

Statusrapport  
2015 en  
Prognose tot  
het jaar 2080

December 2015



# Bodemdaling door Aardgaswinning

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



Status rapport 2015 en  
Prognose tot het jaar 2080

## Bodemdaling door aardgaswinning

### NAM-velden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe

NAM B.V.

<i>EP Document Nummer.:</i>	EP201511213444	<i>Owner:</i>	NAM
<i>Revision No.:</i>	0		
<i>Document Date:</i>	december 2015	<i>Security:</i>	

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.

1	Samenvatting .....	5
	1.1 Verklarende woordenlijst .....	6
2	Inleiding .....	7
	2.1 Bodemdaling; oorzaak .....	7
3	Observaties & nieuwe ontwikkelingen sinds 2010 .....	9
4	Metingen en analyse .....	12
	4.1 Waterpassing .....	12
	4.2 InSAR .....	13
	4.3 GPS .....	13
	4.4 Differenties .....	15
	4.5 Stabiliteit .....	16
	4.6 Bodemdaling door gaswinning .....	17
	4.7 Contourkaart waterpasmetingen .....	19
	4.8 Profielen .....	20
5	Modellering van compactie .....	25
	5.1 Laboratoriumexperimenten .....	26
	5.2 Compactiemetingen in diepe observatieputten .....	27
	5.3 Compactie-modelparameters bepalen met behulp van inversie .....	31
	5.4 Compactiemodel .....	31
	5.4.1 Diffusie mechanisme in het reservoir .....	32
	5.5 Compactiemetingen van de ondiepe ondergrond .....	33
6	Modellering en prognose van de bodemdaling .....	34
	6.1 Bodemdalingsmodel .....	34
	6.2 Invoergegevens van de velden .....	34
	6.2.1 Groningen .....	36
	6.3 Aquifers .....	39
7	Prognose tot 2080 .....	42
	7.1 Onzekerheid .....	42
8	Conclusies .....	45
9	Referenties .....	46

# 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 vorige prognose dateert uit het jaar 2010 (Referentie 1). De toen gedane voorspelling over bodemdaling door gaswinning is in grote lijnen correct gebleken. Boven het Groningen-gasveld zijn de verschillen tussen de voorspelde en in 2013 gemeten bodemdaling gemiddeld kleiner dan 10%.

De prognoses in het huidige rapport zijn vergelijkbaar met de prognoses gedaan in 2010 op een paar gebieden na. Het noordwestelijk gedeelte van het Groningen veld laat voor 2050 minder bodemdaling zien vanwege een aanpassing in het verwachte productieprofiel. Bodemdalingsmetingen tonen aan dat de drukvariatie in de westelijke en noordwestelijke aquifers waarschijnlijk groter is dan eerder aangenomen. Deze variatie resulteert ook voor de toekomst in meer spatiële verschillen in de gemiddelde bodemdaling. Sinds 2010 zijn er een beperkt aantal nieuwe gasvelden in de winningsvergunningen Groningen, Noord-Friesland en Drenthe aangetoond of in ontwikkeling gebracht. De bodemdaling ten gevolge van de (voorgenomen) productie van deze velden is in de modellering meegenomen.

De in 2013 ingediende Groningen winningsplan geeft aan dat de productie uit het Groningen-gasveld zal worden voortgezet tot 2080. Volgens verwachting zal de bodemdaling in het centrum van de schotel in het jaar 2080 ongeveer 47 cm bedragen. Voor 2050 wordt een maximale bodemdaling van 45 cm verwacht, vergelijkbaar met de voorspelling voor het jaar 2050 gedaan in 2010.

In 2013 is in Noord-Nederland opnieuw een grote waterpassing in combinatie met "Interferometric Synthetic Aperture Radar" (InSAR) metingen uitgevoerd waarmee de opgetreden bodemdaling door gaswinning is bepaald. Hieruit is gebleken dat de bodemdaling die tot 2013 in het centrum van de schotel boven het gasveld Groningen is opgetreden circa 33 cm bedraagt.

De bodemdaling is berekend voor de jaren 2025, 2050 en 2080, de eindfase van het Groningen-gasveld. 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 (compactiecoëfficiënt).

Dit rapport is primair bedoeld voor de besluitvorming over te nemen maatregelen in verband met bodemdaling door gaswinning op land. In statusrapport 2010 is de constatering beschreven dat InSAR resultaten een goede overeenkomst laat met waterpassingsmetingen en dat InSAR daarom beschouwd kan worden als alternatieve techniek voor het monitoren van bodemdaling. Ter opvolging van het fundamenteel onderzoek aan de Technische Universiteit Delft wordt nu InSAR data van de Radarsat-2 satelliet verwerkt door een extern bedrijf. Gedetailleerde uitleg over dataverwerking wordt gegeven in het meetregister Noord-Nederland 2014 (Referentie 4). Resultaten van de verwerkte data worden in dit rapport getoond.

De metingen die de afgelopen vijf jaar zijn uitgevoerd in de diepe compactie-observatieputten geven de indicatie dat de compactie in het reservoir momenteel lineair verloopt met de reservoirdruk daling.

### 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
Depletie	Ontstane drukdaling door het onttrekken van koolwaterstoffen (gas/olie) of water uit reservoirgesteente
Eindige-elementen-modellering	rekenmethode waarmee spanningen en vervormingen in de ondergrond ten gevolge van drukveranderingen in het reservoir berekend kunnen worden
GPS	Global Positioning System: systeem voor plaats- en hoogtebepaling met behulp van satellieten
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar. Toepassing van radar interferometrie (satelliet beelden) 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 en het totale volume van het gesteente.
Probabilistische berekening	rekenmethode waarbij expliciet rekening gehouden wordt met onzekerheden.
RD coördinaat	Rijksdriehoeksmeting coördinaat. Coördinaten in het topografische kaartmateriaal zijn vermeld in het stelsel van de Rijksdriehoeksmeting (RD). De auteursrechten en databankrechten zijn voorbehouden aan de Topografische Dienst Kadaster, Emmen, 2006
Sintef	Noors instituut voor wetenschappelijk en industrieel onderzoek
TNO	Nederlandse organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek

## 2 Inleiding

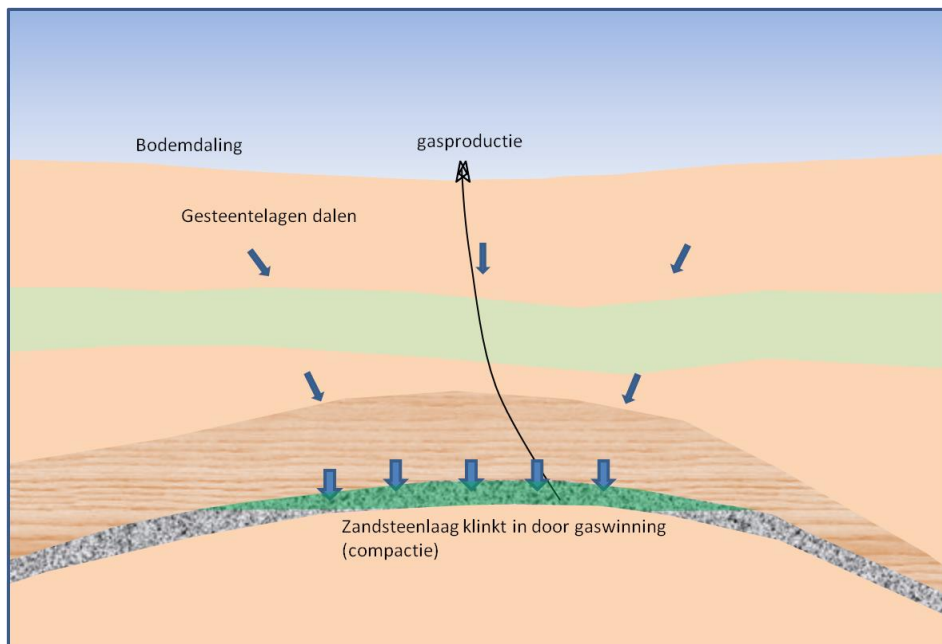
Eén van de verantwoordelijkheden van de Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. (NAM) is na te gaan in hoeverre de productieactiviteiten aanleiding kunnen geven tot bodemdaling als gevolg van compactie van de poreuze gesteentelagen waaruit aardgas wordt gewonnen. Met de resultaten van dergelijke studies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

### 2.1 Bodemdaling; oorzaak

In een gasveld veroorzaakt de winning van aardgas een vermindering van de poriëndruk in de gasvoerende gesteentelaag. Daarbij wordt het gesteente langzaam iets 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 depletende 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 depletende 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** Druk­daling in het reservoir resulteert in bodemdaling. Factoren van invloed.

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 (Referentie 2). Hierover wordt jaarlijks gerapporteerd aan de minister van Economische Zaken.

Dit vijfjaarlijkse rapport beperkt zich tot de bodemdaling ten gevolge van de gaswinning door de NAM in Groningen, Friesland en Noord-Drenthe voor zover die 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 & nieuwe ontwikkelingen sinds 2010

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 tussen 2008 en 2013 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 (opname interval is 35 c.q. 24 dagen) kan uit InSAR extra informatie omtrent bodemdalingsgedrag worden gehaald. Boven het Groningerveld zijn in 2013 en 2014 11 permanente GPS stations geplaatst. Daarnaast wordt het reeds bestaande (referentie)station van Veendam nu ook als monitoringsstation gebruikt. Resultaten van deze metingen worden maandelijks aan Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) gerapporteerd. Zie hiervoor ook het laatst gerapporteerde rapport van oktober 2015 (Referentie 13). Ook boven de ondergrondse gasopslag installaties Grijpskerk en Norg zijn permanente GPS stations opgesteld in 2014. De meetresultaten hiervan worden ook maandelijks aan SodM gerapporteerd (resp. Referentie 14 en Referentie 15).

Zoals in het aangepaste Groningen-winningsplan (Referentie 3) is aangegeven zal de productieperiode van het Groningen veld doorlopen tot 2080. Voor dit statusrapport is daarom, naast de bodemdalingsprognose voor 2025 en 2050, ook de bodemdalingsprognose in 2080 (voorheen 2070) getoond.

