

Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen

Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2023

NAM B.V

EP Document Number:	EP202402225793	Owner:	NAM-IUC
Document Date:	1/5/2024	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 2023 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 de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag in de Waddenzee vergelijkbaar is met de belasting volgens de M&R-cyclus 2022 en wederom binnen de toegestane gebruiksruimte blijft. Daarom worden er geen maatregelen genomen om de productie bij te stellen.

Samenvatting metingen

- In 2023 zijn de reservoirdrukken bepaald in de voorkomens Nes en Lauwersoog-Centraal.
- Op basis van het meetplan Waddenzee zijn in 2023 GNSS-metingen (Global Navigation Satellite System, GPS) uitgevoerd op 10 clusters van peilmerken in de kombergingen Borndiep, Pinkegat en Zoutkamperlaag.
- De continue GNSS-metingen op de locaties boven de gasvelden Ameland, Anjum en Moddergat zijn in 2023 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.
- In de periode februari tot maart 2023 is op het eiland Ameland een nauwkeurigheidswaterpassing uitgevoerd.
- Op het vasteland zijn in 2023 vlakdekkende InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) metingen geanalyseerd en gerapporteerd.

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 2023 kunnen reproduceren, maar met name variëren in de mobiliteit en gassaturatie in de aquifers. Voor het veld Nes zijn dit jaar de modellen opnieuw gekalibreerd.
- Ten westen van het veld Nes bestaat een discrepantie tussen het geodetische model en het geomechanische model. Deze discrepantie is onderzocht en beschreven in bijlage G. Op basis van de analyse zijn drukrealisaties toegevoegd voor het breukblok ten westen van het veld Nes.

- 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 bodemdalingsmodellen zijn fysisch realistisch en vallen binnen het bereik van gemeten waarden in het veld en laboratorium.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Inhoudsopgave.....	4
1 Inleiding	6
2 Deelprocessen	8
2.1 Meten (stap 1)	8
2.1.1 Geodetische metingen	8
2.1.2 Reservoirdrukmetingen en historische productie	8
2.2 Analyseren meetgegevens (stap 2)	9
2.2.1 Analyseren van GNSS-metingen en referentie	9
2.2.2 Campagne GNSS-metingen op de Waddenzee	10
2.2.3 Continue GNSS-metingen.....	10
2.2.4 Waterpassen en InSAR.....	12
2.2.5 Ruimte-tijd analyse.....	12
2.3 Verifiëren prognose (stap 3).....	13
2.3.1 Overzicht ondergrondmodellering	13
2.3.2 Verifiëren reservoirmodellen (stap 3a)	14
2.3.3 Verifiëren bodemdalingsscenario's (stap 3b)	18
2.3.4 Vergelijking van gemodelleerde bodemdaling met resultaten van campagne GNSS ..	35
2.4 Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4)	38
2.4.1 Bepaling volume en gemiddelde daling	38
2.4.2 Bodemdalingsvolume voor bepaling belasting.....	39
2.4.3 Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting	41
2.5 Indien nodig aanpassen productie (stap 5).....	43
2.6 Actualiseren (stap 6)	43
2.7 Remwegscenario	44
3 Kwaliteitsborging	45
4 Conclusies.....	46
5 Referenties.....	47
A. Bijlage A: Gemodelleerde en gemeten bodemdaling tussen 1986 en januari 2023	50
B. Bijlage B: Verwachte bodemdaling in het jaar 2050	52
C. Bijlage C: Mogelijke gevolgen van aardbevingen op bodemdaling en milieu	53
D. Bijlage D: Tijdseries Waddenzee	57
E. Bijlage E: Vergelijking reservoirmodellen met drukmetingen.....	62
E.1 Moddergat	62
E.2 Nes	62
E.3 Lauwersoog Oost	66
E.4 Lauwersoog Centraal	66
E.5 Lauwersoog West	69
E.6 Vierhuizen Oost.....	69
F. Bijlage F: Autonome diepe-bodembeweging.	71
G. Bijlage G: Onderzoek naar de discrepantie tussen meting en model in het gebied bij Wierum ...	74
G.1 Introductie.....	74
G.2 Mogelijke verklaringen voor de discrepantie tussen de 2 modellen	75
Bodemdaling door ondiepe natuurlijke processen:	75

Beschikbare gegevens over grondwaterstand.....	76
Bodemsamenstelling.....	76
Metingen van ondiepe daling	78
G.3 Imperfecties in de diepe ondergrondmodellen.....	78
G.4 Onderzoek mogelijke connectie Nes-breukblok met het Nes dynamische model.....	80
bodemdalingsscenario's voor Nes	82
G.5 Imperfecties in de geodetische ruimte-tijd analyse	83
Overeenstemming met waterpassing en GNSS	83
Overeenstemming met InSAR	86
Bodemdaling veroorzaakt door bebouwing.....	87
Invloed op peilmerken	87
Invloed op Persistent Scatterers	88
G.6 Conclusies.....	88

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 het voorkomen Lauwersoog Centraal in juni 2012 in productie genomen ook vanaf de locatie 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). 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 2023 is tenslotte besloten (DGKE / 22263937) dat de verwachtingswaarde voor de zeespiegelstijging 2,4 mm/jaar is voor de periode 2021 tot 2026, en vanaf 2026 toeneemt tot 4,5 mm/jaar in het jaar 2050. Dit heeft geleid tot de wijziging Instemmingsbesluit voor het winningsplan MLV met het kenmerk DGKE / 22263921. Deze meest recente wijzigingen zijn gebruikt in 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 2023 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 2-15 en Figuur 2-16).
2. Tabellen met de jaarlijkse toename van het bodemdalingsvolume (inclusief onzekerheid) per voorkomen per kombergingsgebied voor de jaren 2005 t/m 2026 (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 2023 wordt op deze manier een B voor 1 januari 2023 berekend.
4. Grafieken met de bodemdalingsbelasting voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag vanaf start productie op de locatie Moddergat tot 2040 (Figuur 2-19 en Figuur 2-20).
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 2-9 tot en met Figuur 2-13).

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 10), is ook een studie gedaan naar de effecten van deze fysische processen op de gaswinning en gerelateerde bodemdaling in en boven het Ameland veld (deel twee van het onderzoek of LTS-II, Referentie 13). De modellen die deze fysische processen beschrijven zijn ook toegepast op de overige MLV-velden en Anjum.

2 Deelprocessen

Op basis van de tot en met het jaar 2023 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 2023.

2.1 Meten (stap 1)

2.1.1 Geodetische metingen

In februari-maart 2023 is op het eiland Ameland een nauwkeurigheidswaterpassing uitgevoerd. Deze is gerapporteerd als meetregister (Referentie 29). Volgens het meetplan Waddenzee zijn in 2023 tevens GNSS-metingen (Global Navigation Satellite System, GPS) uitgevoerd op 10 clusters van peilmerken in de kombergingen Borndiep, Pinkegat en Zoutkamperlaag. De GNSS-metingen zijn in Referentie 7 beschreven en ook gerapporteerd als meetregister (Referentie 19). De resultaten van de permanente GNSS-metingen zijn in 2023 driemaandelijks aan SodM gerapporteerd. Naast de stations AME1, Moddergat en Anjum, zijn hier in 2016 het AGRS (Actief GNSS Referentie Systeem) station Ameland (bij Nes, operationeel sinds 2014) en het station Ternaard aan toegevoegd. In anticipatie op veranderingen in de inrichting van NAM-locatie Ameland-Oost is in mei 2023 een tweede GNSS-station geplaatst aan het elektriciteitsgebouw op de NAM-locatie (AME4), welke nu operationeel is in parallel met het bestaande GNSS-station (AME1). Op het vasteland zijn in 2023 vlakdekkende InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) metingen geanalyseerd en gerapporteerd, waarbij van de Sentinel-1 satellieten gebruik is gemaakt (Referentie 30).

2.1.2 Reservoirdrukmetingen en historische productie

In 2023 is de reservoirdruk in het veld Nes bepaald met een SPG ('Static Pressure Gauge') meting in MGT-3. Voor Lauwersoog-Centraal is de reservoirdruk bepaald op basis van de druk gemeten boven in de put ('Closed-in Tubing Head Pressure'; CITHP). Deze druk is bepaald aan het einde van een productiestop van 15 dagen, waarbij de druk tijd heeft gehad om op te bouwen naar de reservoirdruk. De drukmetingen in 2023 staan samengevat in Tabel 2-1.

Het veld Vierhuizen-Oost heeft ook in 2023 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. Voor Lauwersoog-West, Moddergat en Nes staan SPG-drukmetingen gepland voor 2024 wanneer er een langere productie stop zal plaatsvinden voor onderhoud.

Tabel 2-2 toont de cumulatieve gasproductie per voorkomen tot en met 31 december 2023 en hoeveel gas is geproduceerd alleen in 2023.

Tabel 2-1: Reservoirdrukken in 2023 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
Nes	MGT-3	18-10-2023	97 @ 3700 m	SPG (1,25 dagen)
Lauwersoog-Centraal	LWO-2	28-01-2023	141 @ 4035 m	CITHP (15 dagen)

Tabel 2-2: Productie per voorkomen.

Voorkomen	Cumulatieve productie t/m 2023 (10^6 Nm^3)	Productie 2023 volgens vigerend WiPla* (10^6 Nm^3)	Actuele productie in 2023 (10^6 Nm^3)
Nes	12591	504	377
Moddergat	5228	108	158
Lauwersoog-C	146	3	4
Lauwersoog-West	1851	46	60
Lauwersoog-Oost	2415	55	0
Vierhuizen-Oost	1628	0	0
Totaal	23859	716	599

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

2.2 Analyseren meetgegevens (stap 2)

2.2.1 Analyseren van GNSS-metingen en referentie

De GNSS-metingen zijn volgens de in Referentie 7 beschreven GNSMART-methodiek geanalyseerd. Hierbij wordt een 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. GNSS-dubbel-differenties ten opzichte van een referentienetwerk zijn namelijk robuuster voor kleine veranderingen in individuele stations.

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

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

De aanleiding voor deze 'tweetraps' procedure is dat bij de vijf GNSS-stations (genoemd onder stap 1) kleine bewegingen zijn geconstateerd in het project dat alternatieve GNSS-processing methodologieën heeft geëvalueerd (Referentie 31). Dit project is uitgevoerd door

TU Delft in opdracht van NAM in het kader van het 'Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen' behorende bij het Winningsplan Groningen.

In de stabiliteitscontrole van 2023 (Referentie 8) is in bovenstaande procedure de wijziging aangebracht, dat in stap 1 de coördinaten van de stations Borkum, Ballum, Drachten, Schiermonnikoog en Terschelling worden aangepast indien deze meer dan 1,0 mm afwijken van de voorgaande coördinaten. Dit is gedaan omdat de grens van 0,5 mm nauwelijks ruisoverstijgend is. Op basis van de 1 mm grens zijn de coördinaten van de stations Borkum (0687), Terschelling, en Schiermonnikoog aangepast in 2023. Vervolgens is het gehele referentienetwerk opnieuw berekend. Alleen de hoogte van het station Nieuwleusen kwam net boven de grens van 2 mm uit in hoogte en is aangepast. Het effect van de aanpassingen van de coördinaten van de referentiestations in 2023 op de coördinaten van alle monitoring stations is minder dan 1 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 9). In de confrontatie workflow met bodemdalingsscenario's worden GNSS dubbel-differenties van de hoogtes in ruimte en tijd berekend, die zowel uit de orthometrische als uit de ellipsoïdische hoogtes kunnen worden bepaald, zolang deze door de tijd op een consistente wijze worden berekend.

Voor de in 2006 door NAM nieuwgeplaatste waddenpeilmerken moet rekening gehouden worden met de in 2008 geconstateerde relatieve instabiliteit van deze peilmerken (hypothese uit M&R 2008, initiële gemiddelde zetting van de NAM-peilmerken van gemiddeld 5 mm). Uit het in 2008 en 2009 uitgevoerde stabiliteitsonderzoek (zie Meet- en regelrapportages 2008 en 2009) is gebleken dat de relatieve stabiliteit van de peilmerken voor de periode 2008-09 gemiddeld 0,4 mm is (voor de periode 2006-2008: 5 mm). De in 2006 geplaatste peilmerken volgen vanaf 2008, evenals de later geplaatste peilmerken, de precisie-modellen zoals beschreven in het LTS-II rapport (Referentie 13).

2.2.3 Continue GNSS-metingen

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

Tabel 2-3 geeft de analyse weer van de continue GNSS-metingen op de locaties Ameland, Moddergat en Anjum, alsmede het AGRS-station Ameland (bij Nes) en Ternaard. Voor de bepaling van de snelheid en bijbehorende standaardafwijking wordt rekening gehouden met de correlatie van hoogteschattingen in de GNSS tijdserie. Het GNSS-signaal in tijd wordt in Figuur 2-9 tot en met Figuur 2-13 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 31/12/2023 [mm]	Verticale bewegingssnelheid in 2023 [mm/jaar]
Ameland	05-02-2007	-106	-6,6 [$1\sigma = 0,6$ mm/jaar]
Anjum	05-02-2007	-56	-2,3 [$1\sigma = 0,4$ mm/jaar]
Moddergat	05-02-2007	-59	-3,6 [$1\sigma = 0,3$ mm/jaar]
Ameland-Nes	17-06-2014	-8	-0,2 [$1\sigma = 0,6$ mm/jaar]
Ternaard	19-11-2016	-15	-2,4 [$1\sigma = 0,4$ mm/jaar]

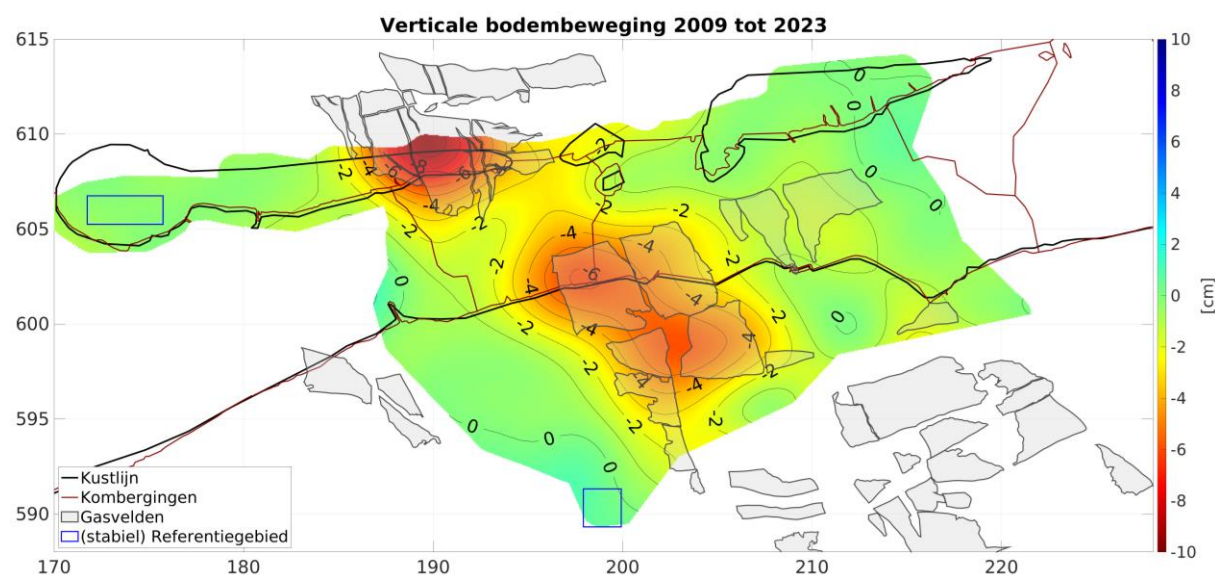
2.2.4 Waterpassen en InSAR

Op de eilanden Ameland en Schiermonnikoog wordt de bodembeweging gemeten middels waterpassingen. De meetresultaten zijn gerapporteerd in de differentiestaten van de laatste meetregisters (Referentie 29 en Referentie 35). 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 30) zijn de InSAR metingen gecombineerd met de waterpasmetingen die vóór 2021 zijn uitgevoerd.

2.2.5 Ruimte-tijd analyse

Om de residuele verschillen tussen geomechanische modellen en geodetische metingen beter te kunnen visualiseren, is een geodetisch model afgeleid op basis van waterpas-, GNSS en InSAR metingen. Dit model geeft de beste oplossing voor een glad oppervlak door de metingen op basis van een ruimte-tijd analyse (methode Houtenbos, Referentie 17). Als resultaat kan voor elk tijdsinterval een continu oppervlak worden gevisualiseerd, dat de gemeten bodemdaling in dat tijdvak weergeeft (Figuur 2-1).



Figuur 2-1: Verticale bodembeweging tussen 2009 en 2023 volgens het geodetische model. De relatieve bodembeweging is hier gevisualiseerd ten opzichte van twee stabiel veronderstelde referentiegebieden bij Driesum (ten oosten van Dokkum) en in het westen van Ameland.

In de ruimte-tijd analyse is naast de GNSS-metingen in de Waddenzee ook gebruik gemaakt van de metingen op permanente GNSS-stations, de waterpassingen op het vasteland, Ameland en Schiermonnikoog evenals de laatste InSAR-metingen op het 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.

2.3 Verifiëren prognose (stap 3)

2.3.1 Overzicht ondergrondmodellering

Het begrip van de ondergrond wordt gevormd met behulp van experts en data uit diverse disciplines. Er vindt regelmatig overleg plaats 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 12 en voor het Ameland veld in Referentie 13. 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 het aquifer en ook de hoeveelheid gas in het aquifer. Op basis van de gekalibreerde modelrealisaties kan vervolgens voorspeld worden hoeveel gas gewonnen kan worden en wat de verwachte drukdaling zal zijn in het gasvoorkomen en in de aquifers.

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

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 (inclusief breukblok ten westen van 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 (jaarlijks)	Porositeit, permeabiliteit, relatieve permeabiliteit, compressibiliteit, doorlatendheid van breuken
Hoeveelheden geproduceerd gas en water (jaarlijks)	Porositeit, permeabiliteit, relatieve permeabiliteit, compressibiliteit

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

- Reservoirvolume en -geometrie (incl. porositeit en saturatie)
- Breukdoorlatendheden
- Gas-water contact
- Hoeveelheid gas in aquifer(s)
- Permeabiliteit in verticale richting
- Permeabiliteit in horizontale richting
- Permeabiliteit in aquifer(s)
- Relatieve permeabiliteit van gas en water

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

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

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

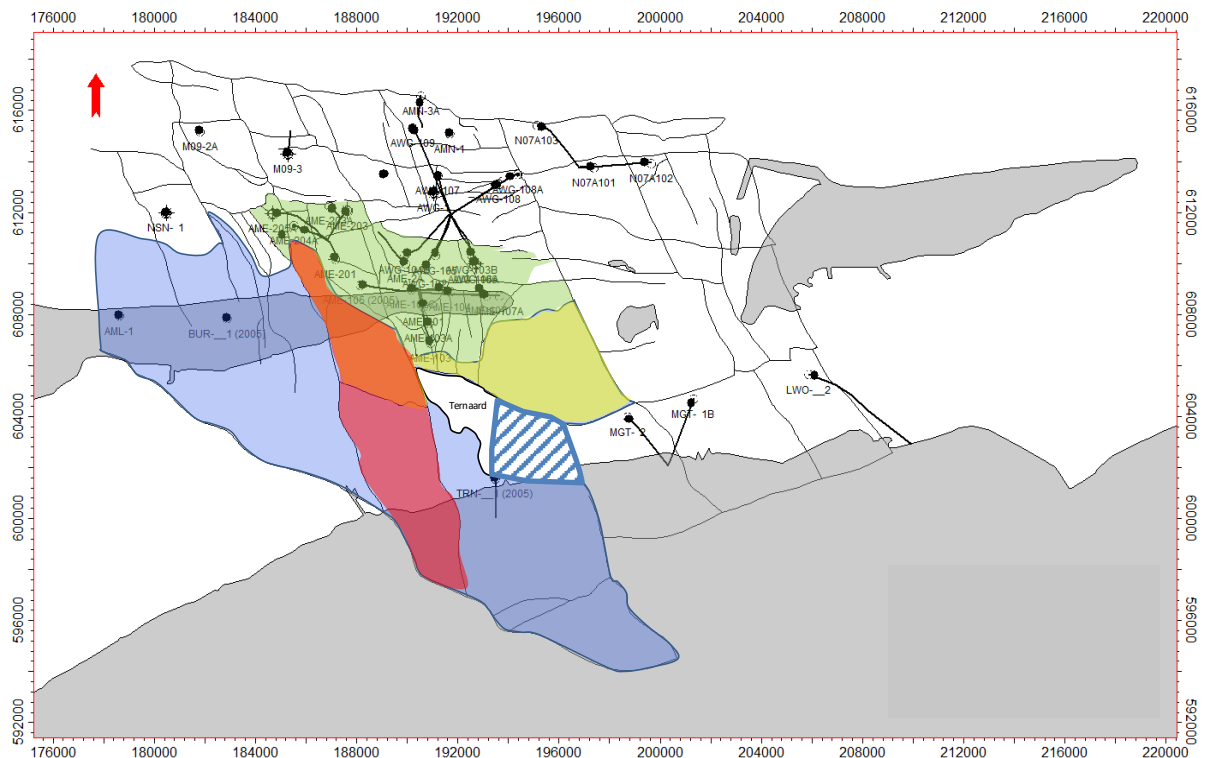
- De hoeveelheid gas in het aquifer, zogenaamd paleo-residueel gas. Deze parameter beïnvloedt hoe de druk in het aquifer reageert. Bij de aanwezigheid van meer paleo-residueel gas in de aquifer zal de druk minder dalen na gasproductie, omdat het gas in de aquifer uitzet bij drukdaling.
- De mate van communicatie tussen het gasvoorkomen en het aquifer. De permeabiliteit in de aquifer bepaalt hoe de druk kan dalen in de aquifer(s). Voor de Anjum en Wadden velden is de locatie van de aquifers eenduidiger door de seismische, geologisch en drukdata (zie hierboven en Referentie 18). Voor het Ameland veld is de permeabiliteit in de zuidwestelijke aquifer E21 en zuidoostelijke aquifer E11-15 en E14 (zie de rode en gele gebieden in Figuur 2-2) gevarieerd om de bodemdaling ten zuiden van Ameland te verklaren.

Referentie 28 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). Hierin is aangenomen dat de breuk in het noordwesten van Nes naar het westen toe in het gebied met zandsteen-zandsteen overlap doorlatend is of is geworden gedurende de productieperiode. In twee realisaties depleteert het westelijk gelegen breukblok in meer of mindere mate mee met het Nes veld. Het breukblok dat volgens het winningsplan voor het Ternaard veld wordt aangeboord staat hierbij niet in verbinding met het Nes veld.

Twee van de drie modelrealisaties voor het Nes veld zijn opnieuw gekalibreerd. De nieuwe modelrealisaties passen goed bij de historische drukken, maar geven een groter bereik in drukvoorspellingen, doordat onzekerheden in meer parameters meegenomen zijn. Dit wordt in meer detail beschreven in Bijlage E.2.



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, zoals uitgebreid beschreven in Referentie 12 en Referentie 13. 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 (zie ook Tabel 2-5):

- Een aquifer waarvan het water niet mobiel is, waardoor vooral de druk daalt in het gasreservoir en nauwelijks in de aquifer. Dit is de lage modelrealisatie¹.
- Een aquifer waarvan het water beperkt mobiel is en daardoor de druk in de aquifer minder snel daalt, ook door de aanwezigheid van paleo-residueel gas. De waarden van paleo-residueel gas zijn in overeenstemming met de waarden zoals gemeten in de putten. Dit resulteert in de basis modelrealisatie.
- Een aquifer die volledig mobiel is, waardoor zowel de druk daalt in het gasreservoir als in de aquifer, resulterend in meer bodemdaling. Dit is de hoge modelrealisatie.
- 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).

De parameterwaarden van deze realisaties vallen binnen de gemeten waarden en hun onzekerheidsbereik. De waarden van bijvoorbeeld de porositeit vallen binnen de grenzen van de gemeten porositeiten in de petrofysische logs en de gesteentekernen, en er zijn geen onfysische porositeiten (van bijv. meer dan 30%) gebruikt om de modellen te kalibreren. Ook

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

de combinaties van parameterwaarden zijn realistisch. De gemodelleerde correlatie tussen bijvoorbeeld de porositeit en de gassaturatie is in overeenstemming met fysische principes en de logmetingen in de putten. Daarmee zijn de parameterwaarden fysisch goed onderbouwd.

De drukmetingen in de putten (zie Tabel 2-1) zeggen iets over de drukken in het gasvoorkomen in voornamelijk de bovenste reservoirlagen. Deze drukken kunnen door de realisaties goed worden gereproduceerd, zie Bijlage E. De drukken in de watervoerende lagen verder weg van de putten (waar geen directe metingen zijn) laten tussen de realisaties grotere verschillen zien. Als de gemodelleerde aquiferdrukken nog lager zouden worden, dan zouden ofwel de drukken zoals gemeten in de put niet meer gereproduceerd kunnen worden, ofwel de parameterwaarden zouden niet meer fysisch te onderbouwen zijn.

Tabel 2-5: Overzicht van de opgestelde realisaties. Dit jaar is één realisatie voor Ameland minder meegenomen.

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	1
Lauwersoog-Oost (zie ook bijlage E)	Laag	0	0,0001
	Basis	23	0,1
	Hoog	0	1
Lauwersoog-West	Laag	0	0,0001
	Basis	21	0,3
	Hoog	0	1
Metslawier	Laag	0	0,0001
	Basis	8	0,1
	Hoog	0	1
Moddergat	Laag	0	0,0001
	Basis	20	0,3
	Hoog	10	1
Nes	Laag	Ongewijzigd, zie bijlage E	
	Basis	Opnieuw gekalibreerd, zie bijlage E	
	Hoog	Opnieuw gekalibreerd, zie bijlage E	
Vierhuizen-Oost	Laag/basis	16	0,3
	Hoog	0	1

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. De verwachting is dat het een aantal jaren zal duren voordat dit mogelijk is.

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).

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

Jaar	Moddergat	Nes	Lauwersoog-Oost	Lauwersoog-West	Lauwersoog-C	Vierhuizen-Oost
2024	137	301	0	54	3	0
2025	118	241	0	48	3	0
2026	102	186	110	41	2	0
2027	97	197	115	36	0	0
2028	91	163	100	33	0	0
2029	84	122	93	0	0	0
2030	75	111	84	0	0	0
2031	66	79	78	0	0	0
2032	60	70	73	0	0	0
2033	53	64	69	0	0	0
2034	42	59	65	0	0	0
2035	38	42	61	0	0	0
Totaal	963	1635	848	212	7	0

2.3.3 Verifiëren bodemdalingsscenario's (stap 3b)

De bodemdalingberekeningen in deze rapportage zijn op dezelfde wijze uitgevoerd als in de LTS-II studie (Referentie 13). Hierin is het RTCiM model uitgebreid met een extra deel dat het geomechanisch gedrag beschrijft op het moment dat het gasreservoir en/of watervoerende pakket zich in een staat van overdruk bevindt. 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 11).

De kruip van het zout boven het compacterende reservoir is gesimuleerd door de toepassing van een "bewegend" rigid basement proxy (Referentie 14). Kalibraties van deze proxy met een numeriek Geomec model zijn beschreven in dezelfde referentie. Door het rigid basement naar boven te bewegen zal de bodemdalingssom smaller worden met de tijd. Eenzelfde gedrag wordt ook gezien wanneer er kruipbeweging in het zout ontstaat door geïnduceerde schuifspanningen in het zout die het gevolg zijn van compactie van het reservoir.

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

2.3.3.1 Opstellen van bodemdalingsscenario's

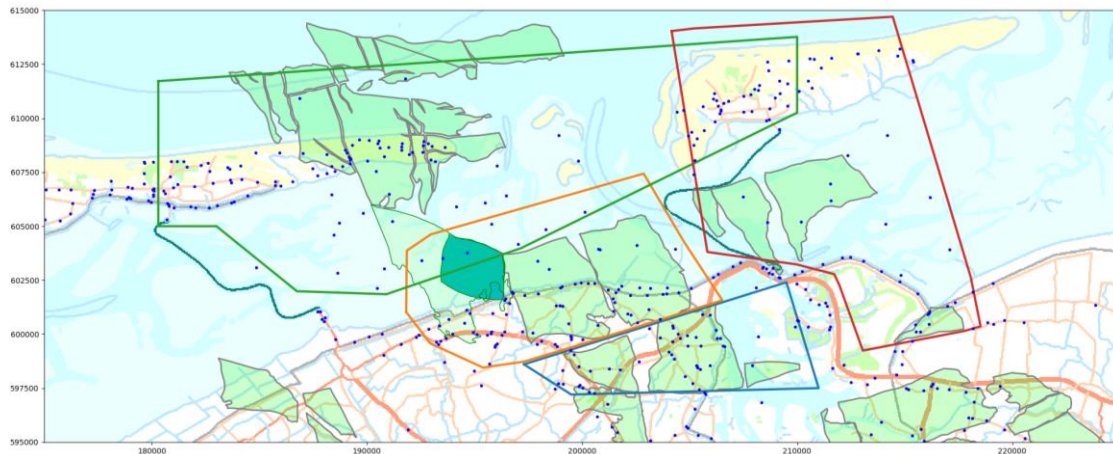
Bij het vinden en opstellen van bodemdalingsscenario's, met als doel de onzekerheid in de modellering te kwantificeren, is gebruik gemaakt van de LTS-II aanpak waarbij er per veld verschillende reservoirrealisaties zijn gemaakt. Voor elk van deze reservoirrealisaties zijn 26.000 bodemdalingsscenario's gemaakt op basis van de onzekerheid in de waarden voor de invoergegevens in de bodemdalingmodellen. Ook zijn de ranges voor een aantal parameters vergroot.

Voor het beoordelen van de passing tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling zijn, gelijk aan de vorige M&R, vier kalibratiegebieden gedefinieerd, namelijk Ameland,

Anjum, Nes/Moddergat en Lauwersoog/Vierhuizen (Figuur 2-3). De vier kalibratiegebieden liggen binnen het geomechanische model, zodat ook de overlappende bodemdalingssommen van de velden goed worden meegenomen. Voor dit rapportagejaar zijn de bodemdalingsmetingen op Schiermonnikoog ook meegenomen. Deze zijn toegevoegd aan het kalibratiegebied Lauwersoog/Vierhuizen (paarse gebied).

Voor de kalibratiegebieden Nes/Moddergat, Lauwersoog/Vierhuizen en Anjum zijn combinaties van realisaties gebruikt, zie Tabel 2-5. Voor het gasveld Ameland zijn dit jaar twee additionele realisaties toegevoegd. Deze scenario's geven meer drukdaling onder de Waddenzee in het zuidoostelijke en zuidwestelijke aquifer dan in de basisrealisatie, maar minder dan in de hoge realisatie. Deze realisaties zijn toegevoegd om de passing van de metingen in de Waddenzee te optimaliseren. Ten westen van het Nes gasveld zijn ook drukrealisaties gemaakt voor het aangrenzende breukblok. Voor een verdere beschrijving hiervan wordt verwezen naar Bijlage G.

Combinaties van reservoirrealisaties (zie Tabel 2-7) worden gelijktijdig voor alle kalibratiegebieden doorerekend en geconfronteerd met de geodetische dataset. Per kalibratiegebied worden vervolgens de χ^2 toetsgrootheden bepaald, die een maat zijn voor de overeenkomst tussen de bodemdalingsscenario's en de geodetische metingen.



Figuur 2-3: Vier kalibratiegebieden met gebruikte geodetische metingen. De meetpunten in het overlapgebied tussen de Waddenvelden en Ameland worden bij de confrontatie voor beide modellen gebruikt. Het donkergroen gekleurde gebied is het breukblok dat mogelijk in verbinding staat met Nes.

Ook binnen de kalibratiegebieden gelden dus combinaties van reservoirrealisaties, waar voor iedere combinatie in een kalibratiegebied 26.000 bodemdalingsscenario's zijn gemaakt. Als voorbeeld: het kalibratiegebied Lauwersoog/Vierhuizen bevat vier voorkomens. Hiervan zijn twintig combinaties gemaakt (zie ook Tabel 2-7). Dit betekent dat $20 \times 26.000 = 520.000$ bodemdalingsscenario's met de geodetische metingen binnen dit kalibratiegebied worden geconfronteerd.

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

Kalibratiegebied Nes/Moddergat		
Breukblok ten Westen van Nes	Nes	MGT
laag	laag	laag
laag	basis	laag
hoog	laag	laag
laag	hoog	laag
scen1	basis_aq	laag
scen2	basis	laag
scen2	basis_aq	laag
hoog	basis	laag
laag	basis	hoog
laag	hoog	basis
scen1	basis_aq	basis
scen2	basis_aq	basis
scen1	basis	hoog
scen1	basis_aq	hoog
scen2	hoog_aq	basis
scen1	hoog_aq	hoog
hoog	basis	basis
hoog	basis_aq	basis
hoog	hoog_aq	basis

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

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

Kalibratiegebied
Ameland
Ame
laag
basis
interM98
interM103
interim2
hoog

2.3.3.2 Geodetische componenten bij het verifiëren van de bodemdalingsscenario's

De geodetische metingen worden in de LTS-studie (Referentie 13) geconfronteerd met bodemdalingsmodellen op het niveau van dubbel-differenties ('double-differences'): dubbele verschilmetingen in ruimte en tijd. Deze paragraaf geeft uitleg over de toepassing van LTS-componenten op geodetisch gebied in de 2023 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 (volgens meetplan Waddenzee):

- Waterpassingen Ameland eiland: t/m 2023 (laatste waterpassing).
- Waterpassingen Schiermonnikoog: t/m 2021 (laatste waterpassing).
- Waterpassingen vasteland Noord-Nederland (Lauwersmeergebied): t/m 2018.
- GNSS-metingen: campagne (Waddenzee) en jaarlijkse sampling van de continue stations (Ameland, productieplatformen en op het vasteland) t/m 2023.
- InSAR: op het vasteland, jaarlijks gesampled op peilmerklocaties, t/m 2023.

Voor de waterpassingen (zowel voor Ameland, Schiermonnikoog als op het vasteland) en de GNSS-metingen is een volle covariantiematrix bepaald volgens de procedure uit de LTS-studie (Referentie 13). In de bepaling van deze covariantiematrix wordt rekening gehouden met de volgende componenten:

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

Variantie

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

Covariantie

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

Idealisatieprecisie

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

Model-imperfecties

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

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

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

Omdat voor de Ameland waterpassingen de toetsgrootheid (χ^2/n , met n het aantal dubbel-differenties) ruim boven de verwachtingswaarde van 1 lag, is in de Meet- en regelcyclus 2020 het stochastisch model bijgesteld. Omdat de meetprecisie en de temporele component van de idealisatieprecisie (puntstabiliteit) voor waterpassingen goed bekend zijn, is de spatio-temporele component aangepast. Deze component is een functie van de afstand tussen meetpunten en tijdstippen waarover gemeten worden, en is een stochastische benadering voor zowel model-imperfecties als mogelijk aanwezige ondiepe bodemdalingscomponenten die zowel in tijd als ruimte gecorreleerd zijn. De variantiefactor is van 0,465 (LTS-studie) naar 2 verhoogd voor Ameland waterpassingen in de Meet- en regelcyclus 2020. Een factor 2 komt overeen met een standaardafwijking van ca. 3 cm over een tijdsperiode van meer dan 30 jaar en een afstand tussen meetpunten van ca. 15 km. In deze Meet- en regelcyclus zijn deze parameters gehanteerd voor alle waterpasmetingen.

