

Statusrapport
2020 en
Prognose tot
het jaar 2080

December 2020



Bodemdaling door Aardgaswinning

■ NAM-gasvelden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe

Status rapport 2020 en
Prognose tot het jaar 2080

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

NAM B.V.

EP Document Nummer.:	EP202011201629	Owner:	NAM
Revision No.:	0		
Document Date:	december 2020	Security:	

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.

Inhoud

1	Samenvatting	6
1.1	Verklarende woordenlijst	7
2	Inleiding	8
2.1	Bodemdaling door aardgaswinning	8
3	Observaties en nieuwe ontwikkelingen sinds 2015.....	10
3.1	Metingen	10
3.2	Modellering	11
3.3	Nieuwe velden	11
4	Metingen en analyse	12
4.1	Waterpassing	12
4.2	InSAR	13
4.3	GNSS.....	13
4.4	Differenties en precisiebeschrijving	14
4.5	Stabiliteit	15
4.6	Bodemdaling door gaswinning	16
4.7	Contourkaart ruimte-tijd analyse waterpasmetingen.....	18
4.8	Overeenkomst meettechnieken.....	19
5	Modellering van de bodemdaling.....	20
5.1	Invoergegevens van de velden	20
5.2	Groningen	21
5.3	Laboratoriumexperimenten.	26
5.4	Compactiemetingen in diepe observatieputten.....	27
5.4.1	DSS metingen.....	27
5.5	Aquifers.....	29
5.6	Bodemdalingsmodel.....	32
5.7	Compactiemodel parameters bepalen met behulp van een Monte-Carlo simulatie.....	33
5.8	Compactie metingen van de ondiepe ondergrond	33
6	Vergelijking met de metingen en prognose van de bodemdaling	35
6.1	Profielen.....	37
7	Prognose tot 2080.....	39
7.1	Contourkaarten	39
7.2	Onzekerheid.....	39
7.3	Verschillen met de prognose uit het status rapport 2015	41
8	Conclusies	43
9	Referenties.....	44
Appendix I	Prognose en onzekerheid voor 2030	46
Appendix II	Prognose en onzekerheid voor 2050	48
Appendix III	Prognose en onzekerheid voor 2080	50
Appendix IV	Bodemdaling in 2018 op basis van ruimte-tijd analyse van waterpasdata	
52		
Appendix V	Gemeten bodemdaling in 2018 op stabiele peilmerken sinds de start	
winning	53	

Appendix VI	Verschilkaart (cm) van gemodelleerde en gemeten bodemdaling voor het jaar 2018 op stabiele peilmerken sinds de start van de winning	54
Appendix VII	Bodembeweging op de GNSS stations	55

1 Samenvatting

Ter uitvoering van de Overeenkomsten provincie Groningen - 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 2015. De verwachte bodemdaling voor 2080 is over het algemeen iets minder dan de prognose uit 2015. Dit verschil is voornamelijk het gevolg van de voorgenomen beëindiging van de productie uit het Groningen veld in 2022. Ook is NAM niet meer de operator van het Tietjerksteradeel veld en staan er daarom geen contouren van dat veld in dit statusrapport. Sinds 2015 zijn er een beperkt aantal nieuwe gasvelden in ontwikkeling gebracht. De bodemdaling ten gevolge van de (voorgenomen) productie van deze velden is in de modellering meegenomen.

Voor de bepaling van opgetreden bodemdaling door gaswinning worden geodetische metingen uitgevoerd. In 2018 is in Noord-Nederland een grote waterpassing uitgevoerd door Rijkswaterstaat. NAM heeft de resultaten van deze waterpassing, alsmede van satelliet radar interferometrie (InSAR) metingen, gerapporteerd als meetregisters (Referentie 5, Referentie 6). Tevens vindt er continue GNSS (Global Navigation Satellite System, GPS) monitoring plaats en zijn er sinds 2018 ook 29 Integrated Geodetic Reference Stations (IGRS) bijgeplaatst. De bodemdaling die tot 2018 in het centrum van de schotel boven het gasveld Groningen is opgetreden, bedraagt circa 37 cm.

De bodemdaling is gemodelleerd voor de jaren 2025, 2050 en 2080. In de prognoses zijn de laatste gegevens verwerkt met betrekking tot zowel de parameters van het reservoirmodel (dikte, druk, diepte van de reservoirs) alsmede de parameters van het compactiemodel (o.a. compactiecoëfficiënt).

Volgens de huidige prognose zal de bodemdaling in het centrum van de schotel boven het gasveld Groningen in het jaar 2080 circa 46 cm bedragen. Voor 2050 wordt een maximale bodemdaling van circa 44 cm verwacht.

Dit rapport is primair bedoeld voor de besluitvorming over te nemen maatregelen in verband met bodemdaling door gaswinning op land.

1.1 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
Eindige-elementen-modellering	Numerieke rekenmethode waarmee spanningen en vervormingen in de ondergrond ten gevolge van drukveranderingen in het reservoir berekend kunnen worden
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

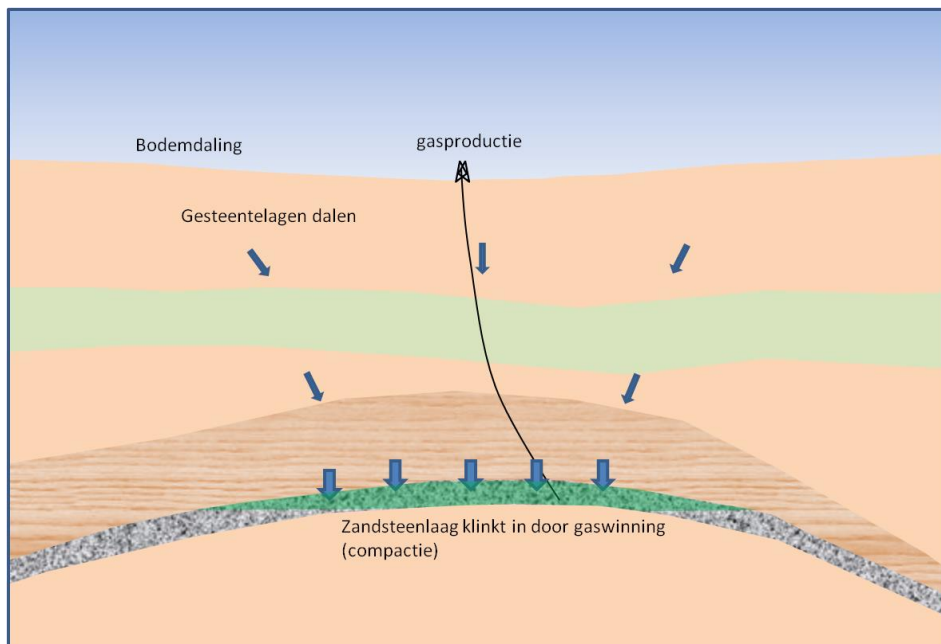
Eén van de verantwoordelijkheden van de Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. (NAM) is na te gaan in hoeverre de productieactiviteiten aanleiding kunnen geven tot bodemdaling als gevolg van compactie van de poreuze gesteentelagen waaruit aardgas wordt gewonnen. Met de resultaten van dergelijke studies kan een inschatting worden gemaakt van de eventuele effecten van bodemdaling op bijvoorbeeld de waterhuishouding of het milieu. Vervolgens kan worden gezien 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 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 slechts een fractie van de maximale compactie van het reservoirgesteente bedragen.

Met name in het geval van een klein veld beslaat de bodemdalingsskom een groter oppervlak dan het veld zelf. In Noord-Nederland zijn veel gasvelden dicht bij elkaar gelegen zodat de bodemdalingsschotels elkaar overlappen.



Figuur 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, werd op 31 augustus 1983 de overeenkomst Groningen-NAM inzake de regeling vergoeding kosten bodemdaling aardgaswinning aangegaan. Deze overeenkomst gaf 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 overeenkomst 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 Economische Zaken (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.

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 2015

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. Uit faseverschilmetingen van radaropnamen wordt de deformatie geschat van objecten op het aardoppervlak (veelal gebouwen). In dit rapport worden de bodemdalingsprofielen getoond zowel op basis van waterpasmetingen, als op basis van InSAR (satellieten Envisat en Radarsat-2). De twee technieken tonen de bodembeweging onafhankelijk van elkaar. Door de grote ruimtelijke en temporele waarnemingsfrequentie kan uit InSAR gedetailleerdere informatie omtrent bodemdalingsgedrag worden gehaald. NAM heeft in 2020 een analyse uitgevoerd met InSAR metingen van de Sentinel-1 satellieten (Referentie 21), en wederom een vergelijking gedaan met waterpasmetingen en de continue GNSS-metingen. Deze analyse geeft vertrouwen dat de toekomstige monitoring van bodembeweging door gaswinning kan worden uitgevoerd met InSAR.

Naast de bestaande permanente GNSS-stations, zijn er tussen 2018 en 2020 29 Integrated Geodetic Reference Stations (IGRS) geplaatst (Figuur 2). Dit zijn gecombineerde meetpunten voor de geodetische technieken GNSS, InSAR (2 reflectoren) en waterpassen, bevestigd op dezelfde, ca. 6 m diepe fundatie.



Figuur 2: IGRS-station (links) en GNSS-station bevestigd op een gebouw op een NAM locatie ('t Zandt).

De resultaten van de GNSS-metingen worden aan Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) gerapporteerd (Referentie 14, Referentie 15).

In 2014 zijn ook boven de ondergrondse gasopslag installaties Grijpskerk en Norg permanente GPS-stations opgesteld. De meetresultaten hiervan worden ook aan SodM gerapporteerd (Referentie 16, Referentie 17).

Tevens is er in 2018-2020 een geodetische studie uitgevoerd waarbij drie methodes met verschillende karakteristieken voor de GNSS-gegevensverwerking zijn vergeleken

(Referentie 22). De resultaten hiervan kwamen binnen de nauwkeurigheidsmarges overeen, hetgeen vertrouwen geeft in de berekende GNSS tijdseries.

3.2 Modellerings

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

Hoewel verdere drukdaling in het Groningen gasveld grotendeels zal stoppen¹ door het beëindigen van de productie in 2022, 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. Met het meest waarschijnlijke scenario wordt vervolgens de prognose gemaakt, waarbij tevens de modelonzekerheid wordt bepaald. Voor meer detail wordt verwezen naar Referentie 3.

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 bodemdalingmodel met de data. Dit model is daarom nu ook voor alle velden in Noord-Nederland gebruikt.

3.3 Nieuwe velden

Sinds de vorige rapportage (Referentie 1) is het Pieterzijl-Oost gasveld in productie genomen. Omdat NAM geen operator meer is van het Tietjerksteradeel veld wordt er geen bodemdalingprognose voor dit veld meegenomen in deze status rapportage. Op sommige velden is compressie geïnstalleerd, waardoor er meer gas geproduceerd kan worden. De additionele drukdaling die hiermee gepaard gaat, is verdisconteerd in de bodemdalingberekeningen.

¹ Om de seismiteit van het Groningen veld te verminderen heeft de minister van Economische Zaken en Klimaat besloten om de gasproductie van Groningen te beëindigen in 2022.

4 Metingen en analyse

4.1 Waterpassing

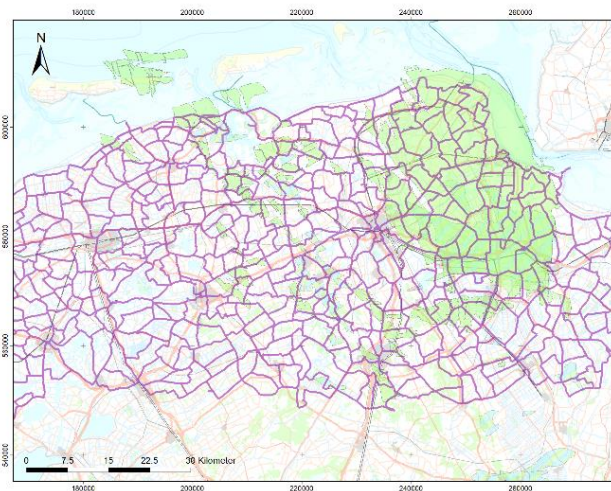
Om de opgetreden bodemdaling als gevolg van de gaswinning te bepalen worden hoogteverschilmetingen door waterpassing uitgevoerd. Hoogteverschillen worden gemeten tussen peilmerken die zijn aangebracht in onder andere gebouwen, bruggen en viaducten. De metingen worden uitgevoerd volgens de richtlijnen die de Data-ICT-Dienst van Rijkswaterstaat (RWS-DID) stelt aan een tweede orde waterpassing (Referentie 24). 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 is gecontroleerd door RWS-DID. Sinds de publicatie van het vorige statusrapport in 2015 (Referentie 1) zijn er twee waterpassingen uitgevoerd zoals weergegeven in Figuur 3 en Figuur 4 (Referentie 5, Referentie 25).

Periode : najaar 2015
Peilmerken : 351
Metingen : 776
Kilometers : 276
Meetregister : Lauwersmeer
2015
EP201509205046



Figuur 3; Waterpastraject 2015.

Periode : mei-dec 2018
Peilmerken : 3741
Metingen : 11824
Kilometers : 3442
Meetregister : Noord-Nederland 2018
EP201901203987



Figuur 4; Waterpastraject 2018 (uitgevoerd door Rijkswaterstaat).

4.2 InSAR

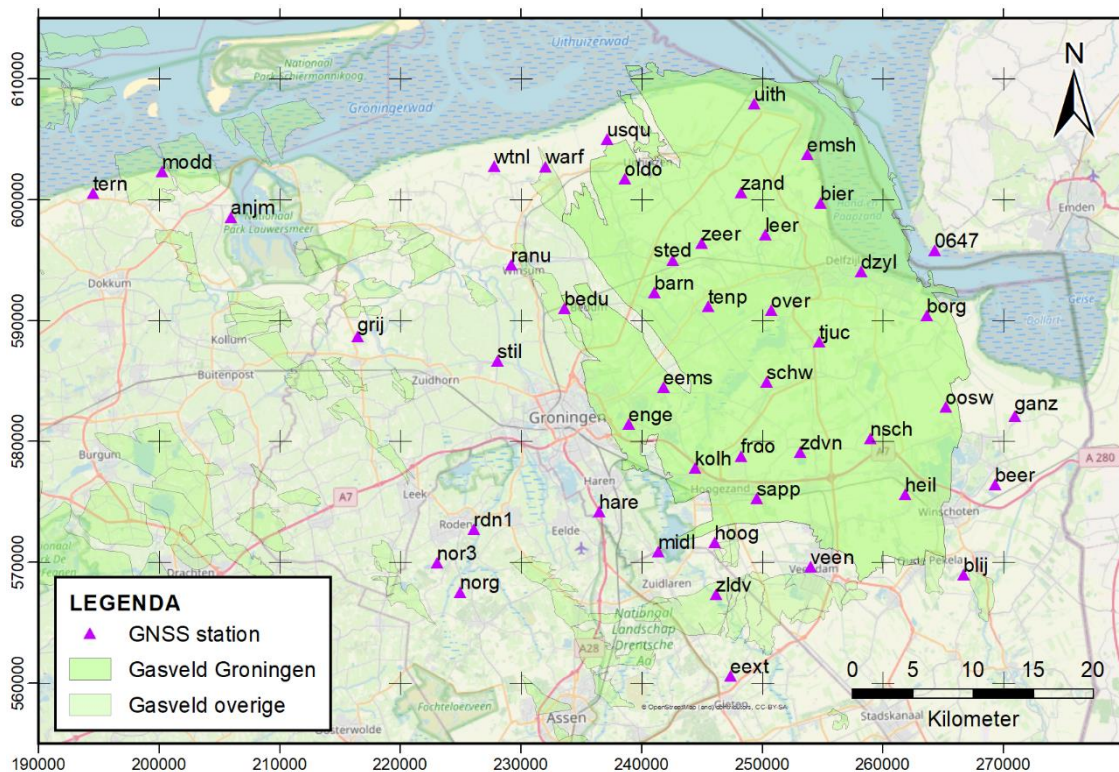
Bij de PS-InSAR methodiek worden uit door een satelliet opgenomen radarbeelden de deformaties van coherente 'reflectoren', zogenaamde Persistent Scatterers (PS), op het aardoppervlak bepaald. Een tijdserie van beelden is nodig om deze Persistent Scatterers (PS) te identificeren; zij corresponderen veelal met de bebouwing en andere objecten.

In de statusrapporten 2010 en 2015 is reeds geconstateerd, dat InSAR een goede overeenkomst laat zien met waterpassing en beschouwd kan worden als alternatieve techniek voor het monitoren van bodemdaling. Dit wordt bevestigd in het Addendum InSAR bij het Meetregister bij het meetplan Noord-Nederland, Groningen en Waddenzee 2018 (Referentie 6), en 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 21).

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.

4.3 GNSS

Voor de monitoring van bodembeweging als gevolg van gaswinning door NAM in Noord-Nederland zijn in 2020 46 permanente GNSS (Global Navigation Satellite System, GPS) stations operationeel. De bestaande permanente stations zijn tussen 2018 en 2020 met 29 Integrated Geodetic Reference Stations aangevuld, die een GNSS-ontvanger met meetpunten voor andere technieken integreren. De locaties van de GNSS-stations (incl. IGRS) worden gevisualiseerd in Figuur 5. De resultaten van deze metingen worden aan SodM gerapporteerd (bijv. Referentie 14 en Referentie 15). Hierin worden ook de dalingssnelheden gerapporteerd, welke berekend worden over een periode van 12 voorafgaande maanden. Deze berekende dalingssnelheden hebben een standaardafwijking van ongeveer 0,6 mm/jaar. De gemeten bodemdaling op alle GNSS-stations is te zien in Appendix VII, tezamen met de gemodelleerde bodemdaling volgens het geomechanisch model.



Figuur 5; Overzicht continue GNSS-stations (inclusief Integrated Geodetic Reference Stations). Behalve tenp, dat in 2019 is afgebouwd, zijn alle getoonde stations in 2020 operationeel.

4.4 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.

Voor de waterpassingen rapporteert NAM, in lijn met de in het verleden gestelde eisen van SodM, gewaterpaste differenties op basis van vrije netwerk vereffeningen, waarbij wordt aangesloten op één referentiepeilmerk. Met het oog op de precisie van de differenties, is het netwerk van Noord-Nederland opgedeeld in drie deelgebieden, met ieder één afzonderlijk referentiepeilmerk (Referentie 5).

Uit InSAR bepaalde differenties worden gerelateerd aan de gemiddelde beweging van Persistent Scatterers in een gebied dat niet is onderhevig aan bodembeweging.

Voor de kalibratie van de bodemdalingsmodellen voor het Groningen gasveld zijn de dubbel-differenties (in ruimte en tijd) van de waterpassingen gebruikt. Bij de precisiebeschrijving is rekening gehouden met de samenhang (correlatie) tussen de metingen. Zowel de meetonzekerheid als de idealisatie precisie (peilmerk(in)stabiliteit) zijn meegenomen (Referentie 3). Voor de geomechanische modellering van de overige velden is een gemiddelde standaardafwijking van 4,5 mm gebruikt voor de dubbel-differenties.

De geodetische metingen van InSAR en GNSS zijn gebruikt bij de validatie van het bodemdalingsmodel inclusief modelonzekerheid.

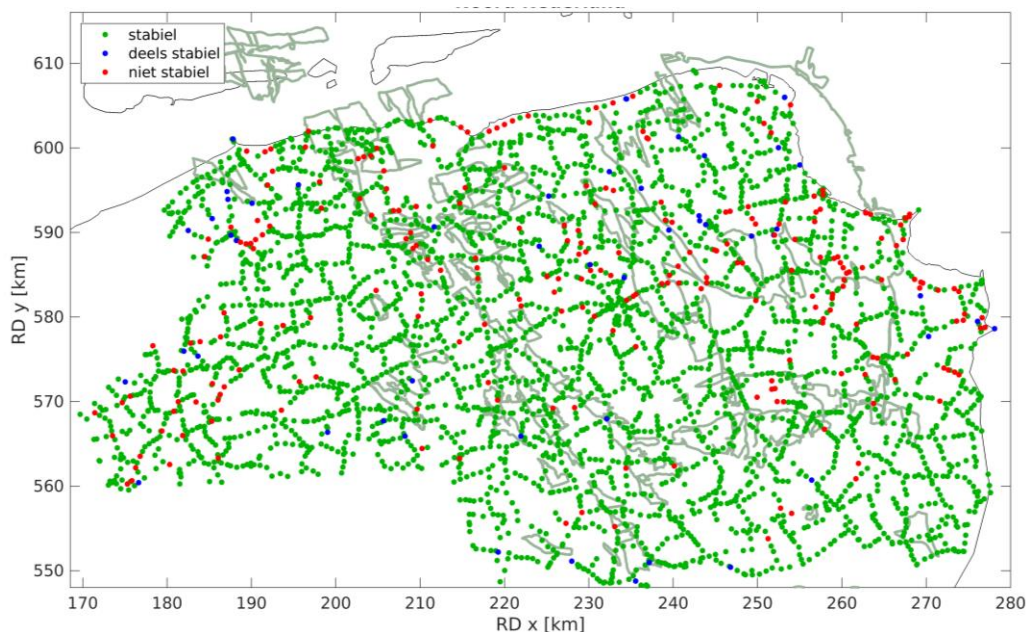
4.5 Stabiliteit

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 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 peilmerk als de daling van een peilmerk representatief is 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 peilmerken binnen een zekere marge overeenkomt met het gedrag van andere peilmerken in de omgeving. Daarop gebaseerd kunnen stabiele peilmerken in een ruimte-tijd analyse op een statistisch objectieve wijze worden gedetecteerd. Het resultaat van deze stabiliteitsanalyse staat afgebeeld in Figuur 6. Voor gedetailleerde toelichting zie Referentie 18.