Sinds de vorige rapportage (Referentie 1) zijn de velden Metslawier-Zuid, Burum-Oost en Wieringa in productie genomen. Van de velden Pieterzijl-Oost en Schildhoek wordt verwacht dat deze binnenkort in productie komen. Op sommige velden is compressie geïnstalleerd, waardoor er meer gas geproduceerd kan worden. Het reservoirsimulatiemodel van Groningen is uitgebreid met een betere beschrijving van de aquifers. De laatste ontwikkeling van het reservoirmodel voorziet tevens in de mogelijkheid om direct de bodemdaling boven de aquifers te berekenen en te vergelijken met de metingen om zodoende een betere schatting te kunnen maken van de drukken in de laterale aquifers.

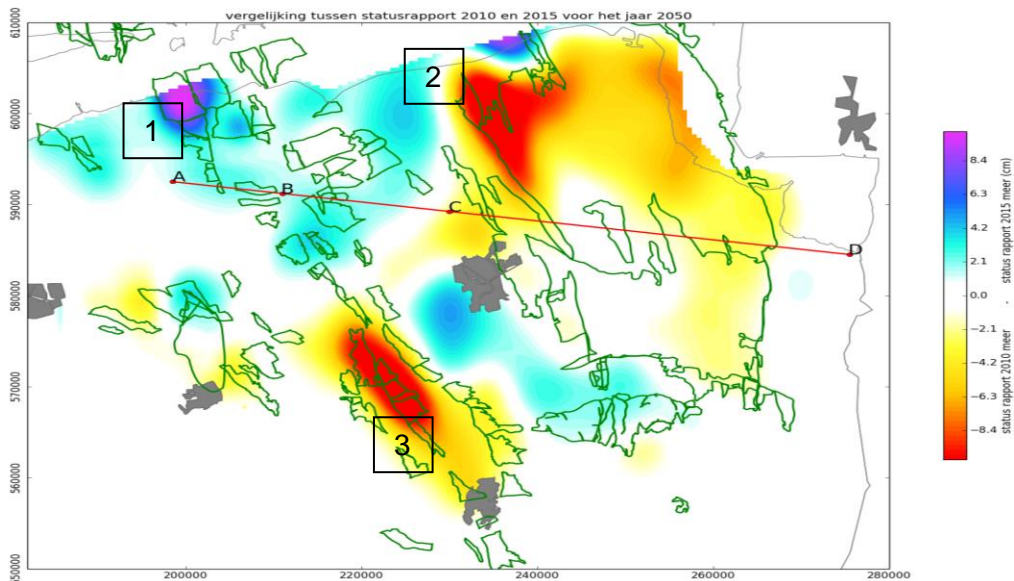
Als onderdeel van de Waddenzee Meet- en regelcyclus 2014 (Referentie 2) zijn de geologische en reservoirsimulatiemodellen gekalibreerd met de gemeten druk en productie data. Resultaten laten zien dat de verwachte bodemdaling boven het Nes veld groter is dan aangenomen in de status rapportage van 2010. Dit komt doordat het gasvolume groter bleek dan eerder aangenomen. Ook is het waarschijnlijk dat er enige drukdaling plaatsvindt in de laterale aquifers ten zuiden van het Ameland veld. Dit zorgt voor een significante bijdrage aan de bodemdalingsbelasting in het Pinkegat kombergingsgebied.

In 2010 is voor de modellering en prognose van de bodemdaling gebruik gemaakt van het geomechanische bodemdalingsmodel voor Noord-Nederland, gekalibreerd met de resultaten van de waterpasmetingen tot en met 2008. De maximale opgetreden daling sinds 1964 was in 2008 30 cm. In de periode 2008-2013 is 3 cm extra daling gemeten, waarmee de totale daling in 2013 op 33 cm uitkomt. Voor het centrum van de

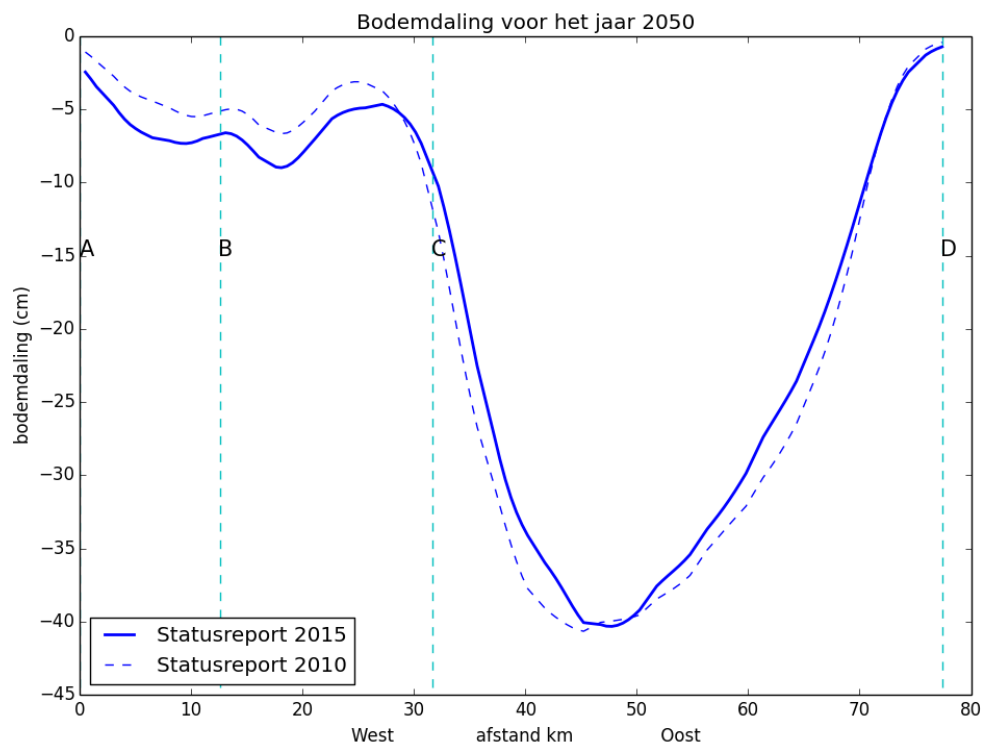
bodemdalingskom in de provincie Groningen is de verwachte maximale bodemdaling in 2050 nu ongeveer 45 cm.

De doorgevoerde aanpassingen op grond van bovengenoemde observaties en nieuwe ontwikkelingen sinds 2010 komt tot uitdrukking in verschilkaart tussen de prognose voor het jaar 2050 van dit rapport en de prognose voor hetzelfde jaar gedaan in 2010. Deze verschilkaart is getoond in Figuur 2. Een doorsnede (A,B,C,D) van de bodemdalingskom is weergegeven in Figuur 3. Figuur 2 laat tevens een aantal gebieden (1 t/m 3) zien waar de verschillen oplopen tot maximaal 10 cm tussen de twee prognoses.

1. De bodemdaling boven de Waddenvelden Nes en Moddergat is meer dan in 2010 aangenomen. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat het gasvolume van het Nes veld groter is dan eerder werd aangenomen. 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. Minder drukdaling door aanpassingen in het productieprofiel voor Groningen resulteert in minder bodemdaling in het noordwestelijk deel van de bodemdalingskom. In de aquifer ten noorden van dit gebied wordt nu meer bodemdaling voorspeld als gevolg van gewijzigde inzichten m.b.t. aquifer activiteit.
3. Het verschil dat bij Norg te zien is wordt veroorzaakt doordat in dit statusrapport is aangenomen dat de Norg UGS ("underground gas storage" of ondergrondse gasopslag) in 2050 nog in bedrijf is (in tegenstelling tot de aanname in 2010). De einddatum voor de Norg en Grijskerk UGS is niet bekend. Het uit bedrijf nemen en leeg produceren van de Norg UGS zal leiden tot meer drukdaling en daarmee gepaard gaande bodemdaling van ongeveer maximaal 10 cm).



**Figuur 2** verschil kaart tussen de bodemdalingsprognose voor het jaar 2050 volgens het Statusrapport 2010 en 2015. Waar het Statusrapport 2015 meer bodemdaling modelleert is weergegeven in de blauwe/paarse kleuren, waar het Statusrapport 2015 minder modelleert is weergegeven in de gele/rode kleuren. De doorsnede van de prognoses op de lijn A,B,C,D is weergegeven in Figuur 3.



**Figuur 3** Doorsnede van de bodemdalingskom in Friesland en Groningen. Vergelijking van de gemodelleerde bodemdaling in 2050 volgens het Statusrapport 2010 en 2015.

## 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 (Productspecificaties Beheer NAP, januari 2008, versie 1.1). 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 statusrapport Bodemdaling Groningen 2010 (EP201006302236, Referentie 1) zijn er twee waterpassingen uitgevoerd weergegeven in Figuur 4 en Figuur 5.

Periode : sep-nov 2011  
# Peilmerken : 359  
# Metingen : 854  
# Kilometers : 311  
Meetregister : Lauwersmeer 2011  
EP201201207051



**Figuur 4 Waterpastraject 2011.**

Periode : jan-aug 2013  
# Peilmerken : 5023  
# Metingen : 10984  
# Kilometers : 4031  
Meetregister : Noord-Nederland  
2013/14  
EP201507207215



**Figuur 5 Waterpastraject 2013.**

## 4.2 InSAR

Bij de PS-InSAR-methode worden uit van 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. Gedetailleerde uitleg over de wijze van processen wordt gegeven in het meetregister Noord-Nederland 2014 (Referentie 4).

