameland, Anjum en Moddergat zijn in 2021 voortgezet. Het AGRS (Actief GNSS Referentie Systeem) station Ameland bij Nes en het in 2016 geplaatste GNSS-station Ternaard zijn ook onderdeel van de monitoring.
- Op het vasteland zijn in 2021 vlakdekkende InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) metingen geanalyseerd en gerapporteerd.

Samenvatting modellen

- Na het kalibreren van de reservoirsimulatiemodellen van de waddenvoorkomens met de gemeten reservoirdrukken is de grootste resterende onzekerheid de druk in de aquifers die in contact staan met de gasvoorkomens. 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 2021 kunnen reproduceren, maar met name variëren in de mobiliteit en gassaturatie in de aquifers.
- De geomechanische modellen voor de voorkomens in het Waddenzee-gebied zijn grondig geëvalueerd met behulp van de drukprognoses en gekalibreerd met de beschikbare geodetische metingen, waarbij de onzekerheid in de metingen is meegenomen. De resultaten van de modellen en de metingen 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.

Inhoud

Samenvatting	2
Inhoud	3
1 Inleiding	4
2 Deelprocessen	6
2.1 Meten (stap 1)	6
2.1.1 Geodetische metingen	6
2.1.2 Reservoirdrukmetingen en historische productie	6
2.2 Analyseren meetgegevens (stap 2)	7
2.2.1 Analyseren van GNSS-metingen en referentie	7
2.2.2 Campagne GNSS-metingen op de Waddenzee	7
2.2.3 Continue GNSS-metingen	8
2.2.4 Waterpassen en InSAR	8
2.2.5 Ruimte-tijd analyse	8
2.3 Verifiëren prognose (stap 3)	9
2.3.1 Overzicht ondergrondmodellering	9
2.3.2 Verifiëren reservoirmodellen (stap 3a)	10
2.3.3 Verifiëren bodemdalingsscenario's (stap 3b)	14
2.3.4 Vergelijking van gemodelleerde bodemdaling met resultaten van campagne GNSS ..	34
2.4 Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4)	37
2.4.1 Bepaling volume en gemiddelde daling	37
2.4.2 Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting	38
2.4.3 Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting	40
2.5 Indien nodig aanpassen productie (stap 5)	42
2.6 Actualiseren (stap 6)	42
2.7 Remwegscenario	43
3 Kwaliteitsborging	44
4 Conclusies	45
5 Referenties	46
A. Bijlage A: Gemodelleerde en gemeten bodemdaling sinds 1986 en 2022	48
B. Bijlage B: Verwachte bodemdaling in het jaar 2050	50
C. Bijlage C: Mogelijke gevolgen van aardbevingen op bodemdaling en milieu	51
D. Bijlage D: Tijdseries Waddenzee	55
E. Bijlage E: Controle reservoirmodellen met drukmetingen	60
E.1 Moddergat	60
E.2 Nes	60
E.3 Lauwersoog Oost	61
E.4 Lauwersoog Centraal	62
E.5 Lauwersoog West	64
E.6 Vierhuizen Oost	64
F. Bijlage F: Communicatie tussen Lauwersoog-Oost veld en naastgelegen breukblok	66

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, waarmee de Inspecteur-Generaal der Mijnen (IGM) heeft ingestemd bij brief van 2 februari 2007. De laatste versie van dit protocol met de bijbehorende technische bijlage dateert uit 2021 (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 2021 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 2021 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 gemeten bodemdaling (Figuur 2-18 en Figuur 2-19).
2. Tabellen met de jaarlijkse toename van het bodemdalingsvolume (inclusief onzekerheid) per voorkomen per kombergingsgebied voor de jaren 2005 t/m 2024 (Tabel 2-12 en Tabel 2-13).
3. Een tabel met de bodemdalingssnelheid (per jaar; S) en belasting (gemiddelde bodemdalingssnelheid per zes jaar; B) per kombergingsgebied (Zoutkamperlaag en Pinkegat) tot 2042 (Tabel 2-14 en Tabel 2-15). De in een bepaald jaar gerapporteerde belasting B wordt berekend voor de situatie op 1 januari van dat jaar. Voor de rapportage over het jaar 2021 wordt op deze manier een B voor 1 januari 2022 berekend.

4. Grafieken met de bodemdalingsbelasting voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag vanaf start productie op de locatie Moddergat tot 2040 (Figuur 2-22 en Figuur 2-23).
5. Overzicht monitoring met continue GNSS-hoogtemetingen (Global Navigation Satellite System, GPS) (Tabel 2-3).
6. Voor de voorkomens in het winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen-Oost: drukdata per put op reservoirniveau en productiedata van het rapportagejaar (Tabel 2-1 en Tabel 2-2).
7. Geplande productie per voorkomen (jaarprofiel, Tabel 2-6).
8. Gemeten en gemodelleerde bodemdaling op de permanente 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 van het geomechanisch model. 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 2021 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 2021.

2.1 Meten (stap 1)

2.1.1 Geodetische metingen

Volgens het meetplan Waddenzee zijn in 2021 GNSS-metingen (Global Navigation Satellite System, GPS) uitgevoerd op 17 clusters van peilmerken in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag, op 8 peilmerken in het Lauwersmeer en op 1 peilmerk op Ameland. De GNSS-metingen zijn in Referentie 7 beschreven en ook gerapporteerd als meetregister (Referentie 19). De resultaten van de permanente GNSS-metingen zijn in 2021 driemaandelijks aan SodM gerapporteerd. Naast de stations AME1, Moddergat en Anjum, zijn hier in 2016 het AGRS (Actief GNSS Referentie Systeem) station Ameland (bij Nes), welke operationeel is sinds 2014, en het station Ternaard aan toegevoegd. Op het vasteland zijn in 2021 vlakdekkende InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) metingen geanalyseerd en gerapporteerd, waarbij van de Sentinel-1 satellieten gebruik is gemaakt (Referentie 30).

2.1.2 Reservoirdrukmetingen en historische productie

In april 2021 is de reservoirdruk bepaald voor de waddenvelden Moddergat, Nes en Lauwersoog-West en Lauwersoog-Oost. Dit is net als voorgaande jaren gedaan aan het einde van een productiestop, zodat de druk in de putten kan opbouwen naar de reservoirdruk. Een reservoirdrukmeting voor het kleinste waddenveld Lauwersoog-Centraal is in oktober 2021 gedaan nadat de put 10 dagen was ingesloten. In Tabel 2-1 staan de reservoirdrukken die bepaald zijn op basis van drukken gemeten boven in de put ('Closed-in Tubing Head Pressure'; CITHP). Het veld Vierhuizen-Oost heeft niet geproduceerd in 2021 door technische problemen met de put en hierdoor is geen drukmeting beschikbaar.

Tabel 2-2 toont de cumulatieve gasproductie per voorkomen tot en met 31 december 2021 en hoeveel gas is geproduceerd alleen in 2021. Samen met de voorgenomen productie (zie Tabel 2-6) blijft dit binnen de maximale volumes in het vigerend winningsplan.

Tabel 2-1: Reservoirdrukmetingen in 2021 voor de MLV-voorkomens op basis van Closed-in Tubing Head Pressure (CITHP) metingen. In de laatste kolom is aangegeven hoe lang de put ingesloten was toen de reservoirdruk werd bepaald.

Voorkomen	Putnaam	Datum	Gemeten druk (op reservoirniveau, bara)	Type meting
Moddergat	MGT-1B	15-04-2021	129 @ 3860 m	CITHP (3 dagen)
Nes	MGT-2	15-04-2021	124 @ 3700 m	CITHP (3 dagen)
	MGT-3	15-04-2021	119 @ 3700 m	CITHP (3 dagen)
	MGT-5	15-04-2021	123 @ 3700 m	CITHP (3 dagen)
Lauwersoog-Oost	LWO-1B	15-04-2021	120 @ 4050 m	CITHP (3 dagen)
Lauwersoog-Centraal	LWO-2	22-10-2021	141 @ 4035 m	CITHP (10 dagen)
Lauwersoog-West	LWO-3	15-04-2021	102 @ 4060 m	CITHP (3 dagen)

Tabel 2-2: Productie per voorkomen.

Voorkomen	Cumulatieve productie t/m 2021 (10 ⁶ Nm ³)	Productie 2021 volgens vigerend WiPla* (10 ⁶ Nm ³)	Actuele productie in 2021 (10 ⁶ Nm ³)
Nes	11799	662	470
Moddergat	4899	138	188
Lauwersoog-C	139	20	2
Lauwersoog-West	1724	54	76
Lauwersoog-Oost	2426	66	91
Vierhuizen-Oost	1628	0	0
Totaal	22615	940	827

*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 zijn volgens de in Referentie 7 beschreven GNSMART-methodiek geanalyseerd. Hierbij wordt een twaalfstal permanente stations als referentie gebruikt.

Sinds de Meet- en Regelcyclus 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 31). 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 geoidemodel (Referentie 9). In de confrontatie

workflow met bodemdalingsscenario's worden GNSS dubbel-differenties van de hoogtes in ruimte en tijd berekend, die zowel uit de orthometrische als uit de ellipsoïdische hoogtes kunnen worden bepaald, zolang deze door de tijd op een consistente wijze worden berekend.

Voor de in 2006 door NAM nieuwgeplaatste waddenpeilmerken moet 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) is gebleken 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 in 2006 geplaatste peilmerken volgen vanaf 2008, evenals de later geplaatste peilmerken, de precisie modellen zoals beschreven in het LTS-II rapport (Referentie 13).

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 weer 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 op zee ten noorden van Ameland. De uitkomsten van deze metingen zijn sterk afhankelijk van temperatuurschommelingen, maar laten over de gehele meetperiode wel een licht dalende trend zien door bodemdaling door gaswinning.

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 31/12/2021 [mm]	Verticale bewegingssnelheid in 2021 [mm/jaar]
Ameland	05-02-2007	-94	-5,6 [$1\sigma = 0,5$ mm/jaar]
Anjum	05-02-2007	-51	-3,6 [$1\sigma = 0,5$ mm/jaar]
Moddergat	05-02-2007	-52	-3,3 [$1\sigma = 0,6$ mm/jaar]
Ameland-Nes	17-06-2014	-7	-0,4 [$1\sigma = 1,5$ mm/jaar]
Ternaard	19-11-2016	-10	-1,9 [$1\sigma = 0,4$ mm/jaar]

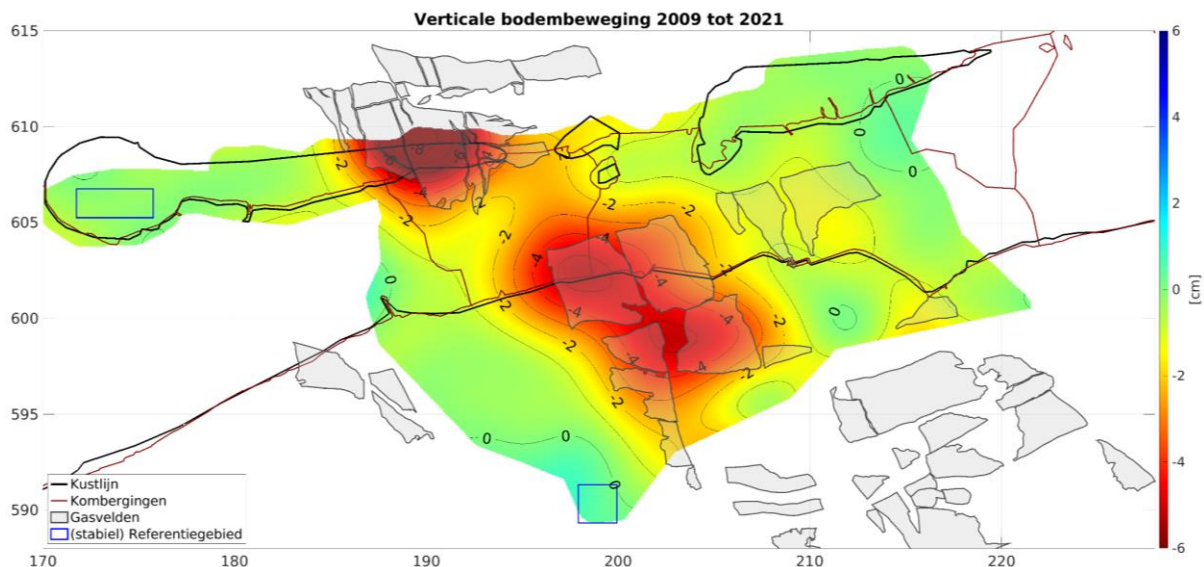
2.2.4 Waterpassen en InSAR

De meetresultaten van de waterpassingen op het vaste land en op Ameland evenals de InSAR-metingen op het vasteland zijn gebruikt zoals gerapporteerd in de differentiestaten van de laatste meetregisters (Referentie 29 en Referentie 30). De daarin gepubliceerde waterpasgegevens zijn per meetepoche geanalyseerd met een vrije netwerkvereffening. De InSAR-metingen zijn afkomstig van opeenvolgende missies (ERS, Envisat, Radarsat-2 en Sentinel-1) en omgerekend op de locaties van de waterpas-peilmerken. Als InSAR-tijdserie wordt per peilmerk de mediaan van de tijdseries van alle InSAR meetpunten binnen een straal van 500 meter gehanteerd en over opeenvolgende periodes van één jaar gemiddeld.

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-

GNSS en InSAR 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 2021 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, de waterpassingen op het vasteland, Ameland en Schiermonnikoog evenals de laatste InSAR-metingen op het vaste land van 2018 tot 2021. 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 reproduceren, 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.

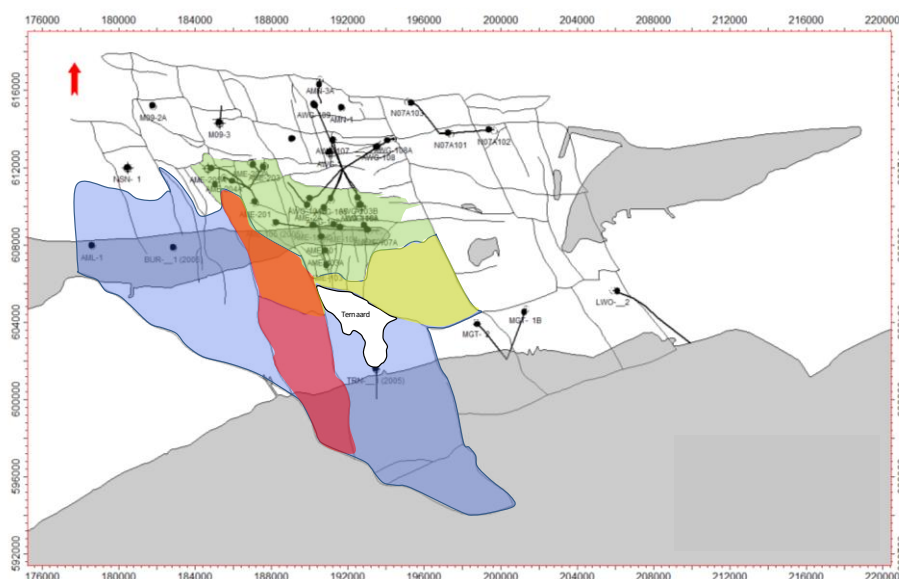
Onzekerheden die gereduceerd kunnen worden met de historische drukmetingen zijn voornamelijk de grootte van het gasvoorkomen en de permeabiliteit in het gasvoorkomen zelf. Design of Experiments (DoE) in combinatie met Monte Carlo is de methode die is toegepast om modelrealisaties te vinden die maximaal 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 Lauwersoog-Oost veld en het oostelijk gelegen breukblok. De effecten op de bodemdaling indien communicatie tussen beide breukblokken zou plaatsvinden zijn in meer detail beschreven in Bijlage F aan de hand van gedetailleerde geologische modellen, reservoirsimulatiemodellen en bodemdalingsmodellen.



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 E. Dit heeft geresulteerd in modelrealisaties die de historische metingen tot en met 2021 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 modelrealisatie¹.
- 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 het Ameland veld zijn er twee additionele realisaties meegenomen, zie Tabel 2-5.

¹ De termen hoog en laag worden gekozen op basis van de invloed in het betreffende scenario op het totale bodemdalingsvolume.

- Voor het Lauwersoog-Oost veld is een extra realisatie gemaakt om de mogelijke invloed van de oostelijke aquifer inzichtelijk te maken, zie bijlage F.

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.

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 E. 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.

Tabel 2-5: Overzicht van de opgestelde realisaties. Dit jaar zijn parameters voor drie realisaties aangepast: Lauwersoog-Centraal Hoog (meer paleo-residueel gas), Lauwersoog-Oost Basis (kleinere GIIP) en Moddergat Hoog (meer paleo-residueel gas).

Voorkomen	Realisatie	Paleo-residueel gas (%)	Permeabiliteits-factor aquifer
Ameland ²	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	12	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	10	1
Nes ³	Laag	16	0,3
	Basis	16	0,3
	Hoog	16	1,0
Vierhuizen-Oost	Laag/basis	16	0,3
	Hoog	0	1

² 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).

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

Om drukprognoses te maken wordt een gaswinningsprognose gebruikt. Tabel 2-6 toont de jaarlijkse voorgenomen productie die is gebruikt om de druk per voorkomen te voorspellen. Uit het Vierhuizen-Oost voorkomen kan sinds 2018 niet meer worden geproduceerd vanwege technische problemen met de put (zie Bijlage E voor meer informatie), vandaar dat de voorgenomen productie op 0 staat. Ook voor Lauwersoog-Centraal is de verwachting volgens het Business Plan 2021 dat de put niet meer produceert, maar er wordt wel geprobeerd om de productie uit dit veld op gang te houden. Gezien de grootte van dit veld en de lage historische productie in 2021 (2 miljoen Nm³) zal het effect van enige productie op bodemdaling zeer beperkt zijn en ruim binnen de gebruiksruimte blijven. Dit wordt bevestigd door Figuur 2-23 die laat zien dat de bijdrage van dit veld aan de belasting gering is geweest.

Tabel 2-6: Voorgenomen productie (miljoen Nm³ per jaar) per voorkomen volgens Business Plan 2021.

Jaar	Moddergat	Nes	Lauwersoog-Oost	Lauwersoog-West	Lauwersoog-C	Vierhuizen-Oost
2022	159	358	91	61	-	-
2023	137	290	85	52	-	-
2024	128	269	85	41	-	-
2025	113	228	80	41	-	-
2026	101	163	76	40	-	-
2027	103	120	77		-	-
2028	91	113	72		-	-
2029	82	100	68		-	-
2030	74	100	65		-	-
2031	67	95	62	-	-	-
2032	61	89	60	-	-	-
2033	51	83	57	-	-	-
2034	45	76	54	-	-	-
2035	32	70	46	-	-	-
Totaal	1242	2161	977	237	0	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. De compactie van de reservoirlaag in deze staat gedraagt zich lineair met de drukdaling. 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 proxy met een numeriek Geomec model zijn beschreven in dezelfde referentie. Door het rigid basement naar boven te bewegen zal de bodemdalingsskom smaller worden met de tijd. Eenzelfde gedrag wordt ook gezien wanneer er kruipbeweging in het zout ontstaat door geïnduceerde schuifspanningen in het zout die het gevolg zijn van compactie van het reservoir.

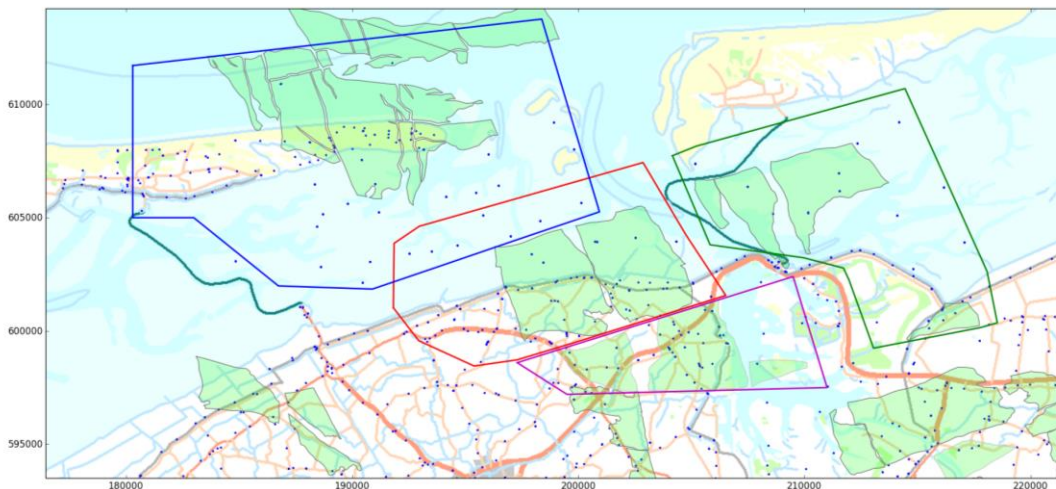
De modelering in de LTS-II studie betrof alleen het Ameland veld. In de M&R cycli die erna volgden worden alle velden (Ameland, de Anjum en de Wadden voorkomens) volgens de LTS-II methode doorgerekend, waarbij voor elk veld meerdere reservoirrealisaties gebruikt zijn (zie Paragraaf 2.3.2). Deze reservoirrealisaties zijn met elkaar gecombineerd, waarna de bodemdalingsscenario's zijn opgesteld, doorgerekend en geconfronteerd met de metingen.

2.3.3.1 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 25.000 bodemdalingsscenario's gemaakt op basis van de onzekerheid in de waarden voor de invoergegevens in de bodemdalingsmodellen. Ook zijn de ranges voor een aantal parameters vergroot.

Voor het beoordelen van de passing tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling zijn, gelijk aan de vorige M&R, 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 bodemdalingssommen van de velden goed worden meegenomen.

Voor de kalibratiegebieden Nes/Moddergat, Lauwersoog/Vierhuizen en Anjum zijn net als voorgaande jaren de combinaties van lage, basis en hoge realisaties gebruikt. Voor Ameland zijn ook dit jaar weer 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 doorgerekend en geconfronteerd met de geodetische dataset. Per kalibratiegebied worden vervolgens de χ^2 toetsgrootheden bepaald, die een maat zijn voor de overeenkomst tussen de bodemdalingsscenario's en de geodetische metingen.



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.

Ook binnen de kalibratiegebieden gelden dus combinaties van reservoirrealisaties, waar voor iedere combinatie in een kalibratiegebied 25.000 bodemdalingsscenario's zijn gemaakt. Als voorbeeld: het kalibratiegebied Lauwersoog/Vierhuizen bevat vier voorkomens. Hiervan zijn twaalf combinaties gemaakt (zie ook Tabel 2-7). Dit betekent dat $12 \times 25.000 = 300.000$ bodemdalingsscenario's met de geodetische metingen binnen dit kalibratiegebied worden geconfronteerd.

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

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

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

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

Kalibratiegebied Ameland					
Ameland	laag	interim1	basis	interim2	hoog

2.3.3.2 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 2021 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.

2.3.3.2.1 Constructie van de covariantiematrix van geodetische dubbel-differenties

In de LTS-toepassing voor deze Meet- en Regel cyclus is de volgende geodetische data gebruikt (volgens meetplan Waddenzee):

- Waterpassingen Ameland eiland: t/m 2020 (laatste waterpassing).
- Waterpassingen vasteland Noord-Nederland (Lauwersmeergebied): t/m 2018.
- GNSS-metingen: campagne (Waddenzee) en jaarlijkse sampling van de continue stations (Ameland, productieplatformen en op het vasteland) t/m 2021.
- InSAR: op het vasteland, jaarlijks gesampled op peilmerklocaties, t/m 2021.

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 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 grondwaterextractie 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.

