

Bodemdaling door aardgaswinning in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe, status rapport 2025



Doc. Nummer EP202603244353

Schepersmaat 2
9405 TA Assen

Postbus 28000
9400 HH Assen

T +31 (0)592 36 91 11
BTW NL-801315670.B01

www.nam.nl

Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. is statutair gevestigd te 's-Gravenhage -
Handelsregister no. 04008869

Inhoud

1	Samenvatting.....	4
2	Inleiding.....	6
	2.1 Bodemdaling door aardgaswinning.....	6
3	Observaties en nieuwe ontwikkelingen sinds 2020	9
	3.1 Metingen	9
	3.2 Modellerings	10
	3.2.1 RTCiM compactiemodel.....	10
	3.3 Nieuwe velden en velden die gestopt zijn met produceren	11
	3.4 Isostasie.....	11
4	Metingen en analyse	12
	4.1 InSAR.....	12
	4.2 GNSS	13
	4.3 Waterpassing	13
	4.4 Representativiteit van de meetpunten	13
	4.5 Differenties en precisiebeschrijving	15
5	Modellerings van de bodemdaling	16
	5.1 Invoergegevens van de velden	16
	5.2 Groningen.....	17
	5.3 Laboratoriumexperimenten.	21
	5.4 Compactiemetingen in diepe observatieputten.	22
	5.4.1 DSS-metingen	23
	5.5 Aquifers	23
	5.6 Bodemdalingsmodel	26
	5.7 Compactiemodel parameters bepalen met behulp van een Monte-Carlo simulatie.....	28
	5.8 Ondiepe compactie van de ondiepe ondergrond	28
	5.8.1 Oorzaken van ondiepe compactie.....	28
	5.9 Compactiemetingen van de middeldiepe ondergrond	30
6	Vergelijking tussen de metingen en prognose van de bodemdaling	31
7	Prognose tot 2065.....	34
	7.1 Contourkaarten	34
	7.2 Modelonzekerheid.....	34
	7.3 Verschillen met de prognose uit het status rapport 2020 (Referentie 1)	34
8	Conclusies	37
9	Referenties.....	38
10	Appendix I Prognose voor 2035	40
11	Appendix II Prognose voor 2050	41

12	Appendix III Prognose voor 2065	42
13	Appendix IV Gemeten bodemdaling in 2023 op stabiele peilmerken sinds de start winning	43
14	Appendix V Verschilkaart (cm) van gemodelleerde en gemeten bodemdaling voor het jaar 2023 op stabiele peilmerken sinds de start van de winning	44
15	Appendix VII Bodembeweging op de GNSS-stations.....	45
16	Appendix VIII Isostasie.....	49

1 Samenvatting

Ter uitvoering van de overeenkomsten provincie Groningen – NAM, Rijk - NAM en provincie Fryslân en Wetterskip Fryslân - NAM inzake regeling vergoeding kosten bodemdaling aardgaswinning bevat dit rapport een op huidige kennis en inzichten gebaseerde prognose voor de bodemdaling als gevolg van gaswinning in de provincies Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe.

In genoemde overeenkomsten is vastgelegd dat de NAM eens in de vijf jaar zal rapporteren over haar bodemdalingsverwachtingen, rekening houdend met resultaten van actuele metingen en specifiek onderzoek op dit gebied.

De nieuwe prognose in dit statusrapport is vergelijkbaar met de prognose van 2020. De verwachte bodemdaling voor 2065 is over het algemeen iets meer dan de prognose uit 2020. Dit is voornamelijk het gevolg van de kalibratie aan alle, inclusief de meest recente, metingen. Sinds 2020 zijn er geen nieuwe gasvelden in ontwikkeling gebracht. Wel zijn een aantal gasvelden gestopt met produceren (zie Tabel 1). De bodemdaling ten gevolge van de historische productie als van de toekomstige productie, zoals deze is vastgelegd in de vigerende winningsplannen en aangevraagde winningsplannen (uitgezonderd Norg) tot en met 31-12-2025 is in de bodemdalingsvoorspelling meegenomen.

Voor de bepaling van de opgetreden bodemdaling door gaswinning worden geodetische metingen uitgevoerd. In 2023 heeft NAM de satelliet radar interferometrie (InSAR) metingen in Noord-Nederland laten verwerken. Tevens is een grote waterpassing uitgevoerd door Rijkswaterstaat in 2023 en 2024. Op meerdere locaties vindt er continue GNSS (Global Navigation Satellite System, GPS) monitoring plaats.

De bodemdaling is gemodelleerd voor de jaren 2035, 2050 en 2065. Het laatstgekozen tijdstip is ongeveer 30 jaar na de productiestop van de meeste kleine velden. De mijnbouwwet schrijft voor dat, na het insluiten van een veld, de bodemdaling nog 30 jaar moet worden gemonitord.

In de prognoses zijn de laatste gegevens verwerkt met betrekking tot zowel de parameters van het reservoirmodel (dikte, druk, diepte van de reservoirs) als de parameters van het compactiemodel (o.a. compactiecoëfficiënt), die door kalibratie aan de metingen zijn verkregen.

Volgens de huidige prognose zal de bodemdaling in het centrum van de schotel boven het gasveld Groningen in het jaar 2065 circa 50 cm bedragen. Voor 2050 wordt een maximale bodemdaling van iets meer dan 46 cm verwacht.

Dit rapport is primair bedoeld voor de besluitvorming over mogelijke te nemen maatregelen in verband met bodemdaling door gaswinning op land. Het Staatstoezicht op de Mijnen houdt toezicht op de bodemdaling zoals vastgelegd in de winningsplannen. Kleine afwijkingen kunnen ontstaan tussen de prognoses in de winningsplannen en de prognoses in dit statusrapport. Dit statusrapport zal de basis vormen voor de berekening van de cumulatieve bodemdaling voor de nieuwe aanvragen van winningsplannen vanaf 1-1-2026.

Verklarende woordenlijst

Aquifer (lateraal)	Watervoerend deel van het reservoir gesteente (lateraal: naast het reservoir gelegen)
Cm	Uniaxiale compactiecoëfficiënt; materiaaleigenschap die de mate van samendrukbaarheid van het gesteente aangeeft
Compactie	Het samendrukken van het reservoirgesteente door het gewicht van bovenliggende gesteenten
Compressibiliteit	Samendrukbaarheid (van het gesteente)
Depletie	Ontstane drukdaling in het gasreservoir of aquifer door het onttrekken van koolwaterstoffen
DSS	Distributed strain sensing. Methode om compactie te meten in het reservoir
GNSS	Global Navigation Satellite System: systeem voor plaats- en hoogtebepaling met behulp van satellieten (ook wel GPS genoemd).
Idealisatie precisie	De mate waarin de beweging van de geodetische meetpunten representatief is voor de bodemdaling door gaswinning.
IGRS	Integrated Geodetic Reference Station: een gecombineerd meetpunt voor de technieken InSAR, GNSS en waterpassen, op dezelfde fundatie.
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar. Toepassing van radar interferometrie (satellietbeelden) voor het bepalen van bodemdaling.
In situ	Ter plaatse (in de ondergrond)
Inversie	Methode waarbij uit de gemeten bodemdaling en kennis van de geologische structuur het compactiegedrag van het reservoir in de diepte wordt afgeleid
Kern	Gesteentemonster uit de ondergrond verkregen bij het boren van een put
Porositeit	Verhouding tussen het poriënvolume (tussen de zandkorrels) en het totale volume van het gesteente.
Probabilistische berekening	Rekenmethode waarbij expliciet rekening gehouden wordt met onzekerheden.
PS	Persistent Scatterer: InSAR meetpunt; een object met een consistente reflectie in de tijd.
RD-coördinaat	Rijksdriehoeksmeting coördinaat. Coördinaten in het topografische kaartmateriaal zijn vermeld in het stelsel van de Rijksdriehoeksmeting (RD).
RTCiM	Rate Type Compaction Isotach model: wiskundig model dat de compactie beschrijft in de zandsteen door drukdaling
SodM	Staatstoezicht op de Mijnen
TNO	Nederlandse organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek

2 Inleiding

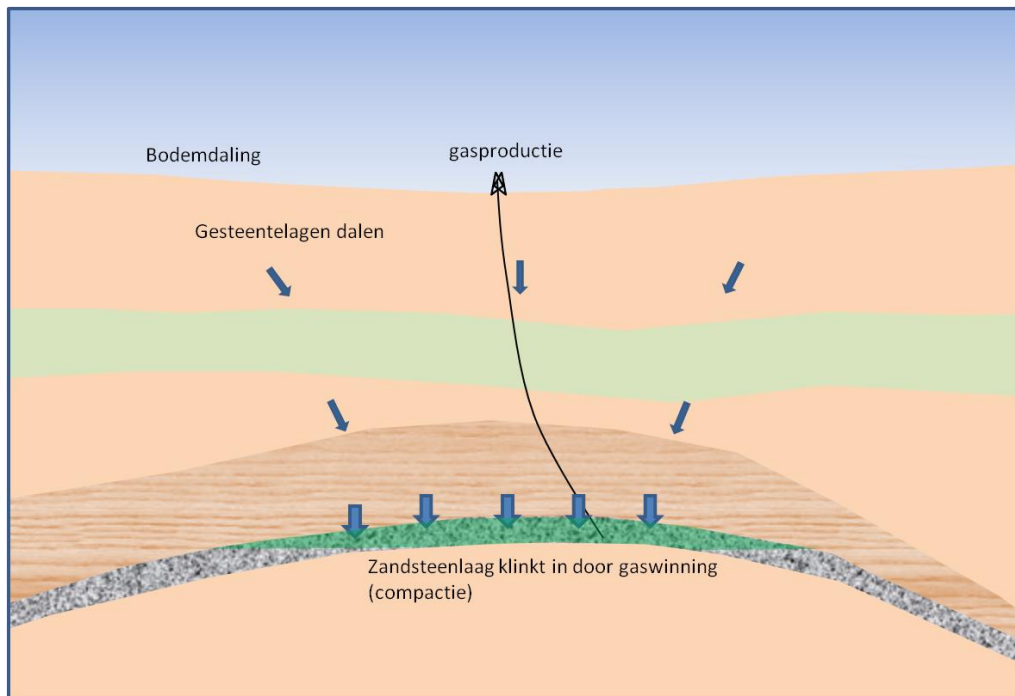
Eén van de verantwoordelijkheden van de Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. (NAM) is na te gaan in hoeverre de productieactiviteiten aanleiding kunnen geven tot bodemdaling als gevolg van compactie van de poreuze gesteentelagen waaruit aardgas wordt gewonnen. Met de resultaten van deze studie kan een inschatting worden gemaakt van de eventuele effecten van bodemdaling op bijvoorbeeld de waterhuishouding of het milieu. Vervolgens kan worden bezien welke maatregelen kunnen worden getroffen om deze effecten te voorkomen dan wel te beperken. Hiertoe wordt voortdurend onderzoek verricht en zijn regelmatig, in de provincie Groningen al sinds 1964 en in Friesland sinds 1969, bodemdalingsmetingen verricht.

2.1 Bodemdaling door aardgaswinning

In een gasveld veroorzaakt de winning van aardgas een vermindering van de poriëndruk in de gasvoerende gesteentelaag. Daarbij wordt het gesteente langzaam een heel klein beetje samengedrukt onder het gewicht van de bovenliggende gesteentelagen.

Deze samendrukking, ook wel compactie genoemd, hangt af van verschillende factoren zoals de materiaaleigenschappen van het reservoirgesteente, de grootte van de drukdaling en de dikte van het depleterende reservoir (Figuur 2-1). De mate waarin de compactie wordt omgezet in bodemdaling op maaiveld-niveau is onder meer afhankelijk van de diepte en omvang van het depleterende gasveld. Bij een groot gasveld als Groningen zal de bodemdaling boven het centrum van het veld vrijwel gelijk zijn aan de ondergrondse compactie. Bij kleinere velden, zoals de meeste velden in Friesland, zal de maximale bodemdaling aan het aardoppervlak een fractie van de maximale compactie van het reservoirgesteente bedragen.

Met name in het geval van een klein veld beslaat de bodemdalingsschotel een groter oppervlak dan het veld zelf. In Noord-Nederland zijn veel gasvelden dicht bij elkaar gelegen zodat de bodemdalingsschotels elkaar overlappen. De bodemdalingsschotels worden bij elkaar opgeteld wat tezamen de cumulatieve bodemdaling geeft.



Figuur 2-1: Drukvaling in het reservoir resulteert in bodemdaling. Factoren van invloed op de bodemdaling.

De bodemdaling die wordt veroorzaakt door gaswinning manifesteert zich in de vorm van een platte, zeer gelijkmatige schotel. Deze schotel veroorzaakt een zekere scheefstand van het maaiveld, die echter dermate gering is (maximaal enkele centimeters verval per strekkende kilometer) dat er door deze geringe scheefzakking geen schade aan gebouwen kan ontstaan. Hoewel de gemiddelde bodemdaling boven de gasvelden relatief gering is, is het volume van de schotel in sommige gevallen wel zodanig dat de waterhuishouding, mede gezien de vaak geringe hoogte van het maaiveld ten opzichte van het zeeniveau, wordt verstoord.

Om een regeling te treffen voor de vergoeding van kosten, die teruggevoerd kunnen worden op bodemdaling ten gevolge van gaswinning in de provincie Groningen, werden op 31 augustus 1983 de overeenkomsten Groningen-NAM en Rijk-NAM inzake de regeling vergoeding kosten bodemdaling aardgaswinning aangegaan. Deze overeenkomsten gaven aanleiding tot de installatie op 9 maart 1984 van de Commissie Bodemdaling door Aardgaswinning. De commissie heeft tot taak vast te stellen welke maatregelen aan te merken zijn als redelijkerwijs noodzakelijk om nadelige effecten van bodemdaling door aardgaswinning te voorkomen, te beperken of te herstellen. Tevens beoordeelt de commissie welke kosten de NAM, op grond van de overeenkomsten dient te vergoeden. Met de provincie Friesland en het waterschap (Wetterskip Fryslân) is op 28 juni 2006 eveneens een dergelijke overeenkomst gesloten en is de Commissie Bodemdaling Aardgaswinning Fryslân opgericht. Uitgangspunt bij de besluitvorming over te nemen maatregelen is onder meer de bodemdalingsprognose van de NAM.

Als onderdeel van de monitoring van de bodemdaling door gaswinning in het Waddenzee-gebied wordt elk jaar een meet- en regelcyclus doorlopen. Doel hiervan is zorg te dragen

dat de bodemdaling door gaswinning binnen de wettelijk vastgelegde gebruiksruimte blijft. Hierover wordt jaarlijks gerapporteerd aan de minister van Klimaat en Groene Groei (Referentie 2).

Dit vijfjaarlijkse rapport beperkt zich tot de bodemdaling in Groningen, Friesland en Noord-Drenthe ten gevolge van de gaswinning door de NAM, voor zover die daling zich voordoet op het vaste land. Het Staatstoezicht op de Mijnen houdt toezicht op de bodemdaling zoals vastgelegd in de winningsplannen. Kleine afwijkingen kunnen ontstaan tussen de prognoses in de winningsplannen en de prognoses in dit statusrapport. Dit statusrapport zal de basis vormen voor de berekening van de cumulatieve bodemdaling voor de nieuwe aanvragen van winningsplannen vanaf 1-1-2026.

De NAM werkt sinds de start van de gasproductie in Nederland continu aan het verbeteren van het voorspellen van de bodemdaling. Elke vijf jaar worden na een uitgebreide meetcampagne van de bodemdaling de bodemdalingsprognoses geactualiseerd en gerapporteerd. De inhoud van dit rapport vormt de weerslag van de laatste inzichten op het gebied van bodemdaling door gaswinning.

3 Observaties en nieuwe ontwikkelingen sinds 2020

3.1 Metingen

Sinds 2003 wordt de satelliet radar interferometrie (InSAR) techniek ingezet door de NAM, tot 2013 in samenwerking met de Technische Universiteit Delft en sindsdien met een extern bedrijf. Bij InSAR wordt uit faseverschilmetingen van radaropnamen de deformatie geschat van objecten op het aardoppervlak (veelal gebouwen). Door de grote ruimtelijke en temporele waarnemingsfrequentie kan uit InSAR gedetailleerdere informatie over bodemdalingsgedrag worden gehaald in vergelijking met waterpasmetingen. Sinds 2019 wordt InSAR ingezet als primaire techniek voor het monitoren van bodemdaling door gaswinning op land. Sinds de Envisat satelliet missie (vanaf 2003) zijn er in tijd overlappende InSAR satelliet missies (Radarsat-2, Sentinel-1). De meest recente rapportage als meetregister is in 2023 gedaan (Referentie 5).

Op specifieke locaties (boven de velden Groningen, Norg, Grijskerk en in het Waddenzee gebied) zijn sinds 2013 (Moddergat en Anjum al sinds 2007) permanente GNSS-stations, en sinds 2018 IGRS (Integrated Geodetic Reference Stations) geplaatst. Een IGRS bevat gecombineerde meetpunten voor GNSS, InSAR (2 reflectoren) en waterpassen, bevestigd op dezelfde, ca. 6 m diepe fundatie. Ten tijde van het verschijnen van deze rapportage zijn er 16 GNSS stations en 28 IGRS operationeel in het gebied dat deze statusrapportage bestrijkt. De resultaten van de GNSS-metingen worden aan Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) gerapporteerd ieder kwartaal (Referentie 11, Referentie 12, Referentie 13, Referentie 14, Referentie 22).

Omdat er in de nabije toekomst een groot aantal NAM-locaties geabandonneerd zal worden, is het de verwachting dat het aantal GNSS en IGRS-stations zal verminderen. Tijdens de jaarlijkse actualisatie van de meetplannen wordt beoordeeld of een GNSS of IGRS-station moet worden verplaatst of kan worden vervangen door naburige InSAR meetpunten, indien deze niet behouden kan blijven op de huidige locatie na abandonnering.

In 2023 en 2024 heeft Rijkswaterstaat een waterpassing uitgevoerd in Noord-Nederland. De NAM heeft de waterpasmetingen van Rijkswaterstaat ontvangen, en deze zijn ook gebruikt in de kalibratie van de prognose voor deze statusrapportage.



Figuur 3-1: IGRS-station (links) en GNSS-station (rechts) bevestigd op een gebouw op een NAM-locatie.

3.2 Modelling

In 2020 is een uitgebreide studie verricht naar de mogelijke bodemdaling in de verre toekomst door de gaswinning in Groningen (Referentie 3).