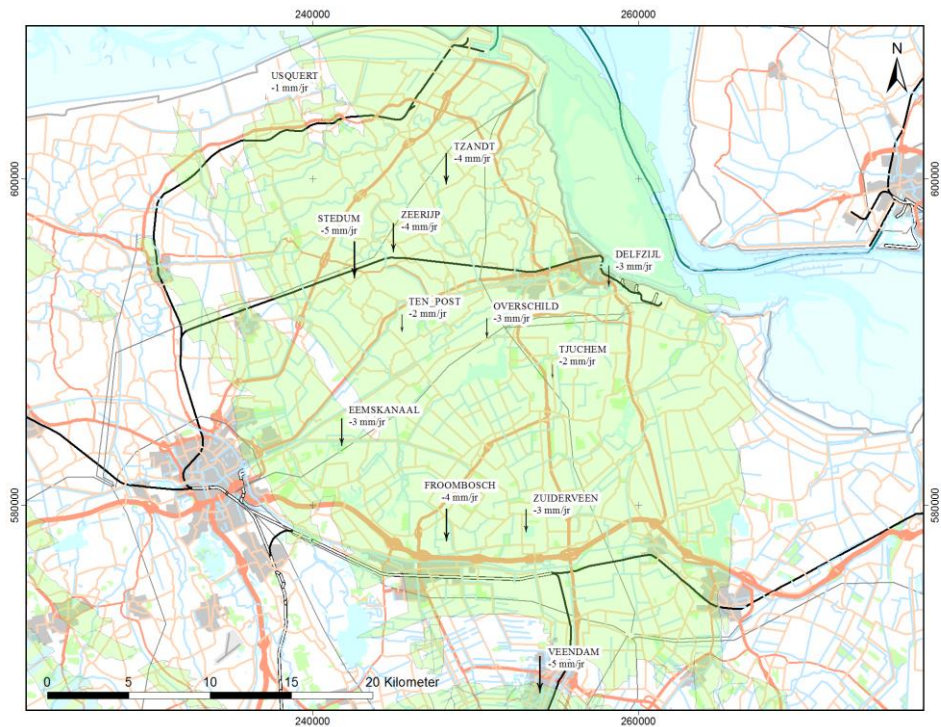
In het statusrapport 2010 (Referentie 1) is reeds geconstateerd, dat InSAR een goede overeenkomst laat zien ten opzichte van waterpassing en beschouwd kan worden als alternatieve techniek voor het monitoren van bodemdaling. Expliciete vergelijkingen zijn bovendien gerapporteerd in de rapportage behorende bij het meetplan Groningen 2010 (Referentie 11) en in het meetregister Noord Nederland 2014 (Referentie 4). Het laatste is gerapporteerd aan SodM, de Commissie Bodemdaling Groningen en de Commissie Bodemdaling Aardgaswinning Fryslân. Voortdurend worden onderdelen van de techniek waar mogelijk verder verbeterd, mede ten aanzien van gebruik van andere satelliet missies.

Om de in het verleden door waterpassing opgebouwde tijdseries van metingen te kunnen voortzetten, worden de 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. In het meetregister 2014 heeft InSAR als primaire inwinningstechniek gefungeerd met waterpassingen ter validatie.

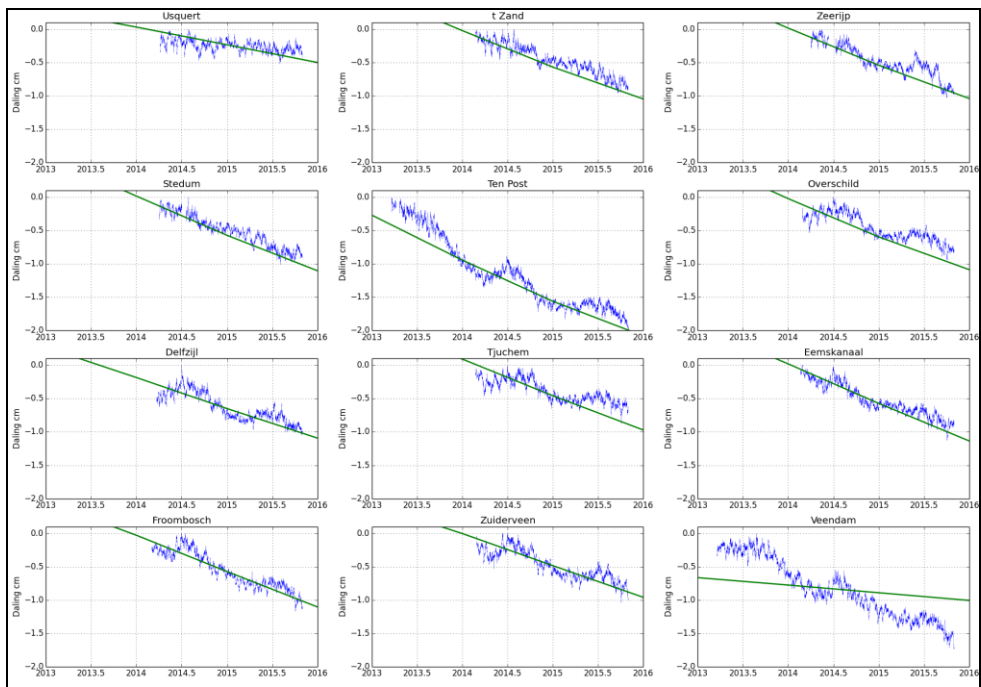
## 4.3 GPS

In 2013 (Ten Post) en 2014 zijn 11 permanent opgestelde GPS stations geïnstalleerd boven het Groningerveld. Daarnaast wordt het reeds bestaande station van Veendam ook als monitoringsstation gebruikt. Resultaten van deze metingen worden maandelijks aan SodM gerapporteerd. Zie hiervoor als voorbeeld het rapport van oktober 2015 (Referentie 12). Hierin worden ook de dalingssnelheden gerapporteerd, welke berekend worden over een periode van 12 voorafgaande maanden, waarbij rekening wordt gehouden met de correlatie van hoogteschattingen in de GPS tijdserie. Nauwkeurigheid van deze berekende snelheid heeft een standaard afwijking van 0,6 mm/jaar. Figuur 6 visualiseert de dalingssnelheid middels een geschaalde vector voor de periode oktober 2014-2015. Figuur 7 laat de bodemdaling op deze stations zien tezamen met de gemodelleerde bodemdaling volgens het geomechanisch model.





**Figuur 6** Dalingssnelheden per GPS station bepaald voor periode oktober 2014-2015 (mm/jaar). Standaardafwijking 0,6 mm/jaar.



**Figuur 7** Bodemdaling in cm gemeten op de GPS stations(blauwe lijn) met de gemodelleerde bodemdaling (groene lijn).

#### **4.4 Differenties**

Door het hoogteverschil op twee tijdstippen tussen twee peilmerken van elkaar af te trekken kan de relatieve peilmerkdaling (differentie) worden berekend. De standaardafwijkingen van de differenties nemen echter toe naarmate de peilmerken verder van het referentiepunt liggen. Tot op heden rapporteert de 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.

Uit InSAR bepaalde differenties worden naar hetzelfde referentiepeilmerk geconverteerd, opdat zij de tijdseries uit waterpassing op een consistente manier voortzetten. Met het oog op de precisie van de differenties, is het netwerk van Noord-Nederland opgedeeld in drie deelgebieden, met ieder één afzonderlijk referentiepeilmerk. De gerapporteerde differenties uit het meetregister Noord-Nederland 2014 (2008-2013) (Referentie 4) worden weergegeven in Figuur 11.

Uit afzonderlijke netwerkvereffeningen kunnen identificatiefouten (verwisseling van peilmerknaam) en autonoom dalende punten niet worden gedetecteerd. Om te controleren of de bodemdaling door compactie in de diepe ondergrond niet structureel wordt onder- of overschat, zijn de gemeten hoogteverschillen ook getoetst met behulp van een integrale ruimte-tijdanalyse op basis van hoogteverschillen. Het voordeel van deze methode is dat hiervoor genoemde fouten wel kunnen worden gevonden.

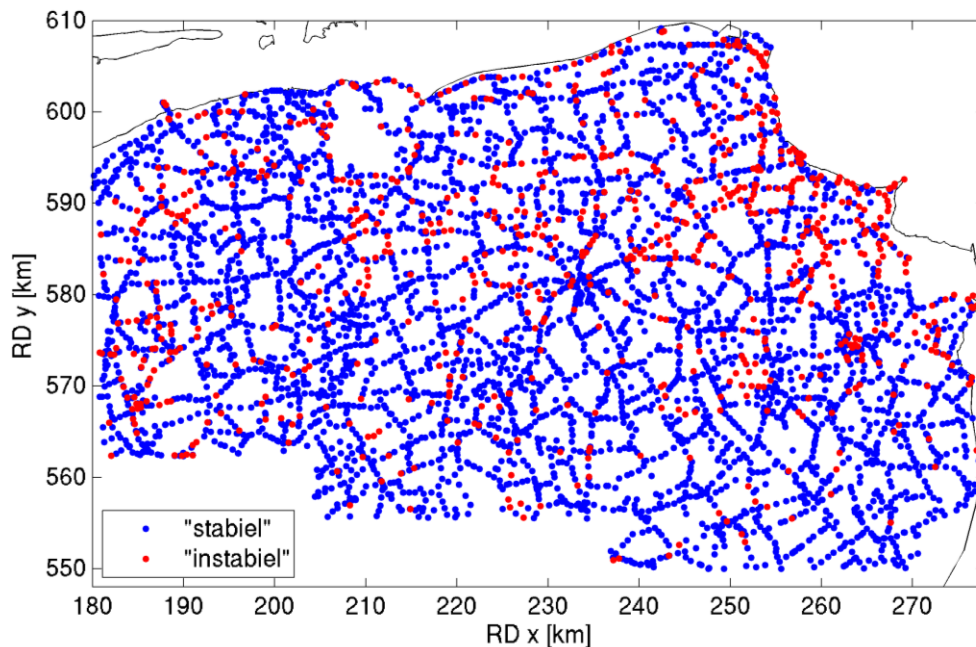
## 4.5 Stabiliteit

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.

Relatieve 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 deze 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 de stabiliteitsanalyse staat afgebeeld in Figuur 8 (voor gedetailleerde toelichting zie Referentie 4).



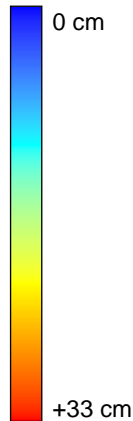
**Figuur 8** Stabiliteitsanalyse van waterpas-peilmerken. 85 % van de geanalyseerde peilmerken worden als “stabiel” geclassificeerd.