Omdat voor de Ameland waterpassingen de toetsgrootte (χ^2/n , met n het aantal dubbel-differenties) ruim boven de verwachtingswaarde van 1 lag, is in de Meet- en regelcyclus 2020 het stochastisch model bijgesteld. Omdat de meetprecisie en de temporele component van de idealisatieprecisie (puntstabiliteit) voor waterpassingen goed bekend zijn, is de spatio-temporele component aangepast. Deze component is een functie van de afstand tussen meetpunten en tijdstippen waarover gemeten worden, en is een stochastische benadering voor zowel model-imperfecties als mogelijk aanwezige ondiepe bodemdalingscomponenten die zowel in tijd als ruimte gecorreleerd zijn. De variantie factor is van 0,465 (LTS-studie) naar 2 verhoogd voor Ameland waterpassingen in de Meet- en regelcyclus 2020. 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. In deze Meet- en regelcyclus zijn deze parameters ook gehanteerd voor de waterpassingen op het vasteland.

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.

Er zijn nieuwe metingen beschikbaar gekomen uit de InSAR processing van Sentinel-1 data van het vasteland (Lauwersmeer) gebied (Referentie 33). De toetsgrootheden in de kalibratiegebieden zijn daarom opnieuw geëvalueerd. Hieruit kon worden geconcludeerd dat de InSAR dubbel-differenties een hogere precisie hebben en het stochastisch model wederom bijgesteld kon worden. Op het initiële stochastisch model voor InSAR is in deze Meet- en Regelcyclus een variantiefactor van 0,64 toegepast:

$$\sigma^2 = 0,64 \cdot 2 \cdot (4^2 \text{ mm}^2 + 4 \text{ mm}^2); \sigma = 5 \text{ mm}$$

Toepassing van bovengenoemde aanpassingen in de (co)variantiematrices in de confrontatie met bodemdalingsmodellen in de LTS-procedure levert waarden van de minimale χ^2/n toetsgrootheden op tussen 0,82 (kalibratiegebied Nes/Moddergat) en 1,35 (kalibratiegebied Ameland), zie Tabel 8.

χ^2/n toetsgrootheid

Iedere modelberekening van de bodemdaling wordt vergeleken met de geodetische dubbel-differenties. Deze confrontatie wordt gedaan door een computerprogramma dat een score voor de mate van overeenkomst (de χ^2/n toetsgrootheid) tussen de modelberekening en de geodetische dubbel-differenties berekent, waarbij n het aantal dubbel-differenties is. Indien de modelberekening overeenkomt met de geodetische dubbel-differenties binnen de gemodelleerde onzekerheden is de verwachte waarde van de χ^2/n toetsgrootheid 1. In het document wordt vaker de χ^2 zonder n genoemd. Hiermee wordt in alle gevallen χ^2/n bedoeld.

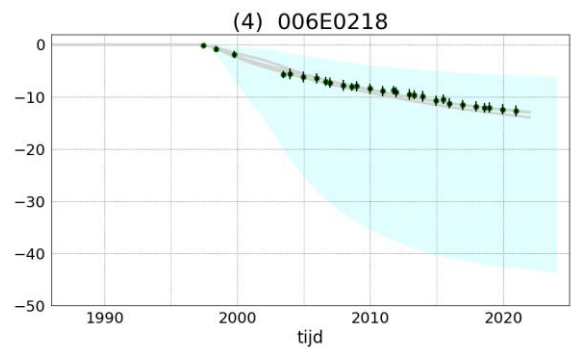
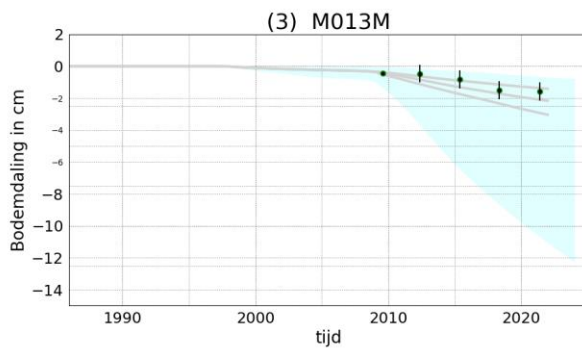
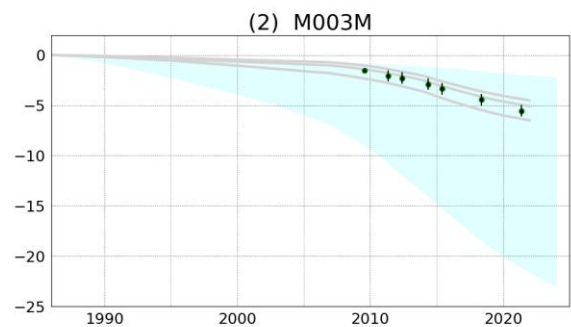
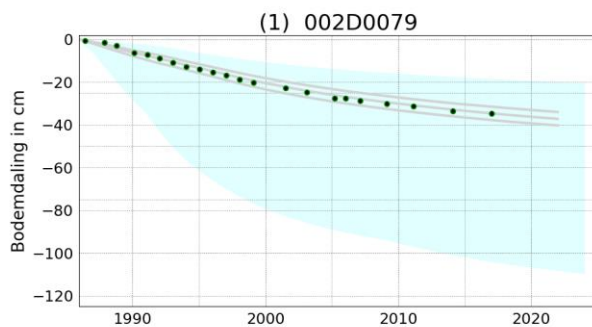
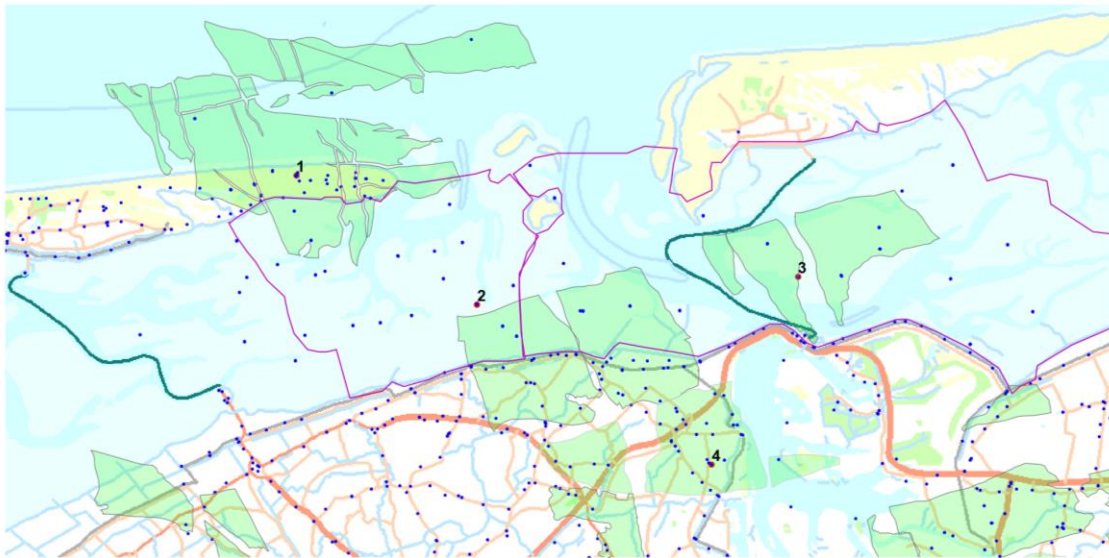
2.3.3.3 Confrontatie bodemdalingsscenario's en geodetische data

Per kalibratiegebied wordt voor elk scenario de passing van het scenario met de metingen uitgedrukt in een waarde voor de χ^2/n toetsgrootheid. De passing van het model met de data is beter naarmate de waarde voor χ^2/n toetsgrootheid dichter bij de verwachtingswaarde van 1 ligt, 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 C_m waarde en bodemdalingsvolume) kunnen hiermee de statistische waarden zoals het gewogen gemiddelde en het betrouwbaarheidsinterval worden afgeleid. De minimale χ^2/n toetsgrootheden na confrontatie met de bodemdalingsmodellen zijn weergegeven in Tabel 2-8 per kalibratiegebieden.

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

Kalibratiegebied	Minimale χ^2/n toetsgrootheid confrontatie
Ameland	1,35
Nes/Moddergat	1,03
Lauwersoog/Vierhuizen	0,82
Anjum	1,27

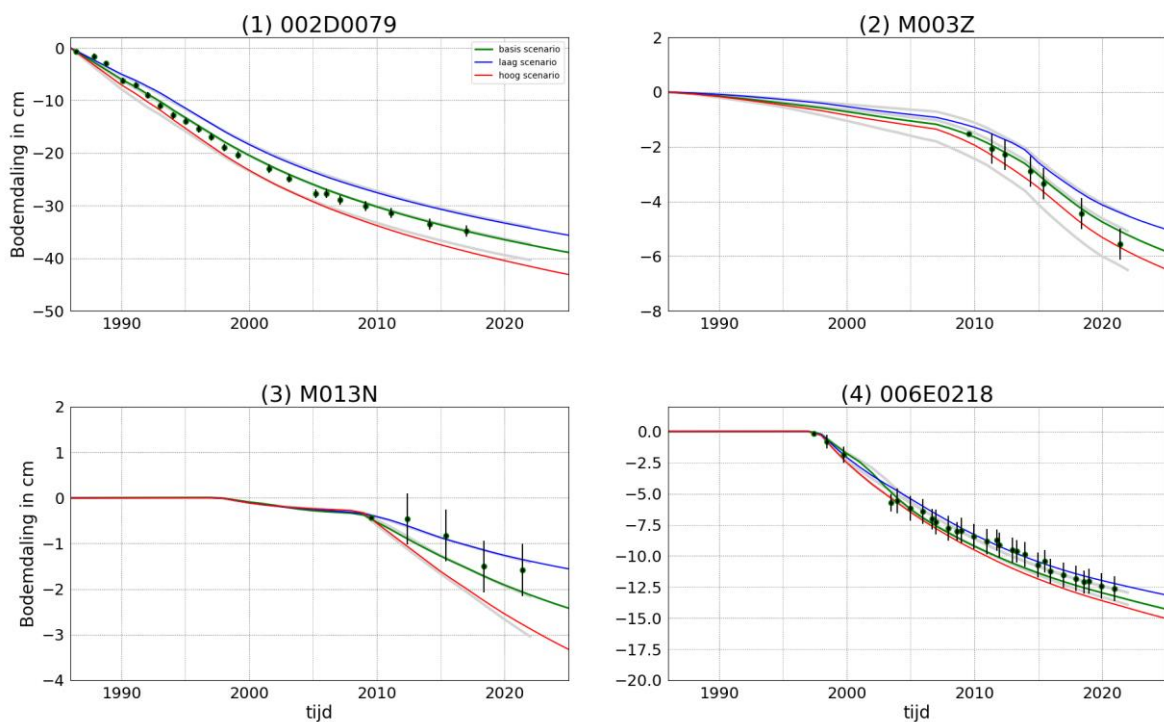
Figuur 2-4 toont met grijze lijnen de statistische bodemdalingslijnen voor de 2,5% overschrijdingskans, het gewogen gemiddelde en de 97,5% overschrijdingskans. Deze statistische waarden worden per dubbel-differentie en per jaar bepaald en zijn dus niet toe te kennen aan een uniek bodemdalingsscenario. Het blauwe vlak toont het bereik van de bodemdalingsruimte dat a priori (voor de confrontatie met de metingen) 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), zoals aangeven op de kaart. 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. Bij de selectie van de deterministische scenario's is gekeken naar de scenario's die én een hoge waarschijnlijkheid kennen én het beste passen bij de recente gemeten

bodemdalingsnelheden. Een derde criterium is het minimaliseren van de variatie voor de parameterwaarden tussen de kalibratiegebieden. Het doel van deze criteria is de verwachting dat de geselecteerde scenario's tot betere voorspellingen zullen leiden. De gekozen deterministische lijnen zijn met blauw, groen en rood aangegeven (Figuur 2-5) en komen goed overeen met de drie statistische waarden (let op de verschillende waarden op de y-assen). Zie Bijlage D voor additionele punten.



Figuur 2-5: Bodemdaling versus tijd voor 4 meetpunten op Ameland (1), Nes (2), Lauwersoog (3) en 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).

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

De geomechanische parameters per kalibratiegebied voor het lage, basis en hoge bodemdalingsscenario (Tabel 2-9 en Tabel 2-10) volgen uit de deterministische scenario's (Figuur 2-5). Deze parameterwaarden zijn vergelijkbaar met die van vorig jaar. In Bijlage D zijn de resultaten van de scenario's getoond als tijdseries voor meerdere punten in de Waddenzee.

In de LTS-II methodiek wordt in alle berekeningen aangenomen dat de compactie lineair verloopt op het moment dat de gasdruk hoger is (overdruk) dan de hydrostatische druk in het reservoir. Deze hydrostatische druk ligt voor de Waddenvelden ongeveer op 380 bar. Dat wil zeggen dat de C_{md} waarde geldt voor de berekening van de compactie wanneer de druk zich bevindt tussen de initiële druk (rond de 550 bar) en de gedepleteerde druk (rond de 380 bar). Wanneer de druk onder de hydrostatische druk komt, verloopt de compactie volgens het RTCiM compactiemodel en zal de C_{md} langzaam (bepaald door de waarde van de b-factor) overgaan naar de C_{mref} . De waarde van de C_{mref} is hoger dan die van de C_{md} waardoor de compactie zal versnellen.

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 porositeit⁴ gebruikt om een spatiële C_m kaart te maken die als a priori informatie gebruikt wordt in de berekeningen. De C_{mref} en C_{md} zijn vermenigvuldigingsfactoren op deze kaarten. De waarden voor de C_{mref} voor Ameland liggen aan de bovenkant van de gemeten C_m waarden. De waarden voor Anjum en de Waddenzee velden liggen dicht bij de gemiddelde C_m -porositeitsrelatie. Dit verschil in waarden voor de passende C_m tussen Ameland en de overige gasvelden bestaat al sinds de start van de M&R-rapportages. Een duidelijke verklaring voor de verschillen is nog niet gevonden. Het is mogelijk dat naast de C_m van het gesteente bijvoorbeeld drukdaling 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 parameterwaardes voor respectievelijk het laag, basis en hoog bodemdalingsscenario.

RTCiM	Ameland	Anjum	Nes Moddergat	Lauwersoog Vierhuizen
C_{mref} (factor) [-]	3,17 - 3,13 - 3,64	1,4 - 1,38 - 1,62	1,31 - 1,38 - 1,55	0,86 - 1,36 - 2,2
C_{md} (factor)[-]	0,46 - 0,6 - 0,7	0,35 - 0,38 - 0,5	0,24 - 0,33 - 0,45	0,1 - 0,45 - 0,63
b [-]	0,034 - 0,031 - 0,031	0,033 - 0,018 - 0,029	0,012 - 0,015 - 0,018	0,019 - 0,02 - 0,02
Zoutgedrag				
$C/k(0)$ [-]	0,82 - 0,75 - 0,77	0,76 - 0,75 - 0,78	0,76 - 0,77 - 0,76	0,84 - 0,76 - 0,76
$d(c/k)$ [-]	0,27 - 0,3 - 0,27	0,18 - 0,23 - 0,21	0,25 - 0,18 - 0,21	0,19 - 0,18 - 0,28
T_{salt} [jaar]	28,7 - 20,1 - 25,5	17,3 - 17,1 - 13,9	46,4 - 17,8 - 46,3	45,9 - 4,1 - 18,2

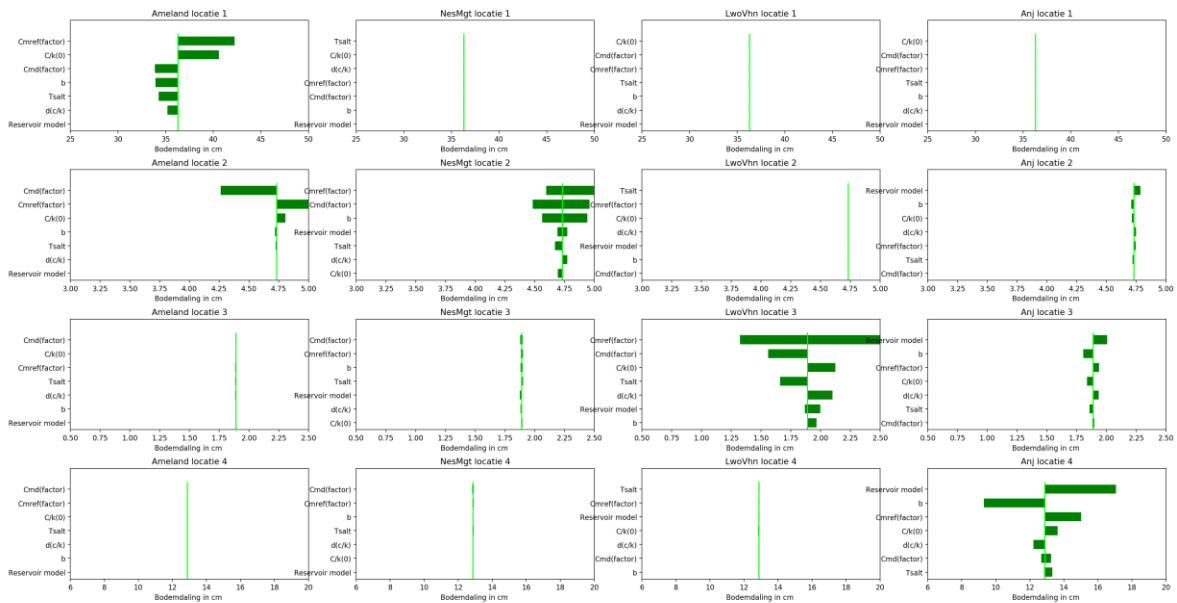
⁴ De gebruikte porositeits (Φ) - C_m relatie is $C_m = 273 \Phi^3 - 68,72 \Phi^2 + 9,85 \Phi + 0,21$ waarbij de C_m in 10^{-5} bar^{-1} is en de porositeit (Φ) in [-].

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	hoog - basis - laag
Moddergat	laag - hoog - hoog
Lauwersoog Centraal	hoog - basis - laag
Lauwersoog West	basis - basis - laag
Lauwersoog Oost	basis - basis - laag
Vierhuizen	hoog - basis - basis
Anjum	hoog - basis - basis
Metslawier	basis - laag - laag
Ezumazijl	basis - 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 na confrontatie met de metingen. 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.

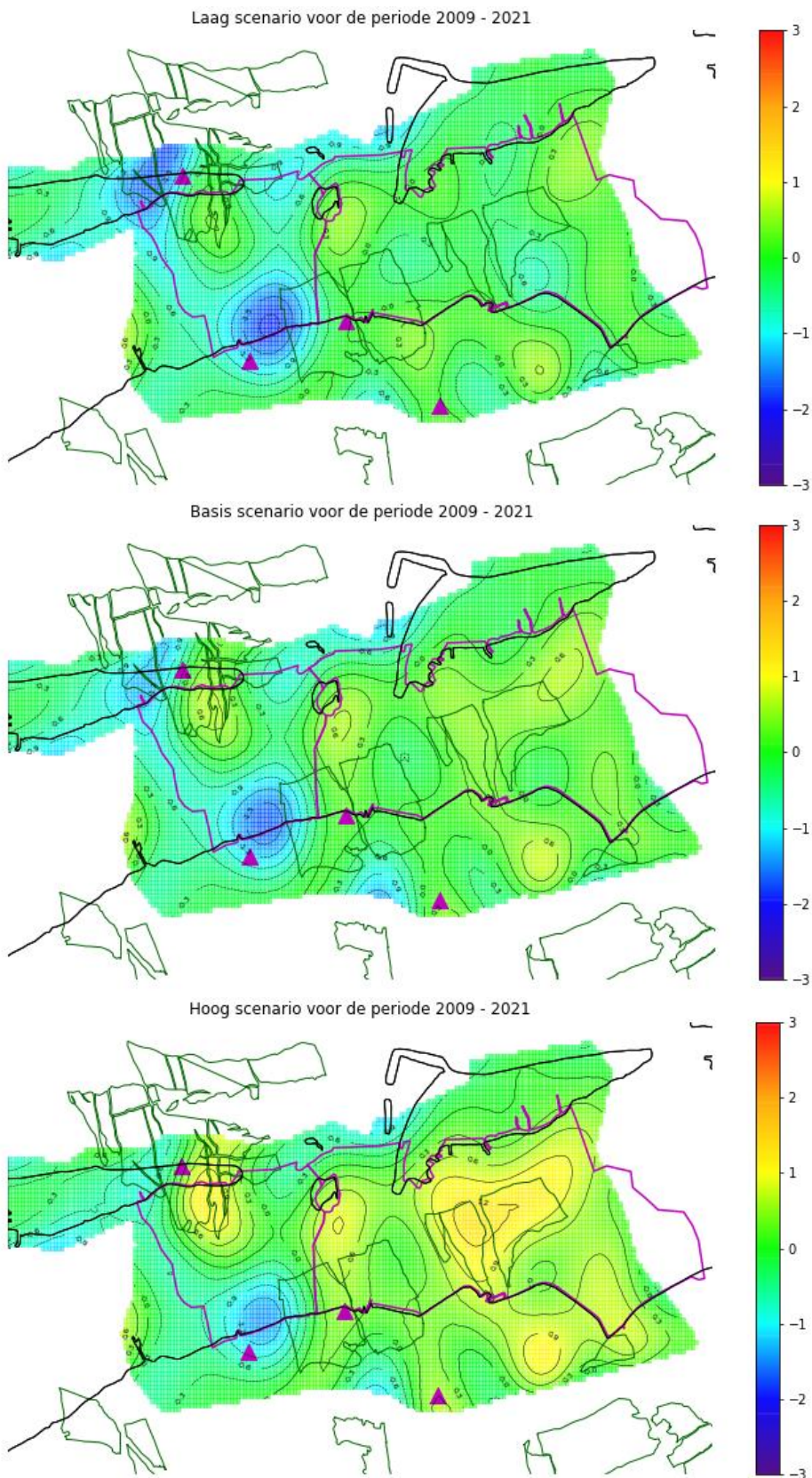


Figuur 2-6: Tornado charts die de invloed van de parameterwaarden toont op de bodemdaling in 4 locaties (zie Figuur 2-5 voor de locatie van de punten). Voor elke locatie is separaat een Tornado-chart gemaakt voor elk van de vier kalibratiegebieden. De naamgeving boven de charts laten het effect zien van het betreffende kalibratiegebied op het punt. De bodemdaling is berekend van start winning tot 2022. De lichtgroene lijn laat de bodemdaling volgens het basisscenario zien.

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

Het vergelijk met de metingen is in deze rapportage ook gevisualiseerd met behulp van een geodetisch model (paragraaf 2.2) berekend uit waterpas-, GNSS, en InSAR 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.

