



Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen

Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus over 2025

EP Document Number:	EP202601221967	Owner:	NAM
Document Date:	1/6/2026	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 2025 en de actualisatie van de modellen op basis van deze metingen.

Resultaten

Op basis van de evaluatie van de metingen en modellen zoals gepresenteerd in dit rapport wordt geconcludeerd dat de belasting in 2025 in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag in de Waddenzee vergelijkbaar is met de belasting volgens de M&R-cyclus over 2024 en wederom binnen de toegestane gebruikruimte blijft. Daarom worden er geen maatregelen genomen om de productie bij te stellen.

Samenvatting metingen

- In 2025 zijn reservoirdrukken bepaald in de voorkomens Lauwersoog-Centraal, Lauwersoog-Oost, Moddergat en Nes.
- Op basis van het meetplan Waddenzee zijn in 2025 GNSS-metingen (Global Navigation Satellite System, GPS) uitgevoerd op 13 clusters van peilmerken in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag.
- De continue GNSS-metingen op de locaties boven de gasvelden Ameland, Anjum en Moddergat zijn in 2025 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.

Samenvatting modellen

- Na het kalibreren van de reservoirsimulatiemodellen van de waddenvoorkomens met de 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 verkrijgen, zijn voor elk producerend voorkomen minimaal drie realisaties gemaakt, die elk de historisch gemeten drukken tot en met 2025 kunnen reproduceren, maar met name variëren in de mobiliteit en gassaturatie in de aquifers. Voor het veld Moddergat zijn dit jaar de modellen opnieuw gekalibreerd.
- Ten westen van het veld Nes bestaat een discrepantie tussen de metingen en het geomechanische model. Deze discrepantie is onderzocht en beschreven in bijlage G van de Meet- en regelrapportage over 2023 (Referentie 30) Op basis van de analyse zijn drukrealisaties berekend voor het breukblok ten westen van het veld Nes. Voor de geomechanische parameters van dit breukblok worden, in de

voorliggende rapportage, de hogere parameters van het Ameland veld gebruikt. De scenario's die hieruit volgen passen beter bij de gemeten bodemdaling.

- De geomechanische modellen voor de waddenvoorkomens zijn 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 bodemdalingsscenario's zijn fysisch realistisch en vallen binnen het bereik van gemeten waarden in het veld en laboratorium.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1 Inleiding	5
2 Deelprocessen	7
2.1 Meten (stap 1)	7
2.1.1 Geodetische metingen	7
2.1.2 Reservoirdrukmetingen en historische productie	7
2.2 Analyseren meetgegevens (stap 2)	8
2.2.1 Analyseren van GNSS-metingen en referentie	8
2.2.2 Campagne GNSS-metingen op de Waddenzee	9
2.2.3 Continue GNSS-metingen	9
2.2.4 Waterpassen en InSAR	10
2.2.5 Ruimte-tijd analyse	10
2.3 Verifiëren prognose (stap 3)	11
2.3.1 Overzicht ondergrondmodellering	11
2.3.2 Verifiëren reservoirmodellen (stap 3a)	12
2.3.3 Verifiëren bodemdalingsscenario's (stap 3b)	16
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 Bodemdalingenvolume voor bepaling belasting	39
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 Conclusie	45
5 Referenties	46
A. Bijlage A: Gemodelleerde en gemeten bodemdaling	49
B. Bijlage B: Verwachte bodemdaling in het jaar 2050	51
C. Bijlage C: Mogelijke gevolgen van aardbevingen op bodemdaling en milieu	52
D. Bijlage D: Tijdseries Waddenzee	56
E. Bijlage E: Vergelijking reservoirmodellen met drukmetingen	60
E.1 Moddergat	60
E.2 Nes	61
E.3 Lauwersoog Oost	64
E.4 Lauwersoog Centraal	64
E.5 Lauwersoog West	66
E.6 Vierhuizen Oost	66
E.7 Metslawier	67
F. De confrontatie workflow tussen geodetische metingen en bodemdalingsscenario's	69
F.1 Het voorbereiden van de geodetische data inclusief precisiebeschrijving	69
F.2 Het voorbereiden van de ondergrondmodellen inclusief precisiebeschrijving	69
F.3 Precisiebeschrijving bodemdalingsscenario's	71
F.4 Confrontatie workflow tussen geodetische metingen en bodemdalingsscenario's	72
G. Praktische implementatie van de workflow	74

1 Inleiding

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 vanaf de locatie Vierhuizen, terwijl de voorkomens Lauwersoog Oost en West in het vierde kwartaal van 2008 in productie zijn genomen vanaf de locatie Lauwersoog. Tenslotte is vanaf deze locatie ook het voorkomen Lauwersoog Centraal in juni 2012 in productie genomen Lauwersoog. Samen vormen deze voorkomens de “waddenvoorkomens”.

Ten behoeve van de gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (MLV) heeft de minister van Economische Zaken in 2006 ingestemd met het winningsplan MLV (kenmerk: ET/EM/6047343 d.d. 26 juni 2006). Daarna zijn de volgende ontwikkelingen m.b.t. winningsplannen danwel gebruiksruimte besluiten geschied:

- 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 MLV (kenmerk: DGETM-EO 16110969) met betrekking tot de herziene gebruiksruimte 2016-2021.
- In 2019 heeft de minister ingestemd om het gasveld Vierhuizen-Oost tot 2024 te mogen produceren (DGKE-WO /18270235).
- In 2024 heeft de minister van Economische Zaken een nieuw gebruiksruimtebesluit vastgesteld (kenmerk PDGGO-DTDO / 52445875) voor de periode 2024-2029. Het kenmerk van dit besluit is:
 - In het beleidsscenario neemt de zeespiegelstijgingssnelheid toe van 3,60 [3,10-4,20] mm/jaar in 2024 tot 3,85 [3,35-4,45] mm/jaar in 2029.
 - In het richtscenario neemt de zeespiegelstijgingssnelheid toe van 3,85 [3,35-4,45] mm/jaar in 2029 tot 6,8 [5,0-10,8] mm/jaar in 2050

De gebruiksruimtebesluiten in de tijd inclusief dit recente gebruiksruimtebesluit zijn gebruikt als basis voor deze rapportage.

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).

Voor het jaar 2025 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:

- Meten
- Analyseren meetgegevens
- Verifiëren prognose
- Berekenen volume en gemiddelde daling
- Indien nodig aanpassen van de productie
- Actualiseren

Hierna volgt een hoofdstuk over de kwaliteitsborging, zoals eveneens beschreven in het Meet- en regelprotocol. Als laatste worden de conclusies 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 2-16 en Figuur 2-17).
2. Tabellen met de jaarlijkse toename van het bodemdalingsvolume (inclusief onzekerheid) per voorkomen per kombergingsgebied voor de jaren 2005 t/m 2028 (Tabel 2-11 en Tabel 2-12).
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 2-13 en Tabel 2-14). De in een bepaald jaar gerapporteerde belasting B wordt berekend voor de situatie op 1 januari van dat jaar. Voor de rapportage over het jaar 2025 wordt op deze manier een B voor 1 januari 2025 berekend.
4. Grafieken met de bodemdalingsbelasting voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag vanaf start productie op de locatie Moddergat tot 2040 (Figuur 2-20 en Figuur 2-21).
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 2-10 tot en met Figuur 2-14).

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 bepaalde drukberekening 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 bepaalde bodemdalingsberekening 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 9), 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 12). 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 2025 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 2025.

2.1 Meten (stap 1)

2.1.1 Geodetische metingen

Geodetische metingen worden uitgevoerd volgens het meetplan Waddenzee, welke jaarlijks wordt geactualiseerd door NAM en beoordeeld door Staatstoezicht op de Mijnen (SodM). Volgens het meetplan Waddenzee 2025 zijn de volgende metingen uitgevoerd (Referentie 31):

- GNSS-metingen (Global Navigation Satellite System, GPS) op 13 clusters van peilmerken in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. De GNSS-metingen zijn in Tabel 2-3 beschreven en ook gerapporteerd als meetregister (Referentie 16).
- Permanente GNSS-metingen op de stations AME1, AME4, Moddergat, Anjum, het AGRS (Actief GNSS Referentie Systeem) station Ameland (bij Nes) en het station Ternaard. Het station AME4 (geplaatst in 2023) vervangt het station AME1 (verwijderd in 2025) op de NAM-locatie Ameland-Oost-1. De resultaten van de permanente GNSS-metingen worden driemaandelijks aan SodM gerapporteerd (Referentie 33).

2.1.2 Reservoirdrukmetingen en historische productie

In 2025 zijn reservoirdrukken in Lauwersoog-Centraal, Moddergat en Nes bepaald op basis van de druk gemeten boven in de put aan het einde van een productiestop ('Closed-in Tubing Head Pressure'; CITHP). In voorkomen Lauwersoog-West is een SPG ('Static Pressure Gauge') meting uitgevoerd. Deze meting wordt echter als minder betrouwbaar beschouwd vanwege een verstopping in deze put. De bepaalde reservoirdrukken in 2025 staan samengevat in Tabel 2-1.

Tabel 2-1: Reservoirdrukken in 2025 voor de MLV-voorkomens op basis van SPG en 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	Druk op reservoirniveau (bara)	Type meting
Lauwersoog-Centraal	LWO-2	21-02-2025	133 @ 4035 m	CITHP (18 dagen)
Lauwersoog-West	LWO-3	16-09-2025	129 @ 4060 m	SPG, minder betrouwbaar
Moddergat	MGT-1B	15-9-2025	112 @ 3860 m	CITHP (7 dagen)
Nes	MGT-2	24-9-2025	96 @ 3700 m	CITHP (9 dagen)
	MGT-3	23-9-2025	91 @ 3700 m	CITHP (15 dagen)
	MGT-5	23-9-2025	93 @ 3700 m	CITHP (15 dagen)

Het veld Vierhuizen-Oost heeft ook in 2025 niet geproduceerd door technische problemen met de put en hierdoor is ook geen drukmeting beschikbaar. Hetzelfde geldt voor de put in het veld Lauwersoog-Oost.

Tabel 2-2 toont de cumulatieve gasproductie per voorkomen tot en met 31 december 2025 en de productie in 2025.

Tabel 2-2: Productie per voorkomen.

Voorkomen	Cumulatieve productie t/m 2025 (10^6 Nm^3)	Productie 2025 volgens vigerend WiPla* (10^6 Nm^3)	Actuele productie in 2025 (10^6 Nm^3)
Nes	13186	383	287
Moddergat	5526	88	148
Lauwersoog-Centraal	149	3	1
Lauwersoog-West	1919	40	29
Lauwersoog-Oost	2415	49	0
Vierhuizen-Oost	1628	0	0
Totaal	24823	563	465

*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 Tabel 2-3 beschreven GNSMART-methodiek geanalyseerd. Hierbij wordt een twaalfal 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.

De referentiestations worden jaarlijks op stabiliteit gecontroleerd. Vanaf 2020 wordt een 'tweetraps' 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 1 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 vijf GNSS-stations (genoemd onder stap 1) kleine bewegingen zijn geconstateerd in het project dat alternatieve GNSS-processing methodologieën heeft geëvalueerd (Referentie 27). 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.

In de stabiliteitscontrole van 2025 (Referentie 7) zijn de coördinaten van de stations Borkum (0687), Drachten (drac) en Terschelling (ters) aangepast in de eerste stap. Wat betreft station Borkum is dit een aanpassing van +1,3 mm in de horizontale coördinaten, en voor de stations Drachten en Terschelling aanpassingen van respectievelijk -1,3 en +2,5 mm in hoogte. In de tweede stap zijn geen andere coördinaten meer aangepast. Het effect van de aanpassingen van de coördinaten van de referentiestations in 2025 op de coördinaten van alle monitoring stations is minder dan 0,5 mm.

2.2.2 Campagne GNSS-metingen op de Waddenzee

De ellipsoïdische hoogteverschillen van de wadpunten worden sinds 2006 met GNSS bepaald. Voor het omrekenen naar orthometrische hoogteverschillen wordt sinds 2006 gebruik gemaakt van het NLGEO2004 geoïdemodel (Referentie 8). 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 12).

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 (station AME4), 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 2-10 tot en met Figuur 2-14 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 31/12/2025 [mm]	Verticale bewegingssnelheid in 2025 [mm/jaar]
Ameland (AME4)	05-05-2023	-14	-5,5 [$1\sigma = 0,6$ mm/jaar]
Anjum	05-02-2007	-61	-3,4 [$1\sigma = 0,4$ mm/jaar]
Moddergat	05-02-2007	-66	-4,5 [$1\sigma = 0,5$ mm/jaar]
Ameland-Nes	17-06-2014	-8	+0,4 [$1\sigma = 0,5$ mm/jaar]
Ternaard	19-11-2016	-18	-2,2 [$1\sigma = 0,4$ mm/jaar]

2.2.4 Waterpassen en InSAR

Op de eilanden Ameland en Schiermonnikoog wordt de bodembeweging gemeten middels waterpassingen. De meetresultaten zijn gerapporteerd in de differentiestaten van de laatste meetregisters (Referentie 25 en Referentie 29). De daarin gepubliceerde waterpasgegevens zijn per meetepoche geanalyseerd met een vrije netwerkvereffening.

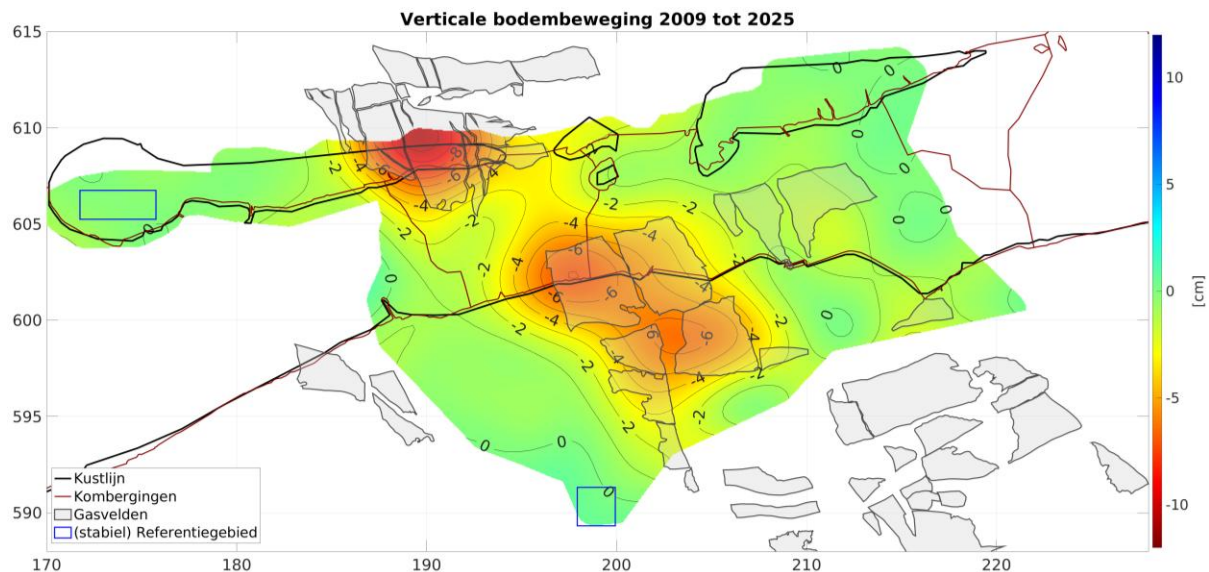
Op het vasteland wordt de bodembeweging sinds 2021 gemeten en gerapporteerd op basis van de InSAR techniek (satelliet radar interferometrie). De InSAR-metingen zijn afkomstig van opeenvolgende missies (ERS, Envisat, Radarsat-2 en Sentinel-1) en omgerekend op de locaties van de waterpas-peilmerken. Als 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. In de differentiestaat behorende bij het laatste meetregister (Referentie 26) zijn de InSAR metingen gecombineerd met de waterpasmetingen.

In 2023 en 2024 heeft Rijkswaterstaat op een deel van het vasteland in Noord-Nederland een grootschalige waterpassing uitgevoerd, waarvan de resultaten in de berekeningen worden meegenomen.

2.2.5 Ruimte-tijd analyse

Om de metingen niet alleen op de meetpunten weer te geven en vlakdekkend te visualiseren moet geïnterpoleerd worden. Dit gebeurt middels een ruimte-tijd analyse (methode Houtenbos, Referentie 14). Hiermee worden ook de verschillen tussen de metingen en de geomechanische voorspelling weergegeven. Als resultaat kan voor elk tijdsinterval een continu oppervlak worden gevisualiseerd, dat de gemeten bodemdaling in dat tijdvak weergeeft (Figuur 2-1).

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 vasteland van 2018 tot 2023. Interpretatie en visualisatie zijn in ruimte en tijd beperkt tot het gebied oftewel het tijdvak, dat door voldoende betrouwbare metingen is afgedekt.



Figuur 2-1: Verticale bodembeweging tussen 2009 en 2025 volgens de ruimte - tijd analyse van de metingen. 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.

2.3 Verifiëren prognose (stap 3)

2.3.1 Overzicht ondergrondmodellering

Het begrip van de ondergrond wordt gevormd met behulp van experts binnen NAM en data uit diverse disciplines. Er vindt regelmatig overleg plaats met en tussen de experts, zodat een geïntegreerd begrip van de ondergrond wordt meegenomen in de modellen van de ondergrond. Een belangrijk aspect van de ondergrondmodellering is ook een beschrijving 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 11 en voor het Ameland veld in Referentie 12. Hierin wordt o.a. beschreven in hoeveel putten er boorgatmetingen (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”).

De geologische modellen worden vervolgens gedeeld met de reservoir engineer. Deze combineert de 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 de aquifer en ook de hoeveelheid gas in de 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.

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

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 (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	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

reproducen, maar verschillende voorspellingen van de toekomstige reservoir en aquiferdrukken 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 11 voor de Wadden en Anjum velden en Referentie 12 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 reproducen.

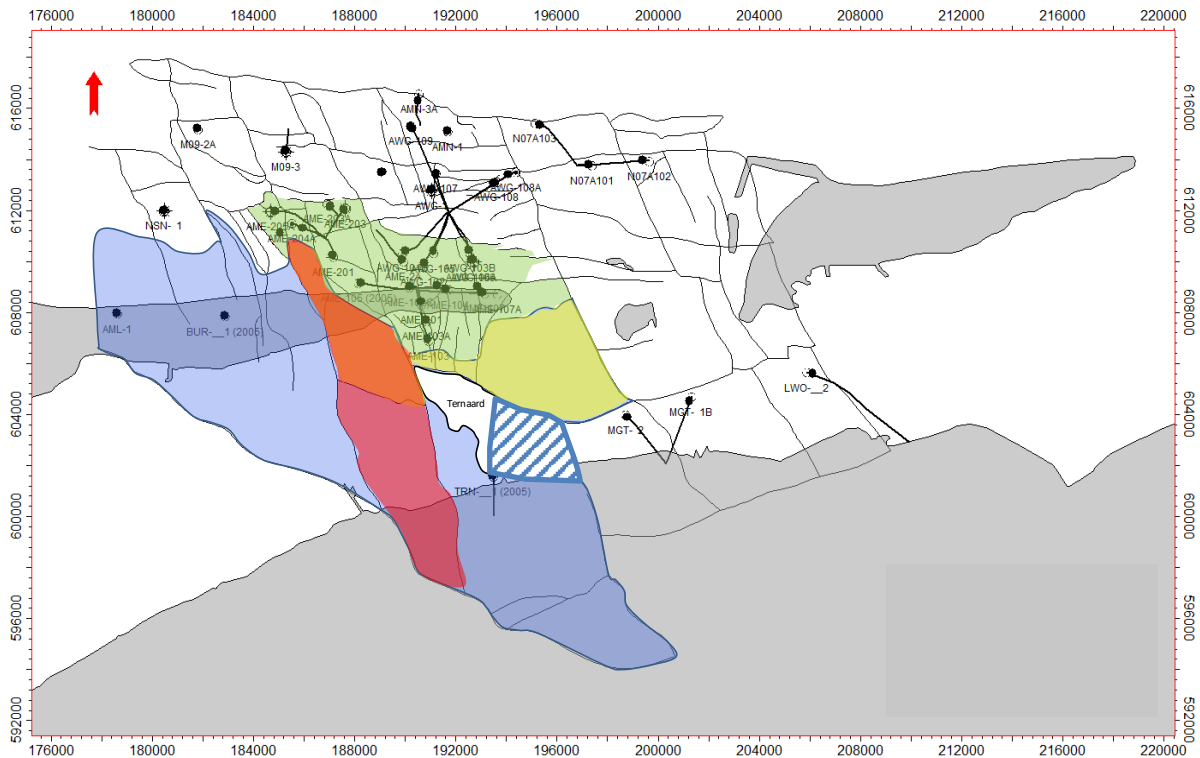
Om de onzekerheden mee te nemen die *in mindere mate* gereduceerd kunnen worden met behulp van de historische productiegegevens en drukmetingen, worden er verschillende realisaties van de reservoirmodellen gemaakt. Resterende onzekerheden die worden meegenomen in de verschillende realisaties zijn:

- De hoeveelheid gas in de aquifer, zogenaamd paleo-residueel gas. Deze parameter beïnvloedt hoe de druk in de 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 de 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 15). 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.

Referentie 24 beschrijft de mogelijkheid van communicatie tussen breukblokken voor de Waddenvelden. Voor het merendeel van de randbreuken is het uiterst onwaarschijnlijk dat ze doorlatend zijn. Langs de oostelijke randbreuk bestaat een klein segment waar mogelijk een verbinding kan ontstaan tussen het Lauwersoog-Oost veld en het oostelijk gelegen breukblok. Referentie 28 beschrijft ook dat er in het noorden van het Nes veld een klein gebied is met zandsteen-zandsteen overlap aan weerszijden van de westelijke randbreuk. Drukcommunicatie tussen Nes en het aangrenzende breukblok werd als onwaarschijnlijk beschouwd, gezien de verschillende gas-watercontacten in Ternaard en Nes. Als onderdeel van het onderzoek naar de discrepantie tussen bodemdalingsmetingen en het bodemdalingsmodel in dit gebied zijn er extra realisaties meegenomen (zie bijlage G in

Referentie 30). Hierin is aangenomen dat de breuk in het noordwesten van Nes naar het westen toe, in het gedeelte waar er nog contact is tussen de zandsteenlagen, doorlatend is of is geworden gedurende de productieperiode. Door deze aanname is het mogelijk dat er drukcommunicatie bestaat tussen het Nes veld en het breukblok. In de verschillende realisaties depleteert het westelijk gelegen breukblok hierdoor in meer of mindere mate mee met het Nes veld. Het gasvoerende breukblok dat volgens het winningsplan Ternaard wordt aangeboord staat hierbij niet in verbinding met het Nes veld.

Alle drie modelrealisaties voor het Moddergat veld zijn opnieuw gekalibreerd, zodat ze beter passen bij de druk die recent gemeten is. Dit wordt in meer detail beschreven in Bijlage E.



Figuur 2-2: Laterale aquifers van het Ameland voorkomen. In rood is de zuidwestelijke aquifer E21 aangegeven, in geel is de zuidoostelijke aquifer E11-15 en E14 en, gearceerd, het breukblok ten westen van het Nes gasveld.

De modelrealisaties voor de overige velden zijn ongewijzigd t.o.v. de vorige rapportage. De modelrealisaties verschillen met name in de aquiferpermeabiliteit en de paleo-gassaturatie, zodat de modelrealisaties de historische metingen kunnen reproduceren maar tegelijkertijd verschillende drukvoorspellingen van met name de aquiferdruk geven):

- Een aquifer waarvan het water niet of nauwelijks 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 meer mobiel is, waardoor zowel de druk daalt in het gasreservoir als in de aquifer, resulterend in meer bodemdaling. Dit is de hoge modelrealisatie.

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

- Voor het Ameland veld zijn drie interim-realisaties tussen de laag en hoog realisaties meegenomen, zie Tabel 2-5. Hiermee is onderzocht wat de invloed is op bodemdaling van depletie van de aquifers ten zuidwesten en zuidoosten van het Ameland veld (zie Figuur 2-2).

Tabel 2-5 geeft de gebruikte waarden voor de belangrijkste aquifer gerelateerde parameters in de verschillende modelrealisaties. Daarnaast zijn er nog andere parameters die verschillende waarden tussen de modelrealisaties hebben. 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 waarden voor de porositeit in de petrofysische logs en de gesteentekernen, en er zijn geen onrealistische waarden (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.

Tabel 2-5: Overzicht van de aquiferparameters in de verschillende modelrealisaties per voorkomen.

Voorkomen	Realisatie	Paleo-residueel gas (%)	Permeabiliteits-factor aquifer
Ameland ²	Laag (M9201)	10	0,01 (E21) & 0,001 (E11-15)
	Basis (M96)	5	0,1 (E21) & 1 (E11-15)
	InterM98	5	1 (E21) & 1 (E11-15)
	InterM103	0	0,01 (E21) & 1 (E11-15)
	InterM10202	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	0,3
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	8	0,01
	Basis	8	0,1
	Hoog	8	0,2
Moddergat	Laag	13	0,001
	Basis	20	0,5
	Hoog	15	1
Nes	Laag	16	0,3
	Basis	18	0,1
	Basis_aquifer	18	0,5 (horizontaal) & 0,03 (verticaal)
	Hoog	19	0,05 (horizontaal) & 0,7 (verticaal)
Vierhuizen-Oost	Laag/basis	16	0,3 (horizontaal) & 0,06 (verticaal)
	Hoog	0	1

² GNSS-metingen zijn gebruikt om de drukdaling in het zuidwestelijke aquifer (E21) en zuidoostelijke aquifers (E11-15 en E14 in Figuur 2-2) te kalibreren (Referentie 14).

De drukmetingen in de putten (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.

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, vandaar dat de voorgenomen productie op 0 staat. Ook uit het Lauwersoog-Oost voorkomen kan op dit moment niet geproduceerd worden i.v.m. technische problemen in de put. Er wordt onderzocht hoe de productie uit dit veld hervat kan worden.

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

Jaar	Moddergat	Nes	Lauwersoog-Oost	Lauwersoog-West	Lauwersoog-Centraal	Vierhuizen-Oost
2026	114	202	0	43	1	0
2027	109	171	52	42	0	0
2028	94	109	121	31	0	0
2029	96	184	115	0	0	0
2030	86	159	100	0	0	0
2031	78	133	90	0	0	0
2032	71	112	82	0	0	0
2033	64	80	76	0	0	0
2034	58	58	71	0	0	0
2035	52	53	67	0	0	0
Totaal	822	1261	774	116	1	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 12). 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, d.w.z. met een druk die hoger is dan de hydrostatische druk. De compactie van de reservoirlaag gedraagt zich in deze staat 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 10).

De kruip van het zout boven het compacterende reservoir is gesimuleerd door de toepassing van een "bewegend" rigid basement proxy (Referentie 13). 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 volgen worden alle velden (Ameland, de Anjum en de Wadden voorkomens) volgens de

LTS-II methode doorerekend, 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, doorerekend 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 40.000 bodemdalingsscenario's gemaakt op basis van de onzekerheid in de waarden voor de invoergegevens in de bodemdalingsscenario's. Ook zijn de ranges voor een aantal parameters vergroot.