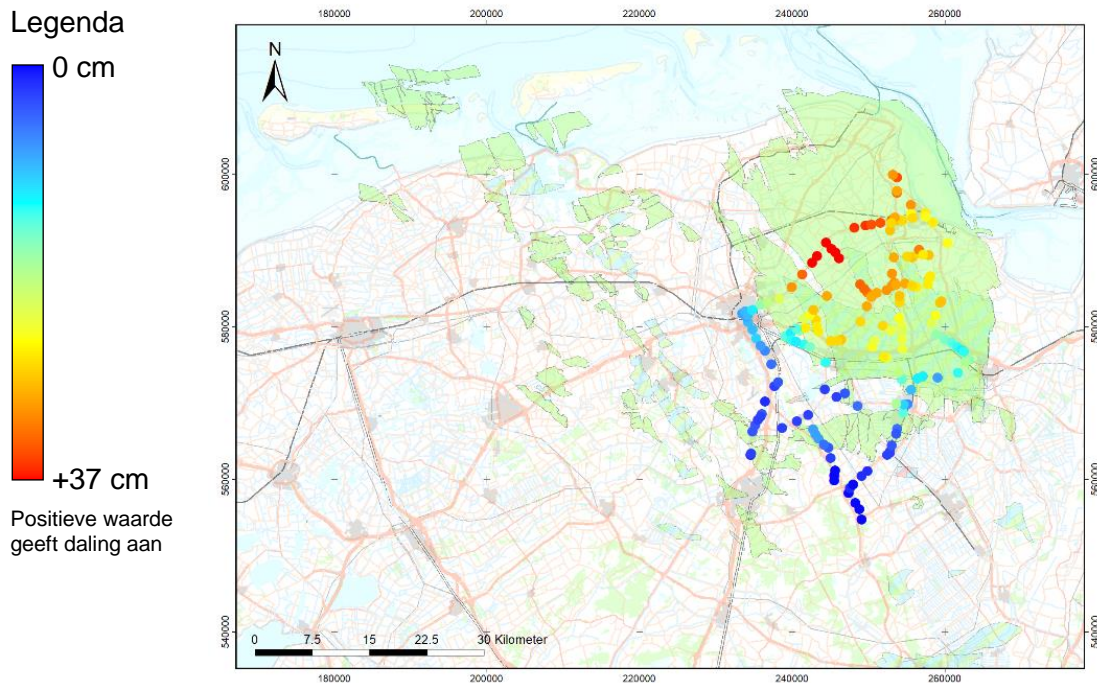
Figuur 6; Herziene stabiliteitsanalyse van waterpas peilmerken 2019. 93% van de geanalyseerde peilmerken wordt als “stabiel” geclassificeerd.

Ook puntverwisselingen en peilmerkverstoringen zijn 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.

4.6 Bodemdaling door gaswinning

Aangenomen wordt dat de bodemdaling door compactie in de diepe ondergrond (zoals door gaswinning) wordt weergegeven door de bewegingen van de stabiele peilmerken. De differenties zijn berekend door de vrij vereffende peilmerkhogten van twee metingen van elkaar af te trekken. Deze hoogten en differenties zijn ook gepubliceerd in openbare meetregisters. De peilmerk differenties tussen 1964 en 2018 staan afgebeeld in Figuur 7.

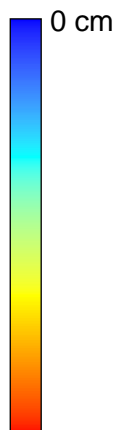


Figuur 7; Relatieve peilmerkbeweging (cm) stabiele peilmerken, 1964-2018.

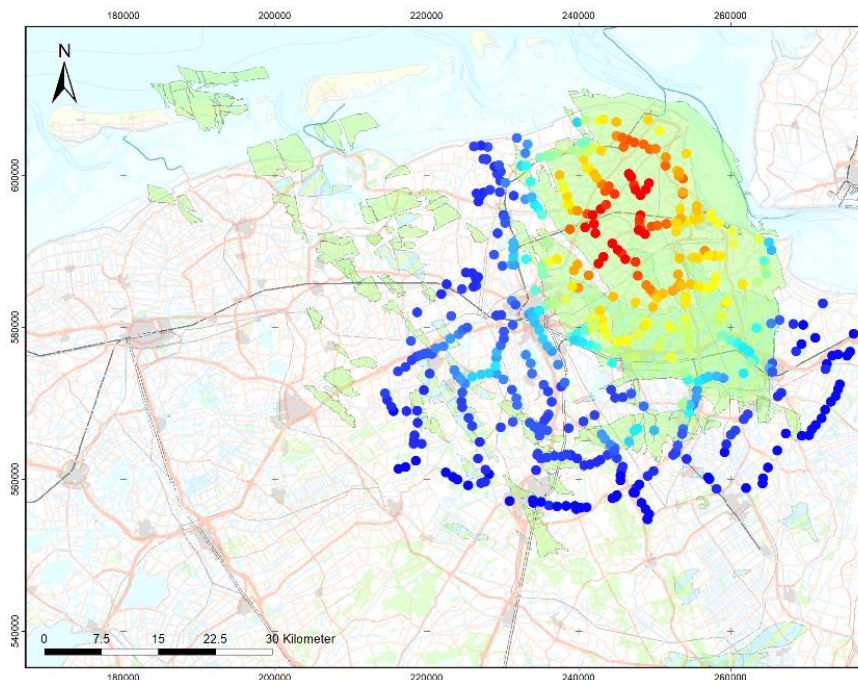
In 1964 is bij de start van de gaswinning in Groningen slechts een beperkt netwerk gemeten, omdat destijds alleen uit het zuidelijke deel van het gasveld werd geproduceerd. De relatieve peilmerkbewegingen tussen 1964 en 2018 kunnen dan ook slechts op een beperkt aantal peilmerken worden bepaald.

Later (vanaf 1972) zijn veel uitgebreidere metingen uitgevoerd. Omdat er zeer weinig bodemdaling heeft plaatsgevonden tussen 1964 en 1972 (max. 2 cm), zijn ook de peilmerkbewegingen tussen 1972 en 2018 berekend. Deze worden weergegeven in Figuur 8.

Legenda



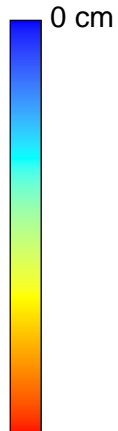
Positieve waarde geeft daling aan



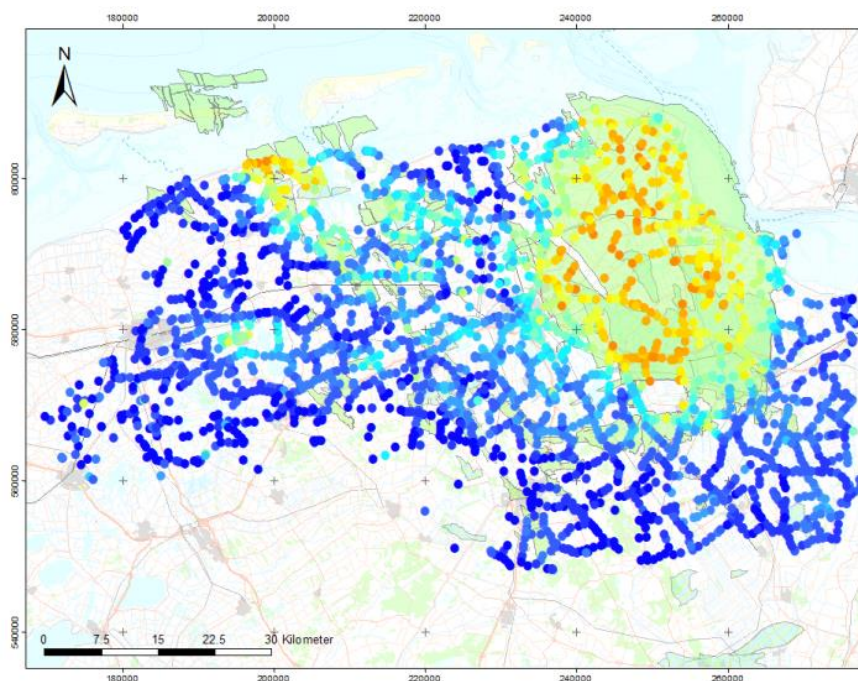
Figuur 8; Relatieve peilmerkbeweging (cm) stabiele peilmerken, 1972-2018.

Figuur 9 geeft de relatieve peilmerkbewegingen weer tussen de twee laatste grote waterpassingen in Noord-Nederland (2013 en 2018).

Legenda



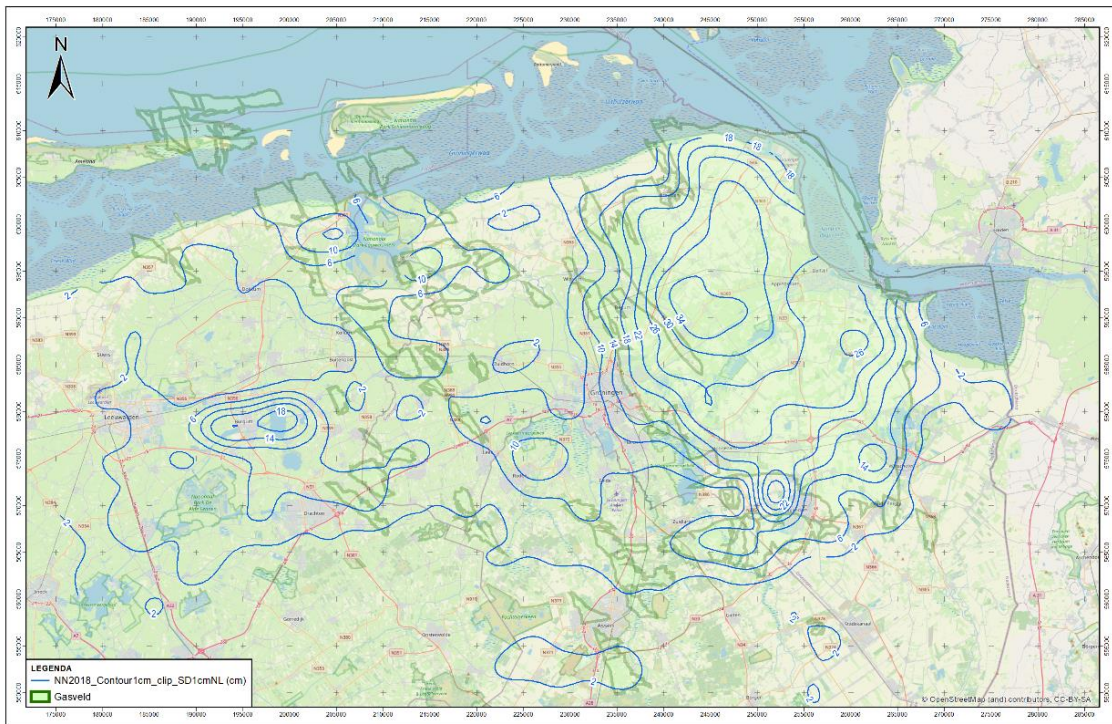
Positieve waarde geeft daling aan



Figuur 9; Relatieve peilmerkbeweging (cm) stabiele peilmerken, 2013-2018.

4.7 Contourkaart ruimte-tijd analyse waterpasmetingen

Op basis van een ruimte-tijd analyse, waarbij alle beschikbare waterpasdata van 1964 tot 2018 is gebruikt, is een contourkaart gegenereerd (Figuur 10). De ruimte-tijd analyse maakt aannames omtrent de modellering en het gedrag van de bodemdeformatie als gevolg van mijnbouwactiviteiten. Daardoor kan onderscheid worden gemaakt tussen de bodemdaling door gaswinning (glad verloop zowel in ruimte als in tijd), autonome peilmerkbewegingen (glad verloop in tijd, geen afhankelijkheden tussen naburige meetpunten) en geheel toevallige meetafwijkingen in het kader van de meetonzekerheid. De uitsplitsing van de door gaswinning veroorzaakte bodemdaling is afhankelijk van de mate, waarin de gebruikte gladheidsparameters de fysische werkelijkheid beschrijven. Deze zijn uit de bodemdalingsmetingen afgeleid en niet direct gerelateerd aan de parameters, die het gedrag van de gasreservoirs en de daarboven liggende ondergrondse lagen beschrijven. Hierdoor heeft de geschatte bodembeweging voornamelijk een signaalfunctie. Contouren worden alleen getoond voor gebieden, waar volgens de analyse de standaardafwijking van de geschatte bodemdaling kleiner is dan 1 cm.

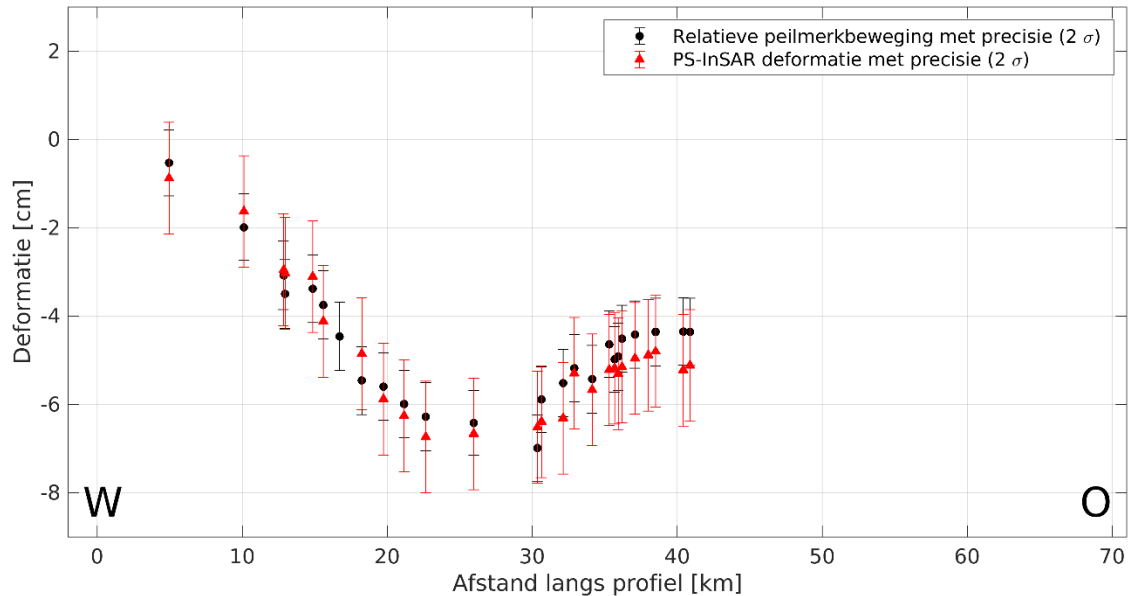


Figuur 10; Contourkaart voor bodemdaling door gaswinning, opgetreden tussen start van de productie en de waterpassing in 2018 op basis van ruimte-tijd analyse van waterpasdata (cm). Deze kaart is groter weergegeven in Appendix IV.

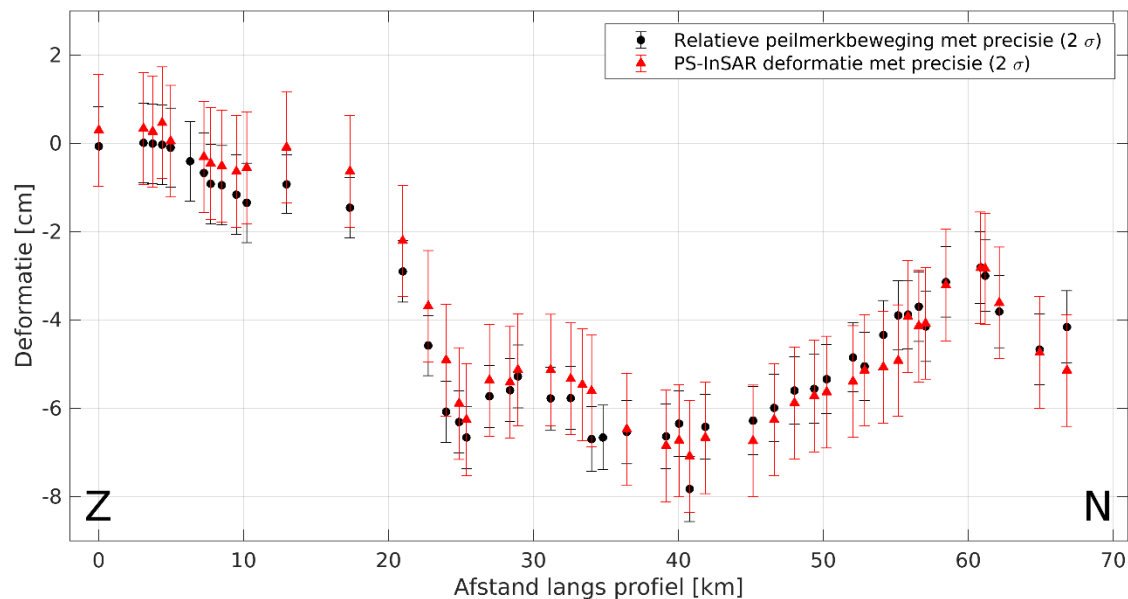
Ter vergelijking is in Appendix V de op stabiele peilmerken gemeten bodemdaling getoond. Deze waarden zijn gebruikt voor de kalibratie van het geomechanisch bodemdalingsmodel.

4.8 Overeenkomst meettechnieken

De goede overeenkomst van metingen uit waterpassing en InSAR is te zien aan hand van twee profielen, die het Groningen gasveld van West naar Oost en van Zuid naar Noord bestrijken. Deze zijn weergegeven in Figuur 11 en Figuur 12. Voor InSAR zijn gewogen gemiddelden uit alle meetpunten binnen een straal van 500 m rond de peilmerken berekend, waarvoor 6 mm als standaardafwijking is aangenomen (conservatieve waarde voor een enkele dubbel-differentie, inclusief idealisatie precisie). Het ruimtelijke verloop van de profielen is in Figuur 24 in paragraaf 6.1 weergegeven.



Figuur 11; West-oost profiel: vergelijking PS-InSAR en waterpassingen (cm), 2008-2018.

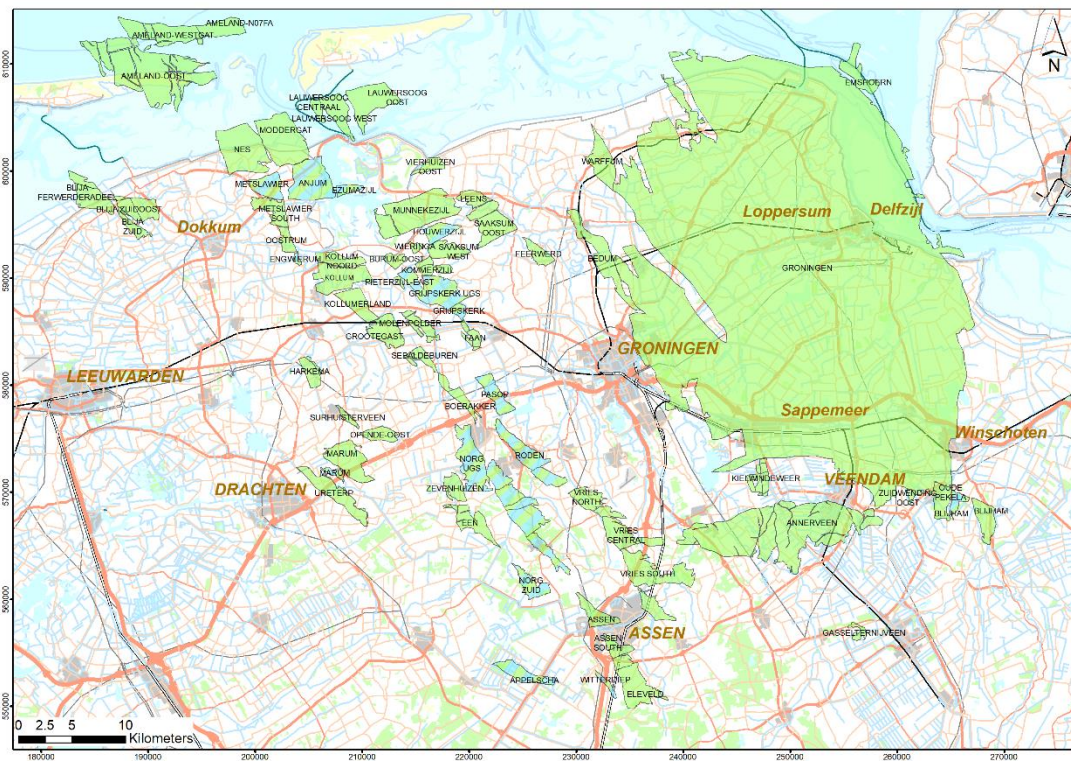


Figuur 12; Zuid-noord profiel: vergelijking PS-InSAR en waterpassingen (cm), 2008-2018.