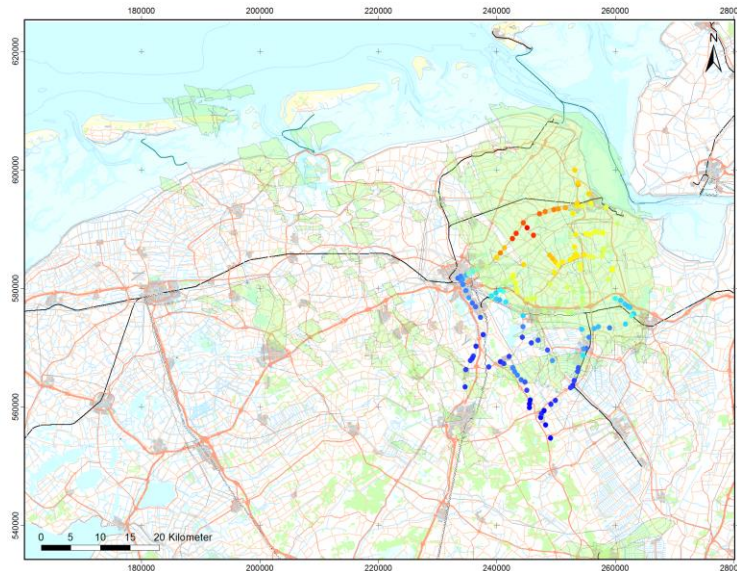
#### 4.6 Bodemdaling door gaswinning

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 peilmerkhoogten van twee metingen van elkaar af te trekken. Deze hoogten en differenties zijn ook gepubliceerd in openbare meetregisters. De peilmerk differenties tussen 1964 en 2013 staan afgebeeld in Figuur 9.

##### Legenda



Positieve waarde geeft daling aan

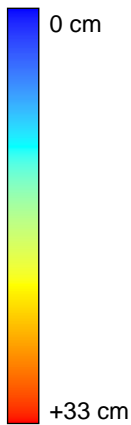


**Figuur 9** Relatieve peilmerkbeweging (cm) stabiele peilmerken, 1964 - 2013.

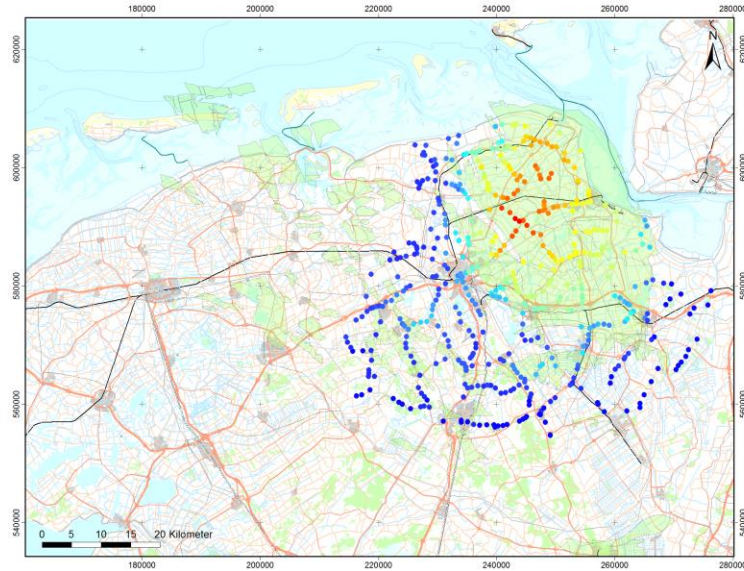
In 1964 is bij de start van de gaswinning in Groningen slechts een beperkt netwerk gemeten omdat destijds alleen uit het zuidelijke deel van het gasveld werd geproduceerd. De relatieve peilmerkbewegingen tussen 1964 en 2013 kunnen dan ook slechts op een beperkt aantal peilmerken worden bepaald.

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 2013 berekend. Deze worden weergegeven in Figuur 10.

### Legenda



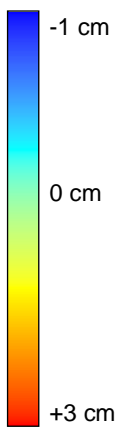
Positieve waarde geeft daling aan



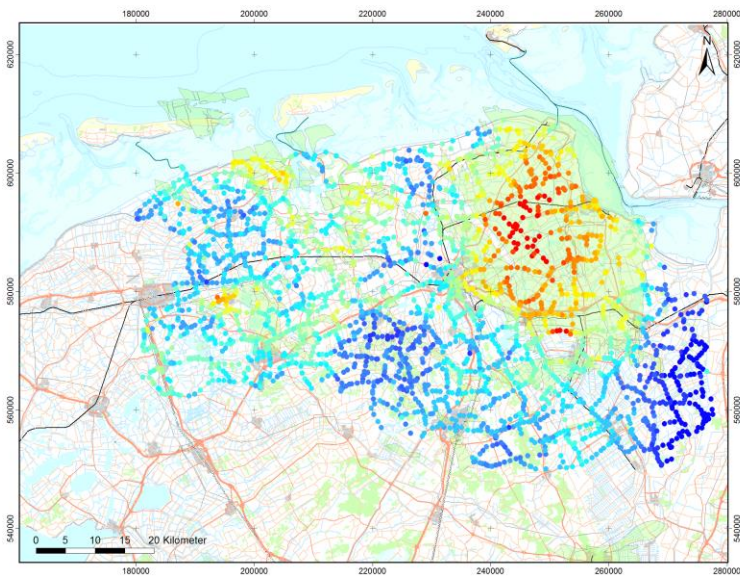
**Figuur 10** Relatieve peilmerkbeweging (cm) stabiele peilmerken, 1972 – 2013.

Figuur 11 geeft de relatieve peilmerkbewegingen weer tussen de twee laatste grote waterpassingen in Noord-Nederland (2008 en 2013).

### Legenda



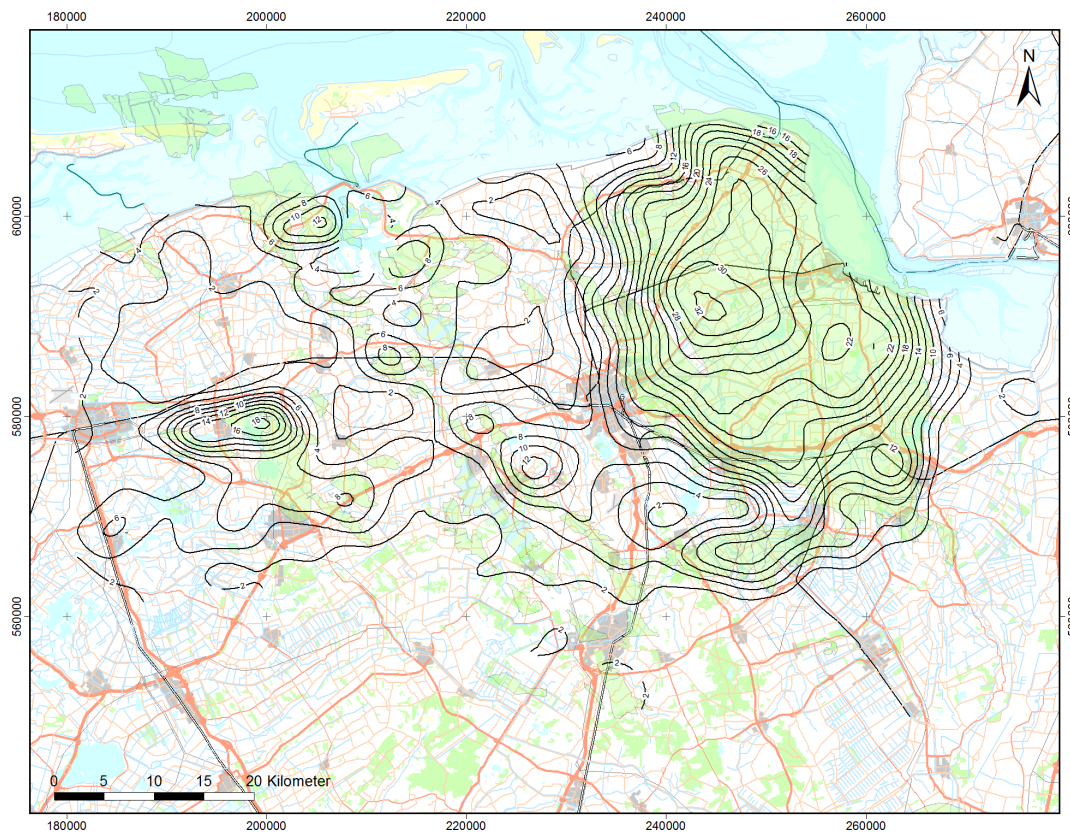
Positieve waarde geeft daling aan



**Figuur 11** Relatieve peilmerkbeweging (cm) stabiele peilmerken, 2008 – 2013.

## 4.7 Contourkaart waterpasmetingen

Op basis van een uitgevoerde ruimte-tijd analyse, waarbij alle beschikbare waterpasdata is gebruikt (1964-2013), is een contourkaart gegenereerd (Figuur 12). De ruimte-tijd analyse maakt aannames omtrent de modellering en het gedrag van de deformatie als gevolg van mijnbouwactiviteiten, zowel in ruimte als in tijd. Belangrijk is te vermelden, dat autonome bewegingen enkel zijn gecorreleerd in de tijd. Afwijkingen in de bodembeweging als gevolg van mijnbouwactiviteiten zijn zowel ruimtelijk als in de tijd gecorreleerd. De uitsplitsing van het bodemdalingssignaal is daardoor afhankelijk van de mate waarin de covariantiefuncties de fysische werkelijkheid beschrijven. Deze zijn niet direct gerelateerd aan de parameters die het gedrag van het reservoir en de overburden beschrijven. Hierdoor heeft de geschatte ruimtelijk gecorreleerde bodembeweging voornamelijk een signaalfunctie. Contouren worden alleen getoond voor die gebieden, waar volgens de analyse de standaardafwijking van de geschatte bodemdaling kleiner is dan 1 cm.