Er zijn in deze Meet- en regelcyclus nieuwe InSAR metingen beschikbaar gekomen. Omdat de waarde van de χ^2/n toetsgrootheid ruim beneden de 1 lag in de confrontatie met alleen InSAR metingen, is het stochastisch model bijgesteld 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 en een component idealisatieprecisie (puntstabiliteit).

Toepassing van bovengenoemde aanpassingen in de (co)variantiematrices in de confrontatie met bodemdalingsmodellen in de LTS-procedure levert waarden van de minimale χ^2/n toetsgrootheden op tussen 0,95 (kalibratiegebied Lauwersoog/Vierhuizen) en 1,34 (kalibratiegebied Ameland), 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

Per kalibratiegebied wordt voor elk scenario de passing van het scenario met de metingen uitgedrukt in een waarde voor de χ^2/n toetsgrootheid. De passing van het model met de data is beter naarmate de waarde voor χ^2/n toetsgrootheid dichter bij de verwachtingswaarde van 1 ligt, waarbij de waarschijnlijkheid van het betreffende scenario groter wordt. Op deze manier kan per kalibratiegebied een rangschikking worden gemaakt van de waarschijnlijkheid van de bodemdalingsscenario's. Per jaar en per parameter (zoals bv. bodemdaling op een punt, de C_m waarde en bodemdalingsvolume) kunnen hiermee de statistische waarden zoals het gewogen gemiddelde en het betrouwbaarheidsinterval worden afgeleid. De minimale χ^2/n toetsgrootheden na confrontatie met de bodemdalingsmodellen zijn weergegeven in Tabel 2-8 per kalibratiegebied.

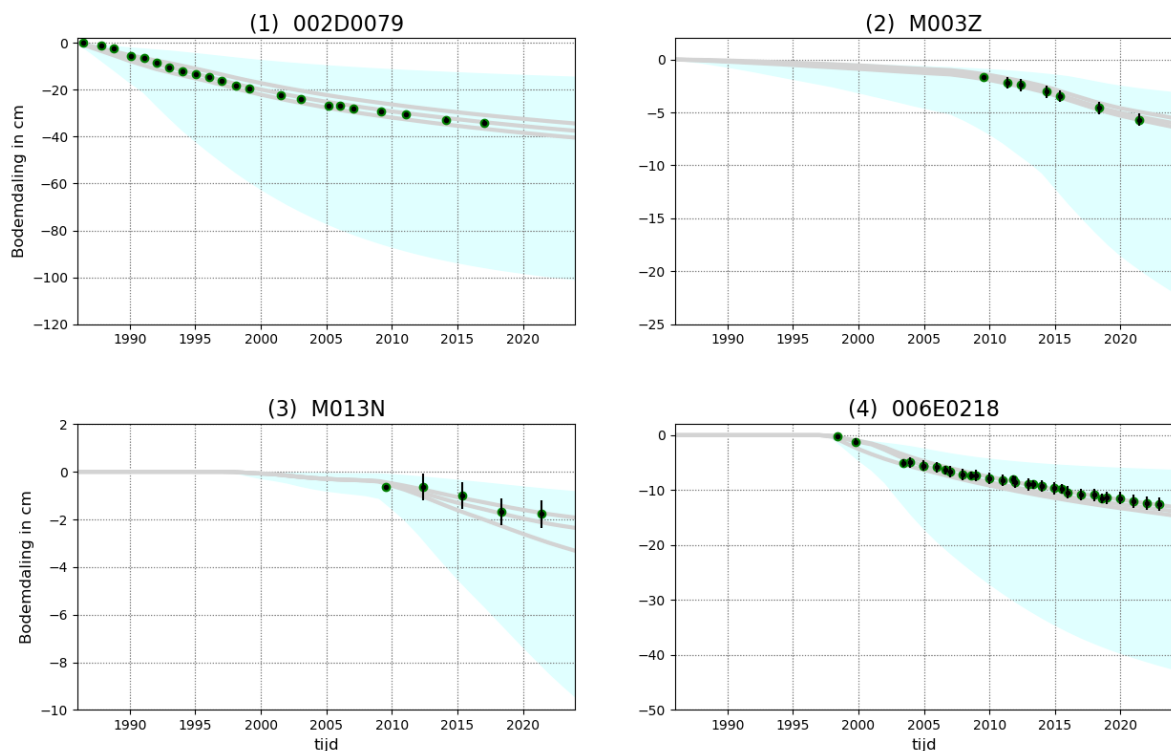
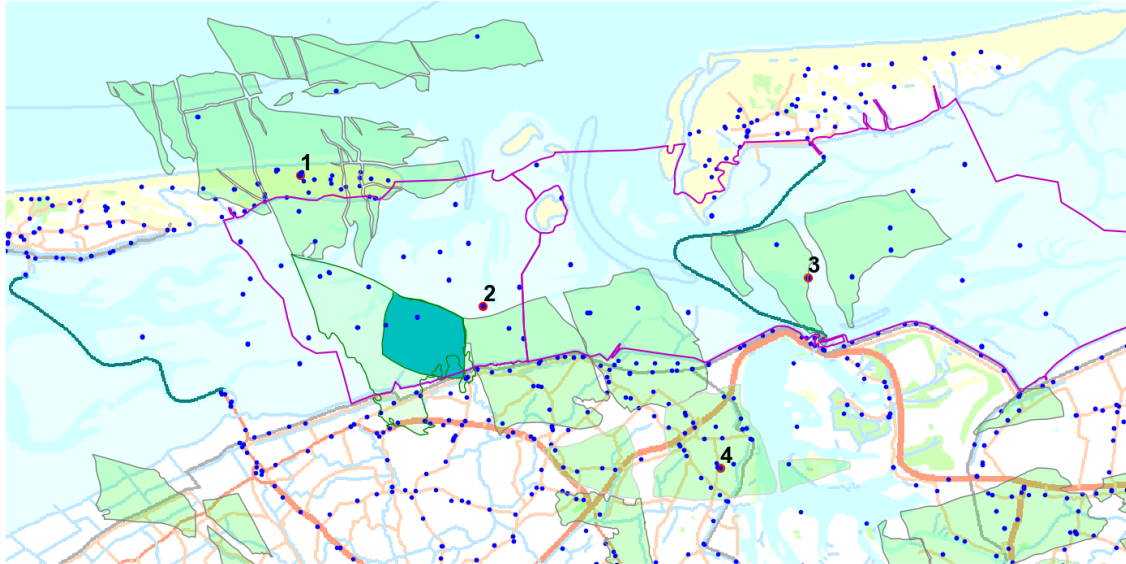
Tabel 2-8: Minimale χ^2/n toetsgrootheid voor de vier kalibratiegebieden.

Kalibratiegebied	Minimale χ^2/n toetsgrootheid confrontatie
Ameland	1,34
Nes/Moddergat	1,14
Lauwersoog/Vierhuizen	0,95
Anjum	1,22

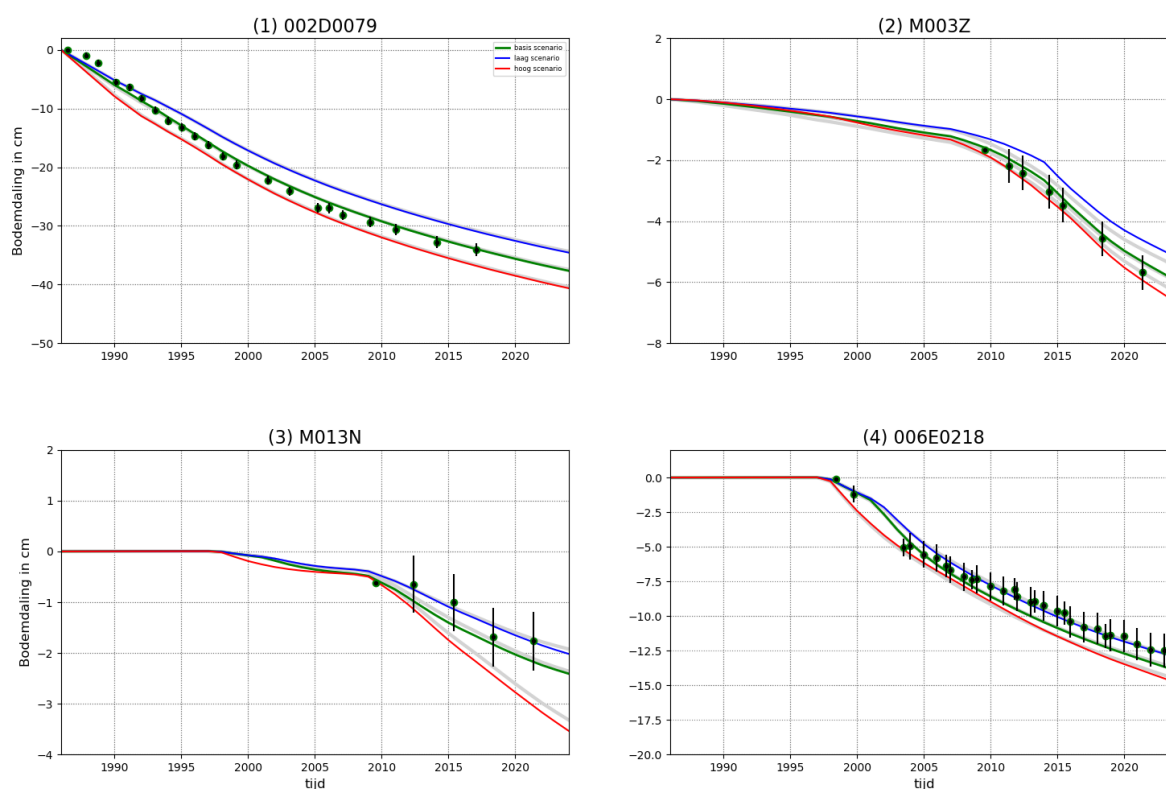
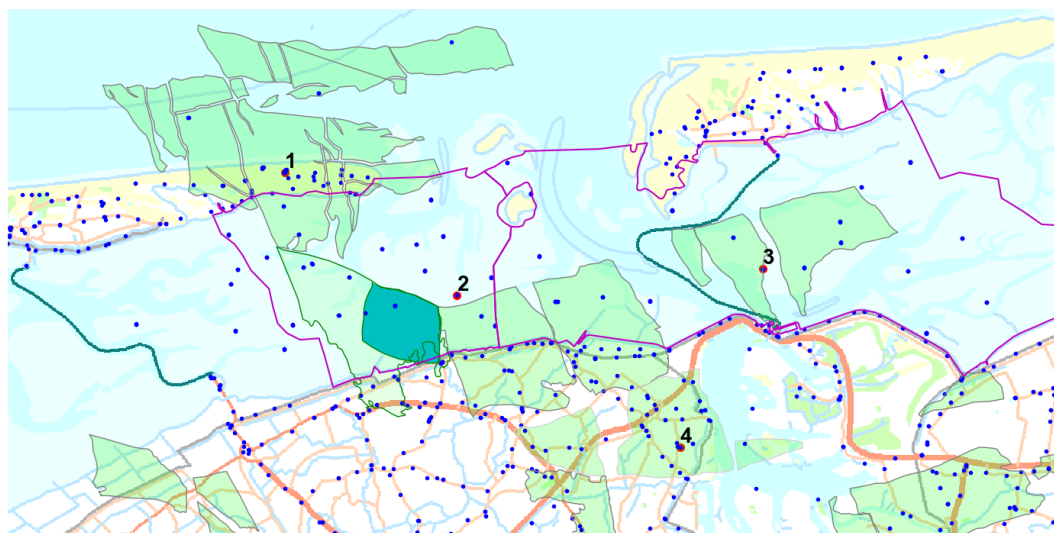
Figuur 2-4 toont met grijze lijnen de statistische bodemdalingslijnen voor de 2,5% overschrijdingskans, het gewogen gemiddelde en de 97,5% overschrijdingskans. Deze statistische waarden worden per dubbel-differentie en per jaar bepaald en zijn dus niet toe te kennen aan een uniek bodemdalingsscenario.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

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. Bij de selectie van de deterministische scenario's is gekeken naar de scenario's die én een hoge waarschijnlijkheid kennen én het beste passen bij de recente gemeten bodemdalingssnelheden. Een derde criterium is het minimaliseren van de variatie voor de parameterwaarden tussen de kalibratiegebieden. Het doel van deze criteria is de verwachting dat de geselecteerde scenario's tot betere

voorspellingen zullen leiden. De gekozen deterministische lijnen zijn met blauw, groen en rood aangegeven (Figuur 2-5) en komen goed overeen met de drie statistische waarden (let op de verschillende waarden op de y-assen). Zie Bijlage D voor additionele punten.



Figuur 2-4: Bodemdaling op 4 punten (let op verschillende schaal op de y-as), zoals aangegeven op de kaart. De grijze lijnen geven de statistische waarden voor de 2,5% overschrijdingskans, het gewogen gemiddelde en de 97,5% overschrijdingskans voor de bodemdaling weer. Het lichtblauwe gebied geeft de a priori gemodelleerde bodemdalingsruimte aan. De punten geven de waarden voor de waterpasmetingen aan inclusief de onzekerheid (2-sigma).



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

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

De geomechanische parameters per kalibratiegebied voor het lage, basis en hoge bodemdalingsscenario (Tabel 2-9) volgen uit de deterministische scenario's (Figuur 2-5). Deze parameterwaarden zijn vergelijkbaar met die van vorig jaar. In Bijlage D zijn de resultaten van de scenario's getoond als tijdseries voor meerdere punten in de Waddenzee. In de LTS-II methodiek wordt in alle berekeningen aangenomen dat de compactie lineair verloopt op het moment dat de gasdruk hoger is 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 de gedepleteerde druk (rond de 380 bar). Wanneer de druk onder de hydrostatische druk komt, verloopt de compactie volgens het RTCiM compactiemodel en zal de C_{md} langzaam (bepaald door de waarde van de b-factor) overgaan naar de C_{mref} . De waarde van de C_{mref} is hoger dan die van de C_{md} waardoor de compactie zal versnellen.

De C_{mref} , C_{md} en b in Tabel 2-9 zijn RTCiM parameters die het compactiegedrag van het reservoir beschrijven. De $C/k(0)$, $d(c/k)$ en T_{salt} parameters zijn bepalend voor het zoutgedrag boven het compacterende reservoir of aquifer. Voor alle velden is de relatie tussen kernplug C_m metingen met de porositeit³ gebruikt om een spatiële C_m kaart te maken die als a priori informatie gebruikt wordt in de berekeningen. De C_{mref} en C_{md} zijn vermenigvuldigingsfactoren op deze kaarten. De waarden voor de C_{mref} voor Ameland liggen aan de bovenkant van de gemeten C_m waarden. De waarden voor Anjum en de Waddenzee velden liggen dicht bij de gemiddelde C_m –porositeitsrelatie. Dit verschil in waarden voor de passende C_m tussen Ameland en de overige gasvelden bestaat al sinds de start van de M&R-rapportages. Een duidelijke verklaring voor de verschillen is nog niet gevonden. Het is mogelijk dat naast de C_m van het gesteente bijvoorbeeld drukdaling in andere lagen een rol kan spelen.

Voor de beschrijving van het zoutgedrag liggen de waarden voor $C/k(0)$, $d(c/k)$ en T_{salt} dicht bij elkaar en komen goed overeen met de parameterwaarden die in vorige M&R-cycli in Geomec zijn gebruikt. Voor een verdere beschrijving van de RTCiM- en zoutparameters wordt verwezen naar Referentie 13.

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

parameter	Ameland	Anjum	Nes Moddergat	Lauwersoog Vierhuizen
C_{mref} (factor) [-]	3,31 - 3,29 - 3,75	1,62 - 1,57 - 1,59	1,8 - 1,46 - 1,57	1,07 - 1,25 - 1,83
C_{md} (factor) [-]	0,5 - 0,6 - 0,69	0,26 - 0,27 - 0,47	0,24 - 0,27 - 0,36	0,2 - 0,29 - 0,33
b [-]	0,037 - 0,033 - 0,039	0,023 - 0,018 - 0,035	0,017 - 0,017 - 0,022	0,019 - 0,015 - 0,02
Zoutgedrag				
$C/k(0)$ [-]	0,77 - 0,75 - 0,84	0,68 - 0,67 - 0,67	0,69 - 0,75 - 0,74	0,8 - 0,78 - 0,78
$d(c/k)$ [-]	0,35 - 0,36 - 0,35	0,26 - 0,33 - 0,34	0,24 - 0,24 - 0,19	0,27 - 0,21 - 0,24
T_{salt} [jaar]	24,5 - 28,8 - 42,3	12,5 - 20,4 - 17,5	29,9 - 22,9 - 10,3	13,9 - 20,4 - 16,6

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

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 [-].

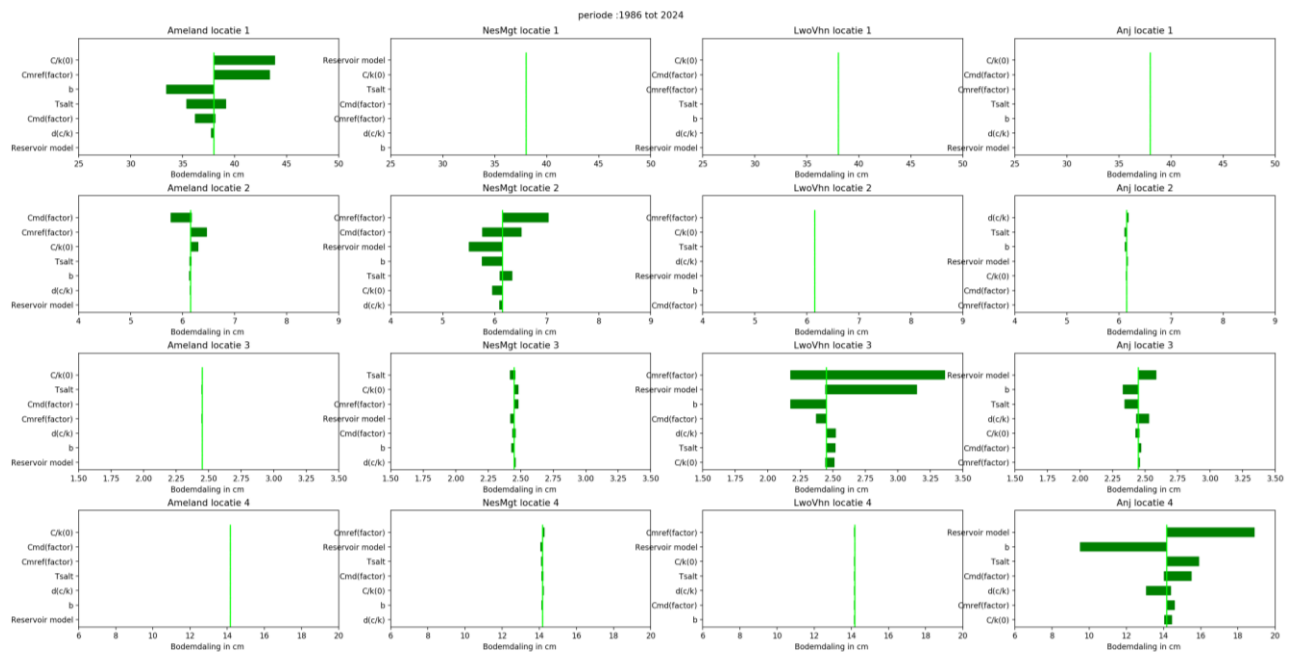
Tabel 2-10: Reservoirrealisaties voor respectievelijk het laag, basis en hoog bodemdalingsscenario.

Veldnaam	Reservoirrealisatie voor laag, basis en hoog bodemdalingsscenario
Ameland	interM98 - interM98 - interM98
Nes	basis - basis_aq - basis_aq
Moddergat	hoog - basis - basis
Breukblok ten westen van Nes	laag – real. 1 – real. 1
Lauwersoog Centraal	basis - hoog - laag
Lauwersoog West	basis - basis - hoog
Lauwersoog Oost	basis - basis - laag
Vierhuizen	hoog - hoog - hoog
Anjum	basis - basis - hoog
Metslawier	laag - laag - laag
Ezumazijl	hoog - basis - basis

Uit bovenstaande tabel blijkt dat voor Moddergat de hoge reservoirrealisatie gebruikt is voor het lage bodemdalingsscenario en de basis reservoirrealisatie voor het basis en hoge bodemdalingsscenario. De Moddergat reservoirrealisaties kennen geen laterale aquifer en daarom genereren deze realisaties allemaal dezelfde komvorm. Het is daarom mogelijk dat de reservoirrealisatie ('hoog') met de meeste drukdaling in combinatie met bv. een lagere compressibiliteit toch een betere beschrijving geeft van het lage bodemdalingsscenario.

Het breukblok ten westen van Nes depleteert zowel in het basis en hoog scenario volgens het depletie realisatie 1, dit betekent dat de reservoirdruk van dit aquifer aan het einde van productieperiode ongeveer 300 bar is (zie ook bijlage G). In de lage realisatie wordt er geen drukdaling in dit breukblok aangenomen.

Om de gevoeligheid van de geomechanische parameterwaarden op de gemeten data inzichtelijk te maken is een Tornado chart gemaakt (Figuur 2-6). Met behulp van dit figuur kan de parameter gevonden worden die de sterkste invloed op de bodemdaling heeft voor het betreffende punt (zie Figuur 2-4 voor de locatie van de punten). De gevoeligheid voor de parameters kan verschillen per locatie. Hoe breder de balk in dit figuur, hoe groter de invloed is van de betreffende parameter op de bodemdaling op een bepaald punt. In de Tornado chart zijn de parameters gebruikt zoals getabuleerd in Tabel 2-9. De invloed van de uiterste waarden volgens het lage en hoge scenario is getest per parameter terwijl de overige waarden constant zijn volgens het basis scenario. Per locatie is een Tornado chart gemaakt waarbij de invloed is getoond op het betreffende punt per kalibratiegebied. Bijvoorbeeld: de bodemdaling op locatie 1 op Ameland wordt alleen beïnvloed door de parameters in het Ameland kalibratiegebied (bovenste rij in Figuur 2-6). De Anjum en Nes-Moddergat en Lauwersoog-Vierhuizen kalibratiegebieden hebben voor dit punt geen effect op de bodemdaling. Op locatie 1 heeft de $C/k(o)$ 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 interM98 reservoirrealisatie is gevonden na confrontatie met de metingen. Op de Waddenzee (Nes-Moddergat en Lauwersoog-Vierhuizen kalibratiegebieden, locaties 2 en 3 in Figuur 2-5) wordt de bodemdaling, naast de beïnvloeding door de Waddenzeevelden, mede beïnvloed door de Ameland en Anjum kalibratiegebieden. In locatie 4 wordt de bodemdaling bijna alleen door het Anjum kalibratiegebied veroorzaakt.

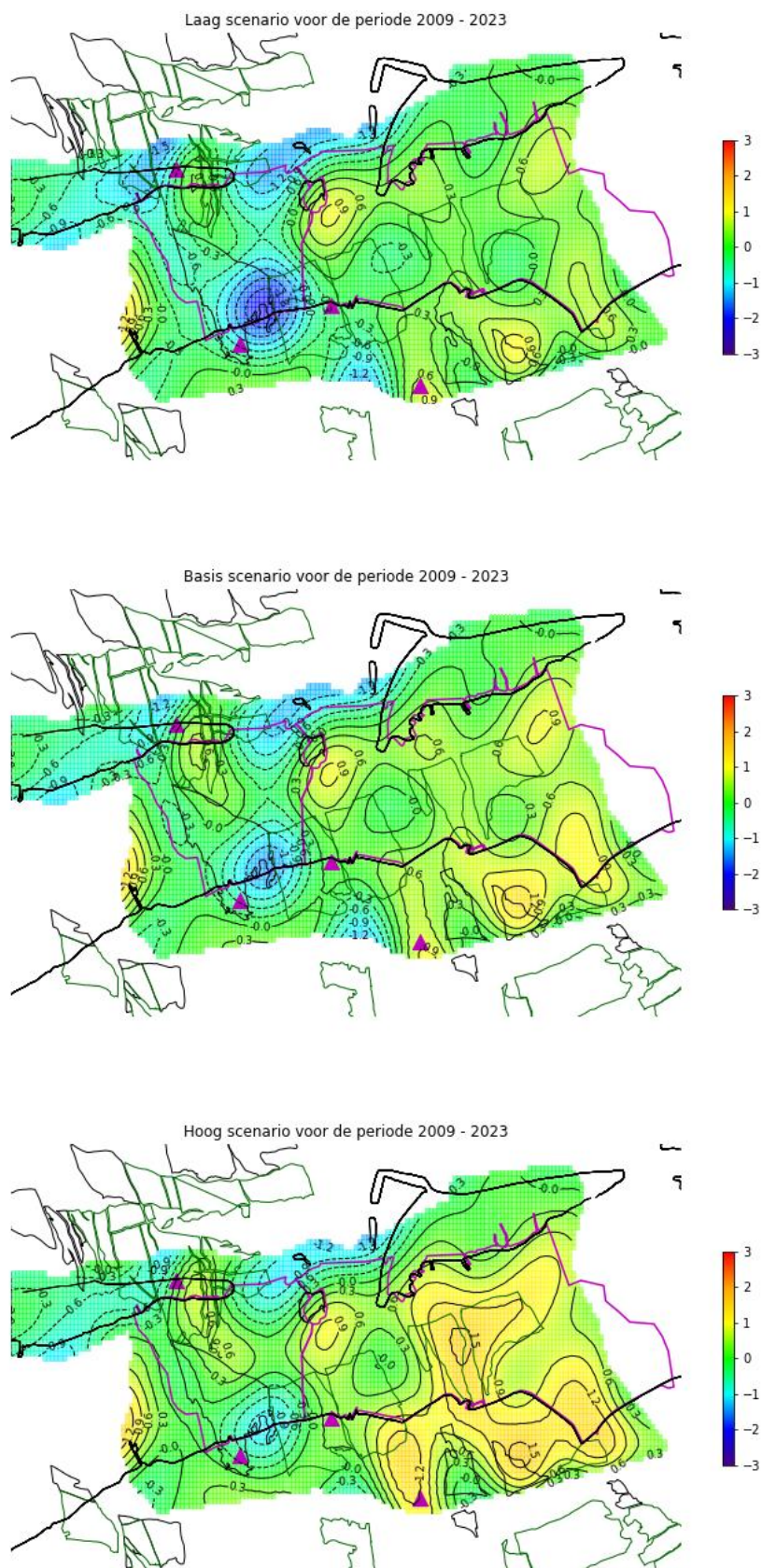


Figuur 2-6: Tornado charts die de invloed van de parameterwaarden toont op de bodemdaling in 4 locaties (zie Figuur 2-5 voor de locatie van de punten). Voor elke locatie is separaat een Tornado-chart gemaakt voor elk van de vier kalibratiegebieden. De naamgeving boven de charts laten het effect zien van het betreffende kalibratiegebied op het punt. De bodemdaling is berekend van start winning tot 2024. De lichtgroene lijn laat de bodemdaling volgens het basisscenario zien.

2.3.3.5 Vergelijking van de bodemdalingsscenario's met het geodetisch model

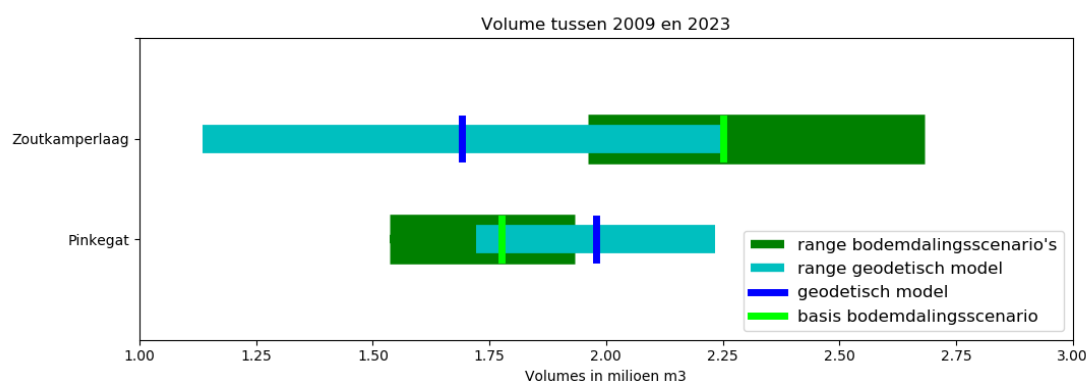
Het vergelijkt met de metingen is in deze rapportage ook gevisualiseerd met behulp van een ruimte-tijd geodetisch model (paragraaf 2.2) berekend uit waterpas-, GNSS, en InSAR metingen, waarbij de verschillen tussen het geomechanische model en het geodetisch model gevisualiseerd worden als een gekleurd oppervlak. Dit is voor de verschillende bodemdalingsscenario's weergegeven in Figuur 2-7.

Uit de vergelijking blijkt dat het basis scenario goed past met het geodetische model voor de periode 2009-2023. Voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag geeft het bodemdalingssmodel meer daling dan het geodetisch model (sub-cm over een periode van 14 jaar). De variatie in verschillen is in het Pinkegat kombergingsgebied iets groter, maximaal 1,5 cm in 14 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 deze rapportage is een nieuwe bijlage toegevoegd (bijlage G) waarin beschreven staat wat de mogelijke oorzaken kunnen zijn van de discrepantie tussen het geomechanische model en het geodetische model, die geconstateerd is net ten westen van het Nes veld. Dit heeft ertoe geleid dat er nieuwe drukrealisaties zijn toegevoegd in deze M&R rapportage voor het breukblok ten westen van het Nes gasveld.



Figuur 2-7: Verschil (in cm) tussen de gemodelleerde bodemdaling volgens het laag (bovenste figuur), basis (middelste figuur), hoog scenario (onderste figuur) en het geodetische model voor de periode 2009-2023. 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 mid 2009 en mid 2023 voor de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. Voor deze bodemdalingsvolumes is tevens een onzekerheidsmarge 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 2-8). De gemodelleerde bodemdalingsvolumes voor Zoutkamperlaag en Pinkegat komen binnen de onzekerheidsmarges overeen met de bodemdalingsvolumes op basis van het geodetisch model.



Figuur 2-8: Vergelijking van de bandbreedte (2 standaarddeviatie) aan bodemdalingsvolumes volgens de geomechanische modellen (groene balk) met het volume volgens het geodetisch model voor de periode 2009-2023 (blauwe streep in met een bandbreedte van 2 standaarddeviatie).

Bodemdalingsmodellen voor Ameland (inclusief LTS-II)

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

1. De C_m waarde is in het begin van de productie (tot 2003) onderschat. Deze onderschatting was met name ingegeven door de kernmetingen die gemiddeld lagere C_m waarden aangaven dan, wat later bleek, nodig in latere kalibraties.
2. De gedachten over de mobiliteit van de aquifers varieerden in de tijd. Gedurende de eerste jaren van productie werd rekening gehouden met een volledig mobiel aquifer terwijl de gemeten smalle bodemdalingsskom juist erop wees dat de mobiliteit van de aquifer en daarmee gepaarde drukdaling waarschijnlijk gering was. De metingen na 2011 laten echter bodemdaling ten zuidwesten en zuidoosten van het gasveld zien, waarvoor de meest waarschijnlijke verklaring beperkte drukdaling in de aquifer onder deze meetpunten is.

De LTS-II studie laat zien dat het best passende geomechanische model gebaseerd is op een reservoirrealisatie waarbij weinig tot geen aquiferdepletie plaatsvindt. De reden waarom de LTS-methode naar deze oplossing convergeert, wordt voornamelijk veroorzaakt door de geodetische metingen boven de oostkant van Ameland eiland. Sinds de start van de winning wordt de gemeten bodemdaling in dit gebied overschat door de geomechanische modellen. Zelfs in het geval dat er geen drukdaling kan plaatsvinden in de aquifers, wordt de bodemdaling nog steeds overschat. Het toelaten van drukdaling in de aquifers ten zuidoosten van het gasveld zou ervoor zorgen dat de bodemdalingsskom wijder wordt en daarmee de gemeten bodemdaling in de oostkant van het eiland nog meer wordt overschat. Omdat de LTS-II confrontatie streeft naar een zo klein mogelijk totaalverschil tussen alle metingen en model zal de methode juist die reservoirscenario's

selecteren die deze overschatting beperkt houden en dit zijn de realisaties zonder drukdaling in de aquifers van Ameland.