5 Modelling van de bodemdaling

5.1 Invoergegevens van de velden

Voor de nieuwe velden die recentelijk in productie zijn genomen (na 2015), of binnenkort zullen worden, is in dit statusrapport een korte beschrijving van het veld opgenomen. 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 1. 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 13.



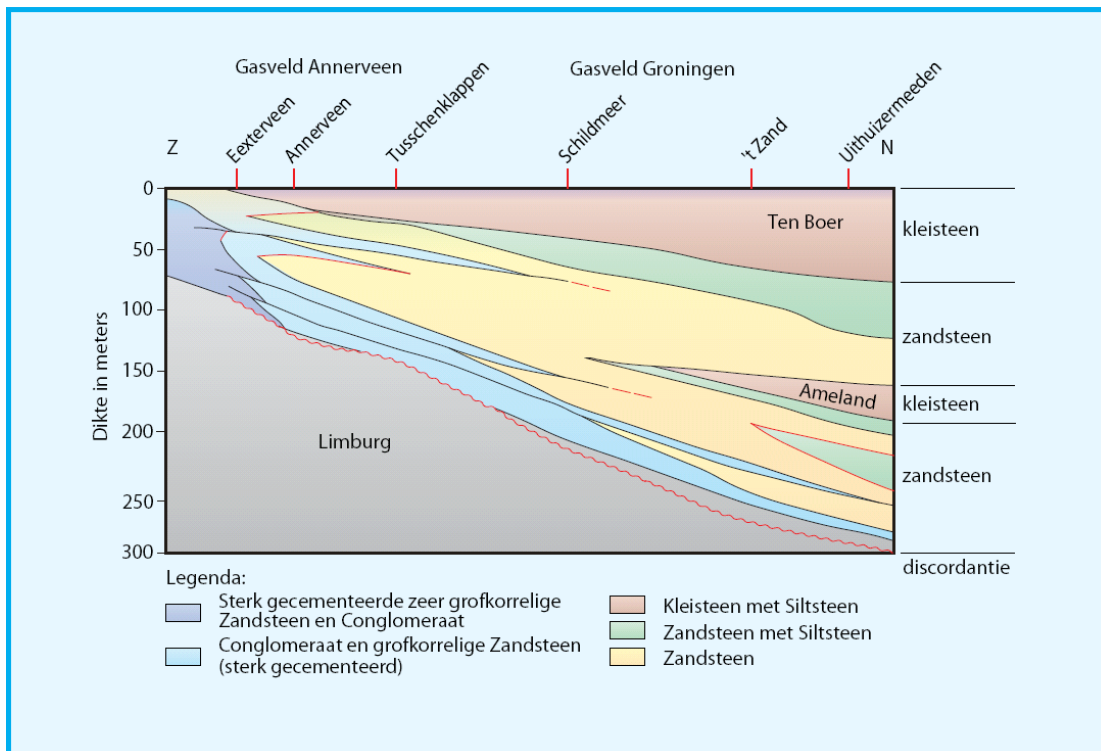
Figuur 13; Overzicht van de gasvelden die in deze prognose zijn meegenomen. De blauw-groen gearceerde velden zijn de velden die in 2020 niet in productie zijn of representeren de UGS-velden (Norg en Grijskerk).

Pieterzijl-Oost: Op een diepte van ongeveer 3300 m bevindt zich het Pieterzijl-Oost voorkomen met een gemiddelde reservoirdikte van 100 m. Het voorkomen is in 2019 in productie genomen (in 2016 is een productie test uitgevoerd). De verwachte compressibiliteit is lager dan de Groningen Cm op basis van de lagere porositeit in dit gebied.

Roswinkel: Dit veld heeft tussen 1980 en 2007 geproduceerd. Het veld bevindt zich in Drenthe, maar de bodemdalingscontouren raken de zuidoosthoek van de provincie Groningen. In de vorige edities van het Statusrapport waren de contouren van dit “Drentse” veld niet getoond, maar omdat de bodemdaling ook gedeeltelijk de provincie Groningen raakt worden ze nu wel getoond.

5.2 Groningen

Voor het modelleren van de bodemdaling boven het Groningen-veld 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 het veld is getoond in Figuur 14. 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.

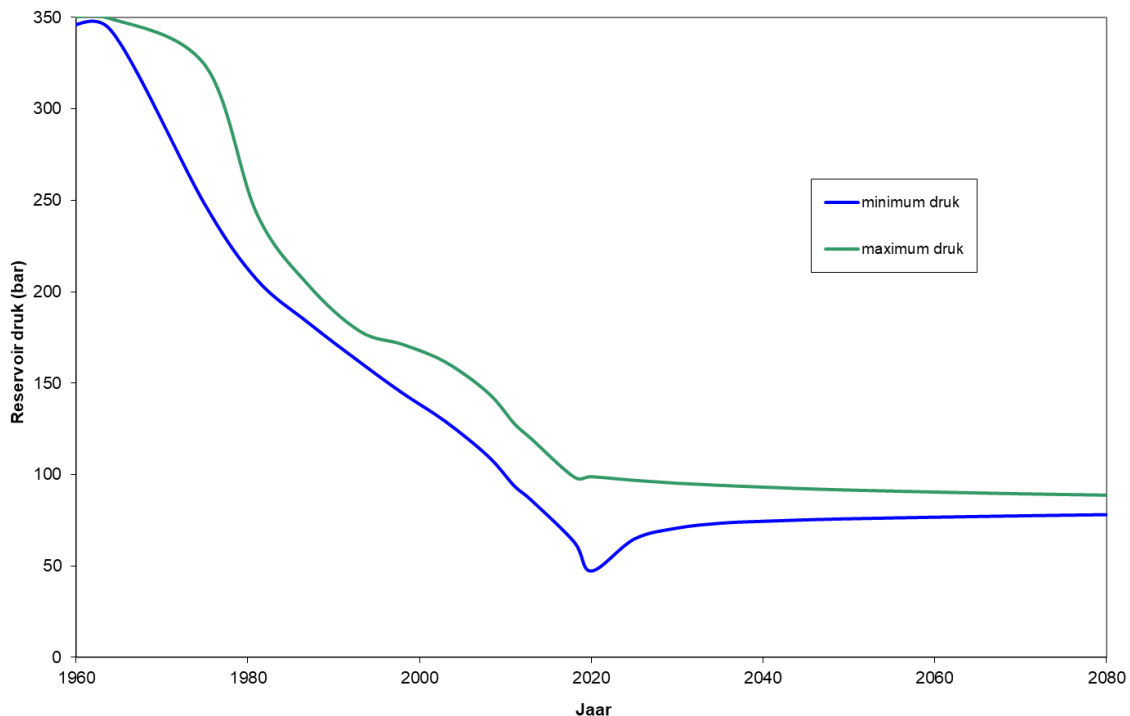


Figuur 14; Schematische weergave van de geologie van het Groningen-gasveld.

De drukontwikkeling in het Groningen-veld wordt in detail beschreven in Referentie 3. Het einde van de Groningen productie is voorzien in 2022. Het reservoirsimulatiemodel wordt gekalibreerd met de gemeten druk en productievolumes van gas, water en condensaat. Door beëindiging van productie in 2022 zal de velddruk hoger blijven dan gerapporteerd in het voorgaande Statusrapport. Toen werd uitgegaan van een druk van 15 bar in 2080, terwijl de huidige inschatting een druk van ongeveer 80 bar laat zien.

Figuur 15 toont het drukverloop van het Groningen veld met de tijd waarbij de lijnen de minimum (zuiden van het veld) en maximum drukken (noorden van het veld) weergeven. De variatie in druk neemt met de tijd af tot het jaar 2013 door de installatie van de noordelijke clusters in jaren tachtig en negentig. In 2013 werd het merendeel van deze clusters weer ingesloten in verband met de waargenomen aardbevingen in het Loppersum gebied. Deze maatregel heeft ertoe geleid dat het drukverschil tussen het zuiden en het noorden verder is toegenomen.

Na het insluiten van het Groningen-veld zal het drukverschil kleiner worden waarna de druk in het veld uiteindelijk overal gelijk zal zijn. De bodemdaling die hierdoor na 2080 optreedt zal enkele centimeters bedragen.



Figuur 15; Spreiding van reservoirdrukken in het Groningen-veld.

Tabel 1 Overzicht van de gegevens die zijn gebruikt in deze bodemdalingsstudie.

veld	opgenomen in vorige prognose(s)	Productie sinds	Initiele druk (bar)	Huidige druk (bar)	Einddruk	gemiddelde Cm (10- 5/bar)	gemiddelde depleterende dikte
Anjum	✓	1997	563	187	56	1,31	109
Annerveen	✓	1973	349	16	14	0,77	119
Appelscha	✓	1999	303	106	106	1,05	93
Assen	✓	2007	337	191	151	0,92	50
Bedum	✓	1985	345	118	68	1,04	195
Blija Zuid	✓	2011	377	247	193	1,16	112
Blija Zuid-Oost	✓	2001	377	307	159	1,16	93
Blija-Ferwerderadeel	✓	1985	377	277	218	1,26	120
Blijham	✓	1984	412	40	33	1,02	75
Boerakker	✓	1998	338	48	48	1,29	190
Burum Oost	✓	2014	428	418	418	1,04	105
Een	✓	2005	299	204	185	0,89	45
Eleveld	✓	1975	377	87	22	0,77	100
Engwierum	✓	2002	420	224	225	1,29	103
Ezumazijl	✓	1999	493	484	75	1,07	106
Faan	✓	2009	387	182	172	0,79	204
Feerwerd	✓	2000	404	208	186	1,20	115
Gasselternijveen	✓	2008	565	180	144	0,81	13
Grijpskerk UGS	✓	1993	394	333	333	1,01	120
Groningen	✓	1963	367	70	83	0,95	188
Grootegast	✓	1979	334	37	28	1,51	150
Harkema	✓	2010	292	70	52	1,11	100
Houwerzijl	✓	2000	423	234	238	1,08	116
Kielwindeweer	✓	2003	381	92	80	0,76	117
Kollum	✓	2002	441	92	91	1,18	94
Kollumerland	✓	1989	342	80	80	1,31	90
Kollum-Noord	✓	2001	443	85	63	1,27	99
Kommerzijl	✓	2001	410	116	112	1,12	121
Lauwersoog-C	✓	2012	500	512	49	0,81	97
Lauwersoog-Oost	✓	2008	481	441	74	0,80	114
Lauwersoog-West	✓	2008	481	425	36	0,83	97
Leens	✓	2003	423	123	121	1,12	123
Marum	✓	1978	281	126	111	1,18	121
Metslawier	✓	1997	559	295	30	1,41	101
Metslawier Zuid	✓	2014	558	209	168	1,21	82

veld	opgenomen in vorige prognose(s)	Productie sinds	Initiele druk (bar)	Huidige druk (bar)	Einddruk	gemiddelde Cm (10- 5/bar)	gemiddelde depleterende dikte
Moddergat	✓	2007	567	491	84	1,29	107
Molenpolder	✓	2001	370	120	113	0,98	200
Munnekezijl	✓	1995	424	127	106	1,03	117
Nes	✓	2007	564	420	81	1,55	99
Norg-Zuid	✓	1999	312	110	110	0,86	142
Norg UGS	✓	1983/1995	351	322	332	1,02	162
Oostrum	✓	2002	522	87	83	1,24	98
Opende-Oost	✓	1993	292	67	63	1,64	152
Oude Pekela	✓	1995	331	15	11	0,92	70
Pasop	✓	1997	358	227	281	1,16	173
Pieterzijl Oost	✓	2019	398	336	206	1,03	100
Roden (blok 1 / 2)	✓	1976	345	233	218	1,01	185
Saaksum(O/W)	✓	1999	412	115/143	99/143	1,14	127/120
Sebaldeburen	✓	1997	338	33	33	0,92	173
Surhuisterveen	✓	2008	292	141	122	1,00	85
Ureterp	✓	1978	281	70	69	1,29	125
Vierhuizen (Oost)	✓	2008	459	446	132	0,90	110
Vries (South/Central/North)	✓	1991	347	248/69/73	246/46/191	0,89	145
Warffum	✓	1986	354	133	132	1,10	152
Wieringa	✓	2014	423	272	265	1,07	108
Witterdiep	✓	2007	341	81	81	0,82	118
Zevenhuizen	✓	2008	306	29	29	0,89	147
Zuidwending-Oost	✓	2006	347	13	10	0,82	70

* 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 waarbij zowel de gas- en aquiferdrukken worden berekend. 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 het 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 drukdaling in het reservoir wordt berekend met reservoirsimulatiemodellen die worden gekalibreerd met de regelmatig gemeten drukken in de productie putten en de hoeveelheid geproduceerd gas, condensaat en water over tijd. De mate waarin de

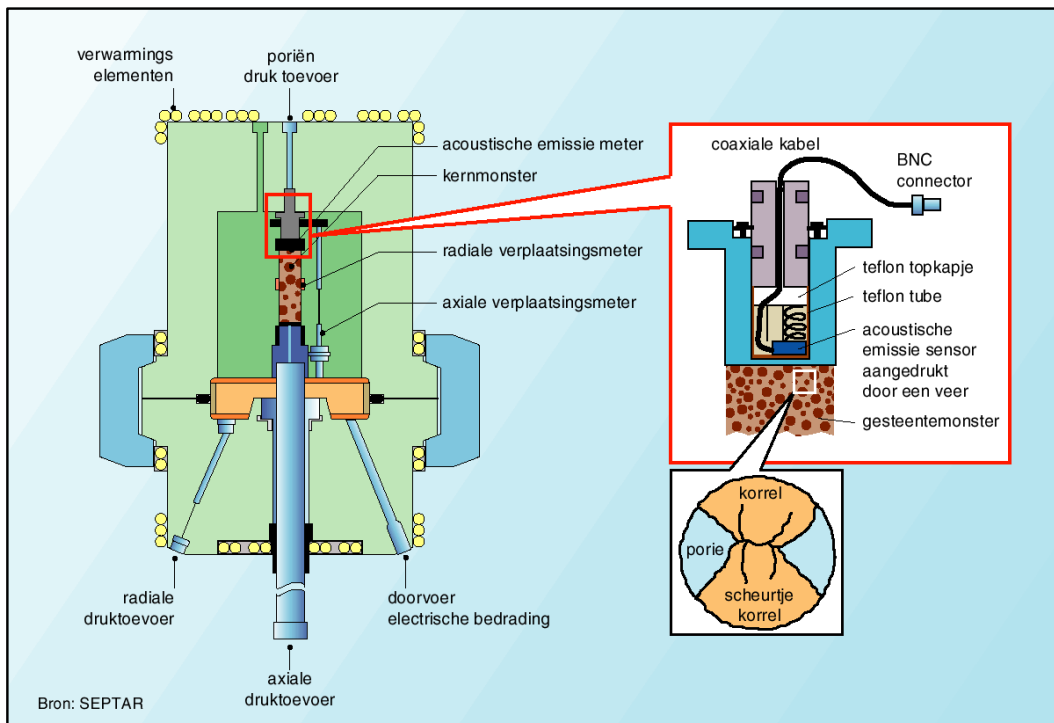
compactie van de reservoirformatie wordt omgezet in bodemdaling aan het maaiveld is onder meer afhankelijk van de diepte en omvang van het depleterende gasveld. Om een prognose van de bodemdaling te maken moet een model voor het compactiegedrag worden bepaald. Bepalende factoren voor het compactiegedrag 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 in het laboratorium.

De parameters 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 16). 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 16; Compactieapparaat, 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 9). 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 bodemdalings-berekeningen 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 20). 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 13) 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-veld werd besloten een meetprogramma op te zetten om de samendrukbaarheid (compressibiliteit) van het reservoirgesteente in het reservoir zelf te meten.

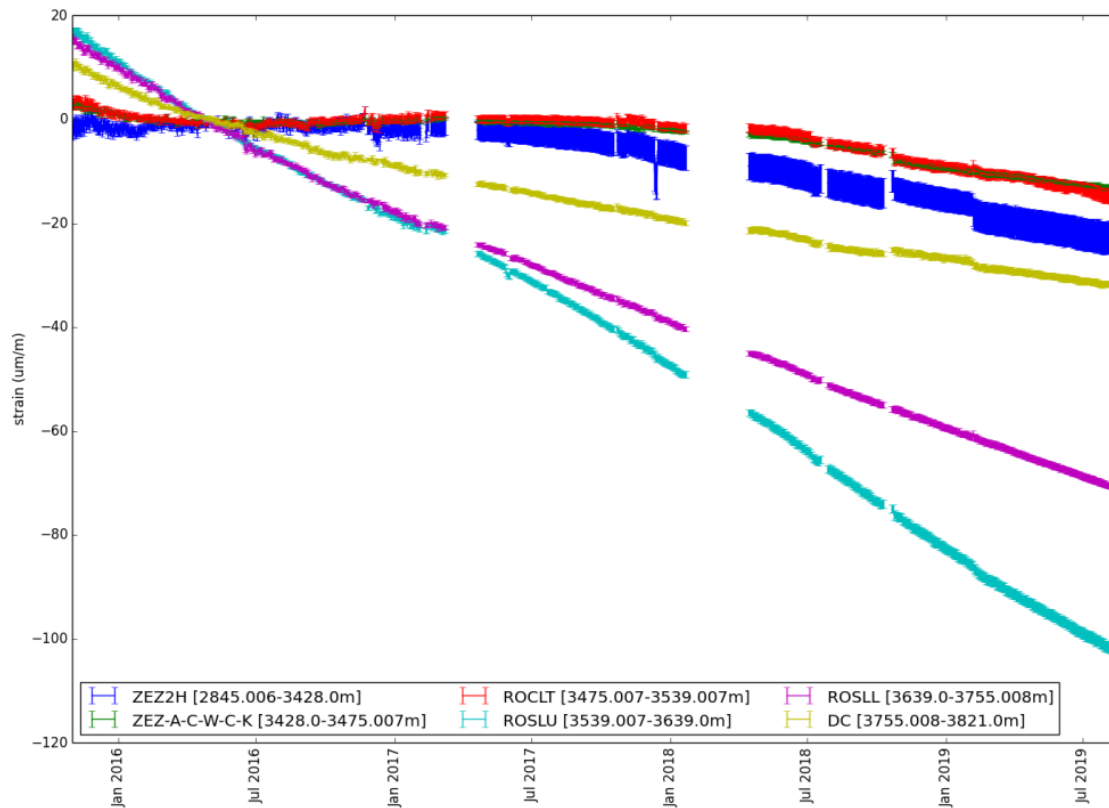
Hiertoe werden in elf observatieputten laag-radioactieve markeringen (kogels) om de tien meter over het gehele reservoir aangebracht. Door periodiek de (verandering van de) afstand tussen de markeringen te bepalen, kan inzicht in de reservoircompactie worden verkregen. De putten zijn over het veld verspreid, 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.