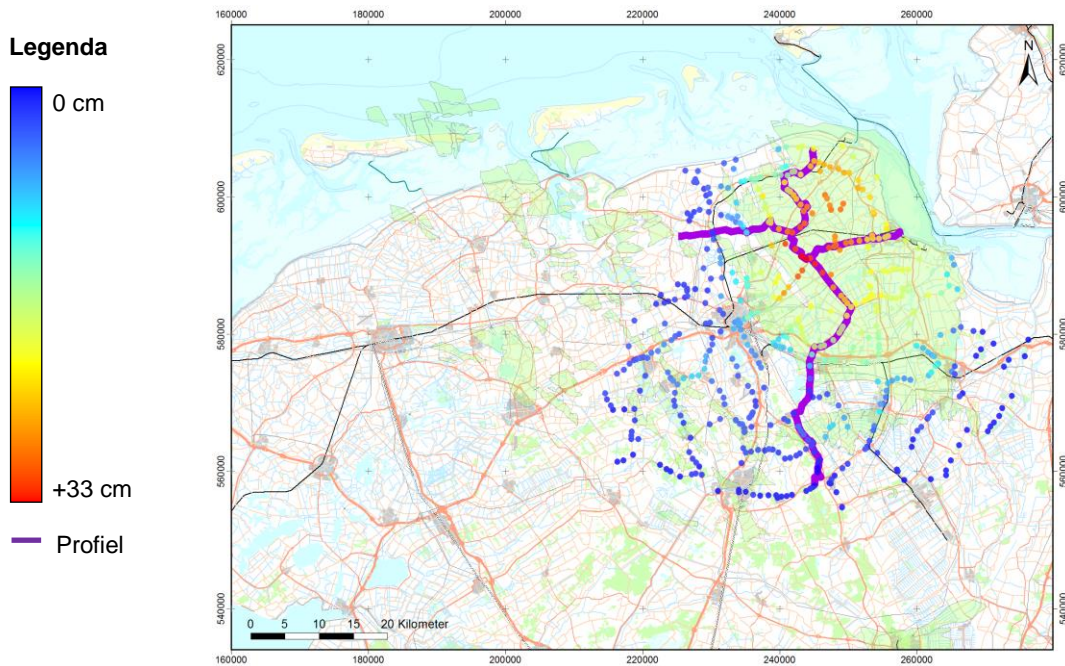
**Figuur 12** Contourkaart voor bodemdaling door gaswinning, opgetreden tussen start van de productie en de waterpassing in 2013 op basis van ruimte-tijd analyse van waterpasdata (cm).

Deze kaart is groter weergegeven in Appendix IV. Ter vergelijking is in Appendix VI de met Move-3 op stabiele peilmerken gemeten bodemdaling getoond. Deze waarden zijn gebruikt voor de kalibratie van het geomechanisch bodemdalingsmodel.



## 4.8 Profielen

De berekende relatieve peilmerkbewegingen worden gebruikt om de bodemdalingsprognoses te toetsen en waar nodig bij te stellen. Daarvoor worden onder andere profielen gebruikt, waarbij de peilmerkdalingen worden afgezet tegen de prognoses. Evenals in het vorige Statusrapport (2010), zijn er twee profielen gekozen over de stabiele peilmerken en door het centrum van de bodemdalingskom. Een kaart met een overzicht van de ligging van deze profielen is weergegeven in Figuur 13. De profielen (west-oost en zuid-noord) zijn weergegeven in Figuur 14 en Figuur 15.



**Figuur 13**      **Overzicht profielen over stabiele peilmerken 1972 – 2013.**

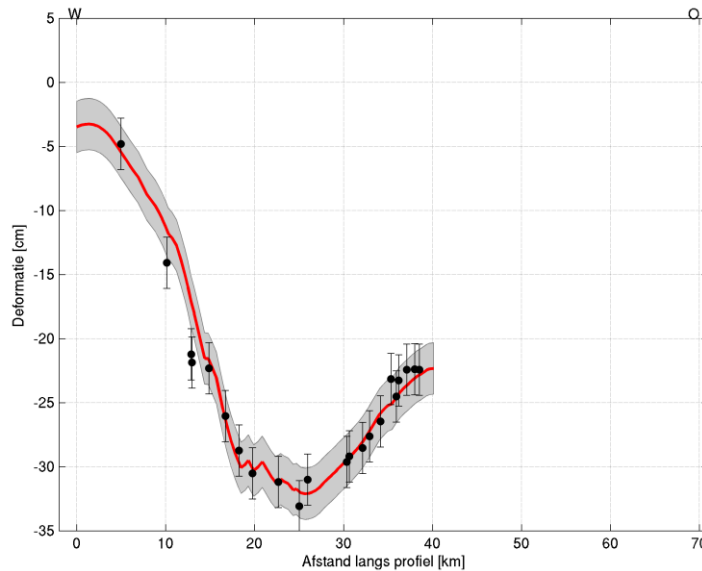
**Legenda**

- ⊥ Relatieve peilmerk-  
beweging met  
precisie ( $3\sigma$ )
- Prognose met  
onzekerheidsmarge

Negatieve waarde geeft daling aan (cm)

W

O



**Figuur 14** West-oost profiel: relatieve peilmerkbewegingen (cm) stabiele peilmerken, 1972 – 2013 (voor uitleg van precisie en onzekerheidsmarge zie par. 7.1).

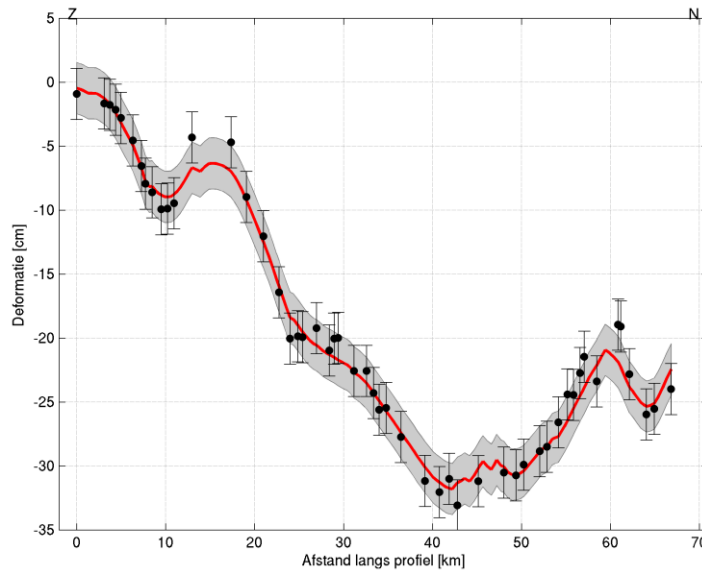
**Legenda**

- ⊥ Relatieve peilmerk-  
beweging met  
precisie ( $3\sigma$ )
- Prognose met  
onzekerheidsmarge

Negatieve waarde geeft daling aan (cm)

Z

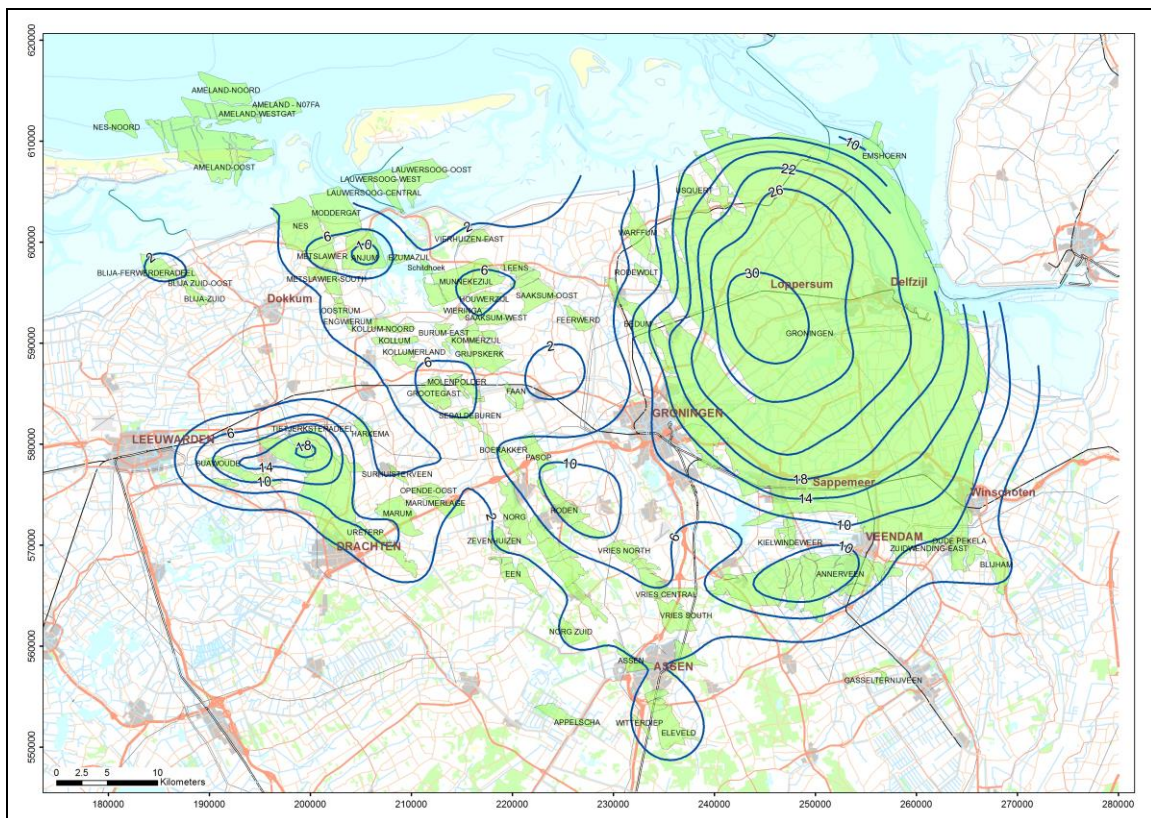
N



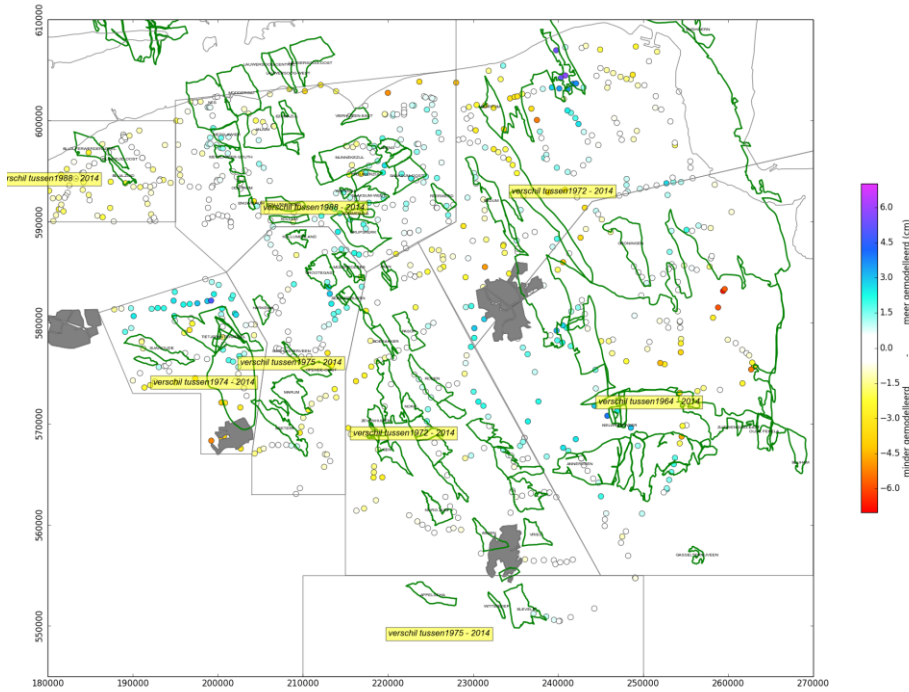
**Figuur 15** Zuid-noord profiel: relatieve peilmerkbewegingen (cm) stabiele peilmerken, 1972 – 2013 (voor uitleg van precisie en onzekerheidsmarge zie par. 7.1).