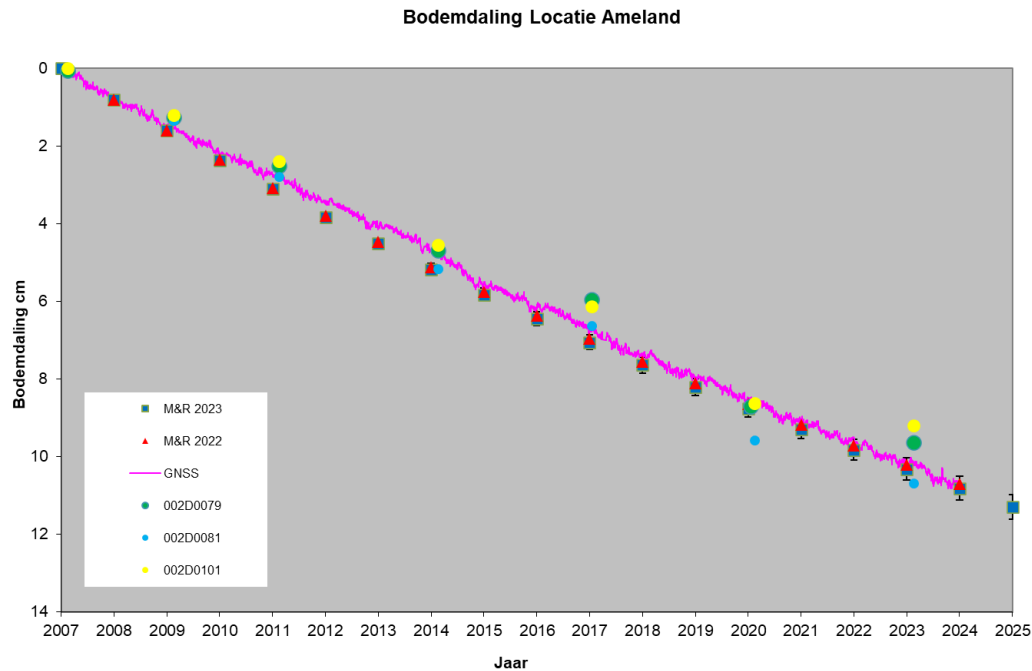
In de M&R-cyclus over de rapportagejaren sinds 2018 is meer gewicht toegekend aan de GNSS-metingen in de Waddenzee. Dit is gedaan door alleen de meetprecisie van de metingen mee te nemen. Voor de meetpunten op het eiland, de waterpaspunten, wordt ook de idealisatie precisie meegenomen. Door deze aanpassingen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

2.3.3.6 Bodemdaling GNSS-locaties

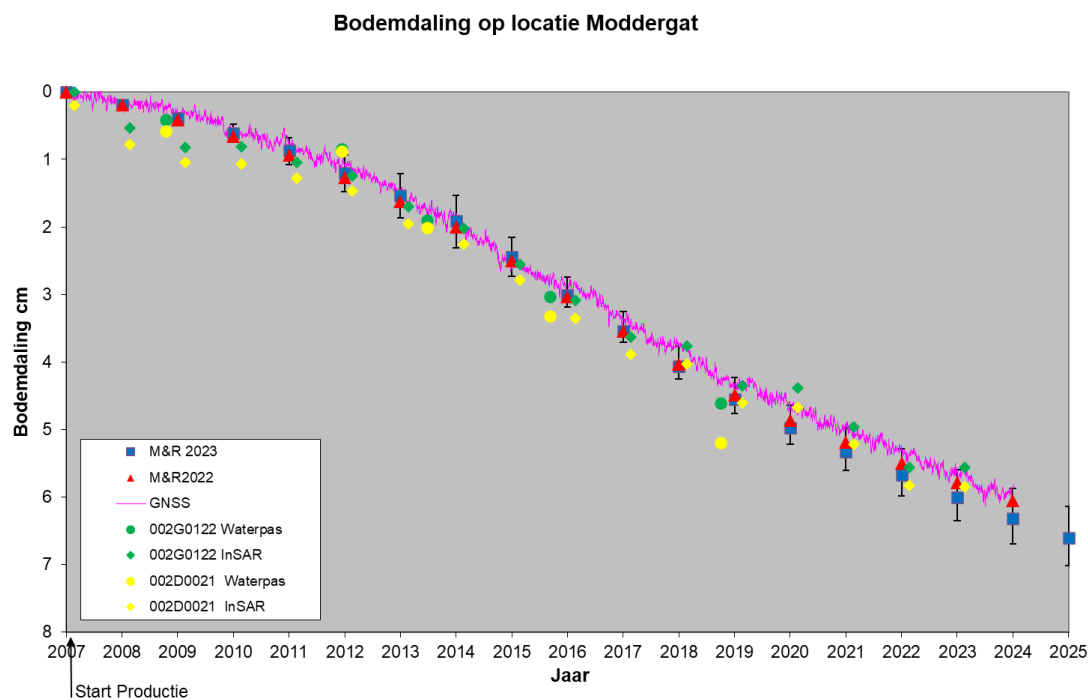
Figuur 2-9 tot en met Figuur 2-13 tonen de gemodelleerde en gemeten daling van 2007 tot en met 2022 op de continue GNSS-locaties. Deze hebben een signaalfunctie om veranderingen in het verloop van de bodembeweging tijdig te kunnen signaleren binnen het meet/rapportage interval van de vlakdekkende metingen (huidig interval van 3 jaar).

Figuur 2-9 toont naast de gemeten daling volgens de GNSS-tijdserie ook de tijdserie van enkele waterpaspeilmerken. Hierbij moet opgemerkt worden dat peilmerk 002D0079 in 2019 is afgebroken. In 2019 is in verband met een validatiemeting een nieuw peilmerk 002D0137 geplaatst op 30 m afstand van 002D0079. Dit peilmerk is ingemeten ten opzichte van 002D0079, voordat 002D0079 onbruikbaar werd. In de waterpassingen vanaf 2020 is 002D0137 weer aangemeten, waarna de daling sinds 2019 is overgebracht op het peilmerk 002D0079 om een continue serie te vormen. In Figuur 2-9 geeft de meting van 002D0079 dus ook de overgebrachte meting van 002D0137 aan. De gemeten bodemdaling wordt ook getoond op twee andere peilmerken in de buurt, namelijk 002D0081 en 002D0101.

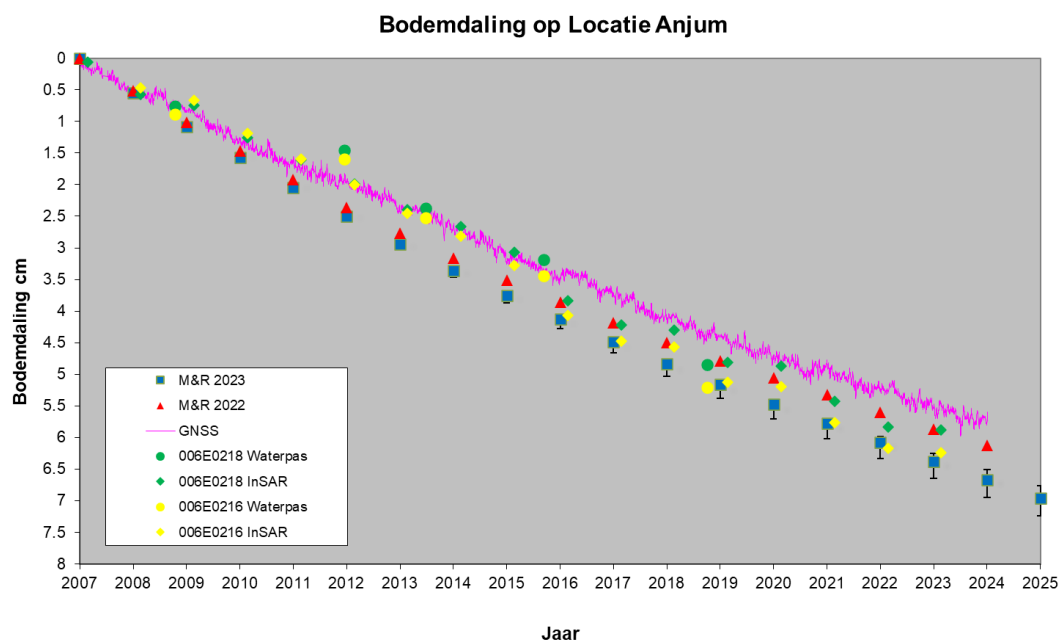
In Figuur 2-10, Figuur 2-11 en Figuur 2-12 is waar te nemen dat de meetfrequentie op de locaties van de waterpaspunten hoger ligt. Dit is het resultaat van de jaarlijkse overbrenging tot en met 2023 van naburige InSAR data op de betreffende punten met een zoekstraal van 500m.



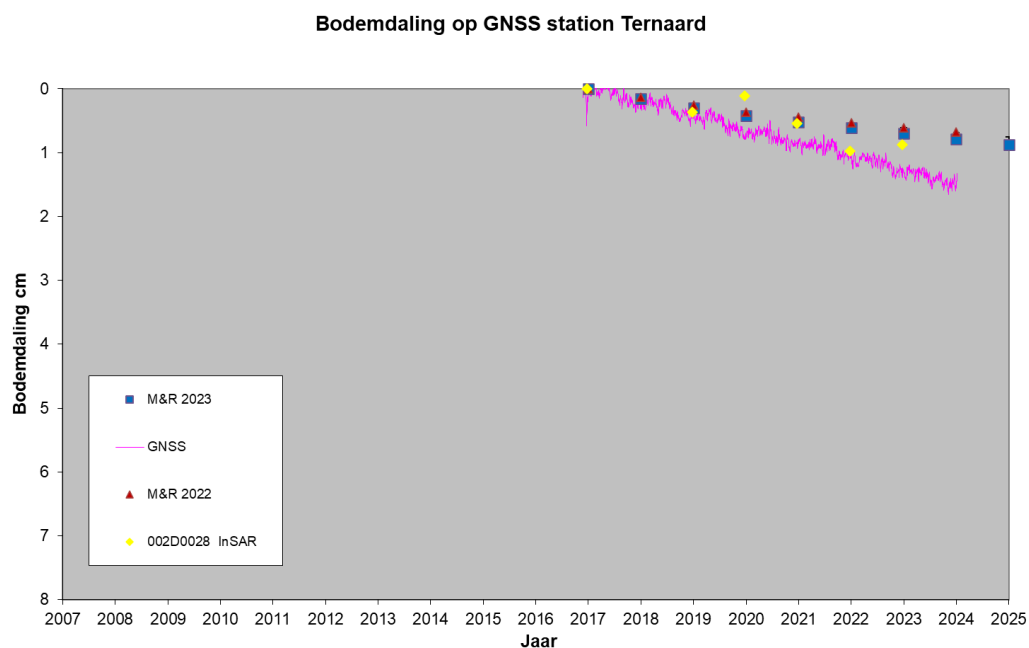
Figuur 2-9: Voorspelde en gemeten (GNSS) bodemdaling locatie Ameland (coördinaten: X-RD:190474.978, Y-RD: 608822.469). De voorspelde bodemdaling plus onzekerheid wordt weergegeven door de blauwe vierkanten met foutenbalken. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2022 is aangegeven in rood. In groen, blauw en geel is de gemeten bodemdaling op de peilmerken 002D0079, 002D0081 en 002D0101 middels waterpassing aangegeven.



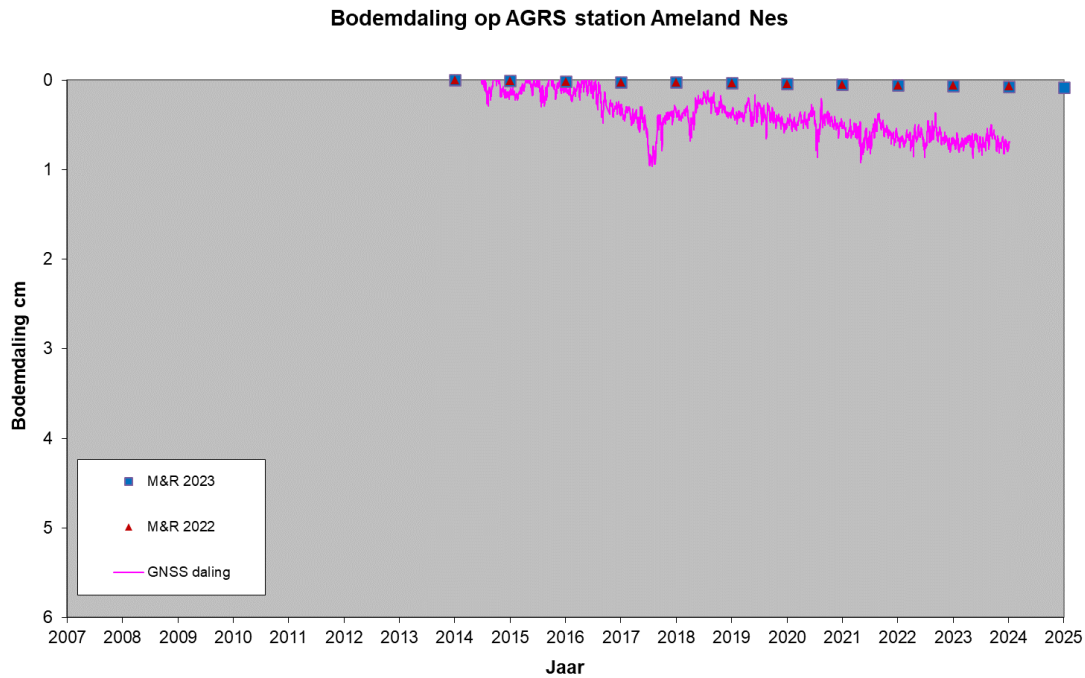
Figuur 2-10: Voorspelde en gemeten (GNSS) bodemdaling op de GNSS-locatie Moddergat (coördinaten: X-RD: 200244.559, Y-RD: 602329.794). De voorspelde bodemdaling plus onzekerheid wordt weergegeven door de blauwe vierkanten met foutenbalken. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2022 is aangegeven in rood. In groen en geel is de gemeten bodemdaling op peilmerk 002G0122 en 002G0121 (dicht bij het GNSS-punt) middels waterpassing en InSAR aangegeven.



Figuur 2-11: Voorspelde en gemeten bodemdaling (GNSS) op de GNSS-locatie Anjum (coördinaten: X-RD: 205931,145, Y-RD: 598546,039). 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 2022 is aangegeven in rood. In groen en geel is de gemeten bodemdaling op peilmerk 006E0216 en 006E0218 (dicht bij het GNSS-punt) middels waterpassing en InSAR aangegeven.



Figuur 2-12: Voorspelde en gemeten bodemdaling (GNSS) op de GNSS-locatie Ternaard (coördinaten: X-RD: 194529,39, Y-RD: 600517,15). 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 2022 is aangegeven in rood. Alle scenario's geven nauwelijks bodemdaling op dit punt waardoor de onzekerheidsbandbreedte zeer gering is. Hierdoor vallen de resultaten van de scenario's op elkaar. In geel is de gemeten bodemdaling op peilmerk 002D0028 (dicht bij het GNSS-punt) middels InSAR aangegeven.



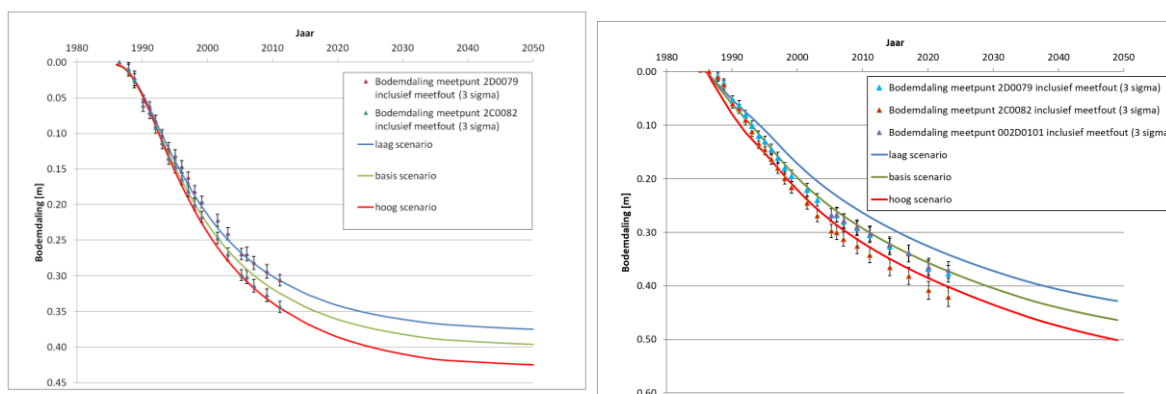
Figuur 2-13: Voorspelde en gemeten bodemdaling op het AGRS-station Ameland Nes (coördinaten: X-RD: 180095,18, Y-RD: 606757,04). De voorspelde bodemdaling plus onzekerheid wordt weergegeven door de blauwe vierkanten met foutenbalken. De voorspelde bodemdaling op basis van de Meet- en regelcyclus rapportage over 2022 is aangegeven in rood. Alle scenario's voor Ameland geven nauwelijks bodemdaling op dit punt waardoor de onzekerheidsbandbreedte zeer gering is. Hierdoor vallen de resultaten van de scenario's op elkaar.

2.3.3.7 Ameland bodemdaling

In het winningsplan Ameland (Referentie 26) wordt de onzekerheid beschreven van de toekomstige bodemdaling volgens de modellen uit 2011. Hierbij werd de volgende kanttekening gemaakt in het winningsplan:

“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 2023 model, zie Figuur 2-14. De onzekerheidsbandbreedte van de voorspelling in 2011 en nu is vergelijkbaar. Het huidige model verwacht echter in 2050 ongeveer 5 cm meer bodemdaling in het diepste punt van de kom, waarbij de bodemdaling na 2050 nog doorgaat. De belangrijkste veranderingen die het verschil verklaren zijn het RTCiM compactiemodel dat nu in de M&R cyclus wordt gebruikt t.o.v. het time-decay model dat in 2011 voor het winningsplan werd gebruikt en de veranderde inzichten in het aquifergedrag.



Figuur 2-14: Links; bodemdaling en metingen volgens het winningsplan Ameland uit 2011 (Referentie 26). Rechts; Maximale bodemdaling volgens het laag, basis en hoog scenario uit deze M&R rapportage in vergelijking met de meetpunten 002D0101, 2D0079 en 2C0082.

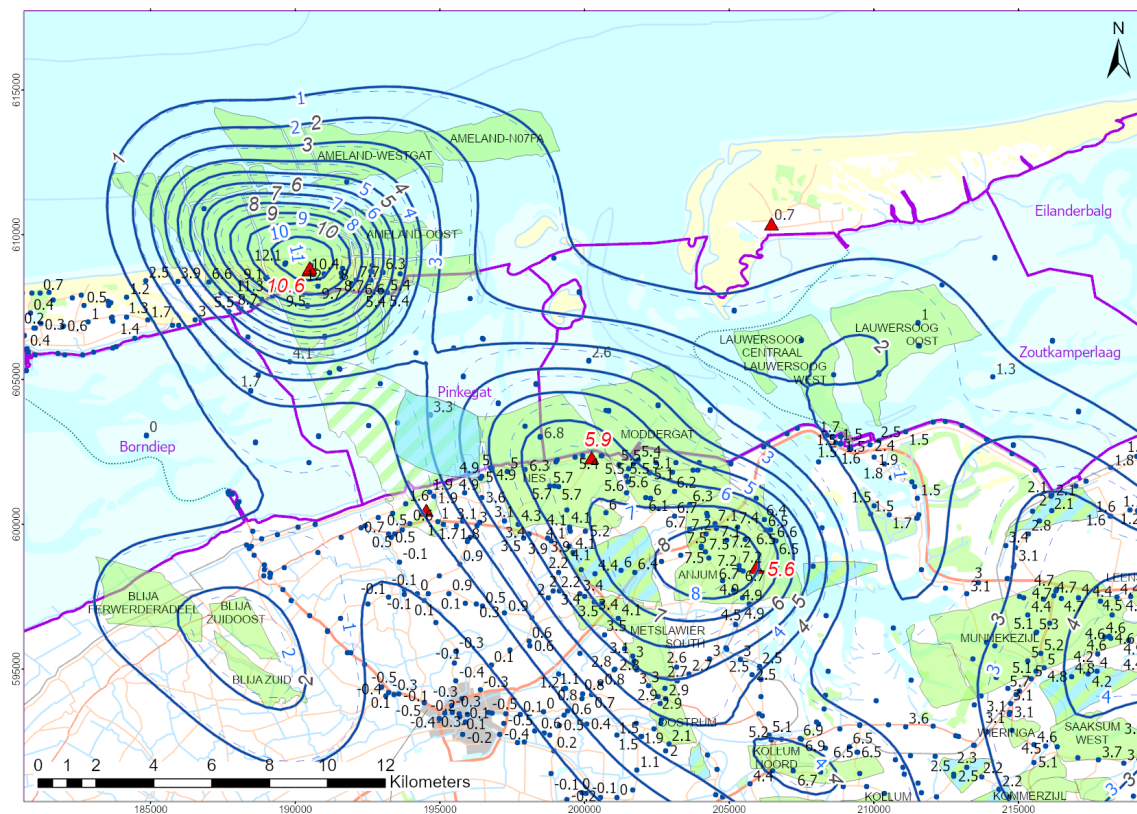
2.3.3.8 Autonome diepe-bodembeweging

Naar aanleiding van het advies van de Auditcommissie over de Meet- en regelcyclus van 2020 (Referentie 32) is in de voorgaande Meet- en regelcyclus 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.

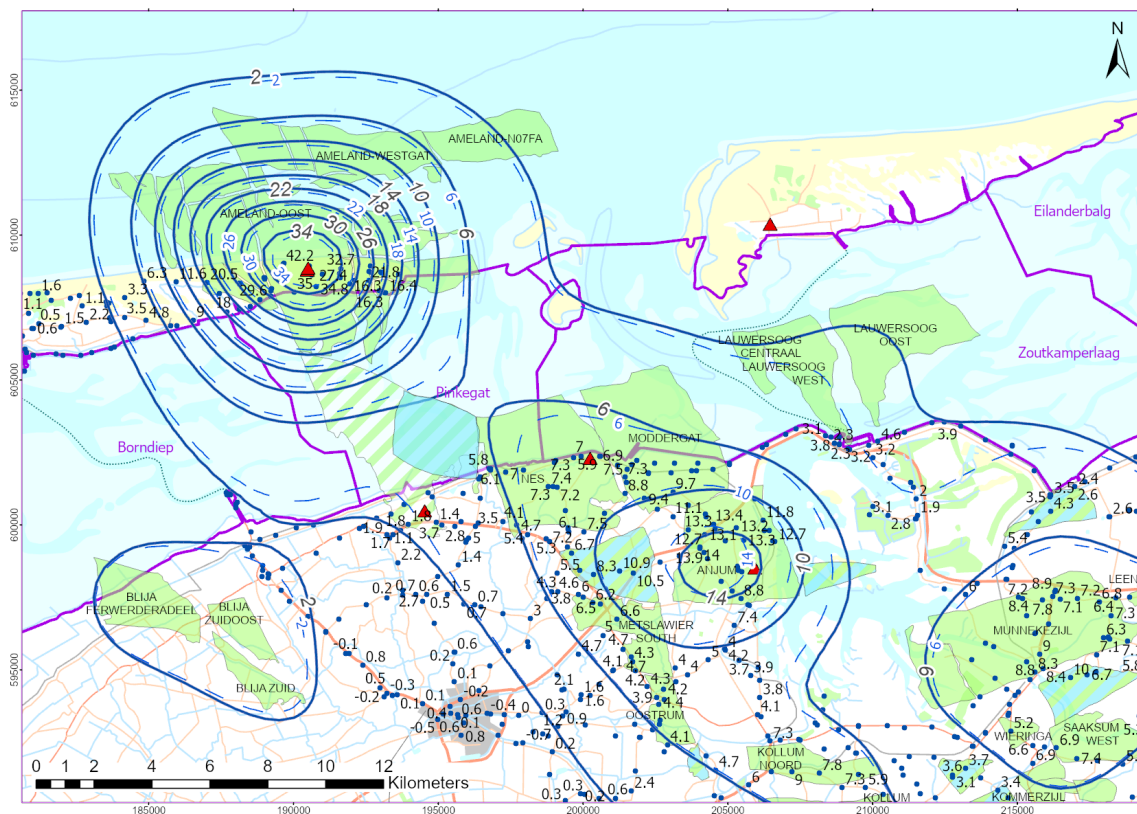
2.3.4 **Vergelijking van gemodelleerde bodemdaling met resultaten van campagne GNSS**

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 2-15. De modelcontouren (doorgetrokken blauwe lijnen) worden per jaar berekend op de eerste dag van elk jaar. De contouren zijn gepresenteerd voor 1-1-2024. Ter vergelijking zijn de contouren (onderbroken lijn) weergegeven die het berekende resultaat weergegeven per 1-1-2023 zoals gerapporteerd in de vorige rapportage M&R 2022 (Referentie 6).

Figuur 2-16 toont de gemodelleerde daling vanaf de start van winning tot en met 1 januari 2024.



Figuur 2-15: Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2024) 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 2022 (1-1-2023) weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2022. 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 2023. De blauwe punten met label op het vaste land representeren de peilmerken met gemeten hoogteverschillen tussen 2006 en 2023. De blauwe punten met label op Ameland representeren de peilmerken met gemeten daling tussen 2006 en 2023. De rode waarden geven de daling aan van de permanente GNSS-stations in de periode feb. 2007- dec. 2023.



Figuur 2-16: Totale bodemdaling in cm (status modelcontour in blauw: 1-1-2024) sinds de start van de gaswinning in het gebied (1986). De gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2023 volgens de M&R-rapportage over 2022. De blauwe punten met label op het vaste land representeren de peilmerken met gemeten hoogteverschillen tussen 1997 en 2023. De blauwe punten met label op Ameland representeren de peilmerken met gemeten daling tussen 1986 en 2023. 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 2022 en M&R 2023 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 bodemdalingsberekeningen.

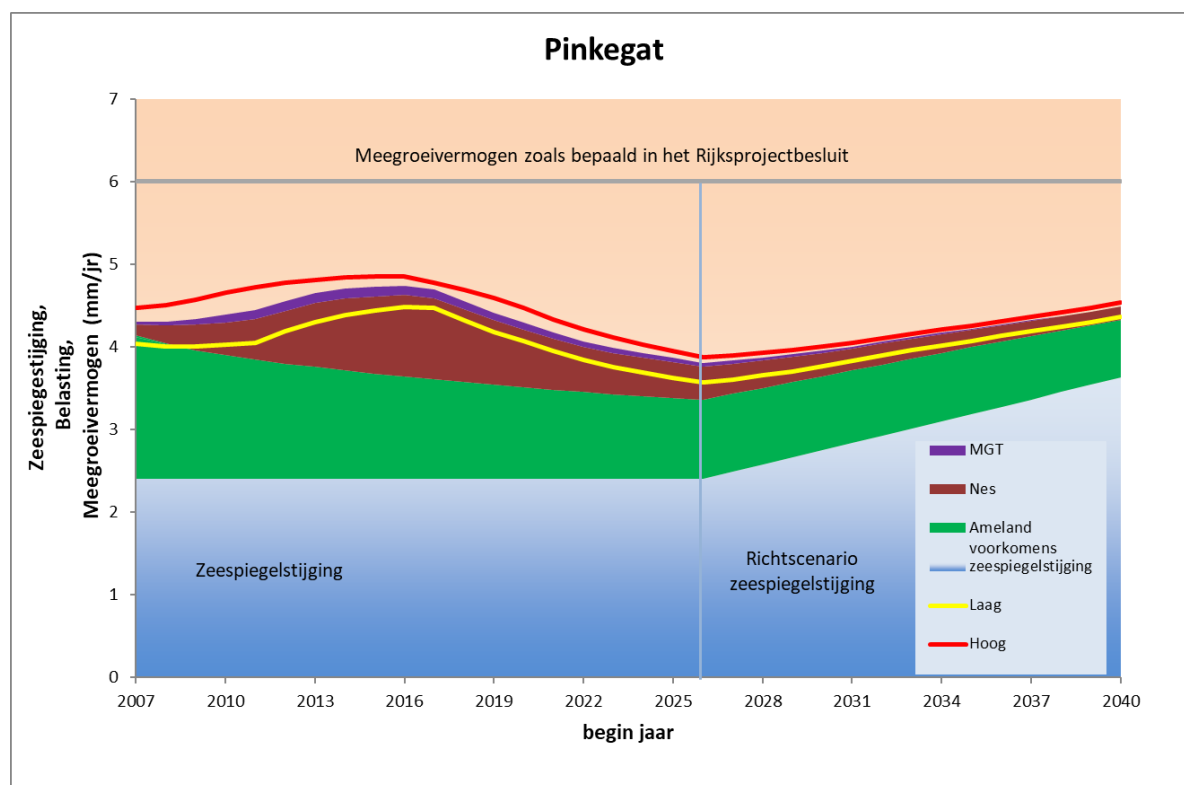
- Het bodemdalingmodel is voor beide M&R-rapportages gelijk aan het LTS-II bodemdalingmodel.
- Om een betere passing van het geomechanische model ten westen van Nes te krijgen zijn verschillende drukrealisaties gemaakt voor het breukblok ten westen van Nes. Hieruit volgt dat het waarschijnlijk is dat er drukdaling plaatsvindt in dit breukblok.
- De variatie in reservoirrealisaties die onderliggend zijn aan de hoge, basis en lage bodemdalingsscenario's is iets kleiner vergeleken met die van vorige rapportage. Dit wordt veroorzaakt doordat het a priori zoekgebied voor de geomechanische parameters is aangepast op basis van de resultaten van vorig jaar. De parameterranges voor sommige parameters zijn verkleind.
- De resultaten van de modellering in de M&R 2023 cyclus zijn zeer vergelijkbaar met de resultaten van de M&R 2022 rapportage.

2.4 Berekenen volume en gemiddelde daling (stap 4)

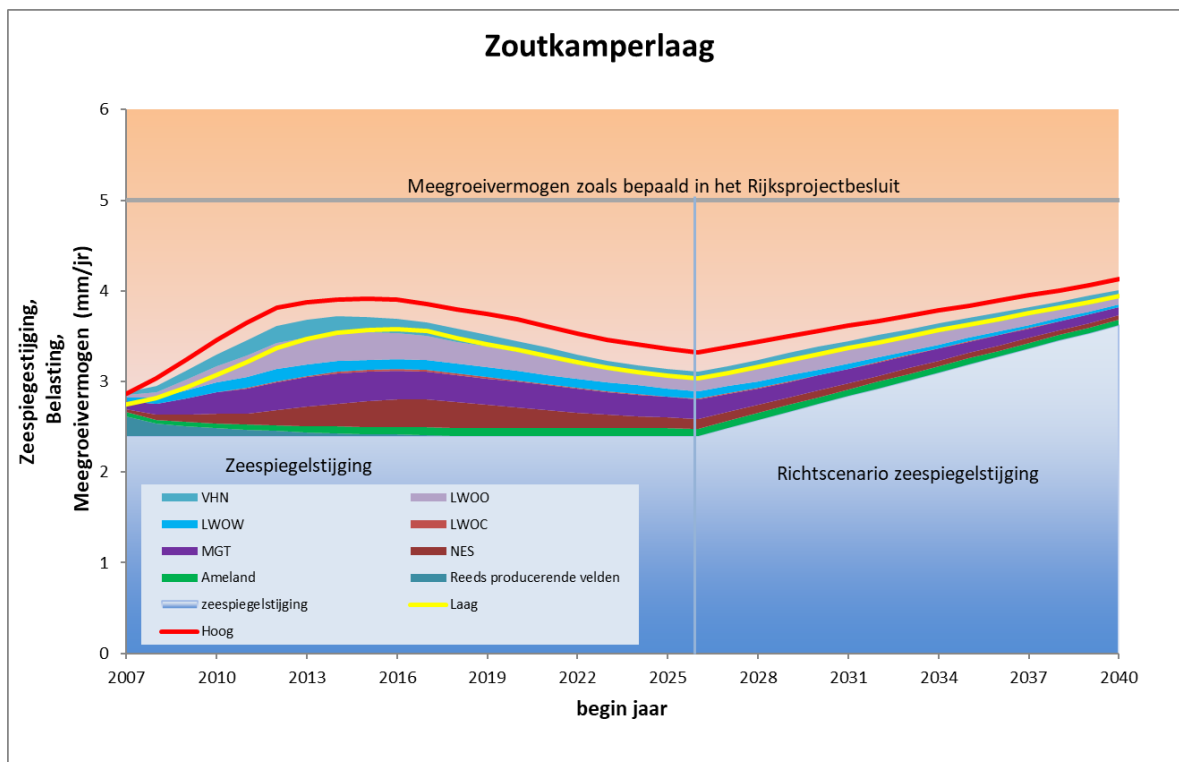
2.4.1 Bepaling volume en gemiddelde daling

Met behulp van de gekalibreerde geomechanische modellen zijn zowel het reeds opgetreden dalingsvolume in de betreffende kombergingsgebieden, als de nog in de toekomst te verwachten jaarlijkse toename bepaald. Door de jaarlijkse volumetoename te delen door het kombergingsoppervlak wordt de gemiddelde bodemdalingssnelheid S (in mm/jr) per kombergingsgebied (met bijbehorende onzekerheid) berekend. Als basis voor de kombergingsgrenzen gelden de grenzen van de kombergingsgebieden, die door 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 2-17 en Figuur 2-18. Voor het basisscenario is onderscheid gemaakt in de bijdrage van de individuele voorkomens d.m.v. de gekleurde vlakken. Voor de hoge en lage scenario's, zoals bepaald uit de onzekerheidsanalyse, is de belasting getoond d.m.v. de rode en gele lijnen.



Figuur 2-17: 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 2-18: 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 J-3 tot en met J+2, waarbij J-1 het rapportagejaar is. Voor de volledigheid zijn ook de resultaten voor het jaar 2005 tot en met 2026 getoond.