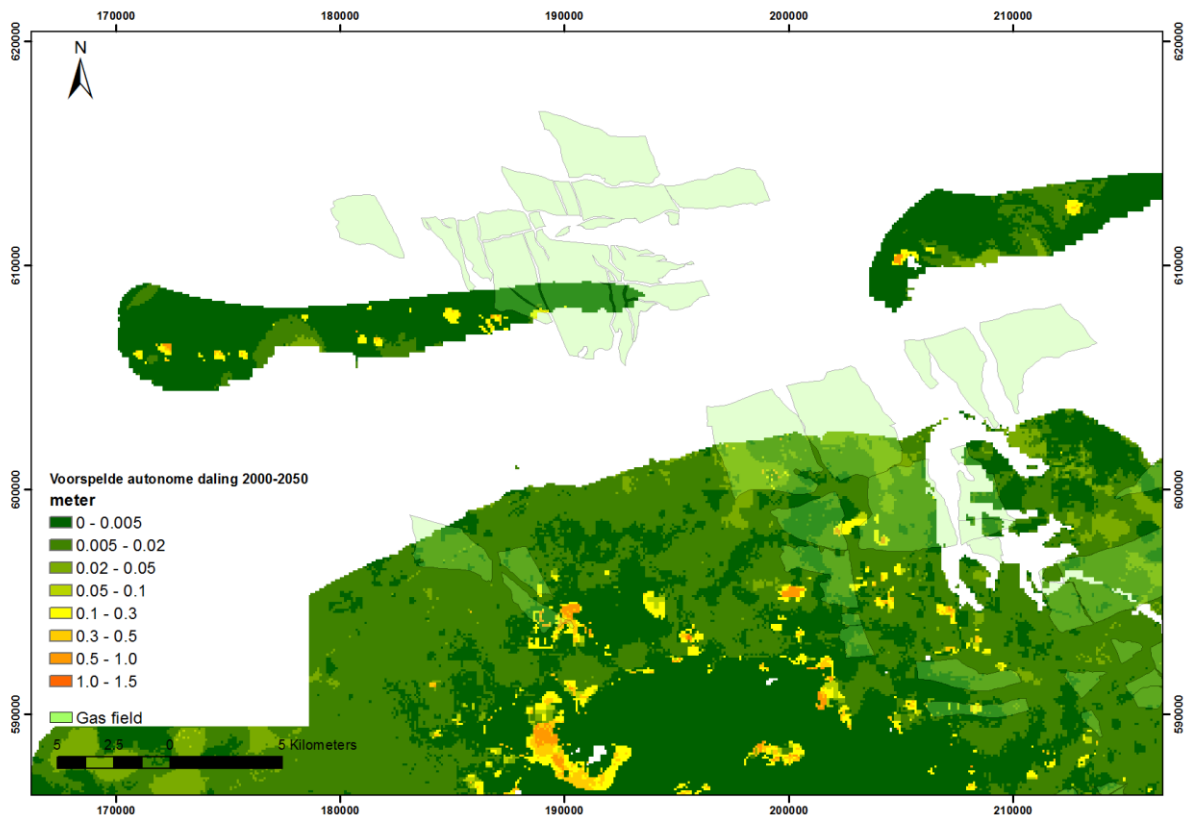
Uit de vergelijking blijkt dat het basisscenario goed past met het geodetische model voor de periode 2009-2021. Voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag geeft het bodemdalingsscenario iets meer daling dan het geodetisch model (enkele mm's over een periode van 12 jaar). De variatie in verschillen in het Pinkegat kombergingsgebied zijn iets groter, maximaal ongeveer 1 cm in 12 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.



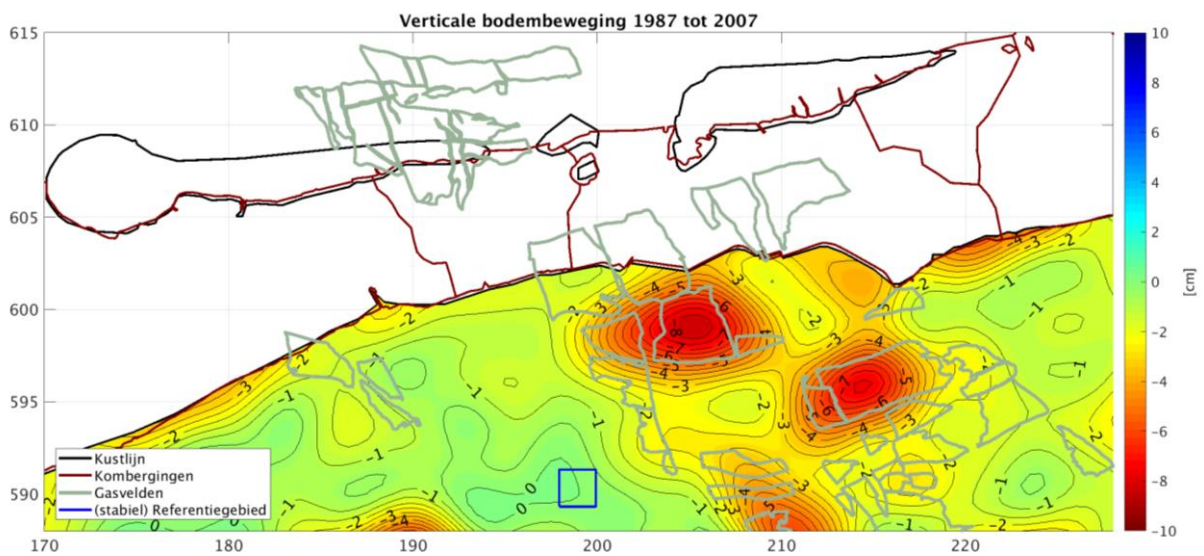
Figuur 2-7: Verschil (in cm) tussen de gemodelleerde bodemdaling volgens het laag (bovenste figuur), basis (middelste figuur), hoog scenario (onderste figuur) en het geodetische model voor de periode 2009-2021. In de blauwe gebieden, met negatieve afwijkingen, is de gemeten bodemdaling groter dan de 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 2.3.3.8). 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 Waddenzegebied zijn deze berekeningen niet uitgevoerd. Voor Ameland en Noord-Friesland kan worden geconcludeerd dat er lokaal significante autonome bodemdaling voorkomt. Rond de Waddenvoorkomens loopt dit op tot 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 reservoirsimulatiemodel 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.



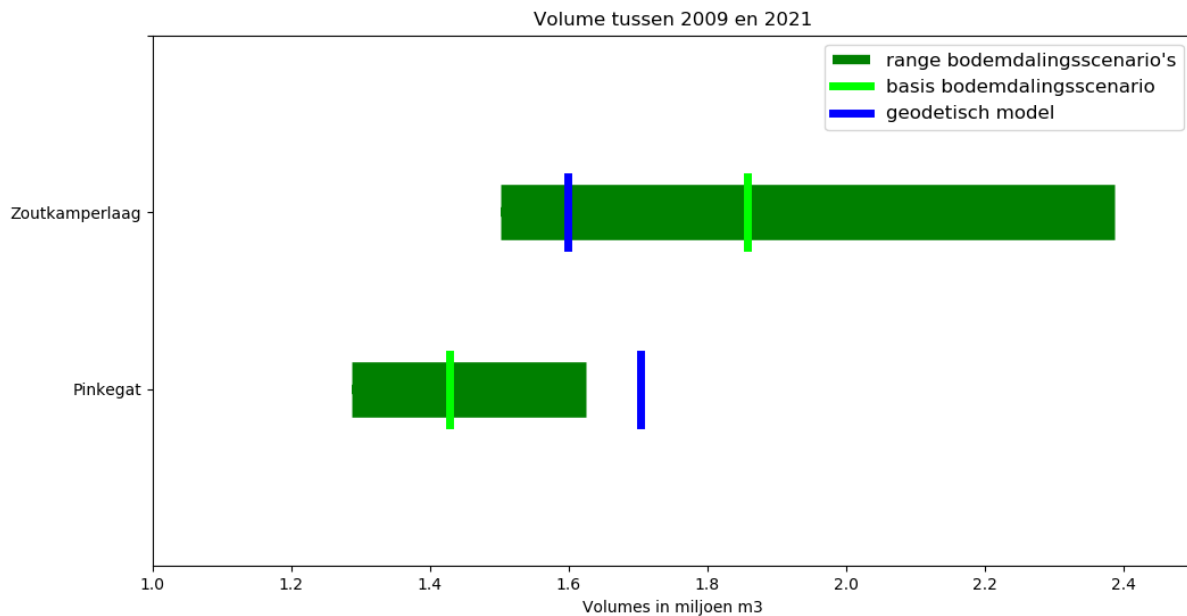
Figuur 2-8: Maaiveldaling (m) over een periode van 50 jaar bij handhaving van huidige drooglegging bij huidig klimaat. De waarden op deze kaart geven een eerste orde schatting van de mogelijke autonome daling. N.B., de kaart heeft een witte ondergrond voor het Waddenzeegebied, omdat voor dit gebied geen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



Figuur 2-9: 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 mid 2009 en mid 2021. 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, echter de range is groter dan in M&R 2020. De volumes volgens het laag-, basis- en hoog scenario in Pinkegat zijn 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 2009-2021 (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 bodemdaling kom 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 drukkaling in de aquifers ten zuidoosten van het gasveld zou ervoor zorgen dat de bodemdalingskom wijder wordt en daarmee de gemeten bodemdaling in de oostkant van het eiland nog meer wordt overschat. Omdat de LTS-II confrontatie streeft naar een zo klein mogelijk totaalverschil tussen alle metingen en model zal de methode juist die reservoircenario's selecteren die deze overschatting beperkt houden en dit zijn de realisaties zonder drukkaling in de aquifers van Ameland.

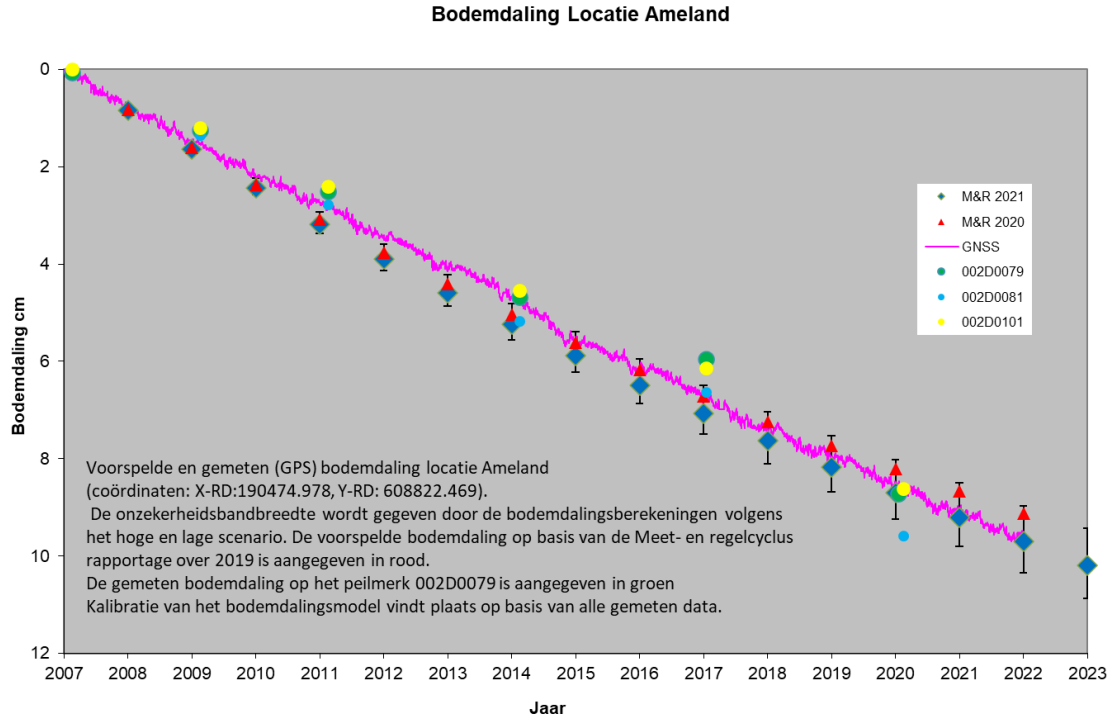
In de M&R-cyclus over de rapportagejaren sinds 2018 is meer gewicht toegekend aan de GNSS-metingen in de Waddenzee. Dit is gedaan door alleen de meetprecisie van de metingen mee te nemen. Voor de meetpunten op het eiland, de waterpaspunten, wordt ook de idealisatie precisie meegenomen. Door deze aanpassingen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

2.3.3.6 Bodemdaling GNSS-locaties

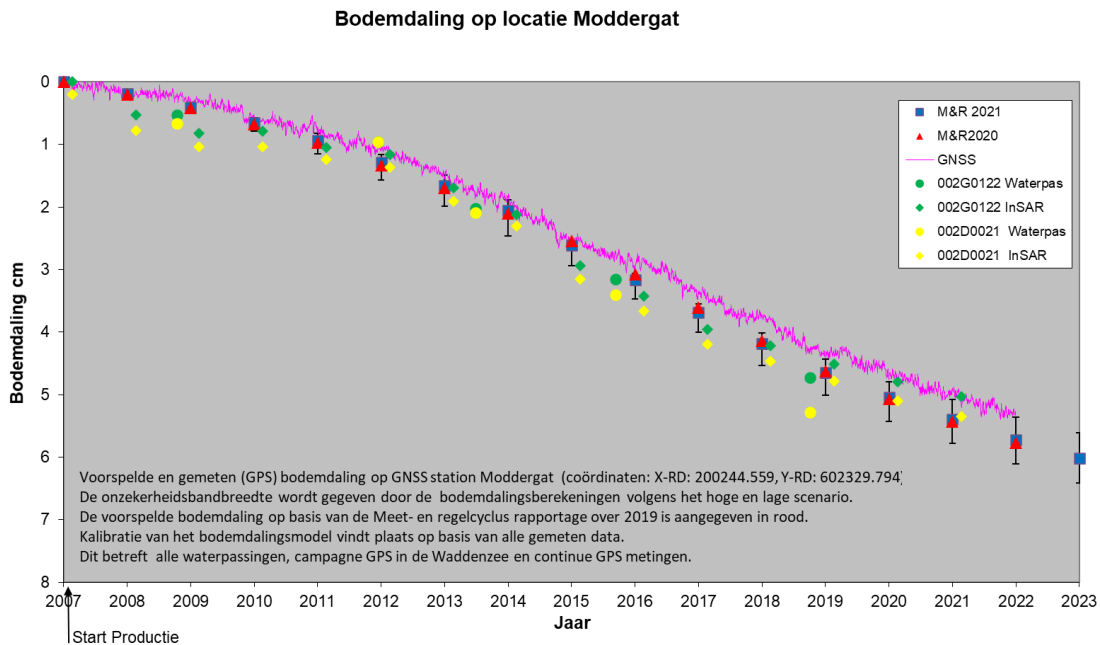
Figuur 2-11 tot en met Figuur 2-15 tonen de gemodelleerde en gemeten daling van 2007 tot en met 2021 op de continue GNSS-locaties. Deze hebben een signaalfunctie om veranderingen in het verloop van de bodembeweging tijdig te kunnen signaleren binnen het meet/rapportage interval van de vlakdekkende metingen (huidig interval van 3 jaar).

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. In 2019 is in verband met een validatiemeting een nieuw peilmerk 002D0137 geplaatst op 30 m afstand van 002D0079. Dit peilmerk is ingemeten ten opzichte van 002D0079, voordat 002D0079 onbruikbaar werd. In de waterpassing van 2020 is 002D0137 weer aangemeten, waarna de daling tussen 2019 en 2020 is overgebracht op het peilmerk 002D0079 om een continue serie te vormen. In Figuur 2-11 geeft de meting van 002D0079 dus ook de overgebrachte meting van 002D0137 aan. De gemeten bodemdaling wordt ook getoond op twee andere peilmerken in de buurt, namelijk 002D0081 en 002D0101.

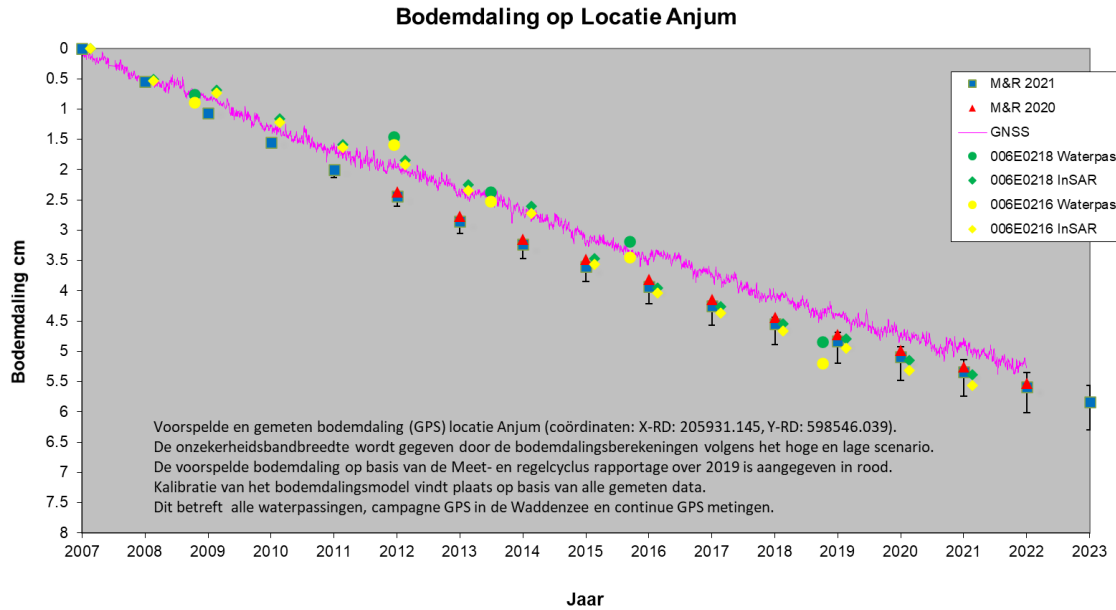
In Figuur 2-12, Figuur 2-13 en Figuur 2-14 is waar te nemen dat de meetfrequentie op de locaties van de waterpaspunten hoger ligt. Dit is het resultaat van de jaarlijkse overbrenging van naburige InSAR data op de betreffende punten met een zoekstraal van 500m.



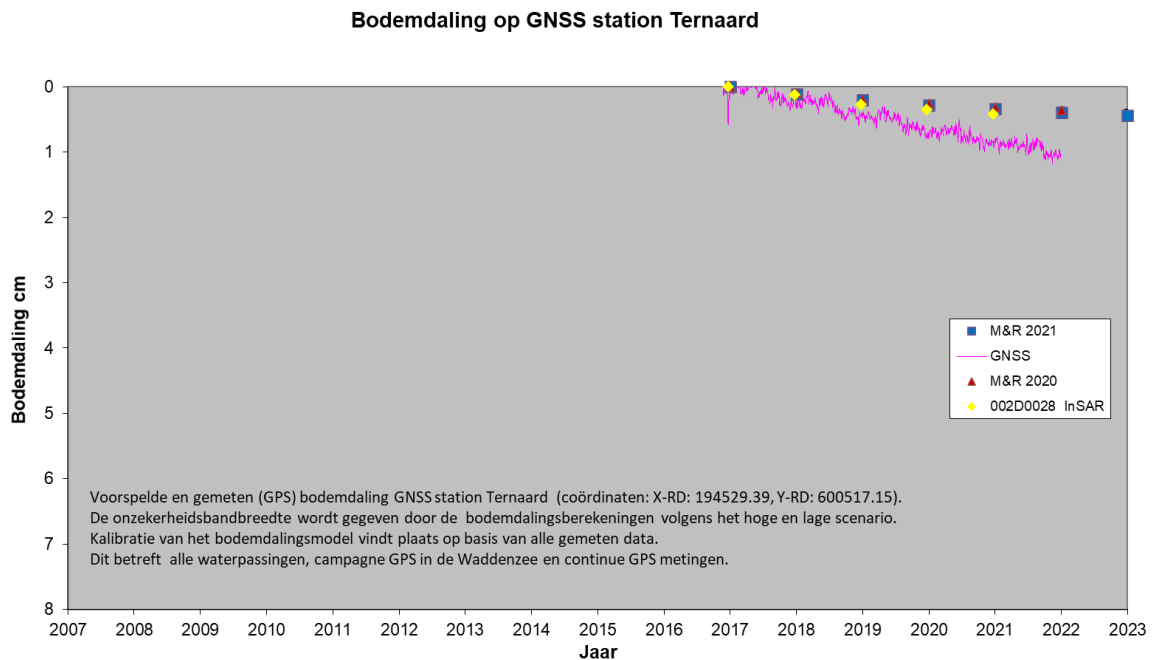
Figuur 2-11: Voorspelde en gemeten (GNSS) bodemdaling locatie Ameland (coördinaten: X-RD:190474.978, Y-RD: 608822.469). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2020 is aangegeven in rood. In groen en geel is de gemeten bodemdaling op de peilmerken 002D0079, 002D0081 en 002D0101 middels waterpassing aangegeven.



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 2020 is aangegeven in rood. In groen en geel is de gemeten bodemdaling op peilmerk 002G0122 en 002G0121 (dicht bij het GNSS-punt) middels waterpassing en InSAR aangegeven.

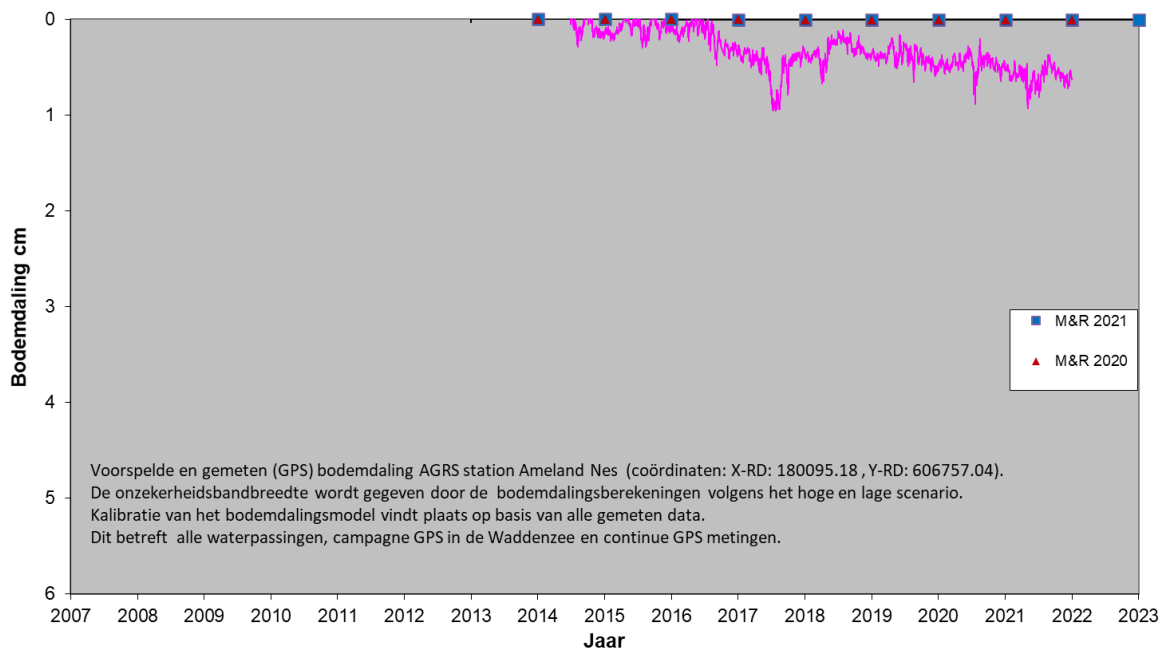


Figuur 2-13: Voorspelde en gemeten bodemdaling (GNSS) op de GNSS-locatie Anjum (coördinaten: X-RD: 205931,145, Y-RD: 598546,039). De onzekerheidsbandbreedte wordt gegeven door de bodemdalingberekeningen volgens het hoge en lage scenario. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2020 is aangegeven in rood. In oranje en geel is de gemeten bodemdaling op peilmerk 006E0216 en 006E0218 (dicht bij het GNSS-punt) middels waterpassing en InSAR aangegeven.



Figuur 2-14: Voorspelde en gemeten bodemdaling (GNSS) op de GNSS-locatie Ternaard (coördinaten: X-RD: 194529,39, Y-RD: 600517,15). De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2020 is aangegeven in rood. 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. In geel is de gemeten bodemdaling op peilmerk 002D0028 (dicht bij het GNSS-punt) middels InSAR aangegeven.