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

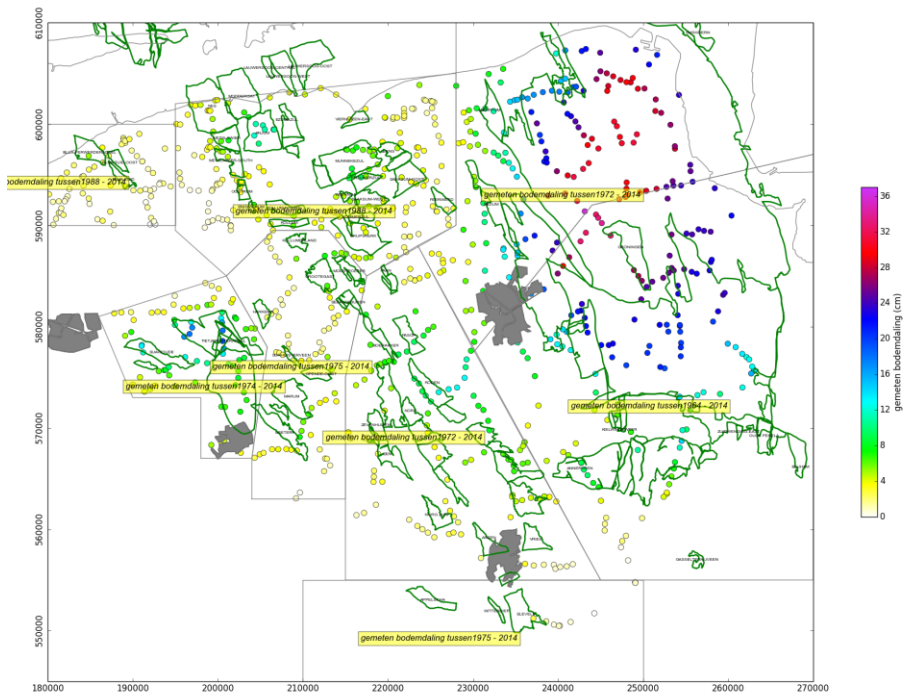
In Figuur 16 zijn de bodemdalingscontouren volgens de aan de metingen gekalibreerde modelberekening voor het jaar 2013 getoond (bodemdaling sinds het begin van de gasproductie). Figuur 17 toont de verschillen tussen de gemeten (waterpasdata 2013) en de gemodelleerde bodemdaling (1 jan 2014). Figuur 18 toont de gemeten (waterpasdata 2013) bodemdaling sinds de start van de winning op stabiele peilmerken. De kaart in Figuur 17 en Figuur 18 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 de appendix.



**Figuur 16** Contourkaart voor bodemdaling door gaswinning opgetreden tussen start van de productie en de waterpassing in 2013, bepaald met het aan de metingen gekalibreerde geomechanisch model.



**Figuur 17** Verschilkaart van de gemiddelde bodemdaling min de, op basis van waterpassing, gemeten bodemdaling in 2013 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 18** Gemeten bodemdaling in 2013 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 19 en Figuur 20 tonen de geschatte bodembeweging uit InSAR en waterpassingen langs de twee geselecteerde waterpastrajecten (zie Figuur 13). Voor InSAR zijn gewogen gemiddelden met bijbehorende standaardafwijking uit alle scatterers binnen een straal van 500 m berekend. Hieruit blijkt dat de resultaten uit InSAR en waterpassingen binnen de nauwkeurigheid van beide meettechnieken overeenkomen.

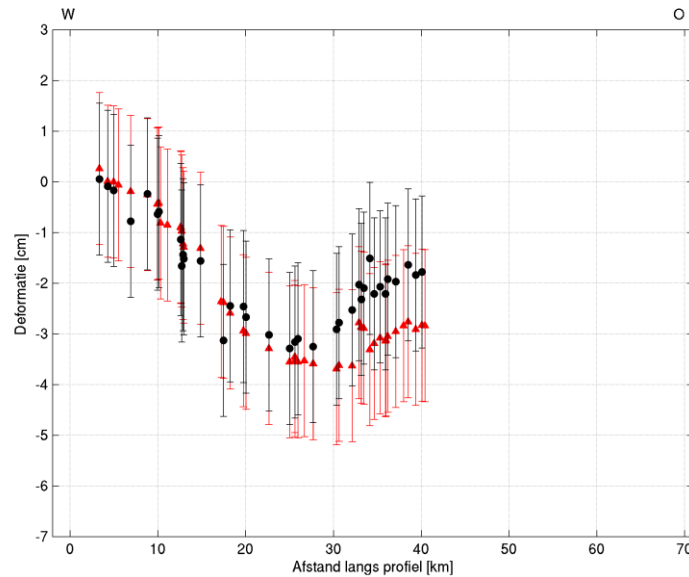
**Legenda**

-  PS-InSAR deformatie met precisie ( $3\sigma$ )
-  Relatieve peilmerk-beweging met precisie ( $3\sigma$ )

Negatieve waarde geeft daling aan (cm)



W

O



**Figuur 19 West-oost profiel: vergelijking PS-InSAR en waterpassingen (cm), 2008 – 2013.**

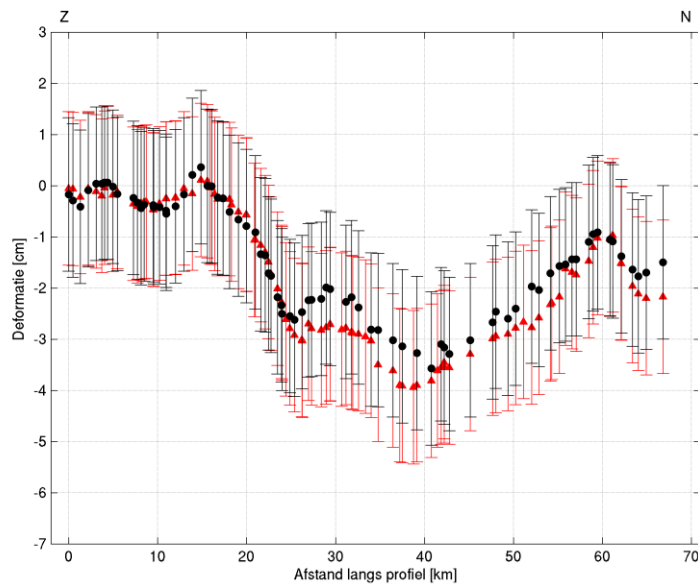
**Legenda**

-  PS-InSAR deformatie met precisie ( $3\sigma$ )
-  Relatieve peilmerk-beweging met precisie ( $3\sigma$ )

Negatieve waarde geeft daling aan (cm)

Z

N



**Figuur 20 Zuid-noord profiel: vergelijking PS-InSAR en waterpassingen (cm), 2008 – 2013.**



## 5 Modelling van compactie

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 reservoir-simulatiemodellen 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.

### **Anomaal bodemdalingsgedrag**

Onder begeleiding van de Waddenacademie heeft een groep wetenschappers sturing gegeven aan een onderzoek naar de fysische achtergronden van de waargenomen tijdsafhankelijke effecten in het bodemdalinggedrag en de mogelijke gevolgen daarvan voor de bodemdaling op langere termijn.

Dit onderzoek komt voort uit vergunningsvoorwaarden van de winningsplannen Ameland, Moddergat en Anjum. Het onderzoek heeft plaatsgevonden in de periode 2013-2015 en zal een vervolg krijgen in 2016. Meer informatie m.b.t. deze studie is te vinden in Referentie 6. Een korte samenvatting is te vinden op de waddenacademie website\*:

“De NAM was verplicht om voor 1 juli 2015 een lange termijn bodemdaling studie in het waddegebied uit te voeren. Het gaat hierbij om een onderzoek naar de fysische achtergronden van de waargenomen tijdsafhankelijke effecten in het bodemdaling gedrag en de mogelijke gevolgen daarvan voor de bodemdaling op langere termijn. De studie werd uitgevoerd in opdracht van de Inspecteur-generaal der Mijnen door de NAM en verschillende partijen namens de NAM. De studie startte op 1 januari 2013 en liep tot 1 juli 2015. De Waddenacademie heeft een onafhankelijke wetenschappelijke [begeleidingscommissie](#) gevraagd de lange termijn bodemdaling studie in het waddegebied te begeleiden.

Op 11 november 2015 heeft de Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) haar oordeel uitgesproken over de 16 rapporten die de Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) op 30 juni 2015 heeft aangeboden aan de SodM. In haar beoordeling heeft de SodM tevens het [oordeel](#) betrokken van de door de Waddenacademie ingestelde wetenschappelijke begeleidingscommissie bodemdaling. In het algemeen beoordeelt de SodM de tot nu toe verkregen studieresultaten als grondig, zeer relevant en van een wetenschappelijk hoog niveau”.