Hoewel verdere drukdaling in het Groningen gasveld grotendeels gestopt is door het beëindigen van de productie in 2023, zal de compactie door drukvereffening nog enkele decennia doorgaan, zij het in afnemende mate. Tevens zal er verdere drukdaling plaatsvinden in de laterale aquifers die grenzen aan het Groningen veld, waardoor er ook in de toekomst bodemdaling zal optreden boven de gebieden waar deze aquifers voorkomen. De genoemde studie maakt gebruik van een statistische methode waar de uitkomsten van vele duizenden bodemdalingsscenario's worden vergeleken met de gemeten bodemdaling, inclusief de (meet)onzekerheid. Vervolgens wordt met het meest waarschijnlijke scenario de prognose gemaakt. Voor meer detail wordt verwezen naar Referentie 3.

3.2.1 RTCiM compactiemodel

Als voorwaarde voor instemming met de wijziging van het winningsplan voor de gasvelden Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen is een studie gedaan naar de tijdsafhankelijke effecten van bodemdaling boven het Ameland gasveld, die in 2017 is afgerond (Referentie 4) en in 2018 door SodM is goedgekeurd. Bij het berekenen van de compactie is in deze studie het Rate Type Compaction Model (RTCiM) gebruikt, wat resulteert in een betere passing van het bodemdalingsmodel met de data. Dit model is daarom nu ook voor alle velden in Noord-Nederland gebruikt.

3.3 Nieuwe velden en velden die gestopt zijn met produceren

Er zijn geen nieuwe velden in productie gebracht. Wel zijn er voor een aantal velden nieuwe aanvragen gedaan voor langere productie in de periode 2020-2025. De verwachte drukprofielen van deze aanvragen voor de periode t/m 31-12-2025 zijn opgenomen in dit status rapport. De velden die voorgoed uit het productieproces zijn gehaald, tussen 1-1-2020 en 31-12-2025 zijn terug te vinden in Tabel 1.

Tabel 1: velden die gestopt zijn tussen 2020-2025

Veldnaam	Jaar einde productie
Annerveen	2021
Assen	2025
Blijham	2023
Boerakker	2023
De Wijk Phase2	2023
Een	2022
Eleveld	2025
Harkema	2024
Kielwindeweer	2021
Oude Pekela	2023
Saaksum-West	2023
Sebaldeburen	2022
Ureterp	2024
Vries	2025
Zuidwending-Oost	2023

3.4 Isostasie

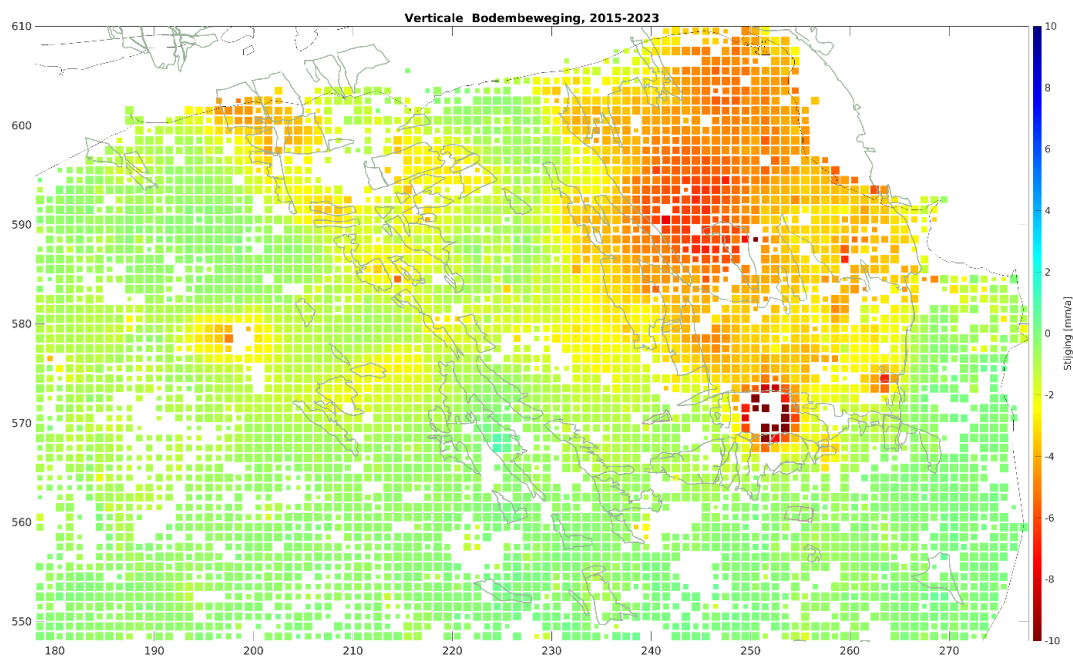
Isostasie is een geologisch proces dat resulteert in de beweging van de aardkorst om een evenwicht te bereiken, bijvoorbeeld na het wegsmelten van ijs uit een ijstijd. Nederland ondergaat hierdoor een kantelende beweging met snelheden in de orde van tienden van mm/jaar. Appendix VIII Isostasie, beschrijft in hoeverre geodetische metingen ten behoeve van het monitoren van bodemdaling door gaswinning deze component zouden kunnen bevatten, en wat het mogelijk effect is op de berekende bodemdaling door gaswinning op de lange termijn.

4 Metingen en analyse

4.1 InSAR

Bij de PS-InSAR methodiek worden uit door een satelliet opgenomen radarbeelden de deformaties van coherente 'reflectoren', zogenaamde Persistent Scatterers (PS), op het aardoppervlak bepaald. Een tijdserie van beelden is nodig om deze Persistent Scatterers (PS) te identificeren; zij corresponderen veelal met de bebouwing en andere objecten. Sinds 2019 wordt InSAR ingezet als primaire techniek voor het monitoren van bodemdaling door gaswinning op land (met Referentie 5 als meest recente meetregister in Noord Nederland). Een uitgebreide evaluatie van de techniek zelf is te vinden in het analyserapport 'Gebruik van InSAR in de meetregisters Noord-Nederland en Groningen; Analyse beschikbaarheid en betrouwbaarheid' op basis van Sentinel-1 InSAR metingen (Referentie 18).

Om de in het verleden door waterpassing opgebouwde tijdseries van metingen te kunnen voortzetten, worden op PS waargenomen bewegingen naar de locaties van de fysieke peilmerken van de waterpassing omgerekend. De gemiddelde beweging van alle PS in de onmiddellijke nabijheid van ieder peilmerk wordt dus als beweging van het peilmerk zelf beschouwd. Doordat meestal meerdere PS in de omgeving beschikbaar zijn, is het resultaat minder gevoelig voor uitschieters dan de waterpassing.



Figuur 4-1: Bodembewegingssnelheid (verticale component) afgeleid uit de decompositie van de Sentinel-1-tijdseries vanuit neergaande en opgaande baan. De decompositie is telkens uitgevoerd voor alle als representatief beschouwde PS voor ruimtelijk gecorreleerde bodembeweging binnen vierkanten van $1 \times 1 \text{ km}^2$. De grootte van een vierkant is een indicatie voor het aantal PS. Grotere vierkanten zijn dus gebaseerd op meer metingen en daarmee betrouwbaarder dan kleinere vierkanten. Bron: Referentie 5.

4.2 GNSS

Ten tijde van het verschijnen van deze rapportage zijn er 16 GNSS-stations en 28 IGRS operationeel in het gebied dat deze statusrapportage bestrijkt. De resultaten van de GNSS-metingen worden ieder kwartaal aan Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) gerapporteerd (Referentie 11, Referentie 12, Referentie 13, Referentie 14, Referentie 22). Hierin worden ook de dalingssnelheden gerapporteerd (met bijbehorende standaardafwijking), welke berekend worden over een periode van 12 voorafgaande maanden. De gemeten bodemdaling op alle GNSS-stations is te zien in Appendix VII, tezamen met de gemodelleerde bodemdaling volgens het geomechanisch model. Ook bevat deze appendix een kaart met de lokaties van de stations.

In de Waddenzee bevinden zich GNSS-clusters waarboven campagne metingen worden gedaan met een interval van respectievelijk 3 jaar (Waddenzee winning) en 5 jaar (Groningen), zie voor het meest recente meetregister Referentie 26.

4.3 Waterpassing

In 2023 en 2024 is door Rijkswaterstaat een waterpassing uitgevoerd in Noord-Nederland voor het bijhouden van het NAP. Bij een waterpassing worden hoogteverschillen gemeten tussen peilmerken die zijn aangebracht in onder andere gebouwen en civiele bouwwerken. De metingen worden uitgevoerd volgens de richtlijnen die de Rijkswaterstaat Centrale Informatievoorziening (RWS-CIV) stelt aan een tweede orde waterpassing (Referentie 19). Door hoogteverschillen te meten in kringen en in heen- en teruggang, kunnen eventuele meetfouten worden ontdekt en toevallige kleine variaties in de metingen worden vereffend. De inwinning en verwerking van de meetgegevens wordt gecontroleerd door RWS-CIV. De gegevens van peilmerken en actuele peilmerkhoogtes worden gepubliceerd in het Dataregister Rijkswaterstaat (Referentie 24). NAM heeft de gemeten hoogteverschillen na controle door Rijkswaterstaat ontvangen. In de vergelijking tussen metingen en prognose worden de hoogteverschillen uit de vrije vereffeningen gebruikt, om te voorkomen dat de nauwkeurigheid door aansluiting aan (wisselende) referentiepunten vermindert voor deformatie monitoring.

4.4 Representativiteit van de meetpunten

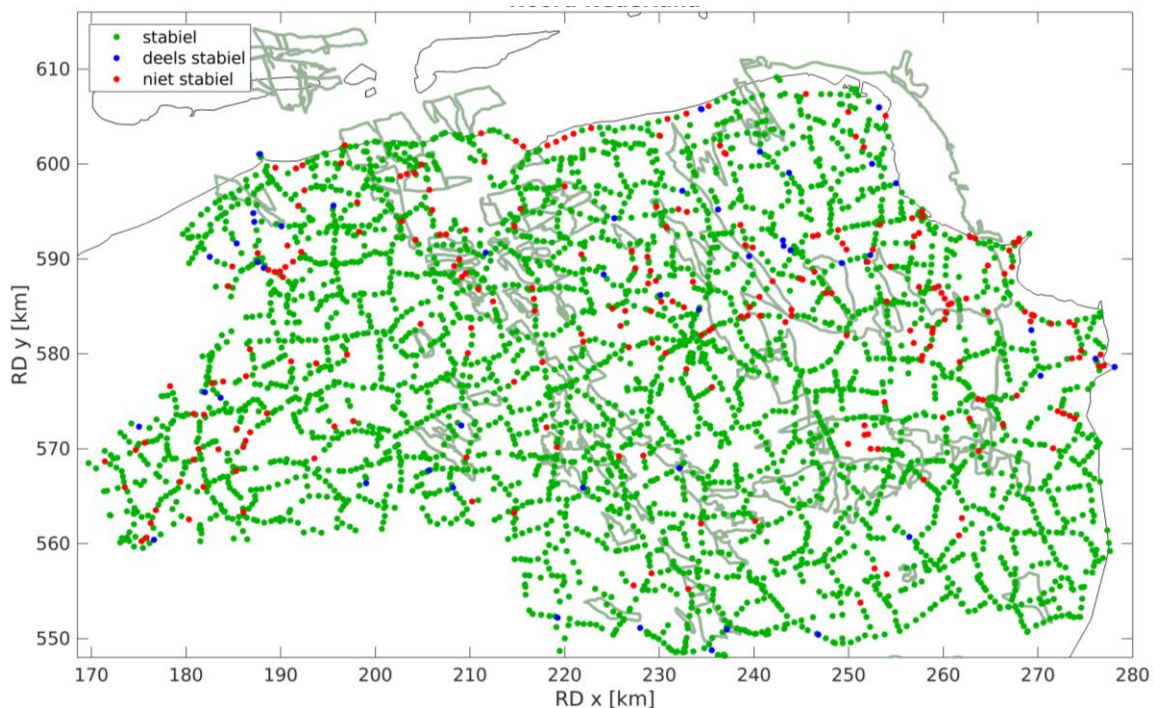
Een gemeten peilmerkbeweging kan verschillende oorzaken hebben:

- Daling van het object waaraan het peilmerk is bevestigd (bijvoorbeeld gebouw, brug, viaduct), doordat dit onder het eigen gewicht in de bodem wegzakt.
- Compactie in de ondiepe ondergrond door bijvoorbeeld aanpassing van polderpeil of natuurlijke klink.
- Compactie in de diepe ondergrond (bijvoorbeeld gaswinning, zoutwinning).
- Puntverwisseling bij de meting of verstoring van het peilmerk door b.v. werkzaamheden.

Gemeten peilmerkdaling is dus niet altijd representatief voor bodemdaling door gaswinning. Bij de berekening van peilmerkbewegingen spreken we van een stabiel verondersteld peilmerk als de daling van een peilmerk representatief wordt verondersteld voor

bodemdaling als gevolg van compactie in de diepe ondergrond, en niet onderhevig is aan andere effecten.

Veronderstellend, dat deze andere effecten lokaal beperkt zijn, volgt uit de definitie dat het bewegingsgedrag van stabiele veronderstelde peilmerken binnen een zekere marge overeenkomt met het gedrag van andere peilmerken in de omgeving. Daarop gebaseerd kunnen stabiel veronderstelde peilmerken in een ruimte-tijd analyse op een statistisch objectieve wijze worden gedetecteerd. Het resultaat van deze stabiliteitsanalyse staat afgebeeld in Figuur 4-2. Voor gedetailleerde toelichting zie Referentie 15. Om te voorkomen dat meetpunten onterechte als niet stabiel verondersteld worden aangemerkt, is de stabiliteitsanalyse op een conservatieve manier uitgevoerd. De minimale autonome beweging (in tijd gecorreleerde daling die niet ruimtelijk gecorreleerd is) waaraan een meetpunt onderhevig moet zijn om als niet stabiel verondersteld aangemerkt te worden, is 2 centimeter. Met name voor korte monitoringsperioden is dit conservatief.



Figuur 4-2; Stabiliteitsanalyse van waterpas peilmerken 2019 (Referentie 15). 93% van de geanalyseerde peilmerken wordt als “stabiel verondersteld” geclassificeerd.

Ook puntverwisselingen en peilmerkverstoringen worden in de stabiliteitsanalyse op een statistisch objectieve manier geïdentificeerd en in de gerapporteerde meetgegevens kenbaar gemaakt. Bij de geomechanische modellering wordt rekening gehouden met de (in)stabiliteit van de peilmerken. Zie voor details hierover Referentie 3, paragraaf 3.1.2.

Een gedetailleerde uitleg over de onzekerheid in geodetische metingen is te vinden in Referentie 4. De onzekerheid van geodetische metingen ten behoeve van het monitoren van bodemdaling is onder te verdelen in:

- Meetprecisie.
- Idealisatieprecisie.

Meetprecisie beschrijft de precisie die afhankelijk is van de meettechniek. Bepalend voor de meetprecisie zijn de foutenbronnen van de instrumenten waarmee de metingen worden uitgevoerd, omgevingscondities (b.v. weersomstandigheden) en het meetontwerp (inclusief de overtolligheid waarmee de metingen worden uitgevoerd).

Idealisatieprecisie beschrijft de representativiteit van de meetpunten voor bodembeweging door een bepaalde oorzaak (bijvoorbeeld gaswinning). De idealisatieprecisie bestaat uit twee componenten:

- Temporele component: dit omvat alle bewegingen die in tijd gecorreleerd zijn, maar niet in de ruimte (bijv. zetting van een individueel gebouw). Deze component wordt vaak aangeduid als 'puntstabiliteit'.
- Spatio-temporele component: dit omvat alle bewegingen die gecorreleerd zijn in zowel ruimte als tijd, anders dan het beoogde deformatiesignaal (bijvoorbeeld bewegingen door compactie van een ondiepe veenlaag of door grondwaterpeil veranderingen die meerdere meetpunten beïnvloeden).

Omdat de spatio-temporele component lokaal kan verschillen (afhankelijk van de opbouw van de geologische lagen in combinatie met de diepte van funderingen en andere ondergrondse processen (b.v. grondwaterstanden en/of onttrekking)), wordt uitgegaan van een minimale onzekerheid in de geodetische metingen bestaande uit meetprecisie en puntstabiliteit. Er moet echter wel mee rekening worden gehouden dat idealisatieprecisie (2-sigma) inclusief spatio-temporele component (lokaal) kan oplopen tot 3-4 cm over 30-40 jaar (zie Figuur 28 in Referentie 4).

4.5 Differenties en precisiebeschrijving

Door het hoogteverschil op twee tijdstippen tussen twee meetpunten van elkaar af te trekken kan de relatieve beweging tussen twee meetpunten ('dubbel-differentie') worden berekend. Deze dubbel-differenties worden gebruikt in de kalibratie van de bodemdalingsmodellen.

Voor de kalibratie van het bodemdalingsmodel voor het Groningen gasveld zijn dubbel-differenties (in ruimte en tijd) van de waterpassingen en GNSS gebruikt. Bij de precisiebeschrijving is rekening gehouden met de samenhang (correlatie) tussen de metingen. Zowel de meetprecisie als puntstabiliteit zijn hierin meegenomen. Vervolgens is de kalibratie methodiek zoals beschreven in Referentie 3 toegepast. InSAR is gebruikt bij de validatie van de gekalibreerde bodemdalingsmodellen inclusief onzekerheid.

De bodemdalingsmodellen van de overige (kleine) velden zijn in basis gebaseerd op de parameterwaarden die uit de Groningen kalibratie zijn verkregen.