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	117 (103 - 123)		
2006	107 (94 - 113)		
2007	102 (90 - 108)	11 (7 - 15)	3 (3 - 6)
2008	96 (85 - 103)	18 (10 - 24)	3 (3 - 5)
2009	93 (82 - 100)	20 (11 - 28)	3 (3 - 7)
2010	89 (78 - 95)	28 (16 - 38)	3 (3 - 7)
2011	86 (76 - 93)	35 (20 - 48)	3 (3 - 7)
2012	83 (73 - 90)	35 (19 - 47)	3 (3 - 7)
2013	81 (71 - 88)	45 (25 - 60)	3 (3 - 8)
2014	78 (69 - 85)	70 (57 - 71)	3 (3 - 7)
2015	77 (67 - 84)	65 (60 - 70)	3 (3 - 6)
2016	74 (65 - 80)	63 (56 - 67)	3 (3 - 6)
2017	73 (64 - 79)	60 (55 - 67)	3 (3 - 5)
2018	69 (61 - 76)	54 (48 - 61)	3 (3 - 5)
2019	68 (60 - 75)	44 (38 - 51)	3 (3 - 5)
2020	66 (58 - 73)	35 (30 - 40)	3 (3 - 4)
2021	66 (57 - 72)	32 (26 - 37)	3 (3 - 4)
2022	62 (54 - 68)	31 (25 - 34)	3 (3 - 4)
2023	61 (54 - 67)	30 (22 - 32)	3 (3 - 4)
2024	60 (53 - 66)	27 (20 - 28)	3 (3 - 3)
2025	60 (52 - 66)	24 (17 - 26)	3 (3 - 3)
2026	58 (50 - 64)	21 (14 - 23)	3 (2 - 3)

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

Komborgingsgebied Zoutkamperlaag								
Jaar	Anjum voorkom en	Amelan d	Nes	Modderg at	LWO- Centra al	LWO- West	LWO- Oost	Vierhuizen -Oost
2005	29 (22 - 32)	3 (2 - 3)						
2006	22 (19 - 25)	3 (2 - 3)						
2007	17 (17 - 20)	3 (2 - 3)	8 (6 - 10)	25 (17 - 33)				
2008	16 (15 - 17)	3 (2 - 3)	11 (9 - 15)	21 (15 - 29)		6 (4 - 7)	3 (2 - 4)	7 (5 - 8)
2009	13 (12 - 13)	3 (2 - 3)	13 (11 - 17)	29 (21 - 40)		29 (19 - 37)	24 (17 - 27)	20 (14 - 23)
2010	10 (9 - 11)	3 (2 - 3)	18 (15 - 24)	32 (22 - 42)		22 (17 - 41)	30 (20 - 31)	33 (21 - 34)
2011	9 (8 - 10)	3 (2 - 3)	22 (18 - 30)	46 (39 - 52)		20 (15 - 42)	38 (28 - 46)	32 (22 - 37)
2012	7 (6 - 8)	4 (3 - 4)	22 (18 - 30)	50 (46 - 53)	3 (2 - 3)	17 (12 - 38)	50 (36 - 53)	29 (21 - 35)
2013	5 (5 - 6)	4 (3 - 4)	26 (24 - 34)	53 (53 - 53)	4 (3 - 4)	17 (12 - 36)	52 (38 - 57)	28 (20 - 34)
2014	3 (3 - 4)	5 (4 - 5)	50 (32 - 68)	51 (50 - 52)	4 (3 - 5)	17 (12 - 35)	48 (37 - 59)	27 (19 - 32)
2015	2 (2 - 2)	5 (4 - 5)	55 (39 - 63)	44 (44 - 45)	3 (2 - 4)	15 (12 - 33)	42 (34 - 54)	25 (17 - 29)
2016	1 (1 - 2)	5 (4 - 6)	49 (48 - 54)	42 (41 - 43)	2 (2 - 3)	16 (12 - 33)	38 (31 - 49)	23 (16 - 27)
2017	0 (0 - 1)	5 (4 - 6)	50 (48 - 53)	42 (42 - 44)	2 (2 - 3)	17 (13 - 36)	37 (31 - 48)	22 (15 - 26)
2018	0 (0 - 1)	5 (4 - 6)	45 (43 - 47)	42 (42 - 45)	2 (2 - 3)	17 (13 - 38)	36 (30 - 45)	21 (15 - 25)
2019	0 (0 - 2)	5 (4 - 6)	37 (34 - 38)	42 (40 - 44)	2 (2 - 2)	16 (13 - 39)	34 (28 - 42)	19 (13 - 22)
2020	0 (0 - 2)	5 (4 - 6)	29 (27 - 31)	40 (37 - 40)	2 (1 - 2)	15 (12 - 39)	30 (26 - 38)	17 (12 - 20)
2021	0 (0 - 2)	5 (4 - 6)	26 (25 - 28)	39 (38 - 40)	1 (1 - 2)	15 (12 - 40)	28 (24 - 35)	16 (11 - 18)
2022	1 (0 - 2)	5 (4 - 6)	24 (23 - 26)	38 (38 - 39)	1 (1 - 2)	15 (12 - 41)	20 (18 - 26)	15 (10 - 17)
2023	1 (0 - 2)	5 (4 - 6)	22 (21 - 24)	37 (37 - 38)	1 (1 - 2)	15 (12 - 41)	16 (15 - 21)	14 (9 - 16)
2024	1 (0 - 2)	5 (4 - 6)	19 (19 - 21)	35 (34 - 35)	1 (1 - 2)	14 (11 - 41)	14 (13 - 17)	14 (9 - 15)
2025	1 (0 - 2)	5 (4 - 5)	17 (16 - 19)	33 (32 - 33)	1 (1 - 2)	13 (11 - 41)	12 (11 - 15)	13 (8 - 14)
2026	1 (0 - 2)	5 (4 - 5)	14 (14 - 16)	30 (30 - 30)	1 (1 - 1)	12 (10 - 40)	20 (16 - 22)	13 (8 - 13)

Tabel 2-13 geeft de bodemdalingssnelheid *S* voor het rapportagejaar 2023 en belasting *B* op 1-1-2024. 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 2-17 en Figuur 2-18).

Tabel 2-13: Bodemdalingssnelheid (mm/jr) voor het rapportagejaar 2023 en belasting *B* (mm/jr) op 1-1-2024 met onzekerheid (bandbreedte) per komborgingsgebied.

Zoutkamperlaag		Pinkegat	
S (laag-hoog)	B (laag-hoog)	S (laag-hoog)	B (laag-hoog)
0,79 (0,73 - 1,03)	0,77 (0,71 - 1,01)	1,59 (1,35 - 1,71)	1,52 (1,29 - 1,63)

2.4.3 Actuele en voorspelde bodemdalingssnelheid en belasting

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

onzekerheid van +/- 1,5 mm/jaar. Deze is niet verdisconteerd in de gebruiksruimte, omdat het protocol uitgaat van het verwachte zeespiegelscenario.

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

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

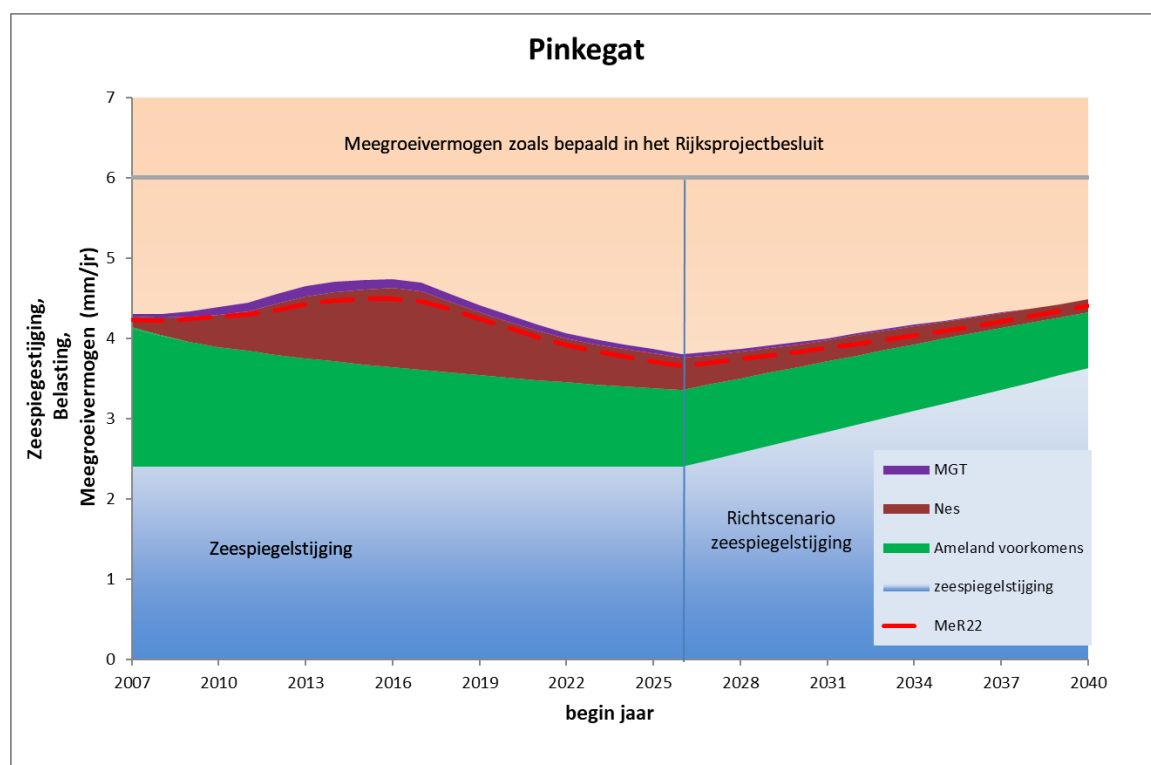
2.5 Indien nodig aanpassen productie (stap 5)

Uitgaande van het basisscenario en de verwachte productie volgen waarden voor de bodemdalingssnelheid S en de resulterende belasting B die niet leiden tot overschrijding van de gebruiksruijme (zie Tabel 2-14). Dit geldt ook voor het hoge scenario. In ieder geval zal de gebruiksruijme niet voor 1-1-2026 (de geldige periode voor het zeespiegelscenario) worden overschreden. Na deze tijd geldt het richtscenario van de zeespiegelstijging (Figuur 2-17 en Figuur 2-18).

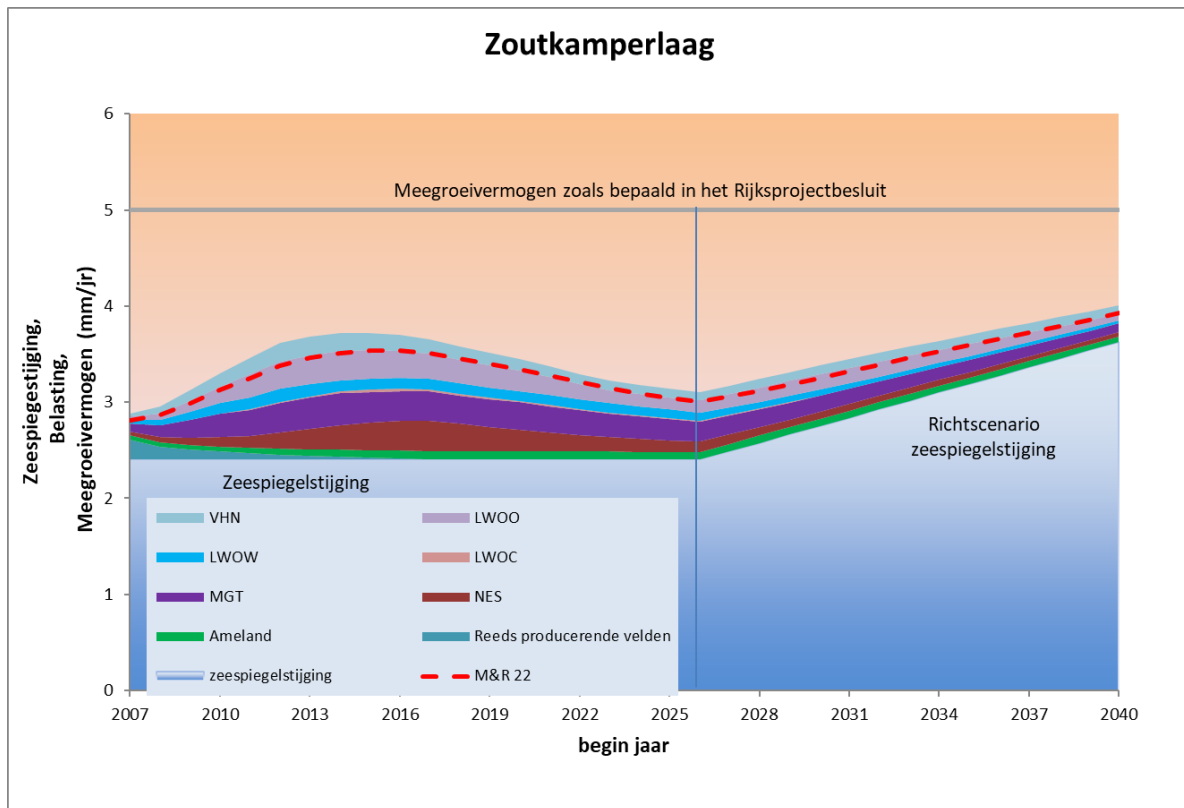
2.6 Actualiseren (stap 6)

Figuur 2-19 en Figuur 2-20 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 2022 (gerapporteerd in 2023).

De berekende belasting in de kombergingen is in de huidige rapportage iets hoger, wanneer deze vergeleken wordt met de vorige rapportage. Het verschil is een gevolg van de statistische methode waarbij nieuwe data kan leiden tot de keuze van andere bodemdalingsscenario's. Het verschil met vorig jaar past binnen de onzekerheid van het model.



Figuur 2-19: 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 2022.



Figuur 2-20: 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 2022.

2.7 Remwegscenario

Om het effect van de “hand aan de kraan” systematiek inzichtelijker te maken, is in de rapportage over 2019 (Referentie 6) een remwegscenario opgenomen. De nieuwe berekeningen in de 2023 rapportage tonen een vergelijkbaar bodemdalingsmodel en daarmee zullen de conclusies voor het remwegscenario onveranderd blijven.

3 Kwaliteitsborging

De beheersing van de milieuaspecten gerelateerd aan de winningsactiviteiten van het Waddengas is volledig geïntegreerd in de bedrijfsvoering van de NAM (het Business Management System - BMS). Dit systeem is onderworpen aan externe certificatie (ISO 14001).

De volgende activiteiten zijn hiervoor uitgevoerd:

Systeem-eis	Uitgevoerde en geplande activiteiten
NAM's Environmental Agenda (periode 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	Het 'Hand aan de Kraan' (HadK) team, bestaande uit verschillende technisch en niet-technische disciplines, heeft gedurende het jaar haar beheer uitgevoerd.
Monitoring, metingen en rapportages	Bodemdalings, reservoirdruk- en biotiekmetingen zijn uitgevoerd volgens plan.
Interne Controle	Vergunningscompliance checks, veldbezoeken en process safety reviews zijn uitgevoerd.

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

Registratie	Bewaarplaats NAM
Winningsplannen	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 Conclusies

Op basis van de evaluatie gepresenteerd in dit rapport volgens het Meet-en regelprotocol wordt geconcludeerd dat de belasting in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag vergelijkbaar is met de belasting volgens de M&R-cyclus over 2022. De belasting blijft evenals in de voorgaande jaren ruim binnen de toegestane gebruikruimte.

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%26binstemming%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 NAM (2023) Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen; Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2022; Rapport EP202303212588, mei 2023. (<https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/wadden/nl/63022a2b-b886-4bc5-a440-51a2d3ffa6b0>)
- Referentie 7 GPS Survey NAM Waddenzee v. 1.28, 06-GPS B.V., 01/2024.
- Referentie 8 Check reference station coordinates NAM v. 1.15, 06 GPS B.V., 06/2023.
- Referentie 9 NLGEO2004: het geoïdemodel voor Nederland. Data-ICT-Dienst, Rijkswaterstaat. (<http://www.rdnap.nl/algemeen/hoogte/geoide.html>.)
- Referentie 10 NAM (2015) Wadden Sea Long-term Subsidence Studies – Overview report, EP201506209625. (<https://nam-feitenencijfers.data-app.nl/download/rapport/2ca6c8d8-c0d4-4c10-8460-672f93b4cdaa?open=true>)
- Referentie 11 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?msclkid=1e3952f7b65811ecb71259c476b047c9>)
- Referentie 12 Dynamic Reservoir Modelling of Wadden Fields for subsidence. Meet & Regel 2016. EP201703201178. (<https://www.commissiener.nl/projectdocumenten/00002813.pdf?msclkid=ad9ce451b63d11ecb694b92812408cd6>)
- Referentie 13 NAM (2017) Ensemble Based Subsidence application to the Ameland gas field – long term subsidence study part two (LTS-II) continued study. (<https://nam-feitenencijfers.data-app.nl/download/rapport/b2bb2626-2cf8-4d7f-994d-04a9995ebe9d?open=true>)
- Referentie 14 TNO (2011) Toetsing van de belasting op de gebruiksruimte in de kombergingsgebieden in Pinkegat en Zoutkamperlaag door bodemdaling ten gevolge van gaswinning onder de Waddenzee. TNO-060-ut-2011-02035c (https://www.nlog.nl/sites/default/files/tno_rapport_waddenzee_final_v17092012_public%20version%20-gelakt.pdf)
- Referentie 15 Deltares en PBL (2011) Deltascenario's Verkenning van mogelijke fysieke en sociaaleconomische ontwikkelingen in de 21ste eeuw op basis van KNMI'06 en WLO-scenario's, voor gebruik in het Deltaprogramma 2011 – 2012, Deltares rapport 1205747-000. (<https://edepot.wur.nl/170665>)
- Referentie 16 Victor Hopman, Ger de Lange, Laura Vonhogen, Pauline Kruiver, Freek van Leijen, Raluca Ianoshi, Report on pilot service Rhine-Meuse Delta, Subcoast report D3.2.3, May 2013.

- Referentie 17 Technische Commissie Bodemdaling (2009) Van Meting naar Daling. Bodemdaling door delfstofwinning. November 2008.
(https://www.waddenzee.nl/publish/library/25/rapport_van_meting_naar_daling_tcbb2008.pdf)
- Referentie 18 NAM (2019) Controle van de reservoirmodellen met de nieuwe drukmetingen van 2018. EP201904223961. (<https://commissiemer.nl/projectdocumenten/00006221.pdf>)
- Referentie 19 Meetregister bij de meetplannen Waddenzee en Groningen 2023, Rapportage van de GNSS-campagne Waddenzee 2023, 9/2023. EP202308204613.
- Referentie 20 Auditcommissie Waddenzee (2019) Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2018.
- Referentie 21 Staatstoezicht op de Mijnen (2016). Methodiek voor risicoanalyse omtrent geïnduceerde bevingen door gaswinning tijdelijke leidraad voor adressering mbb. 24.1.p, versie 1.2, SodM, 1 februari 2016.
(https://www.nlog.nl/sites/default/files/fdb3cd42-ecba-49ce-969f-44318e9d1272_tijdelijke%20leidraad%20sra%20v1-2.pdf)
- Referentie 22 Deltares (2010) Schade aan buisleiding door aardbeving. fase 1 inventarisatie.
(<https://docplayer.nl/16931137-Schade-aan-buisleiding-door-aardbeving.html>)
- Referentie 23 GRGeo (2019) Estimate of seismic activity of the Ternaard gas field and deformation risk assessment for the adjacent primary levee, The Netherlands. Project No. P2019.0002.
- Referentie 24 NAM (2019) Review and update of: Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen. (<https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/8693b0f8-fd9f-49d6-8be6-f1759b9803be>)
- Referentie 25 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 26 NAM (2011) Winningsplan Ameland 2011 (WP 2011) Verzoek om instemming wijziging winningsplan. (<https://www.nlog.nl/nlog/requestDocument?id=1363502161&type=fieldPubAsset>)
- Referentie 27 Leusink, J. (2003) Wat waterpasgegevens vertellen over geologische bodemdaling. ([link](#))
- Referentie 28 NAM (2020) Evaluatie van de doorlatendheid van breuken van de Waddenzee velden en implicaties voor bodemdaling. EP202007201552.
(<https://commissiemer.nl/projectdocumenten/00007500.pdf?msckid=7f05fef9b64311eca3dd28587e78de4e>)
- Referentie 29 Meetregister bij het meetplan Waddenzee 2023, Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Ameland 2023, 6/2023, EP202305200042.
- Referentie 30 Meetregister bij de meetplannen Noord-Nederland, Groningen en Waddenzee 2023, Rapportage van satelliet radar interferometrie, Noord-Nederland 2023, 10/2023, EP202303201224.
- Referentie 31 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/portalfiles/portal/90402176/Comparison_of_GNSS_Processing_Methodologies_for_Subsidece_Monitoring_1_.pdf)
- Referentie 32 Auditcommissie Waddenzee (2021) Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2020.
(https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/90402176/Comparison_of_GNSS_Processing_Methodologies_for_Subsidece_Monitoring_1_.pdf)
- Referentie 33 Kooi, H. (1997) Contribution of tectonics, isostasy and natural compaction to vertical land movement in the Netherlands, Meetkundige Dienst Rijkswaterstaat MDGAP-9770.
(https://puc.overheid.nl/PUC/Handlers/DownloadDocument.ashx?identifier=PUC_58289_31&versienummer=1)
- Referentie 34 Muntendam-Bos, A., et al. (2006) Bodemdaling in Nederland, TNO rapport 2007-U-R0566B. (<https://www.nlog.nl/sites/default/files/2007-u-r0566b%20am%20gip%20bodemdalingkaart.pdf>)

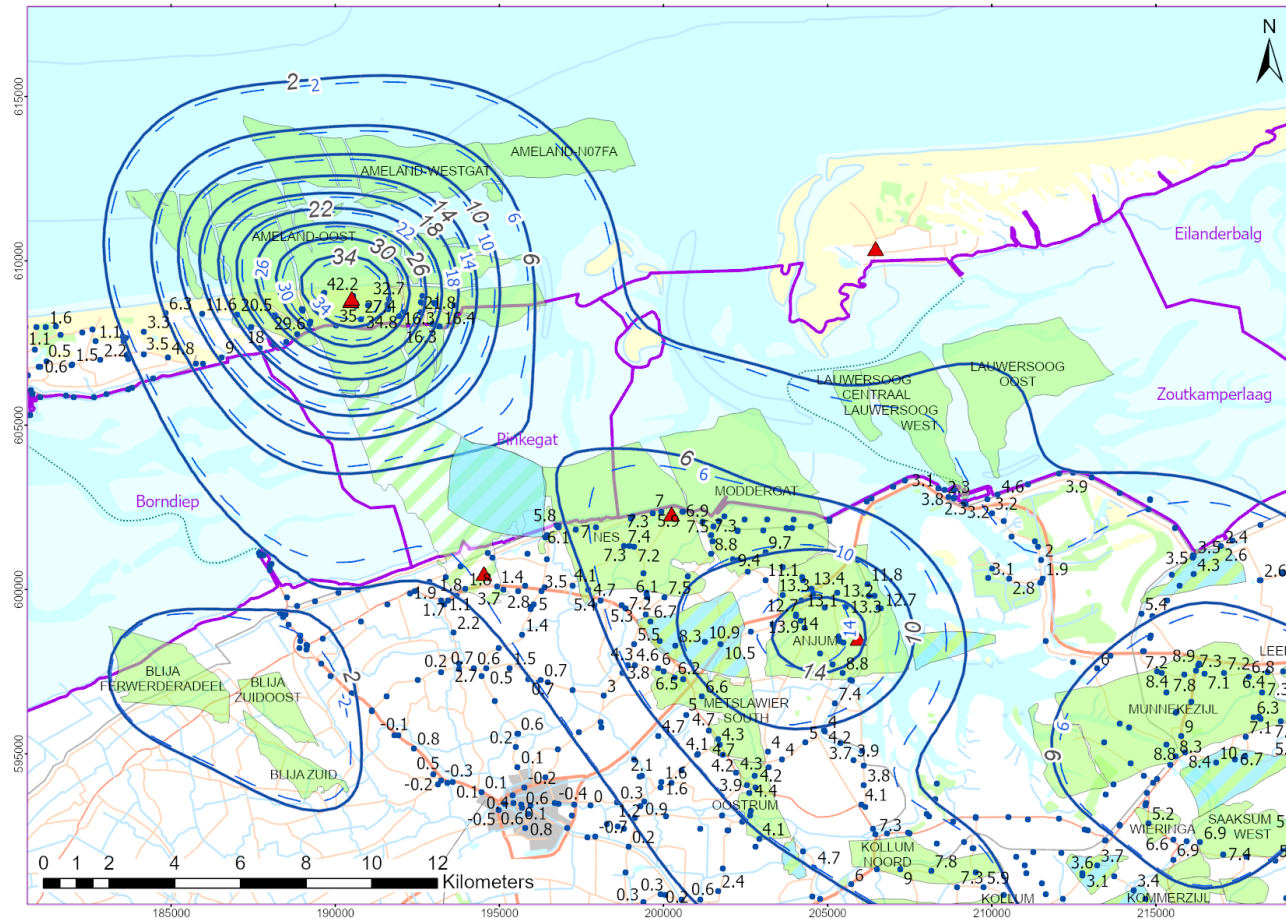
Referentie 35 *Meetregister bij het meetplan Waddenzee 2021, Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Schiermonnikoog 2021, 5/2021, EP202105200348*

Referentie 36 *Deltares (2021) Actualisatie bodemdalingsvoorspellingskaarten. Rap. Nr. 11206724-002-BGS-0001*

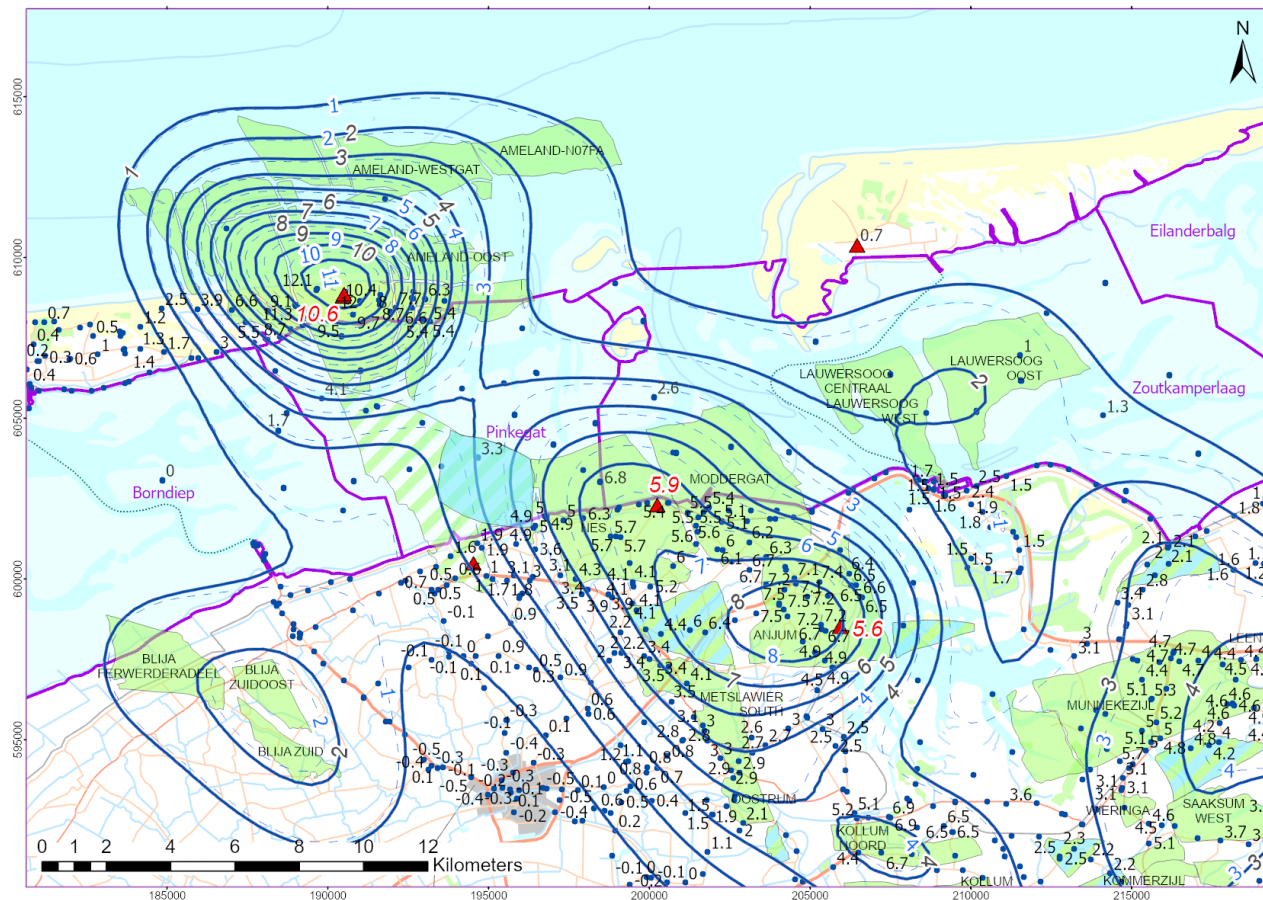
Referentie 37 *NAM (2020) Evaluatie van de doorlatendheid van breuken van de Waddenzee velden en implicaties voor bodemdaling NAM-notitie EP202007201552*

(<https://commissiener.nl/projectdocumenten/00007500.pdf?msclkid=7f05fef9b64311eca3dd28587e78de4e>)

A. Bijlage A: Gemodelleerde en gemeten bodemdaling tussen 1986 en januari 2023

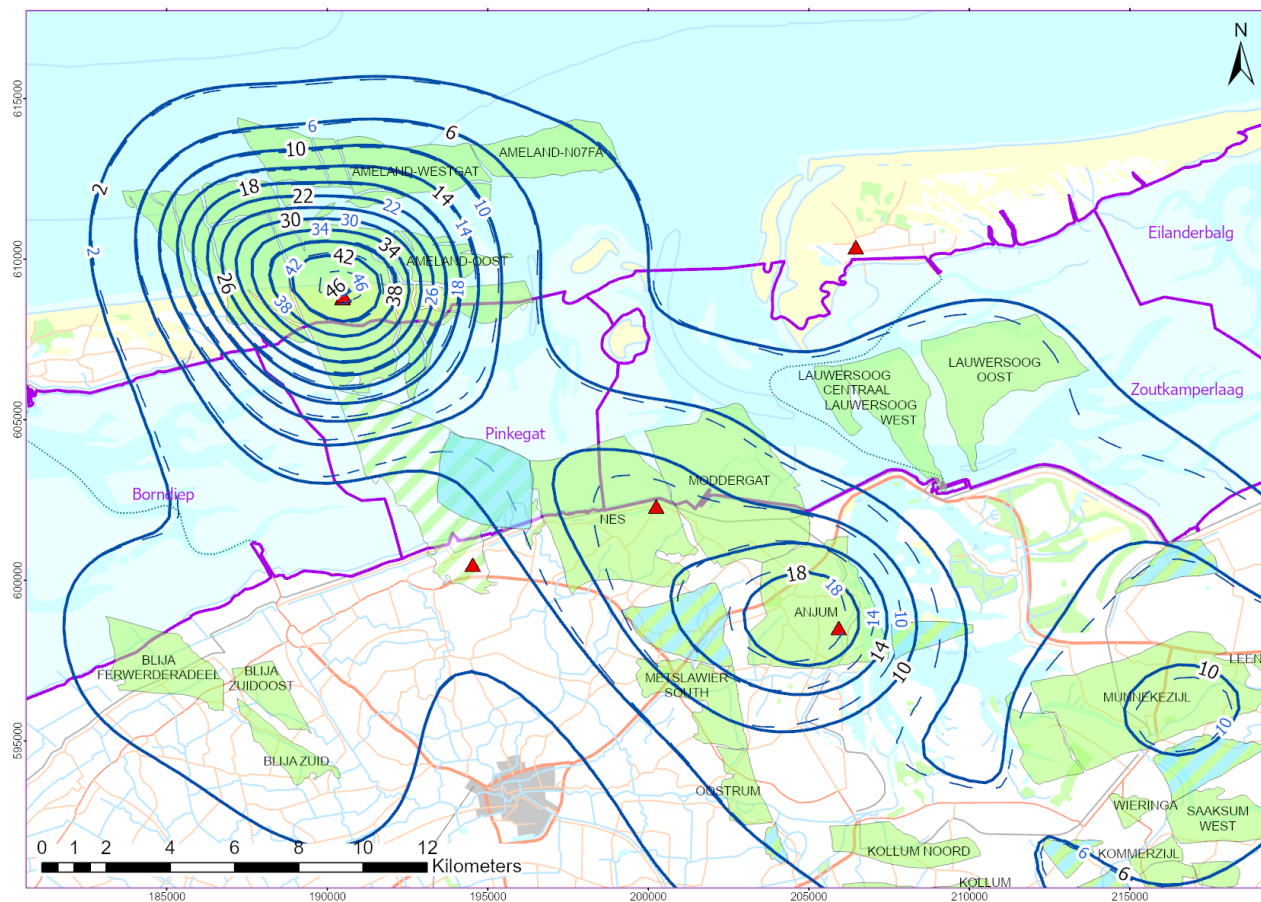


Totale bodemdaling in cm (status modelcontour in blauw: 1-1-2024) sinds de start van de gaswinning in het gebied (1986). De gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2023 volgens de M&R-rapportage over 2022. De blauwe punten met label op het vaste land representeren de peilmerken met gemeten hoogteverschillen tussen 1997 en 2023. De blauwe punten met label op Ameland representeren de peilmerken met gemeten daling tussen 1986 en 2023. De rode driehoeken geven de posities van de GNSS-stations aan.



Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2024) 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 2022 (1-1-2023) weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2022. 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 2023. De blauwe punten met label op het vaste land representeren de peilmerken met gemeten hoogteverschillen tussen 2006 en 2023. De blauwe punten met label op Ameland representeren de peilmerken met gemeten daling tussen 2006 en 2023. De rode waarden geven de daling aan van de permanente GNSS-stations in de periode feb. 2007- dec. 2023.

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 2022.

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: Geregistreerde aardbevingen in het Waddengebied en omgeving voor de periode 1986 - maart 2024.

Een mogelijke vervolgvraag is of de bevingen een invloed kunnen hebben op drukveranderingen of drukcommunicatie binnen en tussen de gasvelden met als gevolg een verandering in reservoirdruk. Dit zou vervolgens kunnen leiden tot onvoorziene compactie en daarmee gepaard gaande bodemdaling.

Dit is alleen mogelijk wanneer de doorlaatbaarheid van breuken tussen reservoirdelen verandert door de beving. Er zijn geen gevallen bekend in de literatuur waar dit fenomeen is beschreven. Ook vanuit een theoretisch oogpunt is de kans bijzonder klein door de volgende condities:

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

Samengevat kan gesteld worden dat mogelijke aardbevingen in dit gebied geen gevolgen zullen hebben voor de bodemdaling.

Over de kans op zwaardere aardbevingen in de toekomst

De Auditcommissie schrijft in haar advies over de rapportage van het jaar 2018 (Referentie 20) om specifiek te kijken naar de mogelijkheid dat zwaardere aardbevingen kunnen optreden in de toekomst en/of aardbevingen ook veroorzaakt kunnen worden door horizontale verschuivingen die mogelijk kunnen leiden tot een zwaardere beving. Aardbevingen gedragen zich over het algemeen volgens een Gutenberg-Richter relatie. Deze relatie houdt in dat er voor tien kleine aardbevingen met een magnitude van $M=2$ er ongeveer één aardbeving met een magnitude van $M=3$ zou kunnen plaatsvinden. In theorie neemt de kans op een beving dus met een factor 10 af voor elke magnitudestap. De kans op een aardbeving met een magnitude tussen 1 en 2 in het Waddengebied is op basis van de historie ongeveer 10% per jaar (drie kleine aardbevingen gedurende 30 jaar productie). Wanneer de Gutenberg-Richter relatie zou worden doorgetrokken wordt de kans op een aardbeving tussen $M=2$ en $M=3$ ongeveer 1% per jaar en voor een aardbeving tussen $M=3$ en $M=4$ ongeveer 0,1% per jaar. Voor geïnduceerde bevingen geldt dat deze relatie niet tot in het oneindige mag worden doorgetrokken, omdat de breukextensies en spanningsveranderingen niet oneindig zijn maar beperkt zijn tot het volume gesteente waaruit het gas wordt gewonnen.

Maxima voor geïnduceerde bevingen

De veranderingen in de ondergrond door de drukdaling zorgen voor een verandering van de spanningen op de breuk. Deze veranderingen in de spanningen hebben invloed op mogelijke reactivatie van de breuken in het reservoir en de breuken die het reservoir begrenzen. Daarmee is het mogelijke breukoppervlak, dat kan schuiven tijdens een aardbeving, beperkt tot het bereik van dergelijke breuken. De compactie van het reservoir zorgt er tevens voor dat er energie wordt opgeslagen die mogelijk kan vrijkomen als aardbevingsenergie. Deze opgebouwde compactie-energie kan ook een beperking vormen voor de maximale aardbeving die kan optreden door productie. Deze twee mogelijke begrenzingen kunnen kwantitatief worden beschouwd en de leidraad die door Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) is geschreven geeft twee rekenmethodes voor het inschatten van de “realistisch sterkste aardbeving”. Voor een beschrijving van deze twee methodes wordt verwezen naar Referentie 21.