Een recent onderzoek (Referentie 7) heeft 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 (beëindiging van de productie in 2022) alleen maar kleiner wordt heeft NAM besloten de metingen in deze observatieputten te stoppen. In 2015 is er een verbeterde monitoringstechniek gerealiseerd in de recente Zeerijp-3A boring: “distributed strain sensing (DSS)”

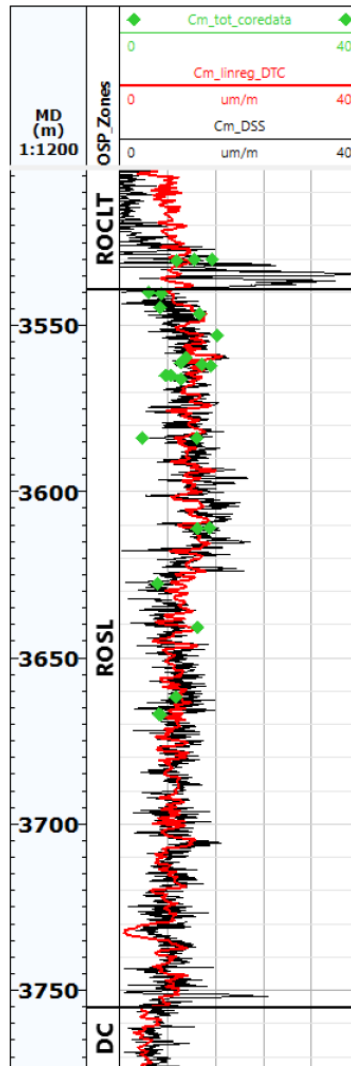
5.4.1 DSS metingen

De Zeerijp-3A put is uitgerust met een DSS-kabel. Dit is een glasvezelkabel waarmee de rek (compactie) in een put gemeten kan worden (Referentie 10). 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. Het verloop in tijd van de (totaal) gemeten rek per formatie is getoond in Figuur 17. De cumulatieve rek is, zoals verwacht, het grootst in de Slochteren Formatie (ROSLU en ROSLL), maar ook in de overige lagen wordt compactie gemeten, waarmee beperkte depletie in deze lagen waarschijnlijk lijkt. In het figuur is ervoor gekozen om de start van de metingen te laten beginnen rond juni 2016 (kruispunt van de lijnen). Het is mogelijk dat de metingen in het eerste half jaar beïnvloed worden door processen rondom de put zoals het uitharden van het cement rondom de stalen verbuizing.



Figuur 17; Gemeten rek als functie van tijd voor de lithostratigrafische eenheden in de Zeerijp-3A put

Door gebruik te maken van de drukdaling die volgt uit het reservoirmodel kan de compressibiliteit van de gesteentelagen worden afgeleid. De bijbehorende compactiecoëfficiënten kunnen worden vergeleken met de waarden van de kernmetingen (Figuur 18). Ook is er in Zeerijp-3A een sterke correlatie te zien tussen de gemeten geluidssnelheid van het gesteente (compressional sonic log) en de compressibiliteit (Referentie 8). Deze correlatie is ook gebruikt in de “Groningen Long Term subsidence” studie (Referentie 3).

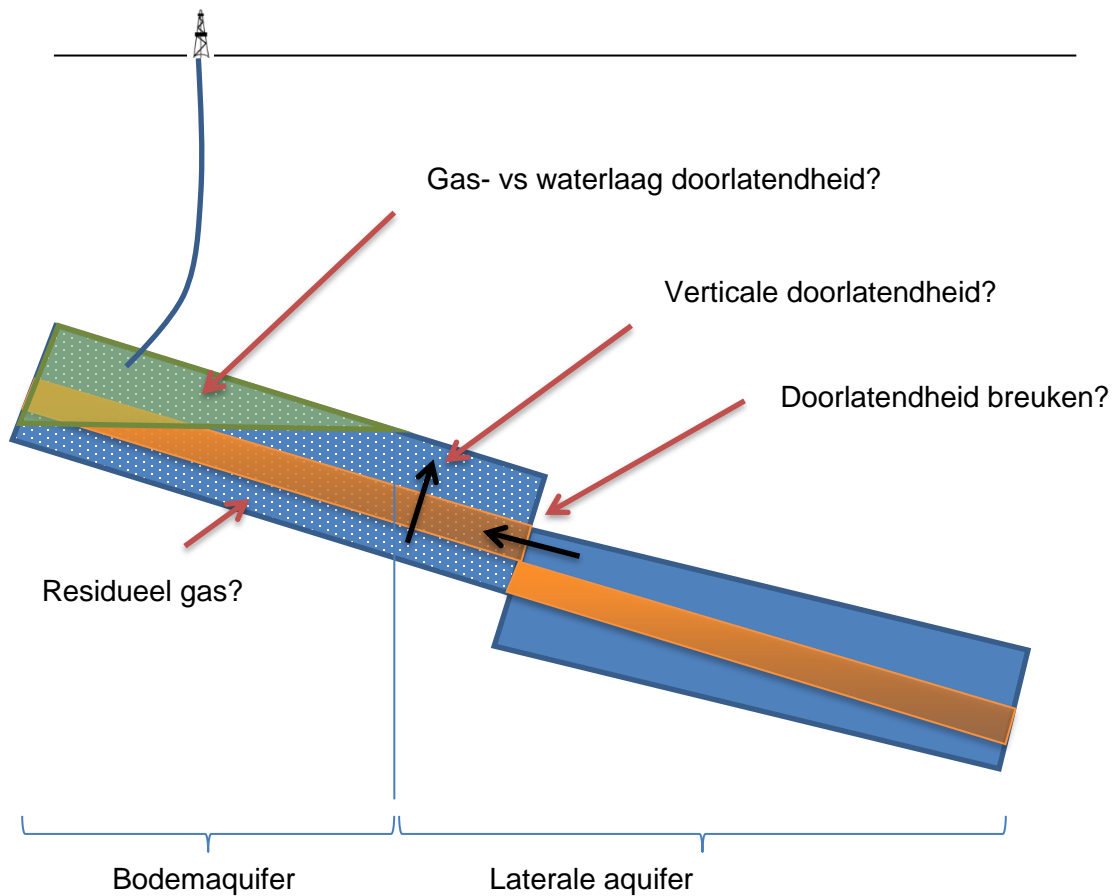


Figuur 18; Correlatie tussen de snelheid en de compressibiliteit in de ZRP-3A put. Zwart: Cm afgeleid uit de DSS-metingen. Rood: Cm afgeleid uit snelheidsmetingen. Groene punten: Cm afgeleid uit kernmetingen. Cm in $\mu\text{m}/\text{m}/\text{bar}$ (Referentie 8).

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 19).

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 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 19.



Figuur 19; 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 drukvaling onderhevig is als het gasgedeelte van het veld. Voor Groningen wordt deze informatie expliciet meegenomen in de 3D reservoirmodellering.

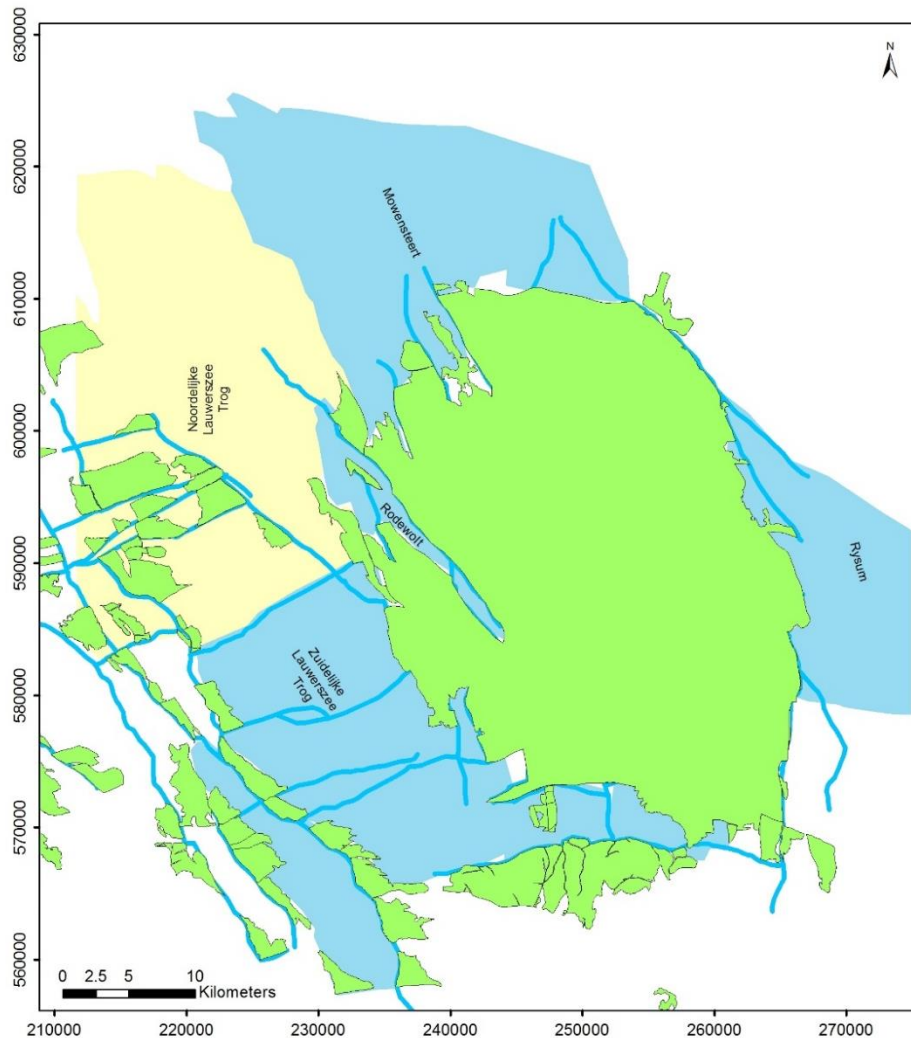
Voor de overige velden geldt dezelfde aanname dat de bodemaquifer evenveel in druk daalt als in het gasgedeelte van het reservoir.

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). Voor de aquifers in de Zuidelijke Lauwerzee trog (Tussen de velden Vries, Roden en Pasop en het Groningen veld, zie Figuur 20) zijn speciale modellen gemaakt waarbij meer dan 3000 aquiferealisaties zijn getest voor de meest waarschijnlijke combinatie van drukverloop en geomechanische parameters.

Voor Anjum, Norg en Grijskerk zijn dynamische reservoirmodellen gemaakt en worden de aquiferdrukken gebruikt die uit deze modellen volgen.

Voor de overige velden is aangenomen dat de aquifers voor 50% meedepleteren met gasveld gedurende productie en volledig depleteren na beëindiging van de productie uit het gasveld. Dit is een conservatie aanname omdat het niet waarschijnlijk is dat de laterale aquifers volledig zullen depleteren.



Figuur 20; 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 4 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 12).

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 door vertaalt naar de bodemdaling aan het maaiveld. Het invloedsmodel is opgesteld volgens Geertsma en van Opstal.

De compactie wordt berekend met het RTCiM (Rate type compaction model, Referentie 19). 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 paragraaf 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 in 2020 een uitgebreide kalibratie aan de bodemdalingsdata gedaan (Referentie 3) waarbij vele duizenden scenario's getest zijn voor de passing met de gemeten data. Hierbij zijn zowel de meest waarschijnlijke drukrealisaties voor de verschillende aquifergebieden als de meest waarschijnlijke waarden voor de RTCiM parameters geselecteerd.

In dit statusrapport zijn voor het Groningen veld dezelfde waarden voor de RTCiM parameters aangenomen als in de "Groningen Long Term subsidence" studie (Referentie 3).

Voor de overige velden zijn de waarden beperkt aangepast. Deze aanpassing is gedaan omdat daarmee de waargenomen bodemstijging bij de velden Norg en Roden als gevolg van de daar opgetreden stijging van de reservoirdruk 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. Roden produceert sinds 2003 weliswaar niet meer, maar recente metingen laten zien dat de reservoirdruk in dit veld weer toeneemt als gevolg van waterinflux uit het aquifer, waardoor de bodemdaling boven dit veld afneemt. Deze aangepaste parameterwaarden resulteren in een vergelijkbare bodemdaling als bij gebruik van de Groningen parameterwaarden, maar geven een betere passing met de gemeten bodemstijging.

	Groningen	Overige velden
Cmref (Totale Cm) [10^{-5}bar^{-1}]	0,85	0,80
Cmd (elastisch gedeelte) [10^{-5}bar^{-1}]	0,40	0,29
B ("tijd component")	0,021	0,018

5.8 Compactie metingen van de ondiepe 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 van de ondiepe ondergrond in veertien over de provincie Groningen verspreid aanwezige ondiepe compactieputten uitgevoerd. De ondiepe compactie werd gemeten tussen een diepte van ongeveer 20 m (fundatie meetgebouw) tot zo'n 400 m. De dalingssnelheid 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.

Een uitgebreide analyse (Referentie 26) leidde tot de conclusie dat de ondiepe compactie van plaats tot plaats varieert en niet over grotere gebieden kan worden geëxtrapoléerd. De metingen geven een goede lokale indicatie van de ondiepe

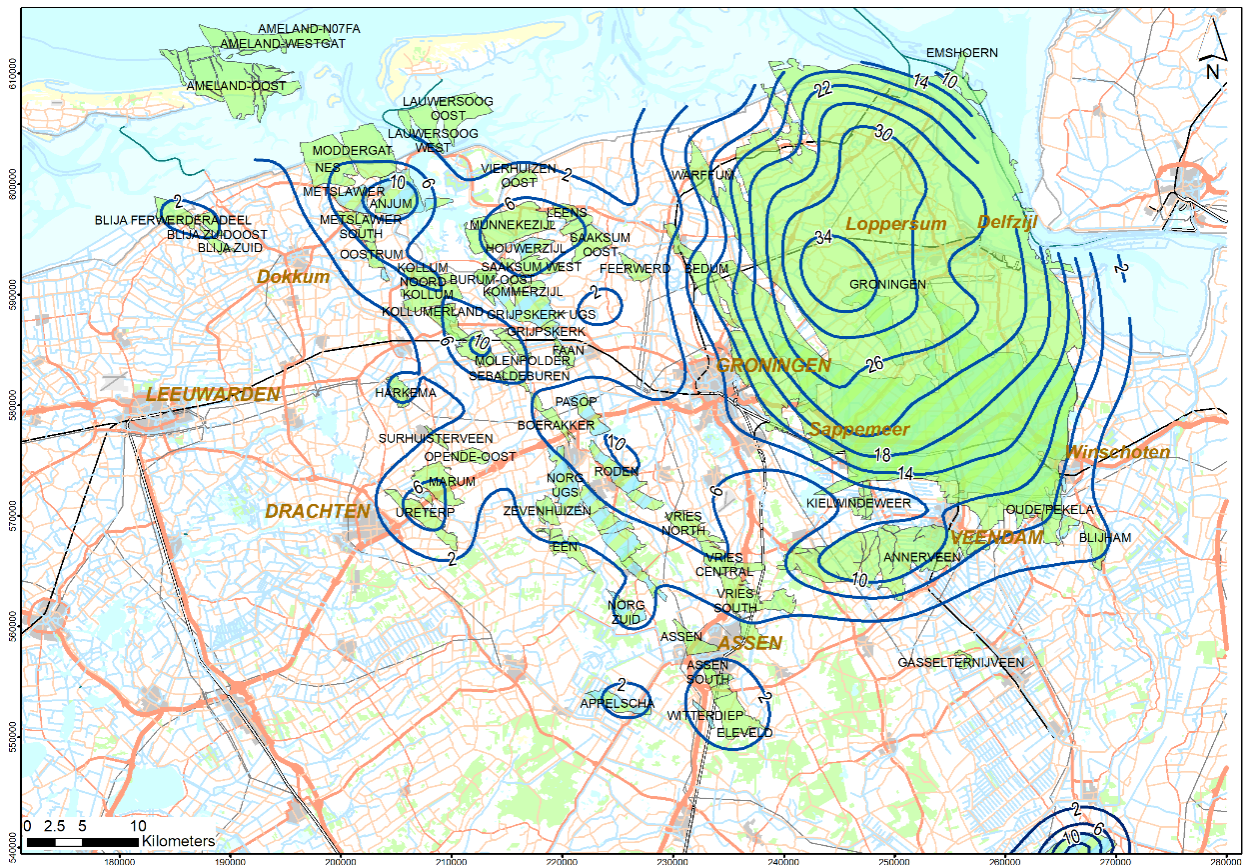
compactie, maar zijn niet geschikt om de bodemdaling veroorzaakt door de ondiepe compactie over geheel Groningen te bepalen. In de passing van het model met de meting wordt de ondiepe compactie niet van de meting afgetrokken, waardoor de gemodelleerde bodemdaling een conservatieve schatting geeft van de bodemdaling die door gaswinning wordt veroorzaakt.

Sinds 1992 worden ook ondiepe compactiemetingen in Drenthe (Annerveen) en Friesland (Tietjerksteradeel) uitgevoerd. Sinds 2018 is NAM niet meer de operator van het Tietjerksteradeel veld en worden de meetresultaten niet meer door de NAM gerapporteerd. Op dit moment wordt door NAM alleen nog in Annerveen de ondiepe compactie gemeten. Deze bedraagt gemiddeld 0,2 mm per jaar.

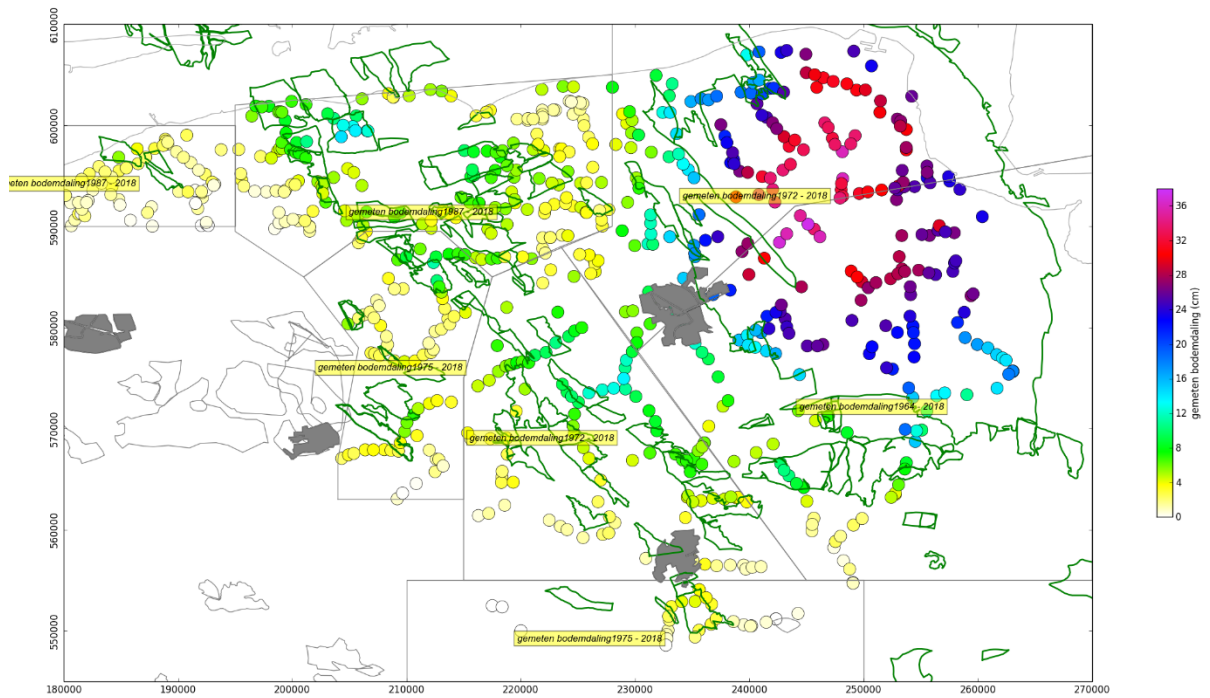
6 Vergelijking met de metingen en prognose van de bodemdaling

In Figuur 21 worden de bodemdalingscontouren volgens het aan de metingen gekalibreerde model voor het jaar 2018 getoond (bodemdaling sinds het begin van de gasproductie). Figuur 22 toont de gemeten (waterpasdata 2018) bodemdaling sinds de start van de winning op stabiele peilmerken. Figuur 23 toont de verschillen tussen de gemeten (waterpasdata 2018) en de gemodelleerde bodemdaling (1 jan 2019), die in het algemeen klein zijn.