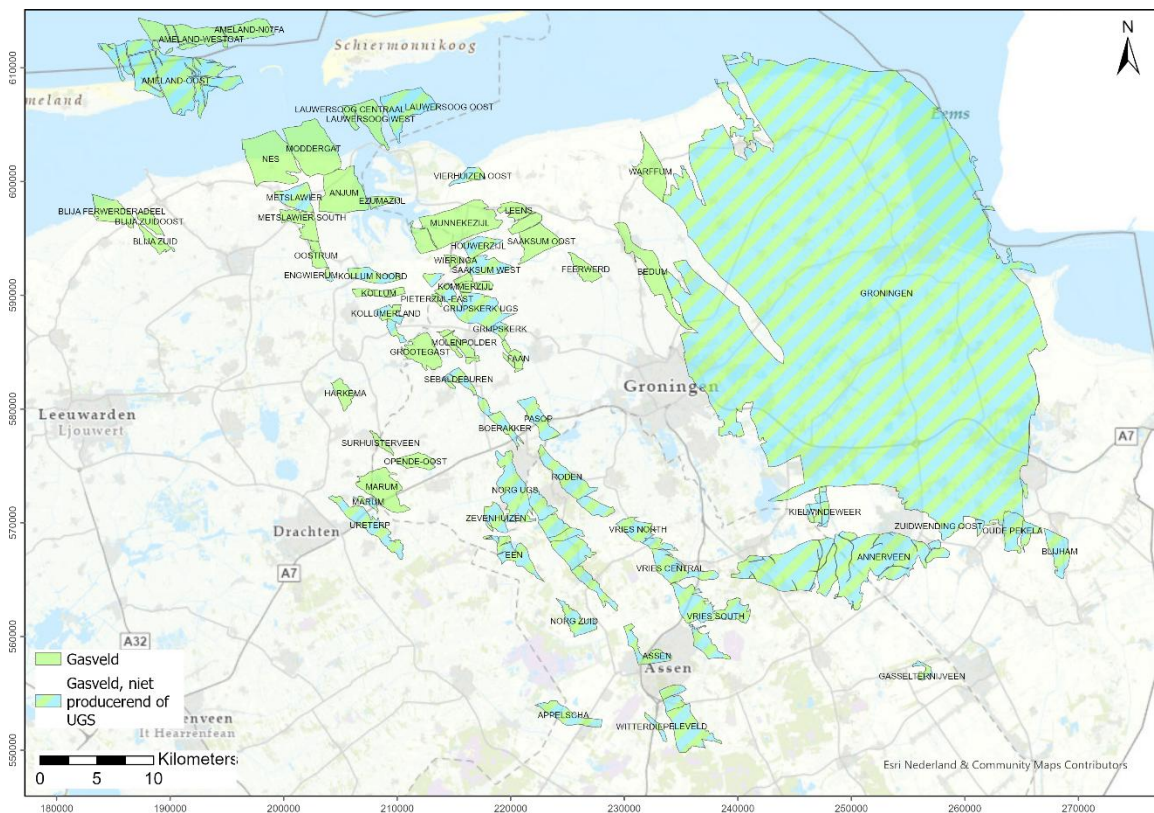
5 Modelling van de bodemdaling

5.1 Invoergegevens van de velden

Voor alle velden die bodemdaling veroorzaken op het vaste land en waarvoor de gegevens zijn bijgewerkt aan de hand van nieuwe metingen of gewijzigde inzichten, worden de kentallen gegeven van de gasvelden in Tabel 2. De gegevens reflecteren een zeer vereenvoudigd model van het voorkomen. In de berekeningen die ten grondslag liggen aan de gepresenteerde contourkaarten zijn de werkelijke reservoirstructuur en gedetailleerde eigenschappen (b.v. laterale variatie in de reservoirdikte) meegenomen.

De variatie in reservoirdruk waarbij de verschillende velden verlaten worden is mede afhankelijk van het productiemechanisme, het putgedrag, de economische levensduur van een veld en het al dan niet installeren van compressie.

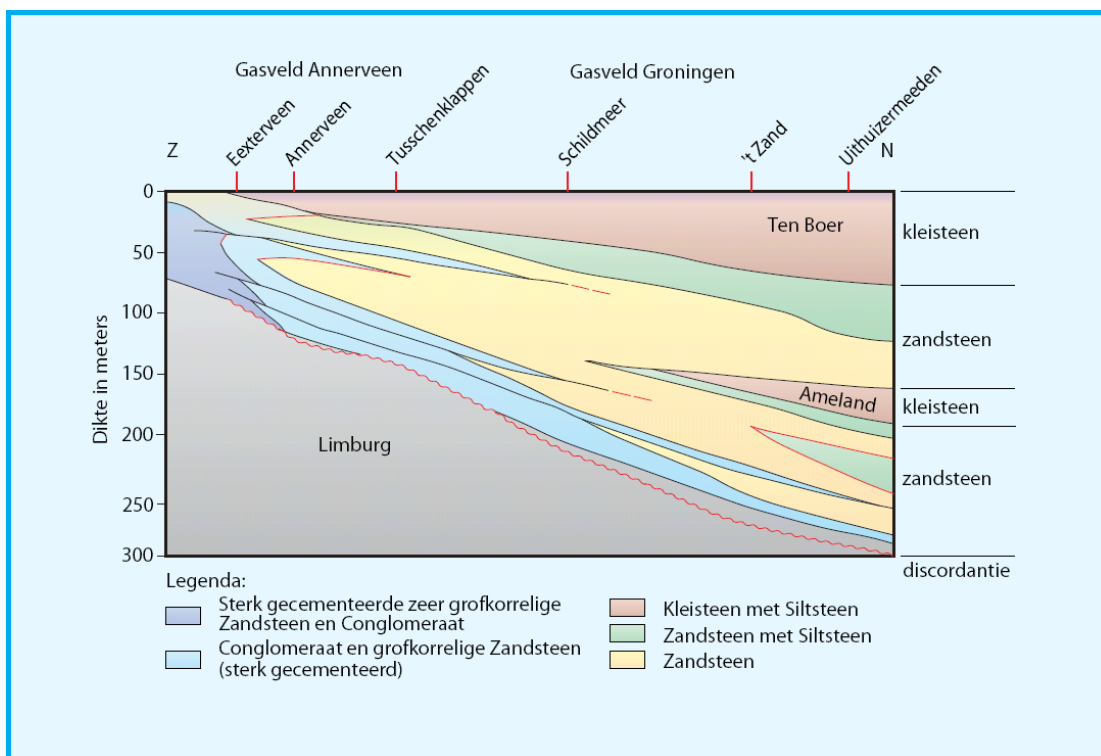
De ligging van de velden wordt weergegeven in Figuur 5-1.



Figuur 5-1; Overzicht van de gasvelden die in deze prognose zijn meegenomen (status 18-03-2026). De blauwgroen gearceerde velden zijn de velden die in 2025 (tijdelijk) niet in productie zijn of de UGS-velden (Norg en Grijskerk) representeren.

5.2 Groningen

Voor het modelleren van de bodemdaling boven het Groningen gasveld is gebruik gemaakt van de beschikbare geologische inzichten in combinatie met inversie van de gemeten daling. Het Groningen-veld is zeer groot waarbij de eigenschappen van het veld variëren. De diepteligging van het veld varieert van zuid naar noord, in het zuiden ligt de top van het reservoir op ongeveer 2750 m, terwijl in het noordelijke deel van het veld de top van het reservoir op ongeveer 2900 m diepte ligt. De dikte varieert van ongeveer 100 m in het zuiden van het veld tot een dikte van 200 m in het noordelijke deel van het veld. Een schematisch doorsnede van de dikte van het reservoir van het veld is getoond in Figuur 5-2. Ook is het waarschijnlijk dat de compactiecoëfficiënt over het veld varieert. Deze variatie is indirect afgeleid d.m.v. inversie naar compactie aan de hand van de gemeten bodemdaling. Deze inversiestap wordt in detail beschreven in Referentie 3.

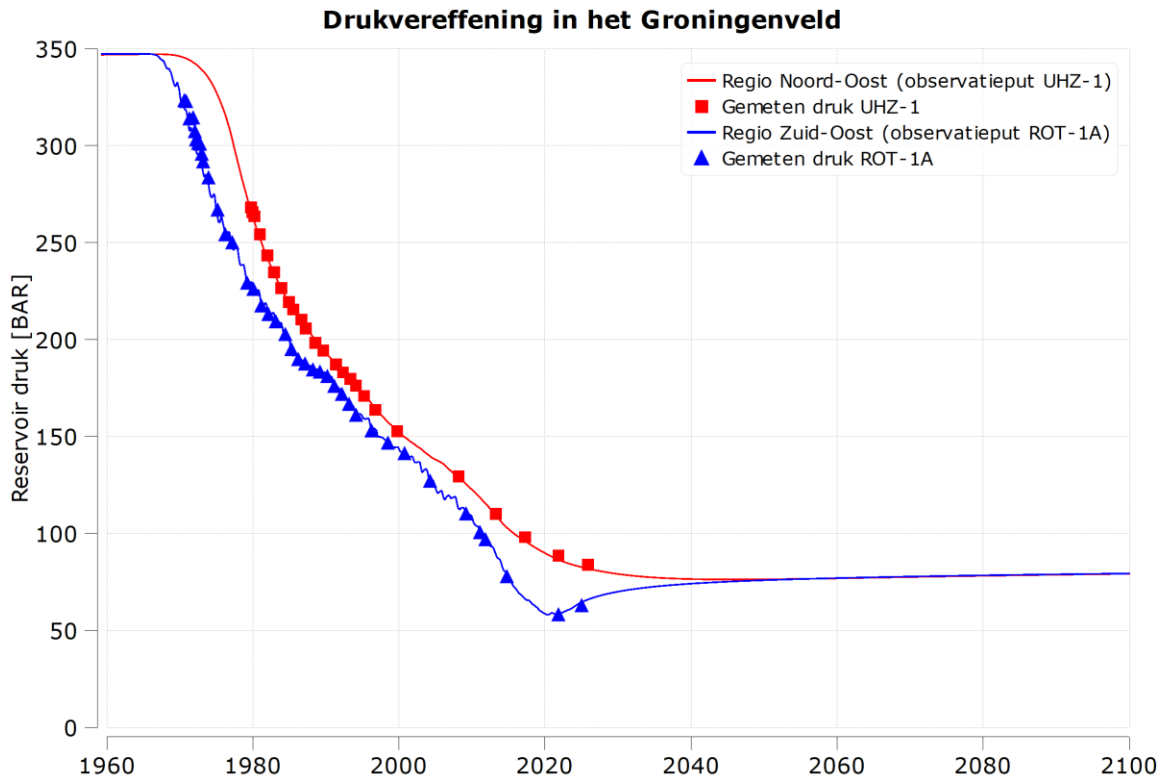


Figuur 5-2; Schematische weergave van de geologie van het Groningen-gasveld.

De drukontwikkeling in het Groningen-veld wordt in detail beschreven in Referentie 3. De productie is ingesloten op 1 oktober 2023. De laatste gasproductie was van 8 tot 10 januari 2024 toen, op verzoek van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat, vanuit twee locaties van het Groningen gasveld, voor korte tijd geproduceerd werd op het waakvlam niveau.

Het reservoirsimulatiemodel is in 2023 opnieuw gekalibreerd met de productievolumes, gemeten drukken, en metingen van het gas-water-contact (Referentie 23). Door beëindiging van productie in 2023 zal de velddruk hoger blijven, wat eveneens aangenomen is in het voorgaande Statusrapport.

De druk in het Groningen gasveld wordt gemonitord in een aantal observatieputten. Figuur 5-3 toont het historische en verwachte verloop van de druk in de meest noordelijke observatieput (UHZ-1) en de observatieput in regio zuidoost (ROT-1A). Het drukverschil, ontstaan door het eerder insluiten van de noordelijke clusters, zal naar verwachting in de komende 10 jaar verder vereffenen.



Figuur 5-3; Reservoirdrukken in het noorden en zuiden van het Groningen gasveld. De lijnen geven modeldrukken aan.

Tabel 2: Overzicht van de gegevens die zijn gebruikt in deze bodemdalingsstudie. De drukgegevens betreffen de gemiddelde gasdrukken.

Veld	Productie sinds (jaar)	Initiële druk (bar)	Huidige druk (bar)	Einddruk (bar)	Gemiddelde C_m (10^{-5} /bar)	Gemiddelde depleterende dikte (m)
Anjum	1997	565	65	43	1,65	109
Annerveen	1973	342	35	35	0,69	126
Appelscha	1999	304	106	106	1,05	93
Assen	2007	337	211	210	0,92	178
Bedum	1985	360	136	136	1,35	222
Blija Zuid	2011	377	210	181	1,17	112
Blija Zuid-Oost	2001	377	146	111	1,16	108
Blija-Ferwerderadeel	1985	377	251	231	1,26	120
Blijham	1984	412	40	33	0,96	76
Boerakker	1998	338	65	65	1,59	188
Burum Oost	2014	428	418	418	1,04	105
Een	2005	300	216	208	0,88	45
Eleveld	1975	383	18	18	0,74	100
Engwierum	2002	420	225	225	1,31	105
Ezumazijl	1999	502	484	483	1,35	106
Faan	2009	387	165	165	0,79	202
Feerwerd	2000	404	195	183	1,20	115
Gasselternijveen	2008	565	144	144	0,73	20
Grijskerk UGS	1993	394	369	379	1,32	212
Groningen	1963	350	69	79	1,33	172
Grootegast	1979	334	39	36	1,51	150
Harkema	2010	292	74	62	1,04	80
Houwerzijl	2000	423	238	238	1,08	117
Kielwindeweer	2003	381	80	80	0,76	116
Kollum	2002	441	228	221	0,93	95
Kollumerland	1989	343	56	56	1,31	90
Kollum-Noord	2001	443	114	43	1,72	190
Kommerzijl	2001	410	110	107	1,24	121
Lauwersoog-C	2012	516	509	505	1,14	97
Lauwersoog-Oost	2008	486	430	409	1,13	114
Lauwersoog-West	2008	487	411	386	1,17	97
Leens	2003	423	115	104	1,20	121
Marum	1978	281	96	68	1,18	122
Metslawier	1997	573	492	463	1,59	107

Veld	Productie sinds (jaar)	Initiële druk (bar)	Huidige druk (bar)	Einddruk (bar)	Gemiddelde Cm (10 ⁻⁵ /bar)	Gemiddelde depleterende dikte (m)
Metslawier Zuid	2014	558	200	157	0,85	81
Moddergat	2007	573	492	463	1,59	107
Molenpolder	2001	370	108	107	1,00	208
Munnekezijl	1995	424	74	72	1,35	117
Nes	2007	568	387	322	1,91	99
Norg-Zuid	1999	312	110	110	0,86	142
Norg UGS	1983/ 1995	351	323	299	0,91	180
Oostrum	2002	522	84	82	1,24	96
Opende-Oost	1993	292	58	51	1,64	152
Oude Pekela	1995	331	11	11	0,92	70
Pasop	1997	360	252	281	1,04	304
Pieterzijl Oost	2016	400	207	184	0,91	109
Roden (blok 1 / 2)	1976	359	238	218	1,01	186
Saaksum(O/W)	1999	412	156	151	1,36	94
Sebaldeburen	1997	338	83	83	0,92	172
Surhuisterveen	2008	289	88	107	1,00	85
Ureterp	1978	281	70	70	1,31	125
Vierhuizen (Oost)	2008	474	391	358	1,27	110
Vries-South/Central/ North)	1991	345	171	171	0,90	142
Warffum	1986	365	210	183	1,75	241
Wieringa	2014	404	242	213	1,07	112
Witterdiep	2007	341	81	81	0,82	118
Zevenhuizen	2008	306	29	29	0,89	147
Zuidwending-Oost	2006	347	8	8	0,82	67

Voor een aantal velden, zoals de waddenvelden (Anjum, Metslawier, Ezumazijl, Nes, Moddergat, Lauwersoog C, W, O en Vierhuizen) geldt dat de drukken zijn berekend met een reservoirsimulatiemodel. Ook de velden Norg, Grijskerk en Groningen worden berekend met een dergelijk numeriek model.

Voor een aantal velden wordt aangenomen dat er laterale aquifers verbonden zijn met de gasreservoirs die (gedeeltelijk) mee dalen in druk. De drukdaling in de aquifers rondom deze velden is over het algemeen minder dan de drukdaling in het gasreservoir zelf. Een middeling tussen aquifer- en gasdrukken zal leiden tot een hogere gemiddelde druk relatief t.o.v. de drukdaling in alleen het gasreservoir. De getabuleerde drukken gelden dus voor de gemiddelde reservoirdruk en zijn niet representatief voor de reservoirdruk in het gasgedeelte. Voor de velden waar alleen een drukdaling is berekend voor het gasreservoir geldt over het algemeen een lagere einddruk.

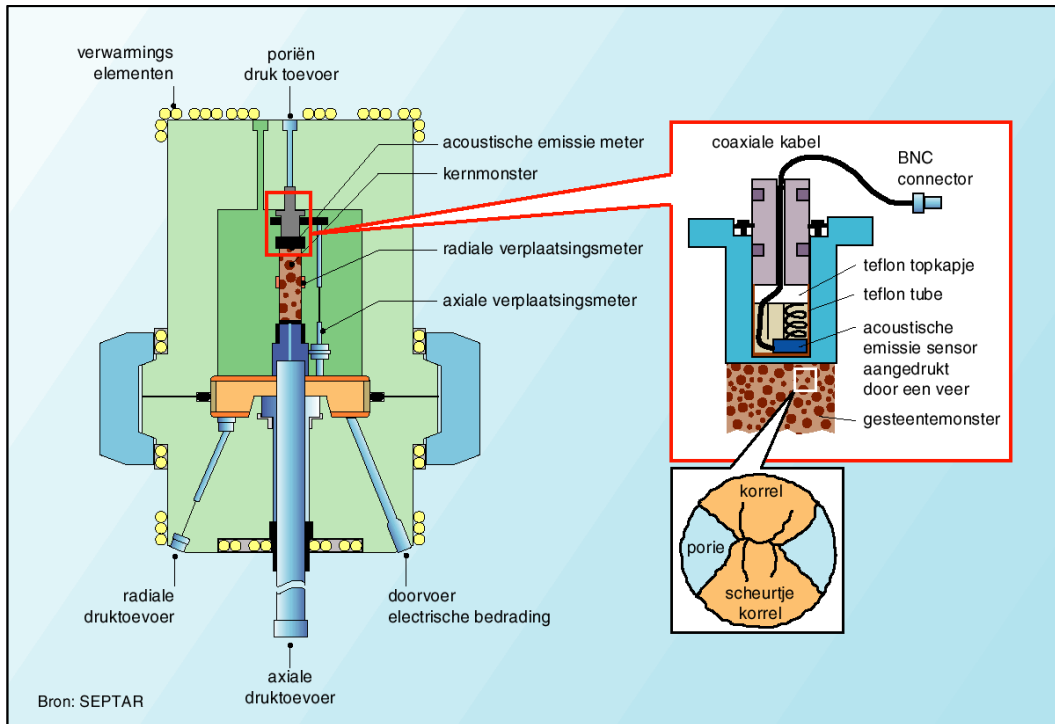
Zoals in de inleiding is aangegeven, veroorzaakt gasproductie uit een gasveld drukdaling in de gasvoerende gesteentelaag, het reservoir. Hierdoor wordt deze gesteentelaag langzaam iets samengedrukt onder het gewicht van de bovenliggende lagen. In hoeverre het reservoir wordt samengedrukt (of compacteert), hangt af van het compactiegedrag, de dikte van de formatie en de drukdaling in het reservoir. De mate waarin de compactie van de reservoirformatie wordt omgezet in bodemdaling aan het maaiveld is onder meer afhankelijk van de diepte en omvang van het depleterende gasveld. Om een prognose van de bodemdaling te maken, moet een model voor het compactiegedrag worden bepaald. Bepalende factoren voor het compactiegedrag zijn onder andere cementatie (mate waarin zandkorrels aan elkaar gekit zijn), porositeit en microstructuur van het gesteente. Tot nu toe is er geen model beschikbaar dat een kwantitatief verband geeft tussen deze parameters en het compactiegedrag. Daarom wordt een empirisch model afgeleid uit macroscopische waarnemingen, zoals bodemdalingmetingen en compactie-experimenten die worden uitgevoerd in een gesteentemechanisch laboratorium.