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

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

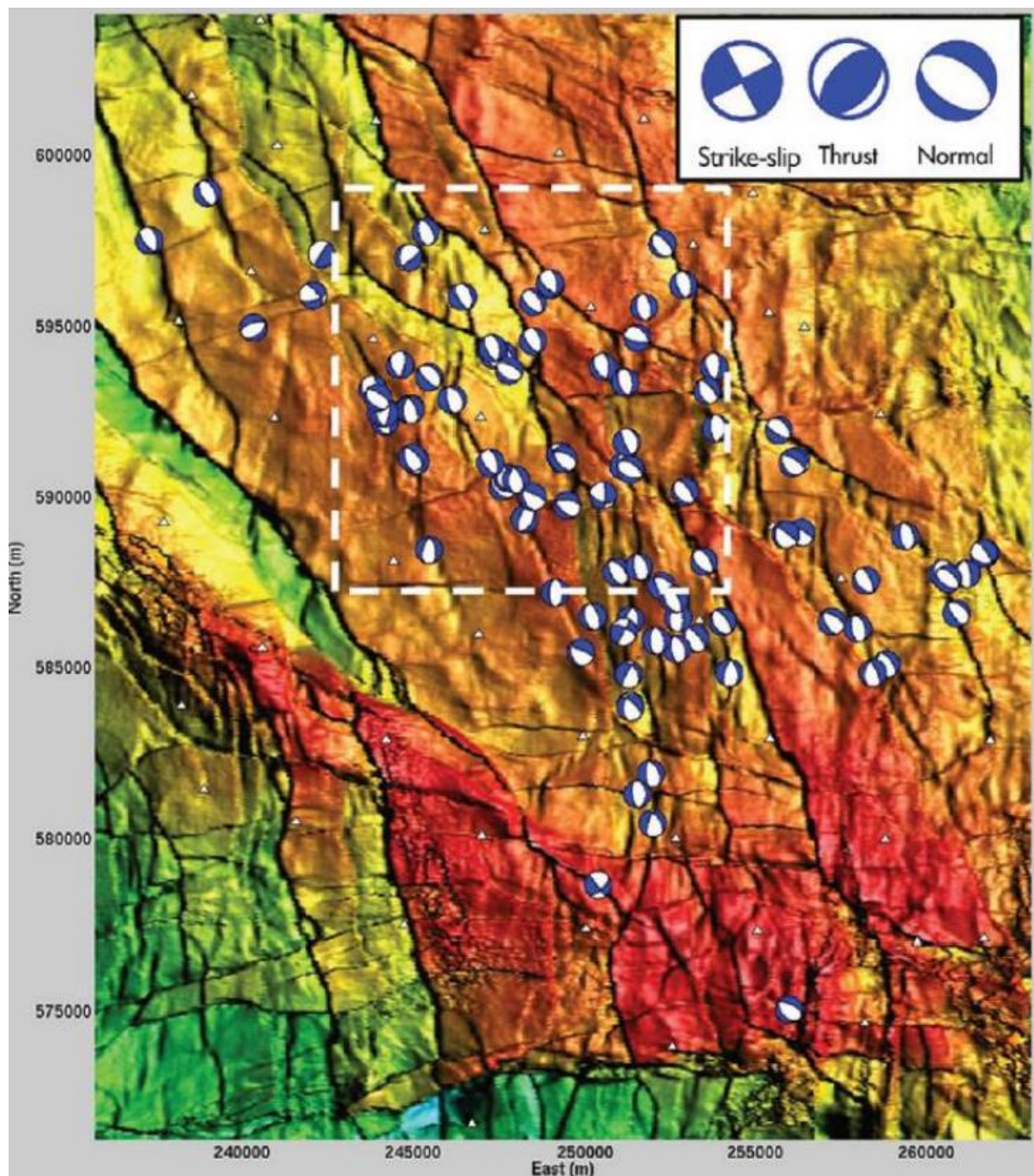
Voorkomen	Langste breuklengte (km)	Poisson's ratio	Breukhoogte (m)	M_{max} energiebalans	M_{max} breukslip
Ameland- Oost	4,3	0,2	110	4	3,6

Volgens deze berekening ligt de maximale magnitude tussen de $M=3,6$ en $M=4$. Dergelijke aardbevingen kunnen leiden tot schade aan huizen, maar het is onwaarschijnlijk dat deze bevingen verdere gevolgen hebben voor infrastructuur, pijpleidingen en dijken. Voor het effect op pijpleidingen is in 2010 een studie door Deltares (Referentie 22) uitgevoerd die concludeert dat de kans op directe schade door trillingen klein is. Verder is er ook een uitvoerige studie gedaan naar de mogelijke schade aan dijken door aardbevingen (Referentie 23). Deze studie is uitgevoerd voor de Waddendijk tussen Blija en Ternaard en ook deze studie concludeert dat het onwaarschijnlijk is dat een dergelijke beving schade kan veroorzaken aan de Waddendijk.

Bevingen met horizontale verschuivingen

De commissie stelt tevens de vraag of mogelijke horizontale verschuivingen op de breuken een effect kunnen hebben op de maximale magnitude. Hierbij ging de commissie uit van de gedachte dat de huidige aardbevingen veroorzaakt zijn door compactie en daarmee verticale bewegingen.

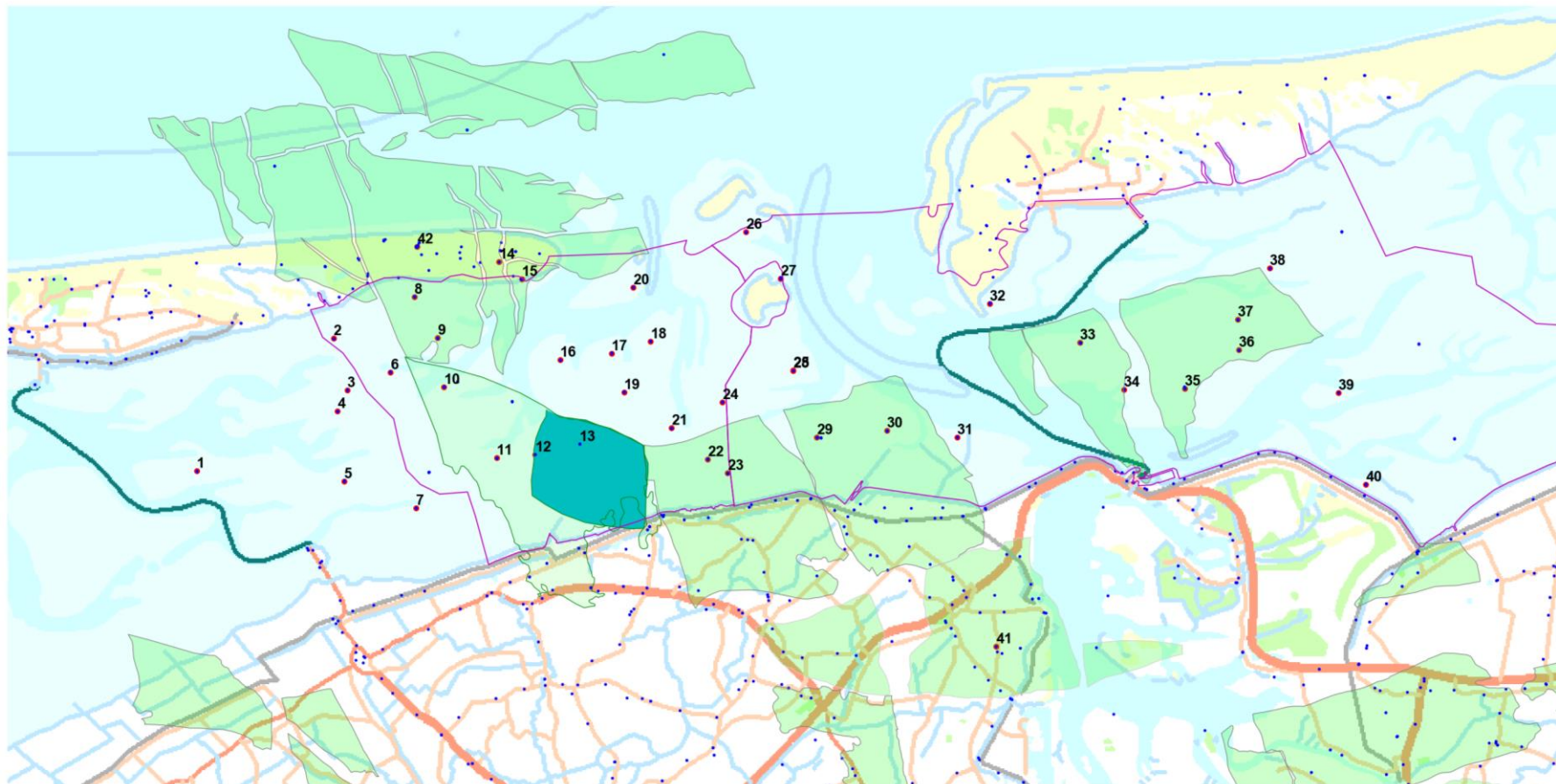
Allereerst moet worden vermeld dat het niet duidelijk is wat de beweging is geweest voor de reeds opgetreden bevingen in het Waddengebied. Om een conclusie te trekken over een aardbevingsbeweging is een "moment tensor" berekening noodzakelijk waarbij een voldoende aantal stations nodig zijn die de bevingen geregistreerd hebben. De aardbevingen in het Waddengebied zijn te licht om te kunnen worden waargenomen door veel stations en daarmee kan een dergelijke berekening niet worden uitgevoerd. Voor de Groningen bevingen kunnen dergelijke berekeningen wel worden gemaakt omdat het netwerk hier veel dichter is dan in de Waddenzee (Figuur C-2, Referentie 24). De bevingen in Groningen laten zien dat bijna alle bevingen een verticale afschuiving kennen (normal faulting) en dat er bijna geen bevingen zijn waarbij de horizontale component een rol speelt. Dit komt overeen met de bekende informatie over spanning in Nederland waarbij uit metingen blijkt dat de spanningsanisotropie tussen de twee horizontale spanningen klein is (Referentie 25). Over het algemeen wordt aangehouden dat $SH=1,05 \cdot Sh$. Het is dus minder waarschijnlijk dat horizontale bewegingen kunnen ontstaan tijdens aardbevingen. Tevens geldt voor een eventuele horizontale beweging dezelfde beperking t.a.v. het maximale breukvlak. De normaalspanning zal buiten het reservoir groter worden waardoor een eventuele aardbevingsbeweging tot stilstand wordt gebracht. Dit betekent dat ook voor een dergelijke beving de begrenzing wordt bepaald door de grootte van het breukvlak binnen de extensie van het gasreservoir. Met deze redenering zal de berekening volgens de SodM leidraad blijven gelden en kan een aardbeving realistisch gezien niet groter worden dan tussen $M=3,6$ en $4,0$.



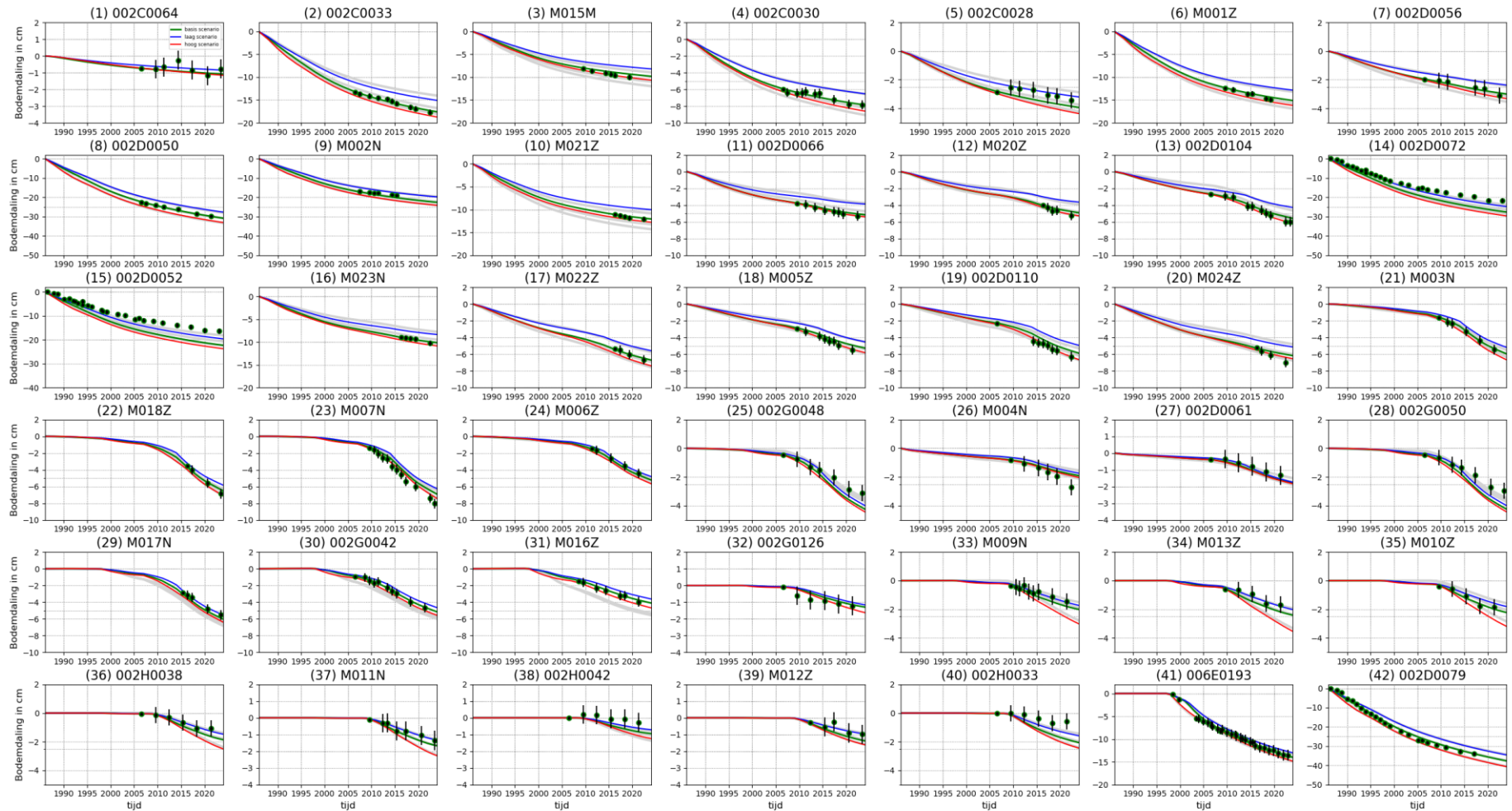
Figuur C-2: Bronmechanismes van 100 aardbevingen in het Groningen veld tussen 2015 en 2017 (Referentie 24).

D. Bijlage D: Tijdseries Waddenzee

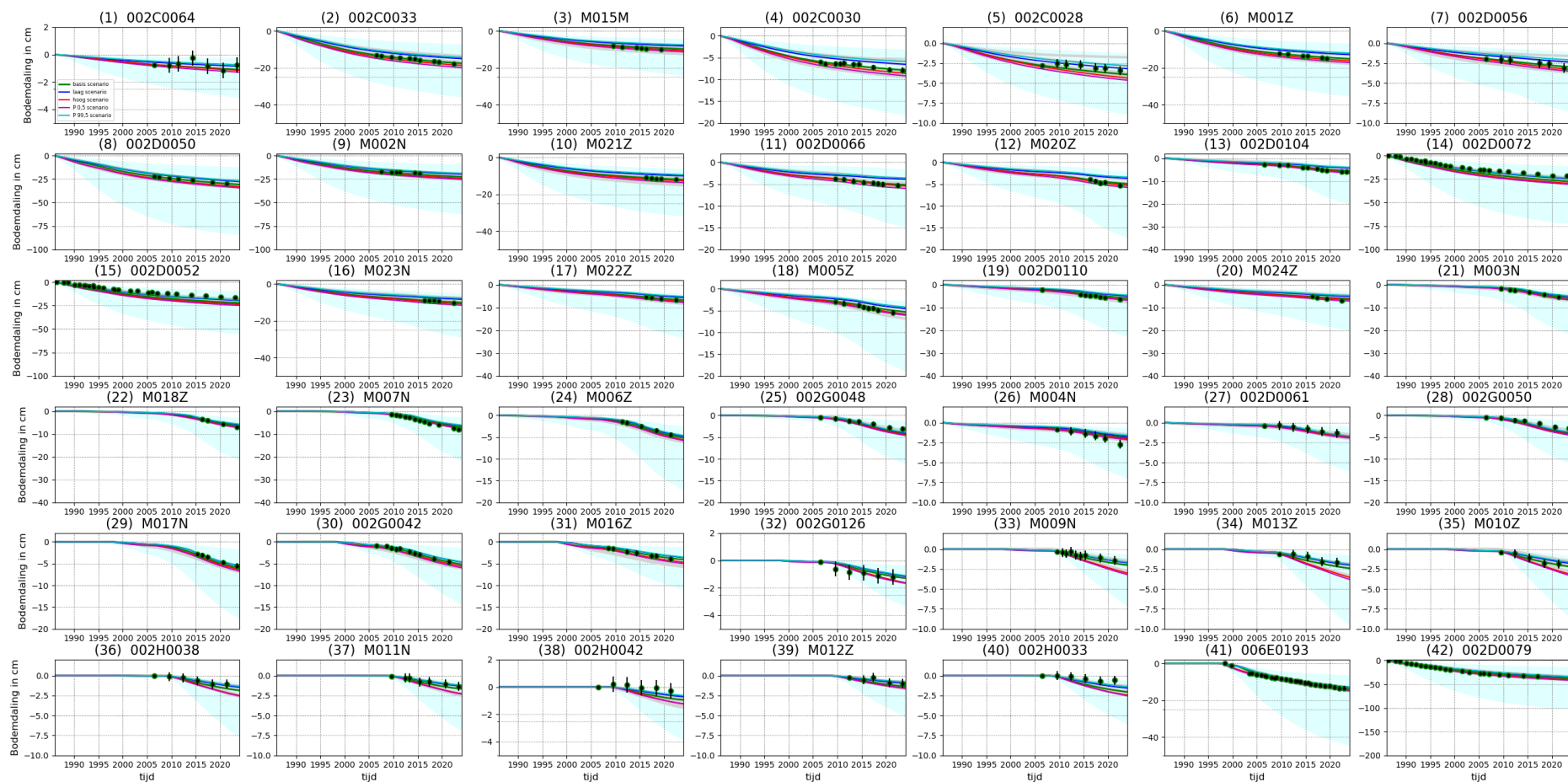
In deze bijlage worden tijdseries van de bodemdaling op het merendeel van de Waddenzee meetpunten getoond. Figuur D-1 laat de locatie van de punten zien. Figuur D-2 en Figuur D-3 tonen de tijdseries. In deze tijdseries laten de grijze lijnen de statistische waarden zien (gewogen gemiddelde, P2,5, P97,5).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



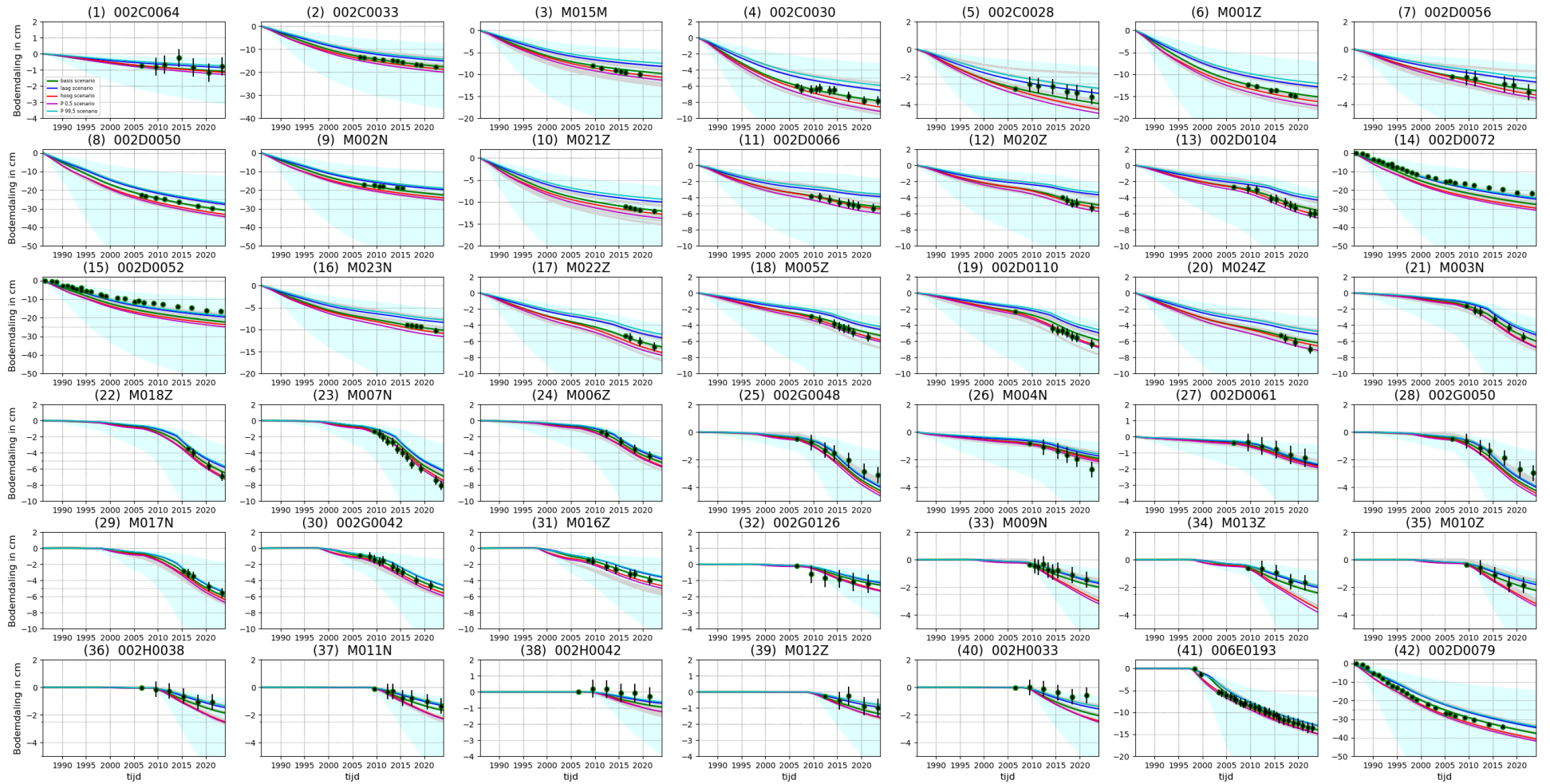
Figuur D-1: Locaties van de peilmerken waarvoor de tijdseries zijn gemaakt in Figuur D-2, Figuur D-3 en Figuur D-4.



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



Figuur D-3: Tijdseries voor de punten zoals aangegeven Figuur D-1. Grijs lijnen geven de statistisch afgeleide P0,5 en P2,5 waarden (meest ondiepe 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 apriori onzekerheid aangegeven.



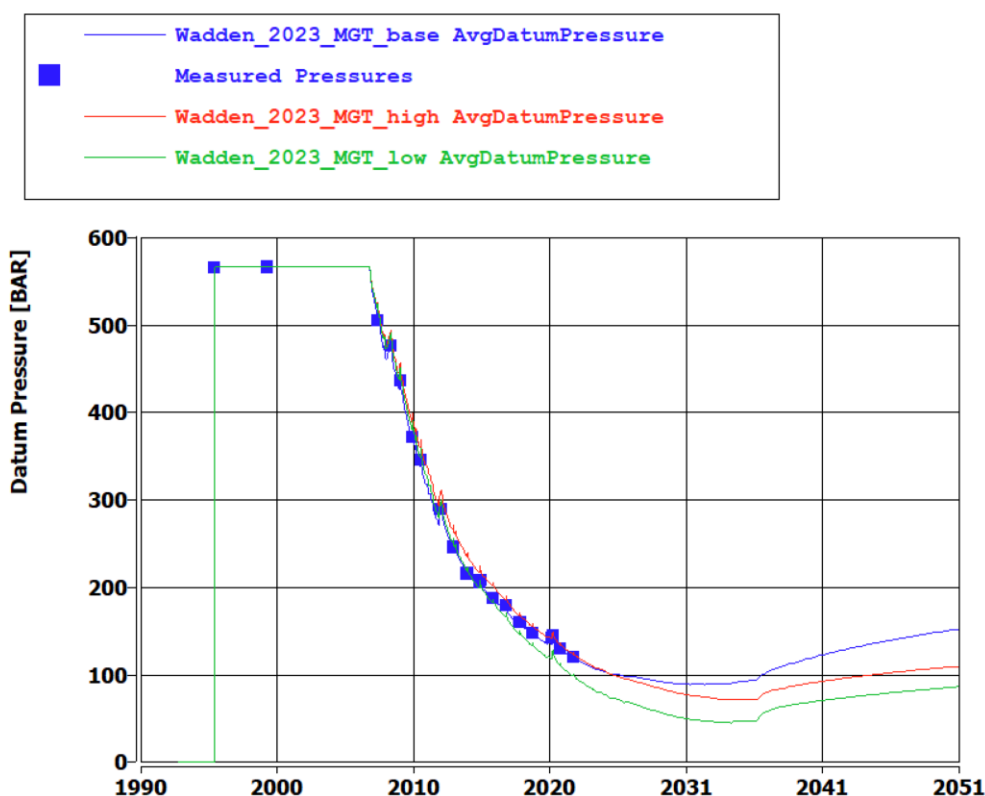
Figuur D-4: Tijdsreeksen voor de punten zoals aangegeven in Figuur D-1. Dit figuur is hetzelfde als Figuur D-3, echter nu is de schaal van de y-as bepaald door de verschillende scenario's i.p.v. door de a-priori onzekerheid.

E. Bijlage E: Vergelijking reservoirmodellen met drukmetingen

In deze bijlage worden de drukmetingen tot en met 2023 vergeleken met de gesimuleerde drukken in elk van de modelrealisaties. Alleen voor het Nes veld zijn de modellen dit jaar aangepast. De overige modelrealisaties zijn ongewijzigd t.o.v. de voorgaande rapportage (Referentie 6). Details van de modellering zijn te vinden in Referentie 12 en Referentie 19.

E.1 Moddergat

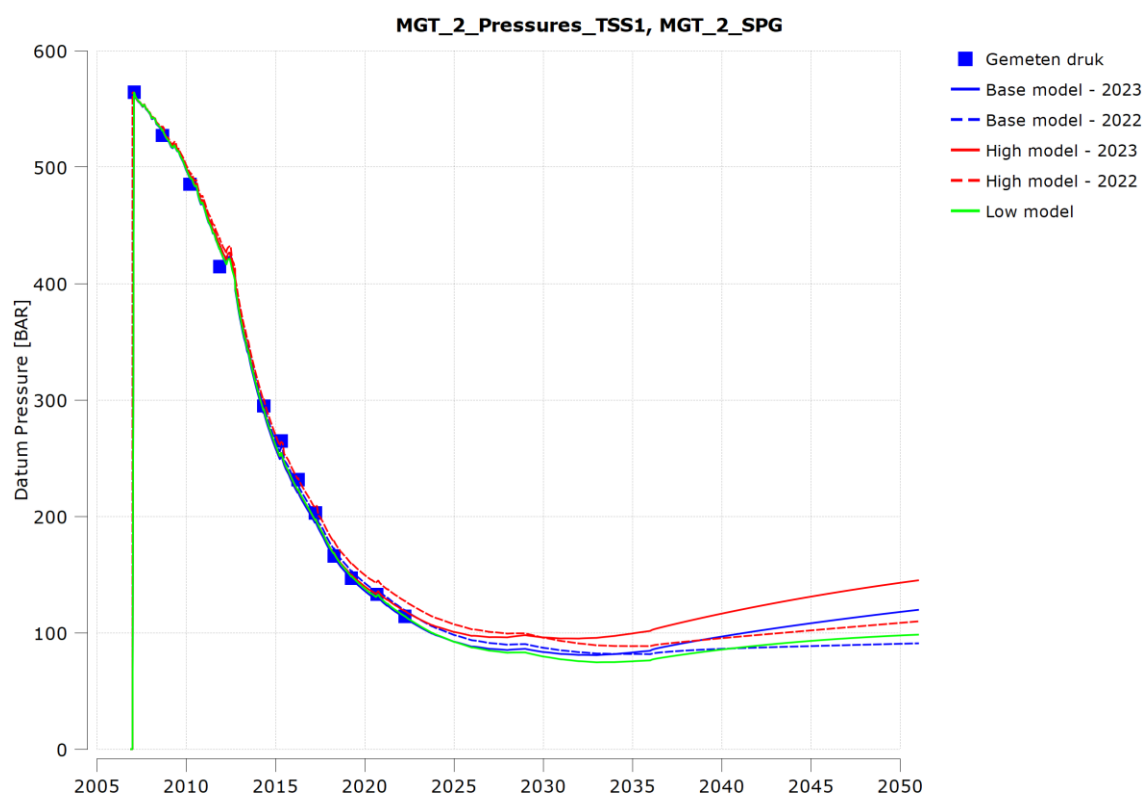
Het gas uit het Moddergat veld wordt geproduceerd met put MGT-1B. De drukmeting uit 2022 is goed in overeenstemming met de *hoog* en *mid* (oftewel *base*) drukprognoses, aangegeven met respectievelijk de rode en blauwe lijnen in Figuur E-1. De drukmeting is het minst in overeenstemming met de *lage* drukprognose, aangegeven met de groene lijn. Aangezien deze lijn het laagst in druk is en daardoor relatief de meeste bodemdaling zal geven, is ervoor gekozen om deze realisatie dit jaar nog niet te veranderen. De realisaties zijn daarmee gelijk aan die van vorig jaar. Er heeft in 2023 geen nieuwe drukmeting in MGT-1B plaatsgevonden. Een nieuwe meting staat gepland voor 2024.



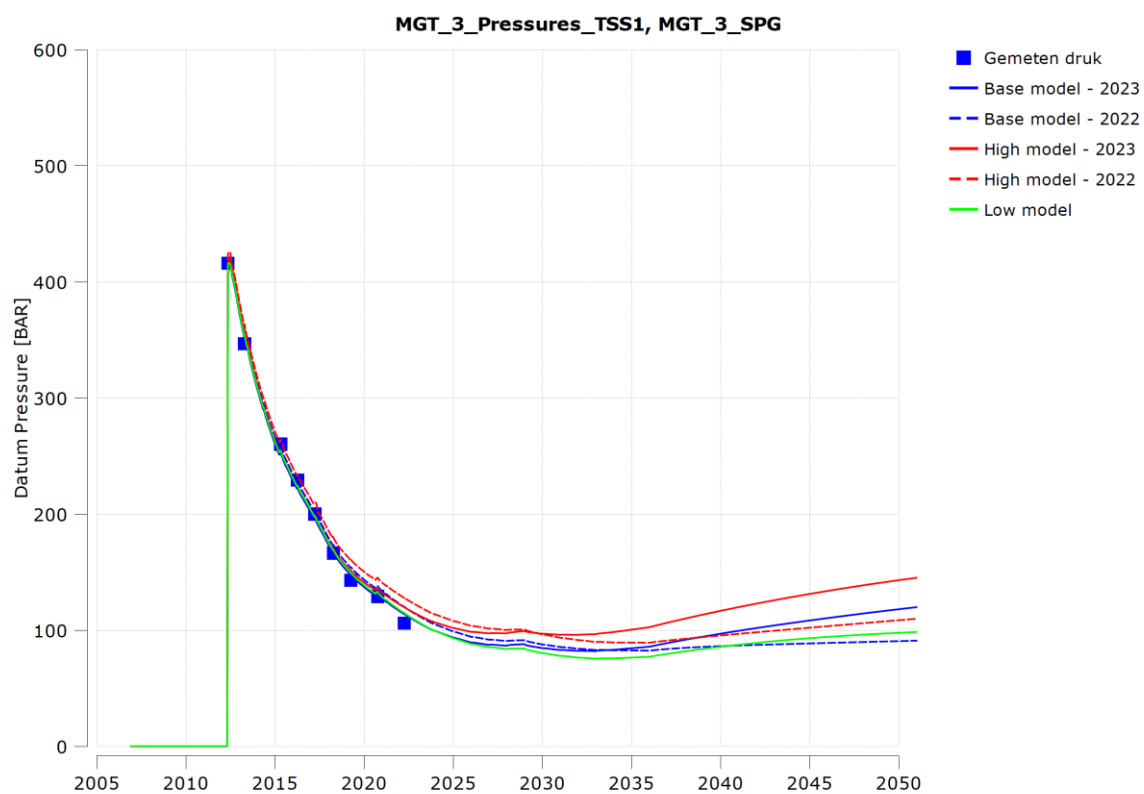
Figuur E-1: MGT-1B gemeten drukken en hoog/mid/laag drukprognoses.

E.2 Nes

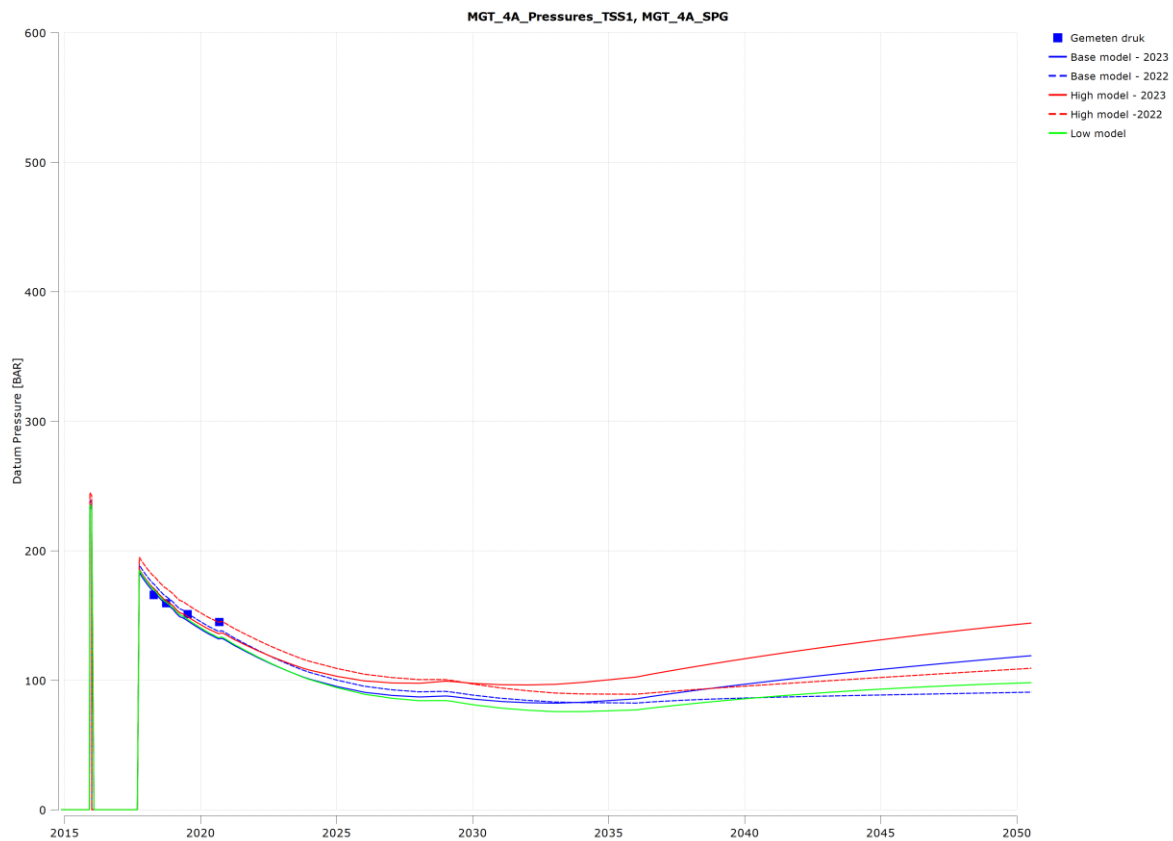
Er zijn vier putten die uit het Nes voorkomen produceren: MGT-2, MGT-3, MGT-4A en MGT-5, waarvan MGT-4A niet meer in gebruik is. Op 18 oktober 2023 is een drukmeting in MGT-3 uitgevoerd. Het lage model scenario past goed bij de drukmetingen van de laatste jaren. Het hoog en mid scenario zijn dit jaar aangepast. De nieuwe modelprognoses passen beter bij de historische drukdata en geven een grotere range aan voorspelde drukken. Figuur E-2 t/m Figuur E-5 laten een vergelijking zien van de modellen voor en na kalibratie voor de vier putten. Alleen de laatste drukmeting in MGT-4A (van september 2020) wordt minder goed gereproduceerd door de modellen.