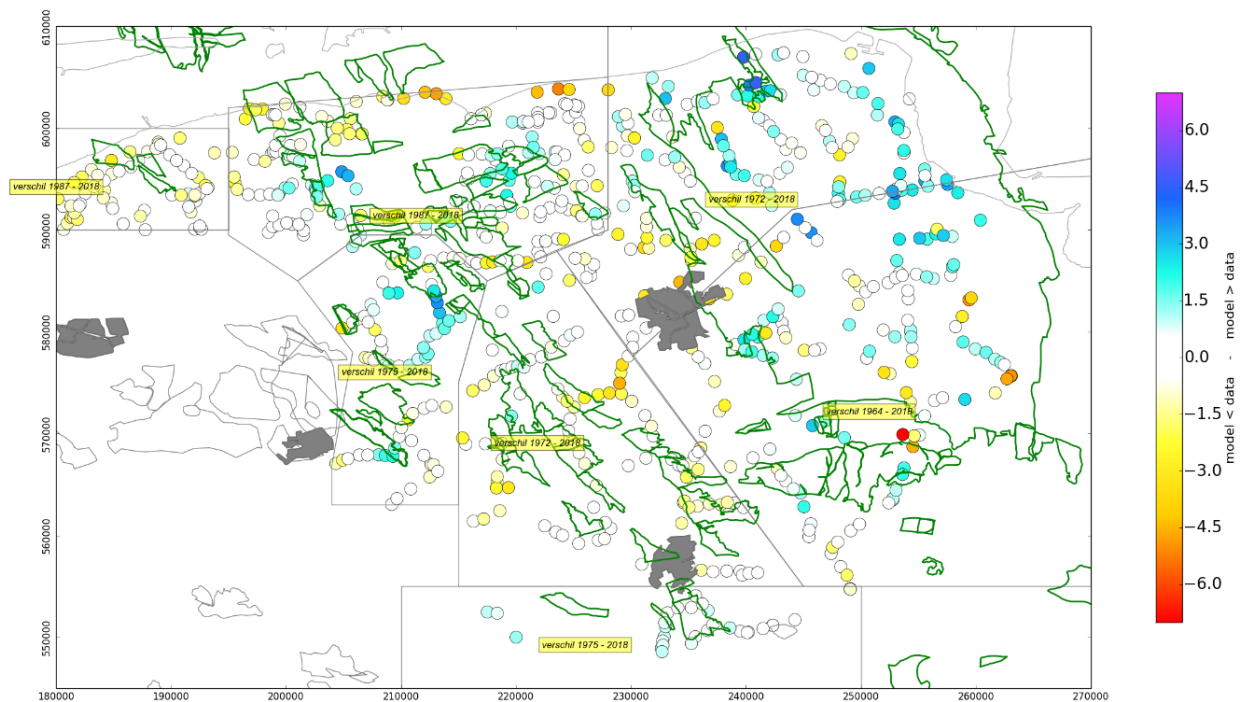
De kaart in Figuur 22 en Figuur 23 is opgedeeld in verschillende gebieden op basis van de eerste nulmeting in een betreffend gebied. Hierdoor is de tijdsperiode van de metingen per gebied verschillend. Deze kaarten zijn groter afgedrukt in Appendix V en Appendix VI.



Figuur 21; Contourkaart voor bodemdaling door gaswinning opgetreden tussen start van de productie en de waterpassing in 2018, bepaald met het aan de metingen gekalibreerde geomechanisch model (cm). De gearceerde velden zijn de in 2020 niet producerende velden of de UGS-velden (Norg en Gripskerk).



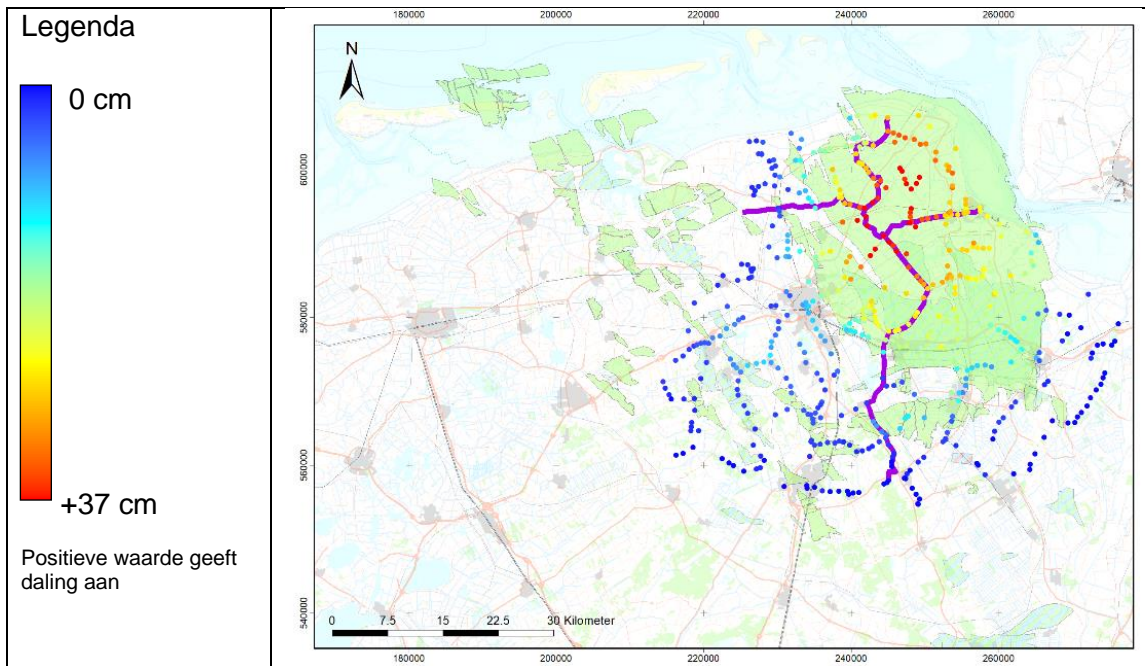
Figuur 22; Gemeten bodemdaling in 2018 op stabiele peilmerken sinds de start van de winning. Per gebied is een andere tijdsperiode gekozen afhankelijk van de eerste meting en/of start van de productie in het betreffende gebied.



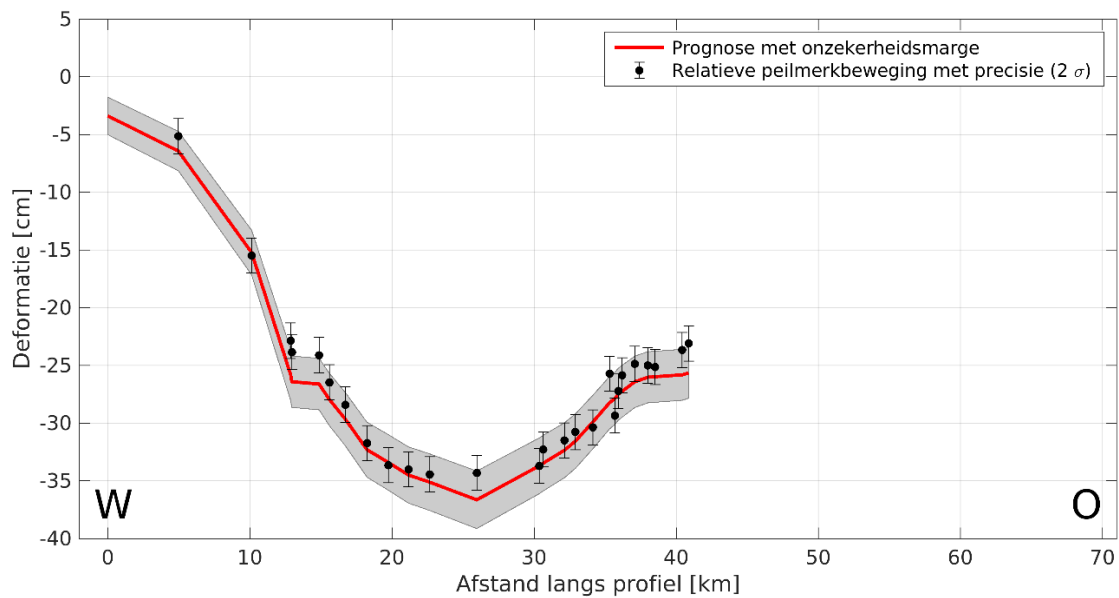
Figuur 23; Verschilkaart van de gemodelleerde bodemdaling minus de, op basis van waterpassing, op stabiele peilmerken gemeten bodemdaling in 2018 (sinds de start van de winning). Per gebied is een andere tijdsperiode gekozen afhankelijk van de eerste meting en/of start van de productie in het betreffende gebied. De verschillen zijn in cm weergegeven.

6.1 Profielen

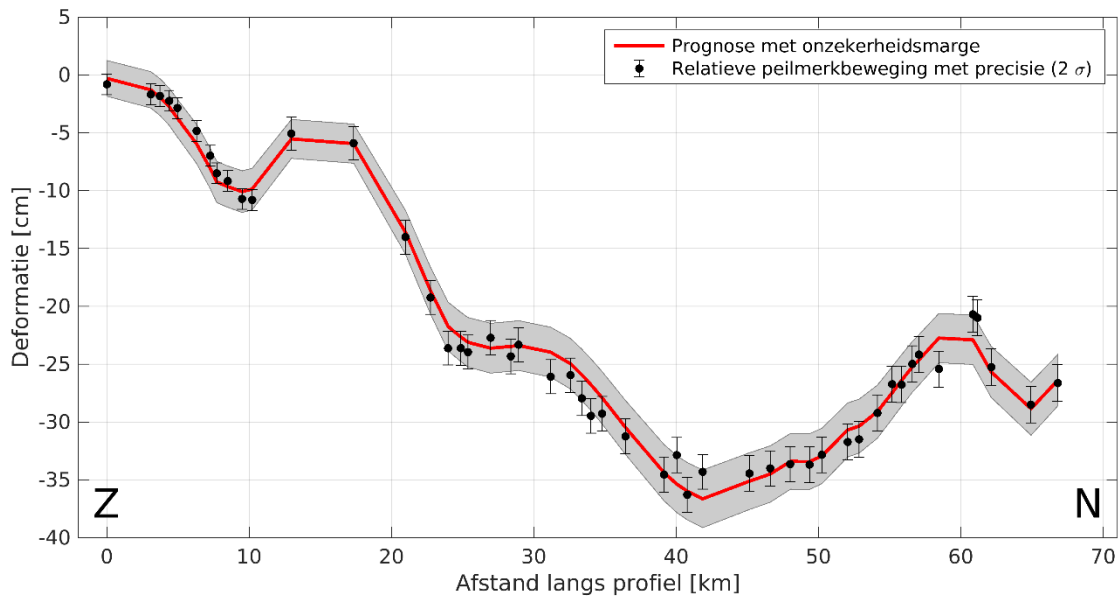
De uit bodemdalingsmetingen berekende relatieve peilmerkbewegingen worden gebruikt om het bodemdalingsmodel te kalibreren. Naast de contourkaarten worden profielen gebruikt om de passing van het model met de data te tonen. Evenals in het vorige Statusrapport van 2015 zijn er twee profielen gekozen door het centrum van Groningen gasveld langs stabiele peilmerken. Een kaart met een overzicht van de ligging van deze profielen is weergegeven in Figuur 24. De profielen (west-oost en zuid-noord) zijn weergegeven in Figuur 25 en Figuur 26.



Figuur 24; Overzicht ligging profielen (paarse trajecten) over stabiele peilmerken 1972-2018.



Figuur 25; West-oost profiel: relatieve peilmerkbewegingen (cm) stabiele peilmerken, 1972-2018.
Negatieve waarde geeft daling aan.



Figuur 26; Zuid-noord profiel: relatieve peilmerkbewegingen (cm) stabiele peilmerken, 1972 – 2018.
Negatieve waarde geeft daling aan.

Uit de profielen blijkt dat voor het merendeel van de peilmerken geldt dat de verschillen binnen de onzekerheidsmarge van de prognose en precisie van de relatieve peilmerkbewegingen vallen.

7 Prognose tot 2080

7.1 Contourkaarten

In Appendix I, Appendix II en Appendix III is de verwachte bodemdaling en de onzekerheid van deze bodemdaling weergegeven als contourkaarten voor respectievelijk de jaren 2030, 2050 en 2080. De productie uit het Groningen-gasveld wordt, naar verwachting, beëindigd in 2022. De contouren tonen dus de effecten van de doorgaande bodemdaling voor 8, 28 en 58 jaar na het stopzetten van de productie van Groningen. Naar verwachting zal de uiteindelijke bodemdaling in het diepste punt boven het Groningen-veld in 2080 circa 46 cm bedragen.

Aangenomen wordt dat de velden Norg en Gripskerk voor langere tijd als UGS-veld zullen worden gebruikt en dat pas na het jaar 2080 de druk zal worden verlaagd. Derhalve is voor de prognose voor het jaar 2080 de gemiddelde operationele druk aangenomen. De productieprofielen die gebruikt zijn voor de overige velden zijn zeer vergelijkbaar met de profielen die getoond worden in de desbetreffende winningsplannen.

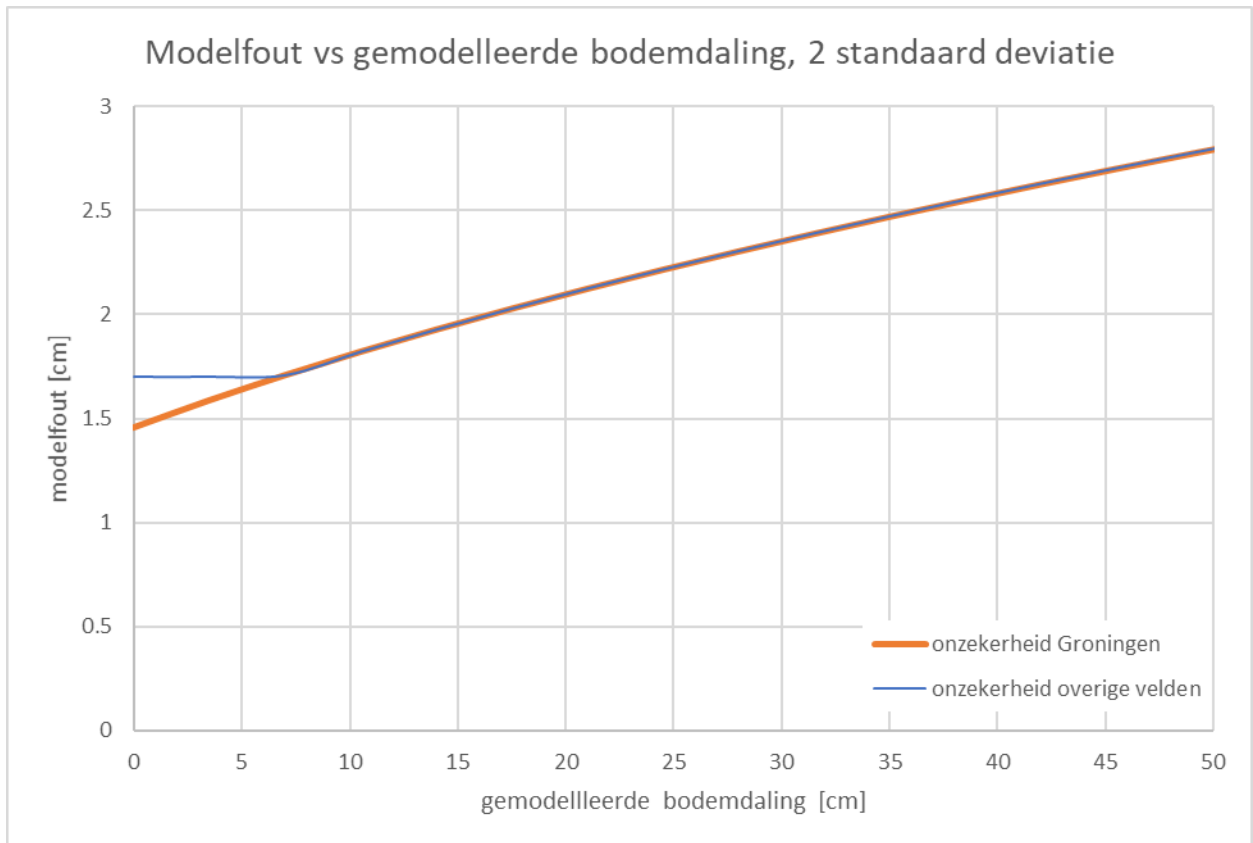
7.2 Onzekerheid

De onzekerheid in de uiteindelijk verwachte bodemdaling veroorzaakt door gaswinning is afhankelijk van de onzekerheden in de geodetische data en van de betrouwbaarheid van de modellen die de ondergrond beschrijven.

Onzekerheid van het model.

De berekening van de modelonzekerheid voor Groningen is beschreven in Referentie 3. In de statistische methode, die in deze referentie is beschreven, wordt de onzekerheid berekend op basis van de afwijking tussen model en metingen. Hieruit volgt een lineair model voor de modelvariantie als functie van de gemodelleerde bodemdaling. De wortel van de variantie geeft de waarde voor de standaardafwijking. Deze waarde is met 2 vermenigvuldigd om te komen tot de beschrijving van het 95% betrouwbaarheidsinterval. Figuur 27 toont de grafiek van deze waarde als functie van de gemodelleerde daling.

Voor de overige velden in Noord-Nederland is de onzekerheid in bodemdaling op een vergelijkbare wijze bepaald. Omdat de bodemdaling hier, in vergelijking tot Groningen, over het algemeen niet zo groot is, kon geen afhankelijkheid met de gemodelleerde bodemdaling gevonden worden. Daarom is gekozen voor een hogere constante waarde voor de onzekerheid op het moment dat de “Groningen onzekerheid” lager is dan de modelonzekerheid voor de kleine velden. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 27. Contourkaarten van deze onzekerheid voor de respectievelijk 2030, 2050 en 2080 zijn weergegeven in Appendix I, Appendix II en Appendix III.



Figuur 27; Onzekerheid in de bodemdaling als functie van de gemodelleerde bodemdaling voor Groningen en de overige velden.

Onzekerheid bodemdalingsmetingen

Niet alleen de berekende bodemdaling heeft een onzekerheidsmarge zoals hierboven beschreven, ook het afleiden van bodemdaling uit metingen (zoals waterpassingen) ter verificatie van de prognose heeft een beperkte precisie. Vooral kleine dalingen die over een lang tijdsinterval plaatsvinden kunnen moeilijk met grote nauwkeurigheid worden bepaald. Omdat een bodemdaling door gaswinning van minder dan 2 cm over een periode van enkele decennia in het algemeen niet precies te meten is, worden in de contourkaarten van de prognose geen contouren van minder dan 2 cm daling getoond.

In de kalibratie van de bodemdalingsmodellen aan de metingen voor het Groningen gebied zijn voor de precisiebeschrijving van de waterpasmetingen zowel de meetonzekerheid als de idealisatie precisie (peilmerk(in)stabiliteit) meegenomen, inclusief de samenhang (correlatie) tussen de metingen (Referentie 3). Zowel voor waterpasmetingen als GNSS-metingen zijn in de “Groningen Long Term subsidence” studie verbeteringen doorgevoerd in de precisiebeschrijving van de metingen (Referentie 4). In een aparte studie is hier eveneens vooruitgang geboekt voor InSAR (Referentie 23).

Voor het vaststellen van maatregelen om schade door bodemdaling te voorkomen, zal vooral in gebieden waar een bodemdaling door gaswinning van slechts enkele centimeters wordt verwacht van geval tot geval bekeken moeten worden of er aanleiding

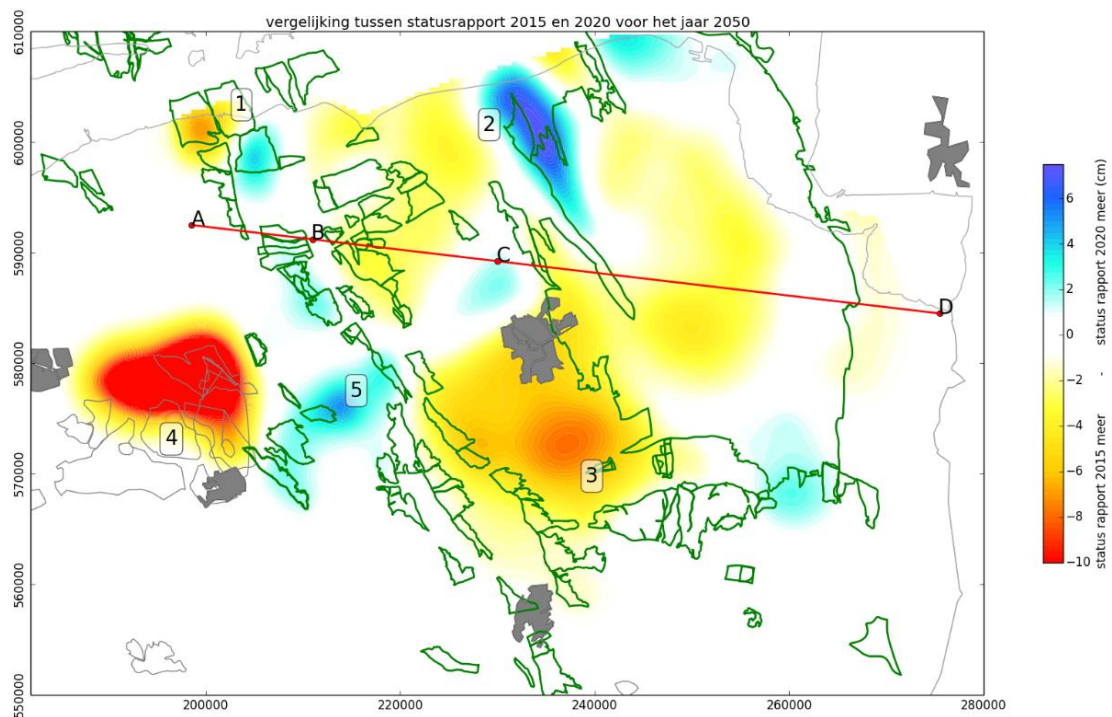
is om rekening te houden met de maximale modelonzekerheid of dat dit met grote waarschijnlijkheid een overschatting zou betekenen. De verbeteringen in de precisiebeschrijving van geodetische metingen van bovengenoemde studies kunnen hierbij helpen.