De parameterwaarden van het compactiemodel (paragraaf 5.6), dat wordt toegepast in het Noord-Nederlandse bodemdalingsmodel van de gasvelden in Groningen, Friesland en Noord-Drenthe, worden bepaald met behulp van de volgende methoden:

- Compactiemetingen op gesteentemonsters in het laboratorium.
- In-situ compactiemetingen in het Groningen-gasveld.
- Inversie van de gemeten bodemdaling boven de gasvelden.

5.3 Laboratoriumexperimenten.

Voor de compactiemetingen zijn gesteentemonsters afkomstig uit de Slochteren-Zandsteenformatie van de reservoirs van de Groningen-, Friesland- en Noord-Drenthe-gasvelden gebruikt. Deze monsters worden zorgvuldig geselecteerd, zodat ze representatief zijn voor het mechanisch gedrag over de totale dikte van het reservoirgesteente. De monsters worden zo georiënteerd dat ze in het experiment in dezelfde richting vervormd worden als in het reservoir. De omstandigheden in het experiment worden zo gekozen dat ze overeenkomen met de drukken en spanningen in het reservoir (zie Figuur 5-4). De verticale en horizontale spanningen zijn gelijk aan die in het veld, evenals de temperatuur. De poriën van het kernmonster zijn gevuld met een zoutoplossing die dezelfde samenstelling heeft als het water dat, naast het te winnen gas, in het reservoir gevonden wordt.



Figuur 5-4: Compactie-apparaat, geschikt voor experimenten bij reservoirtemperatuur (100°C). De gesteentemonsters hebben een lengte van 65 mm en een doorsnede van 35 mm.

Ondanks het zorgvuldig nabootsen van de omstandigheden in het reservoir, wordt vaak in het lab een (iets) ander compactiegedrag geobserveerd dan in het veld. Mogelijke oorzaken zijn beschadigingen van het gesteente tijdens het uitboren en verschillend compactiegedrag door het voorkomen van b.v. zwakkere breukvlakken in het reservoirgesteente op grotere (veld)schaal.

Tussen 2013 en 2015 zijn uitvoerige testen verricht op kernmateriaal uit de boring MGT-3 (Referentie 7). Deze testen laten zien dat 20% van de totale geobserveerde axiale deformatie (vervorming in de lengterichting van het gesteentemonster) een tijdsafhankelijk karakter heeft (kruip). Deze tijdsafhankelijkheid wordt meegenomen in de gebruikte compactierelaties die ten grondslag liggen aan de bodemdalingsberekeningen in dit statusrapport.

In 2015 zijn er in het Groningen veld nieuwe kernen genomen in de Zeerijp-3 boringen, speciaal voor verder geomechanisch onderzoek (Referentie 17). Kernmateriaal is niet alleen beschikbaar gekomen voor het reservoir (Slochteren Formatie), maar ook voor de gesteentelagen erboven (Ten Boer Laagpakket) en eronder (Limburg Groep). Het RTCiM compactiemodel (Referentie 10) is gevalideerd met deze metingen (Referentie 3) en waarden voor de gesteentecompressibiliteit uit de experimenten liggen dicht tegen de waarden voor de compressibiliteit die gevonden worden na de passing met de metingen.

5.4 Compactiemetingen in diepe observatieputten.

Enkele jaren na het begin van de gasproductie uit het Groningen gasveld werd besloten een meetprogramma op te zetten om de samendrukbaarheid (compressibiliteit) van het reservoirgesteente in het reservoir zelf te meten.

Hiertoe werden in elf observatieputten laag-radioactieve markeringen (kogels) om de tien meter over het gehele reservoir aangebracht. Door periodiek de (verandering van de) afstand tussen de markeringen te bepalen, werd inzicht verkregen in de reservoircompactie. De putten zijn over het veld verspreid, zodat ook het effect van gesteentevariabiliteit onderzocht kan worden. Om ook informatie te verkrijgen over mogelijke compactie van de formaties boven en onder het reservoir zijn in drie putten (Roode Til, Ten Boer en De Hond) ook kogels geschoten in de bovenliggende Ten Boer Kleisteen en in de onderliggende Limburg-groep.

Van 1974 tot 1982 werden metingen in de diepe compactieputten uitgevoerd met een precisie dieptemeter van Schlumberger (PDM). Deze methode bleek echter niet nauwkeurig genoeg en in 1982 werd de meetapparatuur vervangen door de zogenaamde "Formation Subsidence Monitoring Tool" (FSMT van Schlumberger), waarmee meer nauwkeurige compactie metingen konden worden gedaan. Vanaf 2010 wordt ook de "Compaction Measurement Instrument" (CMI van Baker Hughes) gebruikt, die volgens hetzelfde principe werkt als de FSMT.

Het meest recente onderzoek (Referentie 6) heeft echter uitgewezen dat de metingen en interpretaties niet accuraat genoeg zijn om de compactie te meten in de Slochteren Formatie. Omdat de verwachting is dat het signaal in de toekomst (na beëindiging van de productie in 2023) alleen maar kleiner wordt, heeft NAM besloten de metingen in deze observatieputten te stoppen. Als alternatief is in 2015 een verbeterde monitoringstechniek gerealiseerd in de Zeerijp-3A boring: "distributed strain sensing (DSS)"

5.4.1 DSS-metingen

De Zeerijp-3A put is uitgerust met een DSS-kabel, die geïnstalleerd is aan de buitenkant van de verbuizing van de put en via het cement in verbinding staat met het gesteente. Deze glasvezelkabel kan de rek (compactie) nauwkeurig en frequent (meerdere keren per dag) meten (Referentie 8). De compactie wordt in deze metingen als rek (verandering van de dikte gedeeld door de oorspronkelijke dikte) bepaald per interval van 2 cm. Continue metingen worden sinds 2015 uitgevoerd in een deel van de Zechstein Groep, het Ten Boer Laagpakket, de Slochteren Formatie en een deel van de Limburg Groep. De data van 2015 tot 2021 is publiekelijk beschikbaar via EPOS-NL¹.

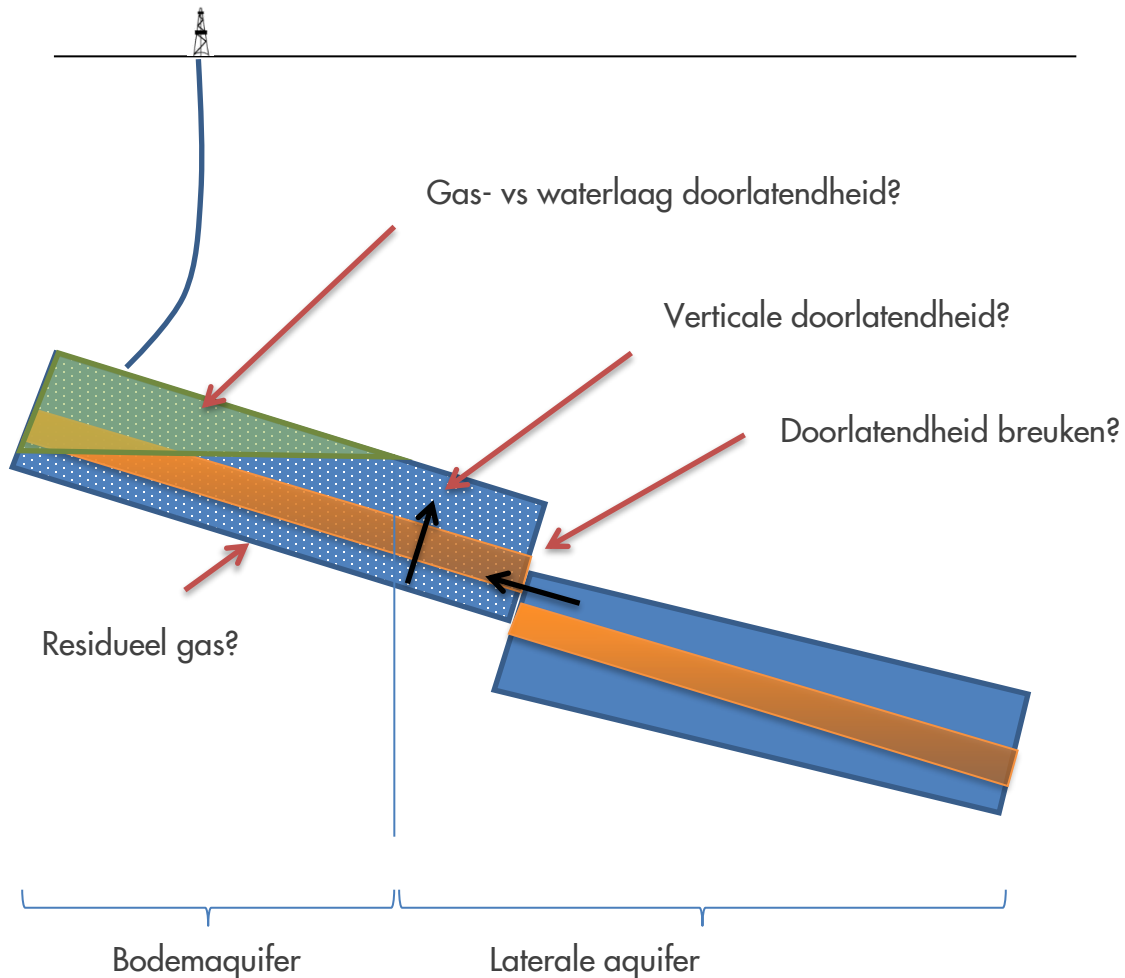
5.5 Aquifers

Zoals in eerdere prognoses al is aangegeven kunnen de diepte en omvang van een bodemdalingsschotel sterk worden beïnvloed door de aanwezigheid van aquifers (watervoerende lagen) die in verbinding met het depleterende gasreservoir staan. In plaats van gas zit in de poriën van deze lagen (zout) water. De aquifer onder het gasreservoir noemen we bodemaquifer. Aquifers lateraal grenzend aan het gasreservoir worden laterale aquifers genoemd (Figuur 5-5).

De druk in de mogelijke aquifers wordt niet direct gemeten omdat er geen putten in deze gebieden staan. Het voorspellen van het drukverloop in de aquifers wordt verder bemoeilijkt door de onzekerheid die bestaat voor de factoren die een invloed hebben op de doorlatendheid van het water naar het depleterende gasreservoir. Mogelijke factoren hierbij

¹ https://epos-nl.nl/data_storage_access/

zijn verticale gesteente doorlatendheid, mogelijke breuken die goed of juist slecht doorlatend zijn en residueel gas dat door drukdaling kan uitzetten en zo mogelijke porieverbindingen kan blokkeren (en daarmee de doorlatendheid van het gesteente op termijn verlagen). Dit wordt verder geïllustreerd in Figuur 5-5.



Figuur 5-5; Drukvaling in aquifers en factoren van invloed (tekening niet op schaal).

Voor deze aquifers zijn een aantal aannames gemaakt over het mogelijke drukverloop. Wanneer er (te) weinig informatie beschikbaar was over het actuele verloop van de druk in deze aquifers is vastgehouden aan conservatieve inschattingen.

Bodemaquifer

Het bodemwater onder het gasvoerende gedeelte van het Groningenreservoir komt voornamelijk voor in het noordelijk deel van het gasveld. Uit drukmetingen in het watervoerende deel is gebleken dat het bodemwater aan dezelfde drukdaling onderhevig is als het gasgedeelte van het veld. Voor Groningen wordt deze informatie expliciet meegenomen in de 3D reservoirmodellering.

Voor de overige velden geldt dezelfde aanname dat de bodemaquifer evenveel in druk daalt als in het gasgedeelte van het reservoir.

Laterale Aquifers

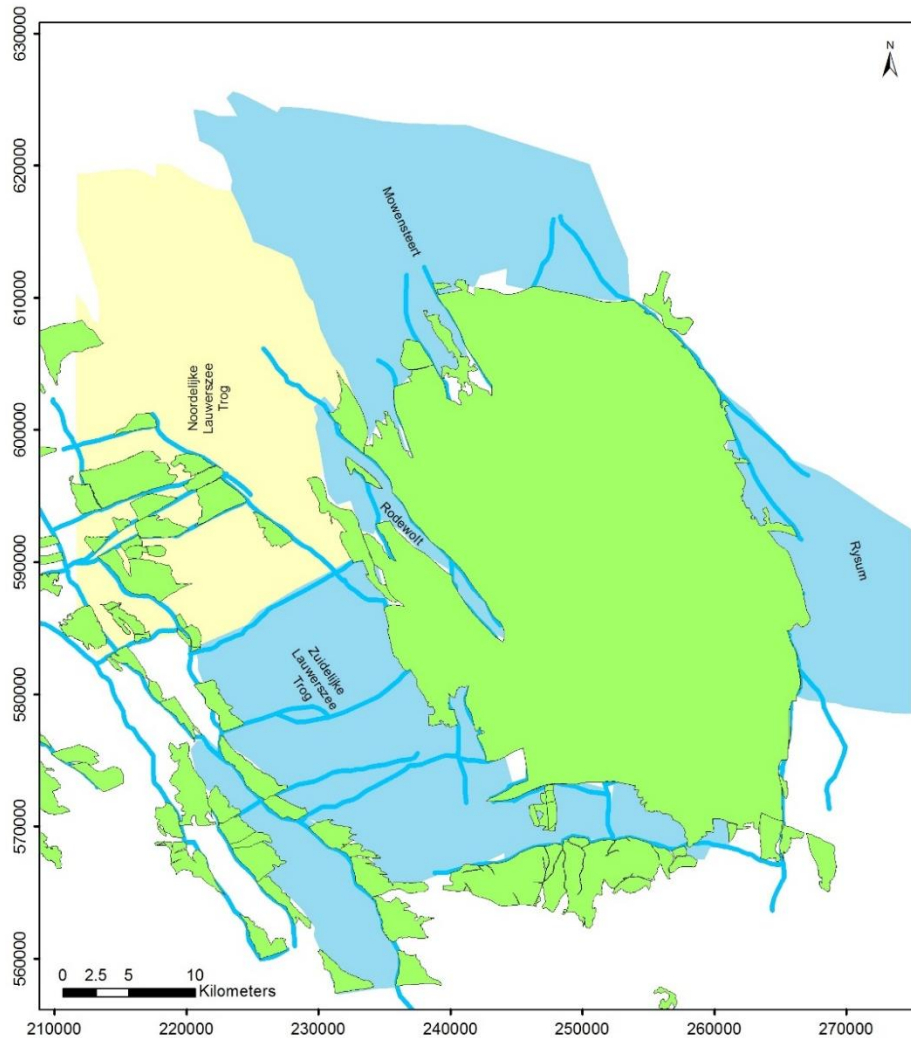
Om de toekomstige drukdaling in de laterale aquifers te bepalen is aangenomen dat de omvang (geologische structuur) van de aquifers in de toekomst niet zal veranderen.

Voor de laterale aquifers rondom het Groningen gasveld is in 2020 een uitgebreide studie uitgevoerd waarbij het meest waarschijnlijke drukverloop in deze aquifers volgt uit een analyse van de bodemdalingsgegevens (Referentie 3). De drukdaling van deze aquifers zijn voor dit Statusrapport verder gekalibreerd met de bodemdalingsmetingen.

De aquifers in de Zuidelijke Lauwerszee trog (tussen de velden Pasop, Roden, Vries en het Groningen-veld, zie Figuur 5-6) worden grotendeels expliciet gemodelleerd in het Groningen V7 dynamische model. Dit model simuleert depletie in de aquifer ten gevolge van de gasproductie uit de velden Pasop, Roden en Vries d.m.v. waterproductie uit pseudo-aquifer putten. De productie uit deze putten gaat langer door dan in het model van 2023 (Referentie 23) omdat dat beter past bij de waargenomen bodemdaling.

Voor Anjum, Norg en Grijskerk zijn dynamische reservoirmodellen gemaakt en worden de aquiferdrukken gebruikt die uit deze modellen volgen. Tevens zijn Bedum en Warffum gemodelleerd tezamen met het dynamische reservoirmodel van Groningen.

Voor de overige velden is aangenomen dat de aquifers voor 50% mee depleteren met gasveld gedurende productie en volledig depleteren na beëindiging van de productie uit het gasveld. Dit is een conservatieve aanname omdat het niet waarschijnlijk is dat de laterale aquifers volledig zullen depleteren. Meer informatie over de ligging van de aquifers is terug te vinden in de winningsplannen die geldend zijn voor de kleine velden.



Figuur 5-6: Schematische weergave van de aquiferzones (in blauw) rond het gasveld Groningen.

5.6 Bodemdalingsmodel

Voor de meeste velden worden de bodemdalingsberekeningen uitgevoerd met behulp van analytische computermodellen die gebaseerd zijn op "Geertsma & Van Opstal Rigid Basement", waarbij de Poisson's ratio de enige gesteentemechanische parameter die van invloed is op de mate waarin compactie in bodemdaling wordt vertaald (in dit geval met waarde 0,2). Bij deze vertaling worden alle bovenliggende lagen als één uniforme laag beschouwd, die elastisch deformeert. Het Rigid Basement is een veronderstelde, niet deformerende, onderlaag die in het geval van Groningen en alle omliggende velden tussen 5 en 7 km diepte wordt aangenomen. Deze extra conditie zorgt ervoor dat de komvorm beter past bij de bodemdalingskom die uit de metingen volgt.

Naast de berekeningen met het analytische model zijn in het verleden voor het Groningen-gasveld ook bodemdalingsberekeningen uitgevoerd met het eindige elementenprogramma Geomec, een door Shell en TNO-bouw ontwikkeld programma op basis van het eindige

elementen programma DIANA van TNO (<https://dianafea.com>). Geomec berekent spanningen en vervormingen in gesteentelagen als gevolg van spannings- en drukveranderingen (door gaswinning). De berekeningen uitgevoerd met het analytische model kwamen goed overeen met de berekeningen uitgevoerd met het eindige elementenmodel. Tevens zijn ook bodemdalingsberekeningen uitgevoerd in het kader van het aardbevingenonderzoek met het eindige elementen pakket ABAQUS (Referentie 9). Vergelijkingen met dit laatste model laten zien dat de analytische modellen beter passen met de metingen dan het numerieke model, hetgeen vertrouwen geeft in de berekeningen die ten grondslag liggen aan de resultaten gepresenteerd in dit status rapport. Een tweede voordeel van het analytische model is dat hiermee snel uitgebreide probabilistische berekeningen kunnen worden uitgevoerd (Referentie 3). Ook voor de Waddenvelden is aangetoond (LTS-II studie, Referentie 4) dat resultaten van de analytische modellen zeer goed overeenkomen met de resultaten die berekend worden met behulp van Geomec.