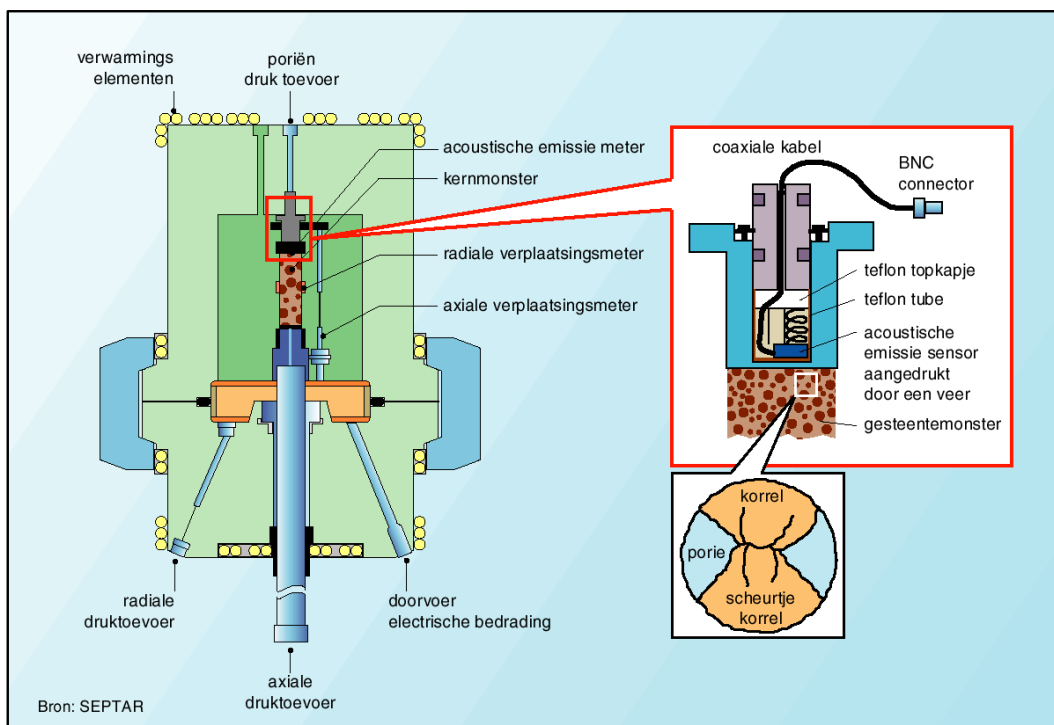
\* <http://www.waddenacademie.nl/themas/geowetenschap/wetenschappelijke-begeleidingscommissie-bodemdaling/>

De parameters van het compactiemodel 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 diepe observatieputten in het Groningen-gasveld.
- Inversie van de gemeten bodemdaling boven de gasvelden.

## 5.1 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 21). 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 21 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 bv 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 6). 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.

## **5.2 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.

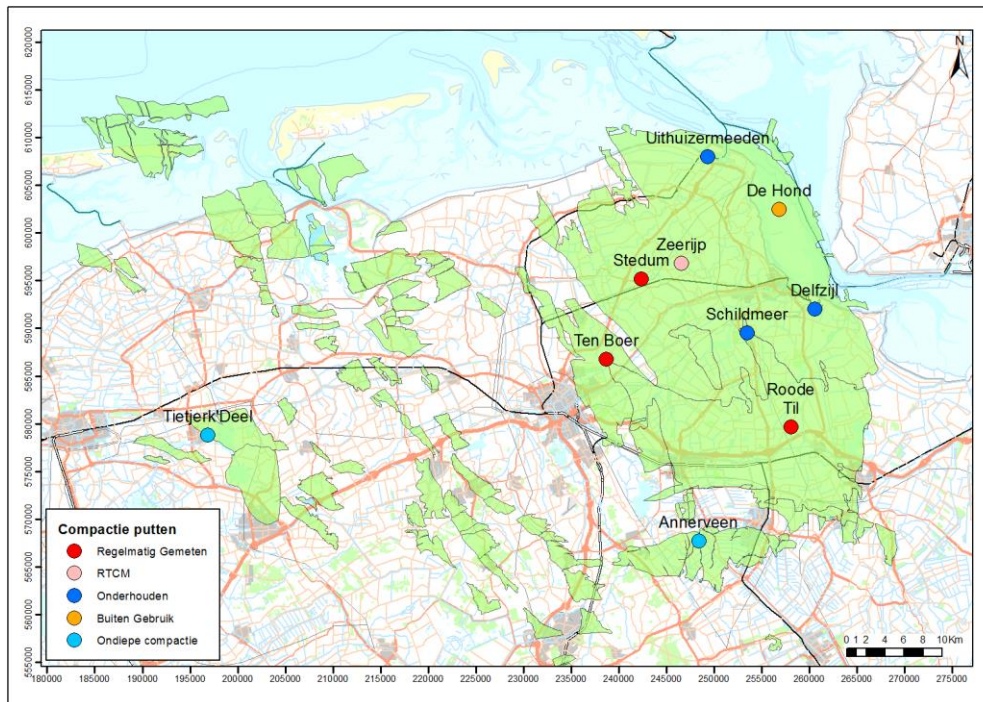
Hiertoe werden in elf observatie putten laag-radioactieve markeringen (kogels) om de tien meter over het gehele reservoir aangebracht. Van deze observatieputten zijn er nu nog zeven in gebruik; in Uithuizermeeden, De Hond, Stedum, Ten Boer, Schildmeer, Delfzijl en Roode Til (Figuur 22). Door periodiek 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.

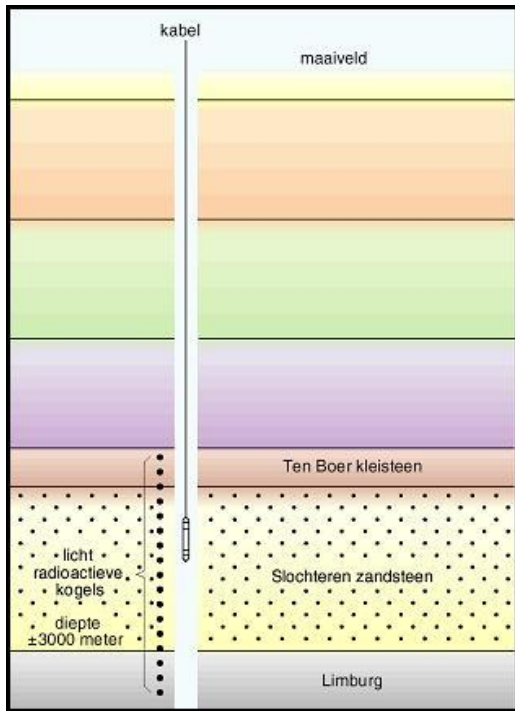
Om de afstand tussen elk aangrenzend paar markeringen te bepalen, wordt het meetinstrument, waarin zich een aantal gamma detectoren bevindt, in het gat gelaten en aan een kabel langs de markeringen geleid (Figuur 23). Als een van de detectoren zich recht tegenover een markering bevindt, is het aantal door die detector ontvangen gammastralen per tijdseenheid maximaal. Dit maximum geeft zo de positie van de markering aan. De meetinstrumenten, FSMT en CMI, bevatten elk vier detectoren. Wanneer de bovenste twee detectoren de gammastraling opvangen van de bovenste markering van elk paar, registreren de onderste twee detectoren de gammastraling van de onderste markering. Uit de onderlinge afstand van de maxima en de afstand tussen de detectoren kan de afstand tussen elk paar naburige markeringen worden berekend. Door deze afstand voor elk paar naburige markeringen periodiek te meten en de resultaten te combineren, kan de in het reservoir optredende compactie worden bepaald.

Uit analyse van de resultaten van de FSMT- en CMI-metingen over de afgelopen jaren blijkt, dat het compactieproces niet wezenlijk verschilt van put tot put. Zoals in de 2000-prognose genoemd, is op grond hiervan besloten om alleen in situ compactiemetingen uit te voeren in drie representatieve, over het veld verspreide, observatieputten. Vanaf 2000 waren dit de putten Stedum, Roode Til en De Hond. De andere putten worden goed onderhouden, zodat ook daarin metingen gedaan kunnen worden als daar aanleiding voor mocht zijn. Het compactieproces verloopt relatief langzaam en gebaseerd op de meetnauwkeurigheid is het niet zinvol de regelmatige in situ compactiemetingen in elk van de gebruikte putten vaker dan eens per vijf jaar uit te voeren. Sinds het status rapport uit 2010 is deze vorm van compactie metingen drie keer uitgevoerd: in 2010 en 2013 in Stedum, en in 2011 in Roode Til.

In 2015 is er een nieuwe observatieput in Zeerijp (Zeerijp-3) geboord, waarin via een nieuwe techniek, "Real-Time Compaction Monitoring" (RTCM), de reservoir compactie nog nauwkeuriger gemeten kan worden. Deze techniek meet de deformatie van de stalen verbuizing van de put die via het cement vastzit aan het gesteente en meet daarmee ook de compactie van het gesteente. Met deze techniek kunnen zeer kleine veranderingen continu worden waargenomen.

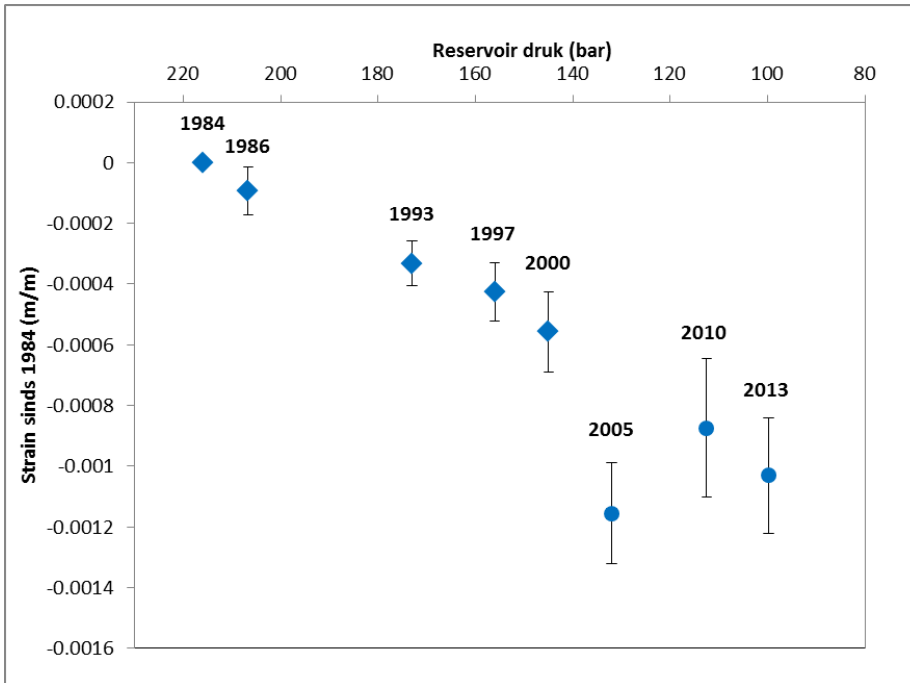


**Figuur 22** Overzichtskartaal van de locaties van de diepe compactieputten en ondiepe compactieputten. De drie putten waarin regelmatig diepe compactiemetingen worden uitgevoerd middels de markeringen, zijn in rood aangegeven. De put in De Hond is tijdelijk niet toegankelijk voor metingen.