7.3 Verschillen met de prognose uit het status rapport 2015

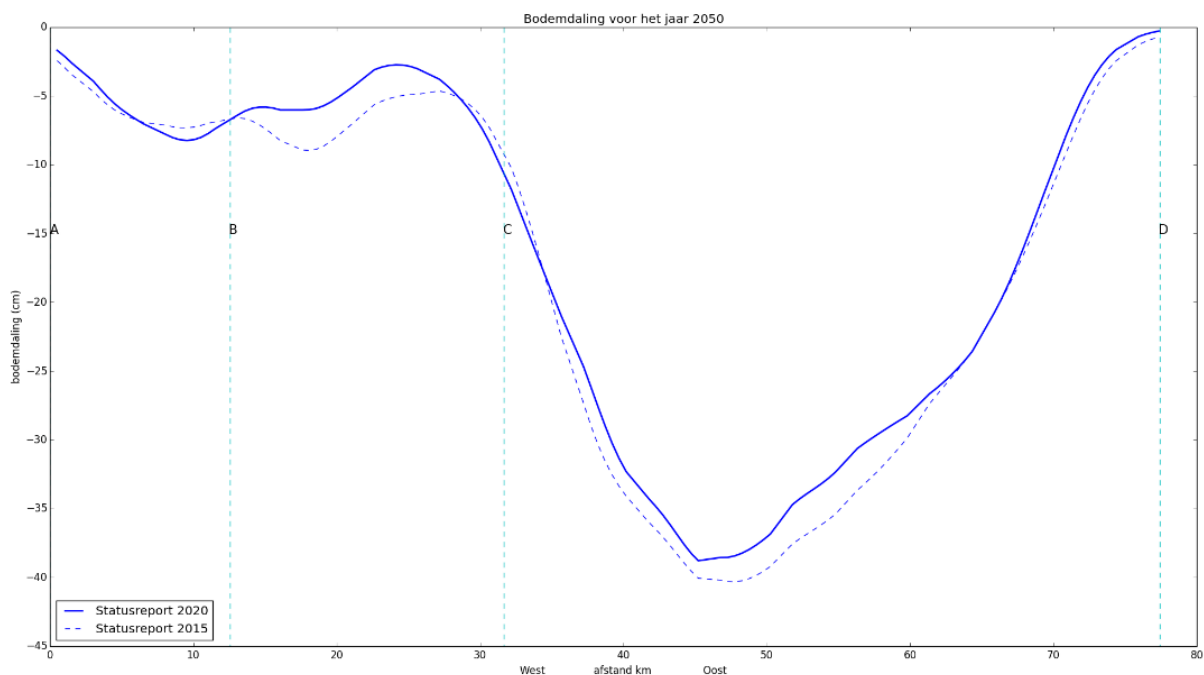
De doorgevoerde aanpassingen op grond van bovengenoemde observaties en nieuwe ontwikkelingen sinds 2015 komen tot uitdrukking in verschilkaart tussen de prognose voor het jaar 2050 van dit rapport en de prognose voor hetzelfde jaar gedaan in 2015. Deze verschilkaart is getoond in Figuur 28. Een doorsnede (A,B,C,D) van de bodemdalingsskom is weergegeven in Figuur 29. Over het algemeen is het beeld dat in 2020 minder bodemdaling wordt voorspeld voor 2050.

Figuur 2 toont een aantal gebieden (1 t/m 5) waar de verschillen tussen de prognoses oplopen tot maximaal 10 cm. Over het algemeen zijn de verschillen tussen de prognoses beperkt. De waarschijnlijke verklaring voor de mogelijke verschillen wordt hieronder verder toegelicht.

1. De bodemdaling boven de Waddenvelden Nes en Moddergat is iets minder dan in 2015 aangenomen. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door aanpassingen in het bodemdalingsmodel die volgen uit de LTS-II studie (Referentie 4). De bodemdalingssnelheid boven de Waddenzee velden wordt jaarlijks gerapporteerd en getoetst en laat in alle rapportages zien dat deze binnen de door de overheid gestelde norm blijft (Referentie 2).
2. De Groningen gaswinning wordt beëindigd in 2022. Over het algemeen zal daarom de prognose uit 2020 voor 2050 lager uitvallen. In de “Groningen Long Term subsidence” studie (Referentie 3) is de resulterende bodemdaling voor vele aquifer depletiescenario's doorgerekend en na vergelijking met de geodetische metingen het best passende scenario geselecteerd. De conclusie was dat de noordwestelijke aquifer waarschijnlijk meer in druk daalt en daarmee meer bodemdaling in 2050 veroorzaakt dan eerder aangenomen.
3. De aquifer tussen de velden Vries, Roden en Pasop en het Groningen veld (Zuidelijke Lauwerszee trog) daalt minder in druk dan eerder is aangenomen en veroorzaakt daarom minder bodemdaling. Dit volgt uit de recente bodemdalingsstudie voor Groningen (Referentie 3). Ook is waargenomen dat de druk in het Roden veld toeneemt. Deze verhoogde druk zorgt ervoor dat de bodemdaling uit het verleden weer gedeeltelijk ongedaan wordt gemaakt. De elastische component in het RTCiM bepaalt de mate van stijging en deze component is gekalibreerd voor de bodembeweging boven Norg op basis van de continue GNSS-meting.
4. Omdat NAM niet meer operator is van het Tietjerksteradeel veld, is de betreffende bodemdalingsprognose niet in dit statusrapport opgenomen.
5. In het gebied van Ureterp, Marum, Opende-Oost wordt niet alleen bodemdaling boven de velden gemeten, maar ook daarbuiten waar geen depletierende watervoerende lagen verwacht worden. Dit duidt erop dat een gedeelte van de bodemdaling een autonome component heeft. De prognose is hier enigszins aangepast, zodat de bodemdaling boven het veld beter wordt beschreven en toont het statusrapport 2020 model hier meer daling.



Figuur 28; Verschilkaart tussen de bodemdalingsprognose voor het jaar 2050 volgens het Statusrapport 2015 en 2020. De blauwe kleuren geven de gebieden aan waar het 2020 model meer bodemdaling voorspelt. De geel/rode kleuren geven de gebieden aan waar het 2020 model minder bodemdaling voorspelt. De doorsnede van de prognoses op de lijn A,B,C,D is weergegeven in Figuur 29. De velden met een grijze omtrek zijn de velden die niet door de NAM worden geopereerd.



Figuur 29; Doorsnede van de bodemdalingskom in Friesland en Groningen. Vergelijking van de gemodelleerde bodemdaling in 2050 volgens het Statusrapport 2015 en 2020.

8 Conclusies

- De prognose voor de bodemdaling zoals uitgevoerd in deze statusrapportage laat zien dat er in de toekomst in het algemeen iets minder bodemdaling wordt verwacht in vergelijking met de prognose uit 2015. Dit is grotendeels het gevolg van de voorgenomen beëindiging van de productie in het Groningen-gasveld in 2022 (voorheen 2080).
- Volgens de huidige inzichten zal de bodemdaling als gevolg van gasproductie boven het Groningen-gasveld omstreeks het jaar 2080 een waarde tussen de 43 en 49 centimeter op het diepste punt bereiken. Een waarde van 46 centimeter wordt het meest waarschijnlijk geacht.
- De belangrijkste verbeteringen met betrekking tot de kalibratie van de modellen aan de metingen zijn:
 - een betere beschrijving van de onzekerheidsstructuur voor de geodetische metingen,
 - een reductie van de onzekerheid over het drukverloop in de aquifers door gebruik te maken van de geodetische data boven de aquifers in een nieuwe statistische workflow,
 - een kwantificatie van de modelonzekerheid als functie van de gemodelleerde bodemdaling,
 - het gebruik van het RTCiM voor alle velden, waarmee een betere temporele passing aan de data wordt verkregen.
- De InSAR metingen voor het monitoren van bodembeweging door gaswinning komen binnen de nauwkeurigheidsmarges goed overeen met waterpas- en GNSS-metingen. In de toekomst beoogt de NAM InSAR te gebruiken als primaire monitoringstechniek, aangevuld met GNSS-metingen. Het monitoringsnetwerk in Groningen is in de afgelopen jaren versterkt met 29 Integrated Geodetic Reference stations (IGRS).

9 Referenties

- Referentie 1 Bodemdaling door Aardgaswinning. NAM-velden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe. Statusrapport 2015 en Prognose tot het jaar 2080. December 2015. NAM-rapportnummer EP201511213444. <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/bodemdaling/nl/03ff38de-1870-4d6a-988b-e6bcc595f6ef>
- Referentie 2 Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen: Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2019. NAM-rapportnummer EP202002200220.
- 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 2018 – Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Noord-Nederland 2018. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 28 februari 2019, EP201901203987.
- Referentie 6 Meetregister bij het meetplan Noord-Nederland, Groningen en Waddenzee 2018 – Addendum InSAR. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 19 juli 2019, EP201907205139.
- Referentie 7 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 8 NAM (2020) Analysis of and learnings from the first four years of in-situ strain data in Zeerijp-3A <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/7326b8c7-07ea-4e19-a6dd-e83a7cbd70b3>
- Referentie 9 Shell (2015) Mechanical characterization of Permian reservoir sandstone from the Moddergat-3 well in the Dutch Wadden Area. SR.15.11614
- Referentie 10 Shell and NAM (2018) The First Year of Distributed Strain Sensing (DSS) Monitoring in the Groningen Gas Field. SR.17.00934
- Referentie 11 NAM (2018) Groningen Dynamic Model Update 2018 – V6, EP201809202872.
- Referentie 12 NAM (2013) Technical Addendum to the Winningsplan Groningen 2013 Subsidence, Induced Earthquakes and Seismic Hazard Analysis in the Groningen Field. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2015/06/25/technical-addendum-to-the-winningsplan-groningen-2013-subsidence-induced-earthquakes-and-seismic-hazard-analysis-in-the-groning>
- Referentie 13 TNO (2013) A general framework for rate dependent compaction models for reservoir rock, 2013, Report TNO 2013 R11405
- Referentie 14 NAM (2015) Continue GPS hoogtemetingen NAM Groningen, Rapportage oktober 2020 (EP202011202837)
- Referentie 15 NAM (2020) Continue GPS hoogtemetingen NAM Groningen Integrated Geodetic Reference Stations, Rapportage oktober 2020 (EP202011202836)
- Referentie 16 NAM (2020) Continue GPS hoogtemetingen NAM Grijpskerk, Rapportage oktober 2020 (EP202011202841)
- Referentie 17 NAM (2020) Continue GPS hoogtemetingen NAM Norg, Rapportage oktober 2020 (EP202011202839)

Referentie 18 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 19 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

Referentie 20 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 21 NAM (2020) Gebruik van InSAR in de meetregisters Noord-Nederland en Groningen; Analyse beschikbaarheid en betrouwbaarheid. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 29 mei 2020, EP202005202312.

Referentie 22 Van der Marel, H (2020) Comparison of GNSS Processing Methodologies for Subsidence Monitoring, project report for NAM, Delft University of Technology, 2020. Author:.

Referentie 23 Van Leijen, F. J., Samiei-Esfahany, S., Van der Marel, H., and Hanssen, R. F. Improving the Functional and Stochastic Model of InSAR, project report for NAM, Delft University of Technology, 2020.

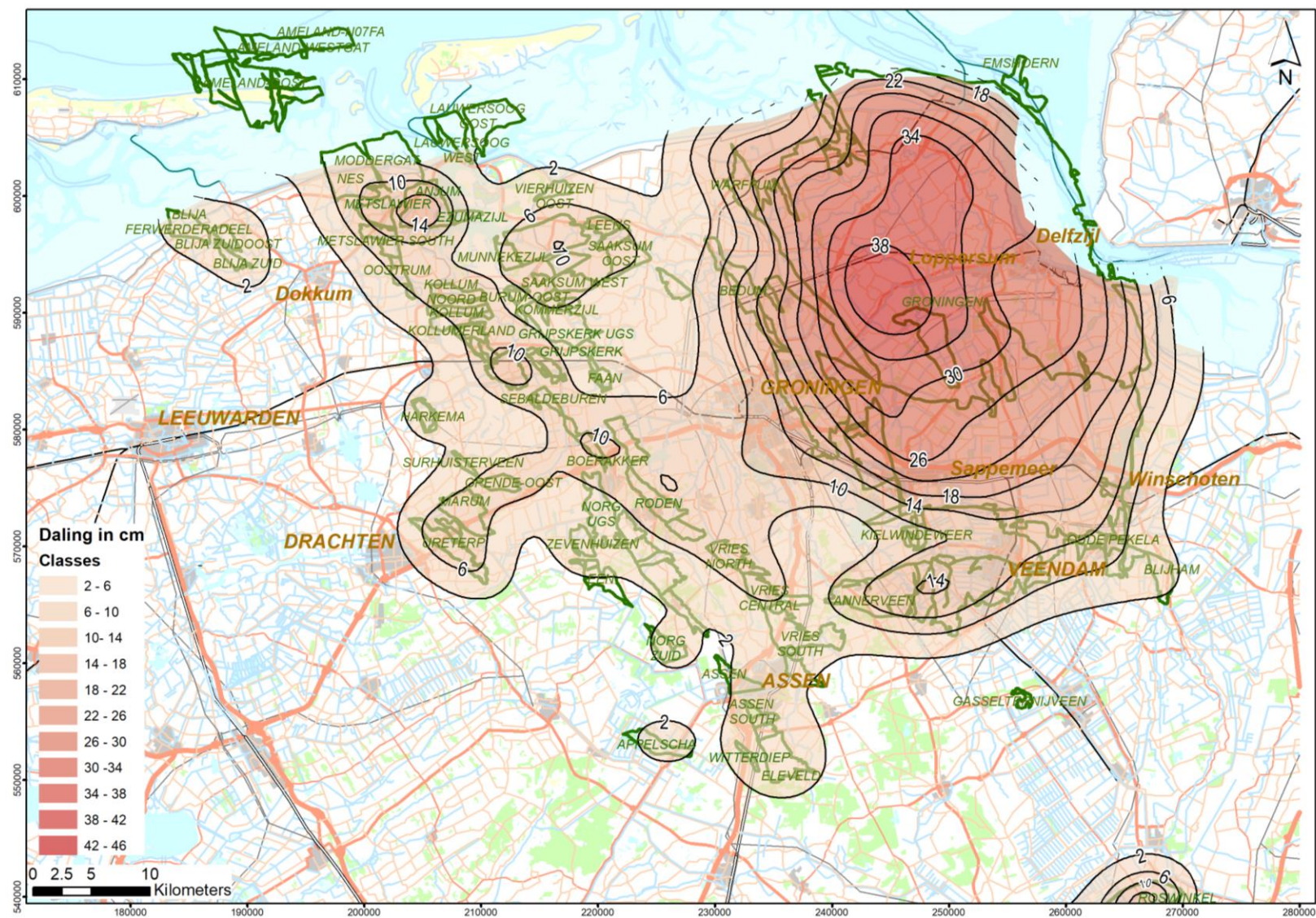
Referentie 24 RWS (2019) Productspecificaties Beheer NAP 2019. Secundaire waterpassing t.b.v. de bijhouding van het NAP. Rijkswaterstaat, 15 januari 2019.

Referentie 25 Meetregister bij het meetplan Waddenzee 2015 – Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Lauwersmeer 2015. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 23 december 2015, EP201509205046.

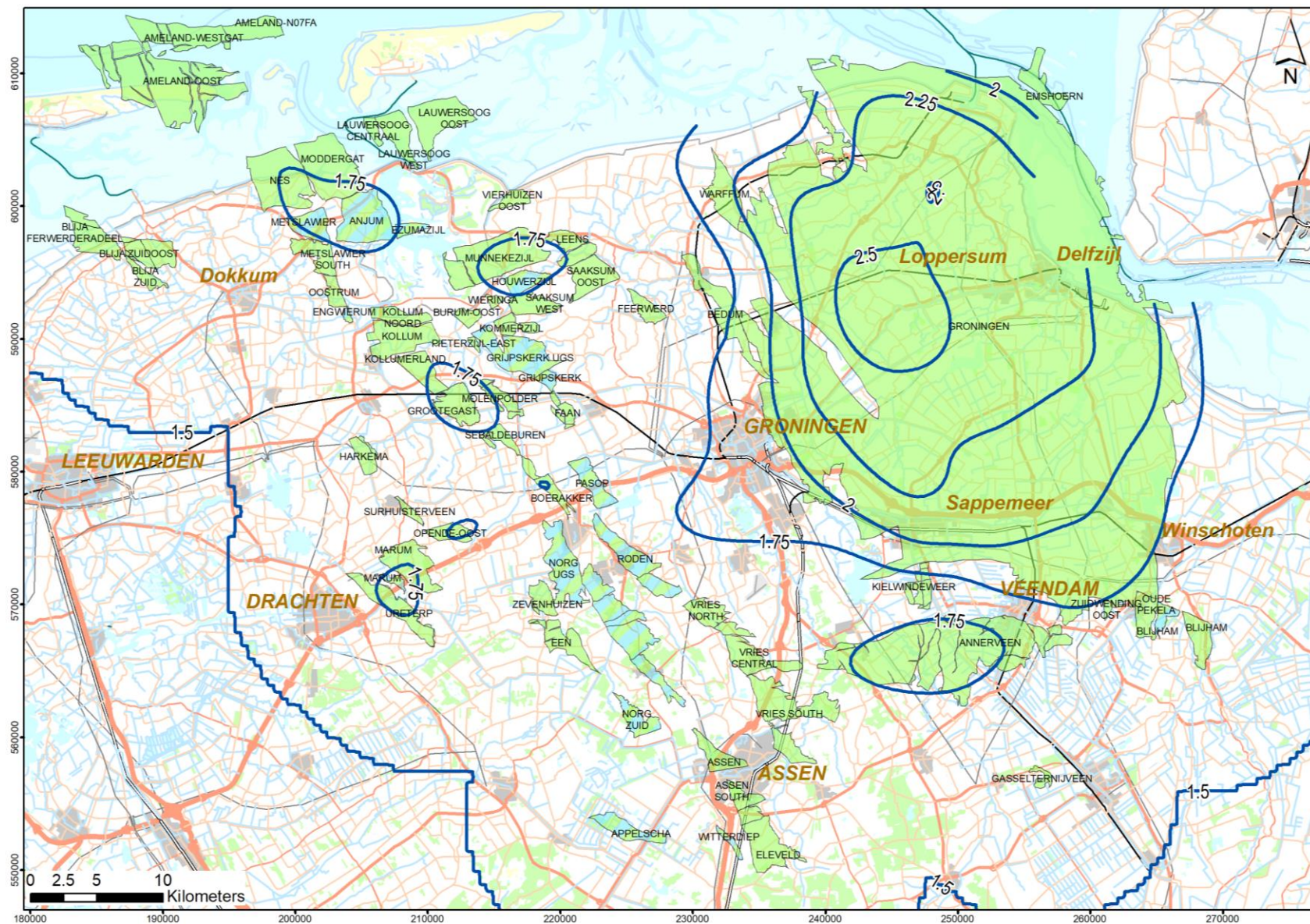
Referentie 26 NAM (2003) Analyse van de ondiepe compactie metingen in Groningen. NAM200301100141