Bodemdaling op AGRS station Ameland Nes



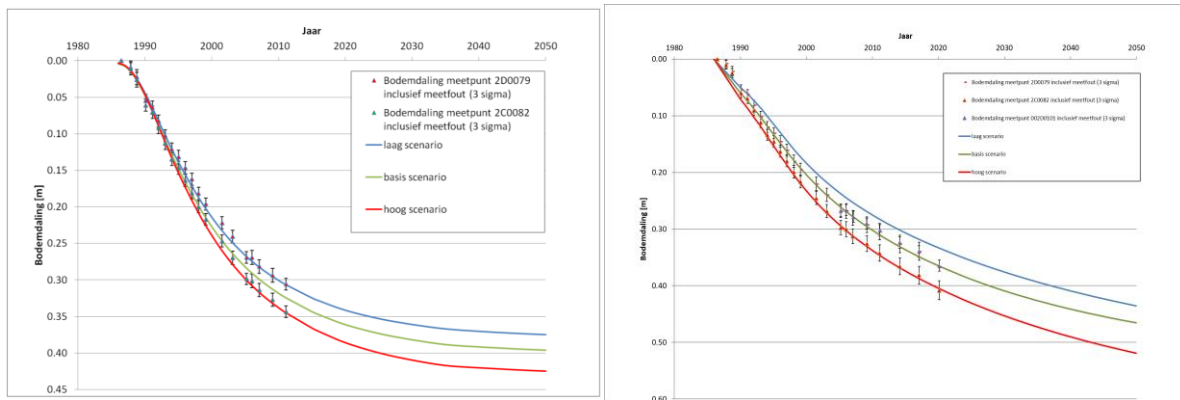
Figuur 2-15: Voorspelde en gemeten bodemdaling op het AGRS-station Ameland Nes (coördinaten: X-RD: 180095,18, Y-RD: 606757,04). De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2020 is aangegeven in rood. Alle scenario's voor Ameland geven nauwelijks bodemdaling op dit punt waardoor de onzekerheidsbandbreedte zeer gering is. Hierdoor vallen de resultaten van de scenario's op elkaar.

2.3.3.7 Ameland bodemdaling

In het winningsplan Ameland (Referentie 26) 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 zijn 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 2021 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. De belangrijkste veranderingen die het verschil verklaren zijn het RTCiM compactiemodel dat nu in de M&R cyclus wordt gebruikt t.o.v. het time-decay model dat in 2011 voor het winningsplan werd gebruikt en de veranderde inzichten in het aquifergedrag.



Figuur 2-16: Links; bodemdaling en metingen volgens het winningsplan Ameland uit 2011 (Referentie 26). Rechts; Maximale bodemdaling volgens het laag, basis en hoog scenario uit deze M&R rapportage in vergelijking met de meetpunten 2D0079 en 2C0082.

2.3.3.8 Autonome diepe-bodembeweging

In het advies van de Auditcommissie over de Meet- en regelcyclus van 2020 (Referentie 32) wordt aanbevolen om de autonome diepe-bodembeweging 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 orde grootte en mogelijke lokale verschillen van de autonome diepe-bodembeweging zouden kunnen zijn in het Waddengebied, en het effect van een eventuele correctie in de procedures van de Meet- en Regelcyclus.

In de confrontatie workflow die in de Meet- en Regelcyclus wordt toegepast, krijgen geomechanische modellen (de scenario's) een waarschijnlijkheid op basis van hun passing met geodetische metingen. Geodetische metingen zijn relatief in ruimte en tijd; dit geldt voor zowel waterpassen, InSAR als GNSS (GPS). Bij waterpassen en GNSS worden hoogteverschillen tussen respectievelijk peilmerken en stations gemeten. InSAR metingen betreffen hoogteverschillen tussen naburige reflecterende objecten, tussen verschillende SAR opnamen in de tijd.

Autonome diepe-bodembeweging

Bodembeweging dieper dan de top van de Pleistocene laag, die door andere (geologische) processen dan de gaswinning wordt veroorzaakt (zoals isostasie, de beweging van de aardkorst om een evenwicht te bereiken, bijvoorbeeld na het wegsmelten van ijs uit een ijstijd).

Voor het monitoren van deformatie worden verschilmetingen in ruimte- en tijd beschouwd ('dubbel-differenties'). In de confrontatie workflow wordt de passing met de verschillende geomechanische modellen ook beoordeeld op 'dubbel-differentie' niveau. Dit betekent dat alleen de relatieve (tussen twee meetpunten en tussen twee tijdstippen) component in ruimte en tijd van de autonome diepe-bodembeweging een effect kan hebben op de passing van geomechanische modellen met geodetische metingen.

Door toegepaste processing methodieken zijn de verschillende geodetische meettechnieken op een verschillende manier gevoelig voor de relatieve component van autonome diepe-bodembeweging:

- De relatieve hoogteverschillen die in waterpassingen gemeten worden, worden beïnvloed door een autonome diepe-bodembewegingscomponent indien aanwezig; echter alleen door het relatieve gedeelte en niet door een absolute (constante) component.
- Bij GNSS worden de coördinaten van de referentiestations jaarlijks gecontroleerd op stabiliteit en waar nodig aangepast. In theorie zouden relatieve verschillen ten gevolge van een aanwezige autonome diepe-bodembewegingscomponent hierin worden verdisconteerd. In de praktijk zien we in de doorgevoerde aanpassingen geen uniformiteit terug die duiden op een diepe-bodembewegingscomponent. Echter, deze kan voor de huidige tijdsperiode van de Waddenwinningen (15 jaar) nog te klein zijn om significant meetbaar te zijn.
- Bij InSAR wordt al een ruimtelijke (lineaire) trend (vanwege grootschalige atmosferische effecten en residuele baanfouten) geschat, en daardoor impliciet gecorrigeerd voor een mogelijk aanwezige diepe-bodembewegingscomponent.

Naast de gevoeligheid van geodetische metingen voor de relatieve component van autonome diepe-bodembeweging, is het van belang te weten wat de te verwachten magnitude en het ruimtelijk patroon is.

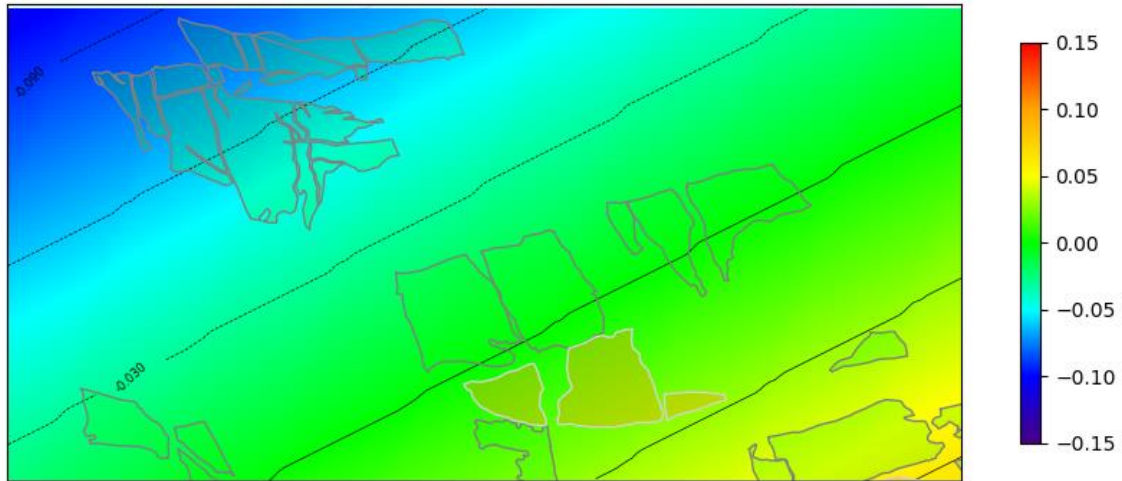
In het advies van de Auditcommissie wordt verwezen naar het TNO rapport 'Bodemdaling in Nederland' (Referentie 34). Deze bevat een figuur met verticale bewegingen van het Pleistoceen bepaald uit waterpasmetingen van ondergrondse merken uit 2000. Naar dit figuur wordt in het TNO rapport verwezen voor de kantelende beweging langs een noordoost-zuidwest lijn in Nederland veroorzaakt door isostasie. Verder wordt verwezen naar een recentere bepaling van diepe-bodembeweging in Leusink, 2003 (Referentie 27). Hier wordt de geologische bodembeweging berekend op basis van waterpasgegevens over heel Nederland. Data in Noord Nederland is buiten beschouwing gelaten vanwege de gaswinning. Isostasie is hier, naast delfstofwinning, een oorzaak van de beweging van meetpunten (ondergrondse merken) die resulteert in een schatbaar (klein) signaal. De orde grootte van de geologische bodembeweging is ca. 0,4 mm/jaar over een afstand van 100 km, en bij benadering een lineair ruimtelijk patroon. De patronen zijn echter niet geheel gelijk indien verschillende gebieden worden geprocessed.

Beide publicaties (Referentie 34, Referentie 27) verwijzen tevens naar Kooi, 1997 (Referentie 33). Dit werk heeft ook tot doel diepe-bodembeweging af te leiden uit de waterpasdata van Rijkswaterstaat (de data na start van de gaswinning buiten beschouwing latende voor de betreffende gebieden). Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen tektoniek, isostasie en compactie. Verschillende modellen kunnen worden bepaald op basis van de data. De ruimtelijke patronen verschillen, maar de orde grootte van relatieve verschillen in het gebied zijn van de Waddenwinningen zijn ca. 0,1-0,2 mm/jaar.

Ondanks dat bovengenoemde referenties variërende resultaten opleveren, is de ruimtelijke component bij benadering een kanteling noordoost-zuidwest richting, en de orde grootte tienden van mm/jaar.

Om het effect van een mogelijke component van autonome diepe-bodembeweging te kwantificeren is er een extra run van de confrontatie-workflow uitgevoerd, waarbij is gecorrigeerd voor autonome diepe-bodembeweging. Hierbij is uitgegaan van de benadering van het patroon van autonome diepe-bodembeweging in de noordoost-zuidwest richting, met een ruimtelijk relatief verschil in het Waddenzeegebied van 0,2 mm/jaar (+/- ~0,1 mm/jaar onzekerheid), zie Figuur 2-17. Dit is een grotere magnitude dan de isostasie component in Kooi, 1997 (Referentie 33), en komt bij benadering overeen met de diepe-bodembeweging bepaald uit peilmerkbewegingen in Leusink, 2003 (Referentie 27). Zoals hierboven is toegelicht wordt deze correctie al impliciet toegepast bij InSAR, en is daarom alleen van de gemeten bodembeweging afgetrokken die met behulp van de waterpassing en GNSS-metingen is bepaald. De confrontatie tussen geodetische data en

geomechanische modellen gebeurt op dubbel-differentie niveau (tussen twee peilmerken en tussen twee tijdstippen). De relatieve correcties die de dubbel-differenties ondergaan zijn dus afhankelijk van de afstand tussen de meetpunten van de dubbel-differenties en zullen zeer klein zijn indien het naburige meetpunten betreffen.



Figuur 2-17: Benaderde mogelijk autonome diepe-bodembeweging in het waddengebied, in mm/jaar.

Na correctie van de dubbel-differenties op basis van waterpas- en GNSS metingen zijn in de confrontatie met de geomechanische modellen de χ^2/n toetsgrootheden berekend. De verschillen in de χ^2/n zijn zeer klein. Het effect op de kalibratie uit zich in het derde cijfer achter de komma (kleiner dan 0,2%) en heeft tot gevolg dat er geen andere bodemdalingsscenario's worden geselecteerd. Dit wordt getoond in Tabel 2-11.

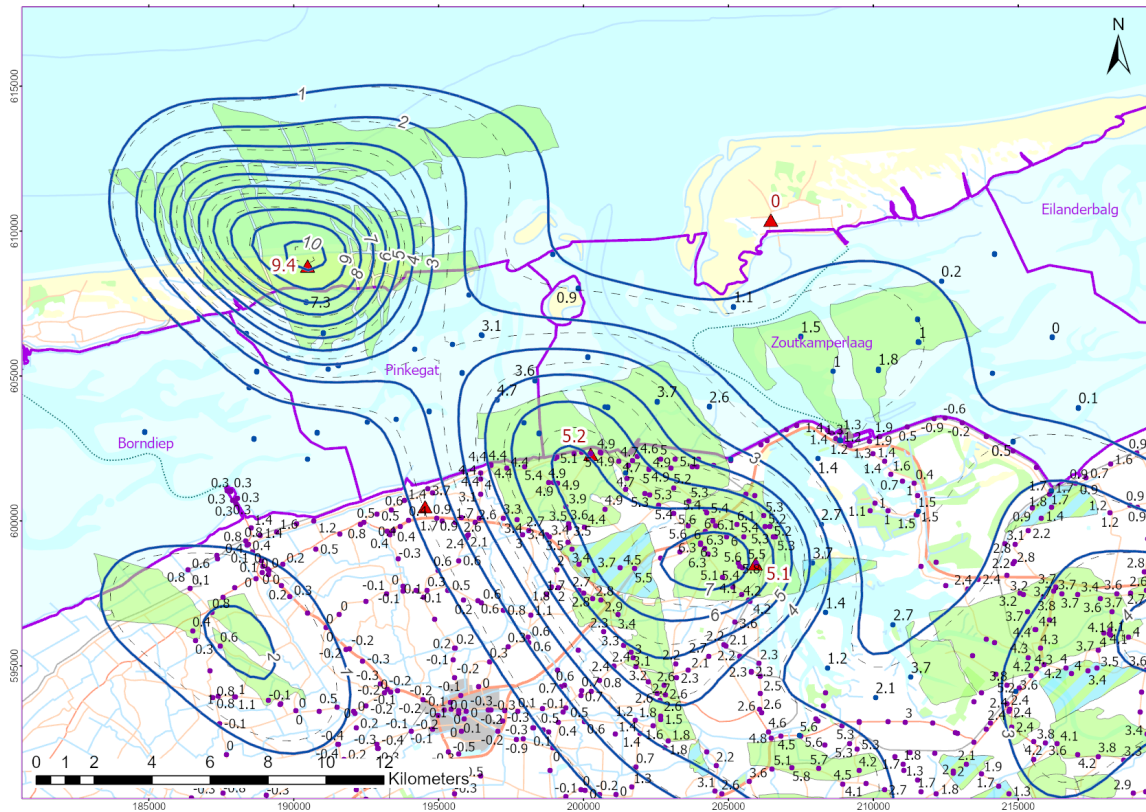
Tabel 2-11: Minimale χ^2 toetsgrootheid voor de vier kalibratiegebieden, zonder en met gebruikmaking van de autonome daling.

Kalibratiegebied	Minimale χ^2/n toetsgrootheid confrontatie, zonder autonome diepe-bodembeweging	Minimale χ^2/n toetsgrootheid confrontatie met autonome diepe-bodembeweging
Ameland	1,34670	1,34441
Nes/Moddergat	1,07362	1,07198
Lauwersoog/Vierhuizen	0,81973	0,81872
Anjum	1,27464	1,27493

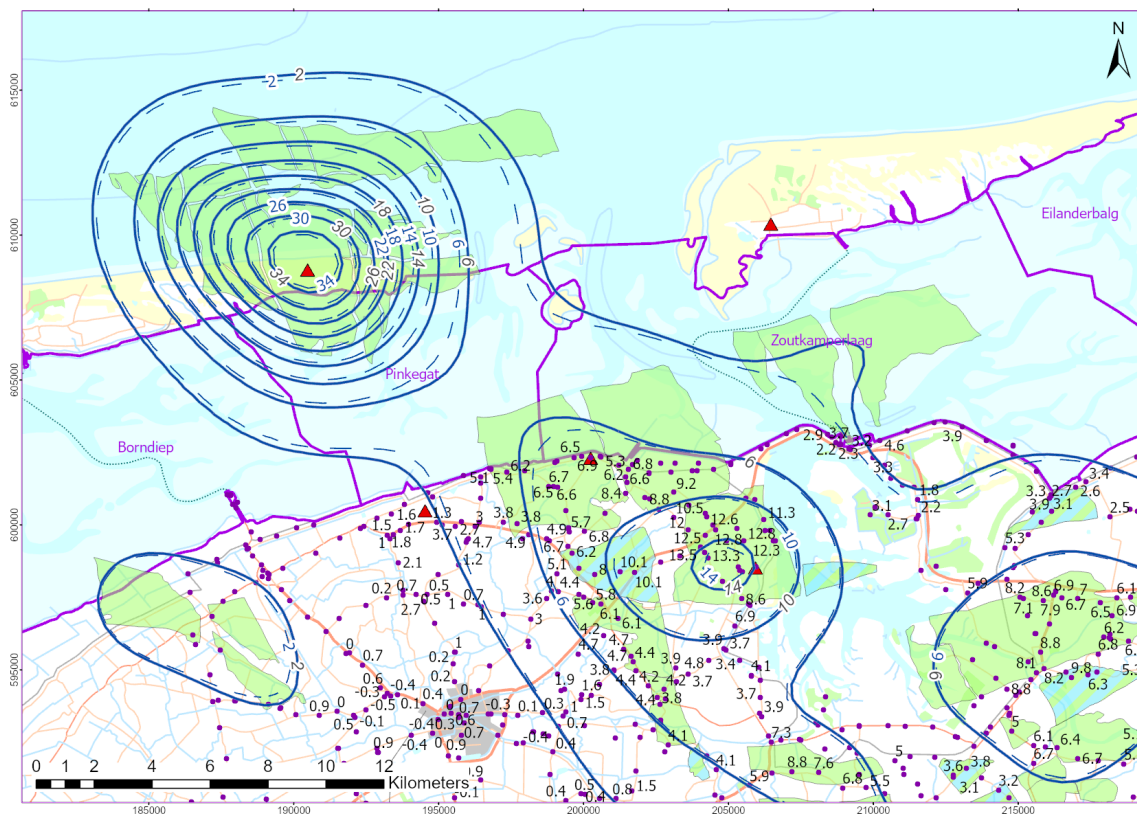
2.3.4 Vergelijking van gemodelleerde bodemdaling met resultaten van campagne GNSS

Naast een vergelijking in de vorige paragraaf van de resultaten van het geomechanisch model met het geodetisch model en de continue GNSS-metingen, wordt een vergelijking van het model (volgens het basisscenario) met de campagne GNSS-metingen getoond in Figuur 2-18. De modelcontouren (doorgetrokken blauwe lijnen) worden per jaar berekend op de eerste dag van elk jaar. De contouren zijn gepresenteerd voor 1-1-2022. Ter vergelijking zijn de contouren (onderbroken lijn) weergegeven die het berekende resultaat weergeven per 1-1-2021 zoals gerapporteerd in de vorige rapportage M&R 2020 (Referentie 6).

In Figuur 2-19 is de gemodelleerde daling vanaf de start van winning tot en met 1 januari 2021 getoond. Deze bodemdaling is vergeleken met de InSAR metingen (gecombineerd met de waterpasmetingen t/m 2018) op het vaste land.



Figuur 2-18: Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2022) door gaswinning sinds de nulmeting in de Waddenzee in 2006. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens de het verwachte scenario. De gestreepte contouren geven de bodemdaling van 2020 (1-1-2021) weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2020. De blauwe punten met label in de Waddenzee representeren de peilmerken met de gemeten hoogteverschillen vanaf 2006 (nulmeting Waddenzee) tot de laatst uitgevoerde meting in mei 2021. De paarse punten met label op het vaste land representeren de peilmerken met de met InSAR gemeten hoogteverschillen vanaf eind 2006 tot eind 2020. De rode waarden geven de daling aan van de permanente GNSS-stations in de periode feb. 2007- dec. 2021.



Figuur 2-19: Totale bodemdaling in cm (status modelcontour in blauw: 1-1-2022) sinds de start van de gaswinning in het gebied (1986). De gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2021 volgens de M&R-rapportage over 2020. De rode driehoeken geven de posities van de GNSS stations aan. De paarse punten met label op het vaste land representeren de peilmerken met de met InSAR gemeten hoogteverschillen vanaf eind 1997 tot eind 2020.

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

2.3.4.1 Vergelijking tussen M&R 2020 en M&R 2021 bodemdalingsscenario's

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

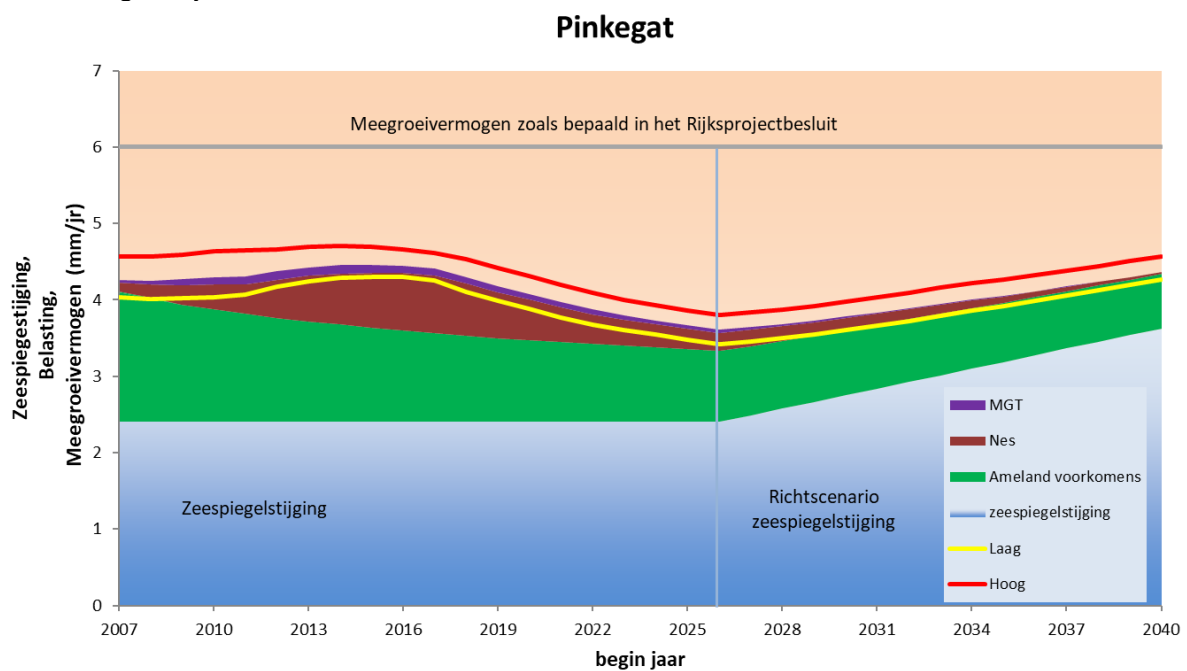
- Het bodemdalingsmodel is voor beide M&R-rapportages gelijk aan het LTS-II bodemdalingsmodel.
- De resultaten van de modellering in de M&R 2021 cyclus zijn zeer vergelijkbaar met de resultaten van de M&R 2020 rapportage.
- De variatie in reservoirrealisaties die onderliggend zijn aan de hoge, basis en lage bodemdalingsscenario's is groter vergeleken met de vorige rapportage. Dit wordt veroorzaakt doordat het zoekgebied waarin de geomechanische parameters worden bepaald iets groter is dan in de vorige M&R. Hierdoor is er een grote overlap tussen mogelijke bodemdalingsscenario's en kan er voor meerdere reservoirrealisaties een bodemdalingsscenario gevonden worden dat redelijk tot goed bij de metingen past.