Een bodemdalingsmodel bestaat uit een compactiemodel en een invloedsmodel dat de compactie vertaalt naar de bodemdaling aan het maaiveld. Het invloedsmodel is opgesteld volgens Geertsma en van Opstal, dat in de vorige paragraaf beschreven is. De compactie wordt berekend met het RTCiM (Rate type compaction model, waarbij de i voor isotachen staat, Referentie 16). Het RTCiM is het meest flexibele compactiemodel dat gebruikt kan worden om een passing te zoeken tussen geodetische metingen en geomechanische modellen en heeft 3 vrije parameters. "Cmd" bepaalt de compactie direct bij depletie. Bij verdere depletie neemt de compressibiliteit toe naar een hogere waarde "Cmref". De snelheid waarmee Cmd overgaat naar Cmref wordt bepaald door de "b" factor. Dit tijdsafhankelijke gedrag zorgt ervoor dat de compactie (en dus ook de bodemdaling) met enige vertraging reageert op de drukdaling bij de start van de winning en ook nog enige tijd door zal gaan na het stoppen van de winning. Dit effect wordt inderdaad waargenomen boven sommige Nederlandse gasvelden.

5.7 Compactiemodel parameters bepalen met behulp van een Monte-Carlo simulatie

In de vorige paragrafen werd uitgelegd dat de analytische bodemdalingsberekening goed geschikt is om een passing te verkrijgen met de gemeten bodemdalingsdata en een voorspelling te maken van de toekomstige bodemdaling.

Voor Groningen is opnieuw een uitgebreide kalibratie aan de bodemdalingsdata gedaan waarbij de methodiek is gebruikt die in Referentie 3 staat beschreven.

Deze kalibratiestap heeft geleid tot de parameterwaarden zoals weergegeven in Tabel 3. De waarden voor Groningen gelden ook als basis voor de kleine velden. Voor het Norg veld zijn de waarden beperkt aangepast. Deze aanpassing is gedaan omdat daarmee de waargenomen jaarlijkse bodemstijging beter gemodelleerd kan worden. Norg kent een jaarlijkse cyclische injectie- en productieperiode, waarbij de reservoirdruk in de injectieperiode stijgt en in de productieperiode daalt. Het effect van deze cyclische productie op de bodemdaling is te zien op de GNSS-metingen boven Norg. Deze aangepaste parameterwaarden resulteren in een vergelijkbare bodemdaling als bij gebruik van de Groningen parameterwaarden, maar geven een betere passing met de gemeten bodemstijging. Voor een aantal kleine velden zijn de C_{mref} en C_{md} waarden vermenigvuldigd met een factor om de passing met de metingen lokaal te verbeteren. Deze lokale aanpassingen zijn gedaan in het kader van (de aanvragen van) nieuwe winningsplannen. Deze hogere waarden zijn meegenomen in dit statusrapport.

Tabel 3: Basis parameterwaarden voor de berekening van de compactie.

parameter	Groningen en kleine velden	Norg veld
C_{mref} (Totale C_m) [$10^{-5}bar^{-1}$]	1,17	0,81
C_{md} (elastisch gedeelte) [$10^{-5}bar^{-1}$]	0,42	0,33
B ("tijd component")	0,032	0,017

Tevens zijn de Waddenzee velden apart gekalibreerd, dit is gedaan voor de Meet- en regelcyclus over het jaar 2024 (Referentie 2).

5.8 Ondiepe compactie van de ondiepe ondergrond

5.8.1 Oorzaken van ondiepe compactie

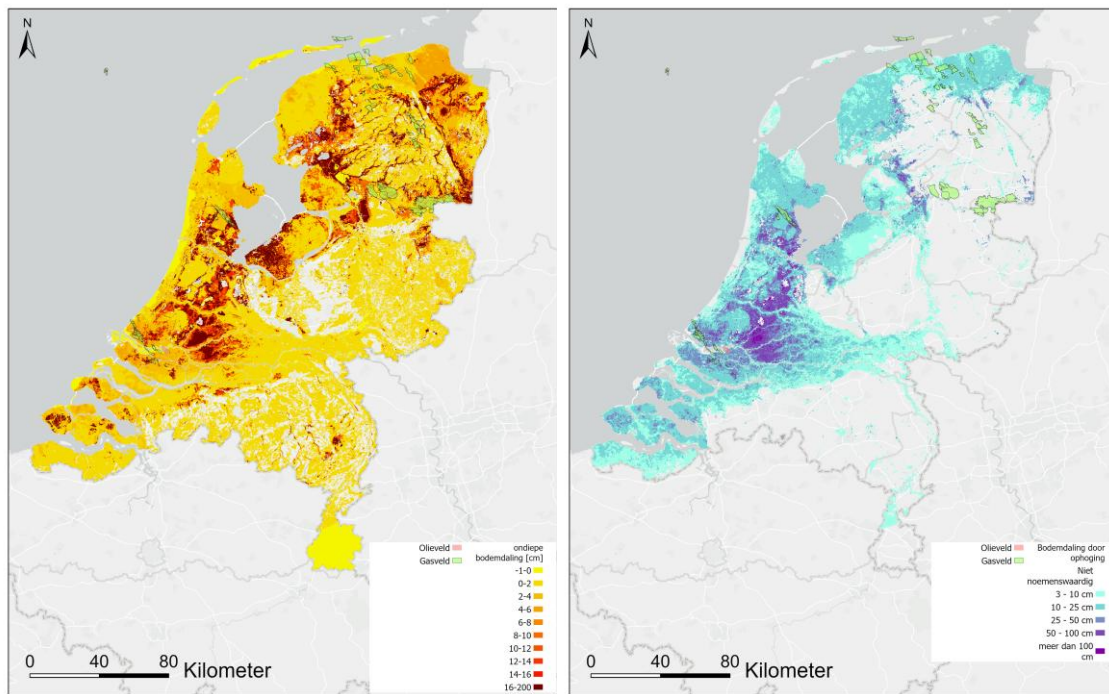
Naast de menselijke activiteiten zoals gaswinning en grondwateronttrekking, zijn er ook diverse natuurlijke processen die bodemdaling veroorzaken. Een belangrijke natuurlijke factor is compactie van sedimenten zoals klei en zand. Vooral in delta- en kustgebieden, kan het gewicht van bovenliggende lagen ervoor zorgen dat de onderliggende lagen samendrukken, wat leidt tot daling van het oppervlak.

Daarnaast speelt oxidatie van organisch materiaal een rol, met name in veengebieden. Wanneer veen in contact komt met zuurstof, bijvoorbeeld door verlaging van het grondwaterpeil, breekt het organisch materiaal af, wat leidt tot volumeverlies en bodemdaling. Klimaatverandering heeft een grote invloed op de schommelingen in het grondwaterpeil met als gevolg dat bodemdaling door natuurlijke processen steeds meer zichtbaar zijn². In veel gebieden in Nederland wordt het oppervlaktewater gereguleerd

² <https://www.deltares.nl/expertise/onze-expertises/bodemdaling>

volgens een vast peil. Peilbesluiten binnen peilvakken hebben ook invloed op het grondwater dus deels kan een mechanisme als veenoxidatie ook veroorzaakt zijn door menselijk handelen (antropogeen). In de klimaateffectatlas zijn kaarten te zien van mogelijke bodemdaling aan de hand van scenario's. Deze scenario's volgen uit aannames over de aanpassing van het oppervlaktewaterpeil en de mate van toekomstige klimaatverandering. In de winningsplannen worden deze kaarten ook getoond omdat ze ook enig inzicht geven in de historische daling door natuurlijke processen. In Figuur 5-7 wordt in het linker figuur een kaart getoond van het scenario met milde klimaatverandering en het vasthouden van het bestaande peil ook wel peilfixatie genoemd. Bodemdaling door gaswinning zal in een dergelijk scenario voor extra vernatting zorgen.

Het indexeren (meebewegen) van het peil met de daling was een gebruikelijke maatregel in het verleden en vaak werden peilen extra verlaagd om het berijden van percelen met zware landbouwmachines of het behouden van bepaalde gewassen mogelijk te maken. Lokaal kan grondwateronttrekking ook worden veroorzaakt door bomen, die daarmee ook lokaal voor differentiële bodemdaling zorgen.



Figuur 5-7: Links: berekening van de maaiveldaling door natuurlijke processen, uitgaande van een mild klimaatscenario en peilfixatie. Rechts: effect van 1 meter ophoging op de daling van het maaiveld (Klimaateffectatlas, 2025).

Naast natuurlijke compactie zal ook de ophoging van land leiden tot inklink en daardoor extra daling. In sommige gevallen wordt door het proces van inklinking het effect van ophoging binnen tientallen jaren weer tenietgedaan (Figuur 5-7, rechter figuur).

Meetpunten die gebruikt worden voor de monitoring van bodemdaling door gas- en oliewinning zijn meestal gerelateerd aan objecten (en meten dus niet de maaiveldaling). Afhankelijk van de diepte van de fundatie en opbouw van de grondlagen is het mogelijk dat de meetpunten deels onderhevig zijn aan ondiepe compactie.

5.9 Compactiemetingen van de middeldiepe ondergrond

Om een onderscheid te maken tussen de bodemdaling veroorzaakt door diepe compactie ten gevolge van gaswinning en ondiepe compactie door andere oorzaken, is in de provincie Groningen tussen 1970 en 2003 de compactie gemeten van de middeldiepe ondiepe ondergrond in veertien speciale compactieputten. De ondiepe compactie werd gemeten tussen een diepte van ongeveer 20 m (fundatie meetgebouw) tot zo'n 400 m. De dalings-snelheid bleek, na de initiële zetting van de fundering van de meetgebouwen gedurende de eerste zeven jaar, over een periode van 25 jaar nagenoeg constant te zijn per locatie, variërend van 0 tot 1 mm per jaar. Om deze reden zijn de metingen, zoals beschreven in het vorige statusrapport, na overleg met de Commissie Bodemdaling Groningen en SodM in 2003 beëindigd, waarna de ondiepe compactieputten in de provincie Groningen zijn verlaten.

Sinds 1992 werden ook ondiepe compactiemetingen in Drenthe (Annerveen) en Friesland (Tietjerksteradeel) uitgevoerd. Deze metingen zijn allen gestopt.

De volledige dataset is inmiddels publiekelijk beschikbaar via EPOS-NL³. TNO heeft deze dataset verder geanalyseerd en de bevindingen gepubliceerd (Referentie 25).

³ https://epos-nl.nl/data_storage_access/

6 Vergelijking tussen de metingen en prognose van de bodemdaling

In Figuur 6-1 worden de bodemdalingscontouren volgens het aan de metingen gekalibreerde model voor het jaar 2023 getoond (bodemdaling sinds het begin van de gasproductie). Figuur 6-2 toont de gemeten (waterpasdata 2023) bodemdaling sinds de start van de winning op stabiele peilmerken. Figuur 6-3 toont de verschillen tussen de gemeten (waterpasdata 2023) en de gemodelleerde, voorspelde, bodemdaling (2023).

De kaart in Figuur 6-2 en Figuur 6-3 is opgedeeld in verschillende gebieden op basis van de eerste nulmeting in een betreffend gebied. Hierdoor is de tijdsperiode van de metingen per gebied verschillend. Deze kaarten zijn groter afgedrukt in Appendix V en Appendix VI.

De verschillen tussen gemeten en gemodelleerde bodemdaling liggen in het algemeen binnen de onzekerheidsmarges. De onzekerheid in de prognose is 4 centimeter (zie de uitleg in paragraaf 7.3).

Wat betreft de geodetische metingen is de precisie (meetprecisie + puntstabiliteit) afhankelijk van het tijdsinterval tussen metingen en de afstand tussen meetpunten, en loopt deze op tot ca. 2 centimeter (2-sigma) voor lange tijdsperiodes (> 50 jaar) en grote afstanden tussen meetpunten (> 30 kilometer) (zie de formules in Referentie 27). Doordat de lokale spatio-temporele idealisatie precisie component (zie de uitleg in paragraaf 4.4) is weggelaten zal de werkelijke precisie dan ook slechter, dat wil zeggen een groter getal, zijn. Omdat de verschillen tussen meting en prognose al grotendeels binnen de combinatie van incomplete meetprecisie en bodemdalingsvoorspellingsprecisie vallen, is ervoor gekozen om dit niet verder te bestuderen.

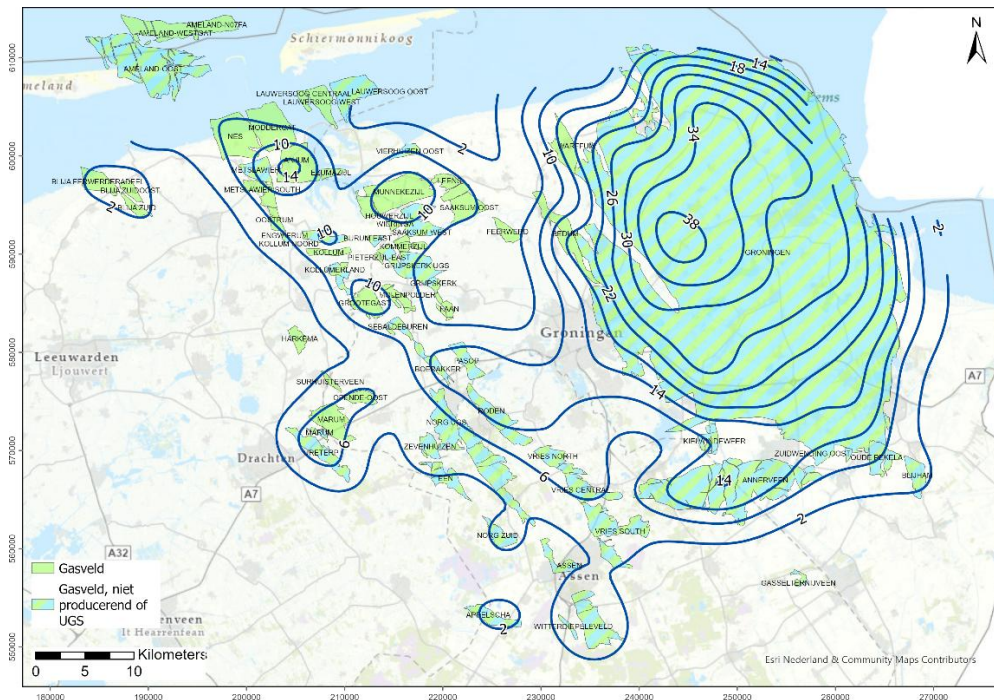
In figuur 6-3 geven de blauw gekleurde peilmerken aan dat meer bodemdaling is voorspeld voor het tijdstip dat de meting in 2023 plaatsvond. De peilmerken met een geel en rode kleur geven aan dat er meer bodemdaling is gemeten dan geprognostiseerd voor 2023.

Als de som wordt gemaakt van alle afgebeelde verschillen in figuur 6-3 dan blijkt dat er voor 2023 meer bodemdaling is voorspeld dan er is gemeten.

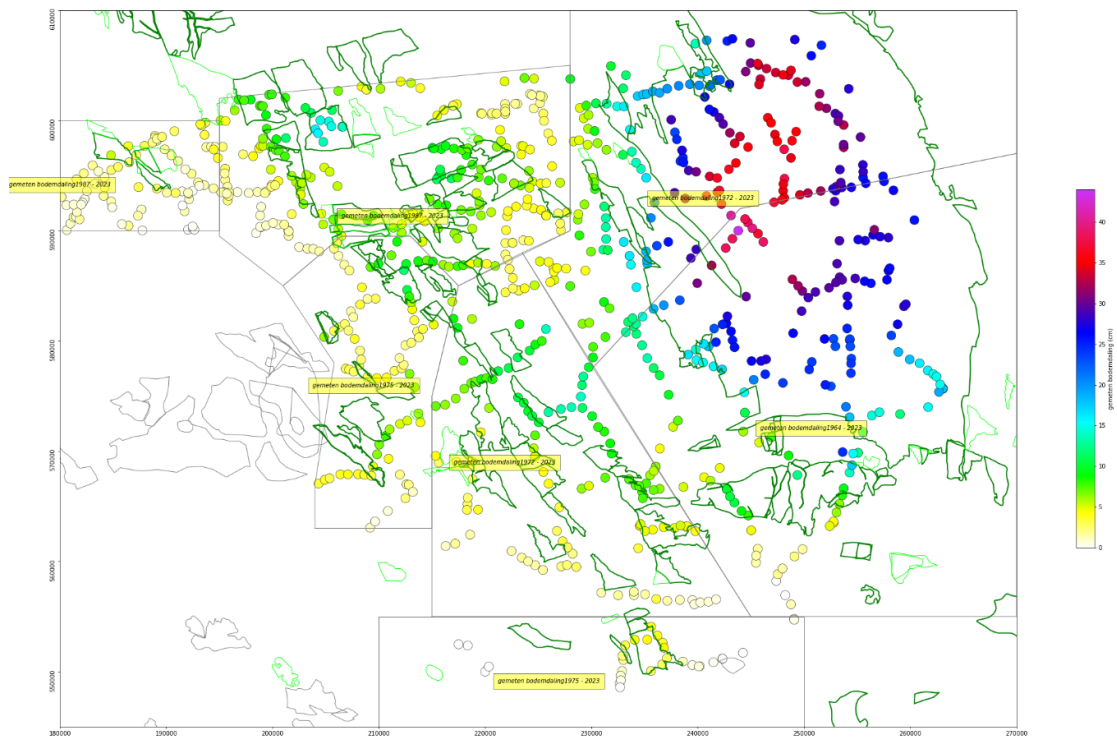
Dit wordt verklaard doordat de kalibratie van de prognose met alle metingen plaatsvindt tussen 1964 en 2023. Gemiddeld over alle jaren, en alle peilmerken, is het verschil tussen meting en prognose geminimaliseerd, met als gevolg dat de prognose de metingen zowel kan overschatten als onderschatten voor verschillende tijdsperiodes. De laatste 20 jaar laten de GNSS-metingen (zie figuur 15.2) in veel gevallen consequent minder daling zien dan er wordt geprognostiseerd, wat de overschatting van de bodemdaling door het model voor deze tijdsperiode illustreert.

Het model heeft niet voldoende vrijheidsgraden om beperkte temporele en spatiale subtiliteiten te accommoderen. De verschillen zijn gering en vallen echter grotendeels binnen de meet- en voorspellingsprecisie.