Appendix I Prognose en onzekerheid voor 2030

Prognose voor 2030

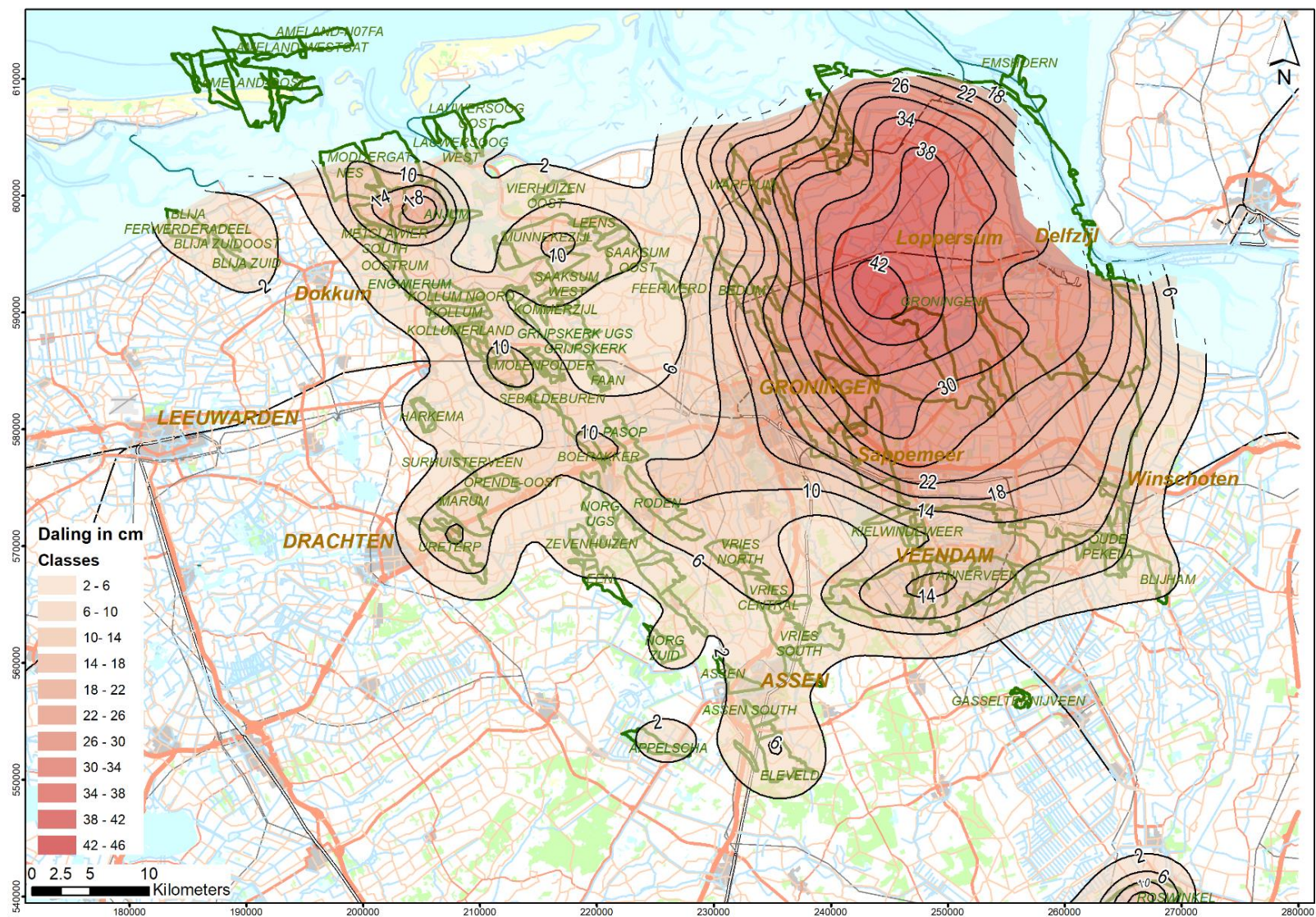


Onzekerheid in cm van de prognose in 2030 (2 maal de standaarddeviatie)

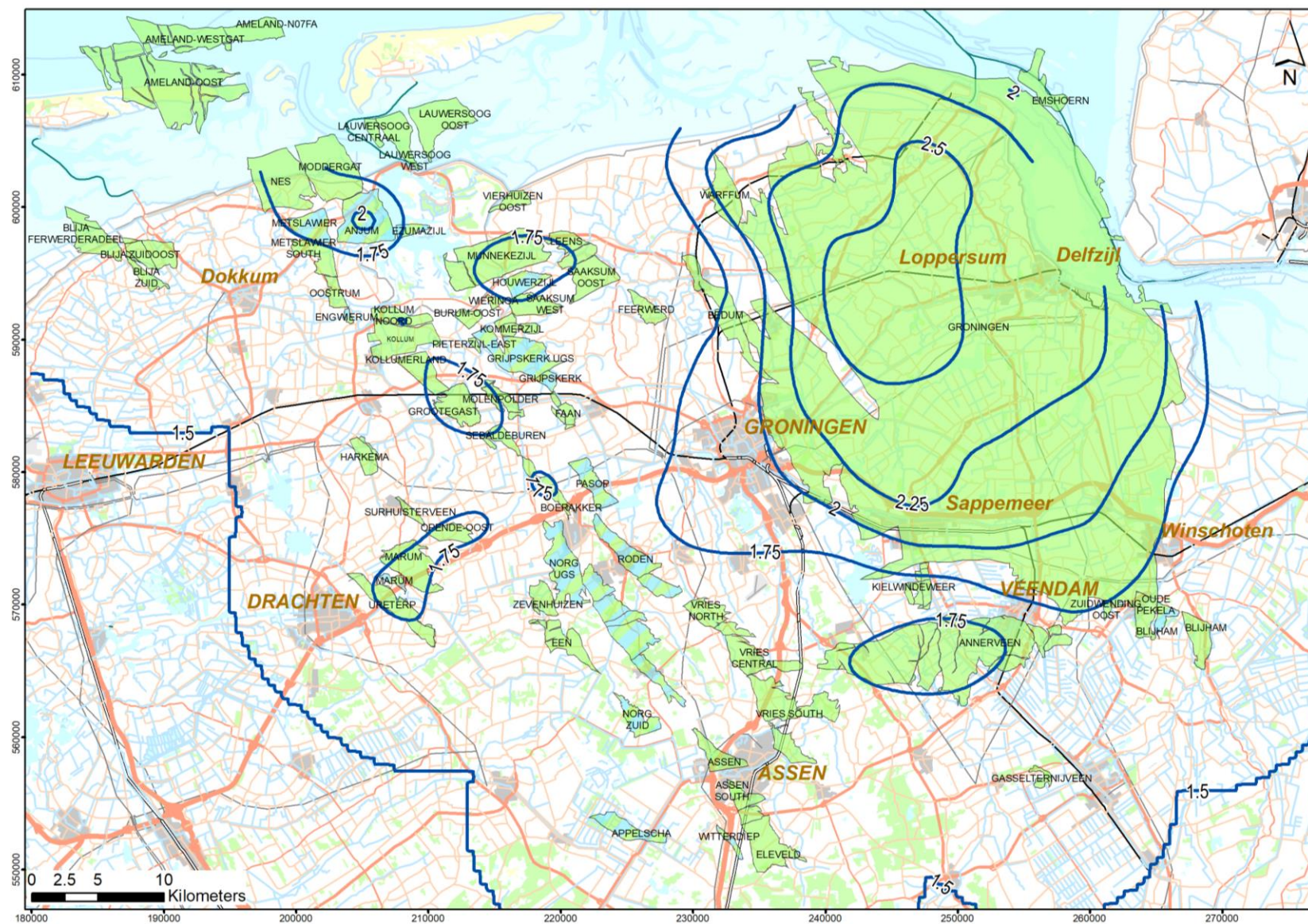


Appendix II Prognose en onzekerheid voor 2050

Prognose voor 2050

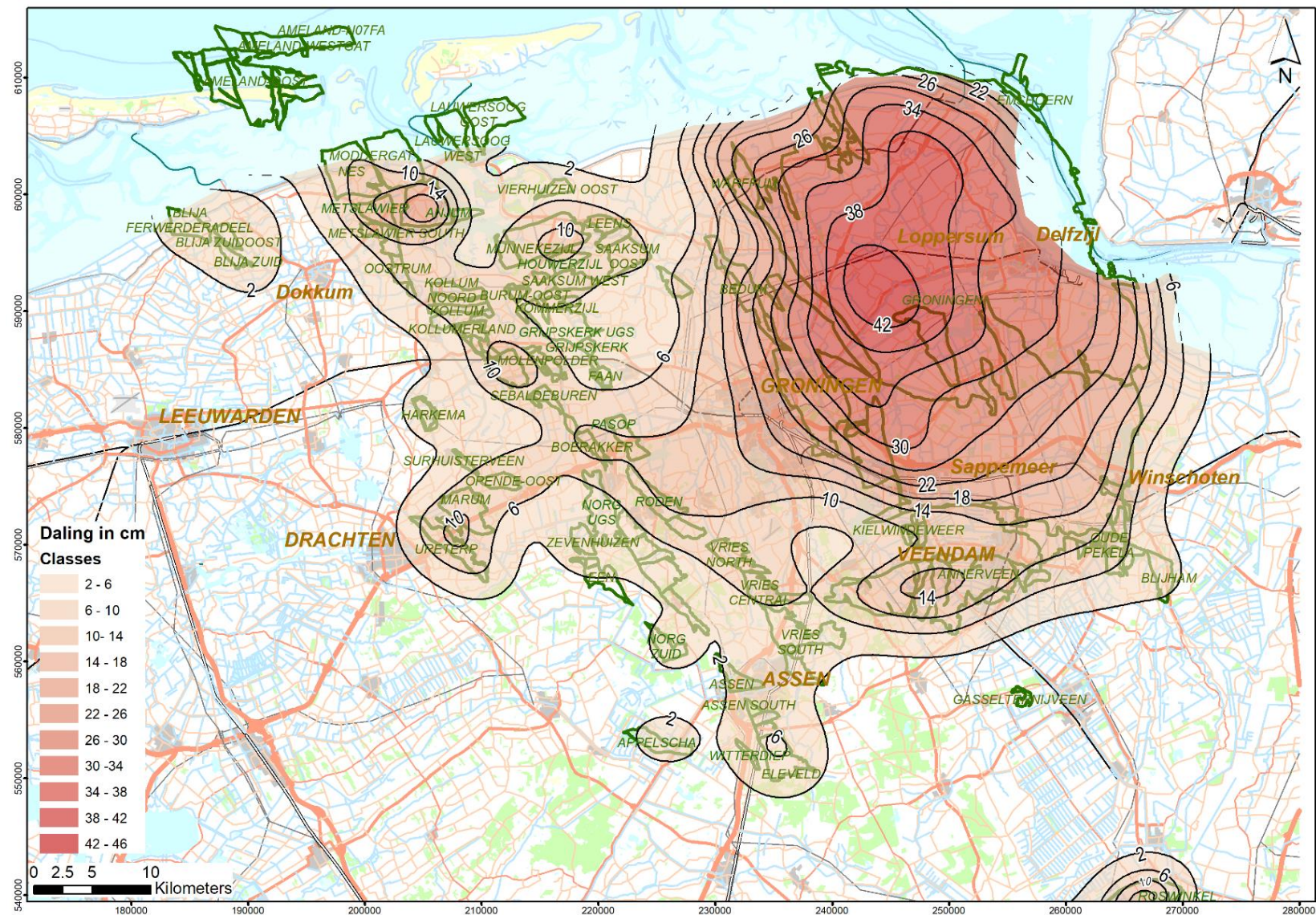


Onzekerheid in cm van de prognose in 2050 (2 maal de standaarddeviatie)

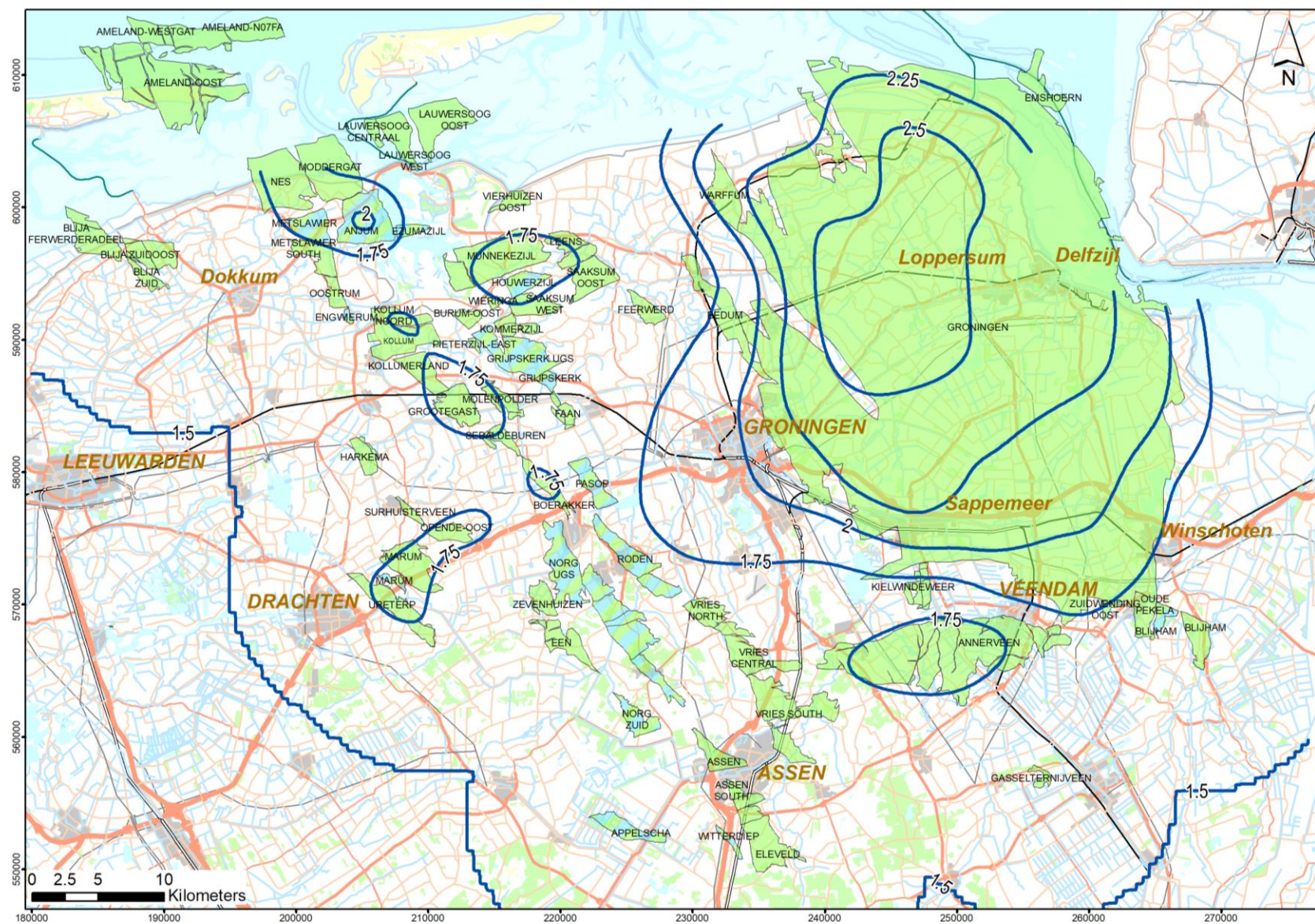


Appendix III Prognose en onzekerheid voor 2080

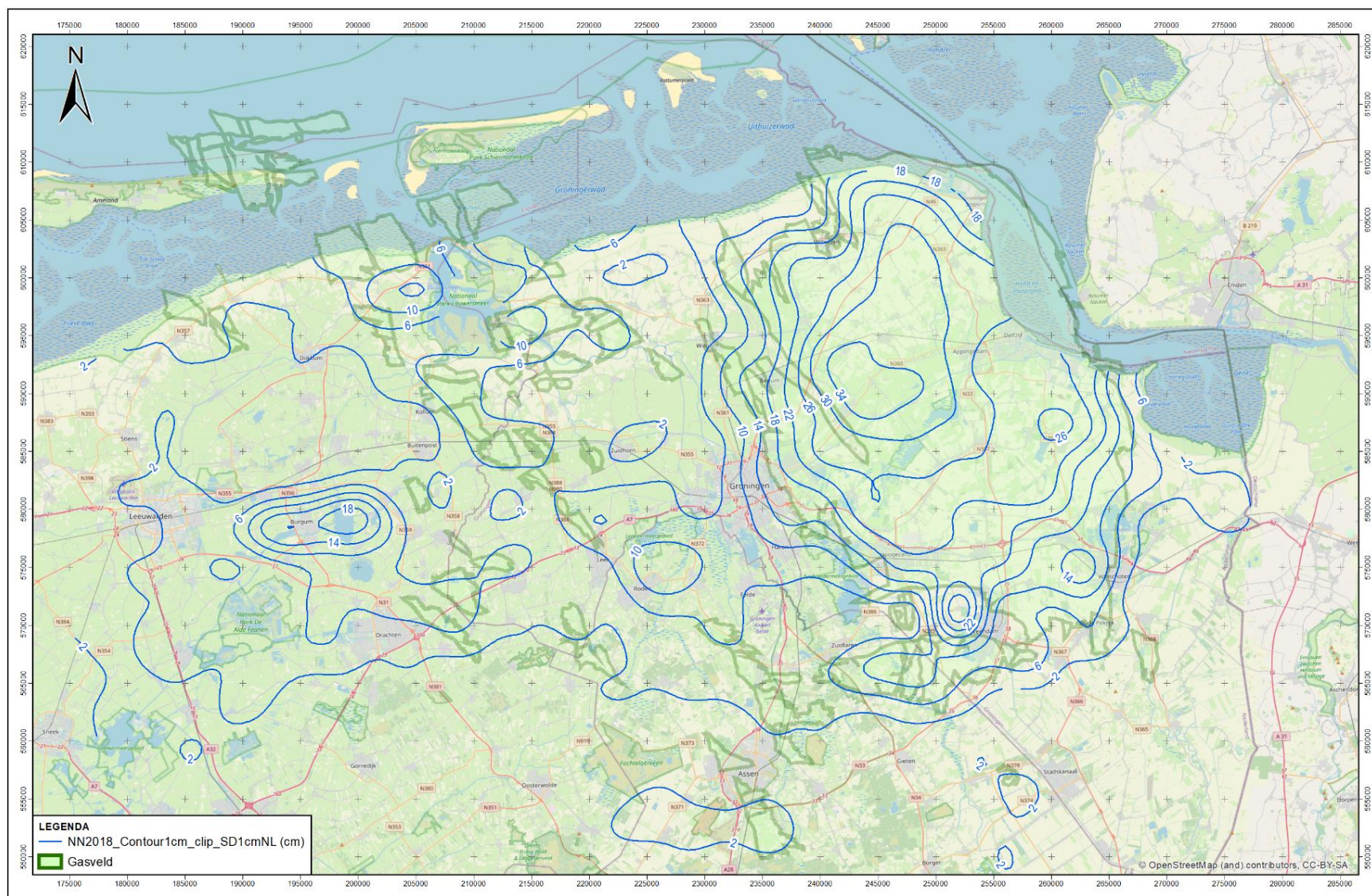
Prognose voor 2080



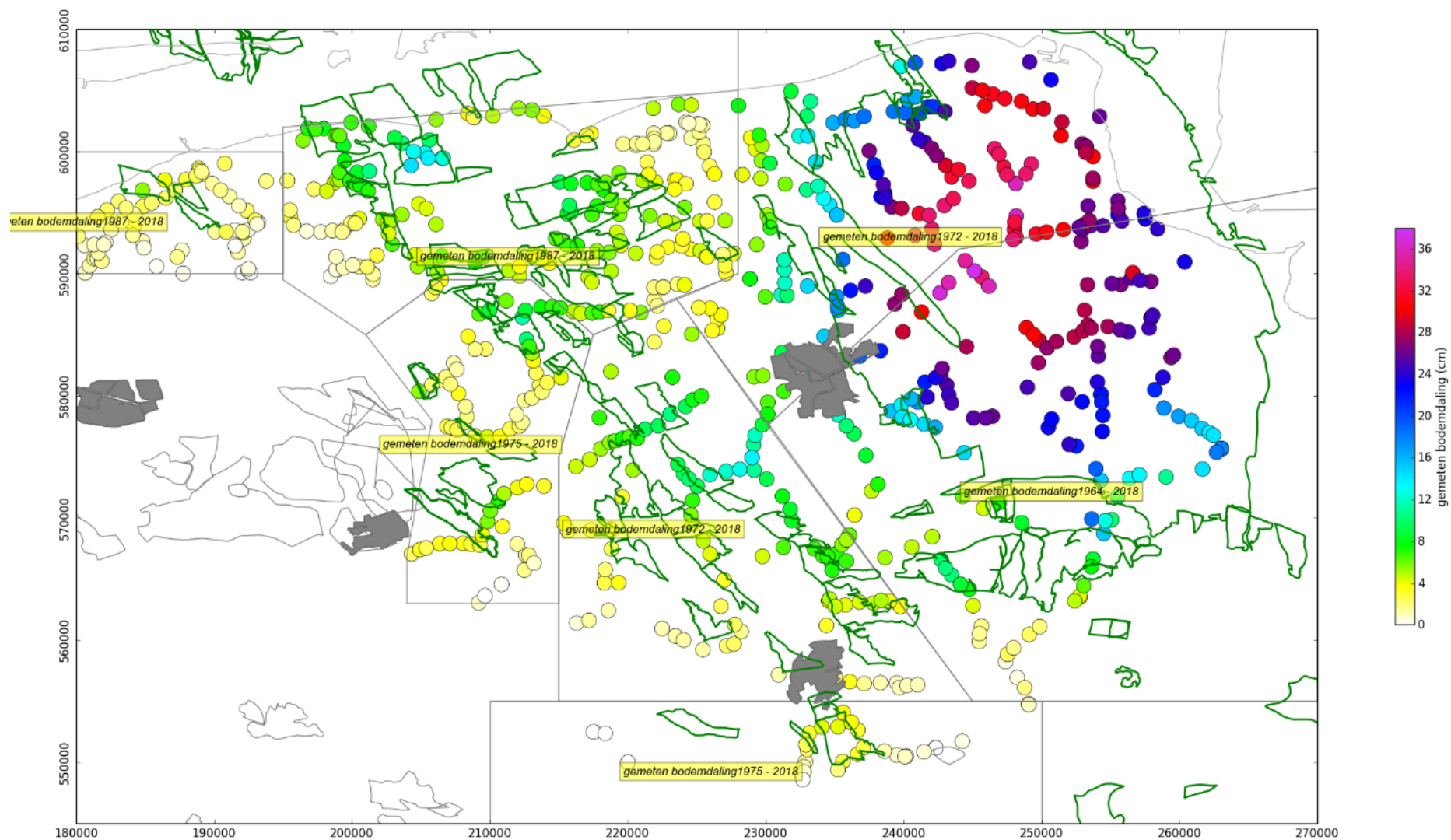
Onzekerheid in cm van de prognose in 2080 (2 maal de standaarddeviatie)