2.4 Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4)

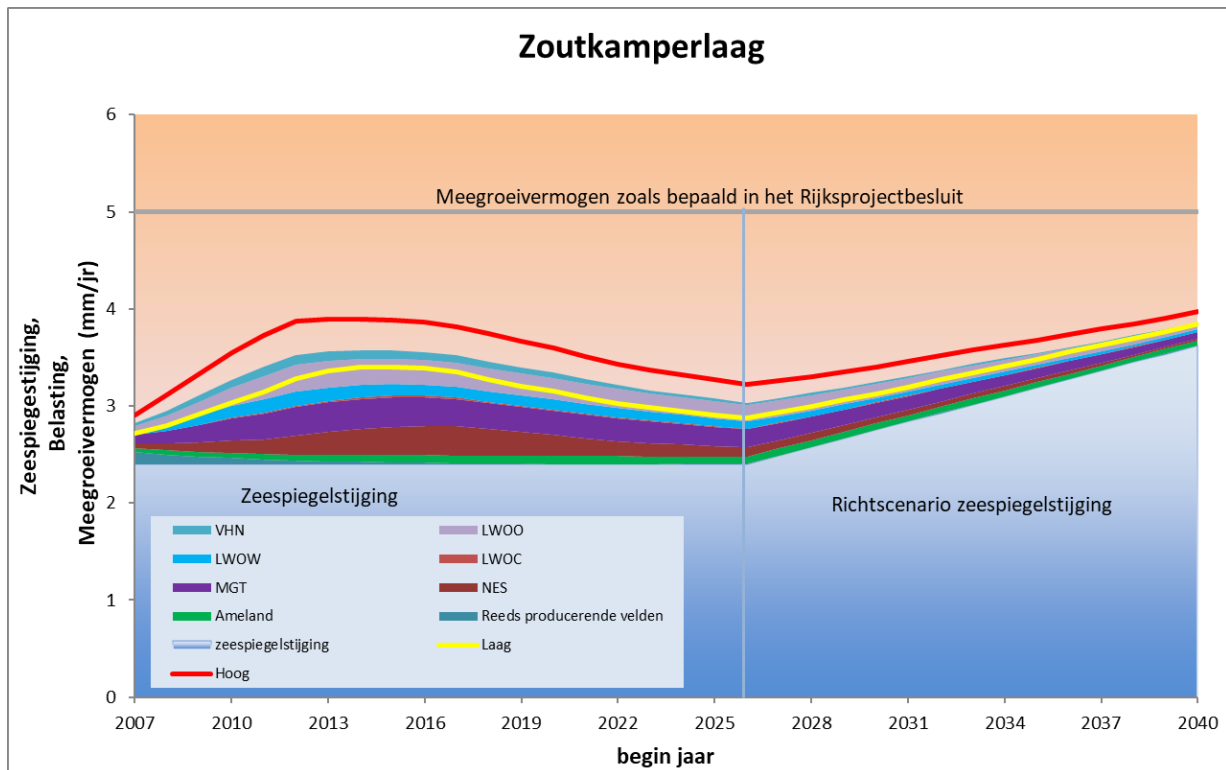
2.4.1 Bepaling volume en gemiddelde daling

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 $148 \times 10^6 \text{ m}^2$. 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 2-20 en Figuur 2-21. Voor het basisscenario is onderscheid gemaakt in de bijdrage van de individuele voorkomens d.m.v. de gekleurde vlakken. Voor de hoge en lage scenario's, zoals bepaald uit de onzekerheidsanalyse, is de belasting getoond d.m.v. de rode en gele lijnen.



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



Figuur 2-21: Belasting in Zoutkamperlaag ten gevolge van gasproductie voor de verschillende scenario's. Het verwachtingsscenario is weergegeven als de bovengrens van de gekleurde vlakken die de bijdrage per voorkomen weergegeven. Het lage en hoge scenario zijn getoond als lijnen (geel: laag scenario, rood: hoog scenario).

Voor de berekening van de verwachte bodemdaling in de toekomst en de bijbehorende volumes en bodemdalingssnelheden is uitgegaan van het basisscenario. Om de onzekerheid voor de volumes en bodemdalingssnelheden te bepalen voor de individuele voorkomens is gebruik gemaakt van het hoge en lage scenario (zie Tabel 2-12 t/m Tabel 2-15).

2.4.2 Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting

Tabel 2-12 en Tabel 2-13 tonen de door gaswinning veroorzaakte bodemdalingsvolumes met bijbehorende onzekerheid per voorkomen voor de jaren J-3 t/m J+2 waarbij J-1 het rapportagejaar (2021) is. Voor de volledigheid zijn ook de resultaten voor het jaar 2005 tot en met 2024 getoond.

De volgende afkortingen voor de voorkomens zijn gebruikt in de tabellen, waarbij LWO voor Lauwersoog staat

Tabel 2-12: 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)	Moddergat Volume (onzekerheid)
2005	116 (103 - 132)		
2006	106 (95 - 121)		
2007	101 (90 - 116)	10 (7 - 13)	3 (3 - 7)
2008	96 (85 - 109)	15 (11 - 19)	3 (3 - 5)
2009	92 (81 - 106)	17 (12 - 22)	3 (3 - 7)
2010	87 (77 - 100)	23 (17 - 31)	3 (3 - 7)
2011	85 (74 - 97)	29 (22 - 38)	3 (3 - 8)
2012	81 (71 - 93)	28 (22 - 37)	3 (3 - 8)
2013	79 (69 - 91)	34 (31 - 40)	3 (3 - 9)
2014	76 (66 - 88)	54 (43 - 66)	3 (3 - 8)
2015	74 (64 - 86)	53 (53 - 54)	3 (3 - 7)
2016	71 (62 - 82)	49 (47 - 54)	3 (3 - 6)
2017	70 (60 - 81)	47 (45 - 52)	3 (3 - 6)
2018	67 (58 - 77)	42 (39 - 46)	3 (3 - 6)
2019	66 (56 - 76)	34 (31 - 38)	3 (3 - 5)
2020	64 (55 - 74)	27 (24 - 30)	3 (3 - 5)
2021	63 (54 - 73)	25 (22 - 28)	3 (3 - 5)
2022	62 (53 - 72)	22 (19 - 24)	3 (3 - 4)
2023	61 (53 - 71)	19 (16 - 21)	3 (3 - 4)
2024	59 (50 - 68)	17 (14 - 19)	3 (3 - 4)

Tabel 2-13: Jaarlijks bodemdalingssnelheid (in duizend m³) in Zoutkamperlaag voor de Anjum en Wadden voorkomens, met tussen haakjes de bandbreedte tussen het hoge en lage scenario.

Kobergingsgebied Zoutkamperlaag								
Jaar	Anjum voorkomen	Ameland	Nes	Moddergat	LWO-Centraal	LWO-West	LWO-Oost	Vierhuizen-Oost
2005	24 (18 - 25)	3 (2 - 3)						
2006	19 (15 - 24)	3 (2 - 3)						
2007	15 (12 - 23)	3 (2 - 3)	9 (7 - 12)	26 (18 - 35)				
2008	13 (11 - 21)	3 (2 - 3)	13 (10 - 17)	23 (15 - 31)		9 (2 - 13)	5 (1 - 7)	8 (2 - 11)
2009	10 (8 - 18)	3 (2 - 3)	16 (12 - 20)	32 (21 - 43)		30 (13 - 48)	37 (8 - 51)	16 (7 - 22)
2010	8 (6 - 15)	3 (2 - 4)	22 (17 - 28)	33 (25 - 45)		24 (12 - 40)	42 (10 - 57)	17 (14 - 27)
2011	7 (5 - 13)	3 (2 - 4)	27 (21 - 35)	48 (45 - 54)		24 (10 - 37)	44 (19 - 60)	16 (15 - 25)
2012	5 (4 - 12)	4 (3 - 5)	27 (21 - 35)	48 (47 - 49)	4 (1 - 7)	20 (9 - 30)	42 (26 - 61)	15 (13 - 23)
2013	4 (3 - 10)	4 (3 - 5)	33 (31 - 39)	51 (47 - 54)	4 (2 - 7)	18 (9 - 26)	40 (29 - 63)	14 (13 - 22)
2014	2 (2 - 8)	5 (3 - 6)	51 (42 - 64)	48 (43 - 52)	4 (3 - 7)	17 (9 - 25)	40 (29 - 65)	13 (12 - 21)
2015	2 (1 - 6)	5 (4 - 6)	51 (50 - 52)	42 (37 - 46)	3 (2 - 5)	15 (9 - 23)	37 (27 - 62)	12 (11 - 19)
2016	1 (1 - 5)	5 (4 - 6)	48 (46 - 52)	40 (35 - 42)	2 (1 - 3)	16 (9 - 25)	37 (24 - 59)	11 (10 - 17)
2017	1 (0 - 4)	5 (4 - 6)	46 (44 - 50)	40 (36 - 42)	2 (1 - 3)	17 (10 - 28)	37 (23 - 58)	11 (9 - 16)
2018	0 (0 - 3)	5 (4 - 6)	40 (38 - 45)	39 (36 - 40)	2 (1 - 3)	17 (10 - 27)	36 (22 - 55)	10 (9 - 15)
2019	2 (0 - 2)	5 (4 - 6)	33 (30 - 37)	39 (34 - 39)	2 (1 - 3)	16 (10 - 26)	34 (21 - 51)	8 (8 - 11)
2020	1 (0 - 2)	5 (4 - 6)	26 (24 - 29)	35 (31 - 36)	1 (1 - 2)	15 (9 - 25)	31 (19 - 46)	7 (7 - 10)
2021	1 (0 - 2)	5 (4 - 6)	24 (22 - 28)	36 (30 - 36)	1 (1 - 2)	15 (9 - 25)	29 (17 - 43)	6 (6 - 9)
2022	1 (0 - 2)	5 (4 - 6)	21 (19 - 24)	35 (28 - 35)	1 (1 - 1)	14 (9 - 23)	28 (16 - 42)	6 (6 - 8)
2023	1 (0 - 2)	5 (4 - 6)	18 (16 - 21)	32 (26 - 33)	1 (1 - 1)	13 (8 - 22)	27 (16 - 41)	6 (5 - 7)
2024	1 (1 - 2)	5 (3 - 6)	17 (14 - 19)	30 (24 - 32)	1 (0 - 1)	12 (7 - 20)	26 (16 - 40)	5 (5 - 6)

Onderstaande Tabel 2-14 geeft de bodemdalingssnelheid *S* voor het rapportagejaar 2021 en belasting *B* op 1-1-2022. De onzekerheidsbandbreedte wordt gekozen op basis van de combinatie van hoge en lage reservoirrealisaties die gedefinieerd zijn voor de verschillende voorkomens (lage en hoge scenario; respectievelijk gele en rode lijn in Figuur 2-20 en Figuur 2-21).

Tabel 2-14: Bodemdalingssnelheid (mm/jr) voor het rapportagejaar 2021 en belasting *B* (mm/jr) op 1-1-2022 met onzekerheid (bandbreedte) per kobergingsgebied.

Zoutkamperlaag		Pinkegat	
S (laag-hoog)	B (laag-hoog)	S (laag-hoog)	B (laag-hoog)
0,84 (0,65 - 1,06)	0,81 (0,63 - 1,03)	1,53 (1,33 - 1,76)	1,47 (1,28 - 1,69)

2.4.3 Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting

Tabel 2-15 toont de prognose van de bodemdalingssnelheid per kobergingsgebied 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 2-15: Bodemdalingssnelheid, Belasting en Gebruiksruimte (mm/jr) met onzekerheid (bandbreedte) per kombergingsgebied per jaar.

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

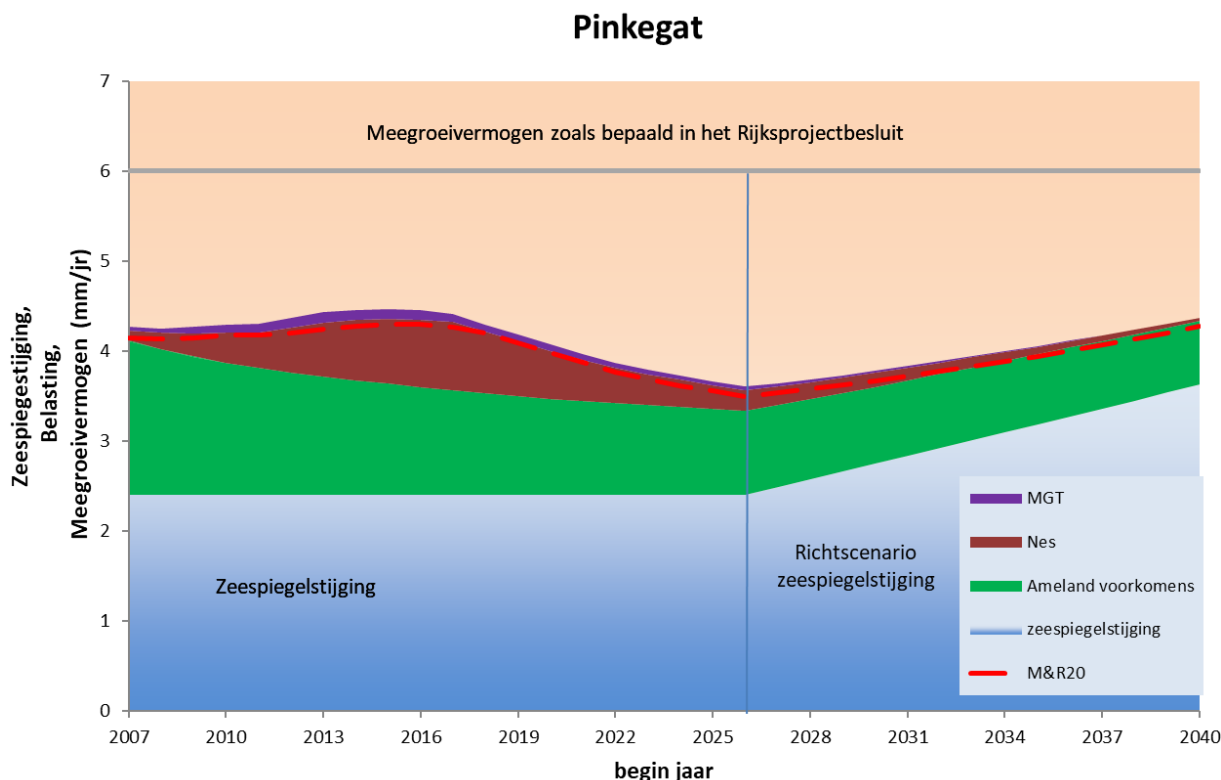
2.5 Indien nodig aanpassen productie (stap 5)

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 2-15). 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 2-20 en Figuur 2-21).

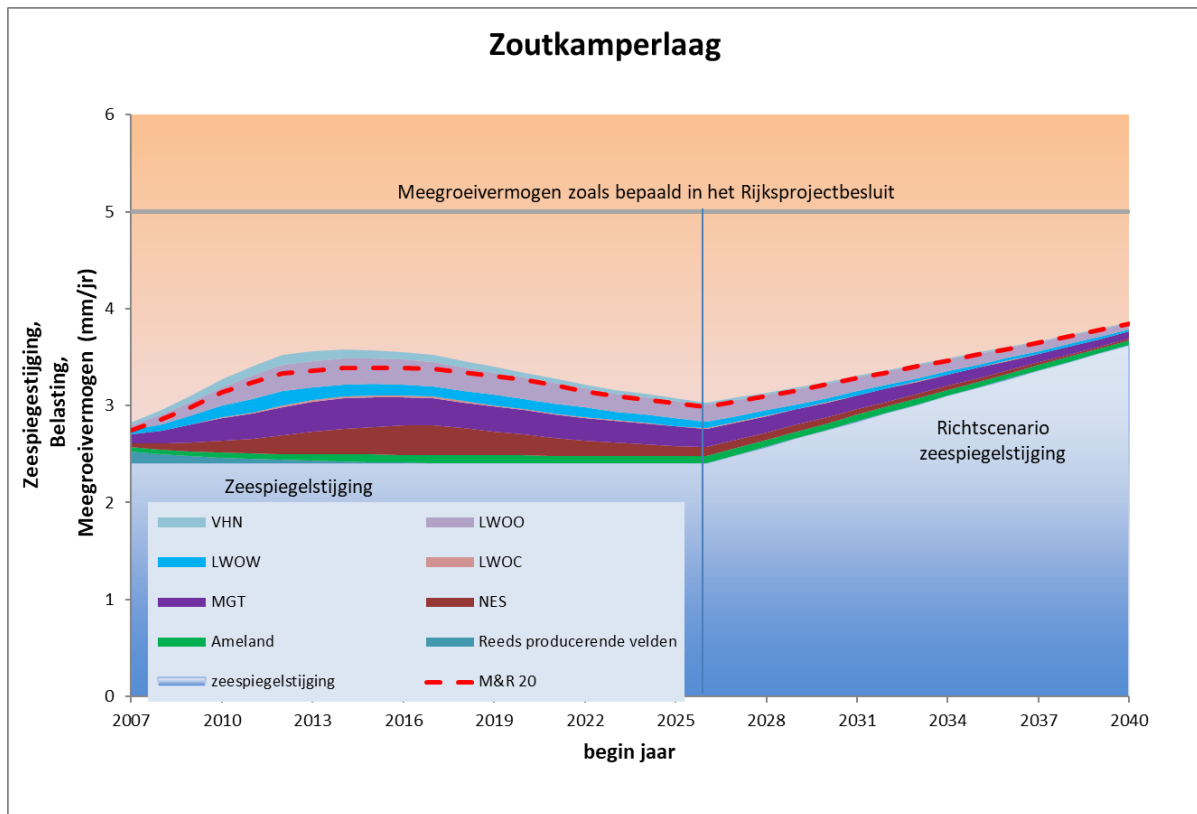
2.6 Actualiseren (stap 6)

Figuur 2-22 en Figuur 2-23 tonen de geactualiseerde berekeningen van de belastingen voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. In de figuren is tevens de belasting, weergegeven zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclus rapportage over 2020 (gerapporteerd in 2021).

De berekende belasting in de kombergingen is vergelijkbaar met die berekend in de M&R-cyclus 2020. Het verschil is voor het rapportagejaar 2021 ongeveer 0,1 mm/jaar voor Pinkegat en nog minder voor Zoutkamperlaag.



Figuur 2-22: Voorspelde belasting inclusief zeespiegelstijging voor het kombergingsgebied Pinkegat. De rood gestreepte lijn geeft de berekende belasting aan zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclusrapportage over 2020.



Figuur 2-23: Voorspelde belasting inclusief zeespiegelstijging voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. De rood gestreepte lijn geeft de berekende belasting aan zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclusrapportage over 2020.

2.7 Remwegscenario

Om het effect van de “hand aan de kraan” systematiek inzichtelijker te maken, is in de rapportage over 2019 (Referentie 6) een remwegscenario opgenomen. De nieuwe berekeningen in de 2021 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
NAM's Environmental Agenda (periode 2018-2021)	Met betrekking tot de gaswinning onder de Waddenzee wordt specifiek verwezen naar het 'hand aan de kraan'-principe en de ontwikkelde Long Term Subsidence studies.
Toewijzen verantwoordelijkheden	Het 'Hand aan de Kraan' (HadK) team, bestaande uit verschillende technisch en niet-technische disciplines, heeft gedurende het jaar haar beheer uitgevoerd.
Monitoring, metingen en rapportages	Bodemdalings, reservoirdruk- en biotiekmetingen zijn uitgevoerd volgens plan.
Interne Controle	Vergunningscompliance checks, veldbezoeken en process safety reviews zijn uitgevoerd.

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

Registratie	Bewaarplaats NAM
Winningsplannen	Sharepoint: Vigerende Winningsplannen
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

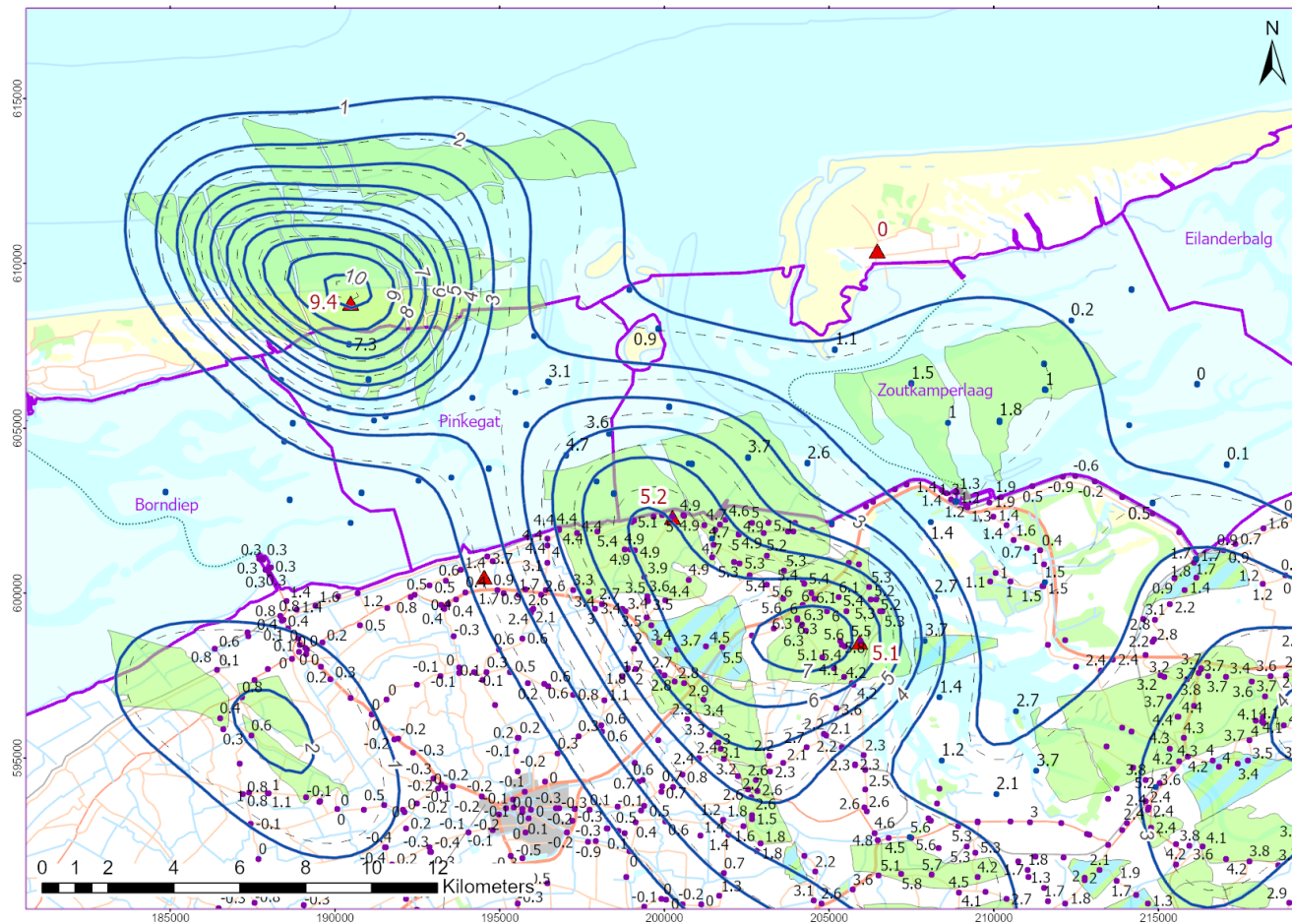
4 Conclusies

Op basis van de evaluatie gepresenteerd in dit rapport volgens het Meet-en Regelprotocol wordt geconcludeerd dat de belasting in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag vergelijkbaar is met de belasting volgens de M&R-cyclus over 2020. De belasting blijft evenals in de voorgaande jaren ruim binnen de toegestane gebruiksruimte. Daarom worden er geen maatregelen genomen om de productie vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen bij te stellen.