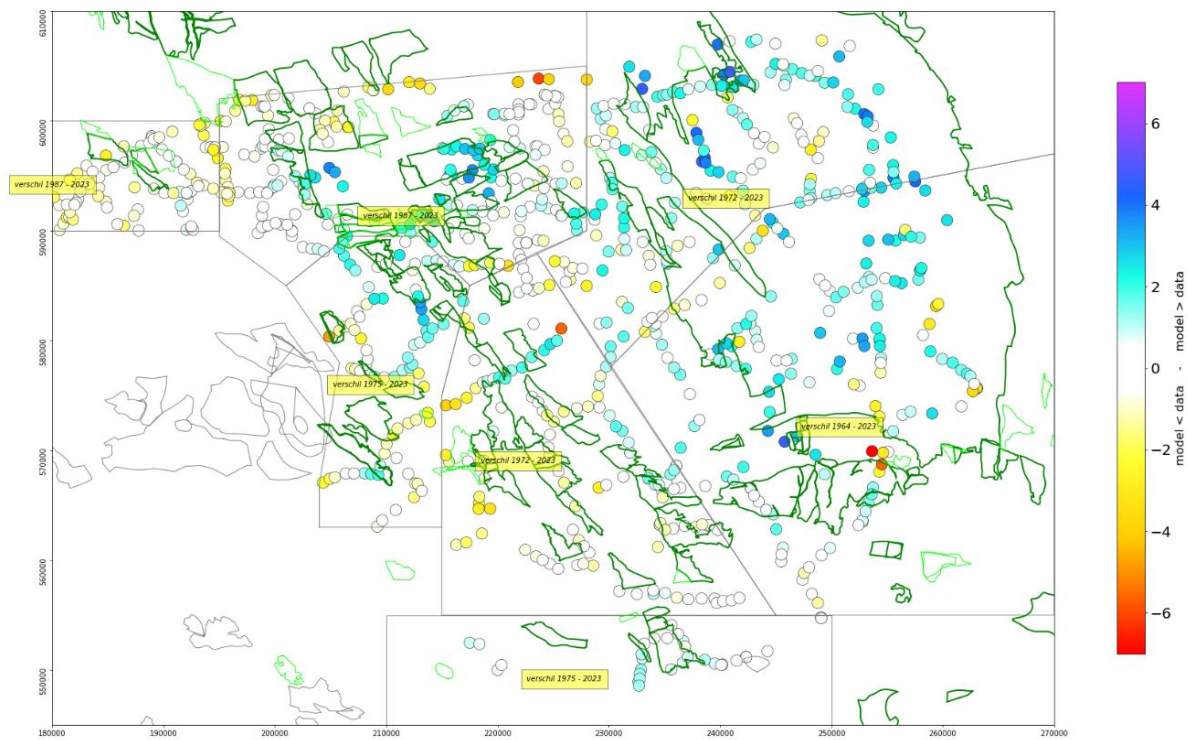
De afwijkende peilmerken in rood in figuur 6-3 in de omgeving van Veendam geven grotere afwijkingen weer tussen gemeten en gemodelleerde bodemdaling. Dit wordt veroorzaakt door de zoutwinning (geen mijnbouwactiviteit van NAM).



Figuur 6-1; Contourkaart voor bodemdaling door gaswinning opgetreden tussen start van de productie en de waterpassing in 2023, bepaald met het aan de metingen gekalibreerde geomechanisch model (cm).



Figuur 6-2; Gemeten bodemdaling in 2023 op stabiele peilmerken sinds de start van de winning. Per gebied is een andere tijdperiode gekozen afhankelijk van de eerste meting en/of start van de productie in het betreffende gebied.



Figuur 6-3; Verschilkaart van de gemodelleerde bodemdaling minus de, op basis van waterpassing, op stabiele peilmerken gemeten bodemdaling in 2023 (sinds de start van de winning). Per gebied is een andere tijdsperiode gekozen afhankelijk van de eerste meting en/of start van de productie in het betreffende gebied. De verschillen zijn in cm weergegeven.

7 Prognose tot 2065

7.1 Contourkaarten

In Appendix I, Appendix II en Appendix III is de verwachte bodemdaling weergegeven als contourkaarten voor respectievelijk de jaren 2035, 2050 en 2065. De productie uit het Groningen-gasveld is beëindigd in 2023 en volgens verwachting zullen de meeste kleine velden uitgeproduceerd zijn in 2035. De verwachte bodemdaling in het diepste punt boven het Groningen-veld zal in 2065 circa 50 cm bedragen.

De einddatum van de prognose is nu 2065, dit is 30 jaar na de verwachte beëindiging van de productie van gas in Groningen, en Friesland en het Noorden van Drenthe. Deze einddatum valt samen met de verplichting volgens de mijnbouwwet dat de bodembeweging tot 30 jaar na het einde van de productie moet worden gemonitord.

In de prognoses wordt aangenomen dat de velden Norg en Gripskerk als UGS (ondergrondse gasopslag) zullen worden gebruikt. Voor Norg is aangenomen dat de toekomstige gemiddelde druk gelijk is aan de druk van alleen het kussengas (UGS niet in operatie). Voor Gripskerk is aangenomen dat de toekomstige gemiddelde druk gelijk is aan de gemiddelde druk van de operationele UGS. De productieprofielen die gebruikt zijn voor de overige velden zijn vergelijkbaar met de profielen die getoond worden in de desbetreffende winningsplannen of lopende aanvragen.

7.2 Modelonzekerheid

In dit statusrapport is gekozen voor een eenduidige oplossing door de modelonzekerheid op een waarde van 4 cm te stellen. Deze waarde wordt ook gehanteerd in de laatste aanvragen van de winningsplannen.

7.3 Verschillen met de prognose uit het status rapport 2020 (Referentie 1)

De doorgevoerde aanpassingen op grond van bovengenoemde observaties en nieuwe ontwikkelingen sinds 2020 komen tot uitdrukking in de verschilkaart tussen de prognose voor het jaar 2050 van dit rapport en de prognose voor hetzelfde jaar gedaan in 2020. Deze verschilkaart is getoond in Figuur 7-1. Dit figuur toont grotere gebieden boven de gasvelden waar de bodemdalingsprognose voor 2050 1 à 2 cm hoger uitkomt dan voorspeld is in 2020. Hierbij moet opgemerkt worden dat bodemdalingsmodellen altijd een mate van imperfectie hebben. In de kalibratie workflow wordt gezocht naar het best passende scenario bij alle metingen. Dit best passende scenario levert een waarde voor de "b-factor" op die hoger is dan in het Statusrapport voor 2020. Hierdoor wordt er in de toekomst iets meer bodemdaling geprognostiseerd als gevolg van na-ijling.

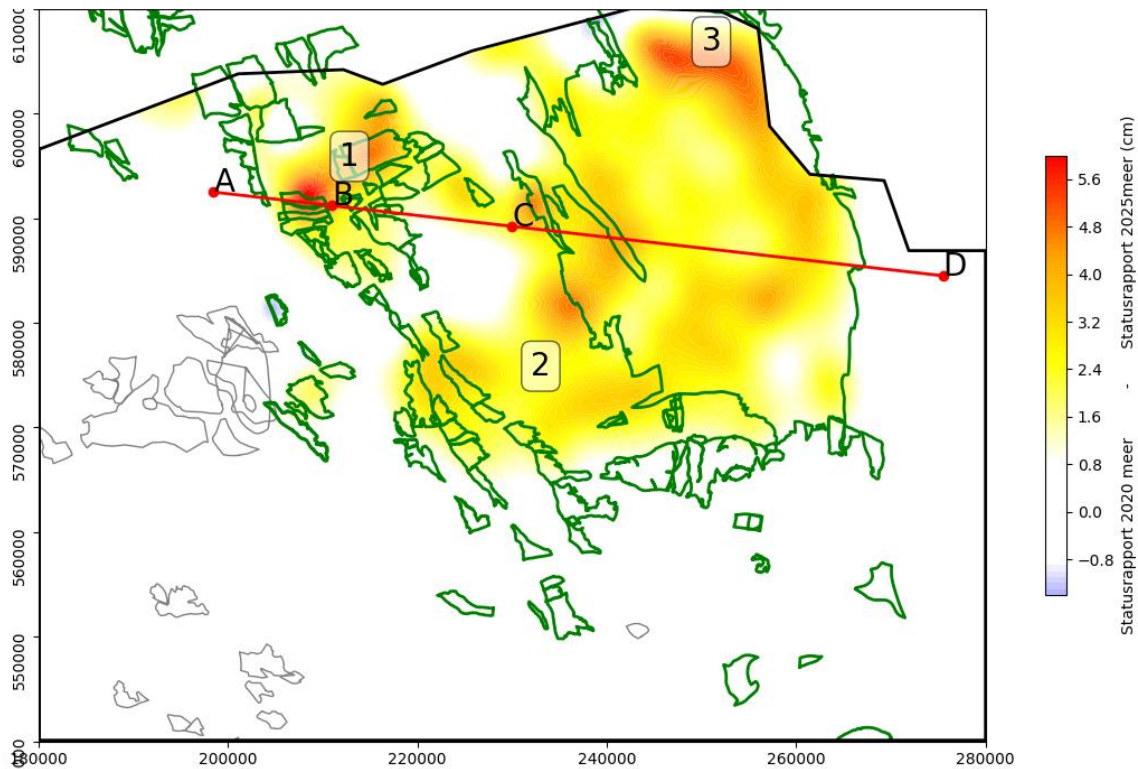
De aanpassingen in parameterwaarden kan dus betekenen dat het best passende bodemdalingsscenario in bepaalde tijdsperioden beter bij de metingen past dan in andere tijdsperioden. In Figuur 15-2 is te zien dat de geodetische metingen op vrijwel alle GNSS-stationslocaties een bodemdaling geven die gelijk is of minder dan het verloop van de prognose. Over het algemeen kan dit bodemdalingsscenario als conservatief worden getypeerd voor deze tijdsperiode.

Een doorsnede (A, B, C, D) van de bodemdalingskom is weergegeven in Figuur 7-2. Ook op basis van dit figuur blijkt dat in 2025 beperkt meer bodemdaling wordt voorspeld voor 2050.

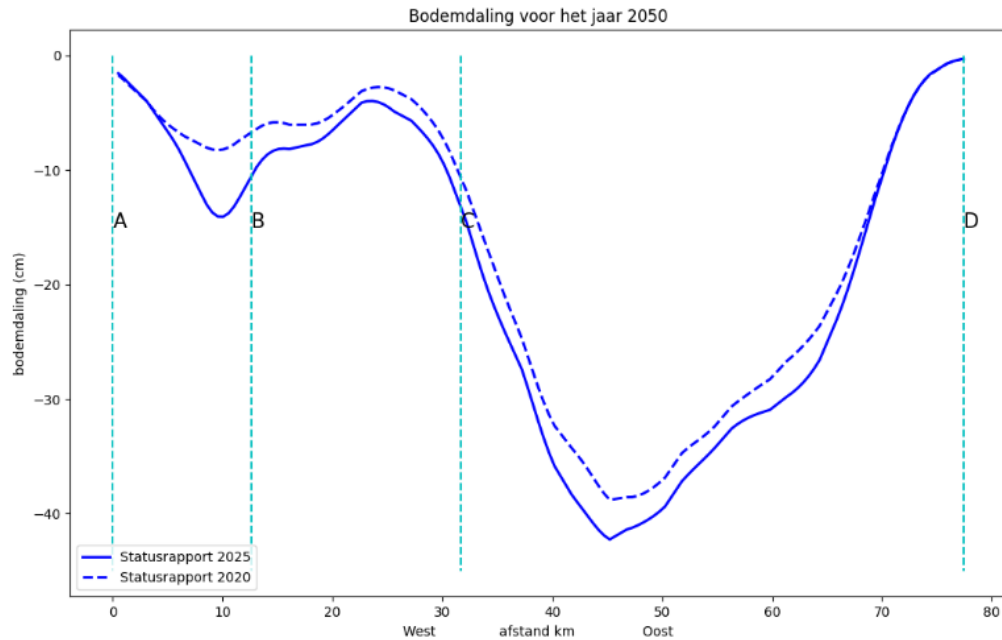
Figuur 7-2 toont ook een aantal gebieden (1 t/m 3) waar de verschillen tussen de prognoses oplopen tot maximaal 6 cm. De waarschijnlijke verklaring voor de mogelijke verschillen wordt hieronder verder toegelicht.

1. De bodemdaling boven Kollum-Noord en Munnekeziyl is meer dan in het Statusrapport 2020 aangenomen. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door aanpassingen in het bodemdalingsmodel op basis van de recente kalibraties die ook zijn opgenomen in de aanvragen van nieuwe winningsplannen.
2. De reservoirdrukken van het Groningen Zuidwestelijk aquifer zijn opnieuw gekalibreerd aan de gemeten bodemdaling en laten wat meer dinkdaling zien.
3. De compressibiliteit van het gesteente in het noordelijk aquifer van Groningen is, na de nieuwe kalibratie, hoger dan in het Statusrapport van 2020.

Dat de laatste bodemdalingsberekening van 2025 meer daling laat zien dan de voorspelling in 2020 voor gebied 3 wordt gerelativeerd doordat de meting minder daling aangeeft dan geprognostiseerd (zie Figuur 6-3).



Figuur 7-1; Verschilkaart tussen de bodemdalingsprognose voor het jaar 2050 volgens het Statusrapport 2020 en 2025. De geel/rode kleuren geven de gebieden aan waar het 2025 model meer bodemdaling voorspelt. De doorsnede van de prognoses op de lijn A, B, C, D is weergegeven in Figuur 7-2. De velden met een grijze omtrek zijn de velden die niet door de NAM worden geopereerd. De dikke zwarte lijn geeft het gebied aan waarbinnen de verschilmeting is berekend.



Figuur 7-2; Doorsnede van de bodemdalingskom in Friesland en Groningen. Vergelijking van de gemodelleerde bodemdaling in 2050 volgens het Statusrapport 2025 en 2020.

8 Conclusies

1. Over het hele tijdsinterval 1964 tot 2023 is het gemiddelde van de verschillen tussen het bodemdalingsmodel en de metingen boven het Groningen gasveld geminimaliseerd. Deze procedure levert het meest waarschijnlijke bodemdalingsscenario.
2. In vergelijking met de metingen laat dit scenario in de laatste tijdsperiode wat meer daling zien dan is gemeten. Dit wordt bevestigd door de GNSS-metingen die een grotere afzwakking van de bodemdaling laten zien dan geprognosticeerd over de afgelopen 20 jaar.
3. De prognose voor de bodemdaling zoals uitgevoerd in deze statusrapportage laat zien dat er in de toekomst in het algemeen iets meer bodemdaling wordt verwacht in vergelijking met de prognose uit 2020. De verschillen liggen echter binnen de onzekerheidsmarges, of zijn verklaarbaar op basis van aanpassingen van het bodemdalingsmodel.
4. Volgens de huidige inzichten zal de maximale bodemdaling als gevolg van gasproductie boven het Groningen-gasveld omstreeks het jaar 2065 een waarde tussen de 46 en 54 centimeter op het diepste punt bereiken. Een waarde van 50 centimeter wordt het meest waarschijnlijk geacht.

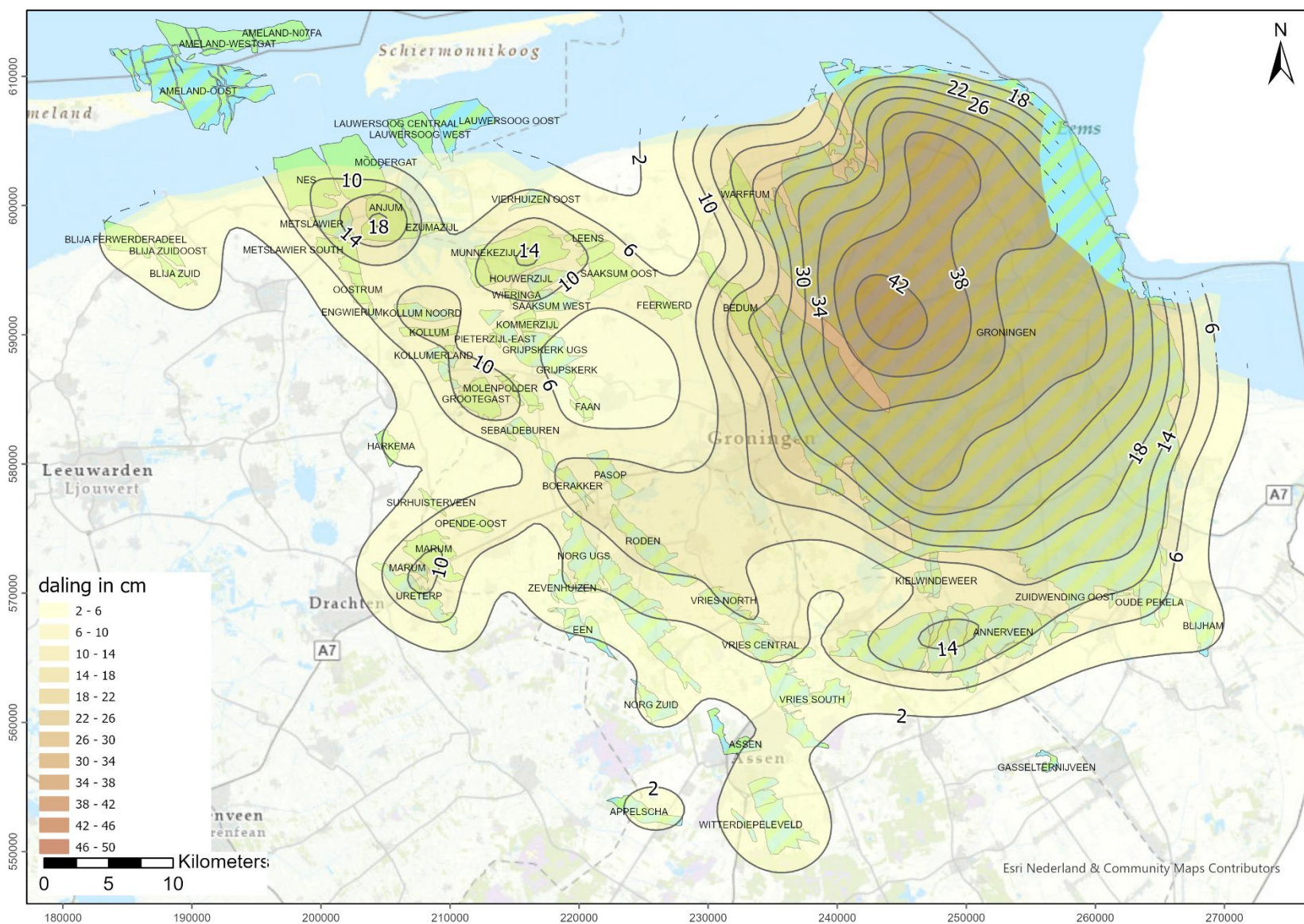
9 Referenties

- Referentie 1 Bodemdaling door Aardgaswinning. NAM-velden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe. Statusrapport 2020 en Prognose tot het jaar 2080. December 2020. NAM-rapportnummer EP202011201629.
<https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/bodemdaling/nl/aa0e05c7-704a-4f9f-a02c-ea7ece904905>
- Referentie 2 Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen: Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2024. NAM-rapportnummer EP202501249317.
- Referentie 3 NAM (2020) Groningen long term subsidence forecast, (EP202008201822)
- Referentie 4 NAM (2017) Ensemble Based Subsidence application to the Ameland gas field – long term subsidence study part two (LTS-II) continued study. EP201710200509.
<https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/wadden/en/b2bb2626-2cf8-4d7f-994d-04a9995ebe9d>
- Referentie 5 Meetregister bij het meetplan Noord-Nederland, Groningen en Waddenzee 2023; Rapportage van satelliet radar interferometrie Noord-Nederland 2013. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 27 oktober 2023, EP202303201224.
- Referentie 6 Kole (2019) Review of wireline depth precision and accuracy for the application of compaction monitoring. NAM report.
<https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/c9c5bc11-2944-45fd-978a-af255c9b0b17>
- Referentie 7 Shell (2015) Mechanical characterization of Permian reservoir sandstone from the Moddergat-3 well in the Dutch Wadden Area. SR.15.11614
- Referentie 8 Shell (2022) ZEERIJP-3A In-situ strain analysis.
<https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/5c6ccc55-707d-49b6-bcc3-9fb02dc72a16>
- Referentie 9 NAM (2013) Technical Addendum to the Winningsplan Groningen 2013 Subsidence, Induced Earthquakes and Seismic Hazard Analysis in the Groningen Field.
- Referentie 10 TNO (2013) A general framework for rate dependent compaction models for reservoir rock, 2013, Report TNO 2013 R11405
- Referentie 11 NAM (2026a) Continue GPS hoogtemetingen NAM Groningen, Rapportage januari 2026 (EP202601225438)
- Referentie 12 NAM (2026b) Continue GPS hoogtemetingen NAM Groningen Integrated Geodetic Reference Stations, Rapportage januari 2026 (EP202601225440)
- Referentie 13 NAM (2026c) Continue GPS hoogtemetingen NAM Grijskerk, Rapportage januari 2026 (EP202601225433)
- Referentie 14 NAM (2026d) Continue GPS hoogtemetingen NAM Norg, Rapportage januari 2026 (EP202601225432)