Uit het vergelijk tussen de metingen en het model bleek dat de gemodelleerde bodemdaling boven het Nes West breukblok lager was dan de gemeten bodemdaling (blauw gebied ten westen van het Nes veld in Figuur 2-8). Deze discrepantie is onderzocht en beschreven in bijlage G van de Meet- en regelrapportage over 2023 (Referentie 30). Het blok dat waarschijnlijk mee in druk daalt met het gasveld Nes, wordt het Nes West breukblok genoemd. Voor het Nes West breukblok werd in de rapportage over 2023 dezelfde geomechanische parameterdistributie gebruikt als voor Nes en Moddergat. Deze keuze was logisch omdat het Nes veld het dichtstbijzijnde veld is, maar had tot gevolg dat de discrepantie maar beperkt werd opgelost. In deze en de vorige M&R rapportage is ervoor gekozen om, a priori, de geomechanische parameterdistributie van Ameland te gebruiken. Deze keuze zal ertoe leiden dat bodemdalingsscenario's worden gekozen met meer bodemdaling boven dit blok vanwege de hogere C_m waarde (uni-axiale gesteentecompressibiliteit). Er zijn geen gesteentemonsters genomen in Ternaard die deze keuze kan valideren. Als gevolg van deze keuze wordt het breukblok Nes West toegevoegd aan het kalibratiegebied Ameland (zie volgende alinea).

Voor het beoordelen van de passing tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling zijn, gelijk aan de vorige M&R, vier kalibratiegebieden gedefinieerd. De confrontatie tussen meting en model wordt per kalibratiegebied berekend. De velden binnen een kalibratiegebied starten met gelijke a priori distributies voor de parameterwaarden en krijgen dezelfde geomechanische parameterwaarden per bodemdalingsscenario. De gebieden zijn als volgt gedefinieerd (Figuur 2-3):

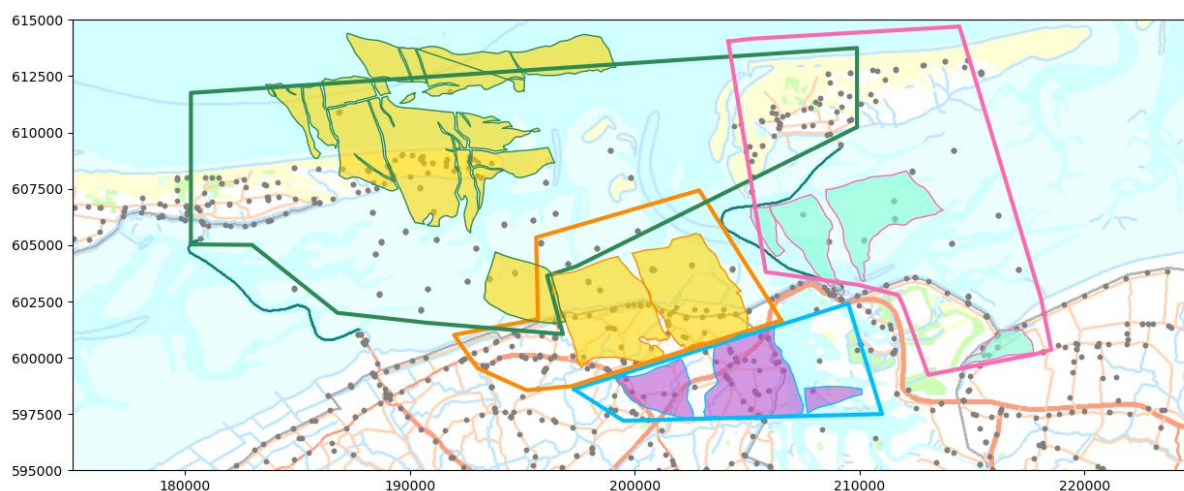
1. Ameland/Nes West breukblok,
2. Anjum/Ezumazijl/Metslawier,
3. Nes/Moddergat
4. Lauwersoog C/O/W en Vierhuizen

Om de meest waarschijnlijke drukdalingsrealisaties te zoeken zijn er combinaties van de reservoirrealisaties gemaakt. Voor groepen van velden, waarvoor er een overlap van de bodemdalingssommen bestaat, zijn telkens alle mogelijke combinaties bepaald. Deze groepen worden combinatiegebieden genoemd (zie Tabel 2-7 en de verschillende veldkleuring in Figuur 2-3):

- a. Ameland, Nes West breukblok, Nes en Moddergat
- b. Lauwersoog C/O/W en Vierhuizen
- c. Anjum/Ezumazijl/Metslawier

Als voorbeeld: het combinatiegebied Ameland, Nes West breukblok, Nes en Moddergat (oranje) bevat vier velden. Voor deze groep velden zijn 162 ($6 \times 3 \times 3 \times 3$) verschillende combinaties van reservoirrealisaties mogelijk. De getallen tussen haakjes verwijzen naar het aantal realisaties per veld (zie ook Tabel 2-7). Vervolgens worden per combinatie 40.000 bodemdalingsscenario's gegenereerd. Dit betekent dat er 162 combinaties gecombineerd

worden met 40.000 trekkingen uit de geomechanische parameterdistributies. Deze 6,5 miljoen bodemdalingsscenario's, worden vervolgens met de geodetische metingen geconfronteerd. Voor de overige combinatiegebieden kunnen minder dan 162 combinaties worden gemaakt. Bij de berekening van de cumulatieve bodemdaling voor alle velden worden in totaal 162 combinaties berekend. Deze zijn voor het combinatiegebied Ameland, Nes West breukblok, Nes en Moddergat uniek en worden voor de overige combinatiegebieden herhaald tot aan 162.



Figuur 2-3: Vier kalibratiegebieden, aangegeven met de gekleurde polygonen, met daarbinnen de gebruikte geodetische metingen. De meetpunten in het overlapgebied tussen de Waddenvelden en Ameland worden bij de confrontatie tussen model en meting door twee kalibratiegebieden gebruikt. De kleuren van de velden bepalen de combinatiegebieden. Het groen gekleurde gebied ten westen van het Nes gasveld is het breukblok dat waarschijnlijk in verbinding staat met Nes.

Tabel 2-7: Reservoirrealisaties per veld en aantal mogelijke combinaties per combinatiegebied. De kolommen in de tabel geven de namen van de reservoirrealisaties per veld.

Realisaties per veld										
Ameland	Nes West breukblok	NES	MGT	LWOC	LWOO	LWOW	VHN	ANJ	EZU	MET
basis (M96)	scen0	basis	basis	basis	basis	basis	basis	basis	basis	basis
hoog (M102)	scen1	hoog	hoog	hoog	hoog	hoog	hoog	hoog	hoog	hoog
laag (M9201)	scen2	laag	laag	laag	laag	laag		laag	laag	laag
Interim 2 (M10202)										
Additional 1 (M103)										
Additional 2 (M98)										
162 combinaties				54 combinaties				27 combinaties		

2.3.3.2 Geodetische componenten bij het verifiëren van de bodemdalingsscenario's

De geodetische metingen worden in de LTS-studie (Referentie 12) geconfronteerd met bodemdalingsscenario's 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 2025 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.

Constructie van de covariantiematrix van geodetische dubbel-differenties

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

- Waterpassingen Ameland eiland: t/m 2023 (laatste waterpassing).
- Waterpassingen Schiermonnikoog: t/m 2024 (laatste waterpassing).
- Waterpassingen vasteland Noord-Nederland (Lauwersmeergebied): t/m 2023.
- GNSS-metingen: campagne (Waddenzee) en jaarlijkse sampling van de continue stations (Ameland, productieplatformen en op het vasteland) t/m 2025.
- InSAR: op het vasteland, jaarlijks gesampled op peilmerklocaties, 2018 tot 2023.

Uit deze metingen worden lineair onafhankelijke dubbel-differenties gevormd in ruimte en tijd. De precisie van deze dubbel-differenties wordt beschreven door een covariantiematrix.

De covariantiematrix in de LTS-studie wordt opgebouwd uit de volgende componenten:

- a) Meetprecisie,
- b) Idealisatie precisie – temporele component (potentiële peilmerkinstabiliteit),
- c) Idealisatie precisie – spatio-temporele component (bijvoorbeeld bodembeweging door ondiepe processen),
- d) Model-imperfecties – spatio-temporele component.

Sinds de vorige Meet- en Regel cyclus is de opbouw van de covariantiematrix iets aangepast. In analogie met de Groningen long term subsidence forecast studie (Referentie 34), is de deze herzien naar strikt geodetische componenten (A en B) en een geomechanische modelonzekerheid (C):

- A. Meetprecisie,
- B. Idealisatie precisie – temporele component (potentiële peilmerkstabiliteit),
- C. Geomechanische model-imperfecties, gemodelleerd als een factor maal de waarde van de gemodelleerde dubbel-differentie (de bodembeweging tussen 2 tijdstippen en 2 meetpunten).

De componenten A en B zijn dus ongewijzigd ten opzichte van de LTS-studie. De toe te passen factor voor de geomechanische modelimperfecties wordt geschat in de confrontatie workflow tussen geodetische metingen en geomechanisch modellen. De factor wordt dusdanig gekalibreerd dat het best passende geomechanische model resulteert in een waarde van de χ^2/n toetsgrootte nabij de verwachtingswaarde van 1. Omdat de factor een schalingsfactor is, wordt voor de gebieden met meer gemodelleerde bodemdaling (bijvoorbeeld in het centrum van de bodemdalingsskom op Ameland) een grotere onzekerheid bepaald dan in de gebieden met minder bodemdaling. Deze methode past beter bij het concept dat de onzekerheid in de geomechanische parameters zich voortplant in de onzekerheid van de bodemdaling.

De aangepaste opbouw van de covariantiematrix voorziet niet expliciet in spatio-temporele deviaties door ruimtelijke gecorreleerde ondergrondse processen anders dan gaswinning.

Het is mogelijk dat in de toekomst, wanneer de winningen meerdere decennia bestrijken, dit soort, bv. natuurlijke, processen ruisoverstijgend worden. In dat geval zou een mogelijke optie zijn om de temporele component van de idealisatie precisie op termijn te verhogen.

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. Peilmerk(in)stabiliteit en 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.

Voor alle drie geodetische meettechnieken (waterpassen, InSAR, GNSS) en in alle kalibratiegebieden is component C (geomechanische modelimperfecties) toegepast in de covariantiematrix. Net zoals in voorgaande cycli is extra gewicht toegekend aan de metingen op het Wad. Dit is in de nieuwe opbouw van de covariantiematrix gedaan, door component B (temporele component van de idealisatie precisie) op 0 te zetten voor de GNSS-campagne-metingen op de Waddenzeeclusters.

Wat betreft de structuur in de huidige opbouw van de covariantiematrix geldt het volgende:

- Er is geen correlatiestructuur toegepast voor component C, de geomechanische model-imperfecties.
- Componenten A (meetprecisie) en B (peilmerkstabiliteit) resulteren voor waterpassen en GNSS in een blok-diagonale covariantiematrix, en volgen geheel de methode uit de LTS-studie.
- Het stochastisch model voor InSAR bestaat uit een variantie, en is ongewijzigd ten opzichte van de Meet- en regelcyclus van vorig jaar:

$$\sigma^2 = 0,40 \cdot 2 \cdot (4^2 \text{ mm}^2 + 4 \text{ mm}^2); \sigma = 4 \text{ mm}$$

Deze variantie bestaat uit een component meetprecisie (A) en een component puntstabiliteit (B).

De confrontatie van geodetische data met bodemdalingsscenario's levert, na iteratie, waardes van de minimale χ^2/n toetsgrootheden van 0,89 (kalibratiegebied Lauwersoog/Vierhuizen) en 1 (overige kalibratiegebieden), zie Tabel 2-8.

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

Voor alle combinaties van drukrealisaties wordt de toetsgrootheid χ^2/n per kalibratiegebied bepaald, welke de gekozen maat is voor de overeenkomst tussen de bodemdalingsscenario's en de geodetische metingen (Figuur 2-3).

Per kalibratiegebied wordt voor elk bodemdalingsscenario de passing van het scenario met de metingen uitgedrukt in een waarde voor de χ^2/n toetsgrootheid. De passing 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 voor bijvoorbeeld het gewogen gemiddelde en het betrouwbaarheidsinterval worden afgeleid. De minimale χ^2/n toetsgrootheden na confrontatie met de bodemdalingsscenario's zijn weergegeven in Tabel 2-8 per kalibratiegebied. Deze minimale waarde geldt voor het beste bodemdalingsscenario voor het desbetreffende kalibratiegebied.

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

Kalibratiegebied	Factoren om de modelonzekerheid te bepalen (standaarddeviatie)	Minimale χ^2/n toetsgrootheid confrontatie
Ameland	0,099	1,00
Nes/Moddergat	0,055	1,00
Lauwersoog/Vierhuizen	0,001	0,89
Anjum	0,036	1,00

Ter illustratie: Op Ameland op een plek waar de daling door gaswinning 35 cm is, bedraagt de modelonzekerheid (standaarddeviatie) dan $0,099 \cdot 35$ cm, dus ongeveer 3,5 cm. Voor drie van de validatiegebieden kon de schaalfactor voor de modelonzekerheid dusdanig gekalibreerd worden, dat de minimale χ^2/n toetsgrootheid precies op 1 uitkomt. In het gebied Lauwersoog/Vierhuizen lukt dat niet, omdat de passing van het beste scenario daar al beter is dan alleen op grond van de meetonzekerheid te verwachten valt. In dat gebied treedt weinig bodemdaling op. De bodemdaling is in dit gebied te beperkt, om het stochastisch model te evalueren of zelfs te kalibreren.

Van de 162 drukcombinaties worden het aantal unieke combinaties bepaald die mogelijk zijn voor het betreffende kalibratiegebied. Na de confrontatie worden de beste unieke combinaties bewaard, d.w.z. de combinaties met de laagste χ^2/n waarde.

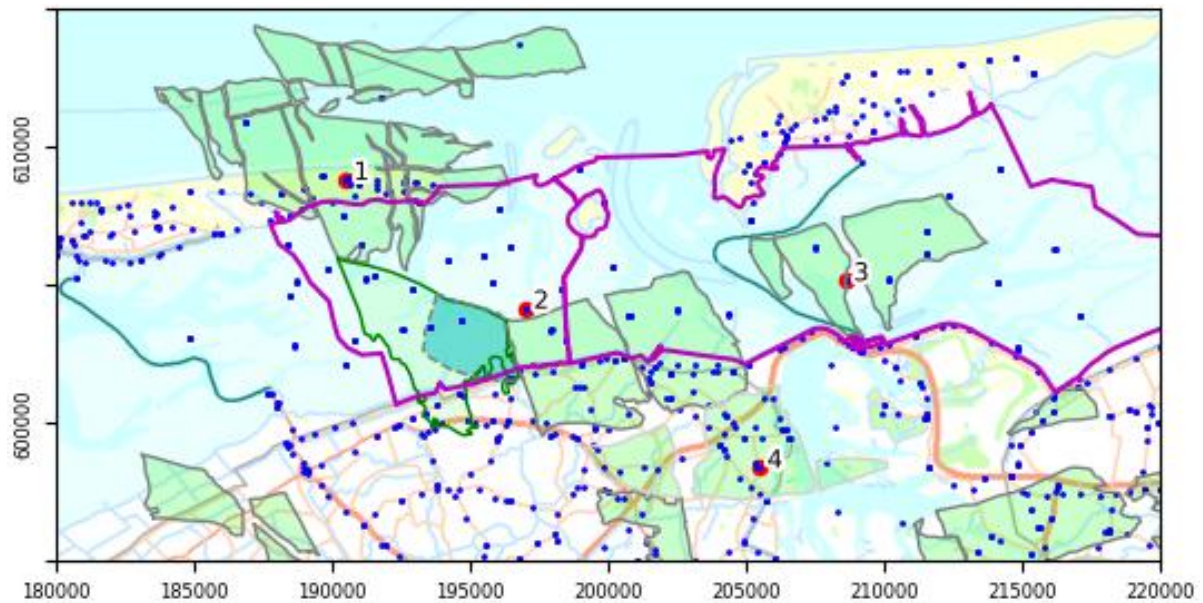
Als voorbeeld: het kalibratiegebied Anjum bestaat uit de velden Anjum, Ezumazijl en Metslawier. Deze hebben allen een low, base en high drukrealisatie. Er zijn dus 27 verschillende drukcombinaties mogelijk in dit kalibratiegebied, maar samen met de andere realisaties buiten het kalibratiegebied komen deze combinaties dus vaker (6 keer) voor in de set van in totaal 162 combinaties. De combinaties en bijbehorende scenario's per

kalibratiegebied, die meerdere keren voorkomen, hebben niet altijd dezelfde χ^2/n waarde. Uiteindelijk worden de 27 unieke combinaties in dit kalibratiegebied geselecteerd, op basis van het scenario met de laagste χ^2/n waarde. Deze geselecteerde combinaties en bijbehorende scenario's worden verder gebruikt in de volgende rekenstap. In het voorbeeld voor het kalibratiegebied Anjum wordt dan verder gerekend met $27 * 40.000 = 1.080.000$ scenario's.

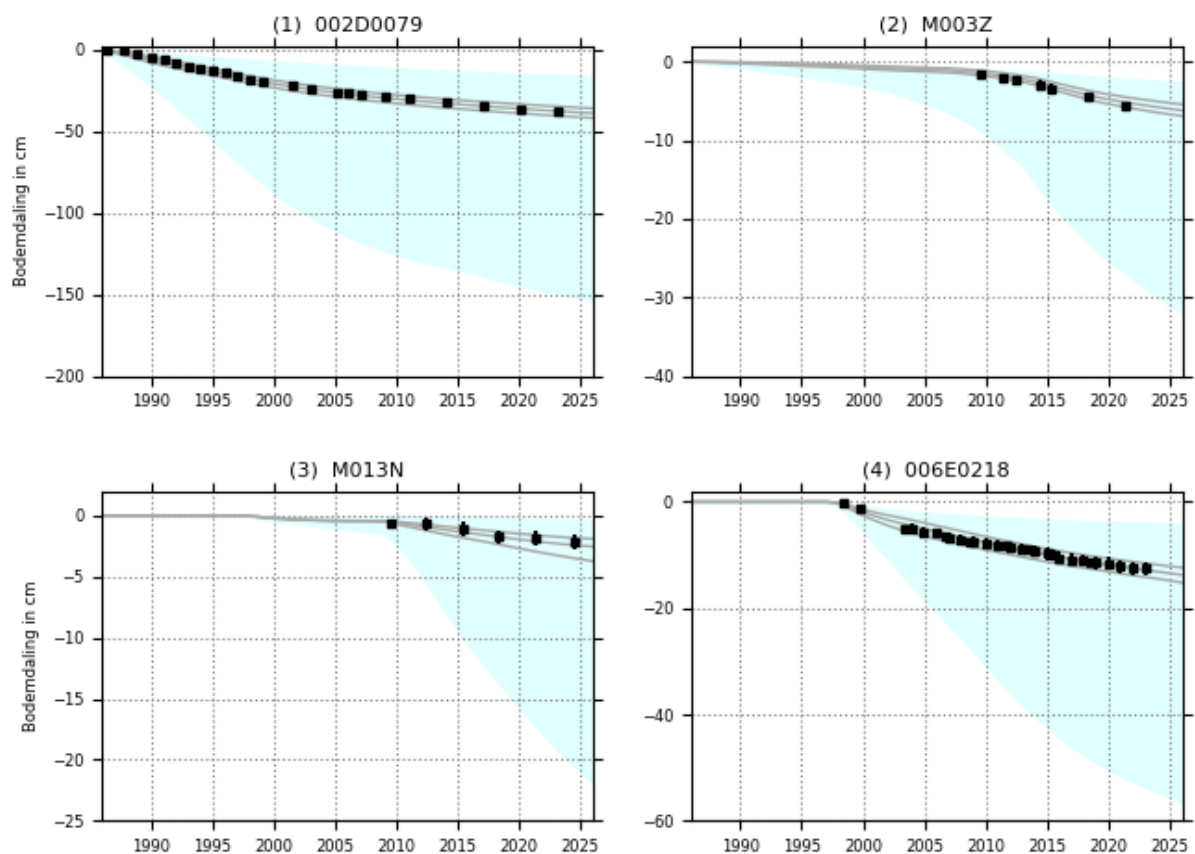
Van deze scenario's worden vervolgens de waarschijnlijkheid en de cumulatieve waarschijnlijkheid bepaald. De scenario's tot een cumulatieve waarschijnlijkheid kleiner dan $1 \cdot 10^{-7}$ vallen af, waarmee de set van mogelijke scenario's weer wordt gereduceerd. Voor alle scenario's binnen deze selectie wordt de bodemdaling op de peilmerken berekend. Per peilmerk wordt vervolgens een rangschikking gemaakt van de scenario's die het best passen bij de metingen op het betreffende peilmerk. Het betrouwbaarheidsinterval en het gewogen gemiddelde kan hiermee bepaald worden.

Voor de vier in Figuur 2-4 geselecteerde punten toont Figuur 2-5 met grijze lijnen de statistische bodemdalingslijnen voor de 2,5% overschrijdingskans, het gewogen gemiddelde en de 97,5% overschrijdingskans. Deze statistische waarden worden per peilmerk en per jaar bepaald en kennen dus niet een uniek overlappend bodemdalingsscenario. Het blauwe vlak toont het bereik van de a-priori bodemdalingsruimte (voor de confrontatie met de metingen). Ook is de gemeten bodemdaling (inclusief onzekerheid) als punten weergegeven in de grafieken.

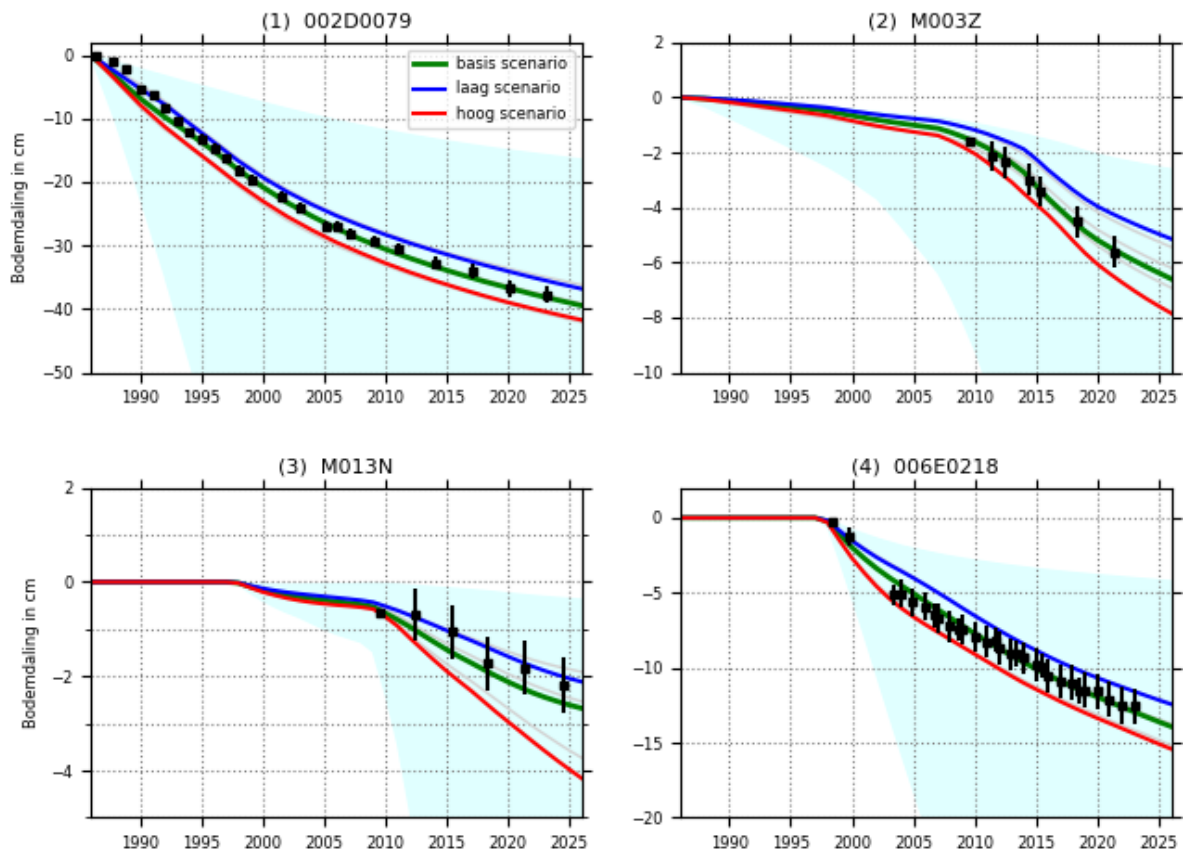
Om ervoor te zorgen dat de probabilistische resultaten gekoppeld kunnen worden aan deterministische scenario's, zijn er scenario's gekozen die zo dicht mogelijk in tijd en plaats bij de drie statistische waarden liggen (gewogen gemiddelde, 2,5% en 97,5% overschrijdingskansen). Dit maakt de koppeling naar parameterwaarden inzichtelijker en het vergelijk met bijvoorbeeld een geodetische ruimte-tijd analyse eenvoudiger. Ook is deze stap noodzakelijk om de prognoses te maken. De gekozen deterministische lijnen zijn met blauw, groen en rood aangegeven (Figuur 2-6) 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 2-4: Selectie van vier meetpunten boven de velden Ameland (1), Nes (2), Lauwersoog (3) en Anjum (4), waarvan de bodemdaling in de komende figuren is weergegeven.



Figuur 2-5: Bodemdaling op vier meetpunten (zie Figuur 2-4). De grijze lijnen geven de statistische waarden voor de 2,5 %, 50 % en 97,5 % percentielen van alle scenario's weer. Het lichtblauwe gebied geeft de a priori gemodelleerde bodemdalingsruimte aan. De gewaterpaste hoogteverschillen met onzekerheid (2σ) zijn in het zwart te zien. De tijdserie van peilmerk 002D0079 is vanaf 2020 voortgezet met peilmerk 002D0137. Let op de verschillende schalen op de y-as.



Figuur 2-6: Bodemdaling op vier meetpunten (zie Figuur 2-4). In de grafieken zijn zowel de statistische (grijze lijnen, zie ook Figuur 2-5) als de deterministische scenario's (groen, blauw en rood) te zien. De gewaterpaste hoogteverschillen met onzekerheid (2σ) zijn in zwart aangegeven. De tijdserie van peilmerk 002D0079 is vanaf 2020 voortgezet met peilmerk 002D0137.

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

De geomechanische parameters per kalibratiegebied voor het lage, basis en hoge bodemdalingsscenario (Tabel 2-9) volgen uit de deterministische scenario's (Figuur 2-6). De C_{mref} factor voor Ameland is lager dan vorig jaar, maar omdat de overige parameters ook andere waarden kennen blijft de gemodelleerde bodemdaling vergelijkbaar met die van de vorige Meet en Regel cyclus (Referentie 31). 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 dan de hydrostatische druk (overdruk) 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 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 per bar drukdaling hoger zal worden.

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 compacterende reservoir of aquifer. Voor alle velden is de relatie tussen kernplug C_m metingen met de porositeit³ gebruikt om een spatiëel C_m grid te maken die als a priori informatie gebruikt wordt in de berekeningen. De C_{mref} en C_{md} zijn vermenigvuldigingsfactoren op deze grids. 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 niet gevonden. Het is mogelijk dat naast de C_m van het gesteente bijvoorbeeld drukdaling, en daarmee een dikkere compacterende laag dan aangenomen, in andere lagen een rol kan spelen. Voor een verdere beschrijving van de RTCiM- en zoutparameters wordt verwezen naar Referentie 12.

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

Parameter	Kalibratiegebied			
RTCM	Ameland/ Nes West breukblok	Anjum	Nes Moddergat	Lauwersoog/ Vierhuizen
C_{mref} (factor) [-]	2,53 - 3,14 - 2,59	1,99 - 1,78 - 2,12	1,54 - 1,51 - 2,0	1,67 - 1,58 - 1,27
C_{md} (factor) [-]	0,4 - 0,53 - 0,66	0,31 - 0,39 - 0,51	0,15 - 0,25 - 0,38	0,13 - 0,28 - 0,2
b [-]	0,032 - 0,037 - 0,030	0,044 - 0,038 - 0,043	0,021 - 0,017 - 0,027	0,033 - 0,022 - 0,007
Zoutgedrag				
$C/k(0)$ [-]	0,83 - 0,82 - 0,76	0,64 - 0,65 - 0,68	0,79 - 0,72 - 0,75	0,91 - 0,8 - 0,68
$d(c/k)$ [-]	0,34 - 0,24 - 0,29	0,29 - 0,49 - 0,41	0,4 - 0,43 - 0,3	0,3 - 0,29 - 0,48
T_{salt} [jaar]	41,3 - 27,7 - 22,5	17,4 - 40,5 - 40,9	72,6 - 51,2 - 40,2	30,6 - 41,5 - 30,6

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 bodemdalingsscenario.