5 Referenties

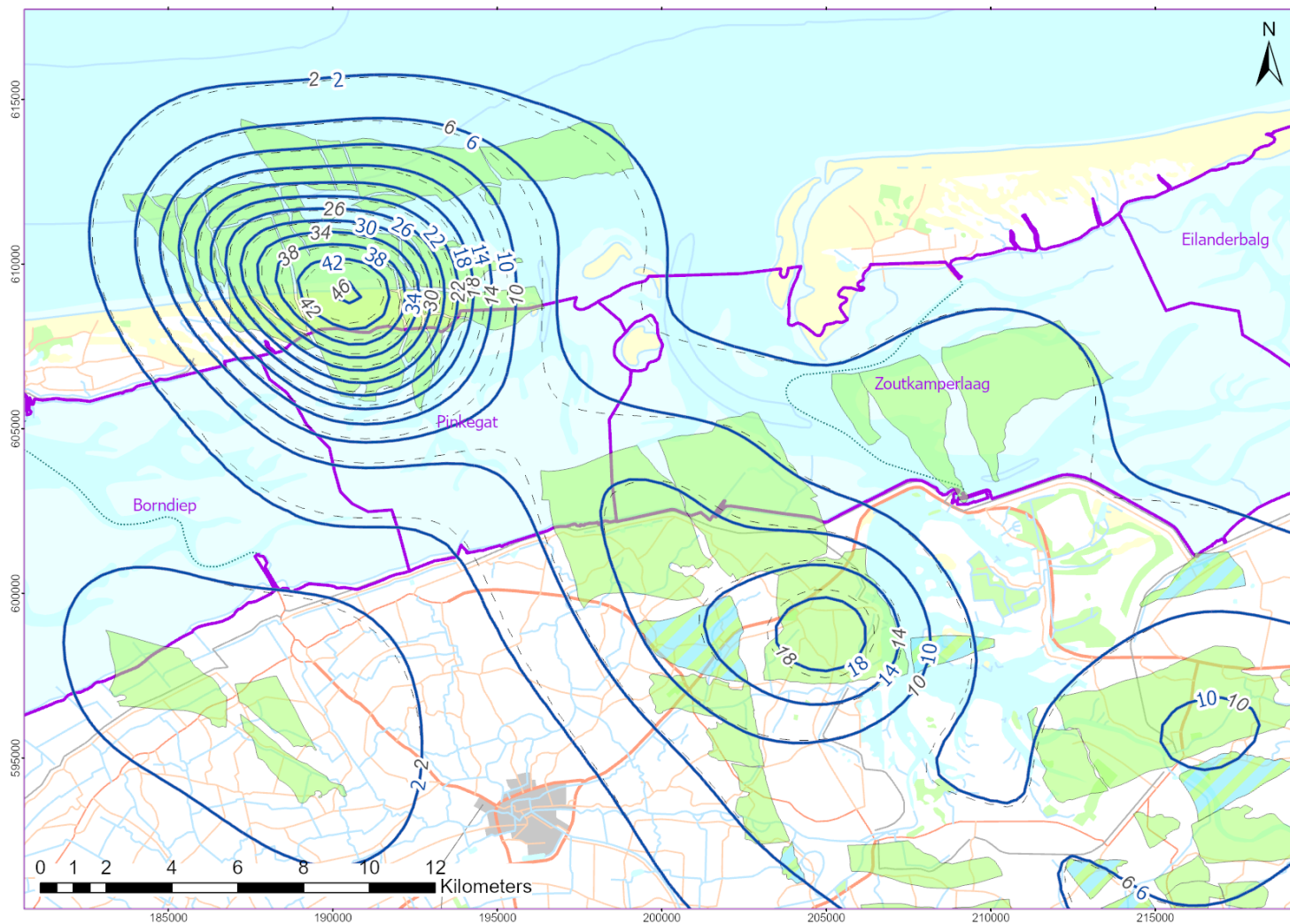
- Referentie 1 NAM (2011) *Wijziging winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen* ([link](#)).
- Referentie 2 *Staatscourant (2013) Kennisgeving besluiten gaswinning Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, Ministerie van Economische Zaken* ([link](#)).
- Referentie 3 NAM (2021) *Gaswinning Moddergat, Lauwersoog, Vierhuizen: Actualisering meet- en regelprotocol 2021 EP202110200380* ([link](#))
- Referentie 4 NAM (2021) *Gaswinning Moddergat/Lauwersoog/Vierhuizen: Technische bijlage (bijlage 2) behorend bij het geactualiseerde Meet- en Regelprotocol 2021. EP202110200383* ([link](#))
- Referentie 5 *Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 – Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. Rapport RIKZ / 2004.025.* ([link](#))
- Referentie 6 NAM (2020a) *Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2019; Rapport EP202002200220, mei 2020.* ([link](#))
- Referentie 7 *GPS Survey NAM Waddenzee v. 1.26. 06-GPS B.V., 01/2022.*
- Referentie 8 *Check reference station coordinates NAM v.1.13. 06 GPS B.V., 06/2021.*
- Referentie 9 *NLGeo2004: het geoidemodel voor Nederland. Data-ICT-Dienst, Rijkswaterstaat.* ([link](#))
- Referentie 10 NAM (2015) *Wadden Sea Long-term Subsidence Studies – Overview report, EP201506209625.*([link](#))
- Referentie 11 *Pruiksma, J.P., Breunese, J.N., Thienen-Visser, K., & De Waal, H. (2015) Isotach formulation of the rate type compaction model for sandstone. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 78. 127-132. 10.1016/j.ijrmms.2015.06.002.*([link](#))
- Referentie 12 *Dynamic Reservoir Modelling of Wadden Fields for subsidence. Meet & Regel 2016. EP201703201178.* ([link](#))
- Referentie 13 NAM (2017) *Ensemble Based Subsidence application to the Ameland gas field – long term subsidence study part two (LTS-II) continued study.* ([link](#))
- 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* ([link](#))
- 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.* ([link](#))
- 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.* ([link](#))
- Referentie 18 NAM (2019) *Controle van de reservoirmodellen met de nieuwe drukmetingen van 2018. EP201904223961.* ([link](#))
- Referentie 19 *Meetregister bij het meetplan Waddenzee, Rapportage van de GPS-campagne Waddenzee/Lauwersmeer 2021, 8/2021. EP202108200114.*
- 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.* ([link](#))
- Referentie 21 *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.* ([link](#))
- Referentie 22 *Deltares (2010) Schade aan buisleiding door aardbeving. fase 1 inventarisatie.* ([link](#))

- Referentie 23 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 24 NAM (2019) Review and update of: Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen. ([link](#))
- Referentie 25 NAM (2015) Neotectonic Stresses in the Permian Slochteren Formation of the Groningen Field. ([link](#))
- Referentie 26 NAM (2011) Winningsplan Ameland 2011 (WP 2011) Verzoek om instemming wijziging winningsplan. ([link](#))
- Referentie 27 Leusink, J. (2003) Wat waterpasgegevens vertellen over geologische bodemdaling. ([link](#))
- Referentie 28 NAM (2020) Evaluatie van de doorlatendheid van breuken van de Waddenzee velden en implicaties voor bodemdaling. EP202007201552. ([link](#))
- Referentie 29 Meetregister bij het meetplan Waddenzee 2020, Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Ameland 2020, 5/2020, EP202004200936.
- Referentie 30 Meetregister bij het meetplan Waddenzee, Rapportage van satelliet radar interferometrie, Lauwersmeer 2021, 9/2021, EP202107202657.
- Referentie 31 Hans van der Marel: Comparison of GNSS Processing Methodologies for Subsidence Monitoring. NAM GNSS APM Project Report, TU Delft, 2020.
- Referentie 32 Auditcommissie Waddenzee (2021) Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2020. ([link](#))
- Referentie 33 Kooi, H. (1997) Contribution of tectonics, isostasy and natural compaction to vertical land movement in the Netherlands, Meetkundige Dienst Rijkswaterstaat MDGAP-9770. ([link](#))
- Referentie 34 Muntendam-Bos, A., et al. (2006) Bodemdaling in Nederland, TNO rapport 2007-U-R0566B. ([link](#))



Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2022) door gaswinning sinds de nulmeting in de Waddenzee in 2006. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens de het verwachte scenario. De gestreepte contouren geven de bodemdaling van 2020 (1-1-2021) weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2020. De blauwe punten met label in de Waddenzee representeren de peilmerken met de gemeten hoogteverschillen vanaf 2006 (nulmeting Waddenzee) tot de laatst uitgevoerde meting in mei 2021. De paarse punten met label op het vaste land representeren de peilmerken met de met InSAR gemeten hoogteverschillen vanaf eind 2006 tot eind 2020. De rode waarden geven de daling aan van de permanente GNSS-stations in de periode feb. 2007- dec. 2021.

B. Bijlage B: Verwachte bodemdaling in het jaar 2050



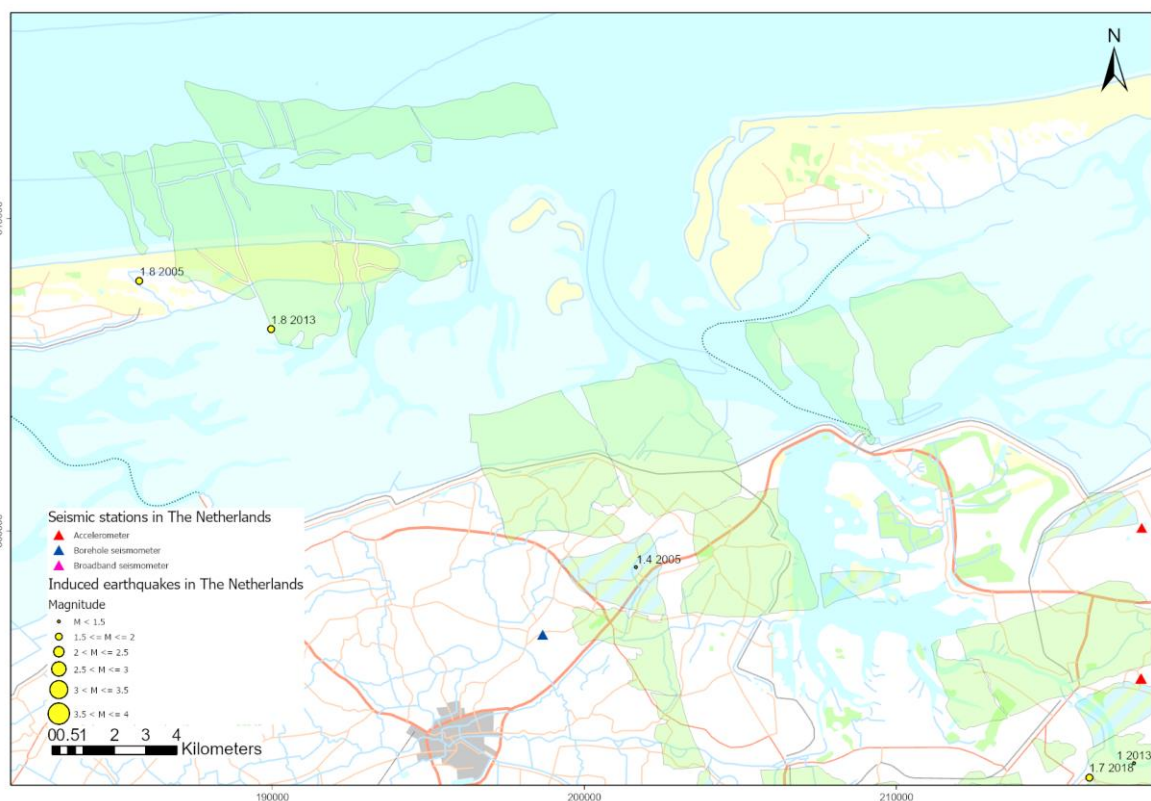
Totale bodemdaling in de Waddenzee op basis van de verwachte scenario's (blauwe doorgetrokken contourlijnen). De gestreepte lijnen tonen de voorspelling volgens de M&R rapportage over 2020.

C. Bijlage C: Mogelijke gevolgen van aardbevingen op bodemdaling en milieu

Sinds 1986 zijn er een drietal aardbevingen in het Waddengebied geregistreerd, waarbij de twee bevingen bij Ameland een magnitude kennen van 1,8 en de beving bij Metslawier een magnitude van 1,4 op de schaal van Richter (Figuur C-1). Deze bevingen zijn door niemand gevoeld en hebben een trillingsnelheid (peak ground velocity) die 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 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 C-1: Geregistreerde aardbevingen in het Waddengebied en omgeving voor de periode 1986 - januari 2022.

Een mogelijke vervolgvraag is 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 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. Ook vanuit een theoretisch oogpunt is de kans 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 plaatsvinden over een beperkte oppervlakte van de breuk, zoals aangegeven in het eerste punt.
- 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, omdat de breukextensies en spanningsveranderingen niet oneindig zijn maar beperkt zijn tot het volume gesteente waaruit het gas wordt gewonnen.

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 21.

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 C-1).

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

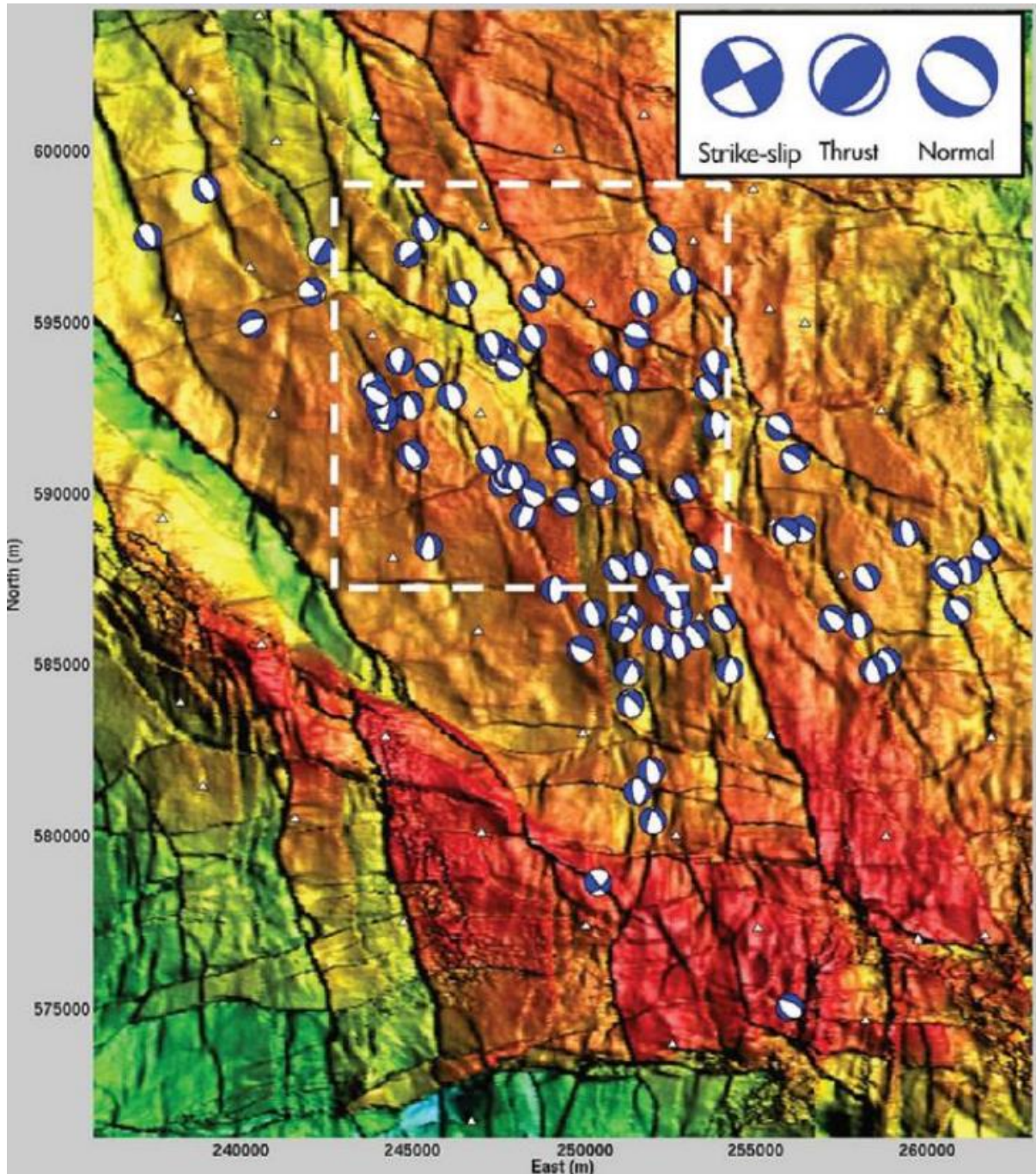
Voorkomen	Langste breuklengte (km)	Poisson's ratio	Breukhoogte (m)	M_{max} energiebalans	M_{max} breukslip
Ameland-Oost	4,3	0,2	110	4	3,6

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 22) 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 23). 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.

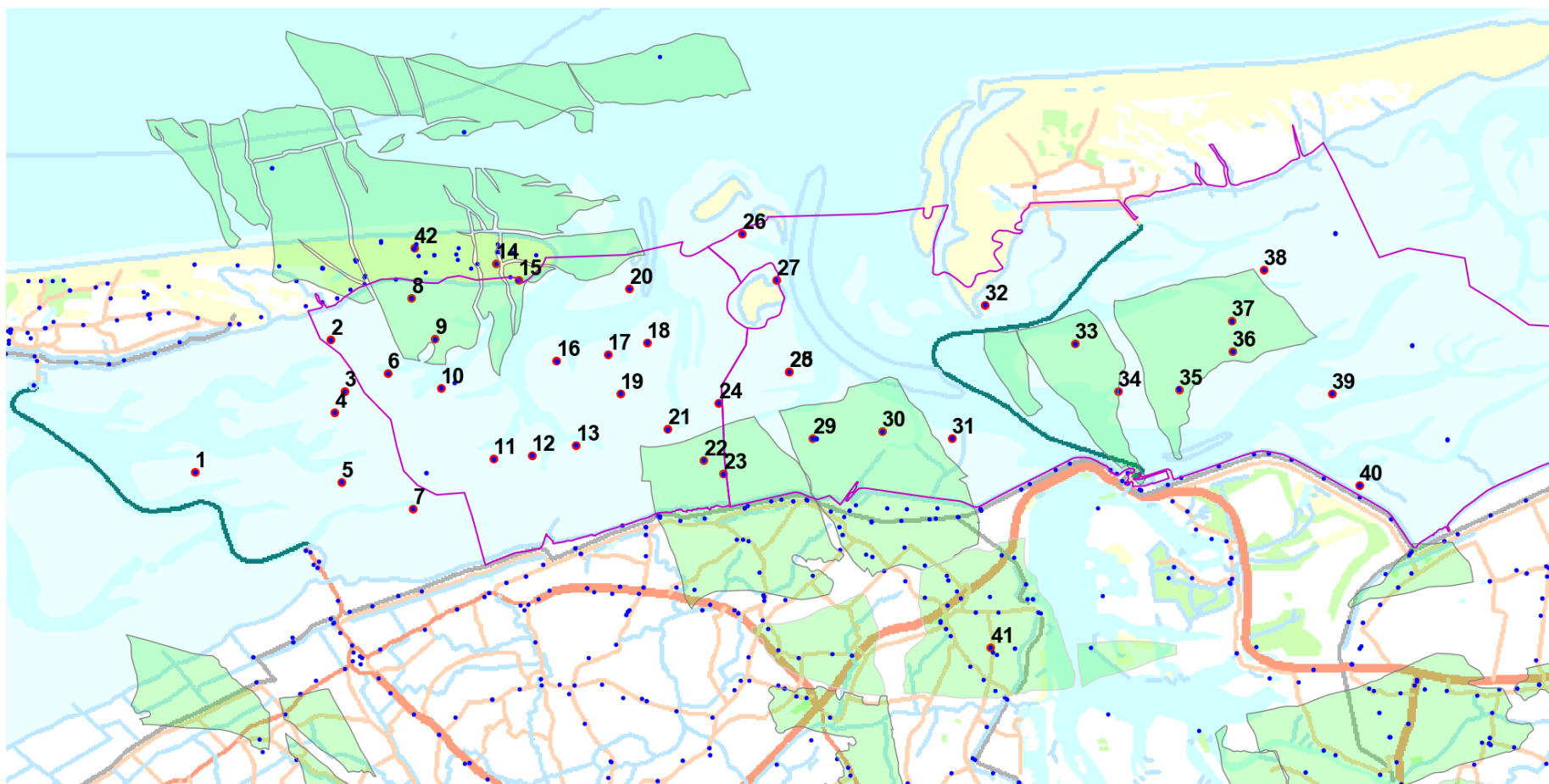
Allereerst moet worden vermeld dat het niet duidelijk is wat de beweging is geweest voor de reeds opgetreden bevingen in het Waddengebied. Om een conclusie te trekken over een aardbevingsbeweging is een “moment tensor” berekening noodzakelijk waarbij een voldoende aantal stations nodig zijn die de bevingen 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 C-2, Referentie 24). 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 25). 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 tussen $M=3,6$ en $4,0$.



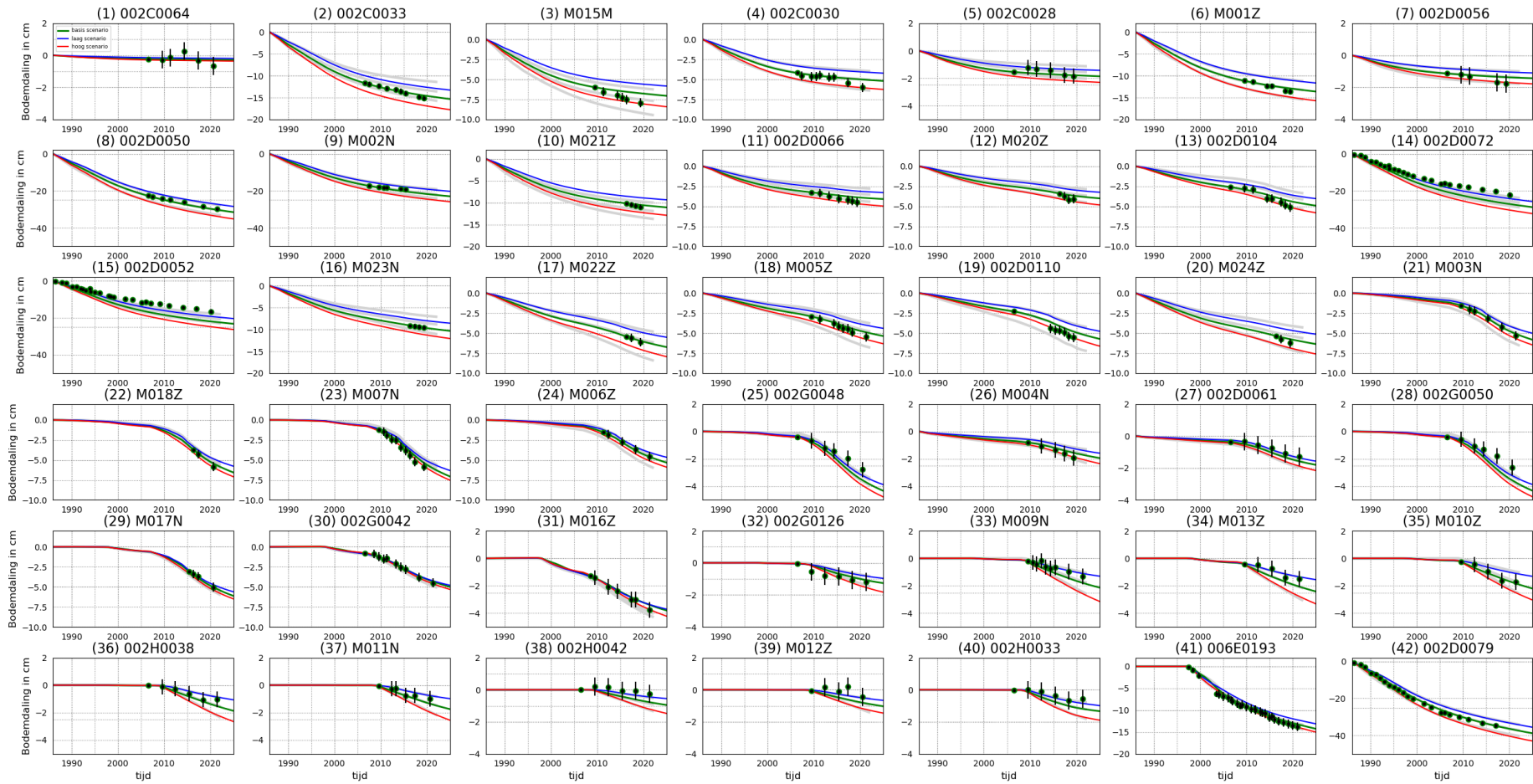
Figuur C-2: Bron mechanismes van 100 aardbevingen in het Groningen veld tussen 2015 en 2017.