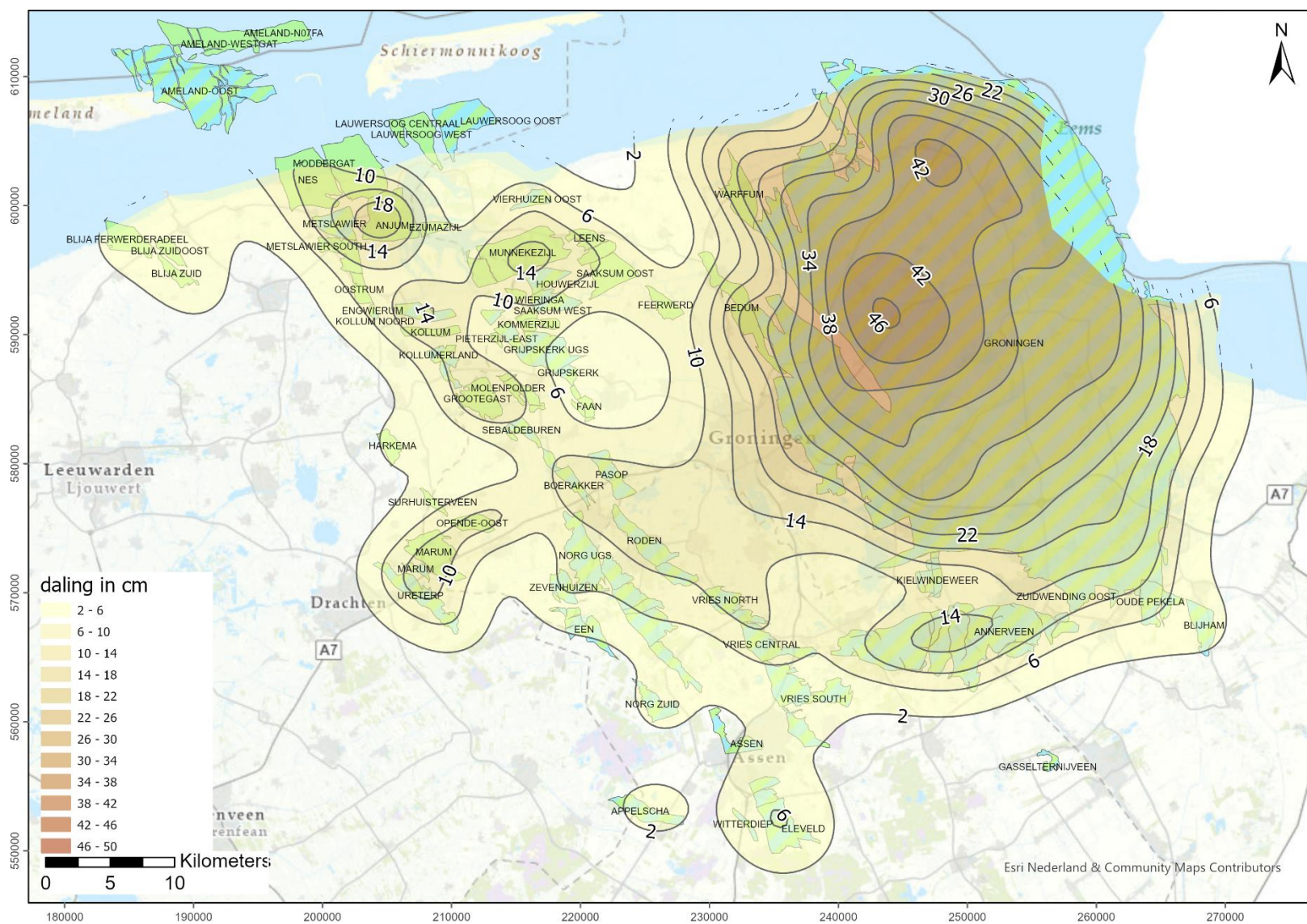
- Referentie 15 NAM (2019) Stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken 2019: Toelichting methodiek en toepassing op de meetregisters "Noord Nederland, Groningen en Waddenzee 2018" en "Zuid-Holland 2017". 12 juli 2019, EP201906210480.
- Referentie 16 Pruiksmā, J.P., Breunese, J.N., Thienen-Visser, K., & 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
- Referentie 17 van der Linden, A.J., Marcelis, F.H.M., Hol, S. & El Azouzi, K. (2020) Mechanical compression testing Carboniferous underburden material from the Zeerijp-3A well, Groningen Field, The Netherlands. Shell report SR.20.00670
- Referentie 18 NAM (2020) Gebruik van InSAR in de meetregisters Noord-Nederland en Groningen; Analyse beschikbaarheid en betrouwbaarheid. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 29 mei 2020, EP202005202312.
- Referentie 19 RWS (2023) Productspecificaties Beheer NAP 2023. Secundaire waterpassing t.b.v. de bijhouding van het NAP. Rijkswaterstaat, 20-2-2023.2
- Referentie 20 Leusink, J. (2003) Wat waterpasgegevens vertellen over geologische bodemdaling.
- Referentie 21 Kooi, H. (1997) Contribution of tectonics, isostasy and natural compaction to vertical land movement in the Netherlands, Meetkundige Dienst Rijkswaterstaat MDGAP-9770.
- Referentie 22 NAM (2026e) Continue GPS hoogtemetingen NAM Waddenzee, Rapportage januari 2026 (EP202601225440)
- Referentie 23 Landman, A.J., and Visser C. (2023) Groningen Dynamic Model Update V7, EP202306200914
- Referentie 24 Rijkswaterstaat (2026) Dataregister Rijkswaterstaat: NAP peilmerken actueel <https://maps.rijkswaterstaat.nl/dataregister/srv/dut/catalog.search#/metadata/g698b941-93e5-4a5f-a291-d070588d431b>
- Referentie 25 Verberne, M., Koster, K., De Bresser, H. Fokker, P.A. (2025) Fifty Years of Intermediate-Depth Compaction in the Coastal Plain of the Netherlands: Detailed Analysis of Twenty Extensometers. Journal of Surveying Engineeringl. ISSN: 07339453, Volume: 151, Issue: 3
- Referentie 26 NAM (2025a) Meetregister bij het meetplan Waddenzee 2025; Rapportage van de GNSS Campagne Waddenzee 2025. 1 september 2025, EP202507250320.
- Referentie 27 NAM (2025b) Beheersplan bodemdaling door gas- en oliewinning; Versie 1.0. 9 december 2025, EP202510246081.