Veldnaam	Reservoirrealisaties voor de bodemdalingsscenario's		
	laag	basis	hoog
Anjum	hoog	hoog	hoog
Ameland	Additional 2 (M98)	Additional 2 (M98)	Additional 2 (M98)
Ezumazijl	laag	laag	laag
Lauwersoog Centraal	hoog	hoog	laag
Lauwersoog Oost	basis	basis	laag
Lauwersoog West	basis	basis	hoog
Metslawier	laag	laag	laag
Moddergat	hoog	hoog	basis
Nes	laag	laag	hoog
Nes West Breukblok	scen2	scen1	scen1
Vierhuizen	hoog	hoog	hoog

Het breukblok ten westen van Nes depleteert in lage scenario met 159 bar (scen2) en in de overige scenario's met 255 bar (scen1).

³ 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 [-].

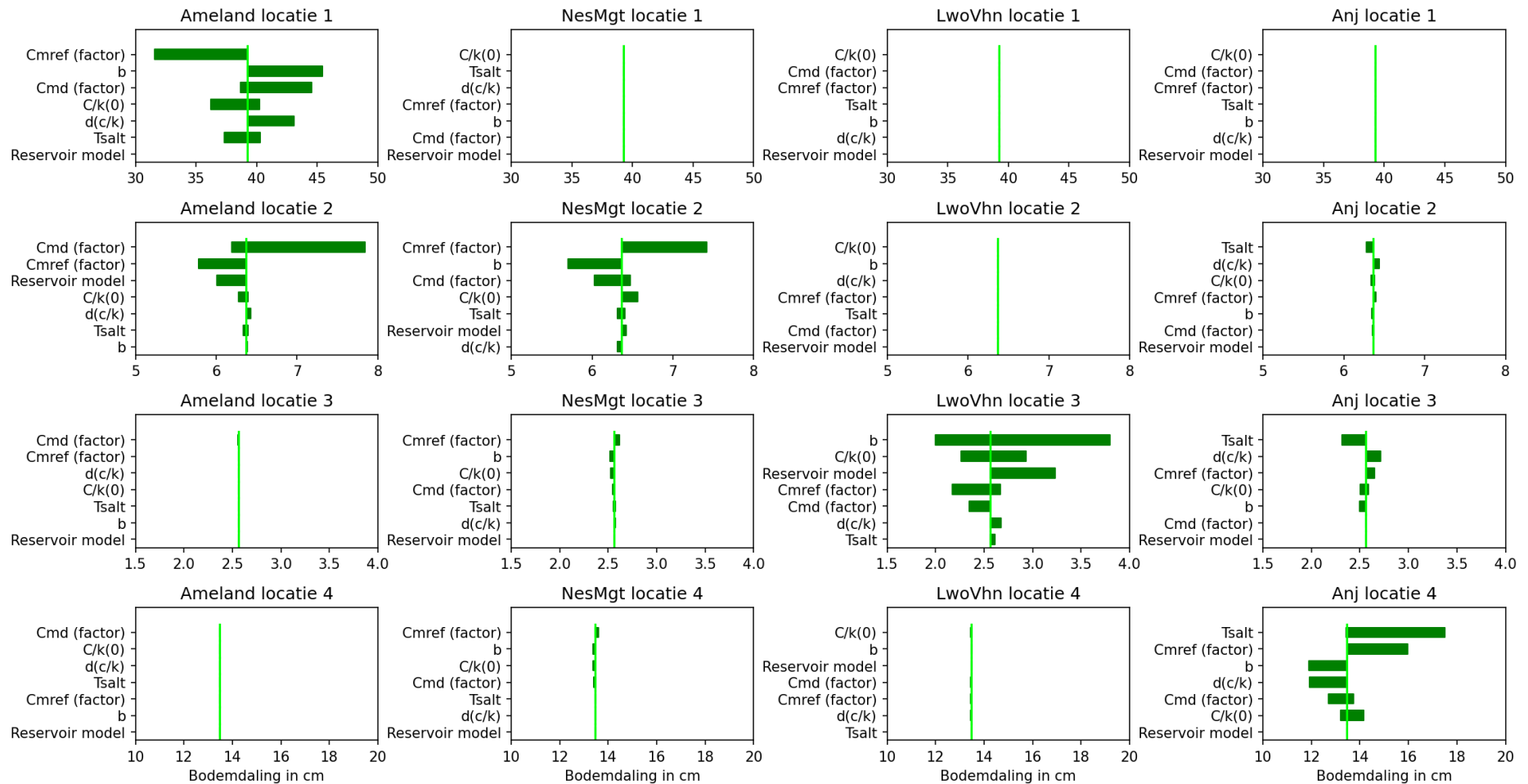
Om de gevoeligheid van de geomechanische parameterwaarden op de gemeten data inzichtelijk te maken is een Tornado chart gemaakt (Figuur 2-7). Met behulp van dit figuur kan de parameter gevonden worden die de sterkste invloed op de bodemdaling heeft voor het betreffende punt (zie Figuur 2-4 voor de locatie 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 weergegeven 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 2-7). De Anjum en Nes-Moddergat en Lauwersoog-Vierhuizen kalibratiegebieden hebben voor dit punt geen effect op de bodemdaling. Op locatie 1 heeft de Cmref het meeste invloed en hebben de reservoirrealisaties het minste invloed op de bodemdaling. Deze laatste observatie kent een logische verklaring, omdat voor alle bodemdalingsscenario's de Additional2_M98 reservoirrealisatie is gevonden na confrontatie met de metingen (zie Tabel 2-10). Op de Waddenzee (Nes-Moddergat en Lauwersoog-Vierhuizen kalibratiegebieden, locaties 2 en 3 in Figuur 2-4) 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.

2.3.3.5 Vergelijking van de bodemdalingsscenario's met het geodetisch model

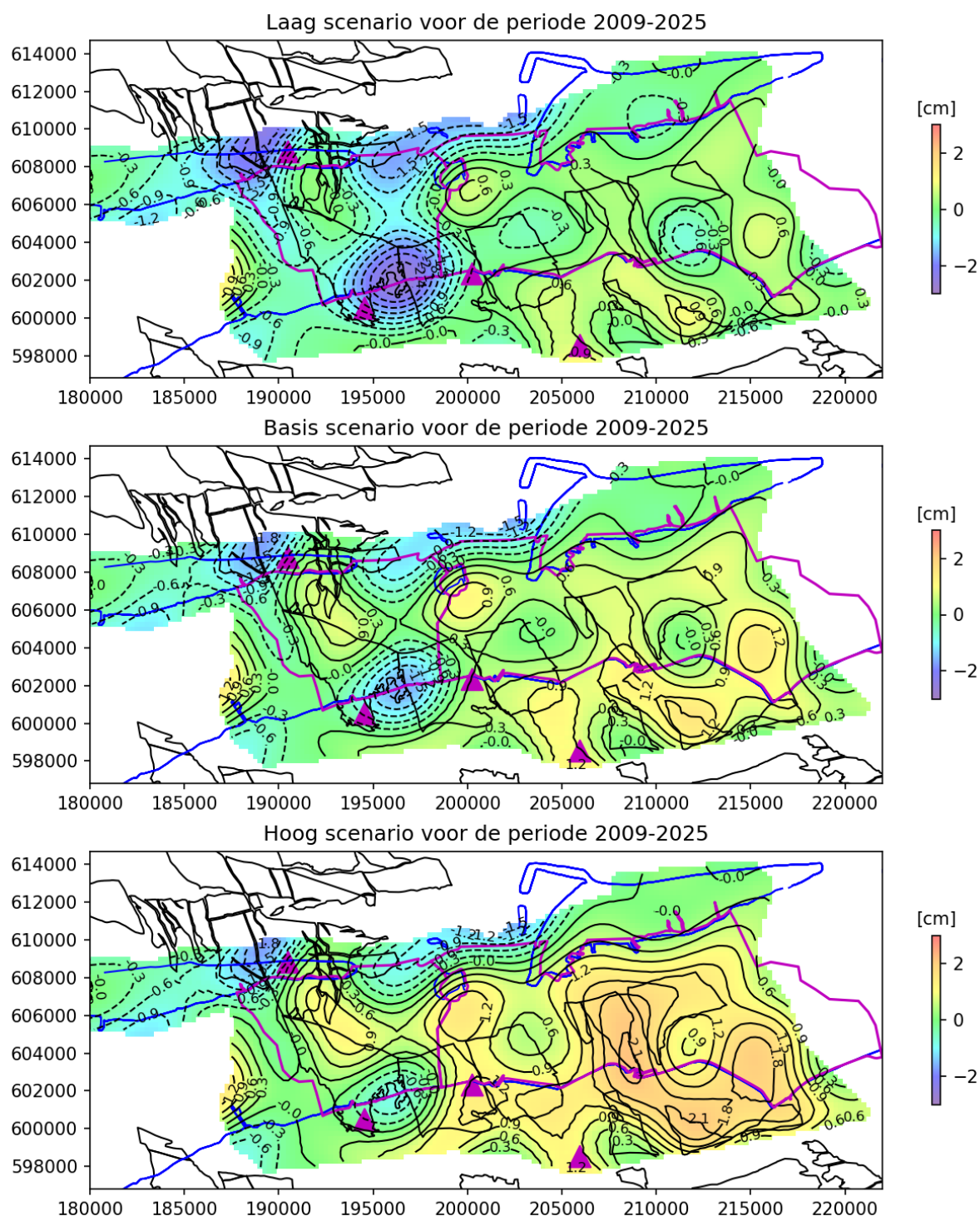
Het vergelijk met de metingen is in deze rapportage ook gevisualiseerd met behulp van een ruimte-tijd geodetisch model (paragraaf 2.2.5) berekend uit waterpas-, GNSS, en InSAR metingen, waarbij de verschillen tussen het geomechanische model en het geodetisch model gevisualiseerd worden als een gekleurd oppervlak. Dit is voor de verschillende bodemdalingsscenario's (laag, basis en hoog) weergegeven in Figuur 2-8.

Uit de vergelijking blijkt dat het basisscenario goed past met de ruimte - tijd analyse van de metingen voor de periode 2009-2025. Voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag geeft het bodemdalingsmodel meer daling dan het geodetisch model (sub-cm over een periode van 15 jaar). De variatie in verschillen is in het Pinkegat kombergingsgebied iets groter, maximaal 1,5 cm in 16 jaar (i.e. ongeveer 1 mm per jaar). Er zijn zowel gebieden waar de bodemdaling licht wordt overschat en gebieden waar de bodemdaling licht wordt onderschat. In Referentie 30 (bijlage G) staat beschreven wat de mogelijke oorzaken kunnen zijn van de discrepantie tussen het geomechanische model en de ruimte - tijd analyse van de metingen, die geconstateerd is net ten westen van het Nes veld.

Periode :1986 tot 2026



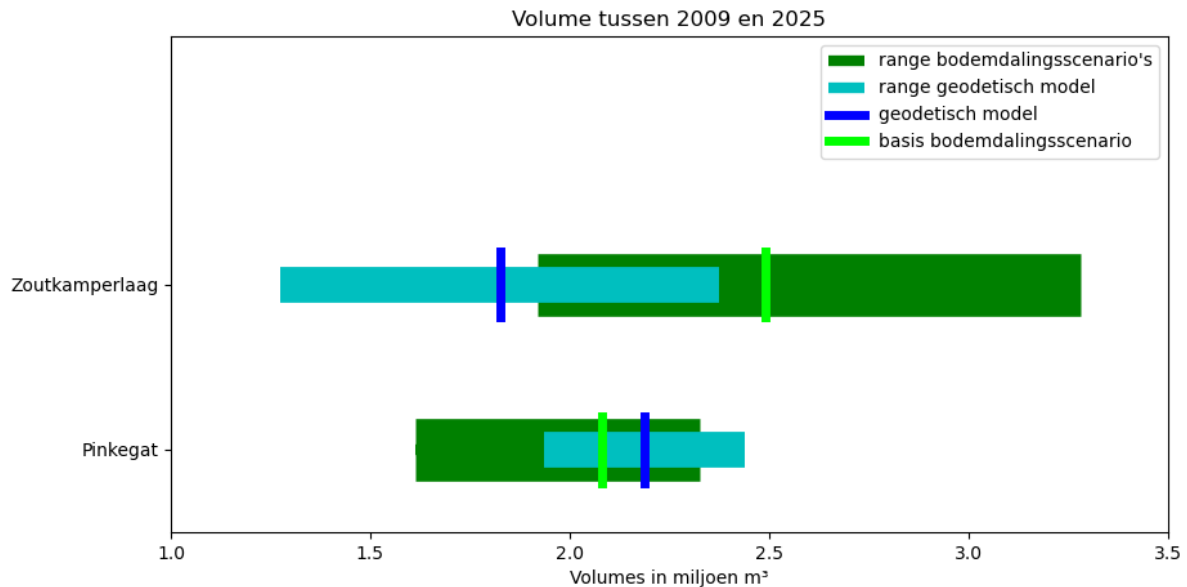
Figuur 2-7: Tornado charts, die de invloed van de parameterwaarden toont op de bodemdaling op de vier locaties uit Figuur 2-4. Voor elke locatie is separaat een Tornado-chart gemaakt voor elk van de vier kalibratiegebieden. De charts laten het effect zien van het boven de charts genoemde kalibratiegebied op de betreffende locatie. De bodemdaling is berekend van start winning tot 2026. De lichtgroene lijn laat de bodemdaling volgens het basisscenario zien.



Figuur 2-8: Verschil (in cm) tussen de gemodelleerde bodemdaling volgens het laag (bovenste figuur), basis (middelste figuur), hoog scenario (onderste figuur) en de ruimte - tijd analyse van de metingen voor de periode 2009-2025. 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.

Met het geodetisch model zijn ook de bodemdalingsvolumes berekend voor de periode tussen 2009 en 2025 voor de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. Voor deze bodemdalingsvolumes zijn tevens de onzekerheidsmarges bepaald, op basis van de precisie

van de in ruimte en tijd gecorreleerde bodembeweging die berekend is uit de geodetische metingen. Deze volumes zijn vergeleken met de uitkomsten voor het lage, basis en hoge bodemdalingsscenario (Figuur 2-9). De gemodelleerde bodemdalingsvolumes voor Zoutkamperlaag en Pinkegat komen binnen de onzekerheidsmarges overeen met de bodemdalingsvolumes op basis van het geodetisch model.



Figuur 2-9: Vergelijking van de bandbreedte (laag-hoog scenario) aan bodemdalingsvolumes volgens de bodemdalingsscenario's (groene balk) met het volume volgens de ruimte - tijd analyse van de metingen voor de periode 2009-2025 (blauwe streep met een bandbreedte van 95% van de distributie).

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 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 bodemdalingskom juist erop wees dat de mobiliteit van de aquifer en daarmee gepaarde drukdaling waarschijnlijk gering was. De metingen na 2011 laten echter bodemdaling ten zuidwesten en zuidoosten van het gasveld zien, waarvoor de meest waarschijnlijke verklaring beperkte drukdaling in de aquifer onder deze meetpunten is.

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

de aquifers ten zuidoosten van het gasveld zou ervoor zorgen dat de bodemdalingssom wijder wordt en daarmee de gemeten bodemdaling in de oostkant van het eiland nog meer wordt overschat. Omdat de LTS-II confrontatie streeft naar een zo klein mogelijk totaalverschil tussen alle metingen en model zal de methode juist die reservoirstenari's selecteren die deze overschatting beperkt houden en dit zijn de realisaties zonder drukkaling in de aquifers van Ameland.

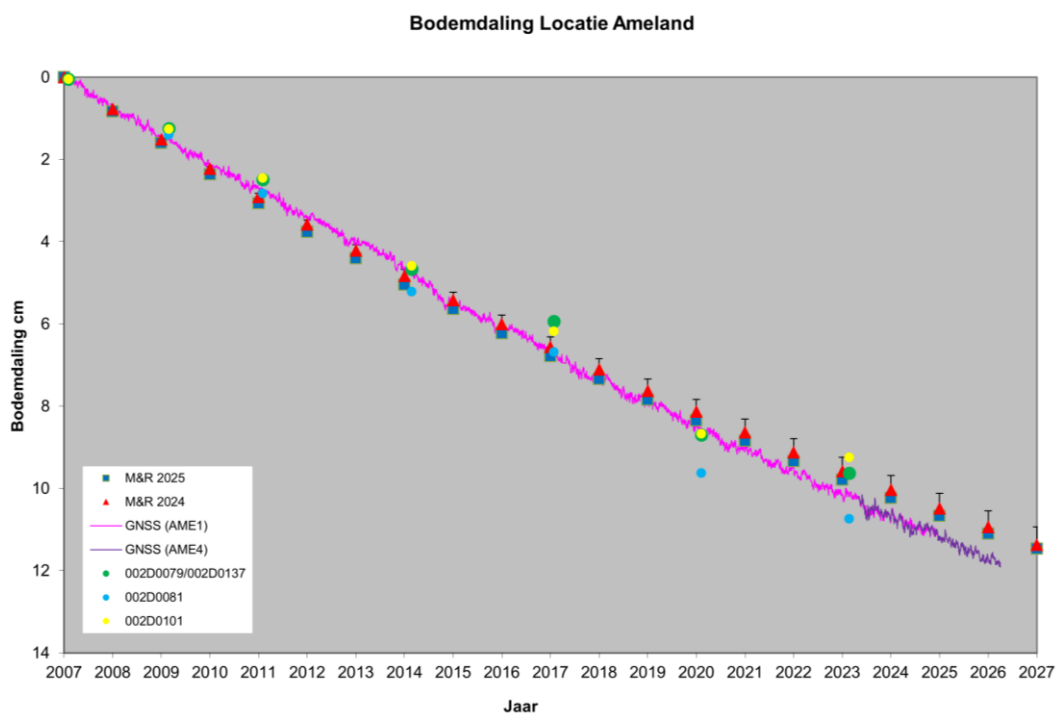
In de M&R-cyclus over de rapportagejaren sinds 2018 is meer gewicht toegekend aan de GNSS-metingen in de Waddenzee. Dit is gedaan door alleen de meetprecisie van de metingen mee te nemen. Voor de meetpunten op het eiland, de waterpaspunten, wordt ook de idealisatie precisie meegenomen. Door deze aanpassingen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

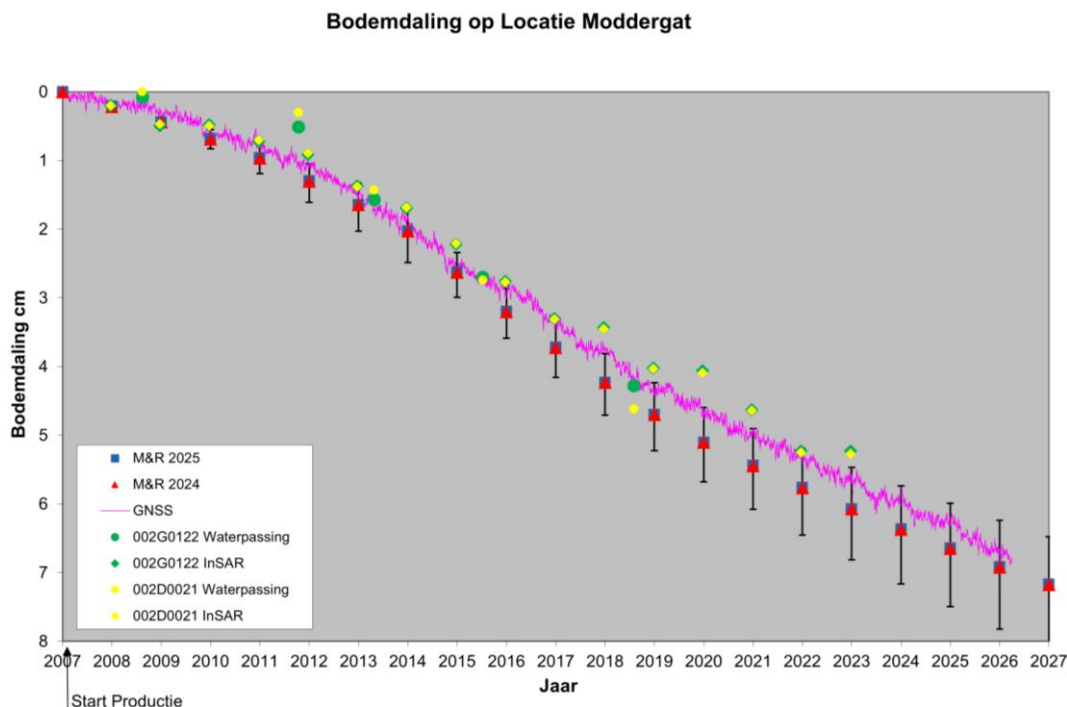
Figuur 2-10 tot en met Figuur 2-14 tonen de gemodelleerde en gemeten daling van 2007 tot en met 2025 op de continue GNSS-locaties. Deze hebben een signaalfunctie om veranderingen in het verloop van de bodembeweging tijdig te kunnen signaleren binnen het meet/rapportage interval van de vlakdekkende metingen (huidig interval van 3 jaar).

De figuren tonen naast de gemeten daling volgens de GNSS-tijdserie ook de tijdserie van enkele waterpaspeilmerken.

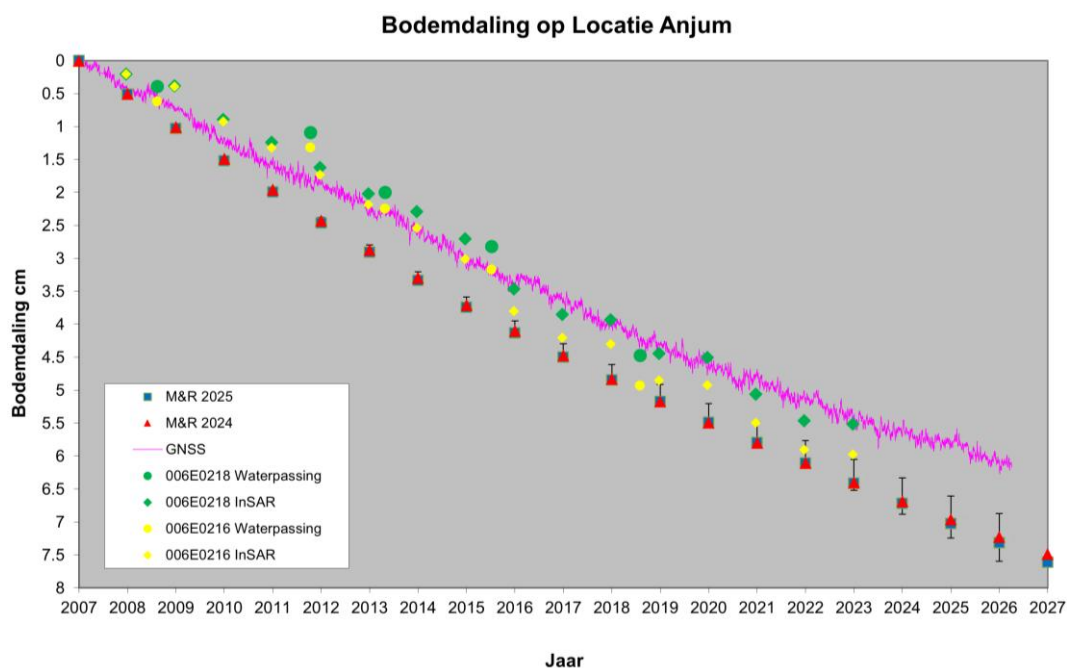
In Figuur 2-11, Figuur 2-12 en Figuur 2-13 is waar te nemen dat de meetfrequentie op de locaties van de waterpaspunten hoger ligt. Dit is het resultaat van de jaarlijkse overbrenging tot en met 2023 van naburige InSAR data op de betreffende punten met een zoekstraal van 500m. De resultaten voor de rapportage over 2025 zijn nagenoeg gelijk aan de resultaten over 2024. De passingen van het model met de GNSS-metingen zijn goed op Ameland en Moddergat. In Anjum wordt het signaal overschat, terwijl op de overige stations het signaal wordt onderschat door het model. Dit is het gevolg van de kalibratie van de modellen waarbij alle metingen worden meegenomen. Individuele punten zullen altijd een overschatting of onderschatting laten zien.



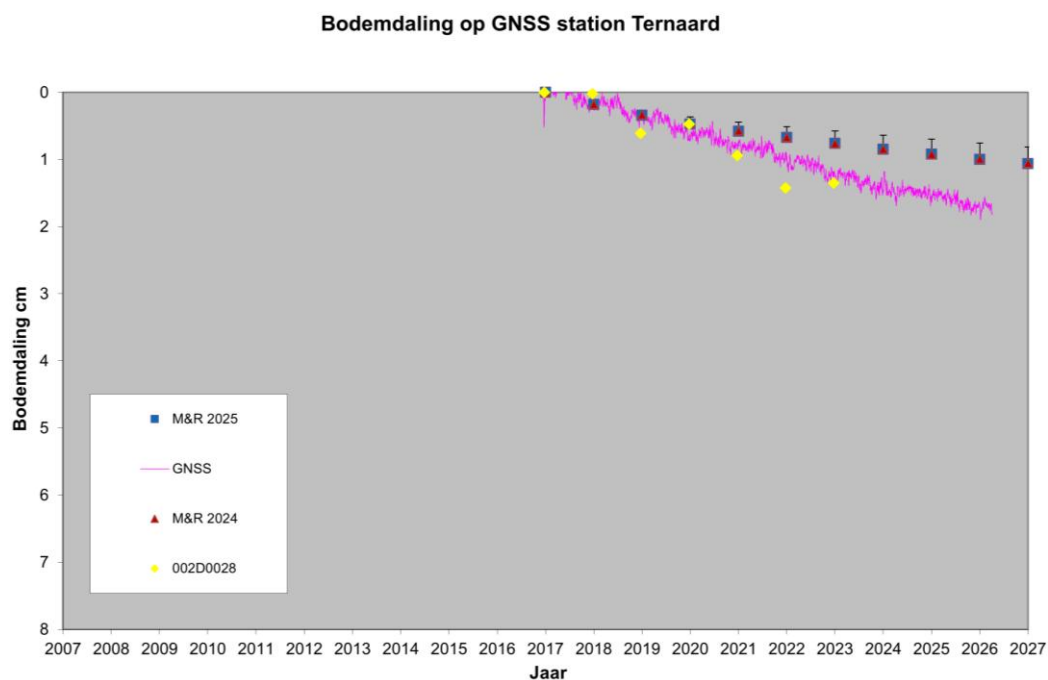
Figuur 2-10: Voorspelde en gemeten (GNSS) bodemdaling op locatie Ameland (coördinaten: X-RD:190475, Y-RD: 608822). De voorspelde bodemdaling plus onzekerheid wordt weergegeven door de blauwe vierkanten met foutenbalken. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2024 is aangegeven in rood. In groen, blauw en geel is de middels waterpassing gemeten bodemdaling op de peilmerken 002D0079, 002D0081 en 002D0101 aangegeven. De tijdserie van peilmerk 002D0079 wordt vanaf 2020 gecontinueerd door peilmerk 002D0137.