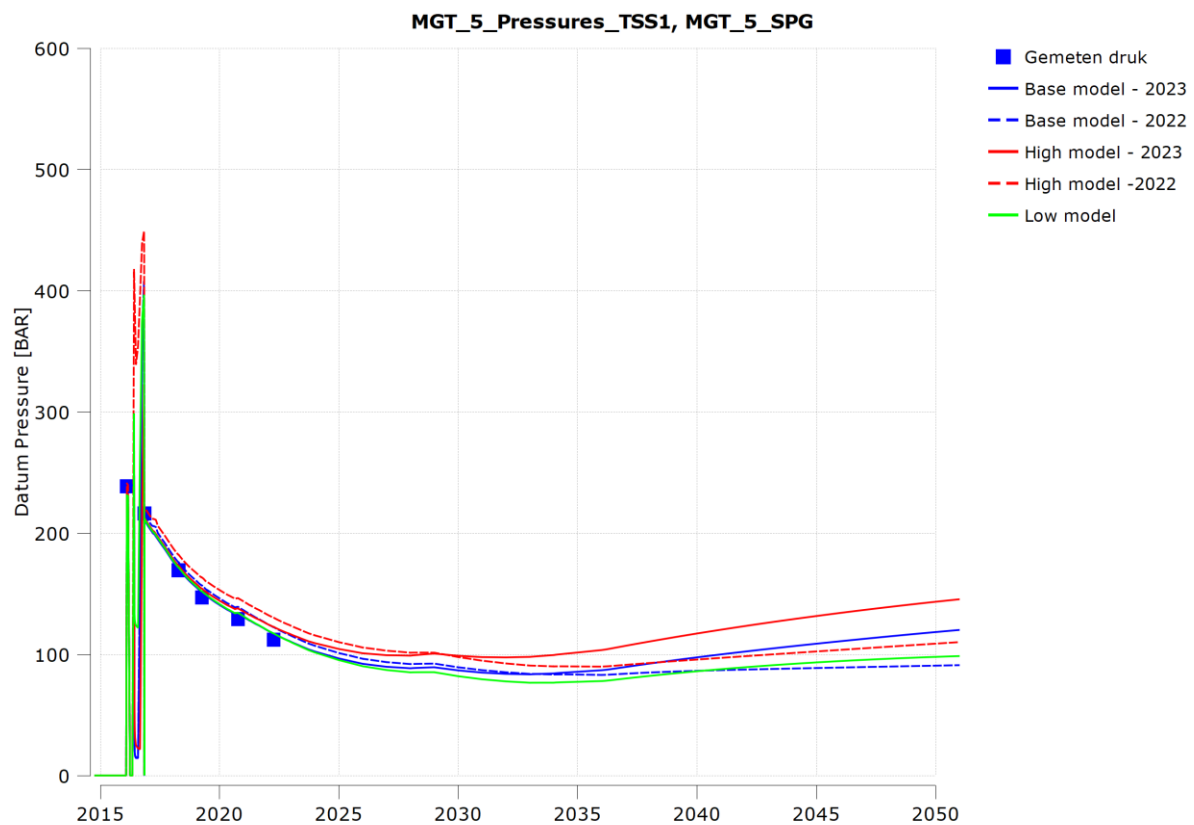
Figuur E-2: Vergelijking modeldrukken voor (gestippelde lijnen) en na herkalibratie met gemeten drukken in MGT-2.



Figuur E-3: Vergelijking modeldrukken voor (gestippelde lijnen) en na herkalibratie met gemeten drukken in MGT-3.



Figuur E-4: Vergelijking modeldrukken voor (gestippelde lijnen) en na herkalibratie met gemeten drukken in MGT-4A.



Figuur E-5: Vergelijking modeldrukken voor (gestippelde lijnen) en na herkalibratie met gemeten drukken in MGT-5.

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. De MGT-5 RFT meting van februari 2016 liet een reservoirdruk van 482 bar zien in de ROSLU3+, tegenover 239 in de ROSLU1. Alle drukmetingen weergegeven in Figuur E-5 zijn voor de ROSLU1, de reservoir zone waaruit geproduceerd wordt.

De grotere variatie in voorspelde drukken voor de nieuwe modelrealisaties komt omdat meer modelonzekerheden zijn meegenomen dan voorheen (zie Tabel E-1). Eerder is voor Nes alleen variatie in de permeabiliteit van de aquifer en de verticale permeabiliteit van de lagere reservoir zones meegenomen (Referentie 12). Voor de modelkalibratie zijn niet alleen SPG en CiTHP drukmetingen, maar ook de RFT-drukprofielen, PLT-data en nu ook waterproductie meegenomen.

Dit jaar is onderzoek uitgevoerd naar mogelijke oorzaken voor de discrepantie tussen bodemdalingsmetingen en het bodemdalingsmodel boven het westen van Nes en het oostelijk deel van het Ternaard veld. In het kader van dit onderzoek is voor het Nes veld een modelrealisatie meegenomen met een analytische aquifer aan de noordwest kant. In deze modelrealisatie kan de gemeten druk even goed gereproduceerd worden als in het mid-case model, maar dan met een lager 'Gas volume Initially In Place' (GIIP) en zwakkere connectie met de aquifer onder het Nes veld zelf. De sterkte van de analytische aquifer en de parameters die de mobiliteit van water (ten opzichte van gas) bepalen zijn zo gekozen dat de waterproductie in MGT-4A gereproduceerd wordt. Het model met de analytische aquifer kan de waargenomen waterproductie in MGT-4A goed reproduceren (zie Figuur G-7 in Bijlage G).

Tabel E-1: Nes model parameters⁴

	Laag	Mid	Hoog	Mid model met aquifer
GIIP (Bcm)	16.7	16.7	16.0	15.5
GBV mult	1.000	1.000	0.990	0.993
Contact	3731	3731	3730	3729
AquiferPerm_Mult_log	-0.50	-0.85	1.32	-0.31
Coreygas	2.00	1.80	1.86	1.53
KwEp	0.05	0.05	0.05	0.09
GasSatBelowFWL	0.17	0.18	0.19	0.18
Kv_mult_log_aquifer	-0.50	-0.96	-0.15	-1.54
Fault_NESM_NESS_log	-1.80	-1.75	-1.78	-1.86
LogPermZ_Unit3	-0.50	-0.67	-0.60	-0.98
LogPermX_Top_U1	-0.45	-0.45	-0.39	-0.28
LogPermX_Bottom_U1	0.06	-0.27	-0.18	-0.01
LogPermX_Unit3	0.30	0.10	0.32	0.10

De modelparameters die verschillen tussen de realisaties staan vermeld in Tabel E-1. De realisatie met analytische aquifer (laatste kolom) geeft zeer vergelijkbare drukken als het mid (base) scenario zonder deze additionele aquifer. Er zijn ook realisaties met analytische aquifer te kiezen die de laag en hoog drukprognoses reproduceren. Daarom kunnen de laag/mid/hoog drukprognoses voor het Nes veld elk gecombineerd worden met een depletierrealisatie in het aangrenzende breukblok.

Voor dit breukblok zijn drie drukprognoses meegenomen voor de bodemdalingsberekeningen: één zonder depletie en twee met depletie. Hiervoor is de cumulatieve influx van water vanuit de

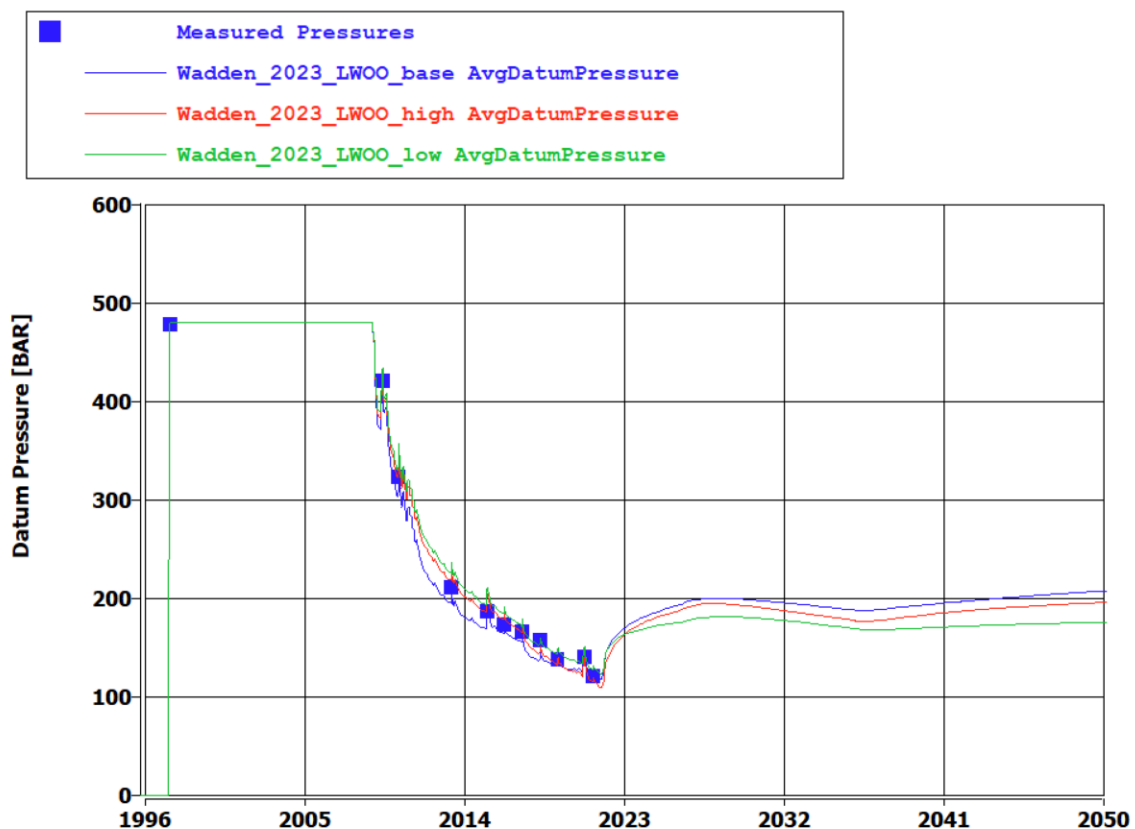
⁴ Voor parameters met "log" in de naam geldt: een parameter waarde van x betekent een multiplicatie van 10^x van de betreffende permeabiliteit of breukdoorlatendheid.

analytische aquifer in het Nes model vertaald in drukafname voor het aangrenzende breukblok (Bijlage G).

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. De verwachting is dat het een aantal jaren zal duren voordat dit mogelijk is. In de tussentijd zal de druk in de put langzaam opbouwen als gevolg van drukequilibratie met het overige deel van het veld. De verwachting is dat de einddatum van productie uit dit veld hetzelfde blijft. Daardoor zal de totale productie uit dit voorkomen lager zijn dan eerder verwacht.



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

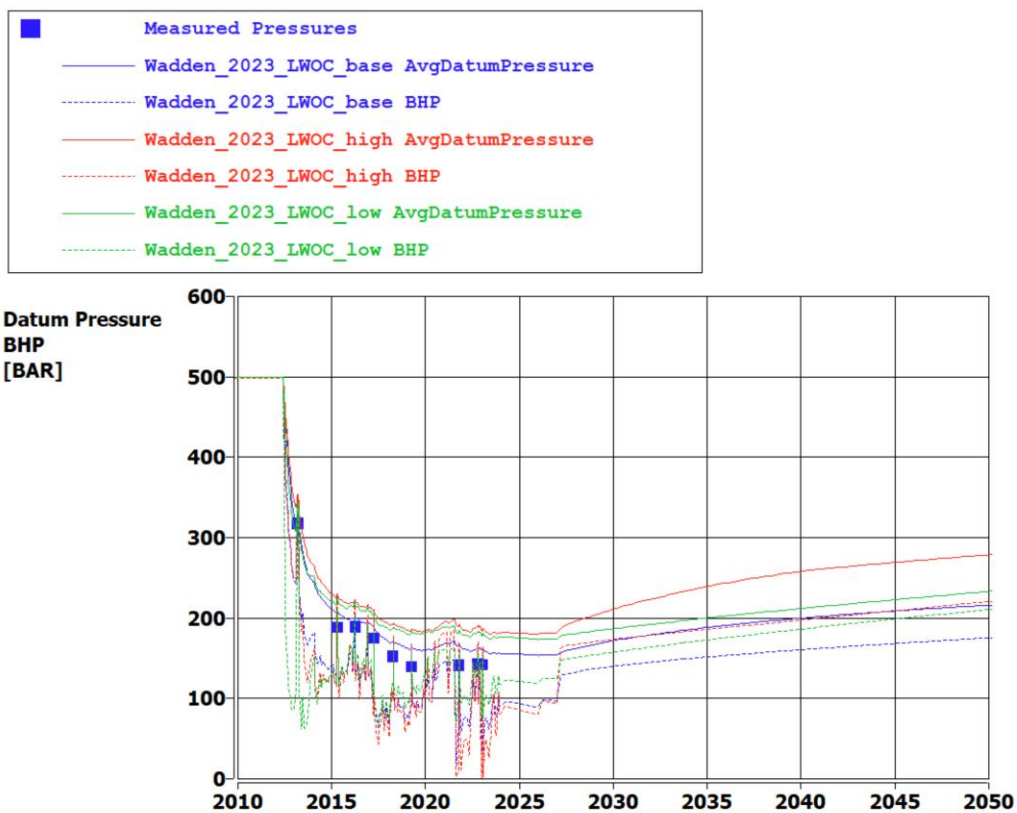
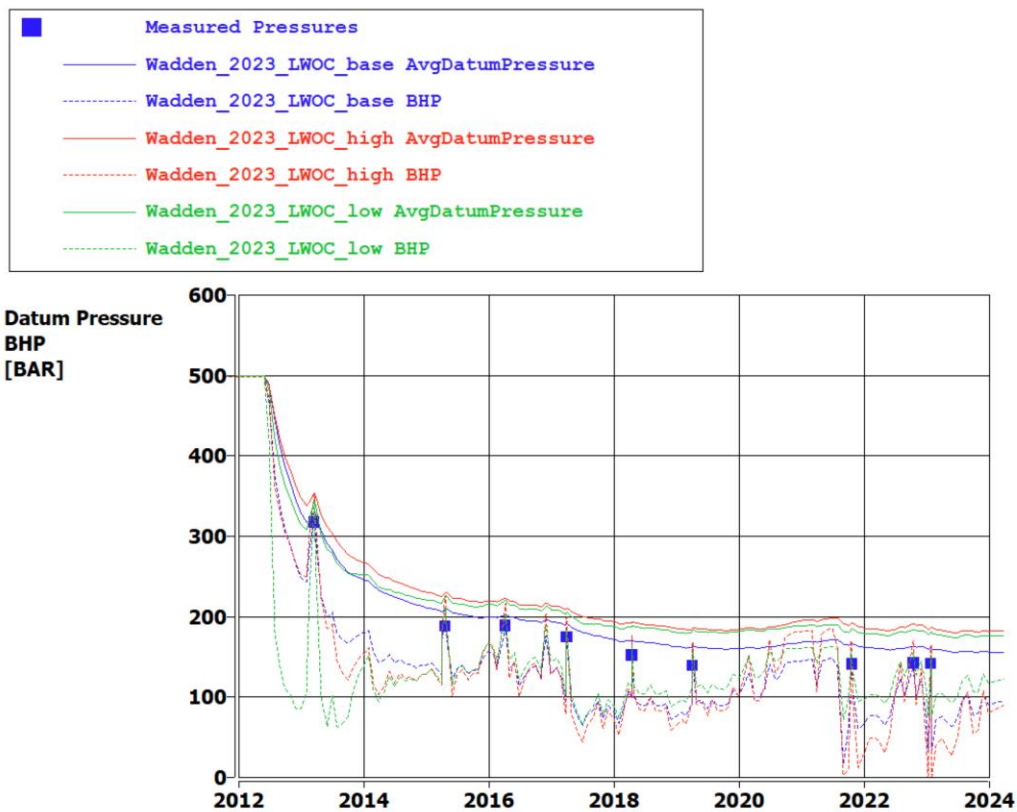
E.4 Lauwersoog Centraal

Het gas uit het Lauwersoog Centraal veld wordt geproduceerd met put LWO-2. Dit veld is het kleinste Waddenveld. De 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 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 tot 2024 te zien zijn en onder tot 2050. 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.

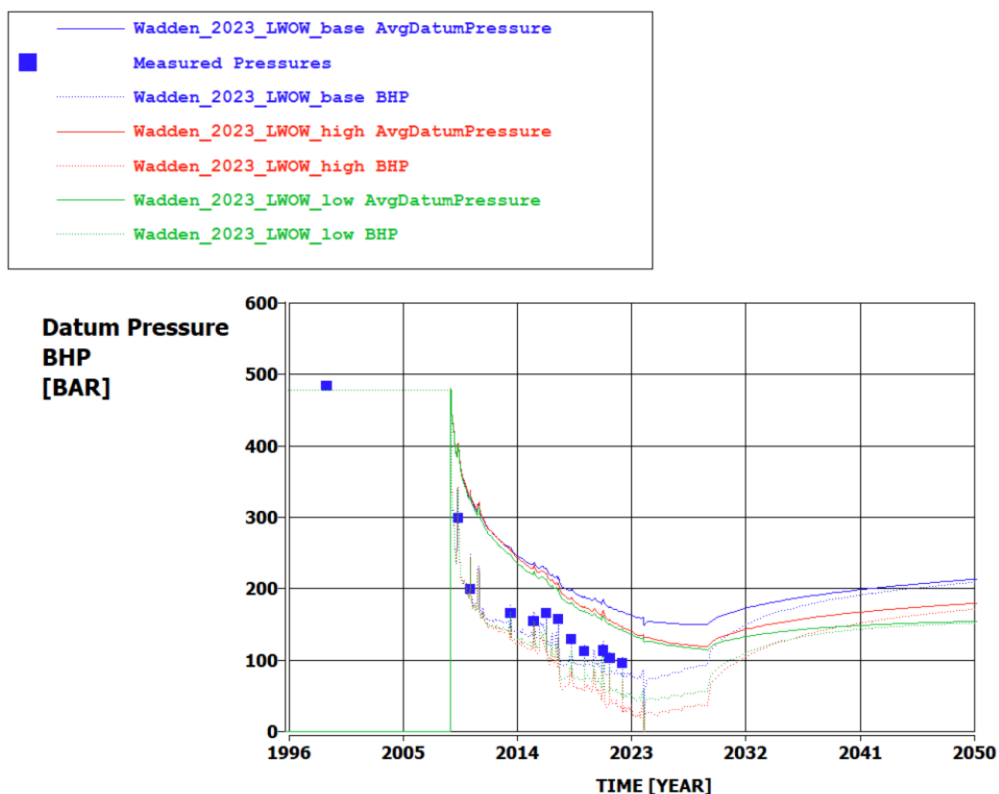
Ook nadat productie uit LWO-2 gestopt is blijft de *bottom-hole* druk in het model lager dan de modeldruk die gebaseerd is op een gemiddelde van *alle* geperforeerde reservoirzones, zie de onderste grafiek in Figuur E-7. Dit komt omdat er door de zeer slechte verticale doorlatendheid een groot drukverschil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



Figuur E-7: LWO-2 gemeten drukken en hoog/mid/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 2012 tot 2024, terwijl de onderste figuur voor de periode 2010 tot 2050 is.

E.5 Lauwersoog West

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

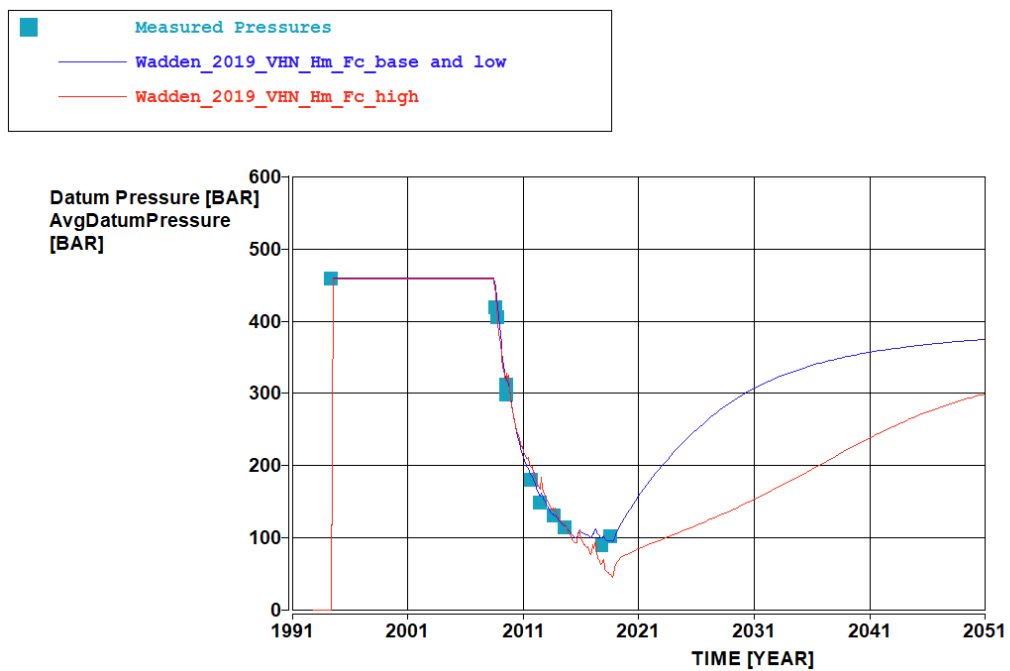


Figuur E-8: LWO-3 gemeten drukken en hoog/mid/laag drukprognoses weergegeven met doorgetrokken lijnen. De gestreepte lijnen geven de drukken weer onder in de put (bottom-hole drukken).

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 laat zien dat de druk rondom de put groter wordt, doordat de druk in het reservoir in evenwicht komt met de hogere drukken in de aquifer. De gemeten druk in 2018 is in goede overeenstemming met de *midllage* 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 gebruiksruijmtte blijft.



Figuur E-9: VHN-1C gemeten drukken en hoog/mid/laag drukprognoses.

F. Bijlage F: Autonome diepe-bodembeweging.

In het advies van de Auditcommissie over de Meet- en regelcyclus van 2020 (Referentie 32) werd aanbevolen om de autonome diepe-bodembeweging en de lokale verschillen daarin in de metingen te verdisconteren waarmee de modellen voor de diepe ondergrond worden gekalibreerd. Het betreft de bodemdaling dieper dan de top van de Pleistocene laag, die door andere processen dan de gaswinning wordt veroorzaakt.

Naar aanleiding van deze aanbeveling is onderzocht wat de ordegrootte en mogelijke lokale verschillen van de autonome diepe-bodembeweging zouden kunnen zijn in het Waddengebied, en het effect van een eventuele correctie in de procedures van de Meet- en Regelcyclus. Voor het onderzoeken van het effect zijn de resultaten gebruikt van de meet- en regelrapportage over 2021.

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

Autonome diepe-bodembeweging

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

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

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

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

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

In het advies van de Auditcommissie wordt verwezen naar het TNO-rapport 'Bodemdaling in Nederland' (Referentie 34). Deze bevat een figuur met verticale bewegingen van het Pleistoceen bepaald uit waterpasmetingen van ondergrondse merken uit 2000. Naar dit figuur wordt in het TNO-rapport verwezen voor de kantelende beweging langs een noordoost-zuidwest lijn in Nederland veroorzaakt door isostasie. Verder wordt verwezen naar een recentere bepaling van diepe-bodembeweging in Leusink, 2003 (Referentie 27). Hier wordt de geologische bodembeweging berekend op basis van waterpasgegevens over heel Nederland. Data in Noord-Nederland is buiten beschouwing gelaten vanwege de gaswinning. Isostasie is hier, naast delfstofwinning, een oorzaak van de beweging van meetpunten (ondergrondse merken) die resulteert in een schatbaar (klein) signaal.

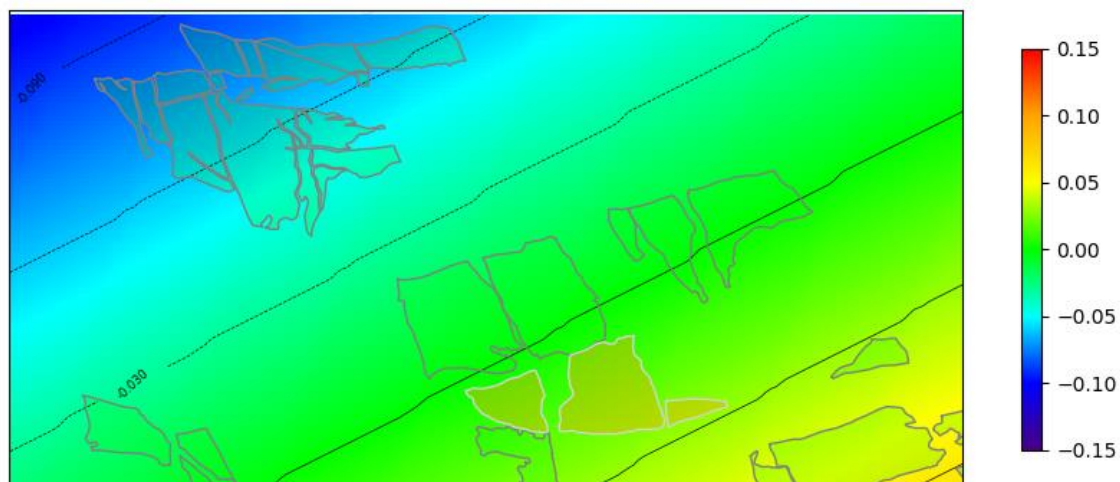
De orde grootte van de geologische bodembeweging is ca. 0,4 mm/jaar over een afstand van 100 km, en bij benadering een lineair ruimtelijk patroon. De patronen zijn echter niet geheel gelijk indien verschillende gebieden worden geprocessed.

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

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

Om het effect van een mogelijke component van autonome diepe-bodembeweging te kwantificeren is er een extra run van de confrontatie-workflow uitgevoerd, waarbij is gecorrigeerd voor autonome diepe-bodembeweging. Hierbij is uitgegaan van de benadering van het patroon van autonome diepe-bodembeweging in de noordoost-zuidwest richting, met een ruimtelijk relatief verschil in het Waddenzeegebied van 0,2 mm/jaar (+/- ~0,1 mm/jaar onzekerheid), zie Figuur F-1. Dit is een grotere magnitude dan de isostasie component in Kooi, 1997 (Referentie 33), en komt bij benadering overeen met de diepe-bodembeweging bepaald uit peilmerkbewegingen in Leusink, 2003 (Referentie 27).

Zoals hierboven is toegelicht wordt deze correctie al impliciet toegepast bij InSAR, en is daarom alleen van de gemeten bodembeweging afgetrokken die met behulp van de waterpassing en GNSS-metingen is bepaald. De confrontatie tussen geodetische data en geomechanische modellen gebeurt op dubbel-differentie niveau (tussen twee peilmerken en tussen twee tijdstippen). De relatieve correcties die de dubbel-differenties ondergaan zijn dus afhankelijk van de afstand tussen de meetpunten van de dubbel-differenties en zullen zeer klein zijn indien het naburige meetpunten betreffen.



Figuur F-1: Benaderde mogelijk autonome diepe-bodembeweging in het waddengebied, in mm/jaar.

Na correctie van de dubbel-differenties op basis van waterpas- en GNSS-metingen zijn in de confrontatie met de geomechanische modellen de χ^2/n toetsgrootheden berekend. De verschillen in de χ^2/n zijn zeer klein. Het effect op de kalibratie uit zich in het derde cijfer achter de komma (kleiner dan 0,2%) en heeft tot gevolg dat er geen andere bodemdalingsscenario's worden geselecteerd. Dit wordt getoond in Tabel 2-F-1.

Tabel 2-F-1: Minimale χ^2 toetsgrootheid voor de vier kalibratiegebieden, zonder en met gebruikmaking van de autonome daling.

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

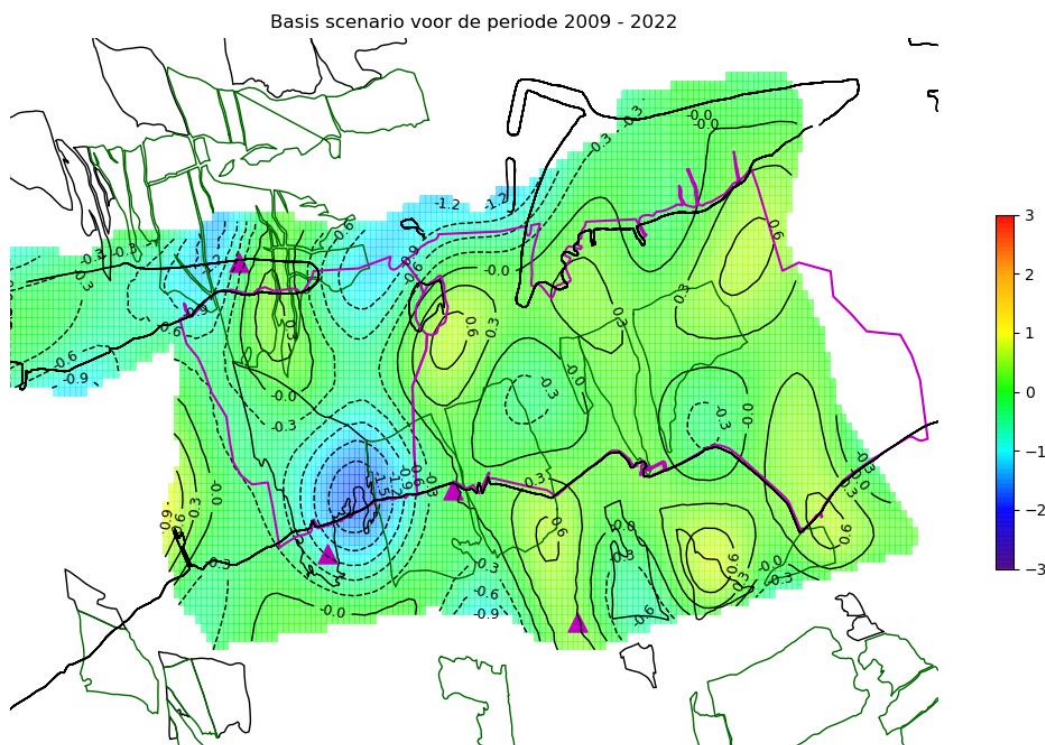
G. Bijlage G: Onderzoek naar de discrepantie tussen meting en model in het gebied bij Wierum

G.1 Introductie

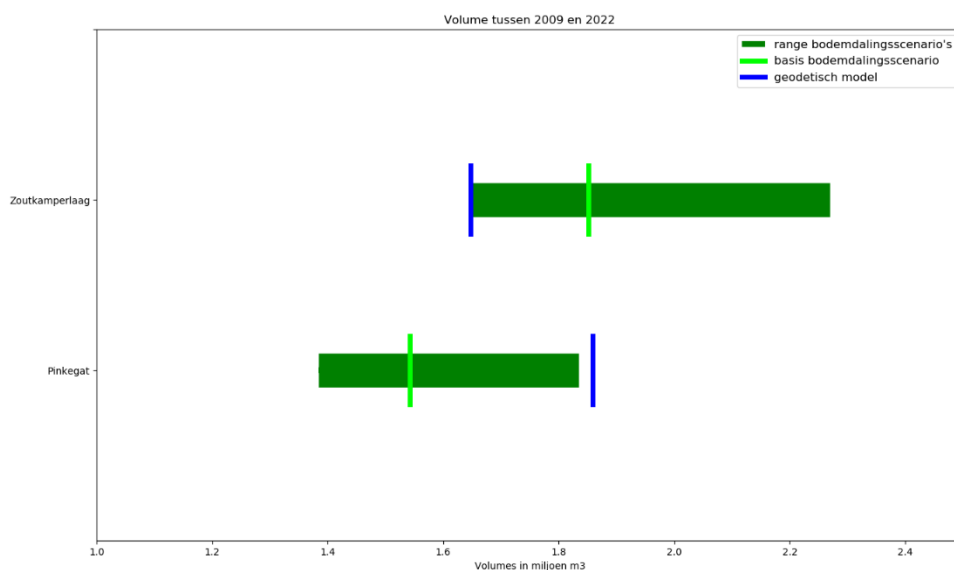
In de jaarlijkse Meet- en regelcyclus voor de Waddenzee wordt een vergelijk gemaakt van de bodemdaling tussen het geodetische model en het geomechanische model. Het geodetische model betreft een ruimte-tijd analyse van de beschikbare metingen met waterpassing, GNSS (Global Navigation Satellite System, GPS) en satelliet-radarinterferometrie (Interferometric Synthetic Aperture Radar; InSAR). Het geomechanische model is gebaseerd op de kenmerken van de diepe ondergrond. Dit model berekent de compactie van het gasvoerend reservoir op ongeveer 3 km diepte. Het model berekent vervolgens de bodemdaling aan het aardoppervlak. Het geomechanische model wordt jaarlijks gekalibreerd aan alle beschikbare geodetische metingen.

Van zowel het geodetische model als het geomechanische model kan voor verschillende tijden een grid worden gegenereerd. Het verschil tussen de grids levert een verschillenkaart op die ook jaarlijks wordt gerapporteerd in de meet- en regelrapportage.