10 Appendix I

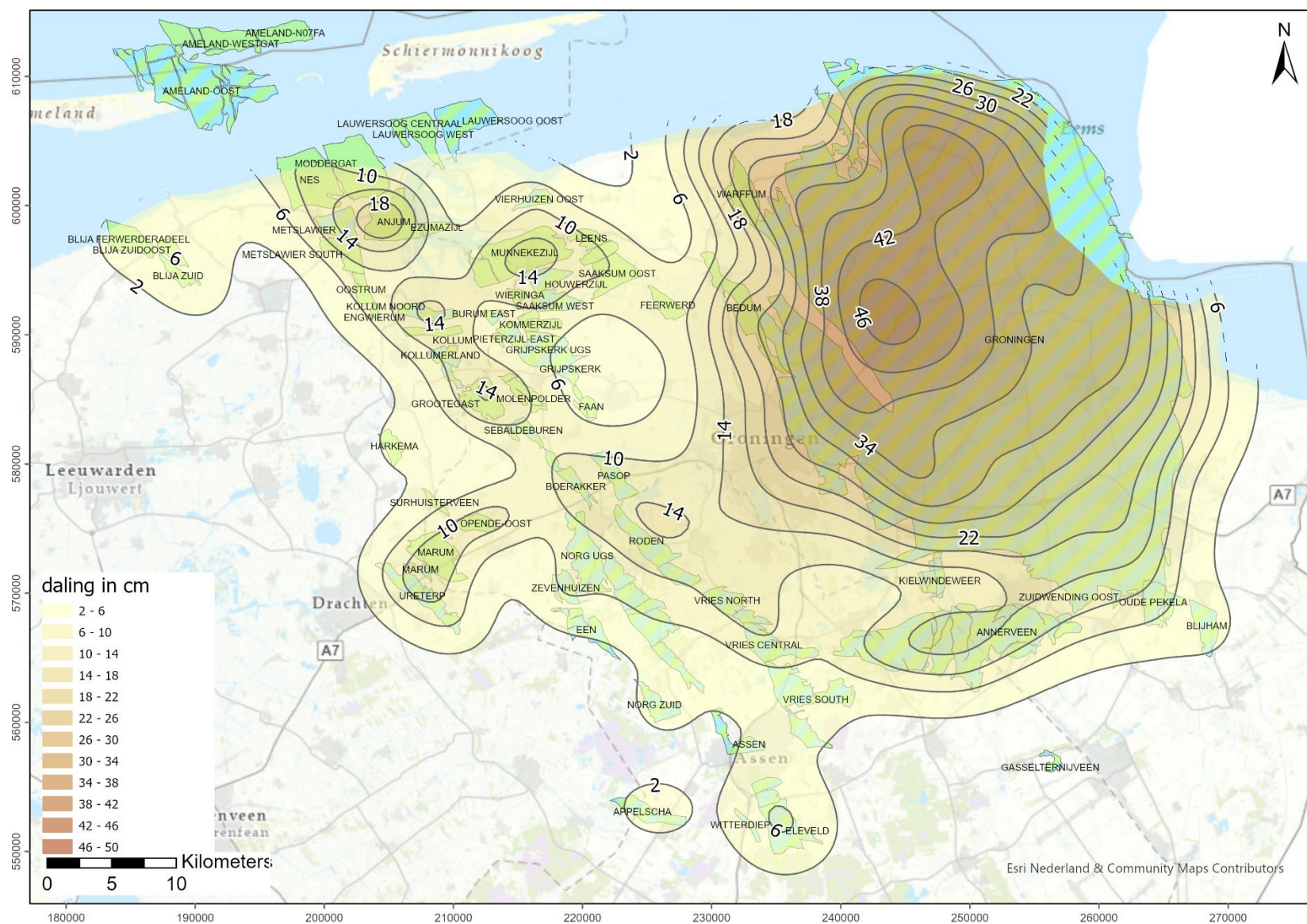
Prognose voor 2035



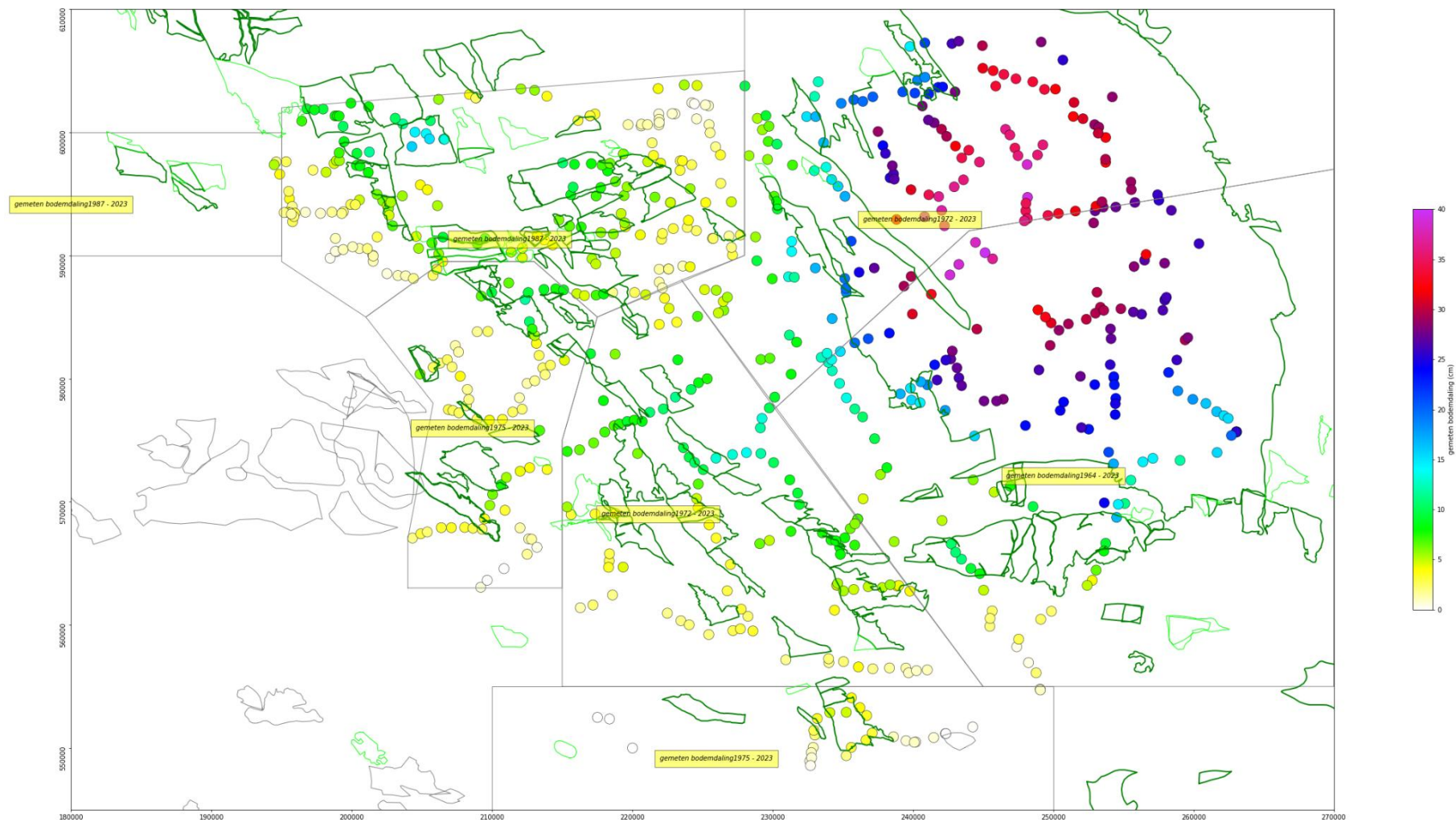
11 Appendix II Prognose voor 2050



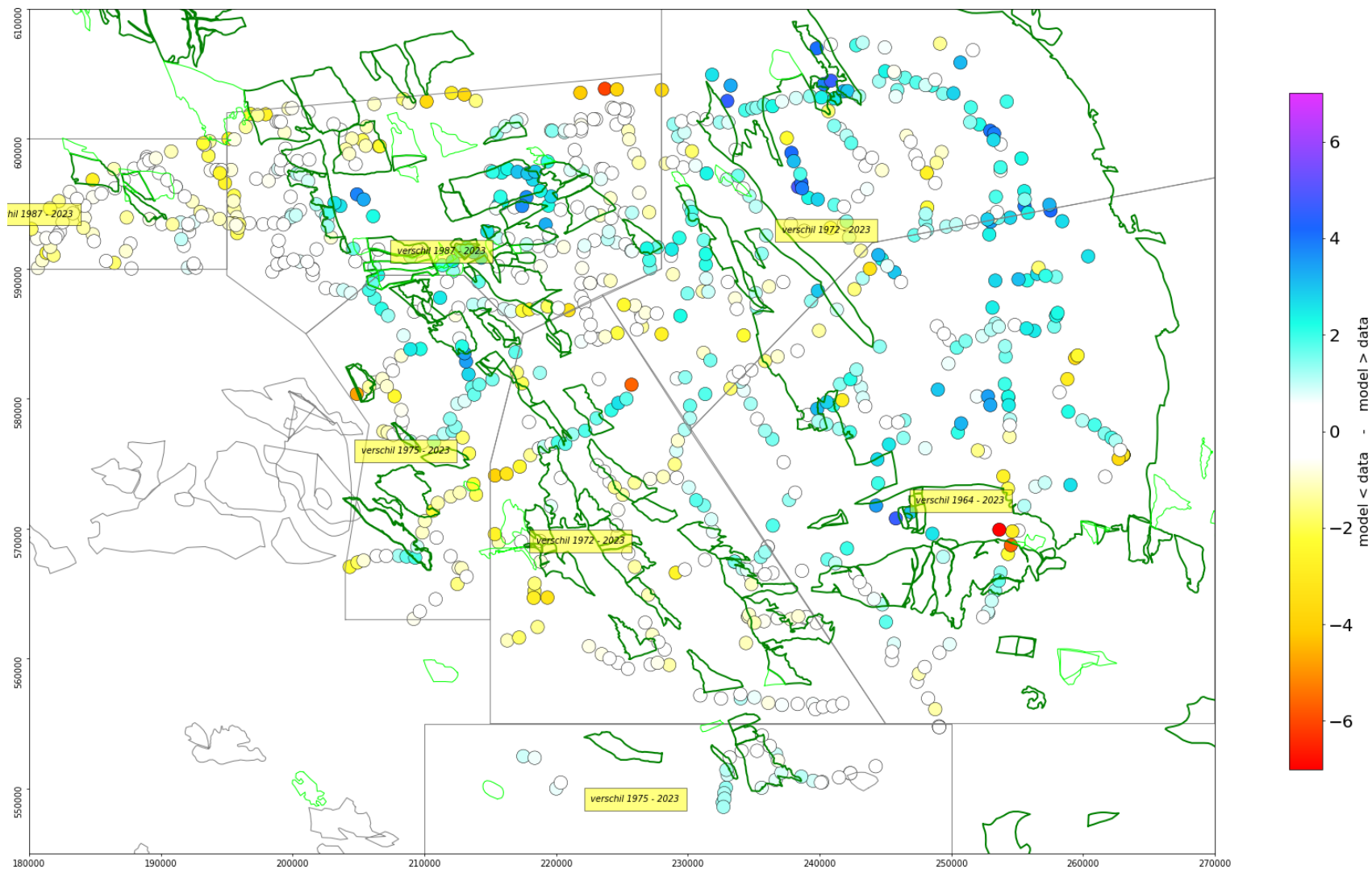
12 Appendix III Prognose voor 2065

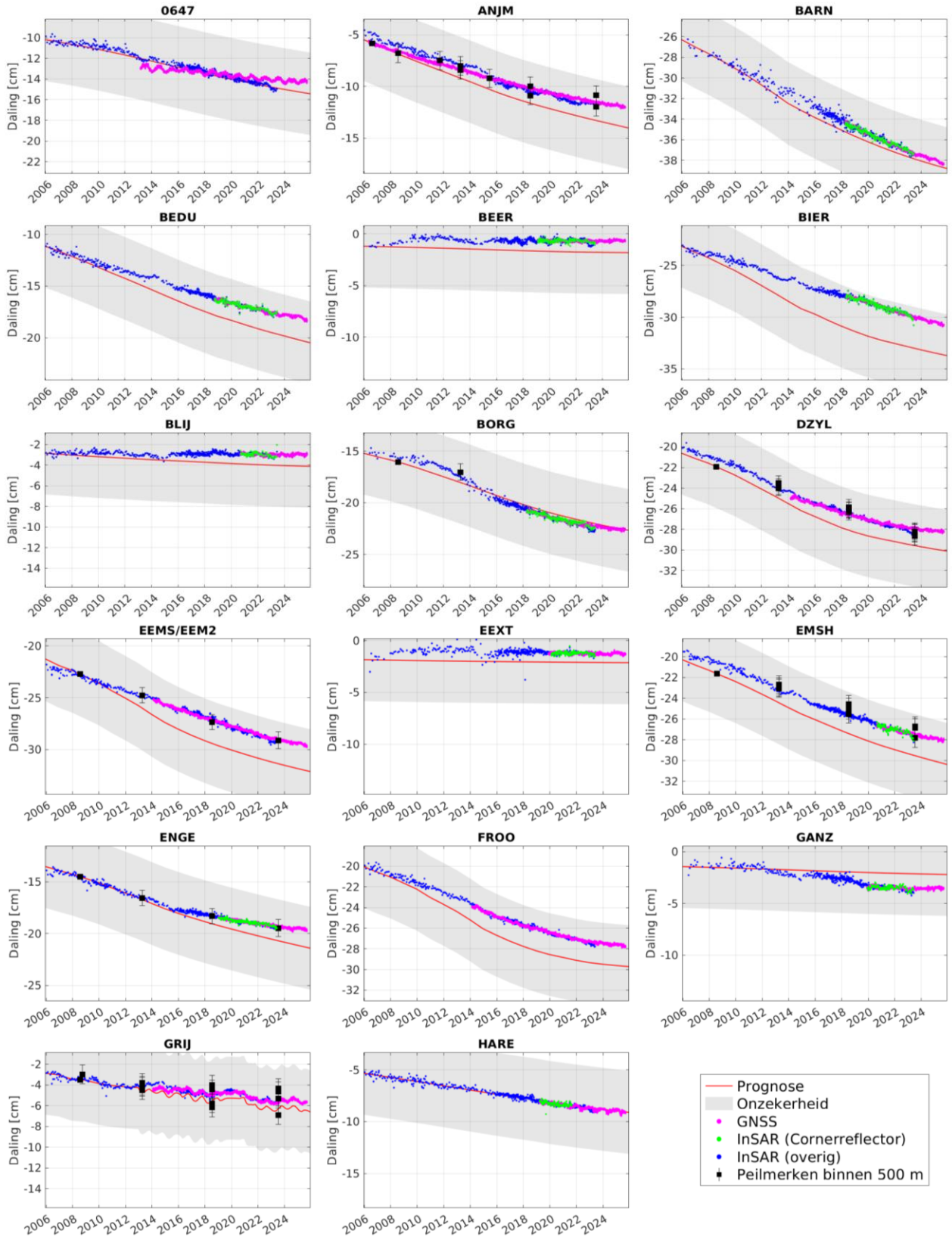


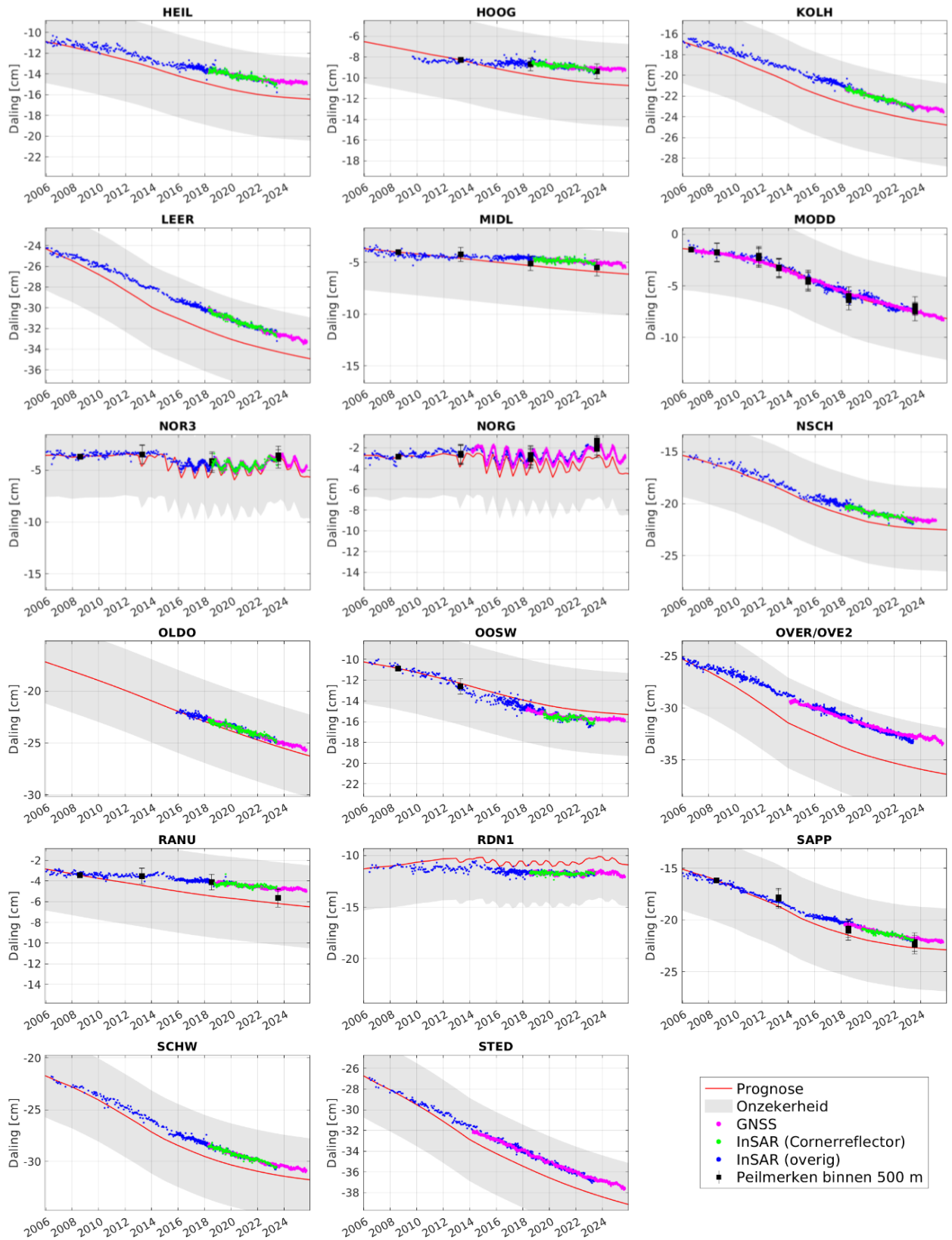
13 Appendix IV Gemeten bodemdaling in 2023 op stabiele peilmerken sinds de start winning

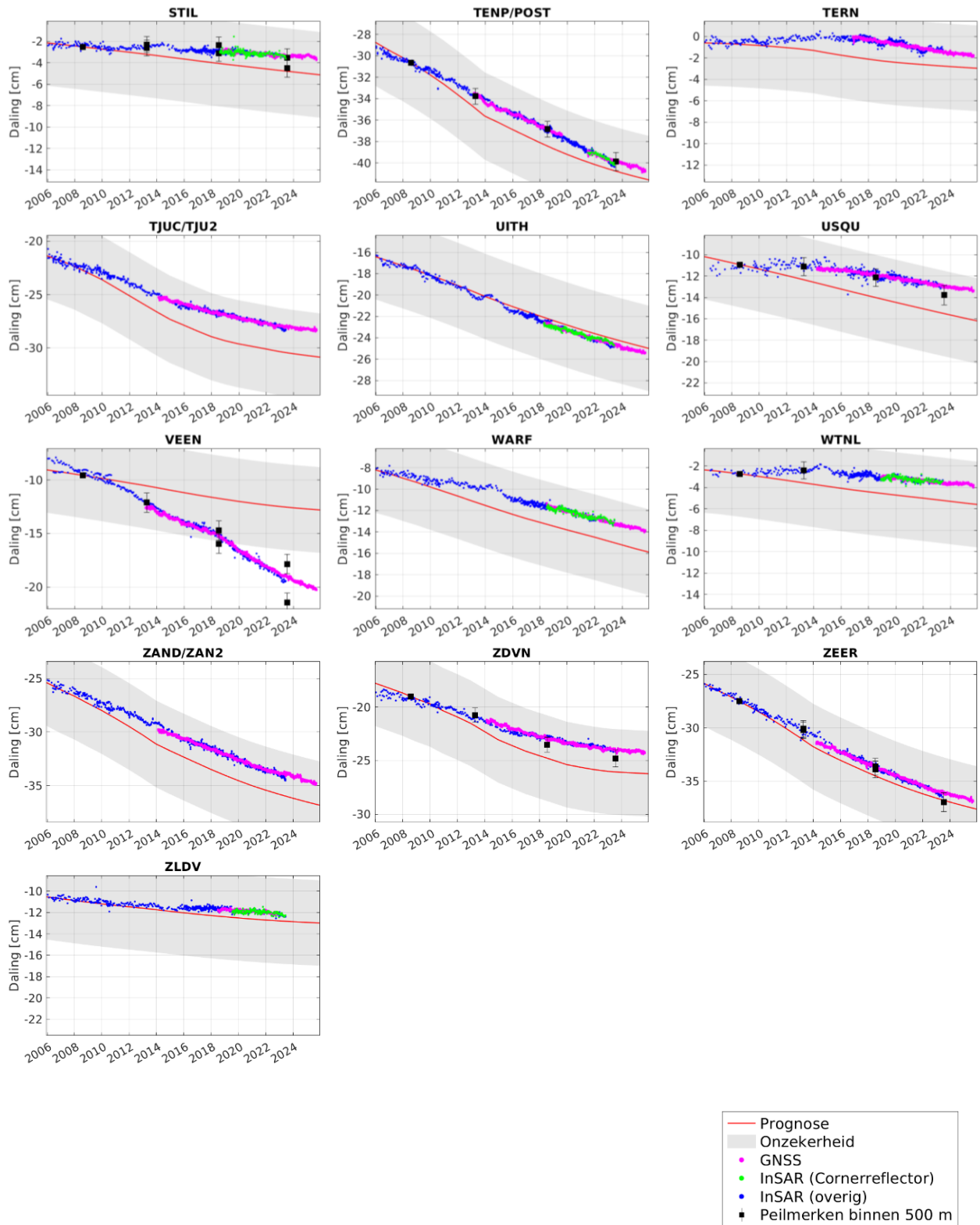


14 Appendix V Verschilkaart (cm) van gemodelleerde en gemeten bodemdaling voor het jaar 2023 op stabiele peilmerken sinds de start van de winning









Figuur 15-2: Tijdsree GNSS stations.

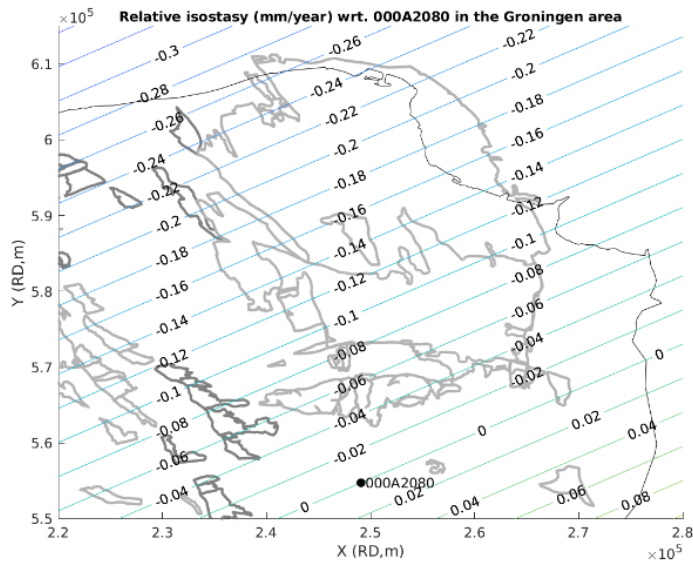
16 Appendix VIII Isostasie

In deze paragraaf wordt beschreven in hoeverre de geodetische metingen voor het monitoren van bodemdaling door gaswinning isostatische bewegingen zouden kunnen bevatten, en wat het mogelijk effect daarvan is op de berekende bodemdaling door gaswinning op de lange termijn.

5. In de vergelijking tussen geodetische metingen en geomechanische modellen worden verschilmetingen in ruimte- en tijd beschouwd ('dubbel-differenties'). Dit betekent dat alleen de relatieve (tussen twee meetpunten en tussen twee tijdstippen) component in ruimte en tijd van bodembeweging door isostasie een effect kan hebben op de passing van geomechanische modellen met geodetische metingen. Door toegepaste processing methodieken zijn de geodetische meettechnieken op een verschillende manier gevoelig hiervoor:
 - De relatieve hoogteverschillen die in waterpassingen gemeten worden, bevatten ook het effect van isostasie; echter alleen het relatieve gedeelte en niet de 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 isostasie hierin kunnen zijn verdisconteerd. In de praktijk is in de doorgevoerde aanpassingen nog geen duidelijke uniformiteit die zou kunnen duiden op isostasie, terug te zien. Echter dit kan ook komen door de korte tijdsperiode van GNSS-metingen (in Groningen vanaf 2013), waardoor het mogelijke effect van isostasie nog niet significant meetbaar is.
 - Bij InSAR wordt al een ruimtelijke (lineaire) trend (vanwege grootschalige atmosferische effecten en residuele baanfouten) geschat, en daardoor impliciet gecorrigeerd voor isostasie.

De meest recente berekening van geologische bodembeweging (voornamelijk isostasie) op basis van geodetische metingen (waterpasmetingen) is gedaan door Leusink, 2003 (Referentie 20). 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 geprocesseerd. In Referentie 20 wordt verwezen naar een eerder onderzoek van Kooi, 1997 (Referentie 21). Dit werk had tevens tot doel diepe-bodembeweging (tektoniek, isostasie en compactie) af te leiden uit de waterpasdata van Rijkswaterstaat (de data na start van de gaswinning buiten beschouwing latende voor de betreffende gebieden). Hoewel de gevonden ruimtelijke patronen verschillen voor verschillende modelopties, kan worden geconcludeerd dat het effect van isostasie voor Nederland bij benadering een kanteling noordoost-zuidwest richting is, met orde grootte enkele tienden van mm/jaar.

Op basis van de geschatte parameters door Leusink, 2003 door toepassing van geodetische vereffenings- en toetsingstechnieken voor het noordelijke gedeelte van Nederland (evenals in Kooi, 1997 is het gaswinningsgebied hierbij buiten beschouwing gelaten), is een inschatting gemaakt van het relatieve effect van isostasie ten opzichte van het ondergrondse merk 000A2080 (referentiepunt in de differentiestaat als onderdeel van het meetregister Groningen).



Figuur VIII-16-1: Relatieve bewegingen boven het Groningen gasveld door isostasie volgens de parameters berekend door Leusink, 2003, ten opzichte van peilmerk locatie 000A2080.

Figuur VIII-16-1 toont de geschatte relatieve isostatische bewegingen in mm/jaar. Deze lopen op tot ca. -0.26 mm/jaar in het meeste noordelijke gedeelte van het vasteland. Dit zou betekenen dat gewaterpaste hoogteverschillen tussen het referentie peilmerk 000A2080 en het noorden van Groningen vanaf de nulmeting in 1964 een dalingscomponent van ca. 1,5 cm veroorzaakt door isostasie in zich zouden kunnen hebben. De berekende bodemdaling door gaswinning uit waterpasmetingen zou daarmee potentieel lokaal tot ca. enkele centimeters overschat kunnen zijn.

Omdat de berekende isostasie component geëxtrapoleerd is over Groningen, deze modelmatig en ook qua berekeningen over verschillende delen van Nederland varieert, en de isostatische beweging niet leidt tot een onderschatting van bodemdaling door gaswinning, heeft NAM ervoor gekozen de waterpasmetingen niet te corrigeren. Er moet echter wel mee rekening worden gehouden dat de bodemdaling door gaswinning hierdoor conservatief is bepaald.

Vanaf 2019 is InSAR de primaire meettechniek voor het monitoren van bodemdaling door gaswinning. Zoals hierboven aangegeven worden de InSAR metingen in het verwerkingsproces impliciet gecorrigeerd voor ruimtelijke bewegingen met karakteristieken van de isostasie component.