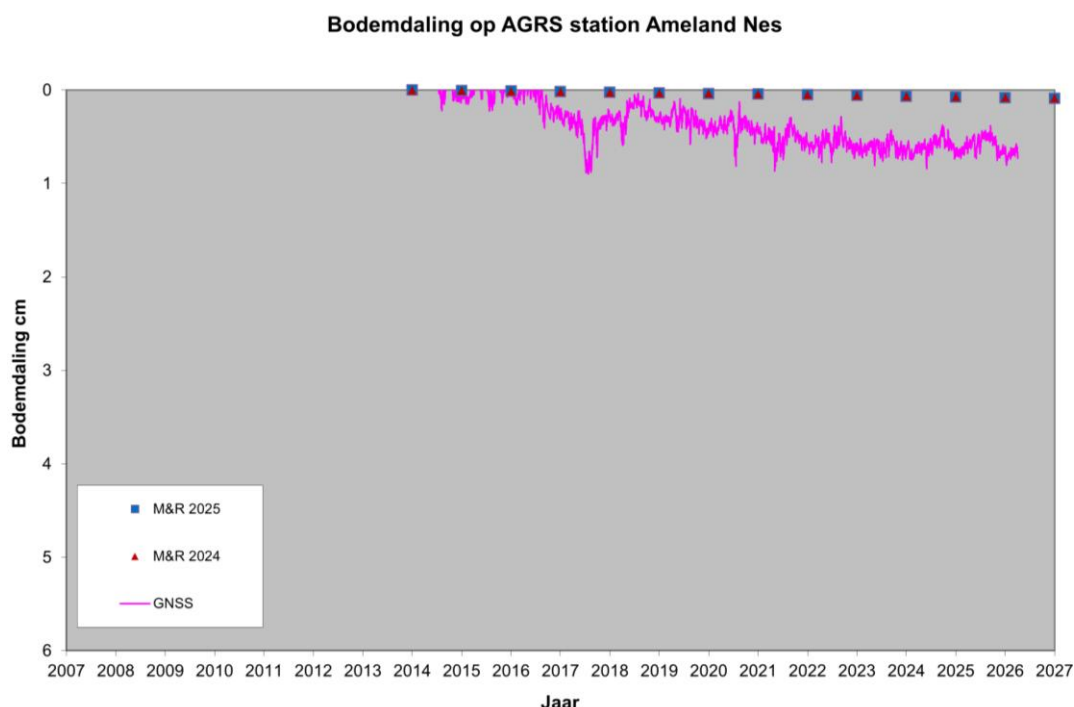
Figuur 2-11: Voorspelde en gemeten (GNSS) bodemdaling op de GNSS-locatie Moddergat (coördinaten: X-RD: 200245, Y-RD: 602330). De voorspelde bodemdaling plus onzekerheid wordt weergegeven door de blauwe vierkanten met foutenbalken. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2024 is aangegeven in rood. In groen en geel is de middels waterpassing en InSAR gemeten bodemdaling op de peilmerken 002G0122 en 002G0121 (dicht bij het GNSS-punt) en InSAR aangegeven.



Figuur 2-12: Voorspelde en gemeten bodemdaling (GNSS) op de GNSS-locatie Anjum (coördinaten: X-RD: 205931, Y-RD: 598546). De voorspelde bodemdaling plus onzekerheid wordt weergegeven door de blauwe vierkanten met foutenbalken. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2024 is aangegeven in rood. In groen en geel is de middels waterpassing en InSAR gemeten bodemdaling op de peilmerken 006E0216 en 006E0218 (dicht bij het GNSS-punt) aangegeven.



Figuur 2-13: Voorspelde en gemeten bodemdaling (GNSS) op de GNSS-locatie Ternaard (coördinaten: X-RD: 194529, Y-RD: 600517). De voorspelde bodemdaling plus onzekerheid wordt weergegeven door de blauwe vierkanten met foutenbalken. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2024 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 middels InSAR gemeten bodemdaling op peilmerk 002D0028 (dicht bij het GNSS-punt) aangegeven.



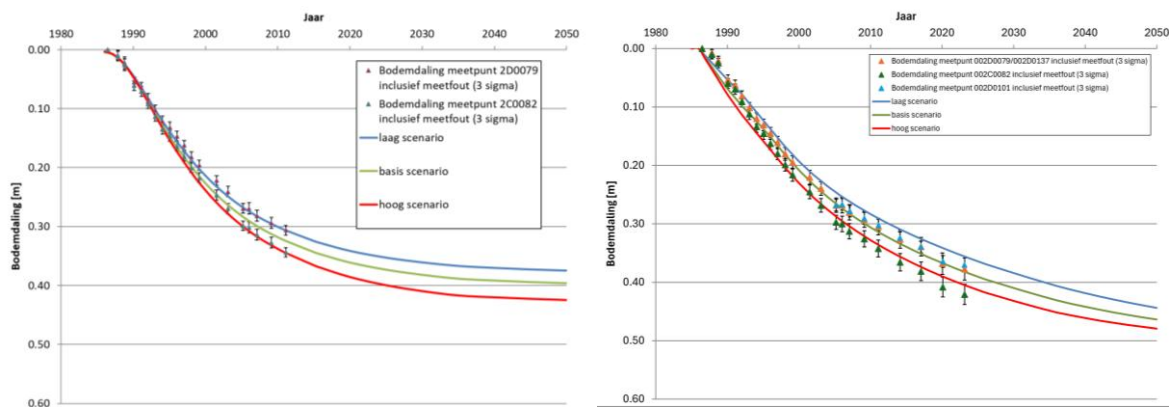
Figuur 2-14: Voorspelde en gemeten bodemdaling op het AGRS-station Ameland Nes (coördinaten: X-RD: 180095, Y-RD: 606757). De voorspelde bodemdaling plus onzekerheid wordt weergegeven door de blauwe vierkanten met foutenbalken. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2024 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 23) 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 2025 model, zie Figuur 2-15. De onzekerheidsbandbreedte van de voorspelling in 2011 en nu is vergelijkbaar. Het huidige model verwacht echter in 2050 ongeveer 7 cm meer bodemdaling in het diepste punt van de kom, waarbij de bodemdaling na 2050 nog doorgaat. De belangrijkste veranderingen die het verschil kunnen 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. Daarnaast zijn er ook veranderde inzichten in het aquifergedrag die later zijn doorgevoerd in de meet- en regelcyclus.



Figuur 2-15: Links; bodemdaling en metingen volgens het winningsplan Ameland uit 2011 (Referentie 23). Rechts; Bodemdaling in het diepste punt van de bodemdalingssom volgens het laag, basis en hoog scenario uit deze M&R rapportage in vergelijking met de meetpunten 002C0082, 002D0101 en 002D0079/002D0137.

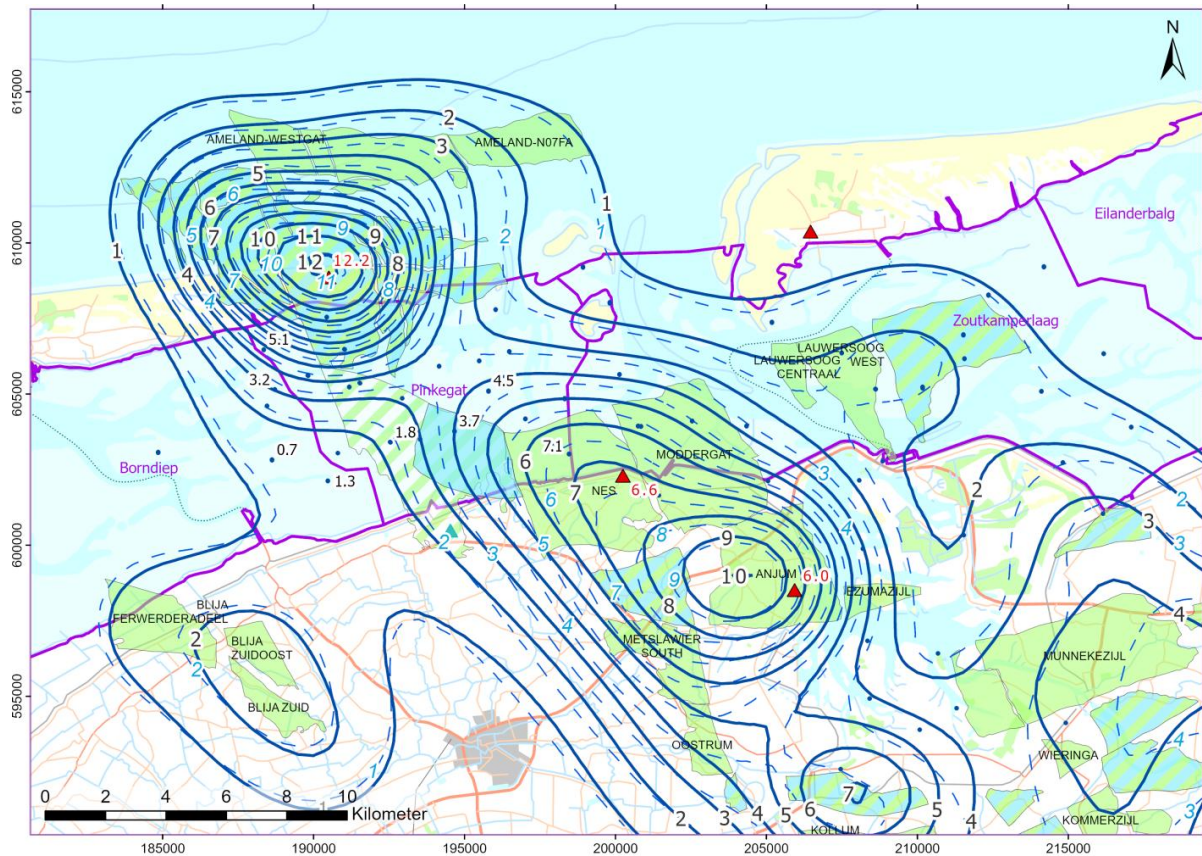
2.3.3.8 Autonome diepe-bodembeweging

Naar aanleiding van het advies van de Auditcommissie over de Meet- en regelcyclus van 2020 (Referentie 28) is in de Meet- en regelcyclus van 2023 onderzocht of autonome diepe-bodembeweging en de lokale verschillen daarin invloed hebben in de confrontatie workflow tussen geodetische metingen en geomechanische modellen. Het effect is zeer klein gebleken en heeft niet geleid tot selectie van andere bodemdalingsscenario's. De uitleg en samenvatting van de uitgevoerde berekeningen is te vinden in Bijlage F van Referentie 30.

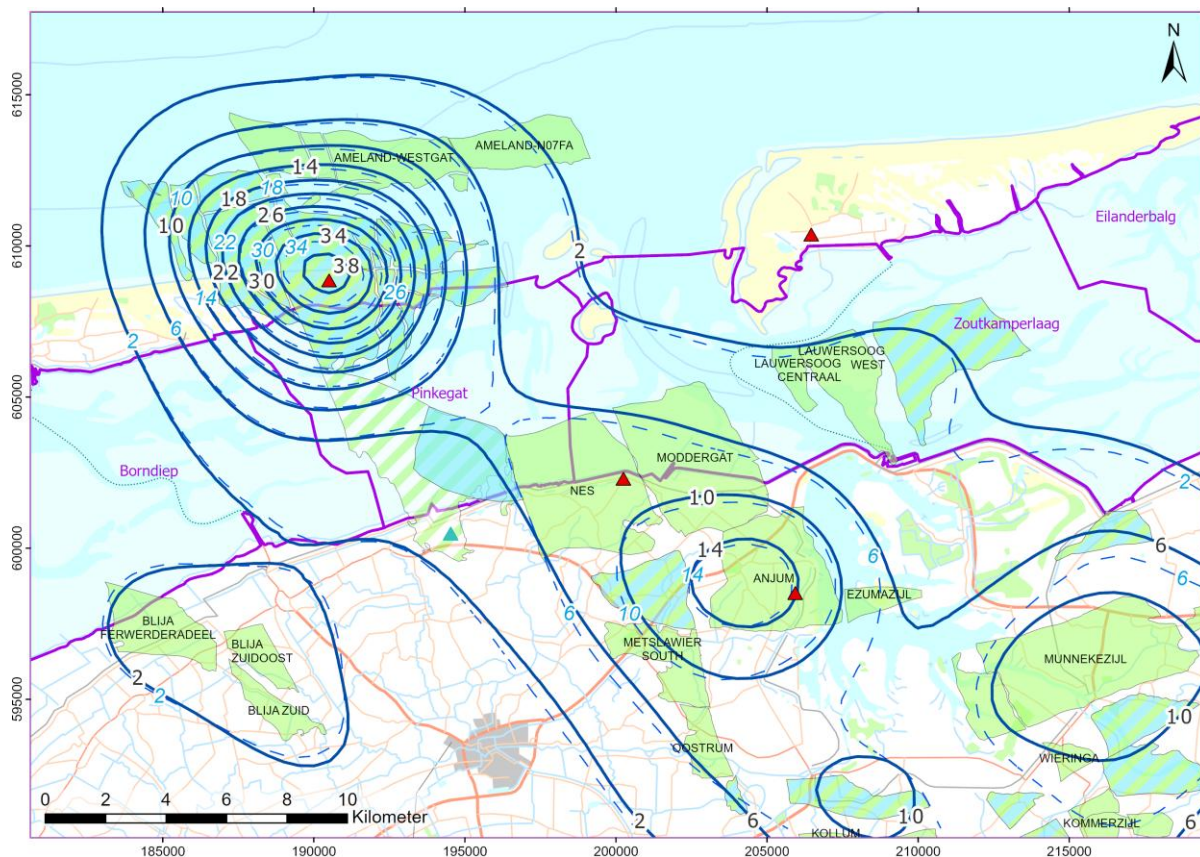
2.3.4 Vergelijking van gemodelleerde bodemdaling met resultaten van campagne GNSS

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 2-16. De modelcontouren (doorgetrokken blauwe lijnen) worden per jaar berekend op de eerste dag van elk jaar. De contouren zijn gepresenteerd voor 1-1-2026. Ter vergelijking zijn de contouren (onderbroken lijn) weergegeven die het berekende resultaat weergeven per 1-1-2025 zoals gerapporteerd in de vorige rapportage M&R over 2024 (Referentie 31).

Figuur 2-17 toont de gemodelleerde daling vanaf de start van winning tot en met 1 januari 2026.



Figuur 2-16: Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2026) door gaswinning sinds de nulmeting in de Waddenzee in 2006. In donkerblauw (met zwarte labels) de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens het verwachte scenario. De gestreepte contouren (met blauwe labels) geven de bodemdaling van 2024 (1-1-2025) weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2024. 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/juni 2025. De rode waarden geven de daling aan van de permanente GNSS-stations in de periode feb. 2007- dec. 2025.



Figuur 2-17: Totale bodemdaling in cm (status modelcontour in blauw: 1-1-2026) sinds de start van de gaswinning in het gebied (1986). De gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2025 volgens de M&R-rapportage over 2024. De rode driehoeken geven de posities van de GNSS-stations aan.

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 2024 en M&R 2025 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.

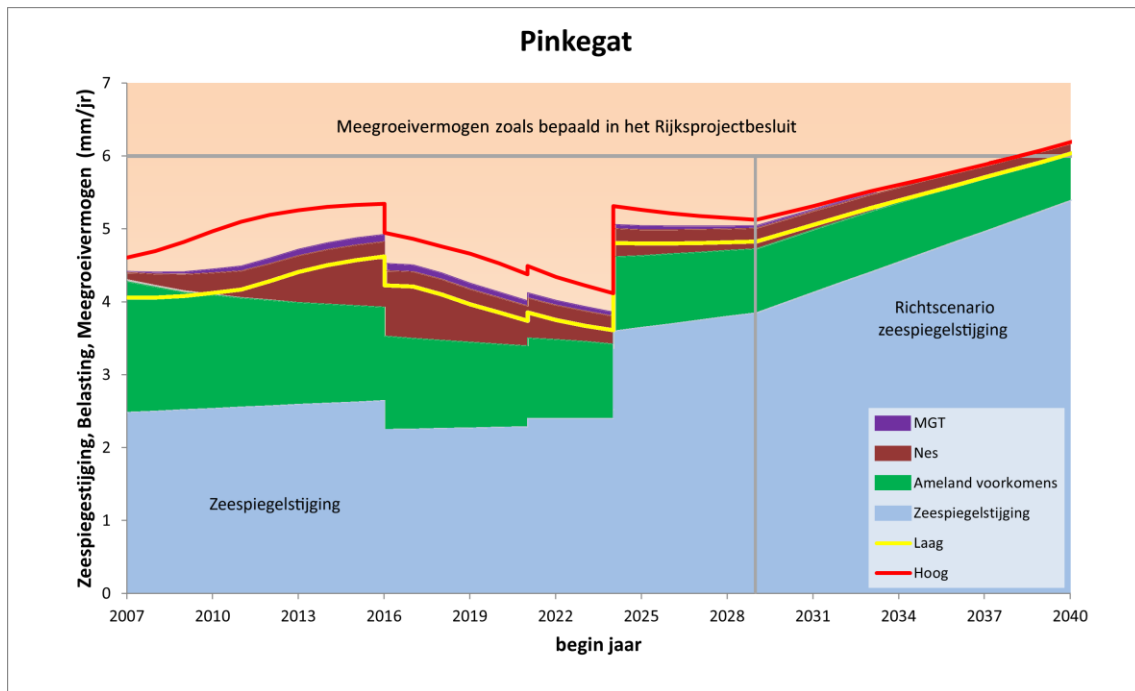
- Het bodemdalingsmodel is voor beide M&R-rapportages gelijk aan het LTS-II bodemdalingsmodel en beiden gekalibreerd aan de laatste metingen respectievelijk t/m 2024 en 2025.
- Om een betere passing van het geomechanische model ten westen van Nes te krijgen zijn verschillende drukrealisaties gemaakt voor het breukblok ten westen van Nes.
- De resultaten voor de berekening van de belasting in de M&R 2025 cyclus zijn zeer vergelijkbaar met de resultaten van de M&R 2024 rapportage. De gebruiktsruimtefiguren zijn in deze rapportage aangepast in vergelijking met de vorige gebruiktsruimtefiguren. De gebruiktsruimte is getoond voor de perioden waar een specifiek gebruiktsruimtebesluit geldt. Hierdoor ontstaan sprongen in de grafieken (bv. Figuur 2-18).

2.4 Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4)

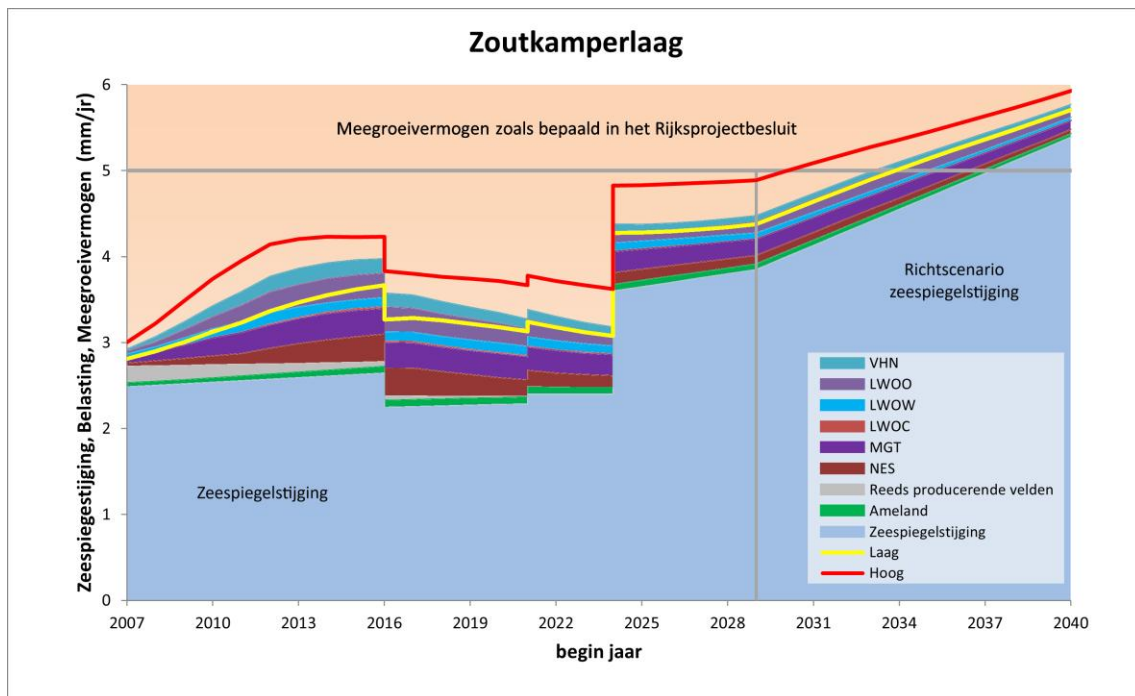
2.4.1 Bepaling volume en gemiddelde daling

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 2-18 en Figuur 2-19. 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. De sprongen in de figuren worden veroorzaakt door de verschillende gebruiksruimtebesluiten voor de zeespiegelstijging over tijd. De gebruiksruimte wordt dan weergegeven voor de periode van het dan geldende gebruiksruimtebesluit. Geconcludeerd kan worden dat er grote verschillen zijn voor de inschatting van de zeespiegelstijging. Door het nieuwe gebruiksruimtebesluit in 2024 komt de belasting over het algemeen dichterbij het meegroeivermogen. Tot het einde van de geldigheid van het gebruiksruimtebesluit in 2029 wordt de afstand tot het meegroeivermogen in het kombergingsgebied Pinkegat echter groter door een afnemende bodemdalingssnelheid en daarmee ook een afnemende belasting. Voor Zoutkamperlaag wordt de afstand tot het meegroeivermogen iets kleiner.



Figuur 2-18: Belasting in Pinkegat ten gevolge van gasproductie voor de verschillende scenario's. Het basisscenario 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 2-19: Belasting in Zoutkamperlaag ten gevolge van gasproductie voor de verschillende scenario's. Het basisscenario is weergegeven als de bovengrens van de gekleurde vlakken die de bijdrage per voorkomen weergegeven. Het lage en hoge scenario zijn getoond als lijnen (geel: laag scenario, rood: hoog scenario).

Voor de berekening van de verwachte bodemdaling in de toekomst en de bijbehorende volumes en bodemdalingssnelheden is uitgegaan van het basisscenario. Om de

onzekerheid voor de volumes en bodemdalingssnelheden te bepalen voor de individuele voorkomens is gebruik gemaakt van het hoge en lage scenario (zie Tabel 2-11 t/m Tabel 2-14).

2.4.2 Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting

Tabel 2-11 en Tabel 2-12 tonen de door gaswinning veroorzaakte bodemdalingsvolumes met bijbehorende onzekerheid per voorkomen voor de jaren 2005 tot en met 2028.

Tabel 2-11: Jaarlijks bodemdalingsvolume in Pinkegat voor de Ameland, Anjum voorkomens en Wadden voorkomens met tussen haakjes de bandbreedte tussen de hoge en lage scenario's (onzekerheid). Volume en bandbreedte (onzekerheid) in duizend m³.

Kombergingsgebied Pinkegat			
Jaar	Anjum/Ameland voorkomens Volume (onzekerheid)	Nes Volume (onzekerheid)	Moddergat Volume (onzekerheid)
2005	118 (101 - 125)		
2006	103 (88 - 109)		
2007	103 (88 - 109)	15 (8 - 22)	3 (3 - 7)
2008	94 (79 - 100)	25 (13 - 34)	3 (3 - 5)
2009	93 (79 - 99)	28 (15 - 39)	3 (3 - 7)
2010	85 (71 - 91)	39 (21 - 54)	3 (3 - 7)
2011	84 (71 - 90)	49 (26 - 67)	3 (3 - 7)
2012	80 (67 - 86)	48 (25 - 65)	3 (3 - 6)
2013	79 (66 - 86)	68 (35 - 84)	3 (3 - 7)
2014	74 (62 - 81)	78 (61 - 98)	3 (3 - 8)
2015	74 (62 - 81)	74 (68 - 87)	3 (3 - 7)
2016	69 (58 - 76)	75 (59 - 81)	3 (3 - 6)
2017	69 (58 - 76)	72 (57 - 85)	3 (3 - 6)
2018	65 (54 - 71)	65 (51 - 80)	3 (3 - 6)
2019	65 (54 - 71)	52 (41 - 66)	3 (3 - 6)
2020	62 (51 - 68)	40 (32 - 53)	3 (3 - 5)
2021	62 (51 - 68)	36 (28 - 48)	3 (3 - 5)
2022	58 (48 - 63)	34 (26 - 45)	3 (3 - 5)
2023	58 (48 - 63)	32 (24 - 41)	3 (3 - 4)
2024	56 (47 - 62)	29 (22 - 36)	3 (3 - 4)
2025	56 (47 - 62)	28 (21 - 33)	3 (3 - 4)
2026	50 (41 - 54)	26 (20 - 29)	3 (3 - 4)
2027	50 (41 - 54)	23 (18 - 25)	3 (3 - 3)
2028	49 (41 - 54)	20 (17 - 20)	3 (3 - 3)

Tabel 2-12: Jaarlijks bodemdalingssnelheid (in duizend m³) in Zoutkamperlaag voor de Anjum, Ameland en Wadden voorkomens (LWO = Lauwersoog), met tussen haakjes de bandbreedte tussen het hoge en lage scenario.

Kombergingsgebied Zoutkamperlaag								
Jaar	Anjum voorkomen	Ameland	Nes	Moddergat	LWO- Centraal	LWO-West	LWO-Oost	Vierhuizen- Oost
2005	27 (26 - 30)	3 (2 - 4)						
2006	27 (23 - 29)	3 (2 - 4)						
2007	27 (21 - 28)	3 (2 - 4)	7 (4 - 12)	21 (13 - 35)				
2008	27 (20 - 27)	3 (2 - 4)	11 (6 - 18)	19 (12 - 30)		5 (3 - 6)	2 (2 - 3)	5 (3 - 7)
2009	23 (18 - 25)	3 (2 - 4)	13 (7 - 20)	26 (16 - 42)		24 (11 - 45)	18 (13 - 24)	19 (9 - 29)
2010	21 (16 - 23)	3 (2 - 4)	18 (10 - 28)	28 (17 - 44)		23 (12 - 36)	27 (14 - 44)	27 (11 - 43)
2011	19 (15 - 21)	3 (2 - 4)	22 (13 - 35)	43 (27 - 47)		21 (14 - 40)	33 (15 - 74)	30 (13 - 34)
2012	16 (14 - 18)	4 (3 - 5)	22 (13 - 34)	42 (39 - 48)	3 (1 - 3)	17 (12 - 38)	41 (17 - 72)	30 (15 - 30)
2013	13 (12 - 16)	4 (3 - 5)	28 (16 - 38)	50 (43 - 50)	3 (2 - 9)	15 (11 - 40)	45 (21 - 61)	28 (16 - 29)
2014	10 (9 - 13)	5 (4 - 6)	41 (34 - 59)	48 (42 - 52)	4 (1 - 5)	15 (10 - 43)	46 (25 - 53)	27 (16 - 28)
2015	8 (8 - 11)	5 (4 - 6)	52 (38 - 57)	42 (37 - 47)	3 (2 - 3)	14 (9 - 43)	43 (27 - 45)	25 (14 - 25)
2016	6 (6 - 9)	5 (4 - 6)	50 (46 - 50)	41 (36 - 44)	2 (2 - 2)	15 (9 - 45)	40 (28 - 40)	23 (13 - 24)
2017	5 (5 - 8)	5 (4 - 6)	48 (44 - 56)	43 (37 - 44)	2 (2 - 2)	17 (11 - 50)	40 (30 - 40)	22 (12 - 24)
2018	3 (3 - 6)	5 (4 - 6)	42 (40 - 52)	43 (39 - 43)	2 (2 - 2)	17 (12 - 51)	37 (31 - 39)	22 (12 - 26)
2019	2 (2 - 5)	5 (4 - 6)	34 (32 - 44)	41 (38 - 43)	2 (2 - 2)	17 (12 - 49)	35 (31 - 37)	19 (10 - 27)
2020	2 (1 - 4)	5 (4 - 6)	26 (25 - 36)	38 (36 - 40)	1 (1 - 2)	16 (12 - 47)	31 (29 - 34)	17 (9 - 31)
2021	2 (2 - 3)	5 (4 - 6)	24 (22 - 33)	39 (36 - 40)	1 (1 - 2)	16 (12 - 48)	28 (28 - 31)	16 (8 - 35)
2022	2 (1 - 3)	5 (4 - 6)	22 (20 - 30)	38 (36 - 38)	1 (1 - 1)	15 (12 - 48)	22 (21 - 23)	15 (7 - 40)
2023	2 (1 - 3)	5 (4 - 6)	21 (19 - 28)	37 (35 - 38)	1 (1 - 1)	15 (12 - 47)	18 (16 - 19)	14 (7 - 42)
2024	2 (1 - 3)	5 (3 - 6)	19 (17 - 25)	35 (33 - 37)	1 (1 - 1)	13 (11 - 44)	16 (13 - 16)	13 (6 - 42)
2025	2 (0 - 2)	5 (3 - 6)	19 (16 - 22)	34 (32 - 37)	1 (1 - 1)	12 (10 - 42)	14 (12 - 14)	12 (6 - 41)
2026	2 (0 - 2)	4 (3 - 5)	17 (15 - 19)	32 (30 - 35)	1 (1 - 1)	12 (10 - 41)	12 (12 - 15)	12 (5 - 40)
2027	2 (0 - 2)	4 (3 - 5)	16 (14 - 17)	30 (28 - 33)	1 (0 - 1)	12 (10 - 39)	14 (13 - 22)	11 (5 - 39)
2028	2 (0 - 2)	4 (3 - 5)	14 (13 - 14)	28 (26 - 31)	1 (0 - 1)	11 (9 - 37)	19 (16 - 26)	11 (5 - 37)

Tabel 2-13 geeft de bodemdalingssnelheid *S* voor het rapportagejaar 2025 en belasting *B* op 1-1-2026. 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 2-18 en Figuur 2-19).