Op de verschillenkaart (Figuur 2-7) valt een geringe afwijking waar te nemen in het gebied net ten westen van het Nes veld, met het centrum van de kom net ten noordwesten van het dorp Wierum. In het blauwe gebied wordt een verschil tot maximaal 1,7 cm over een periode van 13 jaar waargenomen, ongeveer 1,4 mm/jaar. De afwijking tussen het geomechanische en geodetische model verklaart voor een belangrijk deel ook de observatie in Figuur G-2; in Pinkegat valt het ingeschatte bodemdalingsvolume volgens het geodetische model net buiten het bereik van de volumes volgens het geomechanische model. Voor een belangrijk deel wordt dit veroorzaakt door de bodemdaling volgens het geodetische model ten westen van Nes.



Figuur G-1: Verschil (in cm) tussen de gemodelleerde bodemdaling volgens het basis bodemdalingsscenario en het geodetische model voor de periode 2009-2022. 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 (Referentie 6).



Figuur G-2: Vergelijking van de bandbreedte aan bodemdalingsvolumes, uit de M&R rapportage over 2022, volgens de geomechanische modellen (groene balk) met het volume volgens het geodetische model voor de periode 2009-2022 (blauwe streep), Referentie 6.

G.2 Mogelijke verklaringen voor de discrepantie tussen de 2 modellen

Omdat het hier een vergelijk betreft tussen twee modellen, moet er gekeken worden naar mogelijke verklaringen die kunnen voortkomen uit zowel het geodetische als het geomechanische model.

Mogelijke verklaringen die onderzocht en beschreven worden in deze notitie zijn:

- Bodemdaling door ondiepe natuurlijke processen
- Imperfecties in de ondergrondmodellen
- Imperfecties in de geodetische metingen en modellen
- Bodemdaling veroorzaakt door bebouwing

Deze 3 punten werden ook aangedragen in Referentie 6 als mogelijke oorzaken. Additioneel zal er ook gekeken worden naar mogelijke imperfecties in de metingen en het geodetische model. Waar mogelijk, zullen op basis van de bevindingen voorstellen worden gedaan om de passing tussen de modellen te verbeteren.

Bodemdaling door ondiepe natuurlijke processen:

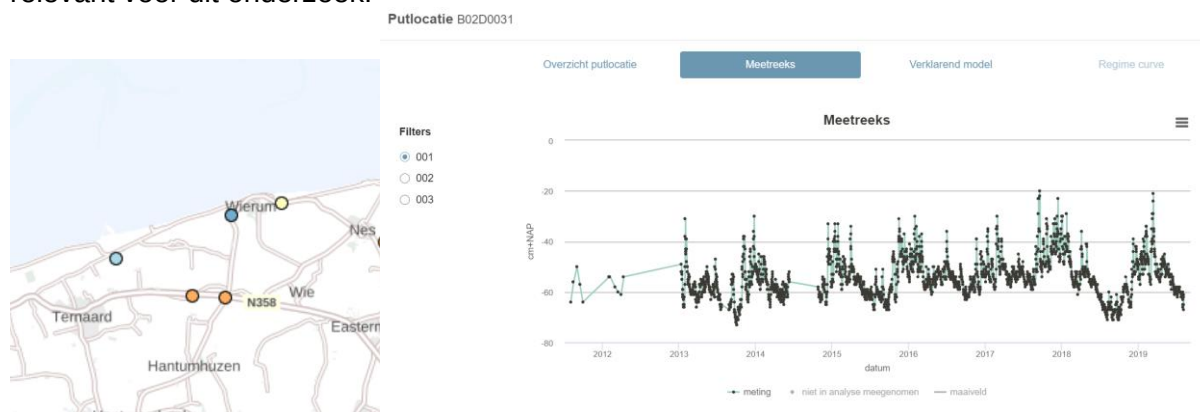
In deze sectie wordt beschreven of bodemdaling door ondiepe natuurlijke processen een mogelijke rol kan spelen in de verklaring voor het verschil tussen de twee modellen in het gebied rondom Wierum. Mogelijk kan het zijn dat de ondiepe ondergrond hier gedaald is door autonome (natuurlijke) processen die beïnvloed worden door klimaatverandering en waterpeilindexatie (Referentie 36).

Met name veenlagen zijn gevoelig voor waterpeilverandering en dat geldt in mindere mate voor kleilagen. Veen kan oxideren na ontwatering waarna de bodem kan deformeren door het eigen gewicht of door het gewicht van lagen boven de veenlaag. Kleien hebben na ontwatering minder draagkracht en zullen daarom mechanische zetting vertonen onder invloed van het eigen gewicht.

Het is dus mogelijk dat de bodem rondom Wierum extra gevoelig is voor grondwaterstandvariatie en/of dat dit gebied een ander grondwaterniveau kent dan het gebied er rondom. Om dit verder te onderzoeken is er gebruik gemaakt van publieke bronnen.

Beschikbare gegevens over grondwaterstand

De beschikbare informatie over grondwaterstanden is beperkt in dit gebied, maar in het midden van het onderzoeksgebied, net ten westen van Wierum, staat één peilbuis met een meetreeks die relevant is voor de periode waarover ook de gaswinning plaatsvindt (Figuur G-3). Het figuur toont het niveau van de freatische grondwaterstand voor de periode 2012-2020. Afgezien van de seizoensgebonden fluctuaties lijkt de gemiddelde grondwaterstand redelijk stabiel. De peilbuizen in de omgeving bevatten slechts data tot eind vorige eeuw en zijn daardoor niet relevant voor dit onderzoek.



Figuur G-3: links; locatie van de peilbuis B02D0031 (blauwe rondje bij het dorp Wierum). rechts; grondwaterstand van het meest ondiepe filterniveau.

<https://www.grondwatertools.nl/gwsinbeeld/>

Bodemsamenstelling

Naast de grondwaterstand dient ook de zettingsgevoeligheid van de bodem te worden onderzocht. Zoals eerder is aangegeven is klei relatief gevoelig voor mechanische zetting en veen voor oxidatie. Fluctuaties in met name deze lagen kunnen leiden tot zetting en daardoor daling van het maaiveld. Figuur G-4 toont de lagenopbouw van de ondiepe ondergrond volgens het geotop model (V1.6)⁵. Dit is gedaan voor 2 punten, nl. het punt B02D0031, waar ook eerder de grondwaterstanden van zijn getoond, en het punt B02D0180 net ten westen hiervan. Het punt B02D0031 toont gemiddeld een zandige bodem zonder het voorkomen van organisch materiaal (veen). Het punt B02D0180 toont meer klei en bevat tevens een dunne laag veen. Op basis van de waterstanden volgens het punt B02D0031 en aannemende dat deze waterstand representatief is voor punt B02D0180, wordt geconcludeerd dat deze dunne veenlaag ruim onder het mogelijk freatische niveau ligt.

⁵ <https://www.broloket.nl/ondergrondmodellen/kaart>

Boormonsterprofiel en interpretatie BRO GeoTOP v1.6

Identificatie: B02D0031
 Coördinaten: 196360, 601598 (RD)
 Maaiveld: 1.16 m t.o.v. NAP
 Diepte t.o.v maaiveld: 0.00 m - 17.00 m

Diepte t.o.v maaiveld in meters

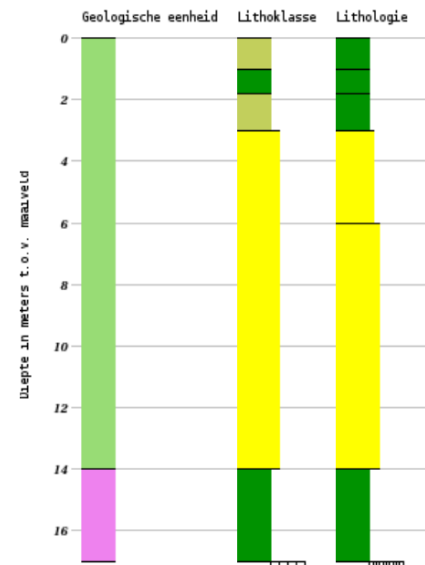
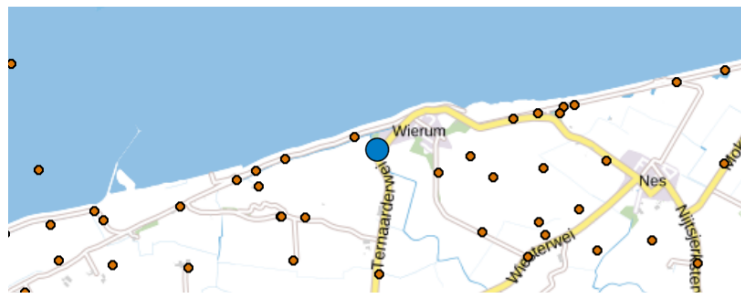
Tussen 0 en 17 m

Opslaan profiel

Maaiveld

Kies een ander model

BRO GeoTOP v1.6



Boormonsterprofiel en interpretatie BRO GeoTOP v1.6

Identificatie: B02D0180
 Coördinaten: 195479, 601508 (RD)
 Maaiveld: 1.37 m t.o.v. NAP
 Diepte t.o.v maaiveld: 0.00 m - 6.66 m

Diepte t.o.v maaiveld in meters

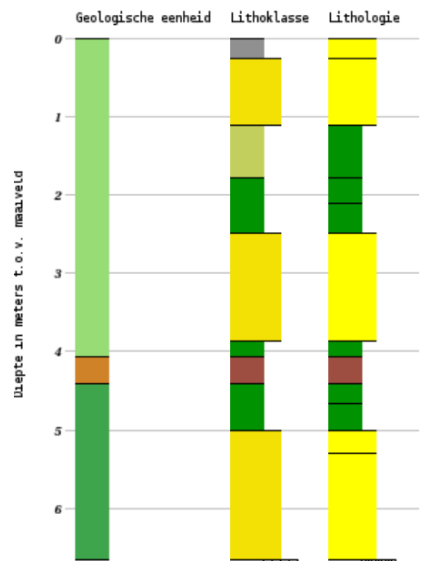
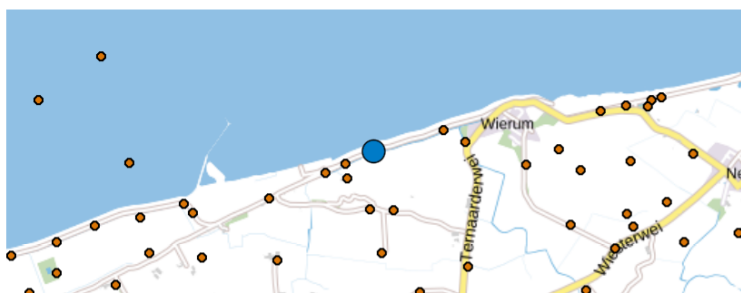
Tussen 0 en 6.66 m

Opslaan profiel

Maaiveld

Kies een ander model

BRO GeoTOP v1.6

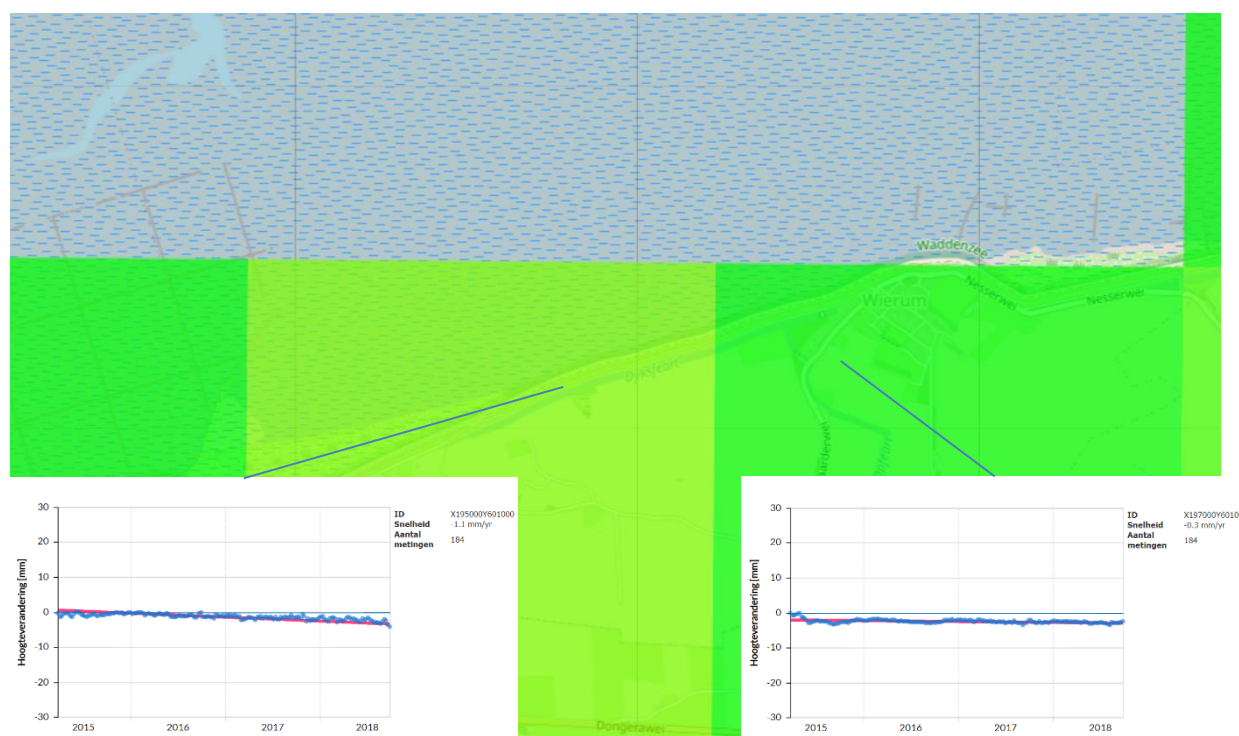


Figuur G-4: boven; bodemprofiel van de peilbuis B02D0031; onder; bodemprofiel van de peilbuis B02D0180.

Op basis van de beschikbare informatie over grondwaterstand en bodemgesteldheid kan worden geconcludeerd dat dit gebied weinig gevoelig is voor autonome daling.

Metingen van ondiepe daling

Zoals beschreven in de voorgaande sectie, wordt de gemeten bodemdaling in dit gebied veroorzaakt door de gaswinning en mogelijke autonome daling. Bodemdalingkaart.nl (versie 1.0) toont de InSAR bodemdalingsdata en tracht deze metingen te scheiden in een daling veroorzaakt door ondiepe mechanismen en door diepe mechanismen zoals de gaswinning. Uit de beelden van de periode 2015-2018 is geconcludeerd dat de daling in het gebied veroorzaakt door ondiepe mechanismen bij Wierum zeer beperkt is (0,3 mm/jaar) en net ten westen van Wierum beperkt is tot ongeveer 1,1 mm/jaar. De precisie waarmee een snelheid kan worden geschat uit InSAR waarnemingen over een periode van 3 jaar ligt in de orde van 1 mm/jaar. De snelheden voor ondiepe bodemdaling in het Wierum gebied uit de Bodemdalingkaart zijn daarmee (nog) niet significant. Er is in ieder geval geen sprake van dalingssnelheden van meerdere mm/jaar voor de ondiepe componenten gerelateerd aan InSAR meetpunten (veelal corresponderend met consistent reflecterende, gefundeerde natuurlijke objecten in het terrein).



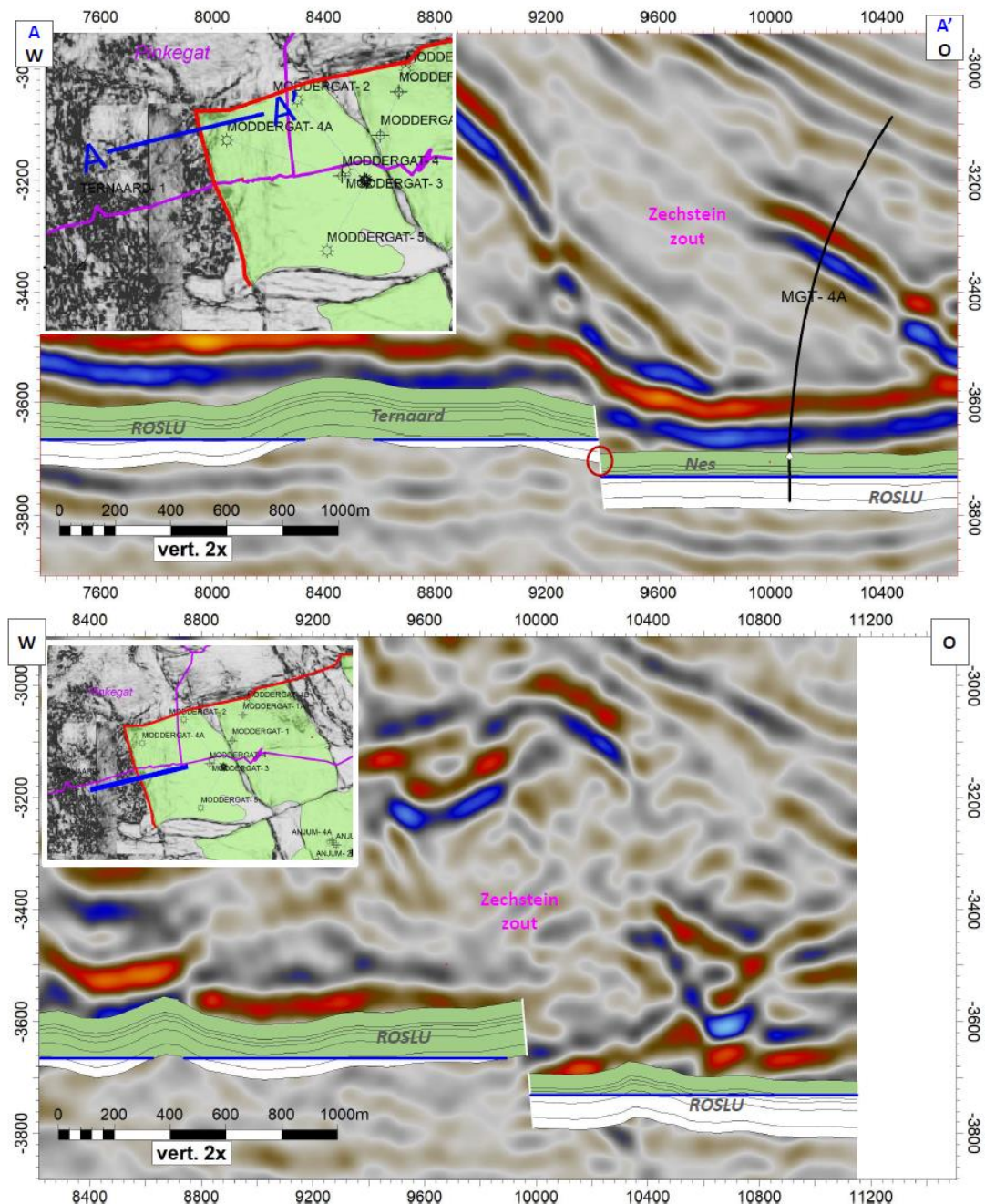
Figuur G-5: gemeten gemiddelde daling door InSAR voor de periode 2015-2018.

G.3 Imperfecties in de diepe ondergrondmodellen

Ieder model van de ondergrond is een vereenvoudiging van de werkelijkheid waarbij de bodemdalingsvoorspelling uiteindelijk berekend wordt via een keten van modellen. De schakels van deze keten bestaan uit een geologisch model van de ondergrond, het reservoirsimulatiemodel en als laatste het geomechanische model. In al deze modellen bestaat een onzekerheid over de heterogeniteit van de invoergegevens en de benadering van het werkelijke fysische gedrag. Deze onzekerheden zijn verder onderzocht in de LTS-II studie (Referentie 13). Deze studie leverde een stochastische beschrijving van de passing van de modellen met de data.

Met behulp van dezelfde methodiek zullen de verschillen tussen meting en model ten westen van het gasveld Nes verder onderzocht worden. Met name zal er gezocht worden naar mogelijkheden van drukdaling in het breukblok dat ten westen van het gasveld Nes ligt. Voor dit breukblok is niet aangetoond of het blok water- of gedeeltelijk gasvoerend is. Tussen het Nes gasveld en dit breukblok loopt een noordnoordwest-zuidzuidoost breuk met een normaal verzet (NNO-afschuiving). Mogelijke communicatie tussen het breukblok en Nes is al eens onderzocht in Referentie 37. Deze notitie beschrijft de structurele geologie van het Waddengebied en met

name de mogelijkheid van breukcommunicatie tussen gasvoerende en watervoerende breukblokken voor de verschillende gasvelden. De westelijke randbreuk van het Nes veld is nauwkeurig onderzocht op mogelijke zandsteen-zandsteen overlap aan weerszijden van de breuk. Figuur G-6 toont een aantal doorsneden over de breuk van noord naar zuid. Op basis van deze doorsneden valt waar te nemen dat het verzet over de breuk toeneemt van noord naar zuid.



Figuur G-6: Inzet: overzichtskaart van de Waddenzee gasvelden Nes en Moddergat en putten. In rood zijn de randbreuken aangegeven die besproken worden in dit rapport, de paarse markering laat de kombergingsgebieden zien. De dwarsdoorsneden die voor de analyse gebruikt zijn aangegeven in blauw en getoond in de grotere figuren (Referentie 37).

Referentie 37 beredeneert in 2020 dat drukcommunicatie tussen het Nes gasveld en het naastgelegen breukblok onwaarschijnlijk is omdat de gas-watercontacten verschillend zijn en omdat er geen grote watervolumes zichtbaar waren in de meest westelijke put in het Nes

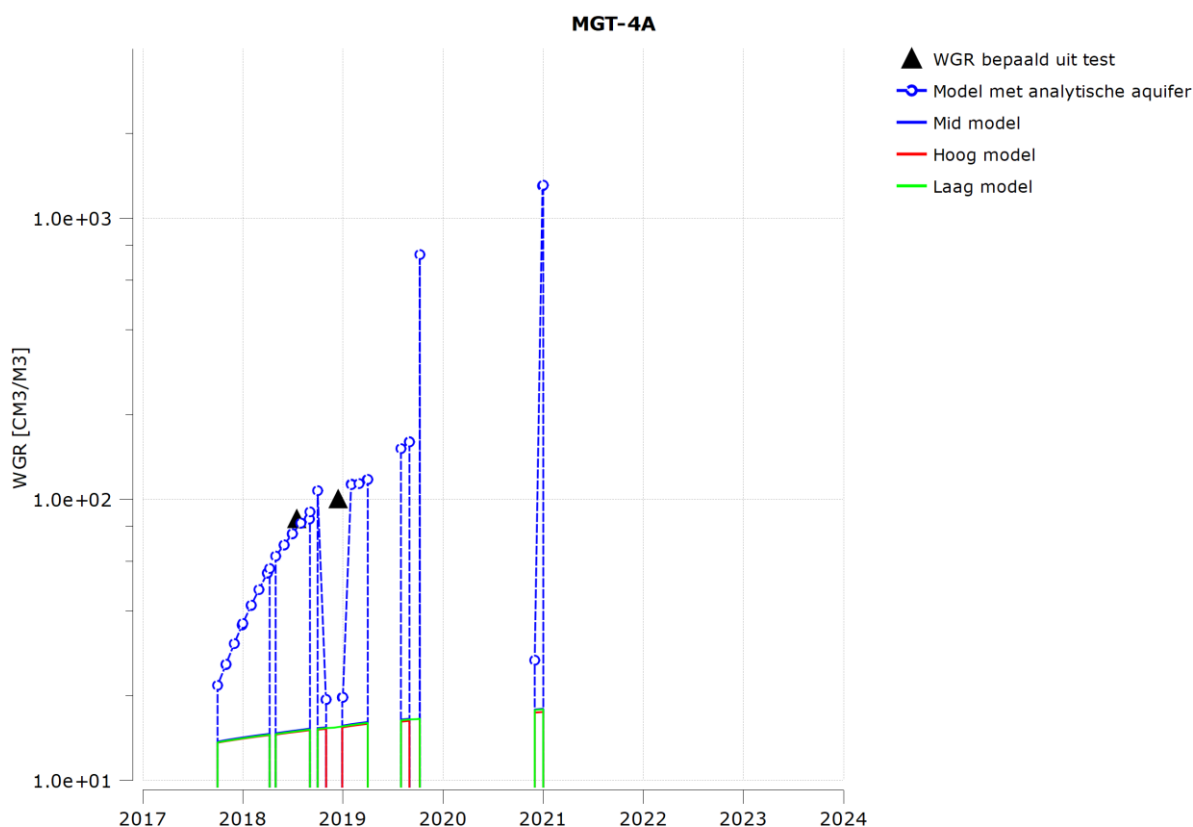
gasveld, nl. MGT-4A. MGT-4A is echter inmiddels ingesloten vanwege water productie, waarbij het niet duidelijk is of het water afkomstig is uit de diepere lagen van het Nes gasveld of dat toch de mogelijkheid bestaat dat het water uit het naastgelegen blok afkomstig is. In het laatste scenario zal de doorlatendheid van de breuk moeten zijn toegenomen door de drukdaling in het Nes veld, waardoor een groter drukverschil over de breuk ontstaat. Uitgaande van dit geologische scenario zijn er verschillende drukrealisaties gemaakt voor het naastgelegen blok dat in connectie staat met het Nes gasveld.

G.4 Onderzoek mogelijke connectie Nes-breukblok met het Nes dynamische model

Er zijn vier putten in het Nes veld: MGT-2, MGT-3, MGT-4A en MGT-5. Momenteel is MGT-4A ingesloten vanwege hoge water productie. Deze put bevindt zich dicht bij het naastgelegen breukblok, zoals te zien in het bovenste plaatje in Figuur G-6. MGT-4A heeft relatief weinig gas geproduceerd, voornamelijk tussen september 2017 en begin 2019. In 2018 is er tweemaal een test uitgevoerd waaruit de water-gas-ratio (WGR) van MGT-4A bepaald is. Deze testen gaven aan dat er formatiewater geproduceerd werd in MGT-4A, in tegenstelling tot de andere putten. Voor de andere drie putten komt de WGR overeen met de verwachte hoeveelheid water dat condenseert uit het geproduceerde gas. MGT-2 en MGT-5 hebben in het verleden wel tijdelijk formatiewater geproduceerd. Deze putten waren toen geperforeerd in twee reservoir zones: ROSLU1 boven en ROSLU3+ onder de ROSLU2 shale. Sinds de afsluiting van de perforaties in de onderste reservoir zone produceren MGT-2 en MGT-5 alleen nog gecondenseerd water. MGT-4A is alleen geperforeerd in de ROSLU1 boven de ROSLU2 shale. De huidige Nes modellen kunnen de waargenomen WGR in MGT-4A niet verklaren. De mogelijkheid dat de waterproductie in MGT-4A het gevolg is van instroom van water door een connectie met het naastgelegen breukblok ten westen van Nes is in deze studie onderzocht. Een andere mogelijke verklaring voor de MGT-4A WGR zou kunnen zijn dat de doorlatendheid van de ROSLU2 shale (lokaal) minder slecht is dan in het model is aangenomen. De ROSLU2 heeft een zeer lage permeabiliteit in het model, om het waargenomen drukverschil tussen de ROSLU1 en ROSLU3+ reservoirs te kunnen verklaren.

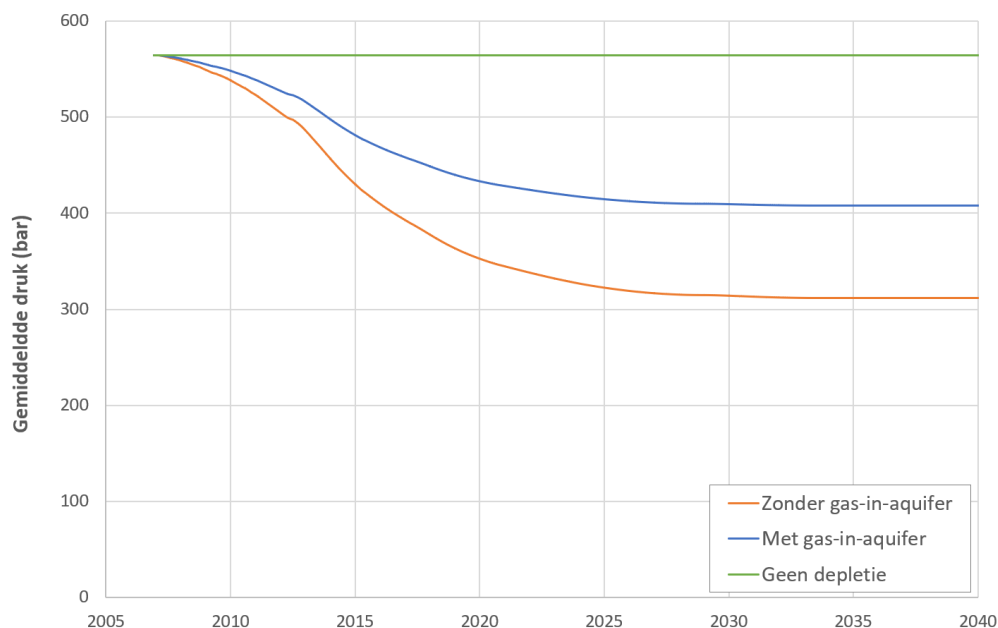
Er is een nieuwe realisatie van het dynamisch model gemaakt met een analytische aquifer in de noord-westelijke hoek van Nes. Deze aquifer staat alleen in verbinding met de ROSLU1, zoals op de bovenste doorsnede van Figuur G-6 te zien is in de rode cirkel. Het model met de analytische aquifer is gekalibreerd zodat het een vergelijkbare history-match geeft als de modellen zonder aquifer. Het model met aquifer heeft een 7% lagere GIIP (gas initially in place) dan het basismodel zonder aquifer.

De sterkte van de analytische aquifer in het model is zo gekozen dat de WGR van MGT-4A in 2018 gereproduceerd wordt. Figuur G-7 laat zien dat de drie modelrealisaties zonder aquifer een veel lagere WGR voorspellen, in lijn met gecondenseerd water. De nieuwe realisatie met aquifer laat een toename van water productie in MGT-4A zien, ruim boven de WGR die voor gecondenseerd water verwacht wordt. Deze gemodelleerde WGR is in lijn met de testen in 2018 en de observatie dat MGT-4A nu ingesloten is vanwege water productie.



Figuur G-7: Door de modellen voorspelde en gemeten WGR in MGT-4A. De resultaten voor het Laag, Mid en Hoog scenario liggen (gedeeltelijk) over elkaar.

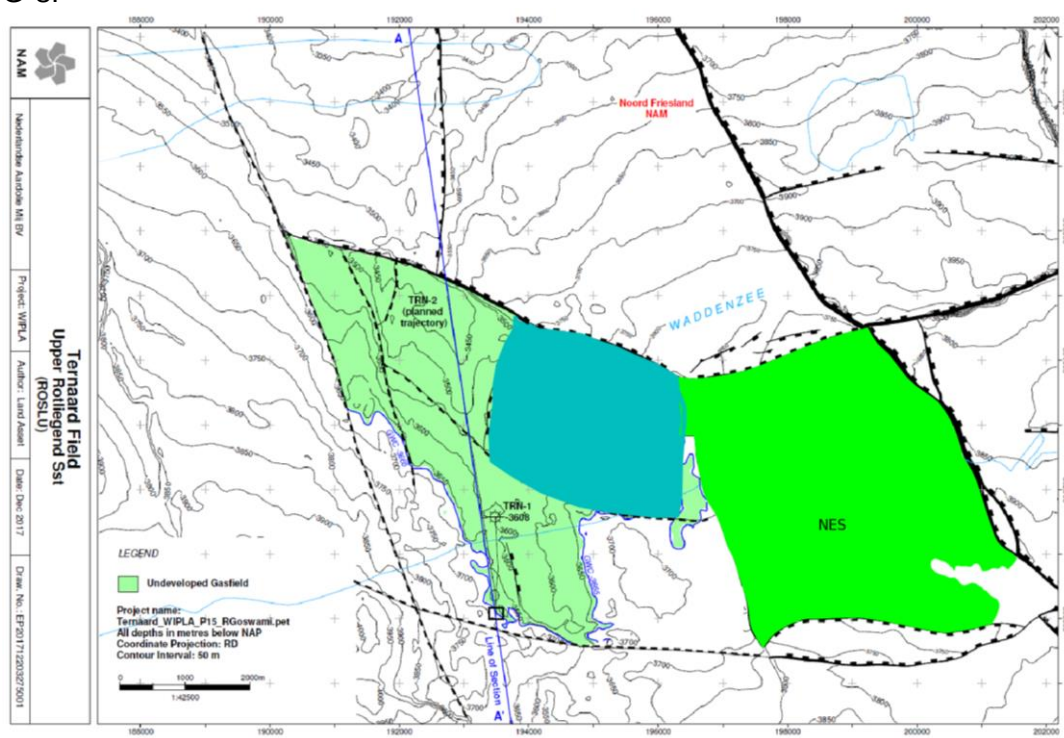
De aquiferinflux over de tijd uit het reservoirsimulatiemodel met analytische aquifer kan worden vertaald in depletie van het naastgelegen breukblok ten westen van MGT-4A met behulp van een aantal aannames. De verplaatsing van water vanuit het breukblok naar het Nes veld is direct gerelateerd aan de expansie van water en gas in het breukblok. Twee depletierrealisaties zijn meegenomen. Vanwege het verzet langs de breuk is aangenomen dat zowel het gas als het water in alleen de onderste reservoirzone (ROSLU3+) in het breukblok in druk dalen. Dit betreft naar schatting 1,2 miljard Nm³ gas en rond 40 mln sm³ water. De geschatte volumes in het breukblok bevatten veel onzekerheid. Het geologische model is gebaseerd op seismische data en waarnemingen van de Ternaard-1 put, dat zich in een ander breukblok bevindt. Aangenomen is dat het gas in de ROSLU1 (boven de ROSLU2 shale) niet mee depleteert. Figuur G-8 toont de drie gebruikte druk-prognoses voor het breukblok ten westen van Nes. Voor de realisatie met de meeste depletie (oranje lijn in Figuur G-8) is aangenomen dat zich onder het verwachte gas-water-contact alleen water bevindt. De tweede realisatie (blauwe lijn in Figuur G-8) houdt rekening met 15% gas saturatie in de aquifer, vergelijkbaar met wat is gebruikt in de modellen voor de andere Waddenzee velden zoals ook Nes. Dit extra gas geeft de aquifer meer compressibiliteit, waardoor een vergelijkbare mate van expansie (lees waterverplaatsing naar Nes) minder drukdaling in de aquifer tot gevolg heeft. Ook een scenario zonder depletie (groene lijn in Figuur G-8) is meegenomen. Dit is het scenario dat gebruikt werd in voorgaande M&R rapportages.