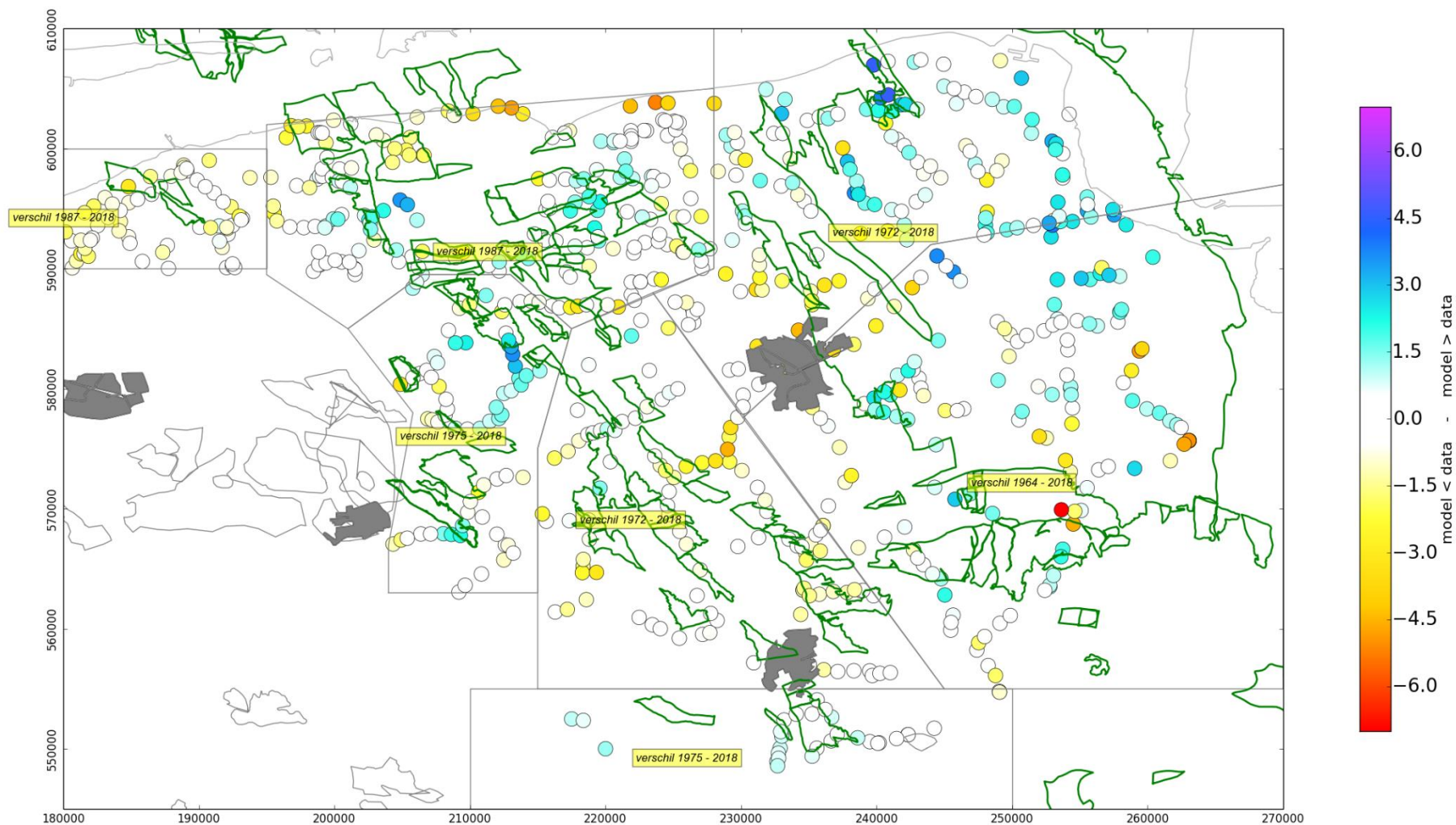
Appendix IV Bodemdaling in 2018 op basis van ruimte-tijd analyse van waterpasdata



Appendix V Gemeten bodemdaling in 2018 op stabiele peilmerken sinds de start winning

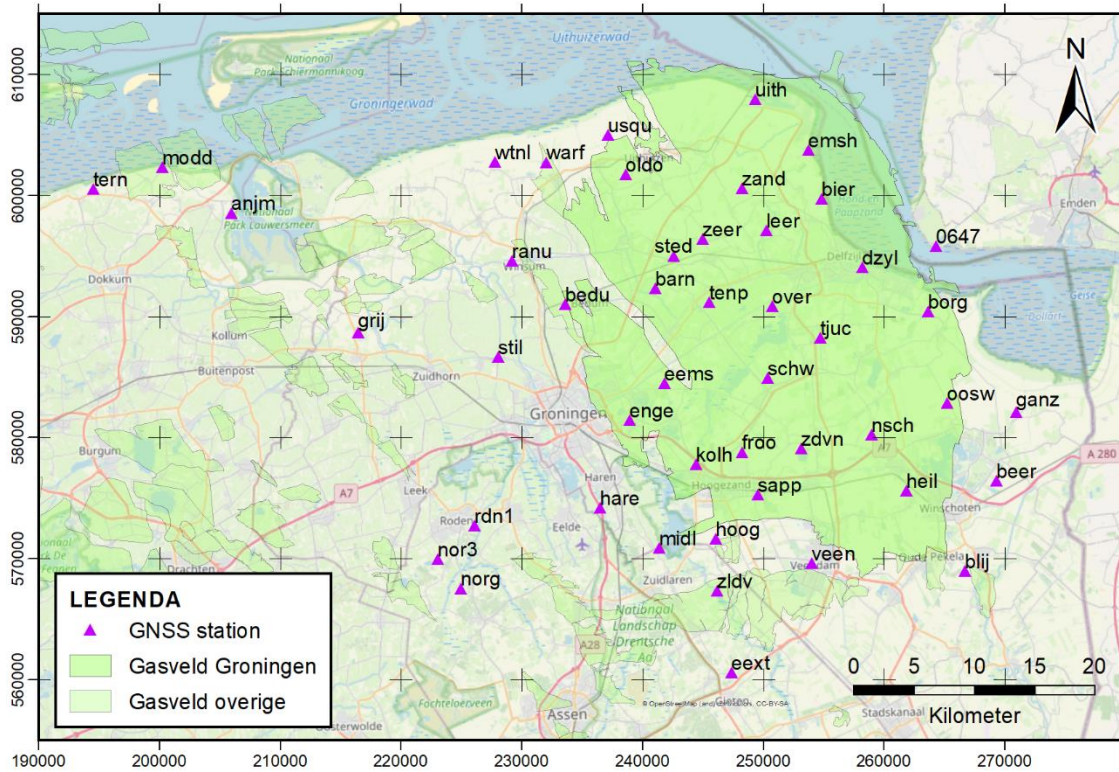


Appendix VI Verschilkaart (cm) van gemodelleerde en gemeten bodemdaling voor het jaar 2018 op stabiele peilmerken sinds de start van de winning



Appendix VII Bodembeweging op de GNSS stations

In de tijdseries wordt de GNSS-meting (paars) met de gemodelleerde bodemdaling (rode lijn) plus onzekerheidsmarge (grijs, 2σ), PS-InSAR deformatiemetingen (blauw) en beweging van nabije peilmerken (zwart; indien aanwezig) met onzekerheidsmarge (2σ) weergegeven. Figuur 30 toont een overzicht van de GNSS locaties.

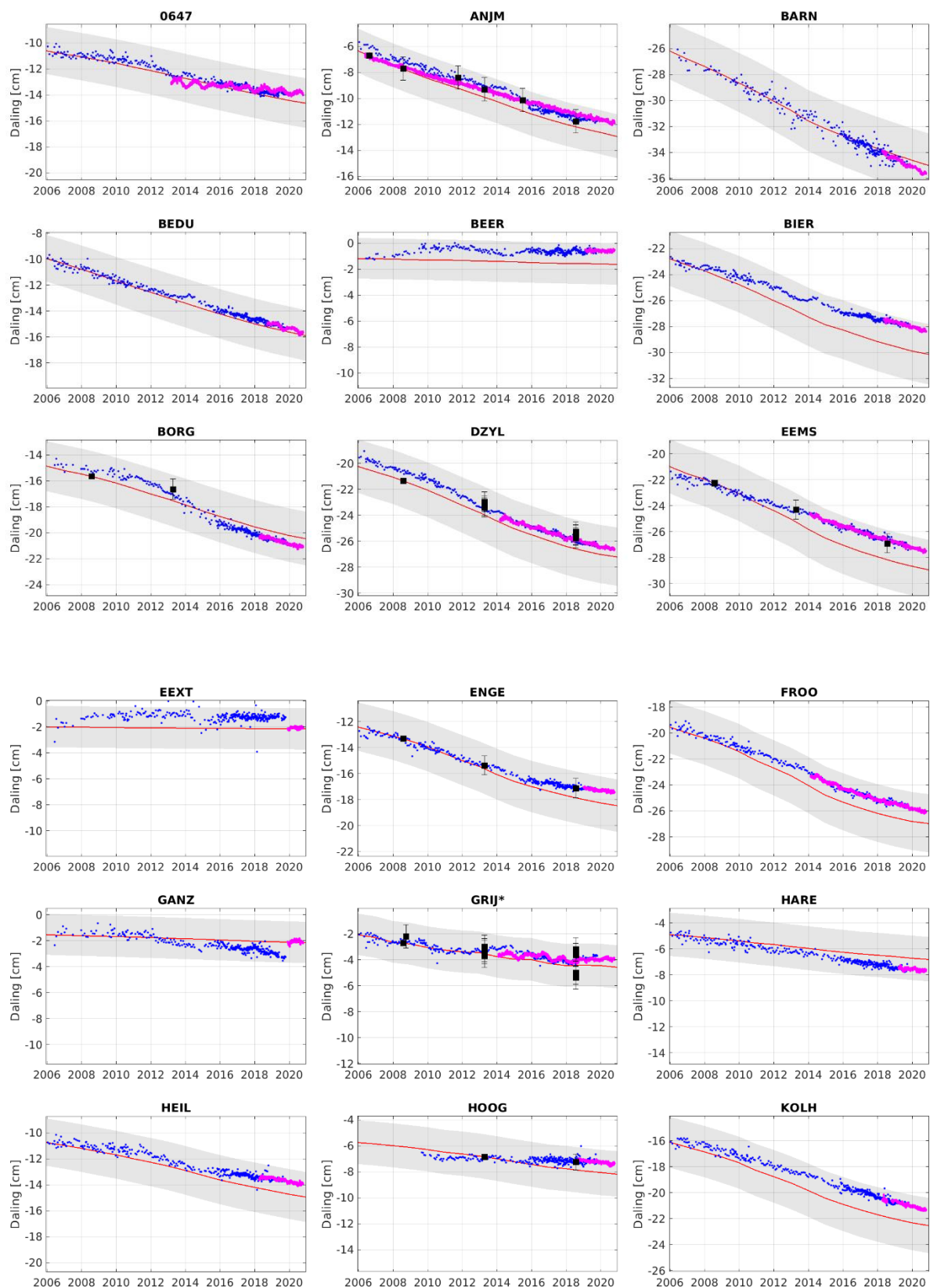


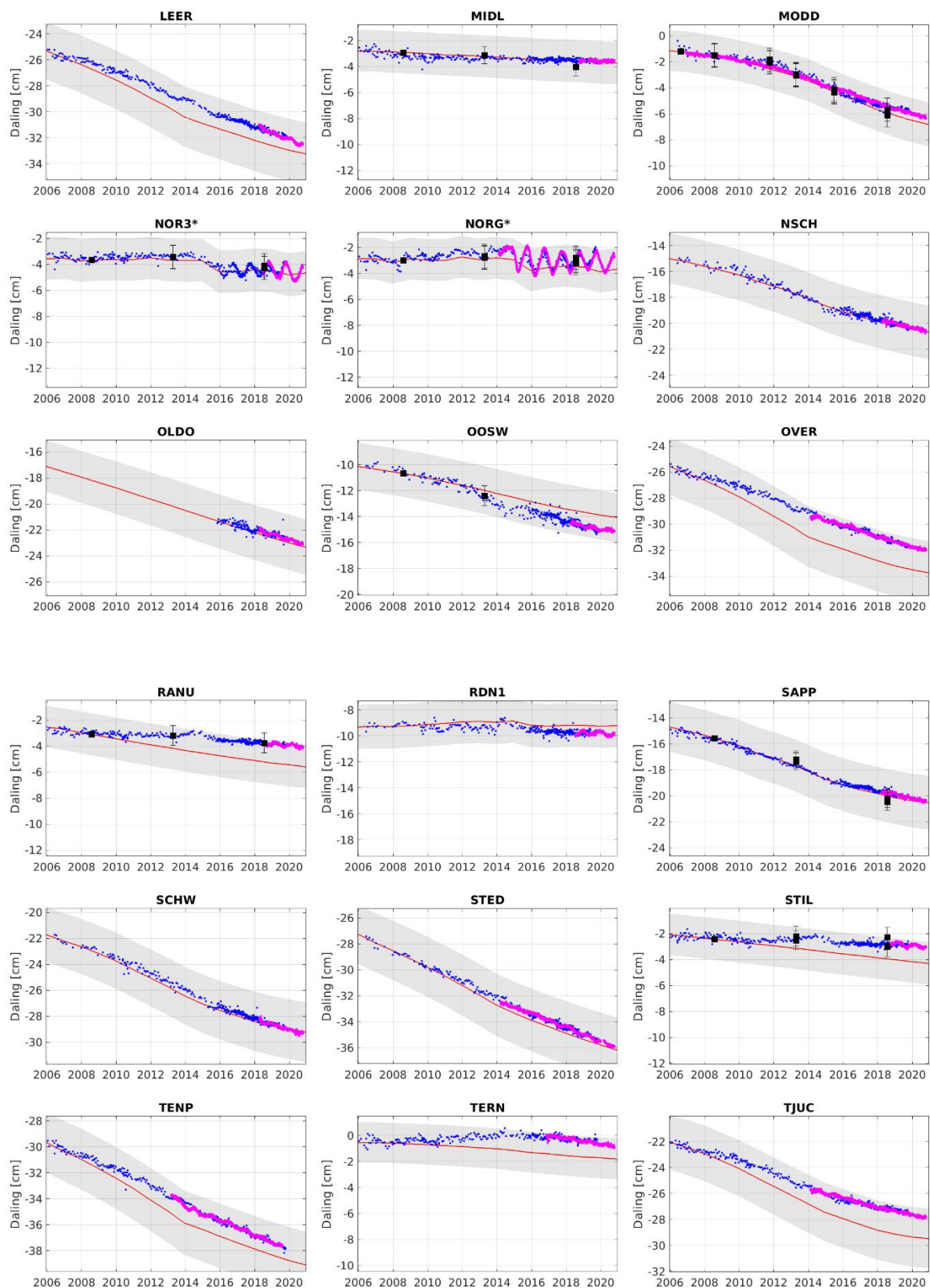
Figuur 30: Overzicht GNSS locaties.

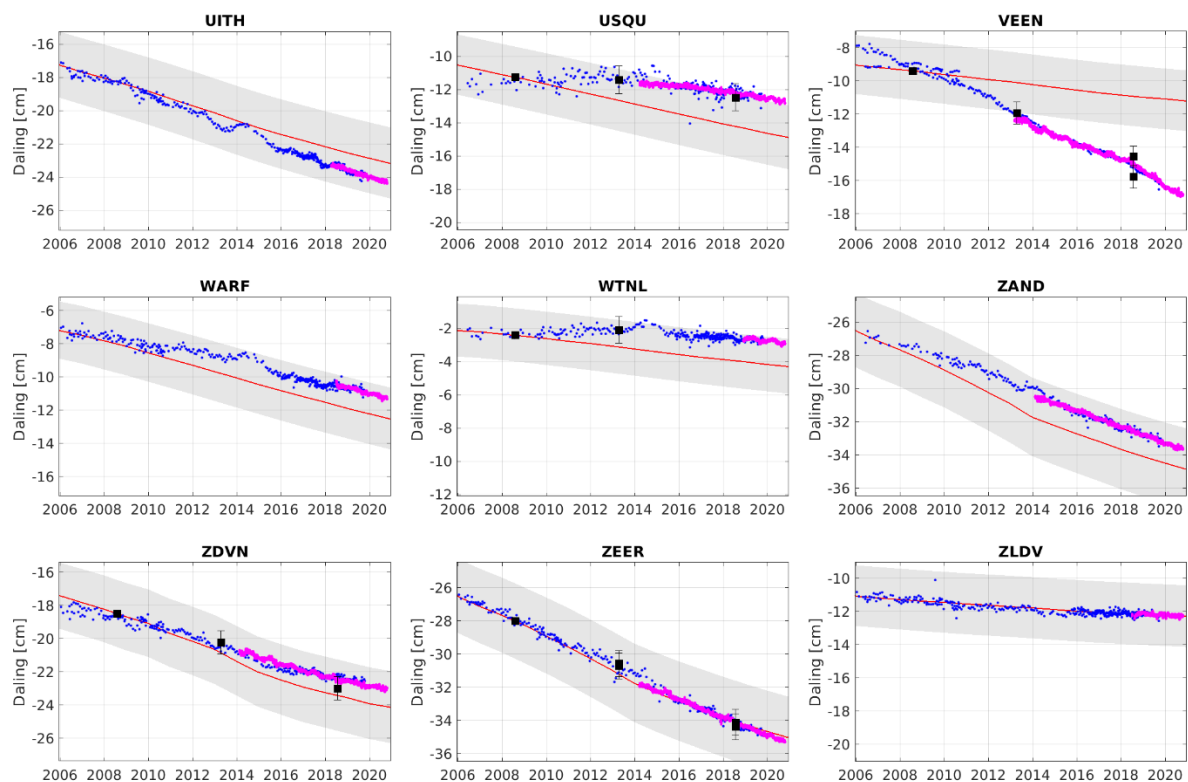
Het station “tenp” is in 2019 afgebouwd en dus niet meer operationeel.

De stations “blij” en “emsh” zijn pas in 2020 geplaatst. Daarom worden hieronder geen tijdseries van deze stations getoond.

De tijdserie van het station “veen” bevat ook bodemdaling door andere oorzaken (zoutwinning), en wijkt daardoor af van de gemodelleerde bodemdaling als gevolg van gaswinning.







* In de GPS-tijdseries van de stations GRIJ, NOR3 en NOR3 zijn de jaarlijkse cycli van ondergrondse gasopslag te zien. Deze worden door de rode lijn niet goed weergegeven, omdat voor de visualisatie jaarlijks gesamplede modeldata gebruikt is.