Tabel 2-13: Bodemdalingssnelheid (mm/jr) voor het rapportagejaar 2025 en belasting *B* (mm/jr) op 1-1-2026 met onzekerheid (bandbreedte) per kombergingsgebied.

Zoutkamperlaag		Pinkegat	
S (laag-hoog)	B (laag-hoog)	S (laag-hoog)	B (laag-hoog)
0,69 (0,60 – 1,14)	0,68 (0,59 – 1,14)	1,44 (1,16 - 1,62)	1,35 (1,10 - 1,51)

2.4.3 Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting

Tabel 2-14 toont de prognose van de bodemdalingssnelheid per kombergingsgebied per jaar (*S*) ten gevolge van de gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen in combinatie met de bodemdalingssnelheid door de reeds voor 2007 gestarte gaswinning in dit gebied. Ook is de op basis van deze waarden berekende belasting *B* weergegeven, waarbij $B(J) = (S(J-3) + S(J-2) + \dots + S(J+2))/6$. Tenslotte is *G* weergegeven in de tabel, waarbij *G* de Gebruiksruimte is die beschikbaar is voor belasting ten gevolge van de gasproductie, getalsmatig bepaald door het meegroeivermogen verminderd met de

(autonome) relatieve zeespiegelstijging. Voor het nieuwe zeespiegelscenario geldt een onzekerheid van +/- 1,5 mm/jaar. Deze is niet verdisconteerd in de gebruiksruimte, omdat het protocol uitgaat van het verwachte zeespiegelscenario.

Tabel 2-14: Bodemdalingssnelheid, Belasting en Gebruiksruimte (mm/jr) met onzekerheid (bandbreedte) per kombergingsgebied per jaar. De zwarte lijnen in de tabel markeren de grenzen van de periodes waar een specifiek gebruiksruimtebesluit geldt.

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

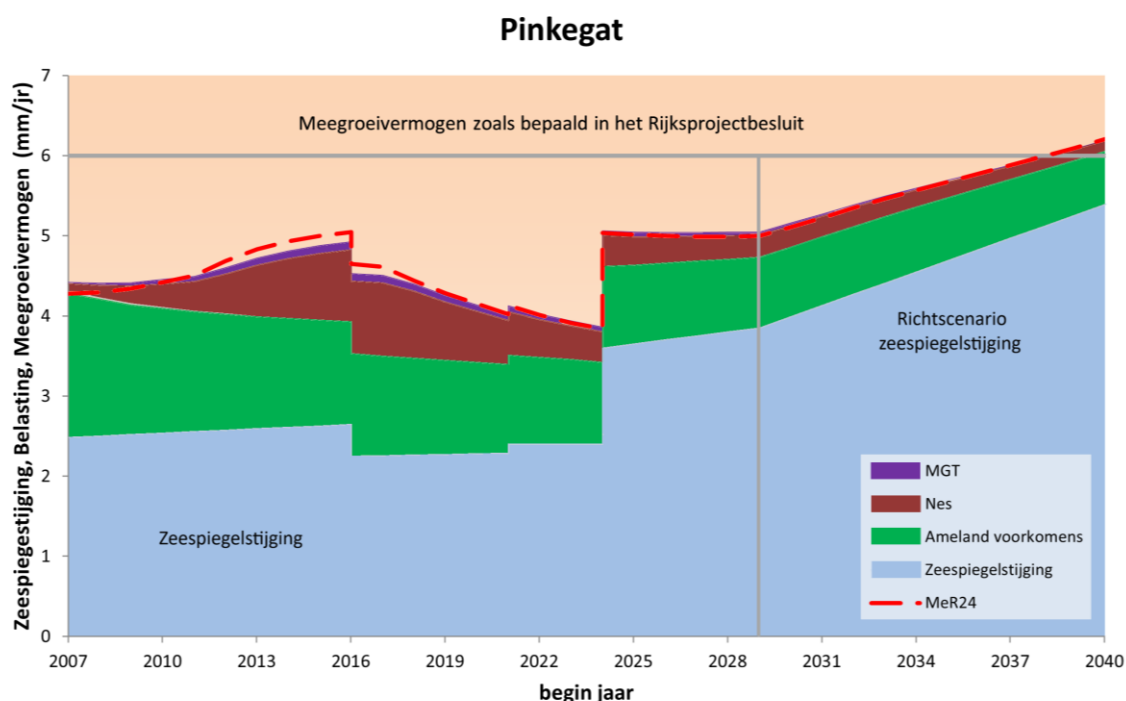
2.5 Indien nodig aanpassen productie (stap 5)

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 gebruiksruijme (zie Tabel 2-14). Dit geldt ook voor het hoge scenario. In ieder geval zal de gebruiksruijme niet voor 1-1-2029 (de geldige periode voor het zeespiegelscenario) worden overschreden. Na deze tijd geldt het richtscenario van de zeespiegelstijging (Figuur 2-18 en Figuur 2-19).

2.6 Actualiseren (stap 6)

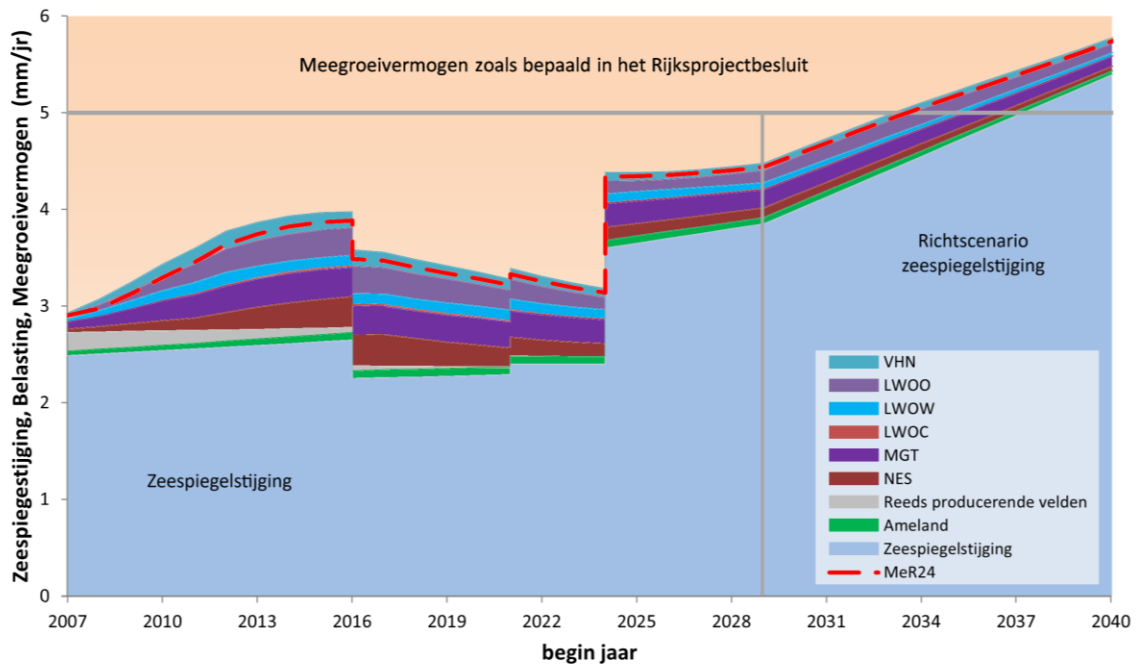
Figuur 2-20 en Figuur 2-21 tonen de geactualiseerde berekeningen van de belastingen voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. In de figuren is tevens de belasting, weergegeven zoals gerapporteerd in de Meet- en regelcyclus rapportage over 2023 (gerapporteerd in 2024).

De berekende belasting in de kombergingen is in de huidige rapportage vergelijkbaar met die van de vorige rapportage.



Figuur 2-20: 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 2024.

Zoutkamperlaag



Figuur 2-21: 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 2024.

2.7 Remwegscenario

Om het effect van de “hand aan de kraan” systematiek inzichtelijker te maken, is in de rapportage over 2019 een remwegscenario opgenomen. De nieuwe berekeningen in de 2025 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 Local Management System - LMS). 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 2022-2025)	Met betrekking tot de gaswinning onder de Waddenzee wordt specifiek verwezen naar het 'hand aan de kraan'-principe en de Long Term Subsidence studies.
Toewijzen verantwoordelijkheden	Binnen het geosolutions teams zijn de verantwoordelijkheden georganiseerd om zorg te dragen voor de kwaliteit van de metingen en bodemdalingsprognoses.
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	Legal portal
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 Conclusie

Op basis van deze rapportage over het jaar 2025, zoals uitgevoerd 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 2024. De belasting blijft evenals in de voorgaande jaren binnen de toegestane gebruiksruijnte. 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 (<https://www.nlog.nl/field-web/rest/field/document/1363502168>).

Referentie 2 Staatscourant (2013) Kennisgeving besluiten gaswinning Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, Ministerie van Economische Zaken (<https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2013-7384.html?zoekcriteria=%3fzkt%3dEenvoudig%26pst%3d%26vrt%3dmoddergat%26instemming%26zkd%3dInDeGeheleText%26dpr%3dAfgelopenDag%26sdt%3dDatumBrief%26ap%3d%26pnr%3d1%26rpp%3d10&resultIndex=0&sorttype=1&sortorder=4>).

Referentie 3 NAM (2021) Gaswinning Moddergat, Lauwersoog, Vierhuizen: Actualisering meet- en regelprotocol 2021 EP202110200380 (<https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/wadden/nl/cd6f0680-eb7d-48be-bd12-feb4c7223f77>)

Referentie 4 NAM (2021) Gaswinning Moddergat/Lauwersoog/Vierhuizen: Technische bijlage (bijlage 2) behorend bij het geactualiseerde Meet- en Regelprotocol 2021. EP202110200383 (<https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/wadden/nl/d17d422f-f5fb-4540-a60a-6cdbe3d2784d>)

Referentie 5 Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 – Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. Rapport RIKZ / 2004.025. (<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:f253433c-a620-4bd9-b486-53b7f9ca006b/datastream/OBJ/download>)

Referentie 6 GPS Survey NAM Waddenzee v. 1.30, 06-GPS B.V., 01/2026.

Referentie 7 Check reference station coordinates NAM v. 1.17, 06 GPS B.V., 07/2025.

Referentie 8 Crombaghs, M., De Bruijne, A. (2004) Een nieuw geoidmodel voor Nederland. (<https://open.rijkswaterstaat.nl/@16833/nlgeo2004-nieuw-geoidmodel-nederland/>)

Referentie 9 NAM (2015) Wadden Sea Long-term Subsidence Studies – Overview report, EP201506209625. (<https://nam-feitenencijfers.data-app.nl/download/rapport/2ca6c8d8-c0d4-4c10-8460-672f93b4cdaa?open=true>)

Referentie 10 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. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1365160915001525?msclid=1e3952f7b65811ecb71259c476b047c9>)

Referentie 11 Dynamic Reservoir Modelling of Wadden Fields for subsidence. Meet & Regel 2016. EP201703201178. (<https://www.commissiemer.nl/projectdocumenten/00002813.pdf?msclid=ad9ce451b63d11ecb694b92812408cd6>)

Referentie 12 NAM (2017) Ensemble Based Subsidence application to the Ameland gas field – long term subsidence study part two (LTS-II) continued study. (<https://nam-feitenencijfers.data-app.nl/download/rapport/b2bb2626-2cf8-4d7f-994d-04a9995ebe9d?open=true>)

Referentie 13 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 (https://www.nlog.nl/sites/default/files/tno_rapport_waddenzee_final_v17092012_public%20version%20-gelakt.pdf)

Referentie 14 Technische Commissie Bodemdaling (2009) Van Meting naar Daling. Bodemdaling door delfstofwinning. November 2008. (https://www.waddenzee.nl/publish/library/25/rapport_van_meting_naar_daling_tcbb2008.pdf)

- Referentie 15 NAM (2019) Controle van de reservoirmodellen met de nieuwe drukmetingen van 2018. EP201904223961. (<https://pas.commissiener.nl/files/nl/3366/03-controle-reservoirmodellen.pdf>)
- Referentie 16 Meetregister bij het meetplan Waddenzee 2025, Rapportage van de GNSS-campagne Waddenzee 2025, 9/2025. EP202507250320.
- Referentie 17 Auditcommissie Waddenzee (2019) Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2018.
- Referentie 18 Staatstoezicht op de Mijnen (2016). Methodiek voor risicoanalyse omtrent geïnduceerde bevingen door gaswinning tijdelijke leidraad voor adressering mbb. 24.1.p, versie 1.2, SodM, 1 februari 2016. (https://www.nlog.nl/sites/default/files/fdb3cd42-ecba-49ce-969f-44318e9d1272_tijdelijke%20leidraad%20sra%20v1-2.pdf)
- Referentie 19 Deltares (2010) Schade aan buisleiding door aardbeving. fase 1 inventarisatie.
- Referentie 20 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 21 NAM (2019) Review and update of: Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen. (<https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/8693b0f8-fd9f-49d6-8be6-f1759b9803be>)
- Referentie 22 NAM (2015) Neotectonic Stresses in the Permian Slochteren Formation of the Groningen Field. (<https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/b7a3cb12-46c3-4783-86f0-5905882cb0f6>)
- Referentie 23 NAM (2011) Winningsplan Ameland 2011 (WP 2011) Verzoek om instemming wijziging winningsplan. <https://www.nlog.nl/field-web/rest/field/document/3945364127>
- Referentie 24 NAM (2020) Evaluatie van de doorlatendheid van breuken van de Waddenzee velden en implicaties voor bodemdaling. EP202007201552. (<https://pas.commissiener.nl/files/nl/3467/nff-doorlatendheid-breuken-waddenzeevelden.pdf>)
- Referentie 25 Meetregister bij het meetplan Waddenzee 2023, Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Ameland 2023, 6/2023, EP202305200042.
- Referentie 26 Meetregister bij de meetplannen Noord-Nederland, Groningen en Waddenzee 2023, Rapportage van satelliet radar interferometrie, Noord-Nederland 2023, 10/2023, EP202303201224.
- Referentie 27 Hans van der Marel: Comparison of GNSS Processing Methodologies for Subsidence Monitoring. NAM GNSS APM Project Report, TU Delft, 2020. (https://pure.tudelft.nl/ws/portafiles/portal/90402176/Comparison_of_GNSS_Processing_Methodologies_for_Subsidence_Monitoring_1_.pdf)
- Referentie 28 Auditcommissie Waddenzee (2021) Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2020. (https://pure.tudelft.nl/ws/portafiles/portal/90402176/Comparison_of_GNSS_Processing_Methodologies_for_Subsidence_Monitoring_1_.pdf)
- Referentie 29 Meetregister bij het meetplan Waddenzee 2024, Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Schiermonnikoog 2024, 4/2024, EP202404202787.
- Referentie 30 NAM (2024) Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen; Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2023; Rapport EP202402225793, <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/wadden/nl/b2e8eded-de47-47c3-9926-042d9c04c9c7>

Referentie 31 NAM (2025) Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen; Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2024; Rapport EP202501249317, <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/wadden/nl/e6a28318-b6c1-4987-9284-a7d30a1a6f4c>

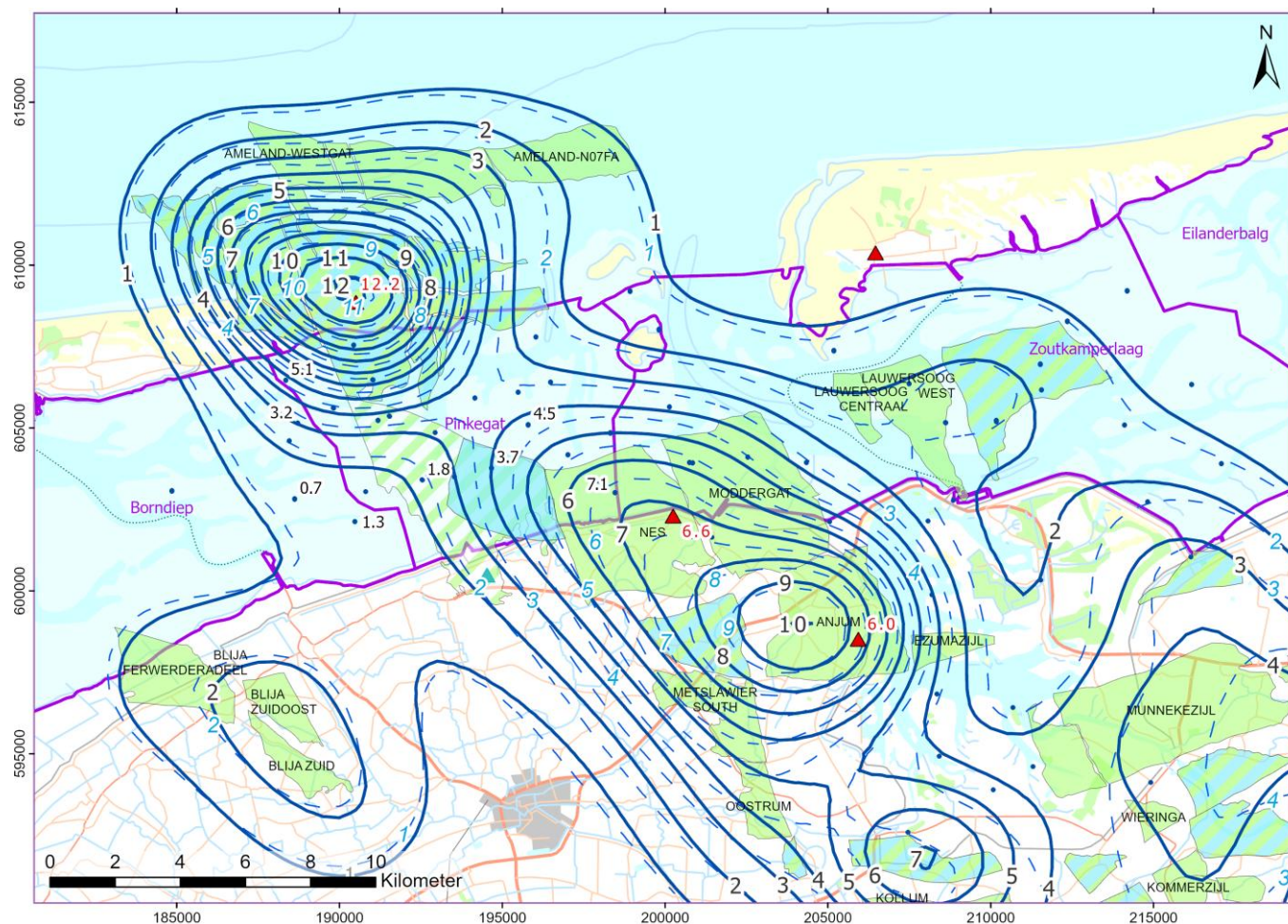
Referentie 32 NAM (2025) Meetplan Waddenzee 2025, EP202410211234.

Referentie 33 NAM (2025) Continue GPS hoogtemetingen NAM Waddenzee; rapportage 4^e kwartaal 2025, EP202601225440.

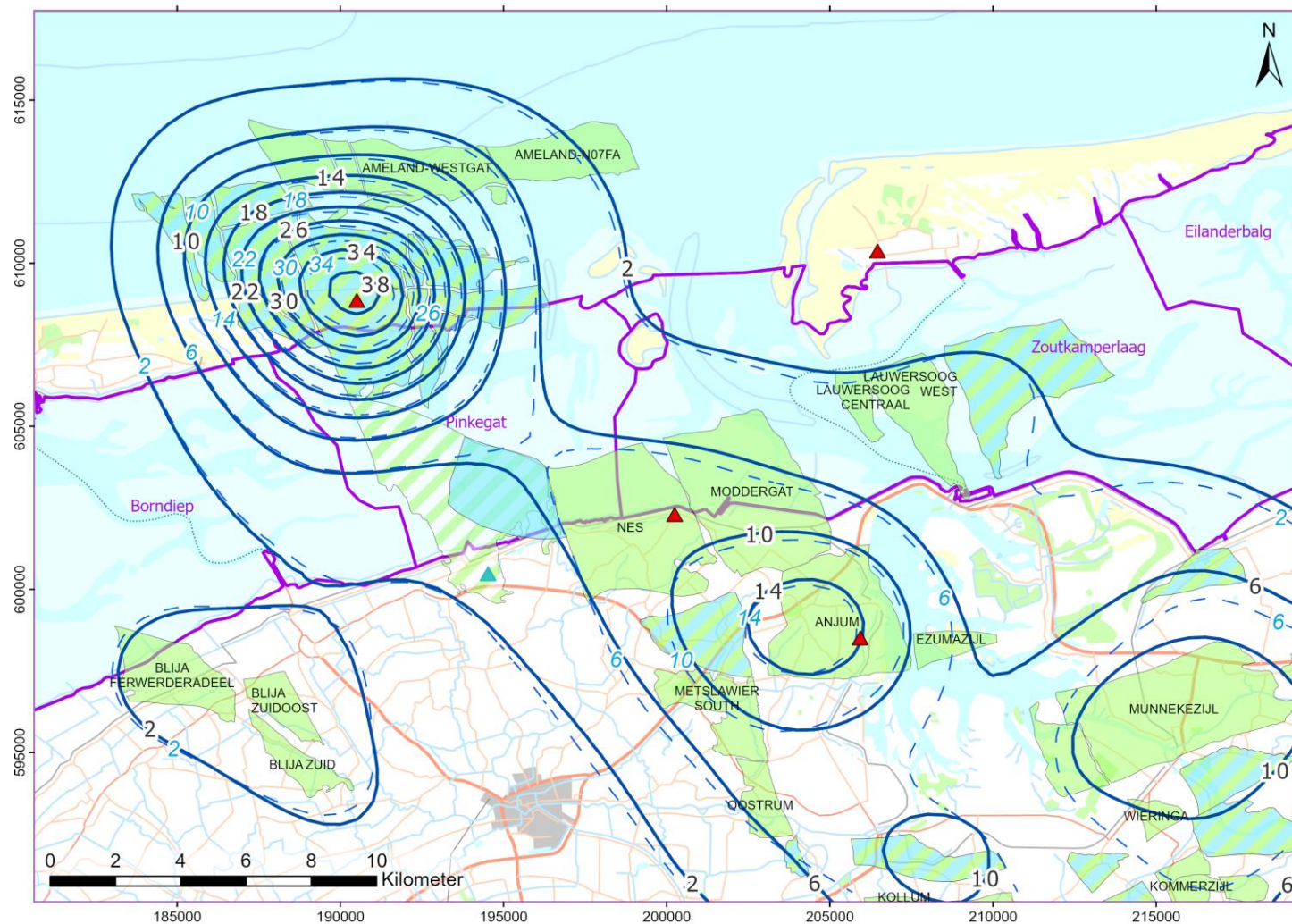
Referentie 34 NAM (2021) Groningen long term subsidence forecast, EP202008201822.

Referentie 35 S.S.R. Kim (2025) Data assimilation for subsidence analysis of the Groningen region; a multi-scale study with importance sampling, PhD thesis.
<https://repository.tudelft.nl/record/uuid:610bb429-08c8-4870-8194-72b0ea1c7c97>

A. Bijlage A: Gemodelleerde en gemeten bodemdaling

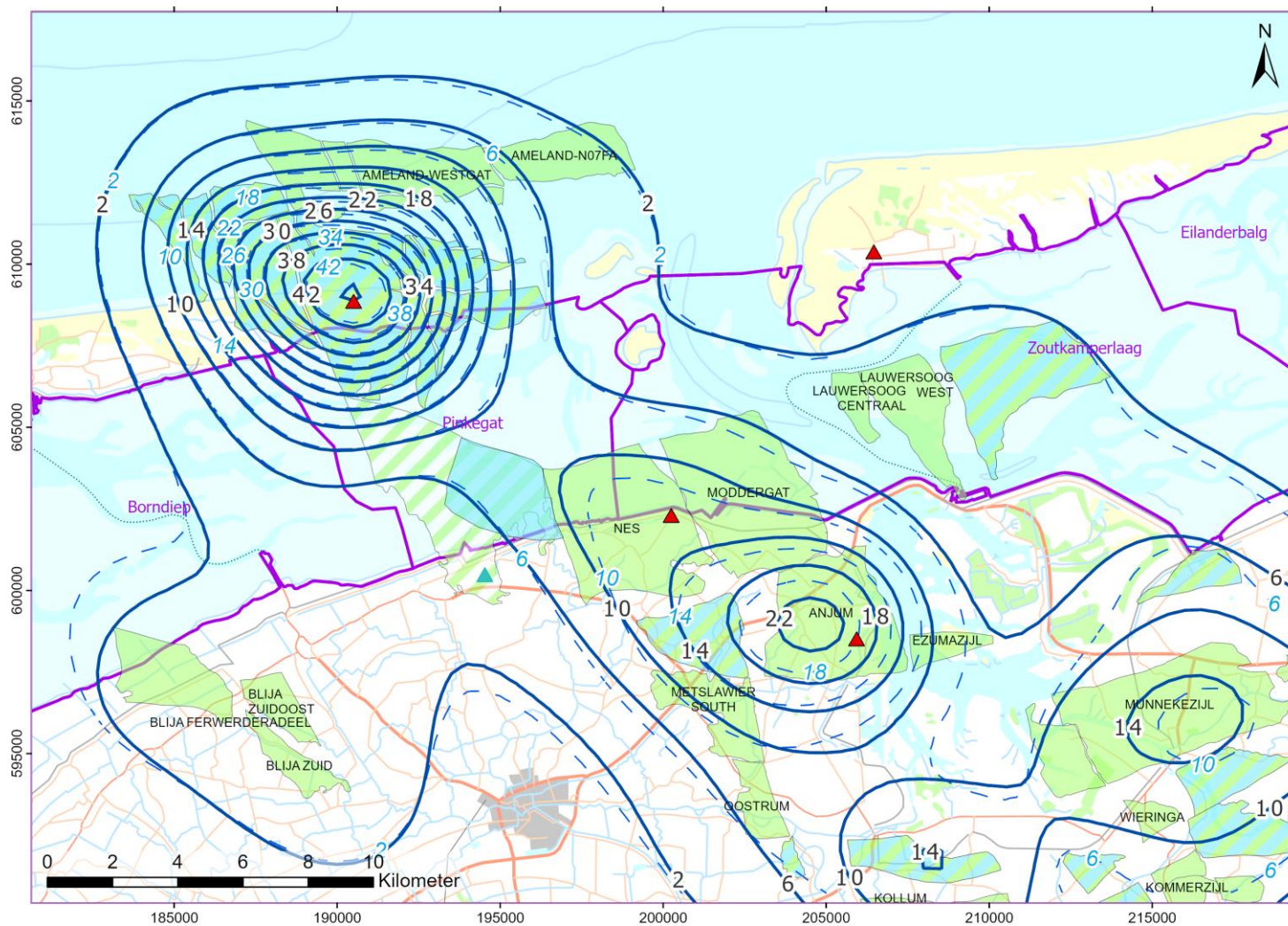


Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2026) door gaswinning sinds de nulmeting in de Waddenzee in 2006. In blauw (met zwarte labels) de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens het verwachte scenario. De gestreepte contouren (met blauwe labels) geven de bodemdaling van 2024 (1-1-2025) weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2024. 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 juni 2024. De rode waarden geven de daling aan van de permanente GNSS-stations in de periode feb. 2007- dec. 2024.