D. Bijlage D: Tijdseries Waddenzee

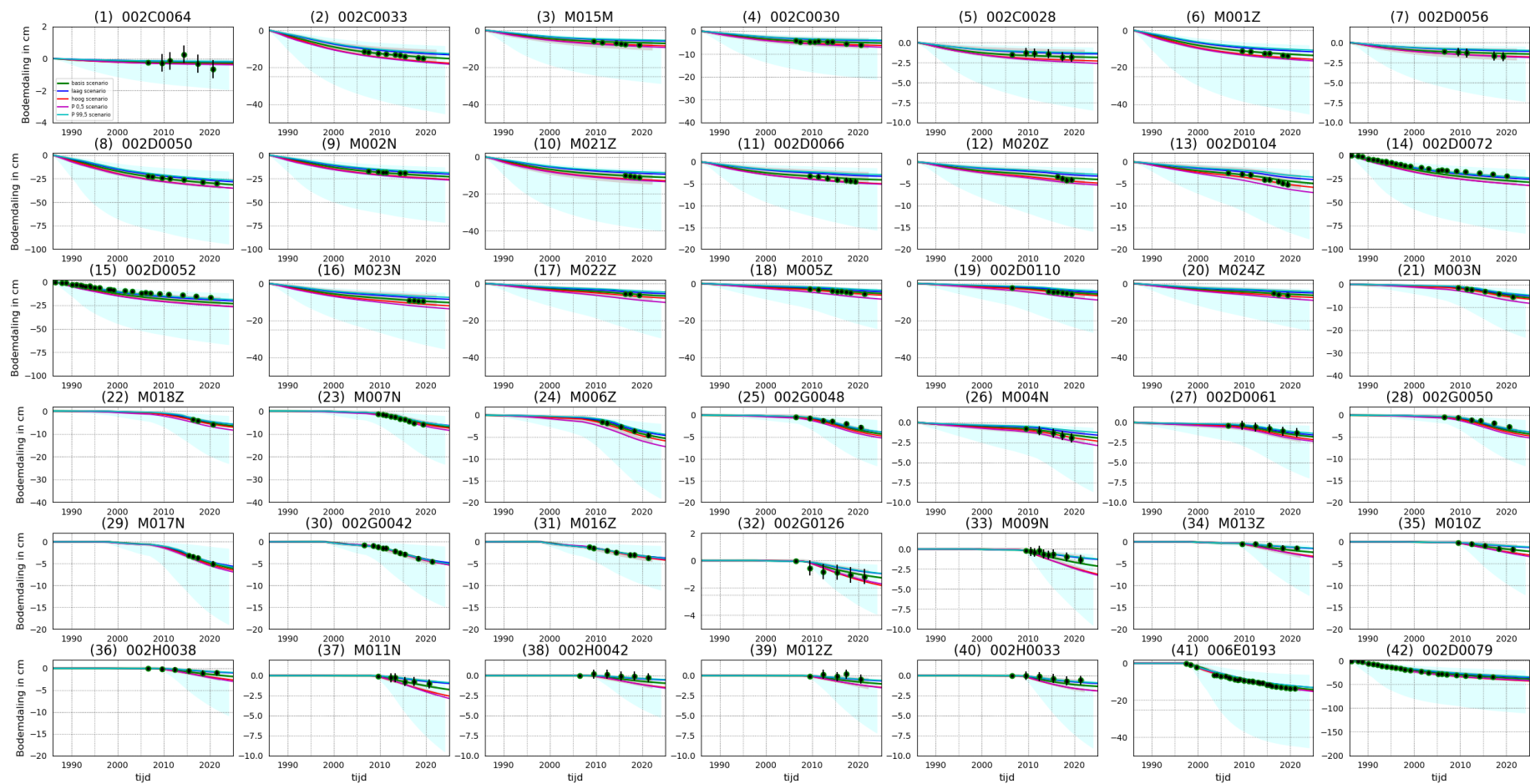
In deze bijlage worden tijdseries van de bodemdaling op het merendeel van de Waddenzee meetpunten getoond. Figuur D-1 laat de locatie van de punten zien. Figuur D-2 en Figuur D-3 tonen de tijdseries. In deze tijdseries laten de grijze lijnen de statistische waarden zien (gewogen gemiddelde, P2,5, P97,5). De blauwe, groene en rode lijnen laten resp. de deterministische laag, basis en hoog scenario's zien. De punten laten de gemeten daling in tijd zien met bijbehorende onzekerheid (2-sigma). Figuur D-3 toont de a-priori onzekerheid (blauw gebied) en wordt ook, naast de P2,5, P97,5 en gewogen gemiddelde, ook de P0,5 en P99,5 statistische waarden getoond met de deterministische lijn. De statistische waarden liggen nagenoeg over elkaar. Figuur D-4 is hetzelfde figuur als Figuur D-3, echter hier is de schaal van de Y-as aangepast zodat de verschillende scenario's beter te onderscheiden zijn.



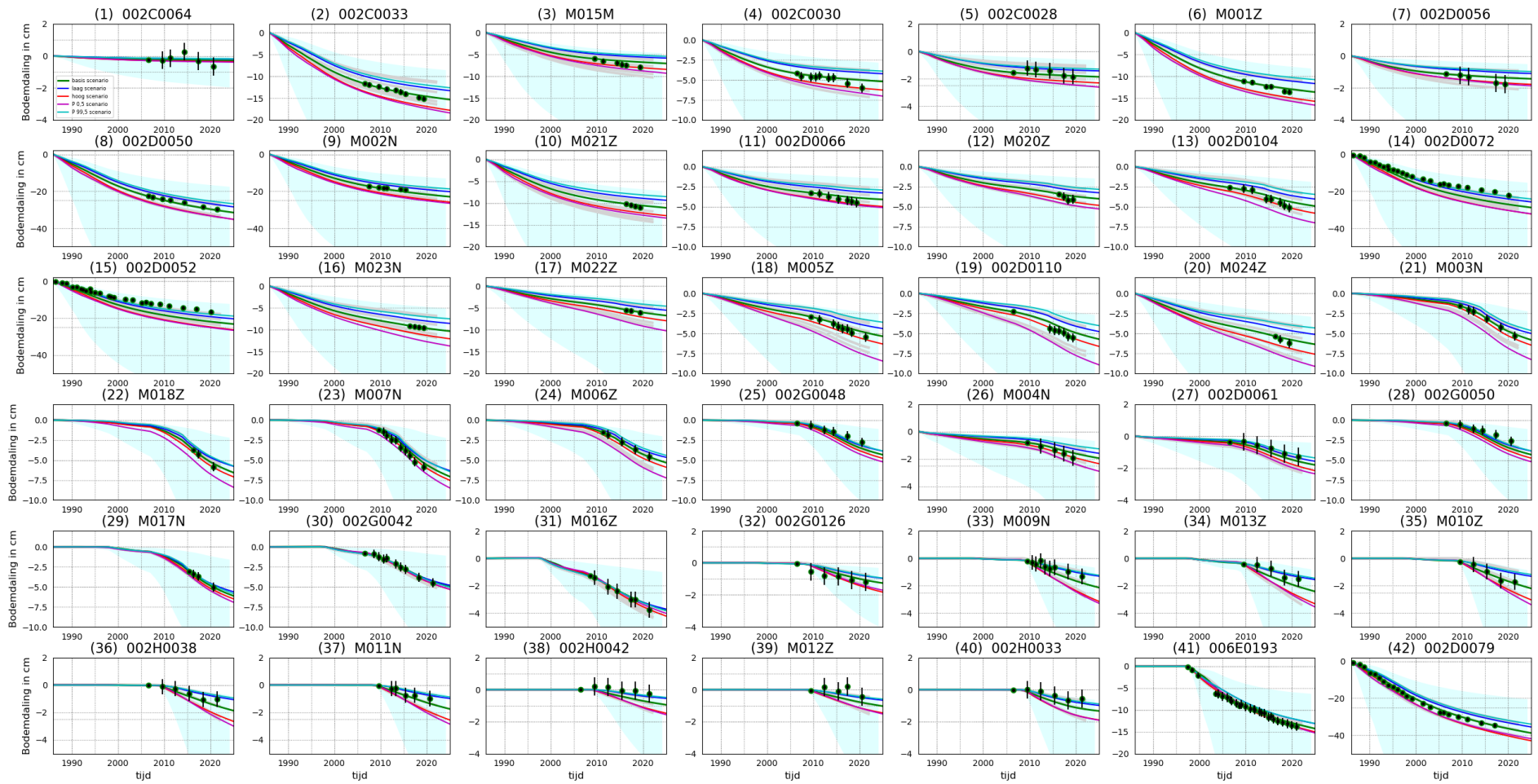
Figuur D-1: Locaties van de peilmerken waarvoor de tijdseries zijn gemaakt in Figuur D-2, Figuur D-3 en Figuur D-4.



Figuur D-2: Tijdsreeën voor de punten zoals aangegeven in Figuur D-1. Grijs lijnen geven de statistisch afgeleide P2,5 waarde (meest ondiepe grijs lijn), de verwachtingswaarde (gewogen gemiddelde, middelste grijs lijn) en de P97,5 waarde (meest diepe lijn). De gekleurde lijnen tonen de deterministische scenario's die zo dicht mogelijk bij de statistische lijnen zijn gekozen.



Figuur D-3: Tijdseries voor de punten zoals aangegeven Figuur D-1. Grijs lijnen geven de statistisch afgeleide P0,5 en P2,5 waarden (meest ondiepe grijs lijnen), de verwachtingswaarde (gewogen gemiddelde, middelste grijs lijn) en de P97,5 en P99,5 waarden (meest diepe lijnen). De gekleurde lijnen tonen de deterministische scenario's die zo dicht mogelijk bij de statistische lijnen zijn gekozen.



Figuur D-4: Tijdsreeksen voor de punten zoals aangegeven in Figuur D-1. Dit figuur is hetzelfde als Figuur D-3, echter nu is de schaal van de y-as bepaald door de verschillende scenario's i.p.v. door de a-priori onzekerheid.

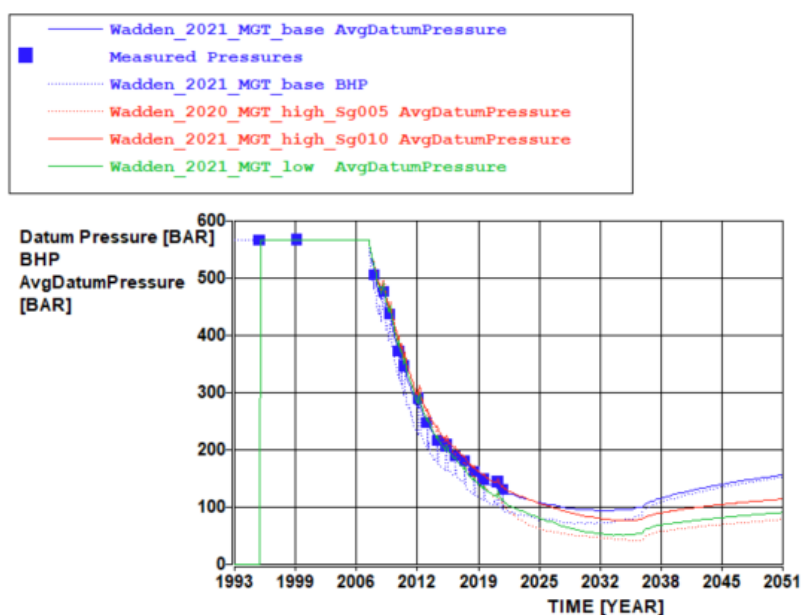
E. Bijlage E: Controle reservoirmodellen met drukmetingen

In deze bijlage worden de drukmetingen tot en met 2021 vergeleken met de gesimuleerde drukken in elk van de modellen. Voor enkele velden zijn de parameterwaardes aangepast om de gesimuleerde drukmetingen beter bij de gemeten drukken te laten passen. Tabel 2-5 bevat een overzicht van de parameterwaardes. Verdere details van de modelering zijn te vinden in Referentie 12 en Referentie 18.

E.1 Moddergat

Het gas uit het Moddergat veld wordt geproduceerd met put MGT-1B. De drukmeting uit 2021 is goed in overeenstemming met de *laag* en *mid* (oftewel *basis*) drukprognoses, aangegeven met de respectievelijk groene en blauwe lijnen in Figuur E-1. Deze realisaties zijn niet aangepast dit jaar.

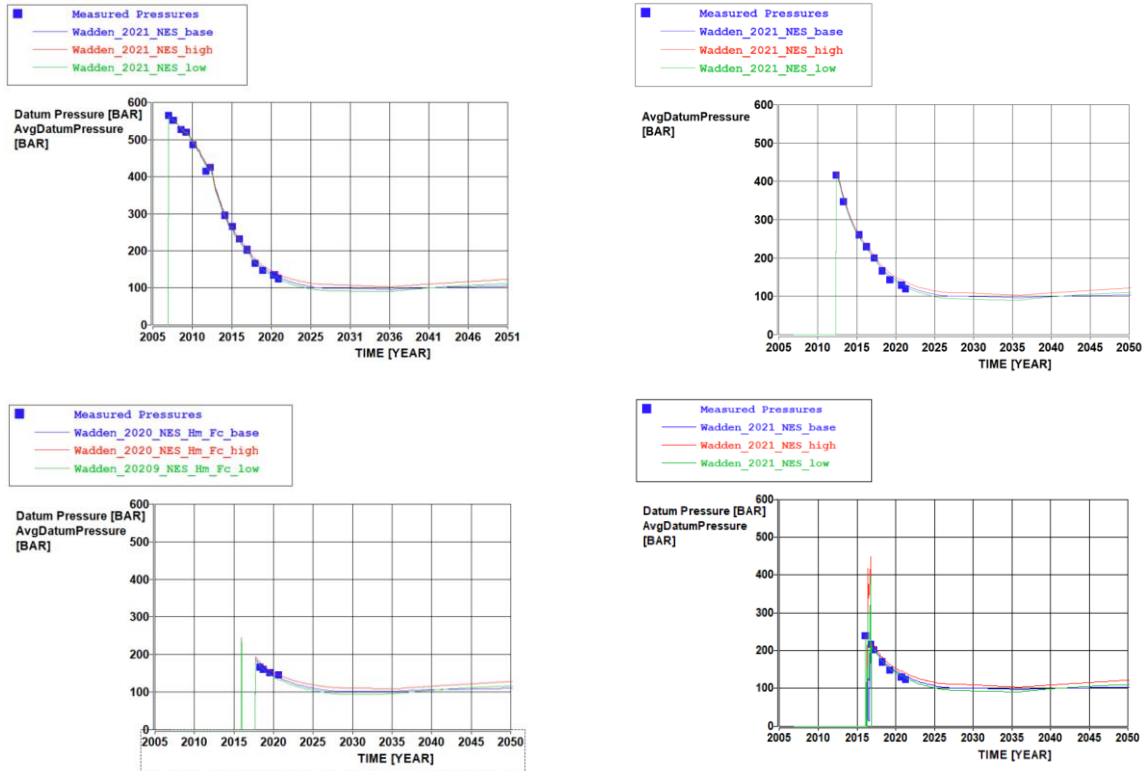
De gemeten drukken dalen echter minder snel dan de drukken zoals voorspeld door de *hoge* realisatie die vorig jaar is gepresenteerd (rode stippellijn in Figuur E-1). Als gevolg van de extra informatie uit de drukmetingen kan de range aan drukprognoses verder worden verkleind. Zoals vorig jaar al is aangekondigd voor dit veld is dit jaar de gassaturatie voor deze realisatie verhoogd van 5% naar 10%. De nieuwe drukprognose voor de *hoge* realisatie is aangegeven in Figuur E-1 met de rode doorgetrokken lijn. De spreiding in de drukprognoses is iets afgenomen t.o.v. vorig jaar.



Figuur E-1: MGT-1B gemeten drukken (blauwe blokken) en hoog/mid/laag drukprognoses.

E.2 Nes

Er zijn vier putten die uit het Nes voorkomen produceren: MGT-2, MGT-3, MGT-4A en MGT-5, waarvan MGT-4A niet meer in gebruik is. Net als in voorgaande jaren passen de nieuwe datapunten goed in de range van drukvoorspellingen, zie Figuur E-2. Er zijn geen aanpassingen aan de modellen gedaan.

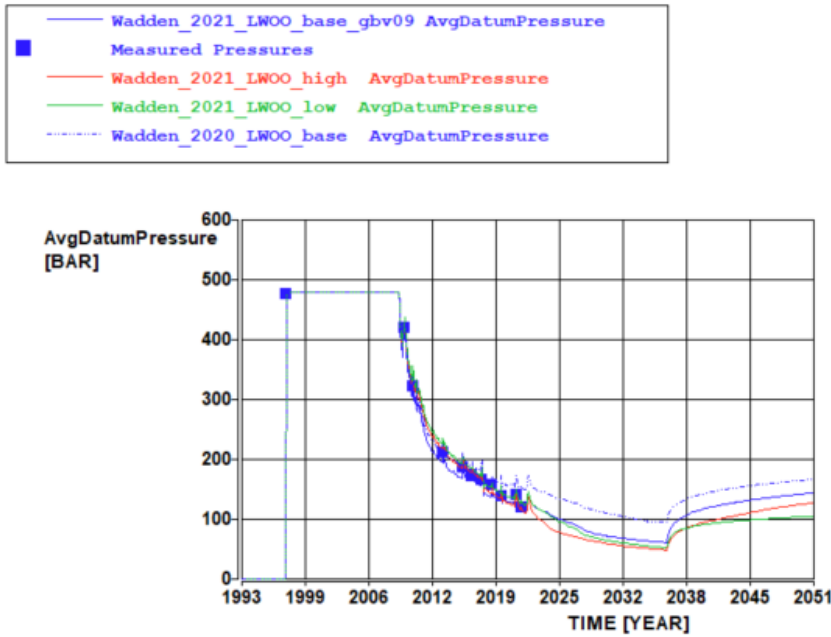


Figuur E-2: Hoog/Mid/Laag drukprognoses en gemeten drukken (blauwe blokken) voor de putten MGT-2 (linksboven), MGT-3 (rechtsboven), MGT-4A (linksonder, buiten gebruik) en MGT-5 (rechtsonder).

E.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 2021 in overeenstemming met de *laag* en *hoog* drukprognoses van vorig jaar, zie de rode en groene lijnen in Figuur E-3. De gemeten drukken dalen echter sneller dan de drukken zoals voorspeld door de basisrealisatie die vorig jaar is gepresenteerd (blauwe stippellijn in Figuur E-3). Als gevolg van de extra informatie uit de drukmetingen is de initiële hoeveelheid gas aanwezig in het reservoir verkleind met 10% en is de range aan drukprognoses verder verkleind.

Dit jaar is voor dit veld een realisatie toegevoegd waarbij een communicatie kan ontstaan met een oostelijk geleden breukblok. De resultaten hiervan staan in Bijlage F.



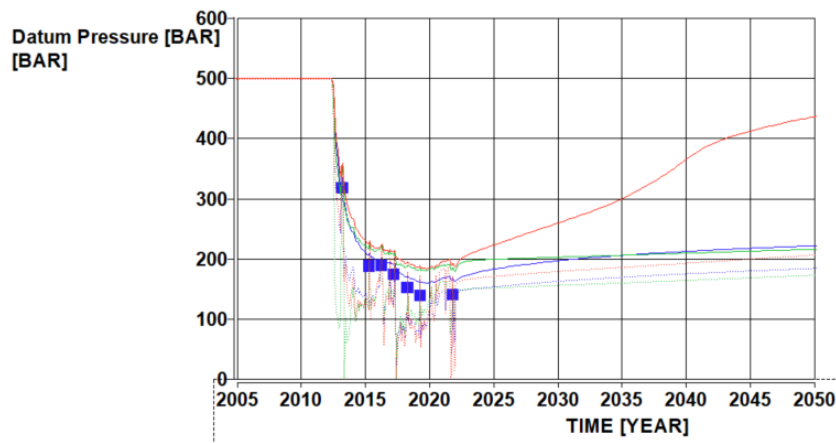
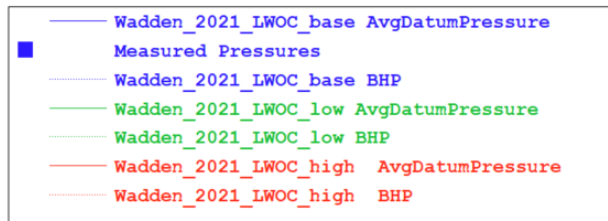
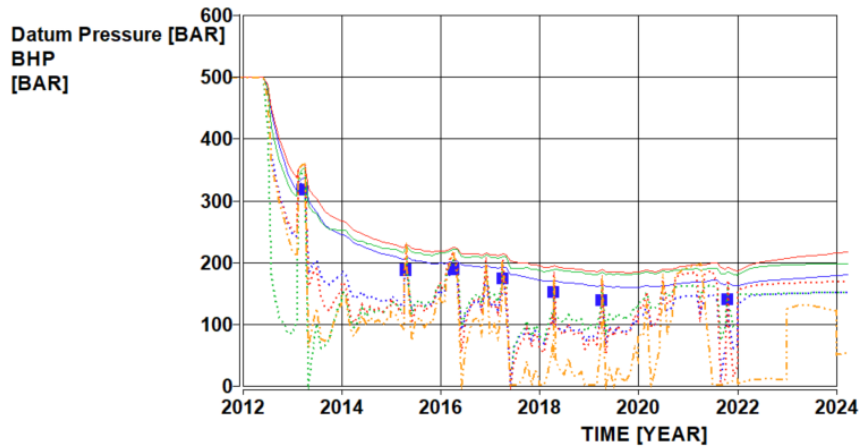
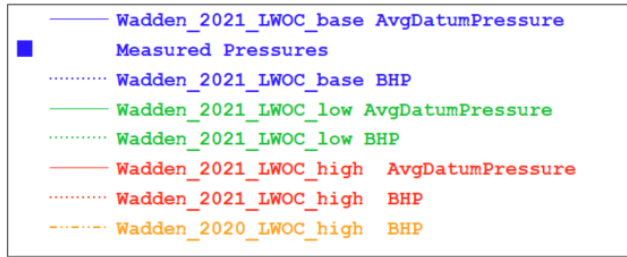
Figuur E-3: LWO-1B hoog/mid/laag drukprognoses en gemeten drukken (blauwe blokken).

E.4 Lauwersoog Centraal

Het gas uit het Lauwersoog Centraal veld wordt geproduceerd met put LWO-2. Dit veld is het kleinste Waddenveld. In de tweede helft van 2020 is deze put gestopt met produceren, maar in 2021 is de productie weer opgestart en is ook een drukmeting gedaan. De put moet frequent uit en aan moet worden gezet om de druk in de put voldoende te laten opbouwen om productie mogelijk te maken. Dit wordt veroorzaakt door de grote verschillen in permeabiliteit en een aantal obstructies in de put. Voor dit veld worden de drukmetingen daarom vergeleken met de *bottom-hole* drukken uit de modellen.