Figuur G-8: Drie druk realisaties voor het naast Nes gelegen breukblok. Dit betreft de druk in de onderste zones (ROSLU3+) die samen ongeveer 70 m dik zijn.

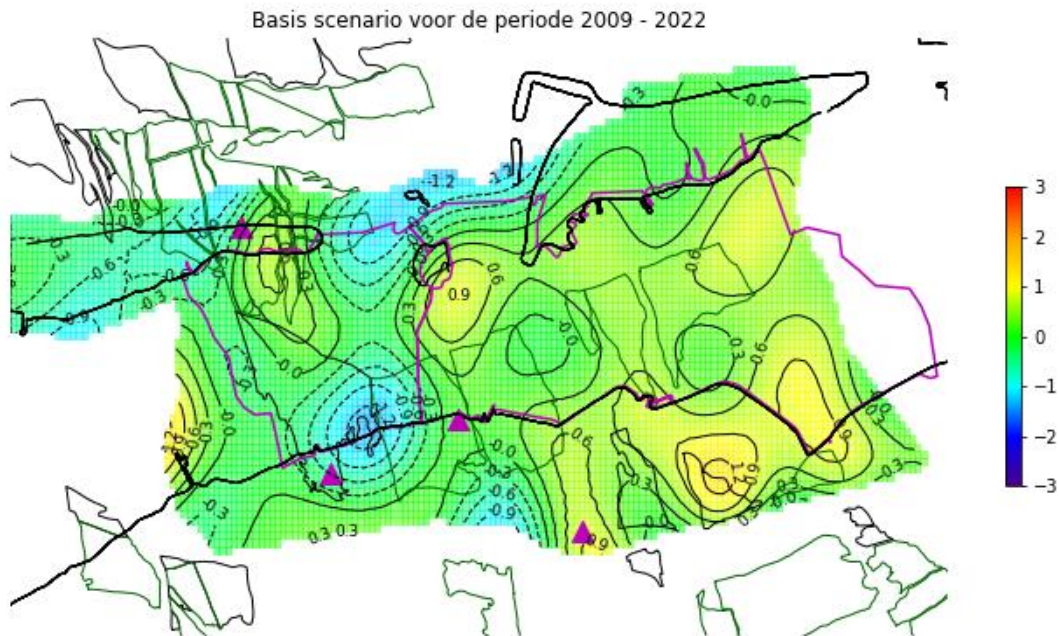
bodemdalingsscenario's voor Nes

Om te bepalen of de discrepantie tussen het geomechanische bodemdalingsmodel en het geodetische model kan worden verkleind is gebruik gemaakt van de drukrealisaties zoals beschreven in de vorige sectie. Het bodemdalingsmodel voor het breukblok gaat uit van een reservoirdikte van 70 m en een porositeit van 15%. De C_m -waarde van het gesteente is dezelfde als gebruikt voor Nes. Het oppervlak van het breukblok is getoond in Figuur G-9. De drukrealisaties, die zijn doorgerekend door het bodemdalingsmodel, zijn getoond in Figuur G-8.



Figuur G-9: spatiële extensie van het breukblok (blauw) ten westen van Nes.

Uit de analyse van de 3 bodemdalingsscenario's blijkt dat het scenario dat de drukrealisatie "zonder-gas-in-water" meeneemt het kleinste verschil geeft met het geodetisch model. Deze realisatie is ook opgenomen voor de berekeningen van de bodemdaling in de M&R 2023 cyclus. Een vergelijking van de M&R 2023 analyse met de Sure analyse is getoond in Figuur G-10. Figuur 2-7 toont dezelfde figuur maar nu met de M&R2022 analyse, zonder de extra Nes aquifer. In vergelijking tussen de figuren laat zien dat het verschil tussen het geomechanische model en geodetische model kleiner is, maar nog steeds significant. Mogelijkerwijs kan (een deel van) de verklaring gezocht worden in het geodetische domein.



Figuur G-10: Verschil (in cm) tussen de gemodelleerde bodemdaling volgens het basis bodemdalingsscenario en het geodetische model voor de periode 2009-2022. Nu getoond met het M&R 23 model inclusief de drukdaling in het breukblok volgens de "zonder-gas-in-water" drukrealisatie.

G.5 Imperfecties in de geodetische ruimte-tijd analyse

Het geodetische model is het resultaat van een ruimte-tijd analyse van waterpas-, GNSS- en InSAR-metingen. In deze analyse worden de metingen op uitschieters getoetst, opdat inconsistenties in de meetdata niet doorwerken in het eindresultaat. Dit bestaat uit een glad oppervlak in ruimte en tijd en kan van de exacte meetwaarden afwijken. In dit hoofdstuk wordt gekeken, in hoeverre de meetgegevens daadwerkelijk met het geodetische model 2022 en met elkaar overeenkomen.

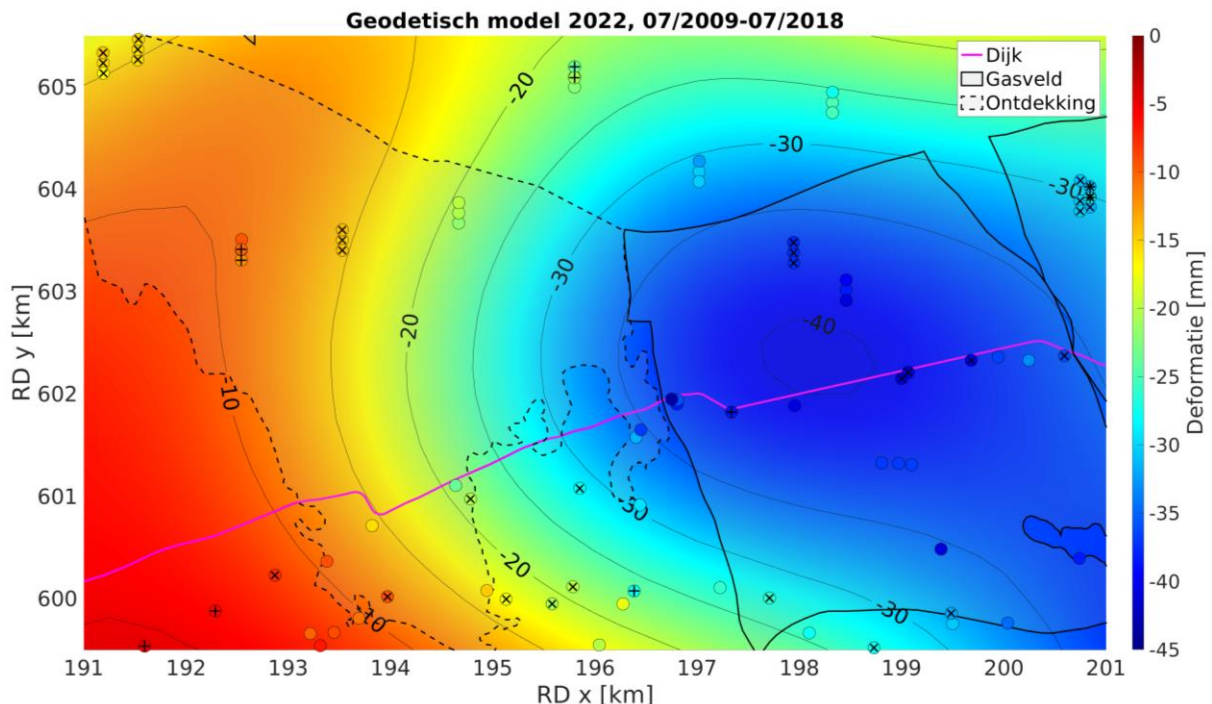
Het geodetische model is gemaakt voor de meet- en regelrapportage 2022 (Referentie 6). Het is gebaseerd op waterpassingen op het vaste land van 2006 t/m 2018, GNSS-metingen in de Waddenzee en op permanente stations van 2006 t/m 2022, InSAR-metingen uit 2018 en 2021 evenals waterpassingen op de eilanden. Als referentiejaar is 2009 gekozen, om te voorkomen, dat invloed door zetting van in 2006 geplaatste wadmerken de visualisatie gaat beïnvloeden.

Overeenstemming met waterpassing en GNSS

Omdat de jaartallen van metingen voor de individuele peilmerken verschillen, is het niet mogelijk, metingen en geodetisch model in één figuur met elkaar te vergelijken. Daarom is voor een andere visualisatieaanpak gekozen.

Figuur G-11 toont het geodetische model samen met de puntsgewijze peilmerkbeweging, die berekend zou worden, wanneer in de ruimte-tijd analyse de gladheidsrestrictie in de ruimte wordt losgelaten en alleen nog gladheid in de tijd wordt vereist. De overeenkomst in kleur

tussen meetpunten en achtergrond geeft aan, hoe goed het geodetische model de op de individuele peilmerken waargenomen bodembeweging volgt.



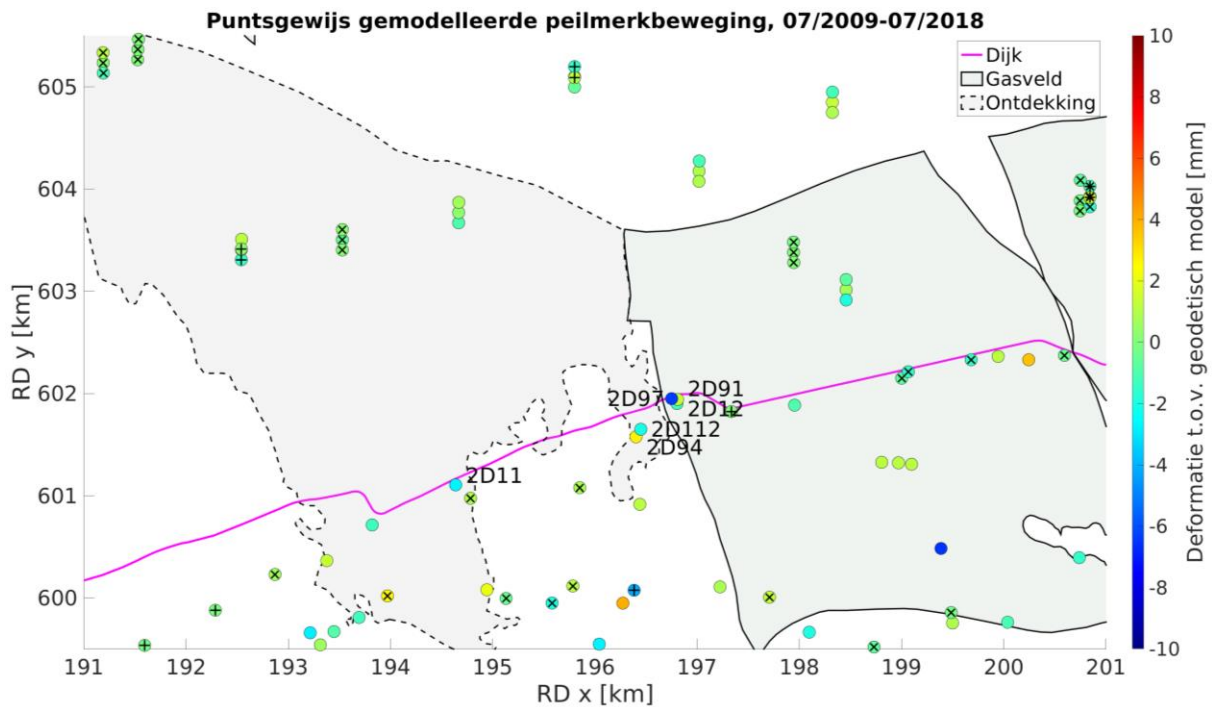
Figuur G-11: Bijdrage van individuele peilmerken aan het geodetische model 2022, hier gevisualiseerd voor het tijdvak 7/2009-7/2018. Stijging is positief, daling is negatief. Peilmerken, waarvan meetgegevens dit tijdvak niet helemaal bestrijken, zijn met een x gemarkeerd, peilmerken met geconstateerde verstoringen met een +. De peilmerkclusters in de Waddenzee hebben onderlinge puntafstanden van respectievelijk 5 m en 10 m en zijn voor de betere zichtbaarheid uit elkaar getrokken.

Het tijdvak 2009-2018 is gekozen, omdat in 2018 de laatste waterpassing op het vaste land heeft plaatsgevonden. De overeenstemming van het geodetisch met de waterpassingen en in bredere zin met het gedrag van peilmerken kan niet buiten deze periode van metingen worden geïnterpreteerd.

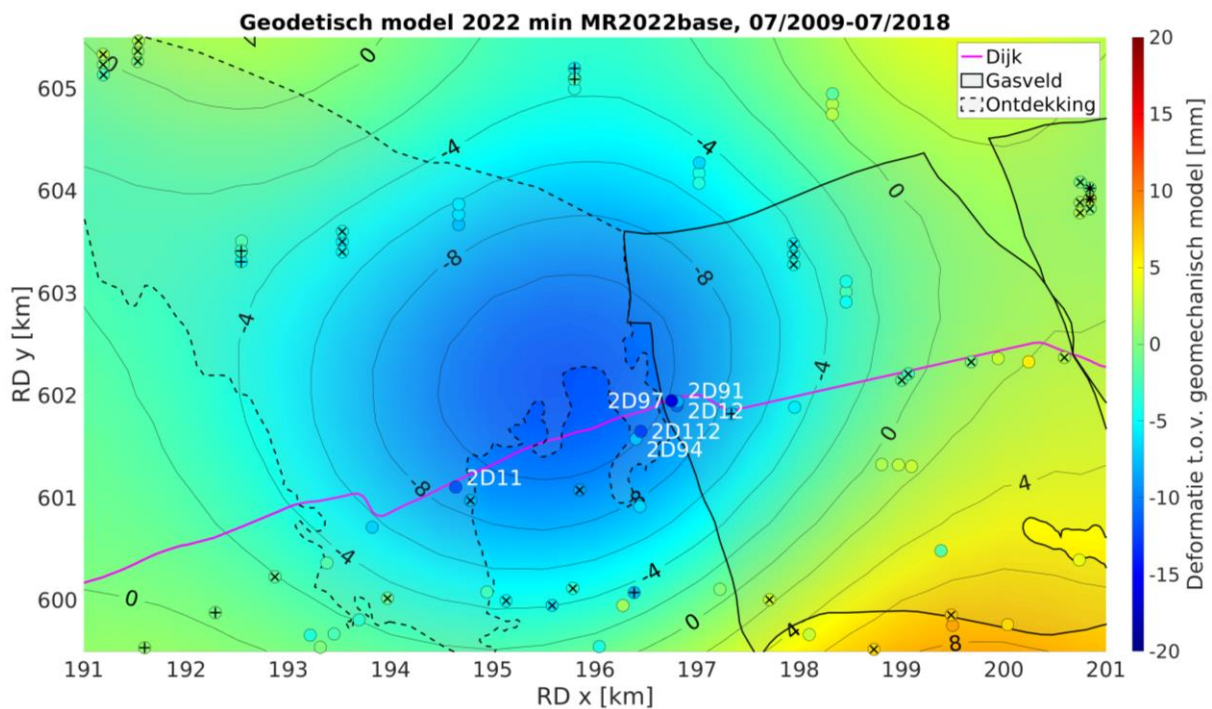
Sommige, met een "x" gemarkeerde peilmerken zijn niet gedurende de hele periode 2009-2018 gemeten. De daarop gevisualiseerde deformatie is geëxtrapoleerd en mag alleen onder voorbehoud worden geïnterpreteerd, in het bijzonder, wanneer de afwijkingen van het geodetische model groot zijn.

Bij met een "+" gemarkeerde peilmerken is in de ruimte-tijd analyse een verstoring geconstateerd en ervoor gecorrigeerd. Met gecorrigeerde verstoringen is in de visualisatie onvoldoende rekening gehouden, en de getoonde waardes kunnen niet zonder verder onderzoek worden geïnterpreteerd.

Figuur G-12 toont alleen de afwijkingen tussen peilmerkbeweging en het geodetisch model. De ligging van de peilmerken t.o.v. het "blauwe gebied", waar geodetisch en geomechanisch model niet goed overeenkomen, is met behulp van Figuur G-13 in kaart gebracht. Dit figuur toont het verschil tussen geodetisch en geomechanisch model.



Figuur G-12: Bijdrage van individuele peilmerken aan het geodetische model 2022, hier gevisualiseerd relatief tot het geodetische model voor het tijdvak 7/2009-7/2018. Stijging is positief, daling is negatief. De kleuren geven aan, in welke mate het geodetische model de waargenomen peilmerkbeweging volgt. Peilmerken, waarvan meetgegevens dit tijdvak niet helemaal bestrijken, zijn met een x gemarkeerd, peilmerken met geconstateerde verstoringen met een +. De peilmerkclusters in de Waddenzee hebben onderlinge puntafstanden van respectievelijk 5 m en 10 m en zijn voor de betere zichtbaarheid uit elkaar getrokken.

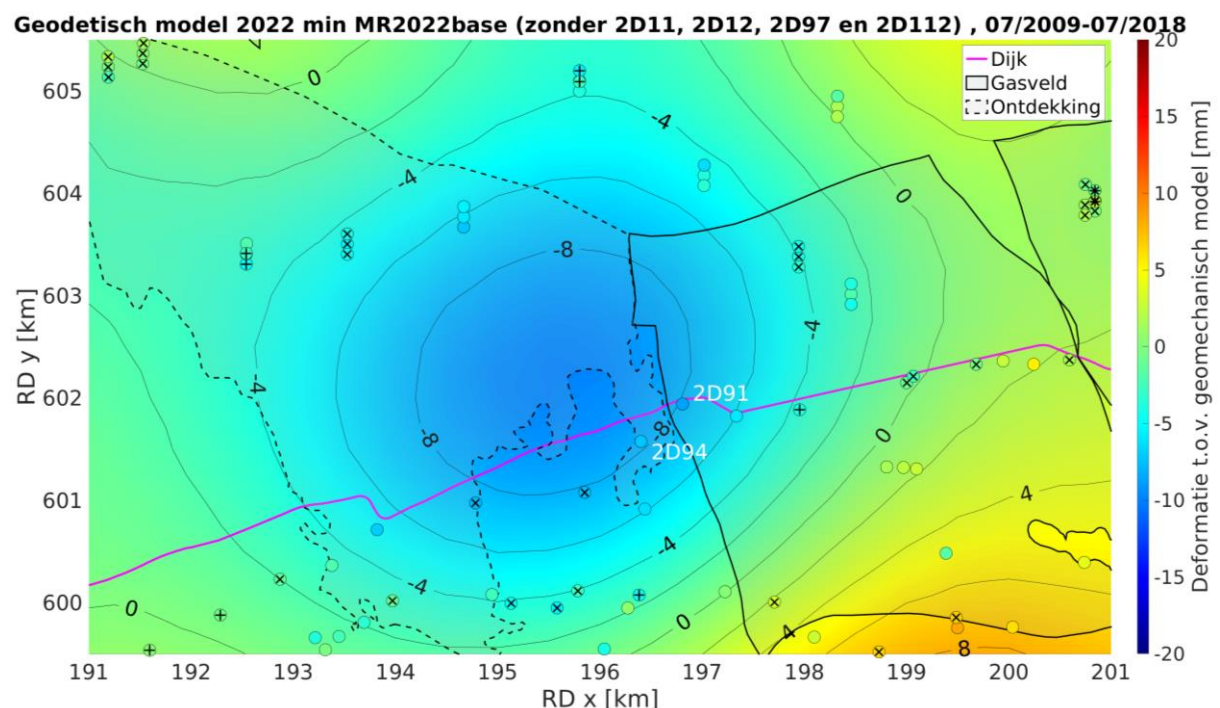


Figuur G-13: Bijdrage van individuele peilmerken aan het geodetische model 2022, hier gevisualiseerd relatief tot het basisscenario 2022 voor het tijdvak 7/2009-7/2018. Stijging is positief, daling is negatief. Peilmerken, waarvan meetgegevens dit tijdvak niet helemaal bestrijken, zijn met een x gemarkeerd, peilmerken met geconstateerde verstoringen met een +. De peilmerkclusters in de Waddenzee hebben onderlinge puntafstanden van respectievelijk 5 m en 10 m en zijn voor de betere zichtbaarheid uit elkaar getrokken.

In het algemeen is er een goede overeenstemming tussen de puntsgewijs berekende peilmerkbeweging en het in de ruimte gladde geodetische model. In het blauwe gebied van de grootste afwijking ten opzichte van het basisscenario zijn er geen peilmerken met geconstateerde verstoringen (“+”), en peilmerken, die niet over het hele tijdvak zijn gemeten (“x”).

Er zijn wel vier peilmerken, met name 2D11, 2D12, 2D97 en 2D112, die een duidelijk grotere afwijking met het geomechanische basisscenario laten zien dan het geodetische model c.q. de peilmerken in de directe omgeving. Aan 2D97 is tijdens de ruimte-tijd analyse wel een lager gewicht toegekend, omdat deze in de analyse is gedetecteerd als een meetpunt met een significant grotere deformatie snelheid dan de meetpunten in de directe omgeving. Alle vier de peilmerken leveren mogelijk een significante bijdrage aan de maximale afwijking in het blauwe gebied van 12 mm (in 9 jaar).

Om te onderzoeken, hoe groot deze bijdrage is, is een alternatieve ruimte-tijd analyse berekend, waarin de vier genoemde peilmerken zijn weggelaten. Figuur G-14 laat het resultaat zien. De maximale afwijking in het midden van het blauwe gebied is gereduceerd van 12 tot 10 mm (in 9 jaar). Omdat daar in de directe omgeving geen peilmerken aanwezig zijn, is er mogelijk ook sprake van een overschatting door interpolatie: De individuele verschillen ten opzichte van het basisscenario op peilmerklocaties zijn maar 9 mm (2D91) of kleiner. Veronderstellend, dat de metingen op de vier peilmerken niet representatief zijn voor de diepe bodemdaling, is de maximale afwijking dus slechts 3 mm in 9 jaar minder oftewel 27 % kleiner dan gemodelleerd.



Figuur G-14: Bijdrage van individuele peilmerken aan een gemodificeerd geodetisch model, hier gevisualiseerd relatief tot het basisscenario 2022 voor het tijdvak 7/2009-7/2018. Ten opzichte van Figuur G-13 zijn de peilmerken 2D11, 2D12, 2D97 en 2D112 buiten beschouwing gelaten.

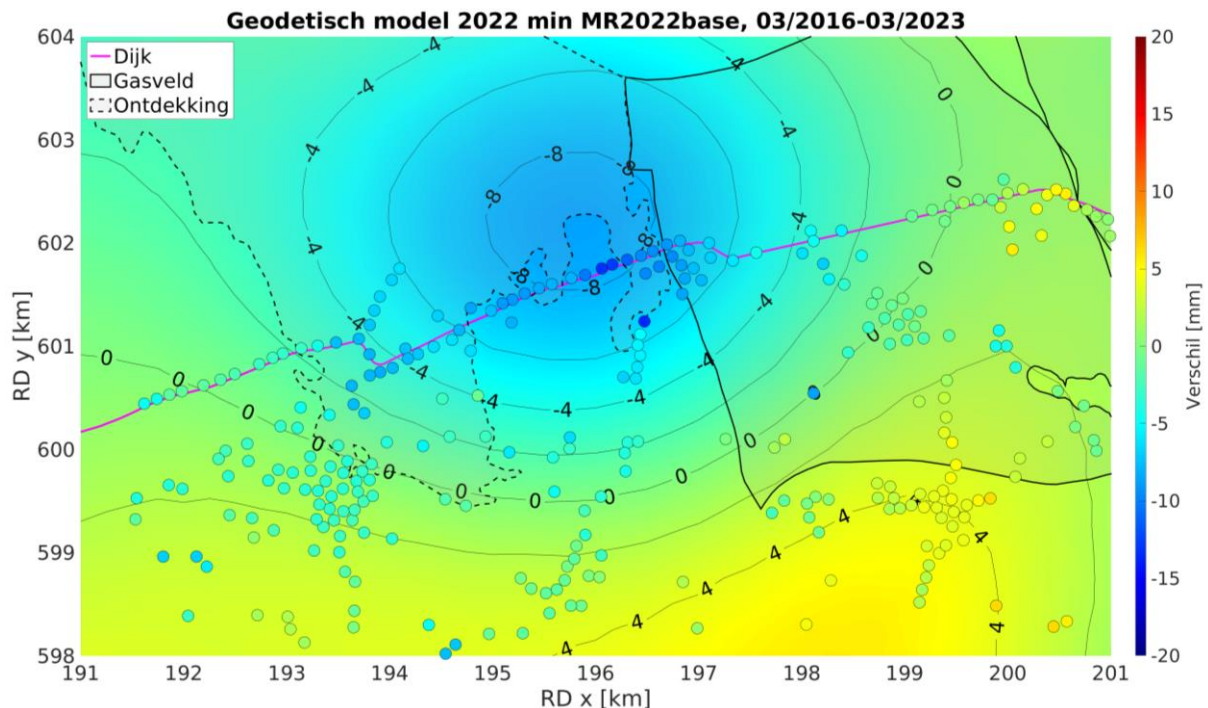
Los van of de hypothese klopt, dat de vier peilmerken niet representatief zijn voor de diepe bodemdaling (in hoofdstuk 0 wordt hier nader op ingegaan), mag het verschil tussen geodetisch model en basisscenario in het blauwe gebied ook zonder hun bijdrage als significant worden beschouwd.

Overeenstemming met InSAR

InSAR-metingen zijn in het geodetische model 2022 slechts voor het hoogteverschil tussen 2018 en 2021 gebruikt en zullen daarom geen grote impact hebben. Wel biedt InSAR de

mogelijkheid, het model te valideren. Hiervoor zijn waarnemingen met de Sentinel-1 satelliet gebruikt, die voor het tijdvak 2016-2023 beschikbaar zijn. Daaruit is een decompositie in ruimtelijke componenten in clusters van Persistent Scatterers (PS) is berekend. De verticale component is in Figuur G-15 weergegeven samen met het geodetische model in de achtergrond en relatief tot het basisscenario.

De overeenkomst is uitstekend in het blauwe gebied, elders lopen de verschillen op tot 5 mm. Dit is binnen de meetnauwkeurigheid van InSAR, en er kan in het algemeen worden gesteld, dat het geodetische model met de InSAR metingen goed overeenkomt.



Figuur G-15: Vergelijking van bodembeweging uit InSAR-metingen met het geodetische model 2022, hier gevisualiseerd relatief tot het basisscenario 2022 voor het tijdvak 3/2016-3/2023. Stijging is positief, daling is negatief. De InSAR deformatie is berekend als verticale component van een decompositie uit op- en neergaande baan, weergegeven voor clusters van PS, waarbij elke cluster minimaal 10 PS van elke baan bevat.

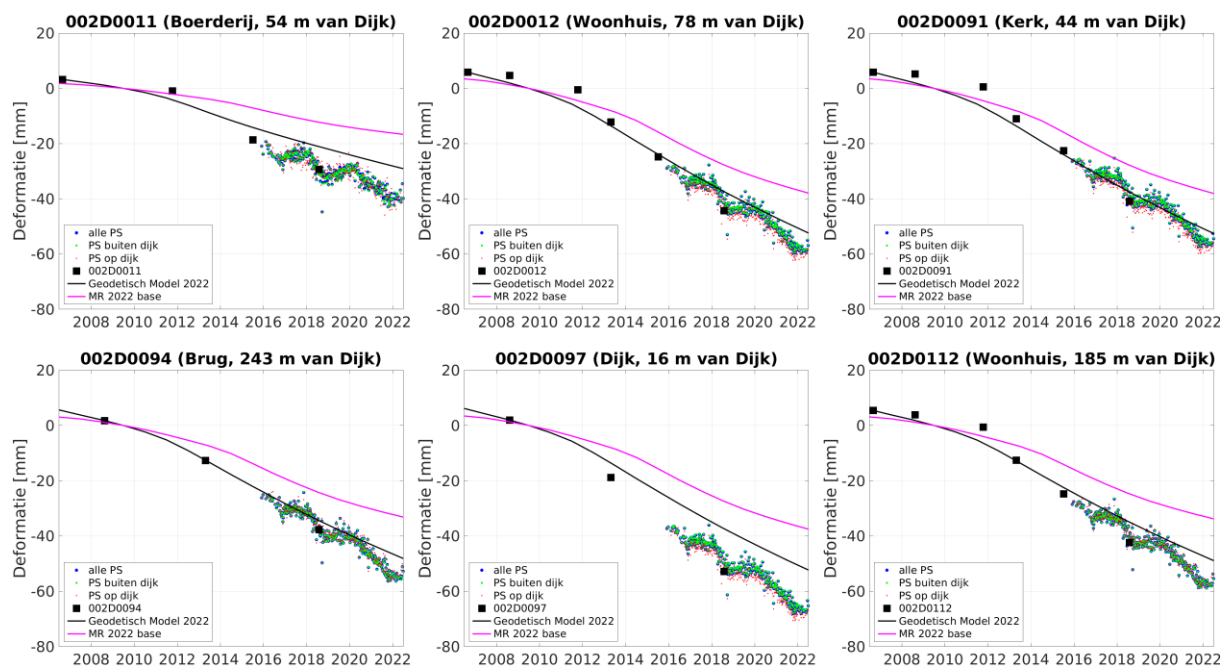
Bodemdaling veroorzaakt door bebouwing

Naast de daling door zetting van klei en oxidatie van veen kan de gemeten bodembeweging ook worden beïnvloed door het gewicht van gebouwen en andere gebouwde objecten zoals bv. dijken. Dit geldt zowel voor peilmerken als voor Persistent Scatterers (PS), de reflecterende objecten die door InSAR worden waargenomen. Mogelijk zettingsgedrag bij gebouwen en de daaraan vastzittende peilmerken kan worden ingeschat door de fundering te beoordelen. Bij PS kan de aanname worden gemaakt, dat de meerderheid van alle PS, waarvan een deformatietijdserie wordt afgeleid, representatief is voor de diepe bodemdaling. De NAM gebruikt hiervoor de mediaantijdserie van alle PS binnen een straal van 500 m rond een peilmerklocatie.

Invloed op peilmerken

In de RDNAP-database van Rijkswaterstaat is informatie over de funderingsdiepte slechts voor een klein aantal ondergrondse peilmerken beschikbaar; geen daarvan ligt in het aandachtsgebied. Wel kan de representativiteit van een peilmerk worden beoordeeld aan de hand van het type object, waaraan het is vastgemaakt. Dit is voor de volgende zes peilmerken gedaan (zie Figuur G-13 voor de ligging): 2D11, 2D12, 2D91, 2D94, 2D97 en 2D112.

Peilmerk 2D91 is geplaatst in een kerk en kan daarom als ongevoelig voor zettingsgedrag worden beschouwd, vanwege de ouderdom van de kerk. 2D97 zit niet ver daarvandaan op de zeedijk en is daarom waarschijnlijk wel onderhevig aan enige zetting. Dit is een aannemelijke hypothese gezien de 8 mm daling van 2D97 ten opzichte van 2D91 tussen 2008 en 2018. De overige van de zes peilmerken zitten in woonhuizen, een boerderij en een brug. Bij deze objecten is autonome beweging door bijvoorbeeld zetting waarschijnlijk kleiner dan bij een zeedijk maar groter dan bij een kerk. Geconcludeerd kan worden dat, met uitzondering van peilmerk 2D97, er geen duidelijke indicatie is van autonome peilmerkbeweging. Onderlinge afwijkingen zijn binnen de foutenmarges, en er is dus geen aanleiding, de waarnemingen op deze peilmerken in de ruimte-tijd analyse niet mee te nemen. Aan peilmerk 2D97 is in de ruimte-tijd analyse terecht een lager gewicht toegekend. Op grond van de beschouwingen in paragraaf 0 is de invloed van een mogelijke zetting op de maximale afwijking in het “blauwe gebied” op 27 % van de totale waarde beperkt.



Figuur G-16: Tijdsreeksen van bodembeweging op zes peilmerklocaties. De twee modellen zijn op 1 juli 2009 op nul gesteld. De waterpassing is op het geodetische model aangesloten, en de InSAR tijdsreeksen, gebaseerd op alle PS binnen een straal van 500 m, is op de waterpassing aangesloten.

Invloed op Persistent Scatterers

Op grond van de grote hoeveelheid Persistent Scatterers (PS) en de variabiliteit van ermee geassocieerde reflecterende objecten kan geen algemene uitspraak over de representativiteit van een berekende bodembeweging worden gemaakt, die op de gemiddelde beweging van een groot aantal PS is gebaseerd. Wel kan de invloed van individuele objecten, zoals de zeedijk, op het gemiddelde worden beoordeeld.

Figuur G-16 laat InSAR-tijdsreeksen zien, die op alle PS binnen een straal van 500 m rond het respectievelijke peilmerk gebaseerd zijn. Telkens zijn varianten van dezelfde tijdsreeksen gemaakt, waarbij alleen PS geselecteerd zijn, die al dan niet op de dijk liggen. Het verschil is marginaal en laat de conclusie toe, dat in het onderzochte tijdvak (dus vanaf 2016) geen significante zetting van het dijklichaam als geheel heeft plaatsgevonden, die de InSAR-metingen zou kunnen verstoren.

G.6 Conclusies

In deze bijlage wordt beschreven wat de mogelijke verklaringen kunnen zijn van de discrepantie tussen het geodetische model en het geomechanische model in het gebied rondom Wierum. Ten

eerste moet worden vastgesteld dat de discrepantie gering is met een maximum van 1,7 cm over een periode van 13 jaar. Echter de discrepantie overstijgt de onzekerheid van de metingen en modellen en daarom is verder onderzoek nodig gebleken. Er is gekeken naar mogelijke processen die dit verschil kunnen verklaren. Allereerst is bestudeerd of het gebied extra gevoelig is voor ondiepe zetting. Dit blijkt niet het geval te zijn. Daarna is gekeken of mogelijke observaties van processen in de ondergrond aanleiding kunnen geven tot andere bodemdalingsscenario's dan eerder gebruikt in de voorgaande M&R rapportages. De geobserveerde hoge WGR, in de put MGT-4A in het westelijke deel van het Nesgasveld, geeft aan dat er mogelijk water migreert, via de westelijke breuk van het Nes gasveld, vanuit een breukblok dat ten westen ligt van het Nes veld. Daarom zijn er verschillende realisaties gemaakt voor mogelijke drukdaling in dit blok die vervolgens zijn gebruikt in het bodemdalingsmodel. Met de verwachte Cm waarden volgens de M&R rapportage is de discrepantie tussen het geodetische en het geomechanische model verkleind, maar niet weggenomen. Wanneer de hoge gesteentewaarden gebruikt worden is de discrepantie vrijwel verdwenen in dit gebied. Verder onderzoek naar de metingen en het geodetische model heeft uitgewezen dat ook hier een gedeeltelijke verklaring kan worden gevonden voor de waargenomen discrepantie. Op basis van de analyses, zoals beschreven in deze notitie, is voor de M&R rapportage over 2023 uitgegaan van de maximale drukdaling in het breukblok ten westen van het Nes gasveld. Er zijn geen aanpassingen gemaakt voor de geodetische analyseprocedures.