Totale bodemdaling in cm (status modelcontour in blauw: 1-1-2026) sinds de start van de gaswinning in het gebied (1986). De gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2025 volgens de M&R-rapportage over 2024. De rode driehoeken geven de posities van de GNSS-stations aan.

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 2024.

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 trillingssnelheid (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: Geregistreeerde aardbevingen in het Waddengebied en omgeving voor de periode 1986 - mei 2026.

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 worden, in beginsel, als gelijkwaardig ingeschat 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 17) 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 minder dan 10% per jaar (drie kleine aardbevingen gedurende 40 jaar productie). Wanneer de Gutenberg-Richter relatie zou worden doorgetrokken wordt de kans op een aardbeving tussen $M=2$ en $M=3$ minder dan 1% per jaar en voor een aardbeving tussen $M=3$ en $M=4$ minder dan 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 begrenzings 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 18.

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 Mmax, en de Mmax waarden volgens de twee methoden.

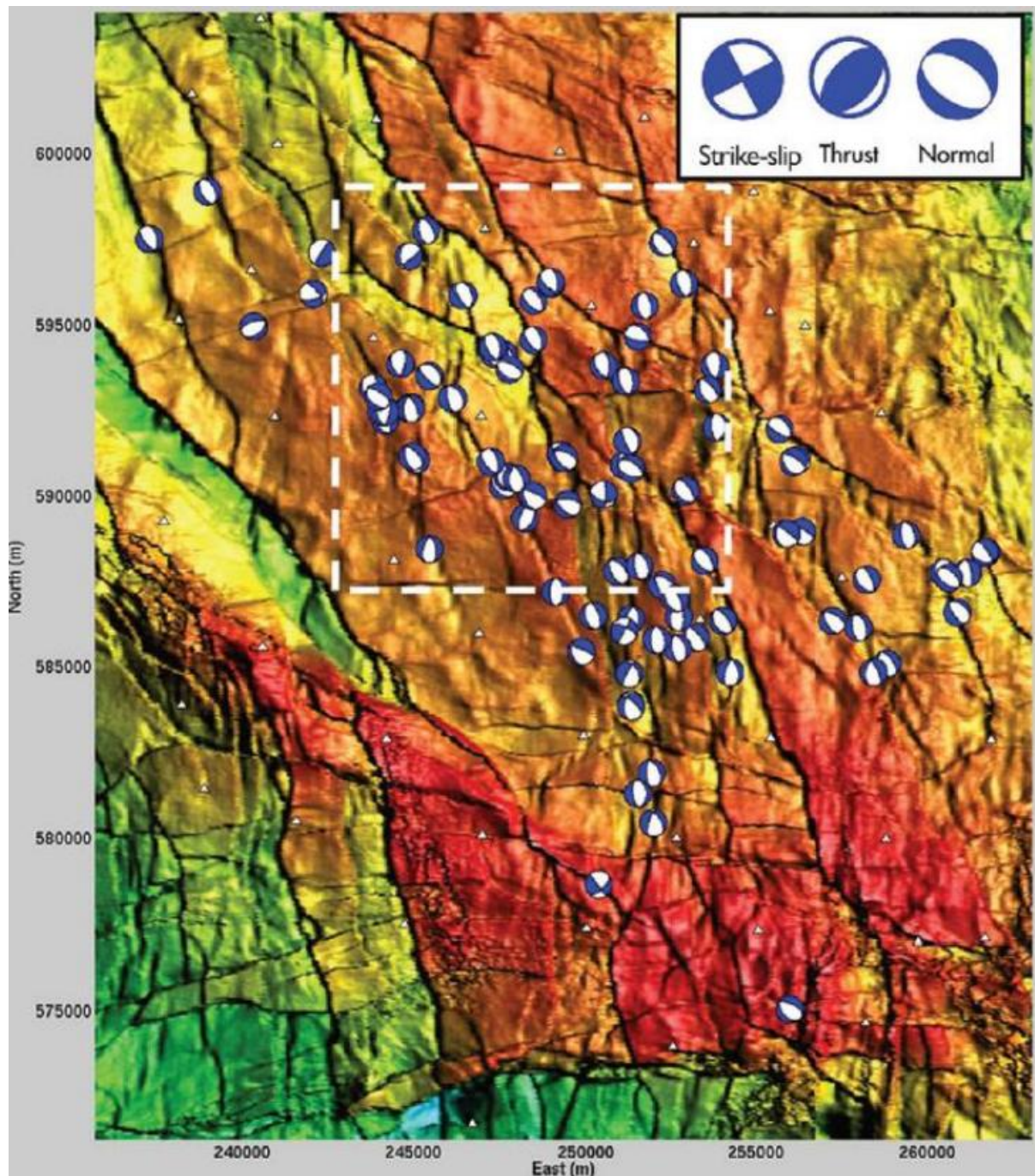
Voorkomen	Langste breuklengte (km)	Poisson's ratio	Breukhoogte (m)	Mmax energiebalans	Mmax breukslip
Ameland-Oost	4,3	0,2	110	4	3,6

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. Ook zijn deze bevingen niet zwaar genoeg om een bedreiging te vormen voor de veiligheid. Voor het effect op pijpleidingen is in 2010 een studie door Deltares (Referentie 19) 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 20). 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 heeft tevens de vraag gesteld 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.

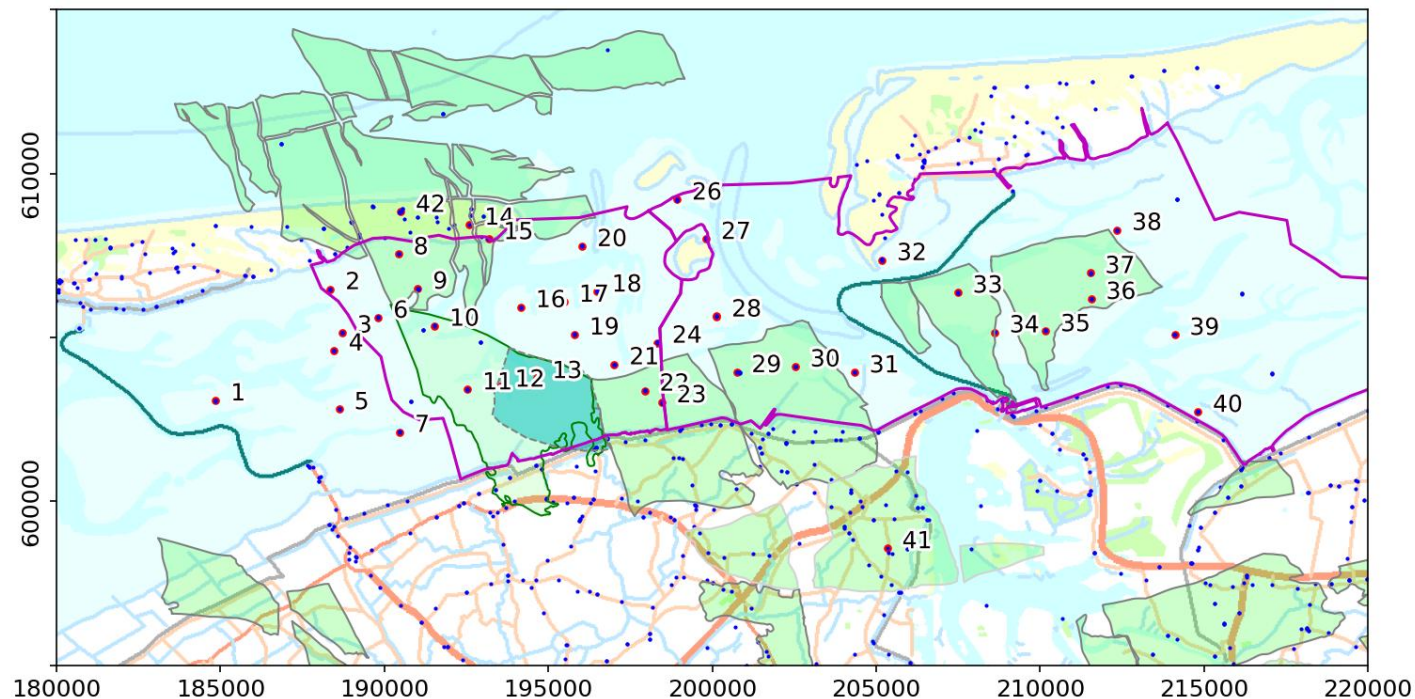
Allereerst moet worden vermeld dat het niet duidelijk is wat de beweging is geweest voor de reeds opgetreden bevingen in het Waddengebied. Om een conclusie te trekken over een aardbevingsbeweging is een “moment tensor” berekening noodzakelijk waarbij een voldoende aantal stations nodig zijn die de bevingen 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 21). 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 22). 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 $4,0$.



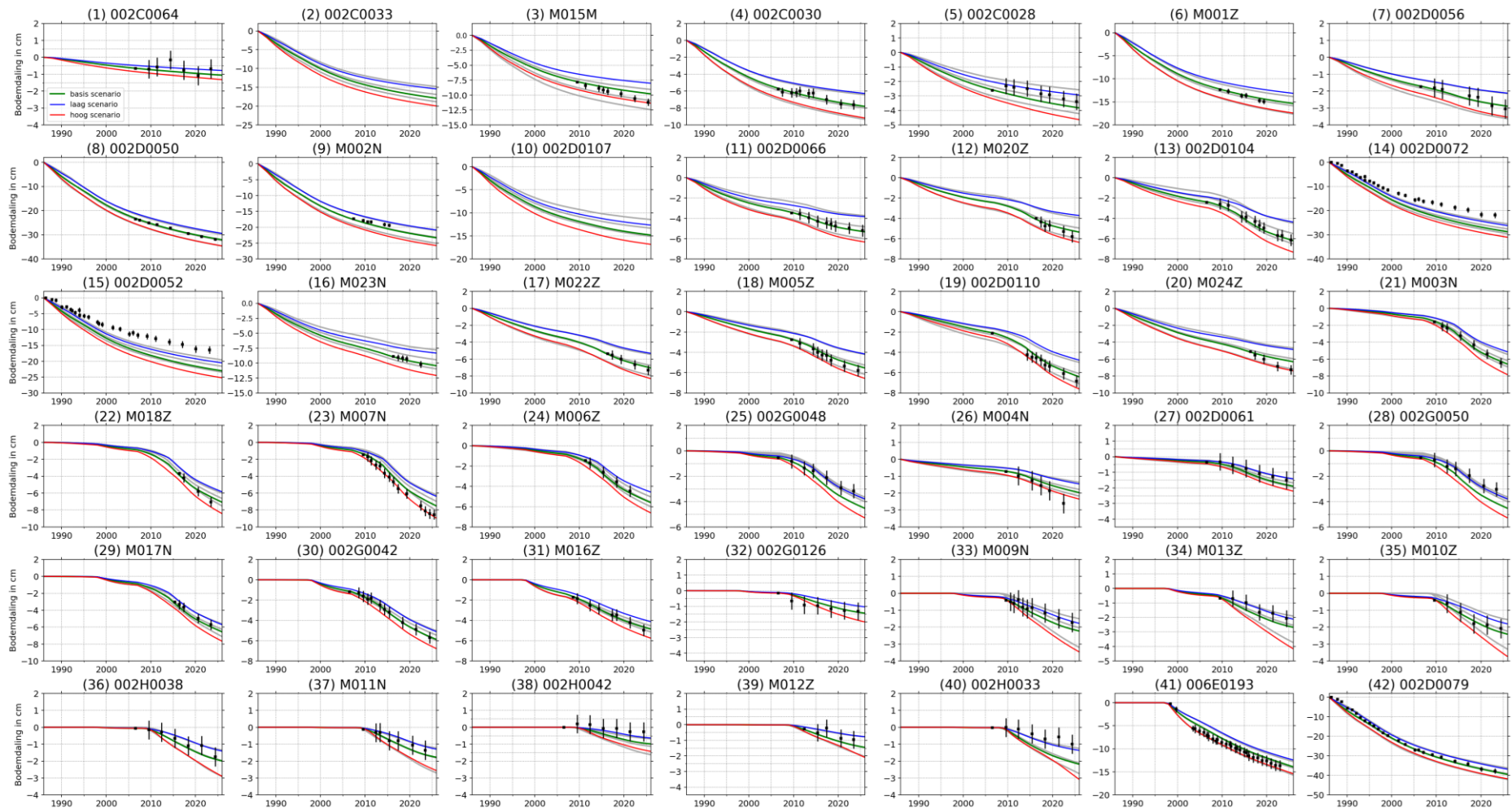
Figuur C-2: Bronmechanismes van 100 aardbevingen in het Groningen veld tussen 2015 en 2017 (Referentie 21).

D. Bijlage D: Tijdsreeksen Waddenzee

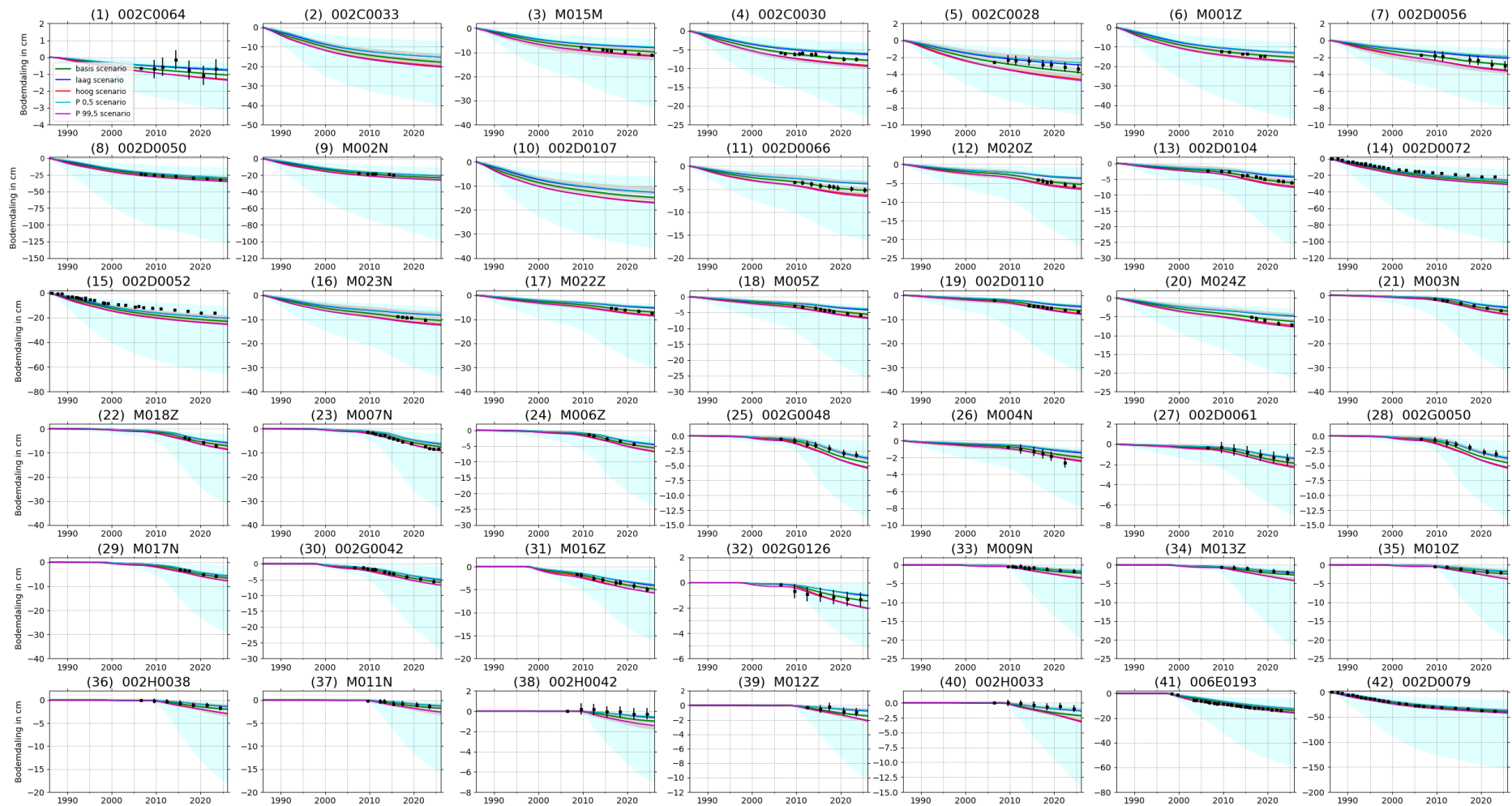
In deze bijlage worden tijdsreeksen van de bodemdaling op het merendeel van de Waddenzee meetpunten getoond. Figuur D-1 laat de locatie van de punten zien. Figuur D-2 en Figuur D-3 tonen de tijdsreeksen. In deze tijdsreeksen laten de grijze lijnen de statistische waarden zien (P2,5, gewogen gemiddelde = P50, P97,5). De blauwe, groene en rode lijnen laten respectievelijk 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 aanvullend de a-priori onzekerheid (blauw gebied) en ook de P0,5 en P99,5 statistische waarden met de bijbehorende deterministische lijnen. 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.



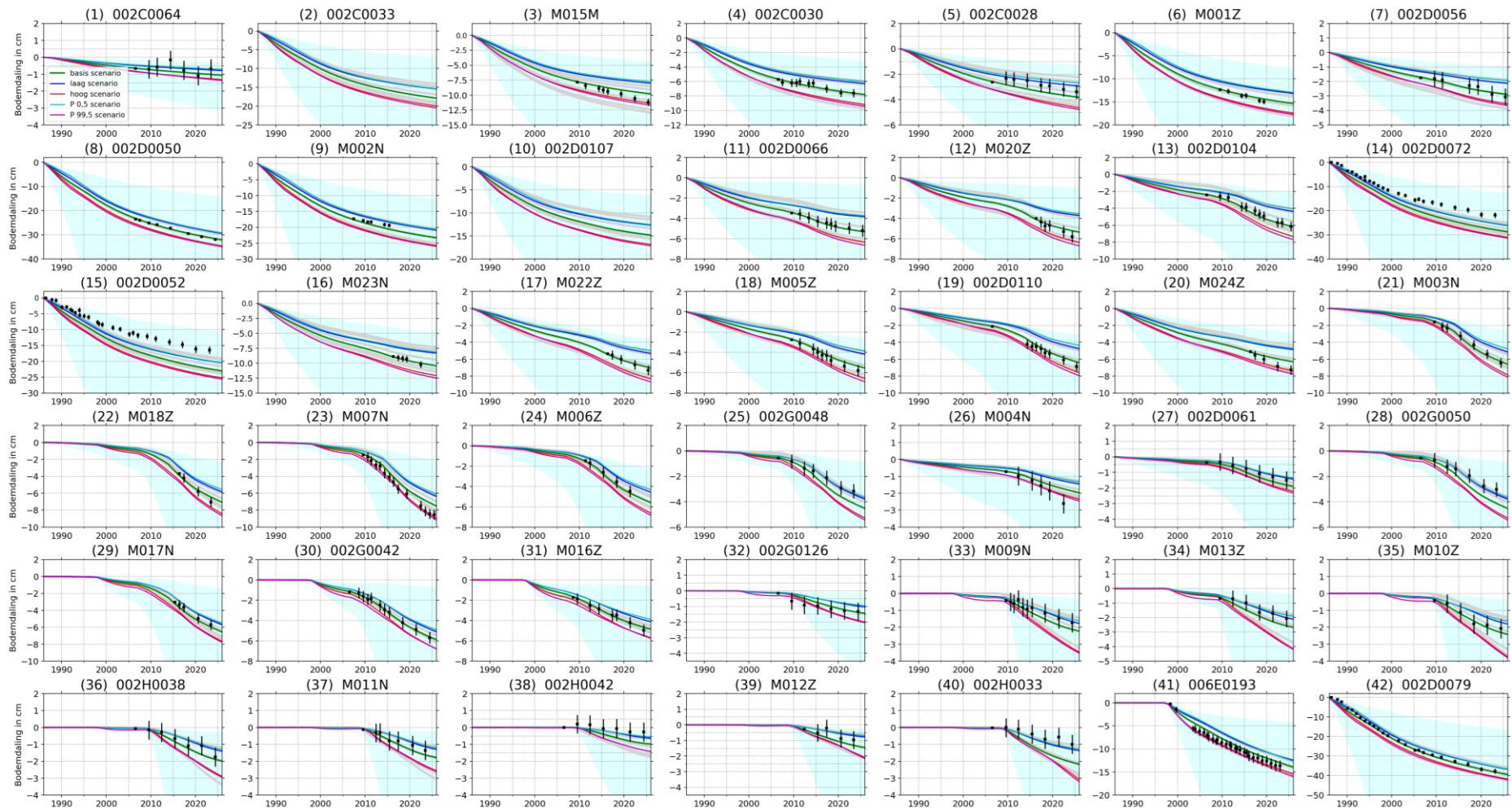
Figuur D-1: Locaties van de peilmerken waarvoor de tijdsreeksen zijn gemaakt in Figuur D-2, Figuur D-3 en Figuur D-4.



Figuur D-2: Tijdseries voor de punten zoals aangegeven Figuur D-1. Grijze lijnen geven de statistisch afgeleide P2,5 waarde (meest ondiepe grijze lijn), de verwachtingswaarde (gewogen gemiddelde, middelste grijze lijn) en de P97,5 waarde (meest diepe grijze 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. Grijze lijnen geven de statistisch afgeleide P0,5 en P2,5 waarden (meest ondiepe grijze lijnen), de verwachtingswaarde (gewogen gemiddelde, middelste grijze lijn) en de P97,5 en P99,5 waarden (meest diepe grijze lijnen). De gekleurde lijnen tonen de deterministische scenario's die zo dicht mogelijk bij de statistische lijnen zijn gekozen. In blauw wordt de a-priori onzekerheid aangegeven.



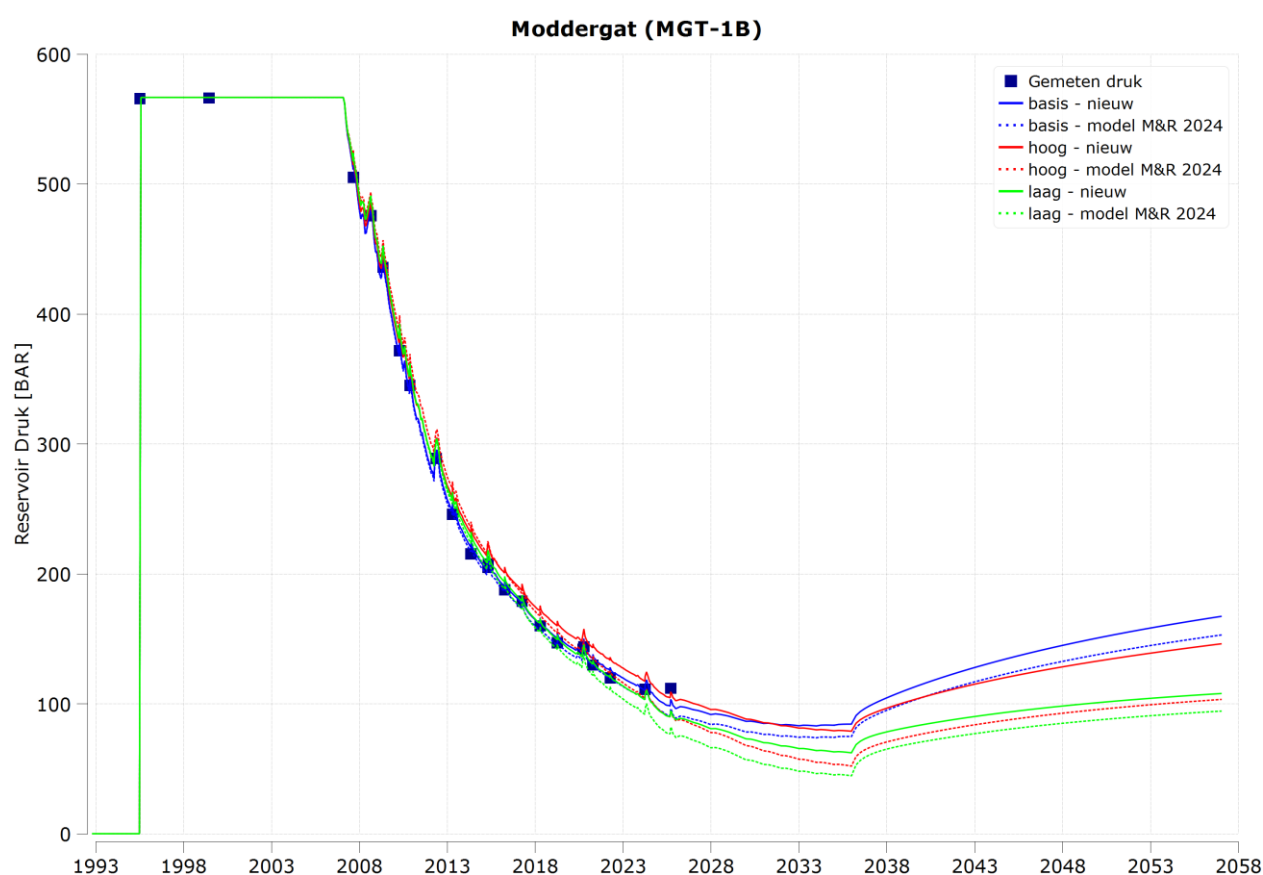
Figuur D-4: Tijdseries voor de punten zoals aangegeven Figuur D-1. Dit figuur is dezelfde als Figuur D-3, echter nu is de schaal van de y-as bepaald door de verschillende scenario's i.p.v. door de a-priori onzekerheid.

E. Bijlage E: Vergelijking reservoirmodellen met drukmetingen

In deze bijlage worden voor de MLV-velden de drukmetingen tot en met 2025 vergeleken met de gesimuleerde drukken in elk van de modelrealisaties. Dit jaar zijn er modelrealisaties aangepast voor Moddergat. De overige modelrealisaties zijn ongewijzigd t.o.v. de voorgaande rapportage (Referentie 31). Details van de modellering zijn verder te vinden in Referentie 11 en Referentie 15.

E.1 Moddergat

Het gas uit het Moddergat veld wordt geproduceerd met put MGT-1B. De druk gemeten in 2025 is vergelijkbaar met die uit 2024 en valt buiten de bandbreedte van de modelrealisaties die vorig jaar gebruikt zijn. De drie realisaties zijn daarom dit jaar aangepast om de onzekerheidsbandbreedte beter te dekken. Figuur E-1 laat de modeldrukken op basis van zowel de voorgaande als de aangepaste (nieuw) realisaties zien.