De gemeten drukken komen goed overeen met de *laag* en *basis* drukprognoses, zie Figuur E-4, waarin boven de drukken tot 2024 te zien zijn en onder dezelfde drukken tot 2051. Voor de hoge realisatie is de gassaturatie in de aquifer verhoogd van 10% naar 12% om de drukprognose in overeenstemming te brengen met de 2021 drukmeting. Zie de oranje stippelstreeplijn in Figuur E-4 (boven) voor de 2020 drukvoorspelling (gassaturatie in de aquifer is 10%) en de rode stippellijn voor de 2021 voorspelling (gassaturatie in de aquifer is 12%) van de druk beneden in de put. Door deze aanpassing is er voldoende druk in het reservoir om de drukmetingen en bijpassende productie te reproduceren.

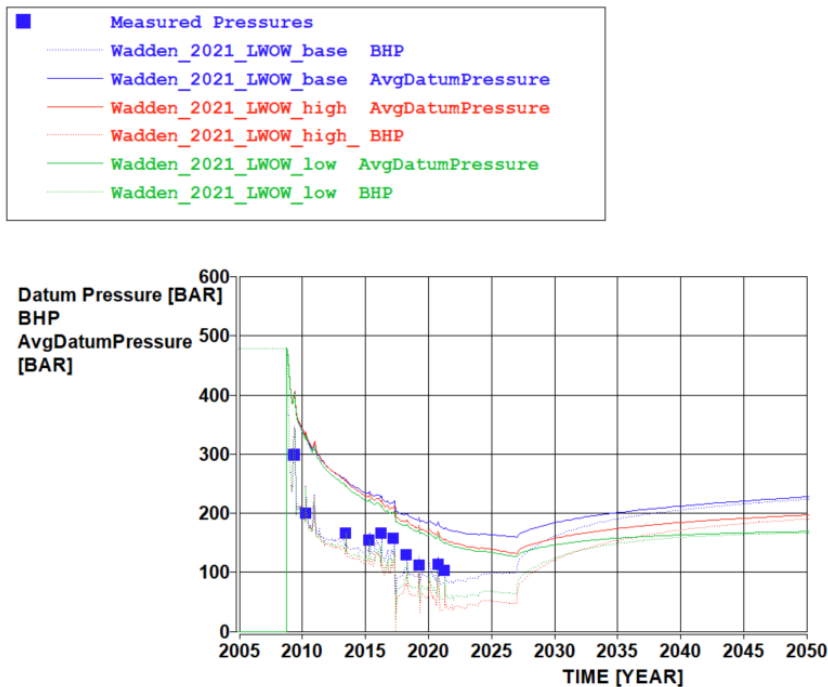
In 2021 is de productie uit dit veld zeer beperkt, gemiddeld slechts 5000 Nm³/d. De aanname voor de drukprognose is dat deze put niet meer produceert, in lijn met het bedrijfsplan Business Plan 2021 (zie Tabel 2-6). Mocht dat wel gebeuren, dan zal dit zeer beperkte invloed op de reservoirdruk en bodemdaling hebben. Zie ook het beperkte volume in Figuur 2-21 voor LWO-C.



Figuur E-4: LWO-2: de drukprognoses (laag, mid en hoog) in het gasreservoir weergegeven met de doorgetrokken lijnen in resp. groen, blauw en rood. De gestreepte lijnen geven de drukken weer onder in de put (bottom-hole drukken). De metingen zijn weergegeven met de blauwe diamantvormen. De bovenste figuur is voor de periode 2012 tot 2024, terwijl de onderste figuur voor de periode 2005 tot 2050 is.

E.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 2021 in overeenstemming met de modellen zoals gebruikt in voorgaande jaren. Er is geen noodzaak om de modellen te herkalibreren.

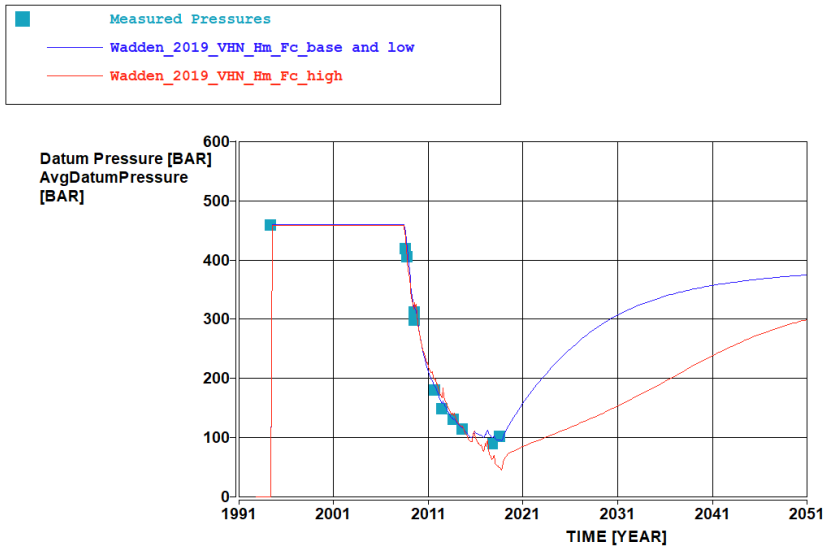


Figuur E-5: LWO-3: de drukprognoses (laag, mid en hoog) zijn weergegeven met de continue lijnen, terwijl de 'bottom-hole' druk met gestippelde lijnen zijn weergegeven. De metingen zijn weergegeven met de blauwe blokken.

E.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 met de hogere drukken in de aquifer. 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, maar volgens het vigerend winningsplan zou dit wel toegestaan zijn. Indien productie uit het Vierhuizen-Oost veld herstart zou kunnen worden, zal met het meet- en regelprotocol worden gewaarborgd dat de belasting binnen de toegestane gebruiksruijme blijft.

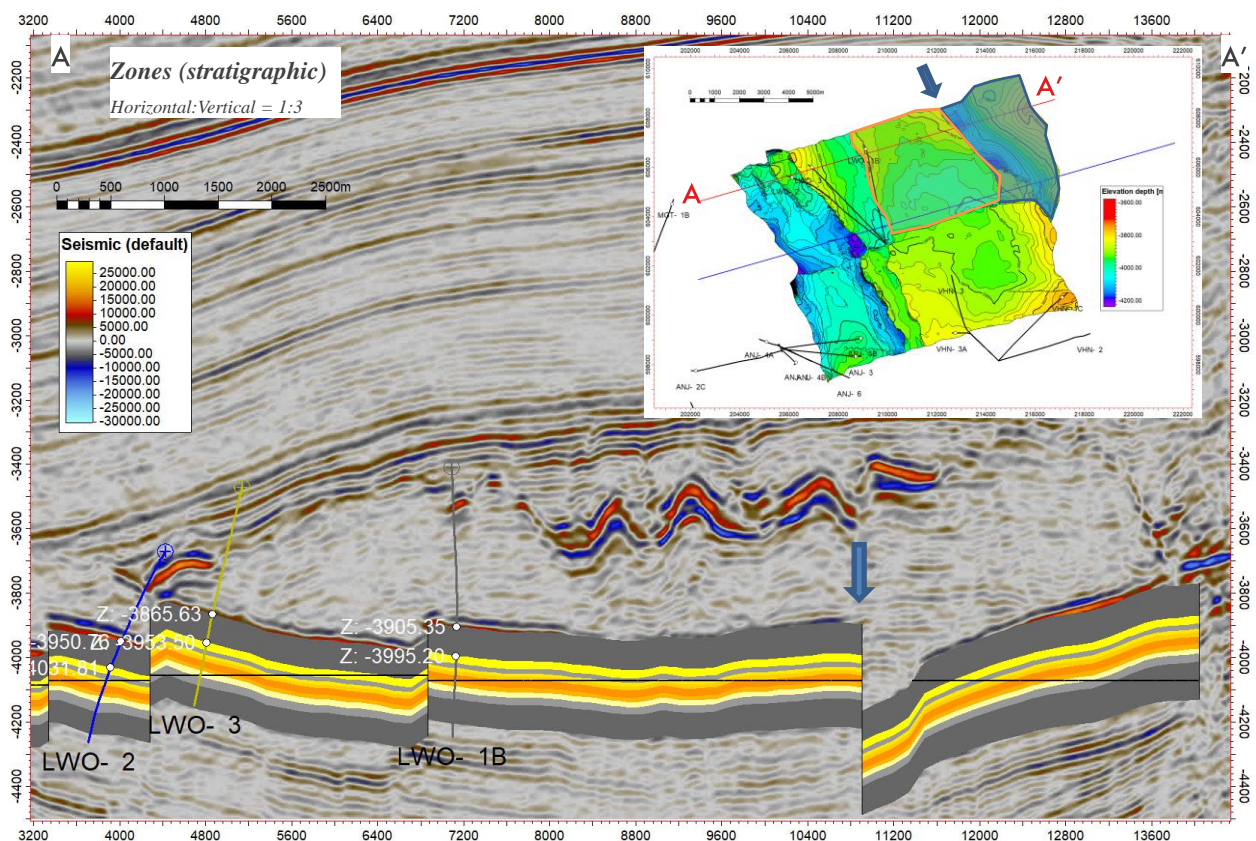


Figuur E-6: Vierhuizen Oost: de drukprognoses (laag/mid en hoog) in het gasreservoir zijn weergegeven met de continue lijnen. De metingen zijn weergegeven met de blauwe blokken.

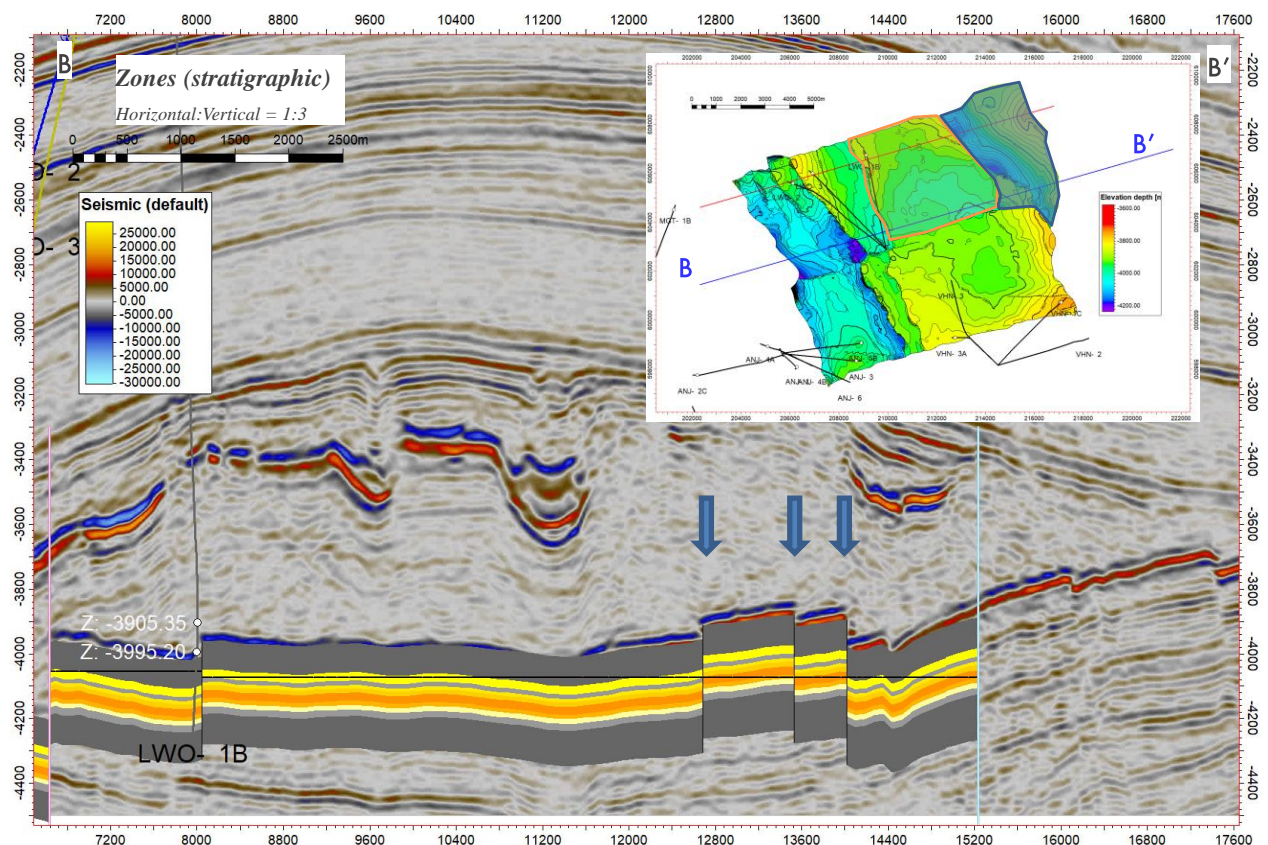
F. Bijlage F: Communicatie tussen Lauwersoog-Oost veld en naastgelegen breukblok

Zoals beschreven in Referentie 28 bestaat de mogelijkheid dat er communicatie plaatsvindt tussen het Lauwersoog-Oost veld (zie Figuur F-1 rechtsboven, gebied binnen de oranje lijnen) en het breukblok direct ten oosten van dit veld (zie Figuur F-1 rechtsboven, gebied binnen de blauwe lijnen). Uit de drukmetingen blijkt niet dat er nu communicatie is over de breuk die deze breukblokken scheidt, maar met behulp van geologische modellen, reservoirsimulatiemodellen en bodemdalingsmodellen is onderzocht wat mogelijk de effecten op de bodemdaling zouden zijn indien deze breuk plotseling doorlatend zou worden.

Allereerst is er een geologisch model gemaakt met behulp van de seismische, geologische en petrofysische data. Dwarsdoorsnedes van west naar oost door het geologisch model zijn te zien in Figuur F-1 en Figuur F-2. De reservoirlagen waaruit geproduceerd wordt zijn aangegeven met de gele en oranje lagen. Op de achtergrond is de seismische data te zien. De putten zijn ook aangegeven, waarbij put LWO-1B zich in het Lauwersoog-Oost veld bevindt. De breuk tussen het Lauwersoog-Oost veld en het breukblok ten oosten hiervan is aangegeven met blauwe pijlen. In het noorden van de breuk (zie Figuur F-1) is geen communicatie mogelijk: de lagen waaruit geproduceerd wordt door de put LWO-1C staan niet in verbinding met elkaar. Maar in het zuiden van dezelfde breuk(en) zou wel communicatie mogelijk kunnen worden, zie Figuur F-2.



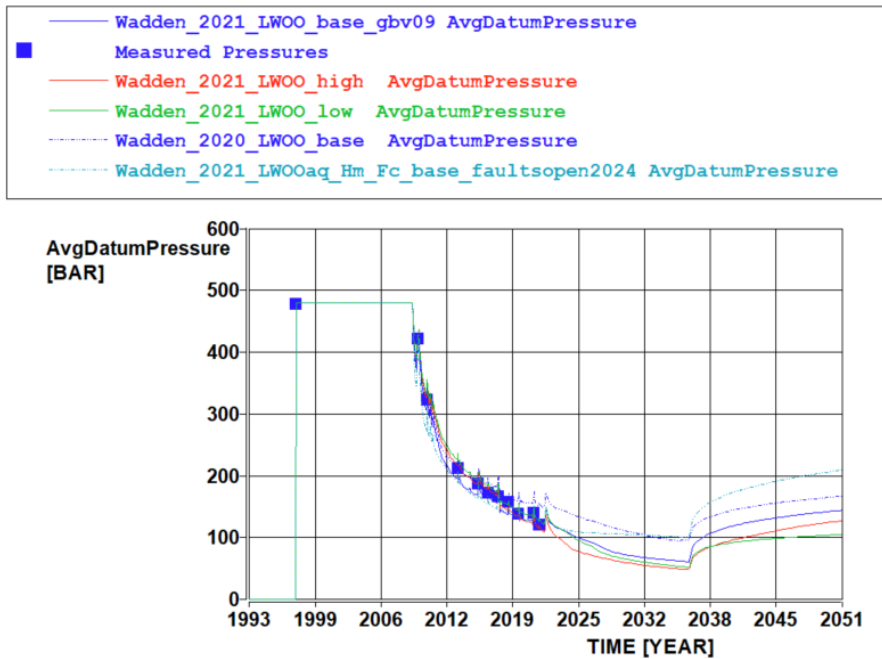
Figuur F-1: Dwarsdoorsnede van west naar oost door de Lauwersoog velden. Het Lauwersoog-Oost veld valt binnen de oranje lijnen en de naastgelegen aquifer binnen de blauwe lijnen (zie inzet rechtsboven).



Figuur F-2: Dwarsdoorsnede van west naar oost door de Lauwersoog velden, meer naar het zuiden toe vergeleken met de vorige figuur. Aan de zuidkant is communicatie over de breuken mogelijk.

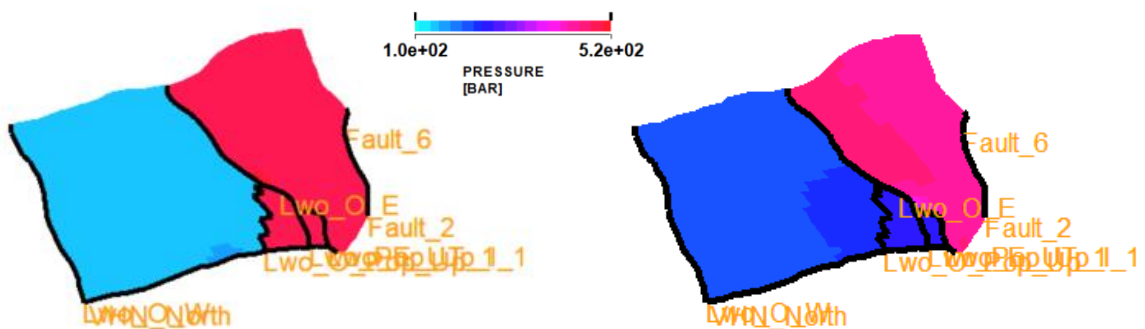
Het is bekend dat de diktes van het Slochteren zandsteenreservoir weinig variëren voor de Waddenvelden. Daarom zijn deze voor het oostelijke breukblok gelijk gehouden. Voor de reservoir eigenschappen zoals porositeit en permeabiliteit is ook aangenomen dat deze vergelijkbaar zijn in het oostelijke breukblok vergeleken met het Lauwersoog-Oost veld. Ten slotte is aangenomen dat het gas-watercontact voor beide breukblokken gelijk is. Dit is in Figuur F-1 en Figuur F-2 aangegeven met de zwarte horizontale lijnen.

In de reservoirsimulaties is aangenomen dat communicatie tussen de put LWO-1b en het oostelijke breukblok ontstaat vanaf 2024. Er zal vanaf dat tijdstip stroming plaatsvinden van het oostelijke breukblok met initiële druk naar het Lauwersoog-Oost veld dat door productie is gedaald in druk. Rondom de put LWO-1b waar de druk wordt gemeten is te zien in Figuur F-3 dat de druk minder daalt vergeleken met realisaties waarbij geen communicatie met het oostelijke breukblok is, terwijl de hoeveelheid gas die geproduceerd gelijk blijft. Als de productie stopt eind 2035 is te zien dat de druk verder toeneemt omdat er zich een nieuw evenwicht ontwikkelt over een groter volume.



Figuur F-3: Drukprognose voor realisaties waarbij geen communicatie mogelijk is met het oostelijke breukblok (rood, groen en blauw; gelijk aan Figuur E-3) en een realisatie waarbij vanaf 2024 wel communicatie mogelijk is (lichtblauw).

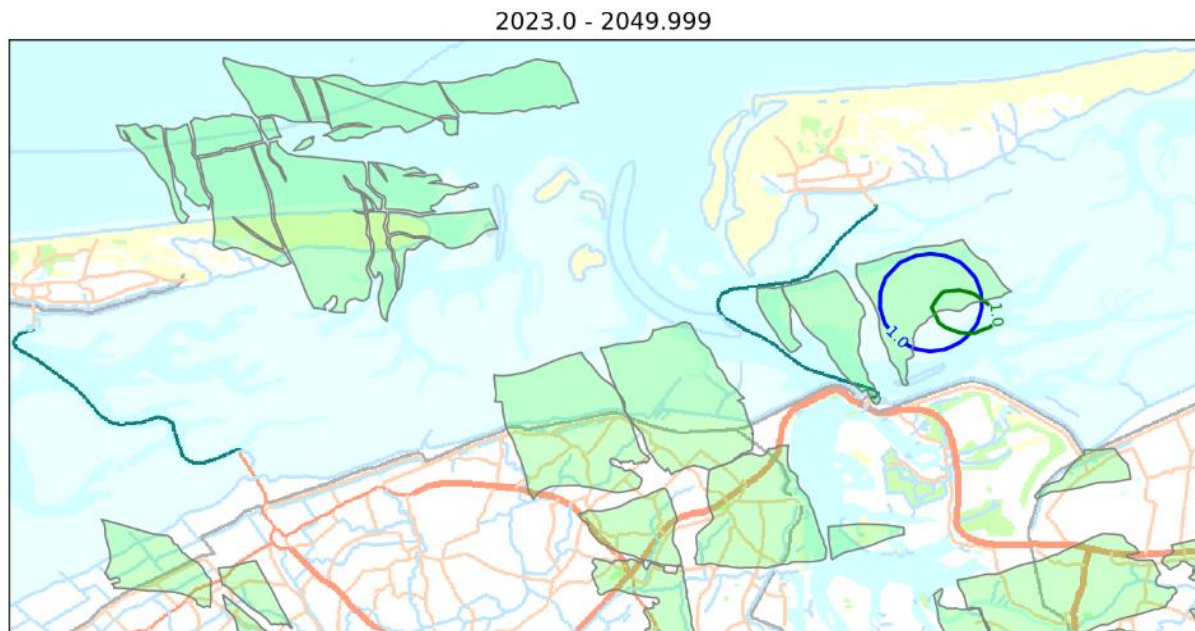
Voor het jaar 2050 is de drukprognose voor beide realisaties vergeleken. In Figuur F-4 zijn bovenaanzichten van beide realisaties weergegeven, waarbij de kleuren de drukken in 2050 weergegeven voor de bovenste laag in het model. Als communicatie mogelijk is over de breuken (Figuur F-4 rechts) gaat de druk in het oostelijke breukblok omlaag (maar blijft boven hydrostatische druk), terwijl de druk in het Lauwersoog-Oost veld minder afneemt.



Figuur F-4: Bovenaanzichten van twee realisaties waarbij er geen communicatie mogelijk is over de breuken (links) en wel communicatie mogelijk is vanaf 2024 (rechts). De kleuren geven de drukken weer in 2050.

Ten slotte is met behulp van de drukprognoses voor beide realisaties de bodemdaling tussen 2023 en 2050 berekend, zie Figuur F-5. De blauwe contour toont de bodemdaling voor de realisatie zonder communicatie. De bodemdaling vindt hoofdzakelijk plaats boven het Lauwersoog-Oost veld. De groene contour laat de bodemdaling zien voor de realisatie met communicatie met het oostelijke breukblok. Deze contour laat een bodemdalingssom zien die iets kleiner in omvang is en zoals verwacht kan worden ligt de kom meer naar het oosten. De beperkte bodemdaling in dit scenario wordt veroorzaakt door het residuele gas wat aanwezig is

in de aquifer waardoor de drukdaling beperkt blijft tot waarden boven de hydrostatische druk. Hierdoor blijft de compactie (via de C_{md} waarde) relatief klein in het oostelijk breukblok. Een andere factor die de beperkte daling in dit scenario verklaart, is de drukstijging in het Lauwersoog-Oost gasveld, die voor een geringe decompactie zorgt.



Figuur F-5: Bodemdaling tussen 2023 en 2050 voor de realisaties zonder (blauw) en met (groen) communicatie tussen het Lauwersoog-Oost veld en het oostelijk gelegen breukblok (bodemdaling in cm).