Figuur E-1: Gemeten drukken en hoog/basis/laag drukprognoses in MGT-1B.

Er zijn 7 model parameters waarvoor de waarden verschillen tussen de *hoog/basis/laag* Moddergat modelrealisaties (Tabel E-1). Voor de *basis* modelrealisatie is alleen de permeabiliteit van de aquifer onder het gasveld iets verhoogd, zowel in horizontale (*Aquiferperm_Mult_log*) als verticale richting (*Kv_mult_log_aquifer*). Deze permeabiliteitsfactor is nu 0.5 ($10^{-0.3}$). Voor de *laag* en *hoog* scenario's zijn de aquifer permeabiliteiten onveranderd gebleven, maar is de gas saturatie in de aquifer, en daarmee de compressibiliteit, verhoogd.

Tabel E-1: Moddergat model parameters (waar deze verschillen tussen de drie realisaties).

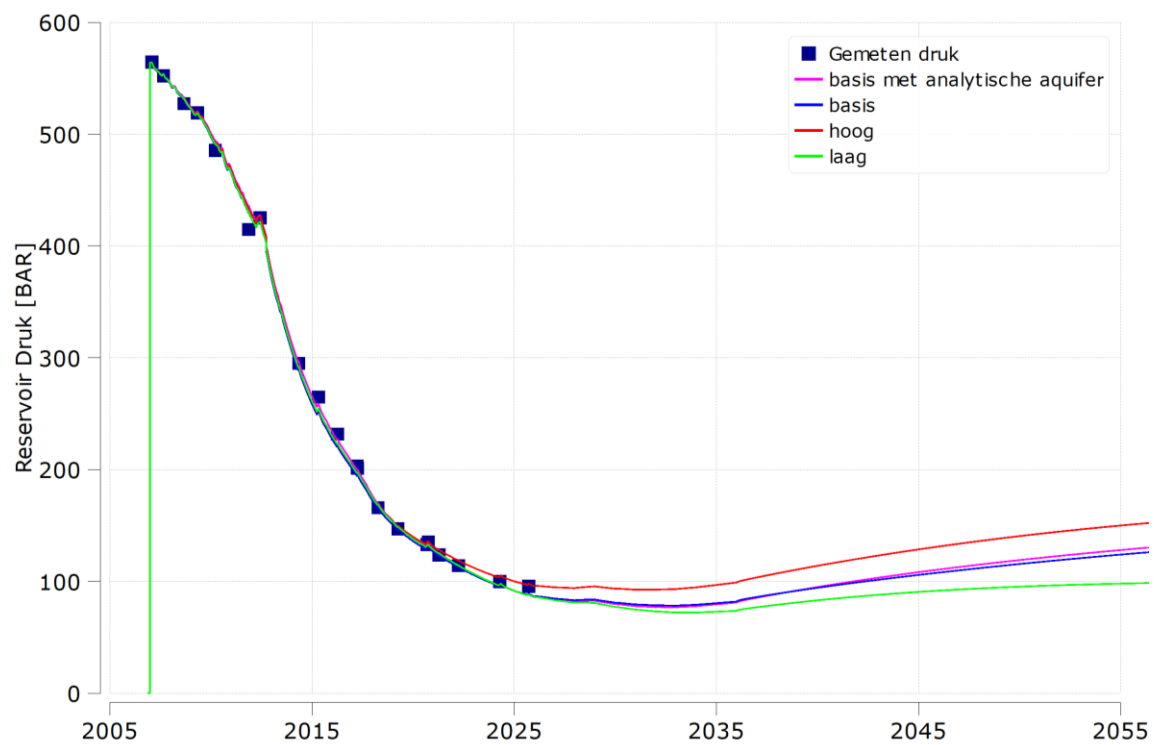
Parameter	Hoog (nieuw)	Basis (nieuw)	Laag (nieuw)	Hoog (vorig)	Basis (vorig)	Laag (vorig)
<i>GBV_mult</i>	1.08	1.00	1.27	1.25	1.00	1.27
<i>Fault_mgt_I_add</i>	-0.5	0	-1.5	-2.0	0	-1.5
<i>Fault_mgt_I_3</i>	-0.5	0	-1.5	-2.0	0	-1.5
<i>Aquiferperm_Mult_log</i>	0	-0.3	-3	0	-0.5	-3
<i>Kv_mult_log_aquifer</i>	0	-0.3	-3	0	-0.5	-3
<i>ResGas</i>	0.18	0.23	0.23	0.15	0.23	0.23
<i>GasSatbelowFWL</i>	0.15	0.2	0.13	0.1	0.2	0.1

Voor de *hoog* realisatie is verder de doorlatendheid van de breuken die het noordelijke en zuidelijke deel van het Moddergat veld scheiden verhoogd richting de waarde van het basis scenario (parameters *Fault_mgt_I_add* en *Fault_mgt_I_3*). Daarnaast is de GIIP verlaagd (via *GBV_mult*) en de residuele gas saturatie (*ResGas*) verhoogd. Desondanks blijft de mogelijke bandbreedte voor toekomstige drukken ongeveer even groot. De realisaties verschillen nog steeds in de mobiliteit van de aquifer. De *laag* realisatie geeft de minste depletie in de onderliggende aquifer.

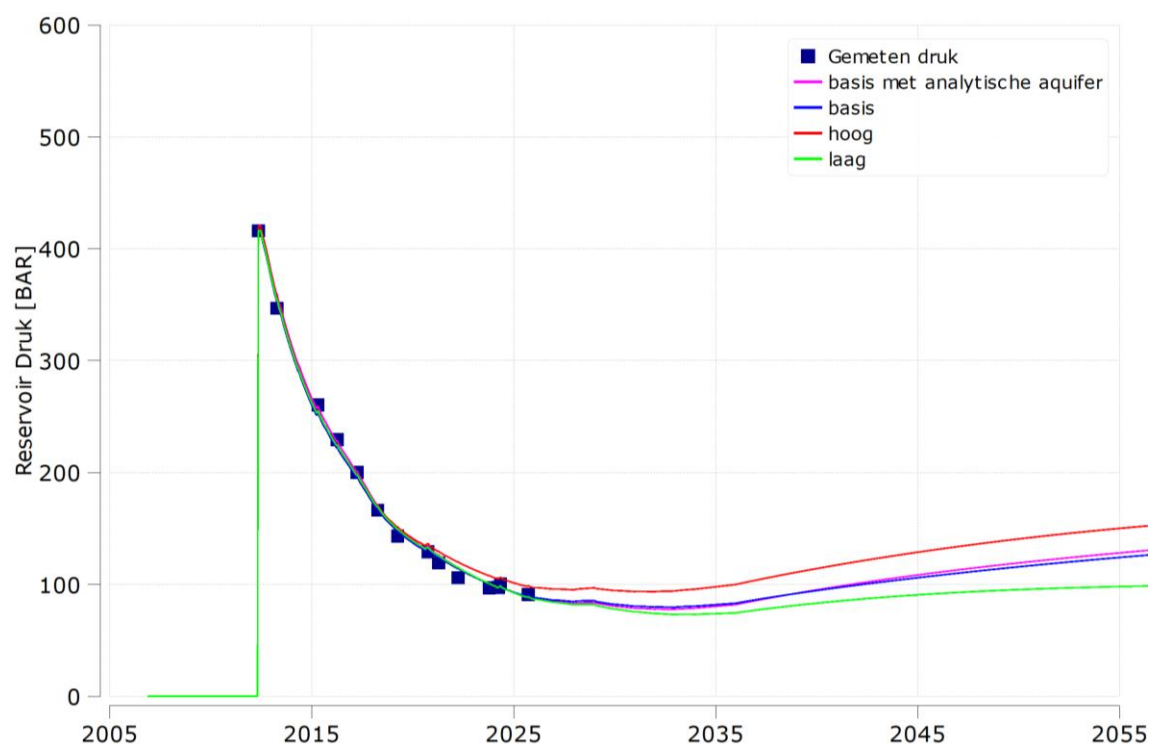
E.2 Nes

De reservoir modellen voor Nes zijn dit jaar ongewijzigd. De laatste kalibratie staat beschreven in Bijlage E van Referentie 30. Er zijn vier putten in het Nes veld: MGT-2, MGT-3, MGT-4A en MGT-5, waarvan MGT-4A niet meer in gebruik is. In de drie producerende putten zijn in 2025 reservoirdrukken bepaald aan de hand van de druk gemeten bovenin de put tijdens een stop voor onderhoud. De drukprognoses voor de verschillende modelrealisaties komen goed overeen met deze in 2025 gemeten drukken, zoals Figuur E-2, Figuur E-3 en Figuur E-5 laten zien.

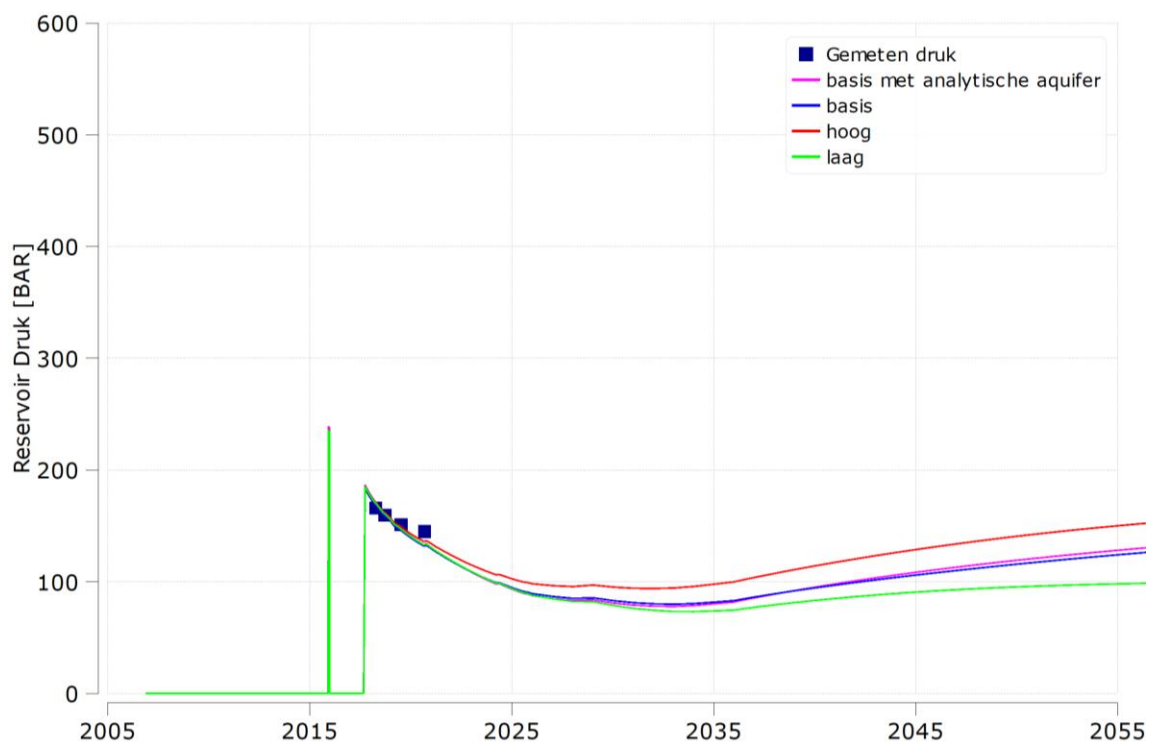
Figuur E-2 t/m Figuur E-5 tonen naast de *hoog/basis/laag* prognoses ook de extra realisatie *basis_aquifer* met een analytische aquifer grenzend aan het noordwesten van Nes. Deze realisatie geeft zeer vergelijkbare drukken als de *basis* realisatie zonder deze aquifer. De realisatie met analytische aquifer is voor de 2023 rapportage gemaakt om een mogelijke connectie met het aangrenzende aquifer breukblok te simuleren. De gemodelleerde cumulatieve aquifer influx is vertaald in een aantal mogelijke drukprognoses voor het aangrenzende breukblok. Details hierover zijn te vinden in Referentie 30 (Bijlage G).



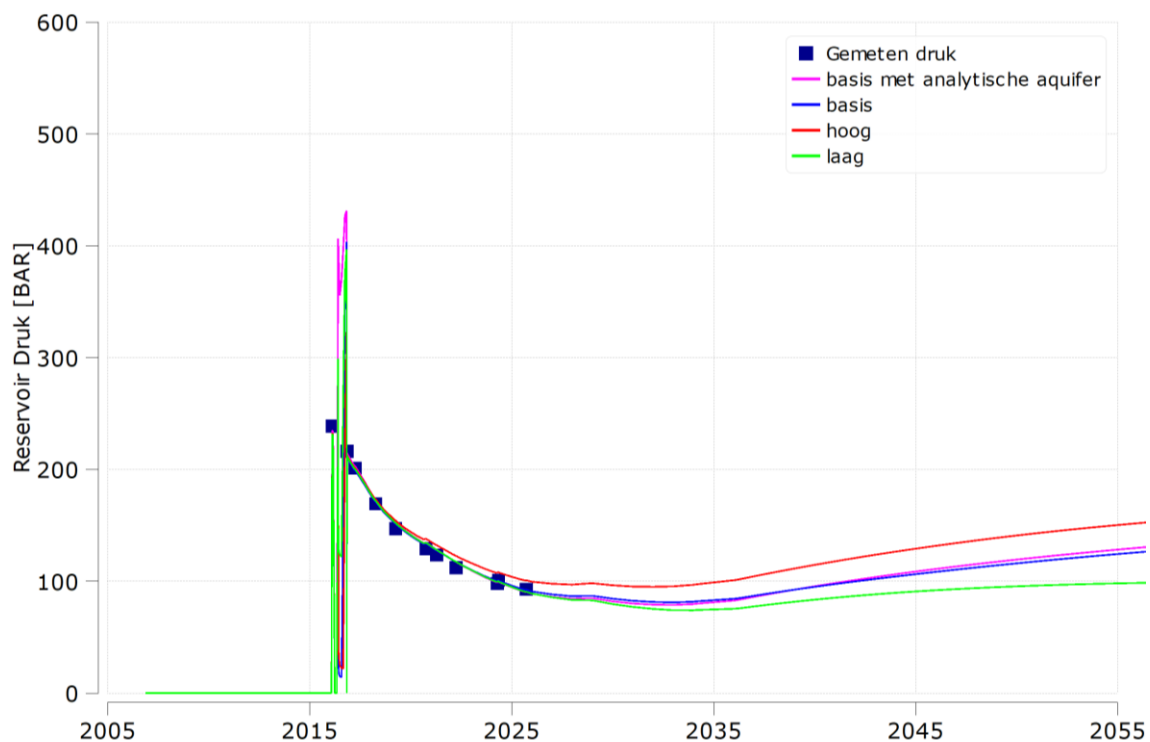
Figuur E-2: Vergelijking modeldrukken met gemeten drukken in MGT-2.



Figuur E-3: Vergelijking modeldrukken met gemeten drukken in MGT-3.



Figuur E-4: Vergelijking modeldrukken met gemeten drukken in MGT-4A.



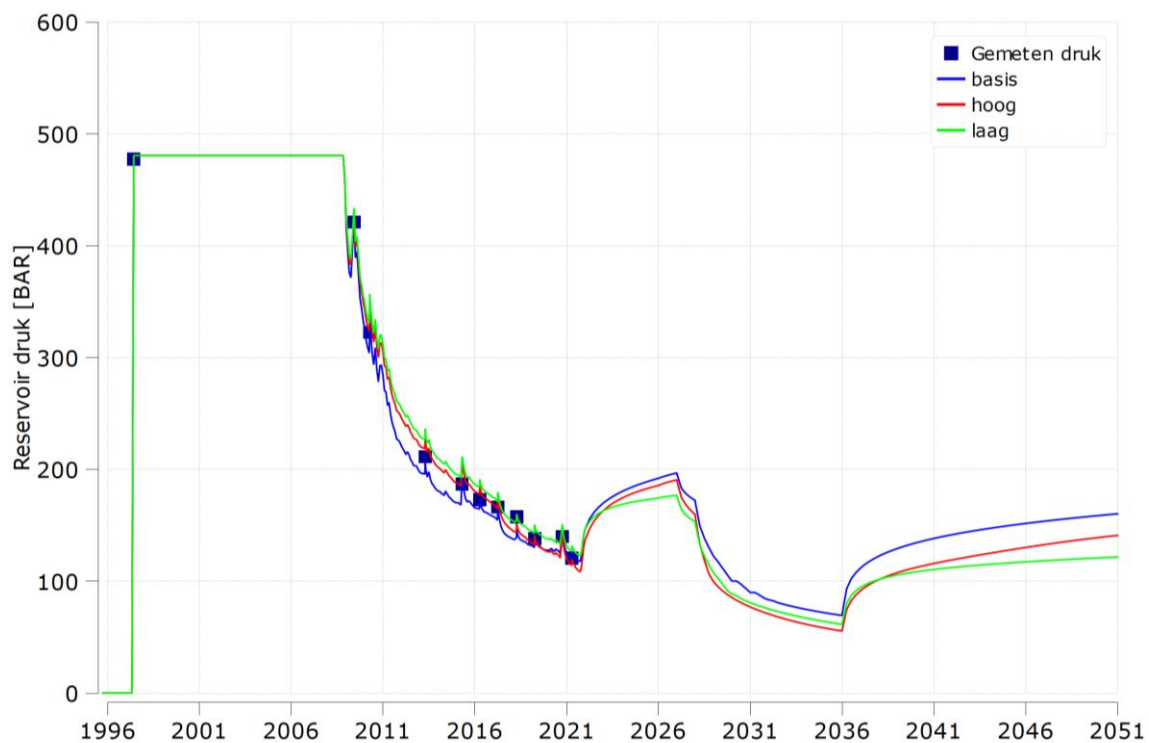
Figuur E-5: Vergelijking modeldrukken met gemeten drukken in MGT-5⁴.

⁴ De korte periode in 2016 waarin de modeldruk voor MGT-5 aanmerkelijk hoger is komt overeen met de periode van productie uit de lagere reservoir zones (ROSLU3+) die een hogere reservoirdruk hebben.

E.3 Lauwersoog Oost

Het gas uit het Lauwersoog Oost veld is geproduceerd met put LWO-1B tot oktober 2021. Sinds die tijd is er geen productie mogelijk geweest door technische problemen met de put. Ook kon de reservoirdruk niet bepaald worden. De laatst gemeten druk in LWO-1B is in overeenstemming met de drukprognoses, zie Figuur E-6. Er zijn geen aanpassingen nodig in de modelparameters.

Er worden mogelijkheden gezocht om productie uit dit veld weer op gang te brengen. Er is voor de prognose aangenomen dat er in 2027 weer geproduceerd kan worden. Tot die tijd bouwt de druk in de put op als gevolg van drukequilibratie met het overige deel van het veld. Door de lange insluiting en de onveranderde einddatum van productie (eind 2035) zal de totale productie uit dit voorkomen opnieuw lager zijn dan eerder verwacht.

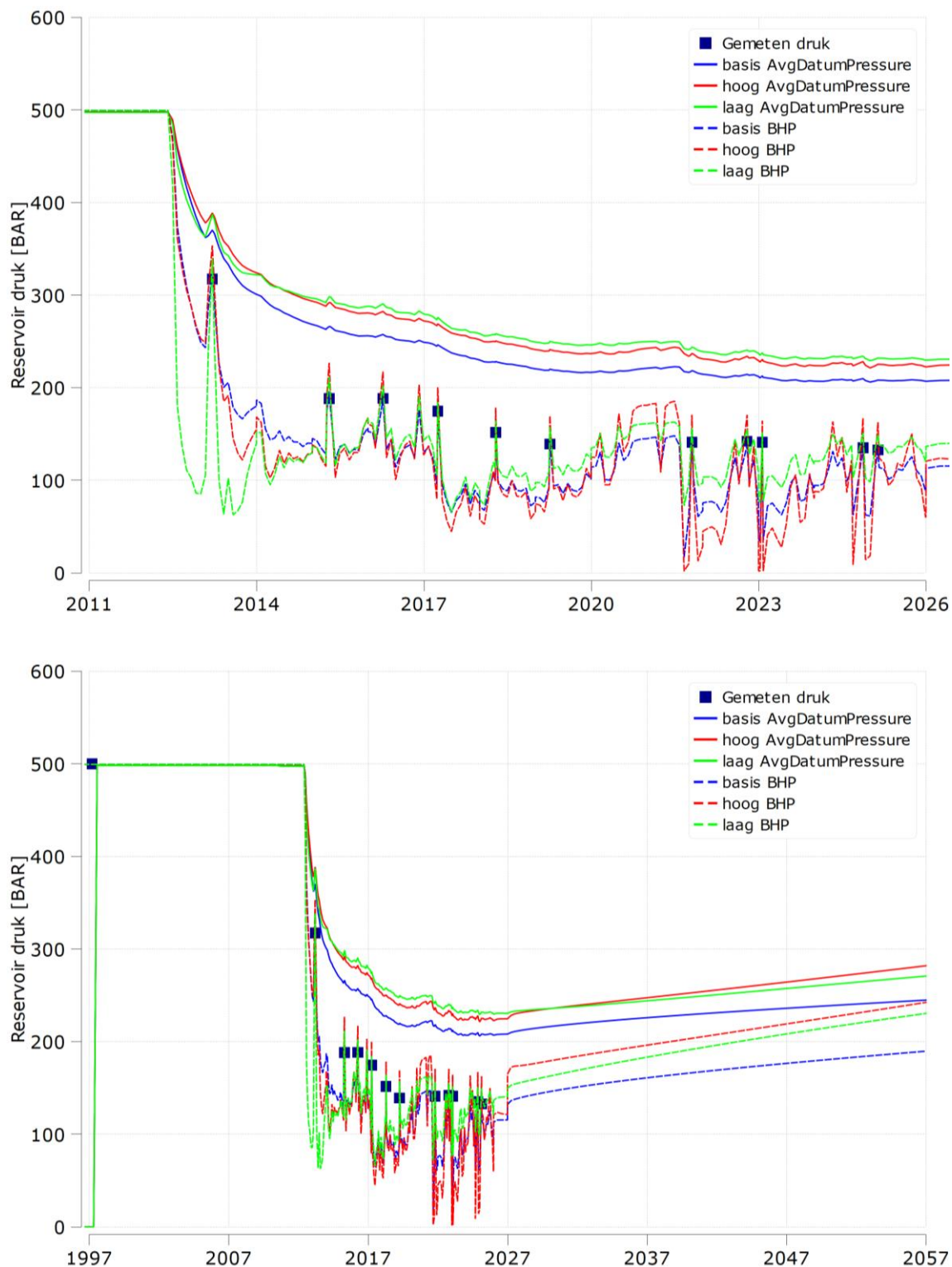


Figuur E-6: LWO-1B gemeten drukken en hoog/basis/laag drukprognoses.

E.4 Lauwersoog Centraal

Lauwersoog Centraal is het meest westelijk gelegen en kleinste Lauwersoog veld en wordt geproduceerd met put LWO-2. Deze put moet frequent uit en aan 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 vooral vergeleken met de *bottom-hole* drukken uit de modellen.

De gemeten drukken komen goed overeen met de drukprognoses, zie Figuur E-7, waarin boven de drukken van 2011 tot 2026 te zien zijn en onder de volledige geschiedenis en prognose. Er is geen noodzaak om de modellen te herkalibreren. De productieprognose uit Lauwersoog Centraal is zeer beperkt (zie Tabel 2-6), waardoor productie uit dit veld zeer beperkte invloed op bodemdaling zal hebben.

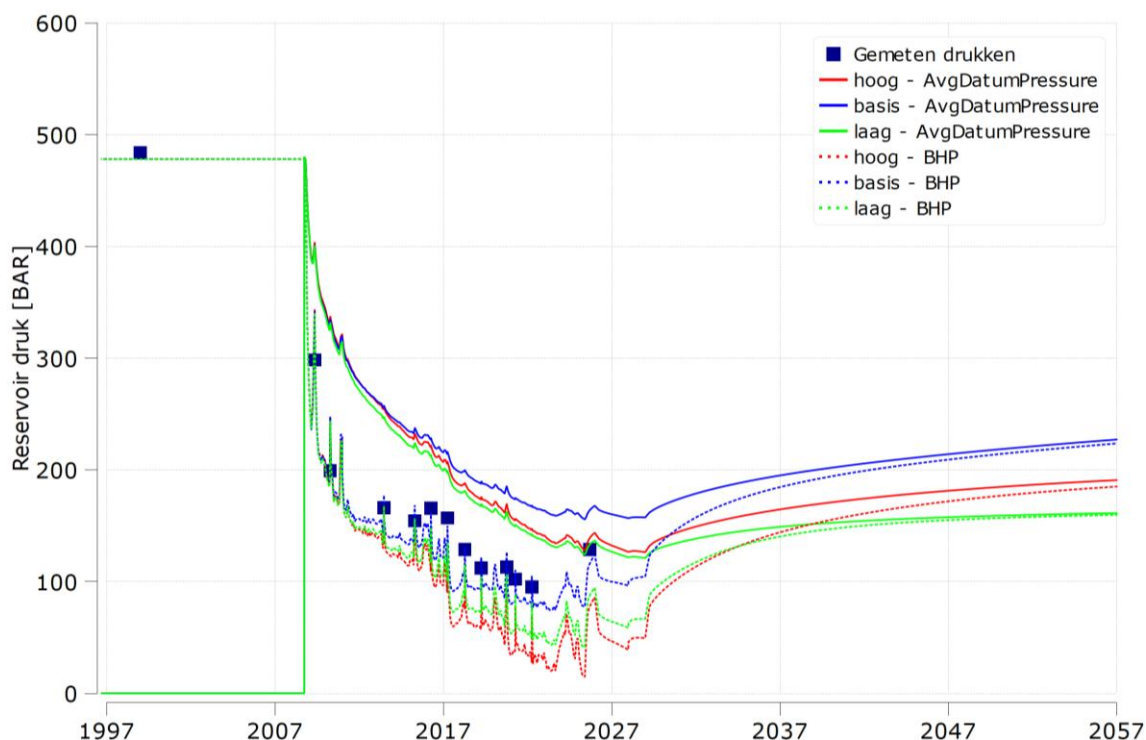


Figuur E-7: LWO-2 gemeten drukken en hoog/basis/laag drukprognoses weergegeven met doorgetrokken lijnen. De gestreepte lijnen geven de drukken weer onder in de put (bottom-hole drukken). De bovenste figuur is voor de periode 2011 tot 2026, terwijl de onderste figuur voor de volledige periode tot 2057 dekt.

Ook nadat productie uit LWO-2 gestopt is blijft de *bottom-hole* druk in het model lager dan de modeldruk die gebaseerd is op een gemiddelde van alle geperforeerde reservoirzones, zie de onderste grafiek in Figuur E-7. Dit komt omdat er door de zeer slechte verticale doorlatendheid een groot drukverschil blijft tussen de druk in de bovenste reservoirzone en de lagere reservoirzones. De *bottom-hole* druk in het model is gebaseerd op de bovenste reservoirzone.

E.5 Lauwersoog West

Lauwersoog West is het meest centraal gelegen Lauwersoog veld en wordt geproduceerd met put LWO-3. Omdat de permeabiliteiten in dit voorkomen sterk variëren, wordt de gemeten druk vergeleken met de *bottom-hole* drukken. Na eerdere pogingen in 2024 is in 2025 opnieuw een SPG meting in LWO-3 uitgevoerd. Bij deze meting wordt een *static pressure gauge* (instrument dat de druk meet) in de put naar beneden gelaten. De gauge kon tot een diepte van 150 m boven de perforaties komen, waarbij de metingen lieten zien dat er water in de put stond. De diepst gemeten druk is naar datum level geëxtrapoleerd met gebruik van de gemeten water gradient. Dit resulteerde in de laatste drukmeting (129 bar) weergegeven in Figuur E-8. Het water dat langere tijd in de put blijft staan kan erop duiden dat de verbinding met het reservoir verslechtert is door mogelijke verstopping onderin de put. Daarom wordt deze drukmeting als minder betrouwbaar aangemerkt. Desalniettemin ligt de nieuwe meting dicht bij de *bottom-hole* druk van de *basis* modelrealisatie.



Figuur E-8: Voor LWO-3 gemeten drukken en hoog/basis/laag drukprognoses weergegeven met doorgetrokken lijnen. De gestreepte lijnen geven de drukken weer onder in de put (*bottom-hole* drukken; BHP).

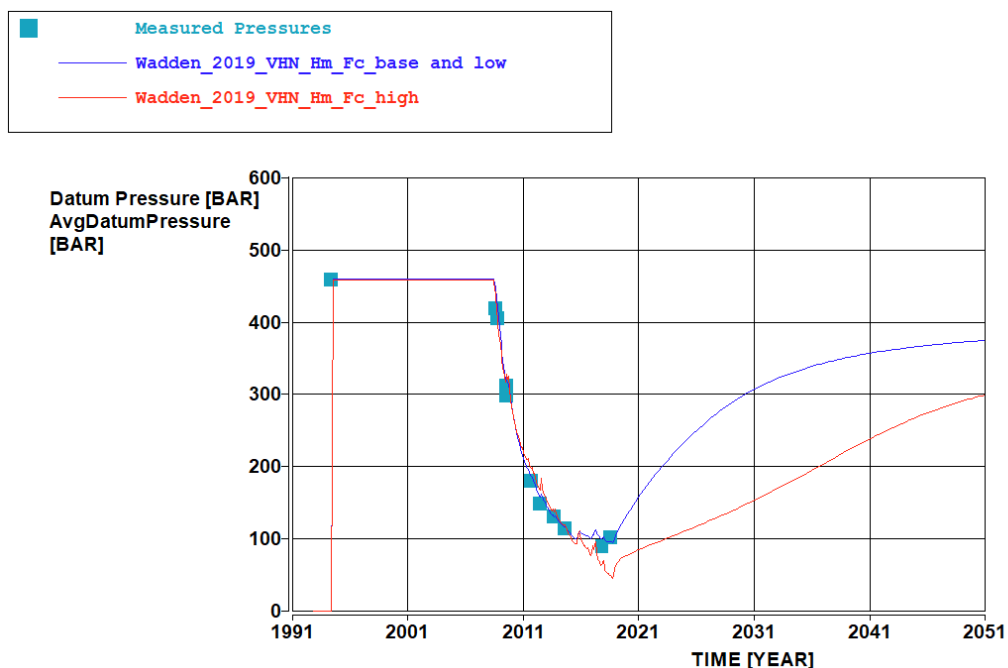
De eerdere metingen weergegeven in Figuur E-8 zijn *closed-in tubing head pressures*. Deze zijn bepaald aan de hand van de druk bovenin de put gemeten, met de aanname dat er op dat moment alleen gas in de put aanwezig was. Indien dit niet altijd het geval was, zou de daadwerkelijke reservoirdruk hoger zijn geweest. De realisatie *hoog* zou dan nog meer conservatief zijn. De modelrealisaties geven voldoende onzekerheidsbandbreedte en zijn niet aangepast.

E.6 Vierhuizen Oost

Uit dit voorkomen wordt sinds november 2018 niet meer geproduceerd doordat de put (VHN-1C) integriteitsproblemen geeft. De laatste drukmeting uit 2018 liet zien dat de druk rondom de put hoger wordt, doordat de druk in het reservoir in evenwicht komt met de hogere drukken in de

aquifer. De gemeten druk in 2018 is in goede overeenstemming met de *basis/laag* drukprognose, weergegeven met de blauwe lijn in Figuur E-9.

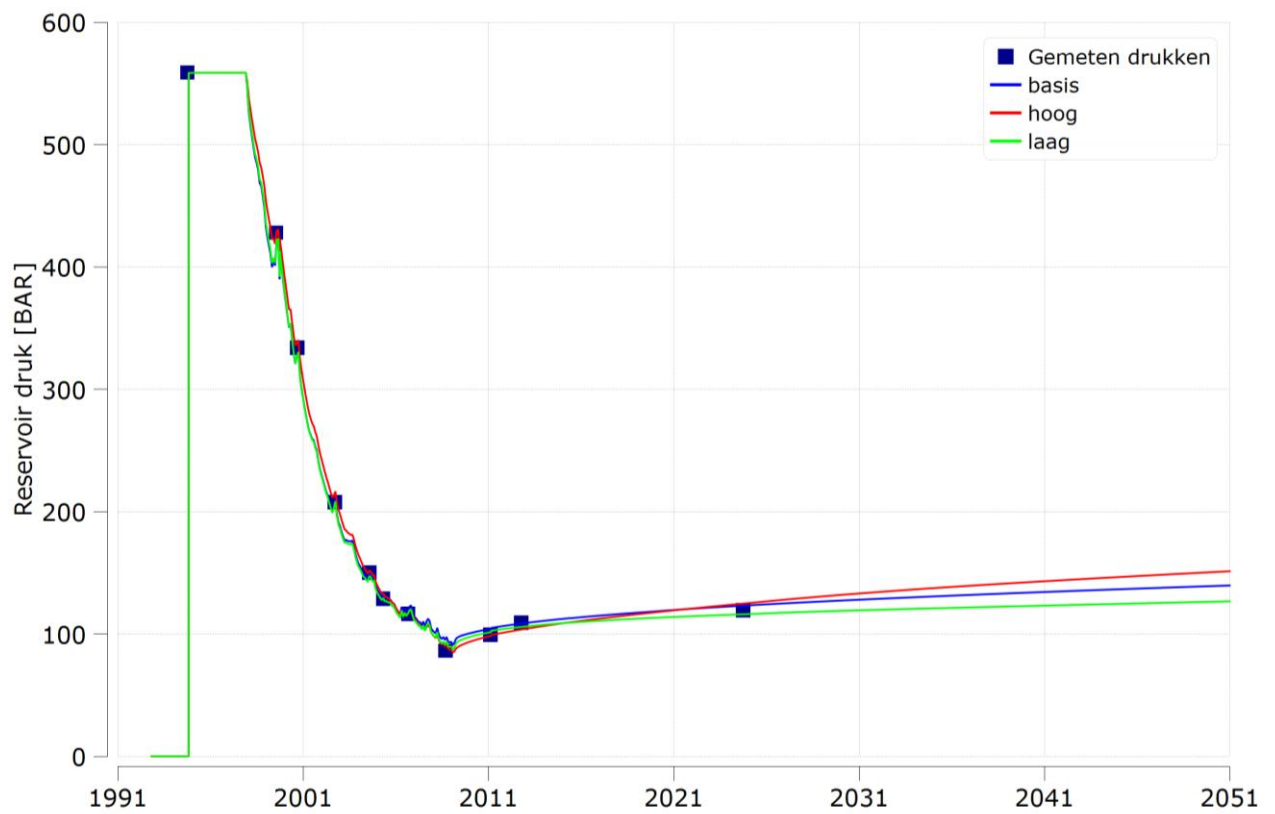
De drukprognoses voor Vierhuizen-Oost zijn ongewijzigd t.o.v. de voorgaande rapportage. Opnieuw wordt aangenomen dat in de toekomst niet meer uit het voorkomen geproduceerd zal worden. Indien productie uit het Vierhuizen-Oost veld opnieuw gestart zou kunnen worden, zal met het meet- en regelprotocol worden gewaarborgd dat de belasting binnen de toegestane gebruiksruimte blijft.



Figuur E-9: VHN-1C gemeten drukken en hoog/basis/laag drukprognoses (ongewijzigd sinds 2019).

E.7 Metslawier

Het Metslawier voorkomen valt niet onder de “waddenvelden” maar wordt, net als het Anjum en Ezumazijl voorkomen, meegenomen in de bodemdalingsberekeningen voor het Meet- en regelprotocol. Productie uit Metslawier is gestopt in 2016. In 2024 is er voor het eerst in lange tijd een drukmeting uitgevoerd in ANJ-2C, de enige put in dit veld. Deze meting gaf vorig jaar aanleiding de *laag* en *hoog* modelrealisaties aan te passen (Referentie 31). Deze komen nu goed overeen met de meting in 2024 (Figuur E-10) en blijven ongewijzigd.



Figuur E-10: Drukprognoses en gemeten drukken in het Metslawier voorkomen (ongewijzigd sinds 2024).

F. De confrontatie workflow tussen geodetische metingen en bodemdalingsscenario's

Deze appendix heeft tot doel de stappen die gevolgd worden in de confrontatie workflow tussen geodetische metingen en geomechanische bodemdalingsscenario's in de Meet- en Regelcyclus over 2024 op een overzichtelijke manier samen te vatten. Deze stappen zijn gebaseerd op de methodiek uit de LTS-studie (voor technische inhoudelijke details, zie Referentie 12).

F.1 Het voorbereiden van de geodetische data inclusief precisiebeschrijving

Alvorens de geodetische metingen (ingewonnen door middel van de technieken waterpassen, GNSS, en InSAR) te vergelijken ('confronteren') met geomechanische bodemdalingsscenario's, worden deze omgezet naar dubbele verschilmetingen, in de technische rapporten aangeduid met 'double-difference'. Het dubbele verschil is de verandering van hoogteverschil tussen twee meetpunten over een bepaalde tijdsperiode ten opzichte van elkaar. Het voordeel van het gebruik van dubbele verschilmetingen is dat deze niet ten opzichte van een vast punt hoeven te worden gemeten. Ze bieden ook het voordeel dat een meetserie met een verstoring, toch grotendeels kan worden gebruikt. Op deze wijze wordt optimaal gebruik gemaakt van de geodetische metingen. Om te voorkomen dat de dezelfde informatie in geodetische metingen meerdere keren wordt gebruikt, worden de dubbele verschilmetingen dusdanig gevormd, dat zij lineair onafhankelijk zijn.

De precisiebeschrijving van de geodetische dubbele verschilmetingen gebeurt door middel van een covariantiematrix. Er wordt daarbij een onderscheid gemaakt tussen meetprecisie en idealisatie precisie. De idealisatie precisie is de mate waarin de beweging van de meetpunten het onderzochte signaal (in dit geval bodemdaling door gaswinning) beschrijft. Ondiepe signalen door bijvoorbeeld grondwater extractie of zetting van een gebouw kunnen de beweging van een meetpunt beïnvloeden, maar deze beweging is niet gerelateerd aan het onderzochte signaal. In deze Meet- en Regelcyclus wordt ervoor gekozen om de covariantiematrix van de dubbele verschilmetingen op te bouwen uit de sommatie van de volgende twee componenten:

- meetprecisie (C_e),
- peilmerk(in)stabiliteit; de temporele component van de idealisatie precisie, die niet ruimtelijk gecorreleerd is (C_t).

De keuze hiervoor wordt toegelicht in paragraaf 2.3.3.2.

F.2 Het voorbereiden van de ondergrondmodellen inclusief precisiebeschrijving

Geologische- en reservoirmodellen

De ondergrondmodellen zijn gebaseerd op 3D geologische modellen die op basis van seismische- en boorgatmetingen geconstrueerd worden. Een aantal eigenschappen van het gesteente, zoals porositeit en permeabiliteit, wordt aan de hand van deze metingen toegevoegd aan het model om dit geschikt te maken voor verdere berekeningen.

Een numeriek reservoirmodel vertaalt deze gesteente-eigenschappen in een nieuw model waar er berekeningen kunnen worden gemaakt van de drukontwikkeling van het reservoir en aangrenzende aquifers. Deze modellen worden gekalibreerd aan de beschikbare drukmetingen en geproduceerde volumes (zie bijlage E en paragraaf 2.3.2). De passing van de modelrealisaties zijn niet uniek wat betekent dat er meerdere realisaties met een model kunnen worden gemaakt die allemaal goed passen bij de drukdata. In de confrontatie workflow worden deze deterministische realisaties als invoer gebruikt voor de geomechanische bodemdalingsscenario's. Het aantal realisaties per veld hangt af van de complexiteit van het veld en met name het aantal aquifers die grenzen aan het gasvoerende deel van het reservoir. Zo kent het veld Ameland zes realisaties en het veld Anjum drie realisaties.

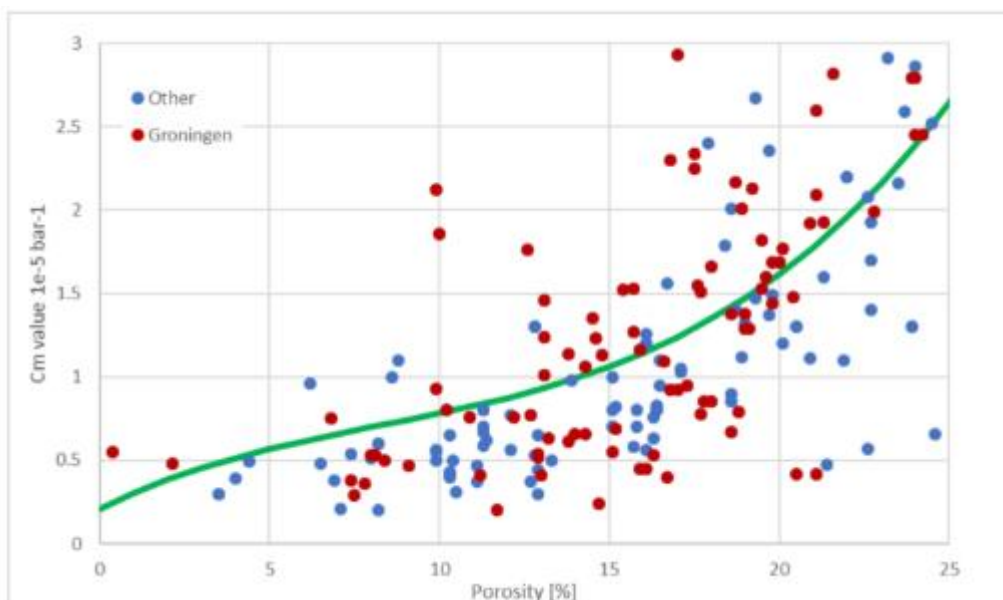
Bodemdalingsmodellen

Geomechanische bodemdalingsmodellen voor de verschillende velden beschrijven de compactie op basis van de gegevens. De porositeit bepaalt bv. de spatiële verdeling van de compressibiliteit van het gesteente. De vermenigvuldiging van deze parameter met de dikte en de drukdaling bepaalt de compactie. Deze compactie wordt per gridcel van 500 bij 500 m berekend. Verticaal worden de lagen ook opgeschaald. Bij de gebruikte opschaling geldt dat er behoud van gesteentevolume, behoud van porievolume en behoud van druk geldt wanneer het opgeschaalde model vergeleken wordt met het oorspronkelijke reservoirmodel.

Iedere gridcel zal dan een bodemdaling veroorzaken die met een hoek van ongeveer 45 graden uitstraalt naar het maaiveld. In de meest eenvoudige representatie van de ondergrond gebeurt dit volgens een lineair elastisch model. In de gebruikte methode voor de berekening van de bodemdaling is, na onderzoek, gebleken dat zowel de compactie (rate type compaction model, RTCiM) als het bovenliggende zoutgesteente (moving rigid basement) een tijdsafhankelijk gedrag kennen. Dit gedrag kan analytisch worden beschreven met als voordeel dat er vele berekeningen kunnen worden gemaakt voor de bodemdaling die elk gepast worden met de geodetische data. In de confrontatie methodiek wordt de kwaliteit van de passing bepaald door de toetsgrootheid.

In de M&R cyclus worden 6 geomechanische parameters gebruikt.

Voor zowel de parameters in het zoutmodel als het RTCiM model bestaan er geen datasets op basis van bijvoorbeeld laboratoriumproeven waarop we distributies kunnen baseren. Wel bestaat er een relatie tussen porositeit en de algemeen gemeten compressibiliteit van het gesteente. Deze is weergegeven in Figuur F-1. De relatie die behoort bij de groene lijn is gebruikt om het porositeitsgrid van het reservoirmodel om te zetten naar een compressibiliteitsgrid. Voor zowel de C_{md} als de C_{mref} in het RTCiM worden factoren getrokken uit een uniforme verdeling, die een vermenigvuldigingfactor zijn op dit grid. Voor verdere uitleg van deze factoren wordt verwezen naar Referentie 12.



Figuur F-1: C_m versus porositeit uit kernplug-experimenten van de Rotliegend zandsteen. De groene lijn toont de C_m -porositeitsrelatie, de rode stippen tonen de experimenten van kernpluggen op het Groningenveld en de blauwe tonen de resultaten voor andere velden in Noord-Nederland.

Het zoutmodel wordt beschreven met een bewegend rigid basement (aangepast Geertsma en van Opstal model, zie Referentie 12). De startdiepte van het rigid basement, de delta waarmee het rigid basement kan bewegen en de relaxatietijd die een maat is voor de viscositeit van het zout zijn de parameters in dit zgn. "influence model".

Voor alle parameters wordt een uniforme distributie aangenomen voor de mogelijke waarden omdat voor deze parameters geen directe a-priori metingen bekend zijn en daarmee ook niet de mogelijke vorm van een distributie.

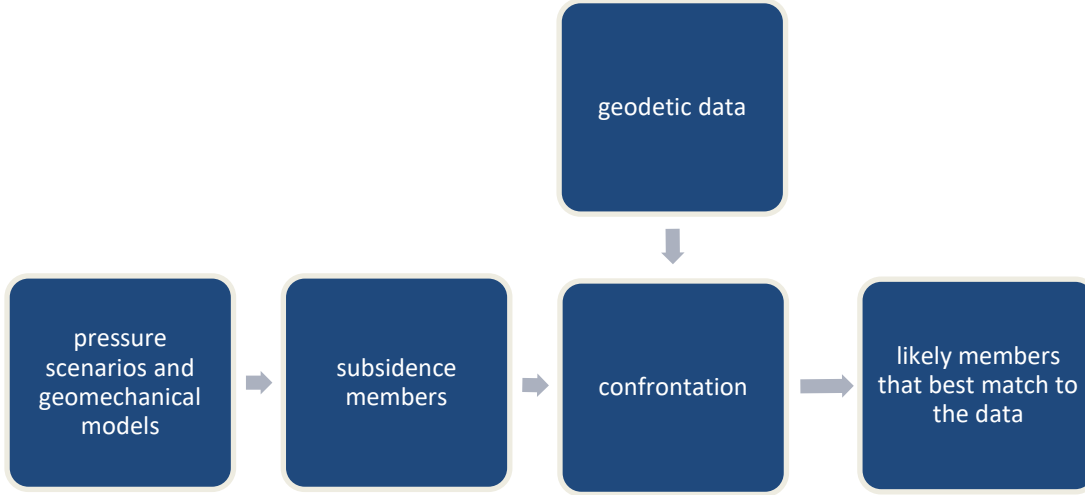
Om de meer dan een miljoen bodemdalingsscenario's te genereren worden er trekkingen verricht middels een Latin-hypercube (LH) methode. Het uitgangspunt van de LH-methode is om ervoor te zorgen dat de trekkingen op een uniforme manier worden gedaan. Daarbij wordt de uniforme verdeling in intervallen verdeeld. Gedurende de trekkingen wordt bijgehouden uit welke intervallen wordt getrokken waarbij wordt zorggedragen dat nagenoeg evenveel trekkingen in ieder interval worden gedaan. Wanneer deze methode wordt vergeleken met een random sampling van de gehele uniforme distributie, dan worden er kleine verschillen geconstateerd. De impact van de keuze van de LH-methode op het eindresultaat is daarom beperkt. Paragraaf 2.3.3 beschrijft hoe het ensemble van bodemdalingsscenario's wordt geprepareerd op basis van combinaties van drukrealisaties en trekkingen uit de geomechanische parameterdistributies.

F.3 Precisiebeschrijving bodemdalingsscenario's

In de LTS-studie worden de spatio-temporele deviaties (spatio-temporele component van de idealisatie precisie) als gevolg van ruimtelijk gecorreleerde ondiepe natuurlijke processen op dezelfde wijze gemodelleerd in de precisie beschrijving als geomechanische model-imperfecties. De gekozen covariantiefunctie bevat een afhankelijkheid van de afstand tussen meetpunten en het tijdsinterval van de dubbel-differenties. In de LTS-studie is bij de toepassing op Ameland al gebleken dat deze covariantiefunctie als een benadering moet worden gezien van de spatio-temporele deviaties.

In de voorliggende Meet- en Regel rapportage wordt de geomechanische modelonzekerheid gemodelleerd als een factor maal de waarde van de dubbel-differenties (de bodembeweging tussen twee tijdstippen en twee meetpunten). Omdat de factor een schalingsfactor is, resulteert dit voor de gebieden met meer gemodelleerde bodemdaling (bijvoorbeeld in het centrum van de bodemdalingsskom op Ameland) in een grotere onzekerheid dan in de gebieden met minder bodemdaling. De precisiebeschrijving van de bodemdalingsscenario's wordt gegeven op basis van de berekende variantie.

F.4 Confrontatie workflow tussen geodetische metingen en bodemdalingsscenario's



Figuur F-2: schematische weergave van de confrontatie workflow

De toetsgrootheid die de overeenkomst kwantificeert tussen geodetische metingen en geomechanische bodemdalingsscenario's, wordt als volgt geformuleerd (zie ook paragraaf 6.3.3 van Referentie 12):

$$\underline{T} = (\underline{dd}_{mm} - \underline{dd}_{dd})^T (C_e + C_t + C_m)^{-1} (\underline{dd}_{mm} - \underline{dd}_{dd}),$$

waarbij $\underline{dd}_{dd}$ en $\underline{dd}_{mm}$ dubbel-differenties zijn op basis van respectievelijk de geodetische metingen en de geomechanische scenario's. Deze worden gewogen met de sommatie van de covariantiematrices van respectievelijk de meetprecisie C_e , de puntstabiliteit C_t , en de geomechanische modelonzekerheid C_m . Indien het aantal dubbel-differentie dat gevormd kan worden uit de geodetische metingen gelijk is aan n , dan heeft de toetsgrootheid $\underline{T}$ een kansverdeling gelijk aan:

$$\underline{T} \sim \chi^2(n, 0)$$

Deze kansverdeling kan voor grote waarden van n benaderd worden door een normale verdeling met verwachtingswaarde n en variantie $2n$. De $\underline{T}/n$ toetsgrootheid heeft een verwachtingswaarde van 1. In de Meet- en regelcyclus rapportages wordt deze toetsgrootheid genoteerd als χ^2/n toetsgrootheid (niet te verwarren met de χ^2 kansverdeling). Vervolgens wordt de Bayesian probability theorie toegepast om de kans voor ieder bodemdalingsmodel uit het ensemble te bepalen, gegeven de geodetische metingen:

$$P(dd_r^{prior} | dd) = \frac{P(dd_r^{prior}) \cdot P(dd | dd_r^{prior})}{\sum_{i=1}^{Ne} P(dd_i^{prior}) \cdot P(dd | dd_i^{prior})}$$

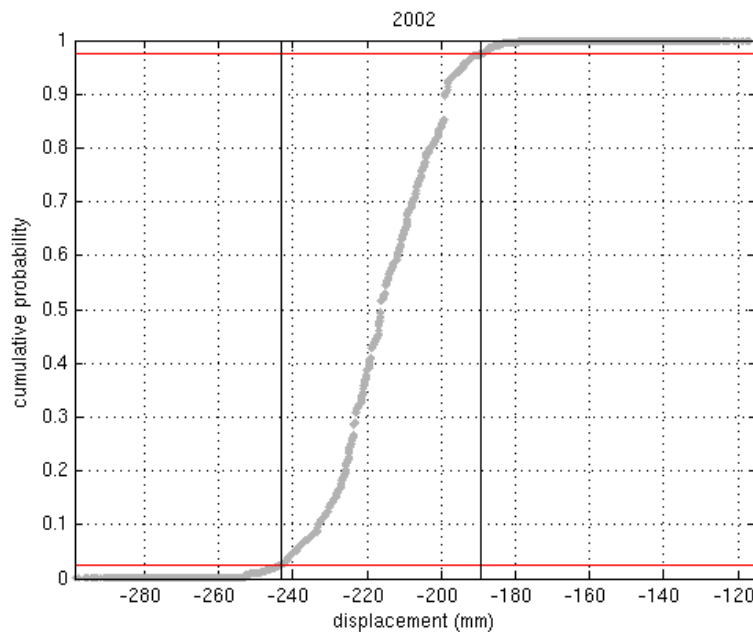
waarbij Ne het aantal bodemdalingsscenario's is (het ensemble), $P(dd_r^{prior})$ de kans op een bepaald bodemdalingsscenario uit het ensemble, en $P(dd | dd_r^{prior})$ de kans op de geodetische metingen gegeven een bepaald bodemdalingsmodel.

Deze methode wordt ook wel 'particle filter' of 'Red Flag' genoemd. Bij grote waarden van n vertoont deze methode 'collapse' gedrag: één bodemdalingsscenario krijgt een waarde voor de

kans van 1 en de overige scenario's een waarde van 0. Om het 'collapse' gedrag te voorkomen, wordt de kans dat de geodetische metingen bij een ensemble member van de bodemdalingsscenario's passen bepaald op basis van de kans dat de toetsgrootheid $\underline{T}$ een bepaalde waarde aanneemt.

1. Uitkomsten en betrouwbaarheidsintervallen

In de confrontatie workflow krijgt ieder bodemdalingsscenario een waarschijnlijkheid toegekend. Het totaal van de waarschijnlijkheden van alle bodemdalingsscenario's is 1. De a-posteriori kansverdeling van bodemdaling (en afgeleiden grootheden) kan worden bepaald op basis van deze waarschijnlijkheden. Figuur F-3 toont als voorbeeld de cumulatieve kansverdeling van dubbel-differenties tussen 1986 en 2002 voor de Ameland casestudie (Fig. 58 uit Referentie 12). Op basis hiervan worden de grenzen van de betrouwbaarheidsintervallen bepaald.



Figuur F-3: Cumulatieve kansverdeling van bodemdaling tussen twee tijdstippen en twee meetpunten (dus 1 dubbelreferentie), op basis van de waarschijnlijkheden die bodemdalingsscenario's hebben gekregen in de confrontatie workflow (Fig. 58 uit Referentie 12).

De a-posteriori statistische waarden worden per dubbeldifferentie bepaald en kennen niet een uniek overlappend bodemdalingsscenario.

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% overschrijdingskansen). Dit maakt de koppeling naar parameterwaarden inzichtelijker en het vergelijk met bijvoorbeeld een geodetische ruimte-tijd analyse eenvoudiger. Ook is deze stap noodzakelijk om de prognoses te maken.

Op een vergelijkbare manier (als in Figuur F-3) worden ook de a-posteriori verdelingen voor de geomechanische parameters gegenereerd. Hierbij wordt er gekeken hoe de a-posteriori verdelingen zich verhouden tot de a-priori verdelingen waarna eventueel a-priori verdelingen aangepast kunnen worden om ervoor te zorgen dat deze niet te nauw zijn gedefinieerd. Hierna wordt de gehele confrontatie workflow herhaald.

G. Praktische implementatie van de workflow

De statistische workflow zoals beschreven in appendix F wordt doorlopen door middel van een aantal Python programma's. De individuele programma's hebben elk een eigen input en output, waarbij de output weer als input dient in een volgend programma. Het stroomschema wordt op de volgende pagina getoond en is besproken met de commissie MER. De blokken in bruinrood geven de input en de verwerking van de geodetische informatie aan. In grijs wordt de informatiestroom aangegeven van de ondergrondse modellen. De groene blokken geven de onderdelen aan van de stochastische berekening en vergelijk met de data. Aan het einde bestaan er weer scripts die de resultaten, aangegeven met de lichtgele blokken, vertalen naar de verschillende figuren in het rapport.