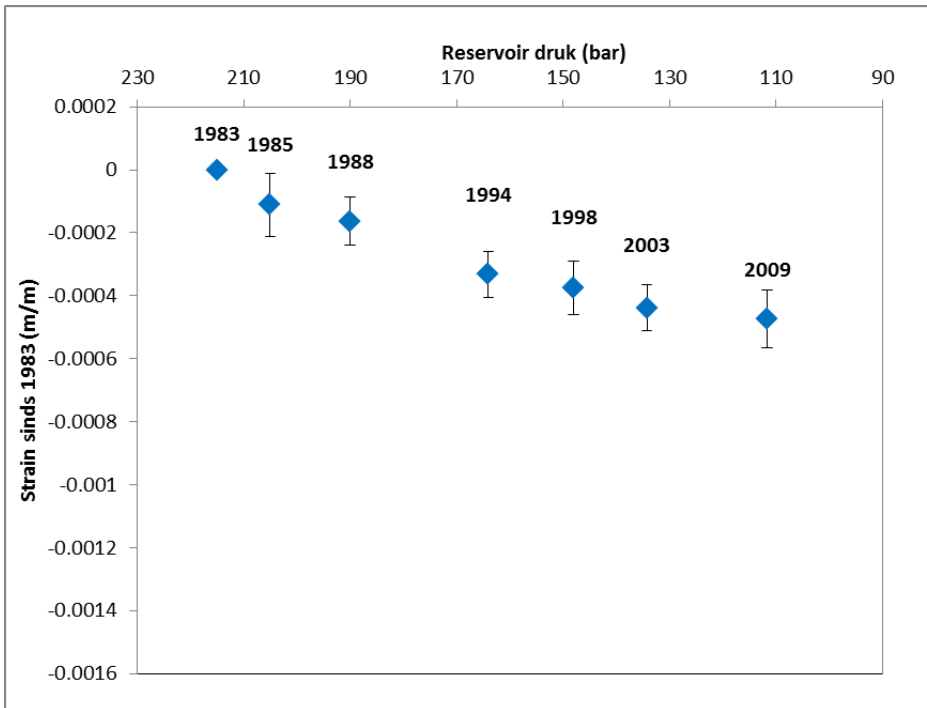


**Figuur 23 Principe van in situ reservoir-compactiemetingen.**

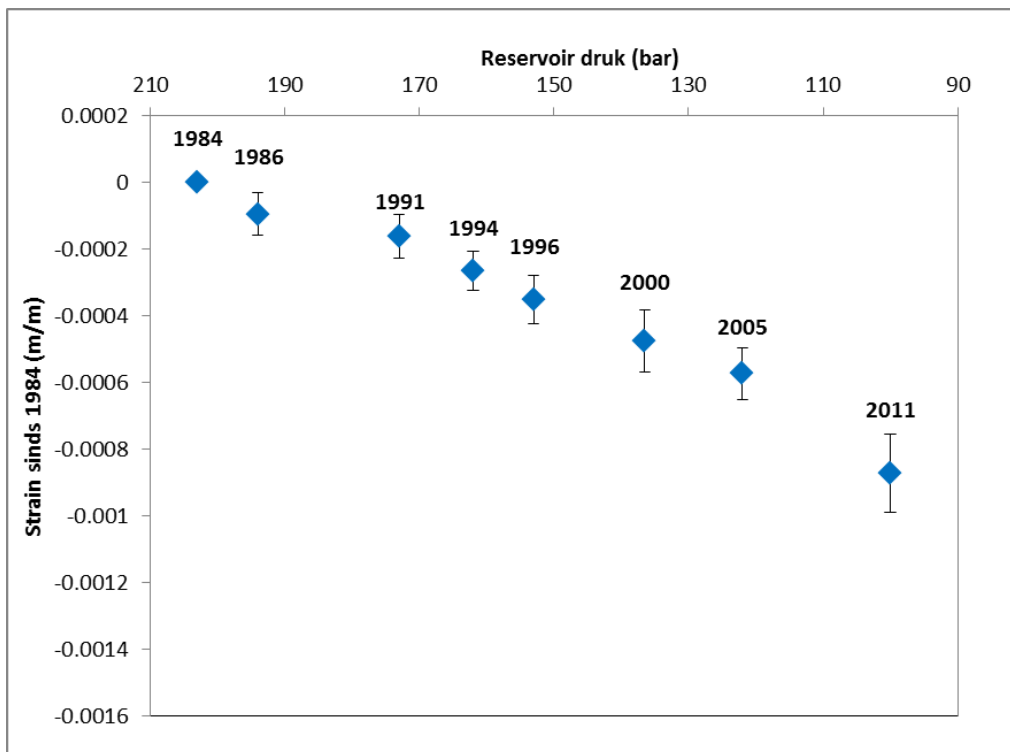
De resultaten van de analyse van de compactiemetingen staan in Figuur 24, Figuur 25 en Figuur 26. Een nieuwe methode van compactiedata analyse (Referentie 9) is toegepast op de meest recente data uit Stedum; alle andere interpretaties zijn gebaseerd op eerdere analyses. De meetnauwkeurigheid van de FSMT en CMI metingen lijkt in het verleden overschat te zijn, en is aangepast voor alle meetpunten. De meting die verricht is in Stedum in 2005 laat een afwijking zien t.o.v. de lineaire trend die bepaald kan worden op basis van de overige metingen. De betrouwbaarheid van de gemeten data is vergelijkbaar met de overige metingen. Deze afwijking is waarschijnlijk veroorzaakt door een fout in de meting zelf (b.v. een kalibratiefout). Metingen in de toekomst moeten vaststellen of dit inderdaad zo is. Over het algemeen laten de laatste metingen zien dat ze nog redelijk in lijn zijn met de voorgaande metingen. De richtingtingscoëfficiënt van een lineaire trendlijn door de datapunten, die een maat zou moeten zijn voor de gemiddelde compactie coëfficiënt over de gehele reservoir dikte, is nog steeds vergelijkbaar met de gemeten compactiecoëfficiënt die volgt uit de laboratoriumexperimenten.



**Figuur 24** Resultaten van de in situ compactiemetingen in Stedum, ten opzichte van 1984. De meest recente data is met een nieuwe methode geanalyseerd (cirkels).



**Figuur 25** In situ compactiemetingen De Hond (geen nieuwe data sinds Statusrapport 2010).



**Figuur 26** In situ compactiemetingen Roode Til.

### 5.3 Compactie-modelparameters bepalen met behulp van inversie

Voor de bepaling van de compactie in het Groningen veld is een inversiestudie uitgevoerd waarbij de inversie van de bodemdalingmetingen naar de compactie in een aantal stappen is uitgevoerd. Allereerst is een kalibratie uitgevoerd van de compactie aan de waterpasdata, reservoirdrukken en productiegegevens in het reservoir model. Deze stap zorgt er ook voor dat de drukken in de laterale aquifers zo goed mogelijk worden bepaald, waarbij wordt verondersteld dat de compactiecoëfficiënt van de samendrukbaarheid van het gesteente vergelijkbaar is met die in het gasreservoir. Vervolgens zijn de drukken gebruikt in een tweede inversiestap m.b.v. het geomechanische model. Hiermee is uiteindelijk een gedetailleerd compactiegrid bepaald met cellen van 1 bij 1 km. Dit grid is vervolgens gebruikt voor de prognoseberekeningen.

### 5.4 Compactiemodel

Het compactiemodel zorgt voor de vertaling van de drukdaling naar de compactie. Gebaseerd op o.a. observaties van de bodemdaling boven Ameland is in de huidige berekeningen een op diffusie gebaseerd en daarmee tijdsafhankelijk compactiemodel voor het reservoir toegepast dat hieronder verder wordt toegelicht. In het Groningen winningsplan (Referentie 3) is tevens een vergelijk gemaakt tussen dit compactiemodel en het RTCiM model dat door TNO is ontwikkeld (Referentie 11). Prognoses voor de bodemdaling die zijn gedaan m.b.v. beide compactiemodellen zijn zeer vergelijkbaar.

### 5.4.1 Diffusie mechanisme in het reservoir

De resultaten van bodemdalingsmetingen op Ameland en in de Waddenzee laten zien dat de bodemdaling in de beginfase van de productie een zekere vertraging heeft ten opzichte van de drukdaling in het veld. Dit effect speelt ook een rol aan het einde van de productie: de bodemdaling stopt niet direct bij beëindiging van de productie, maar zal altijd vertragen. Een mogelijke verklaring voor deze observatie is dat er een diffusieproces optreedt in het reservoir. Dit wordt ook waargenomen in b.v. de bodemdalingsmetingen boven Groningen.

Het onderzoeken van het exacte fysische proces (of combinatie van processen) dat de waargenomen tijdsafhankelijke daling veroorzaakt was onderdeel van de “Long Term Subsidence” studie die recentelijk in juni 2015 door NAM is afgerond (zie kader pagina 25), waarbij o.a. de volgende processen zijn onderzocht:

- Mogelijke drukdaling in de watervoerende pakketten onder en naast de gasreservoirs
- Tijdsafhankelijk gedrag in de compactie van het reservoir
- Tijdsafhankelijke deformatie van de zoutlaag boven het reservoir

Het is zeer waarschijnlijk dat een combinatie van deze mechanismes zorgt voor het geobserveerde tijdsafhankelijke gedrag, waarbij het niet mogelijk is alle fysische processen exact te onderscheiden en/of te vertalen naar computermodellen. Daarom heeft NAM een tijdsafhankelijk diffusiemodel ontwikkeld en toegepast waarmee op een eenvoudige manier een betere temporele passing met de geobserveerde bodemdaling gemaakt kan worden.

De diffusie komt uiteindelijk tot uitdrukking in de volumerek van het reservoirgesteente, die vervolgens de bodemdaling veroorzaakt.

#### *Time-decay model*

De formule voor dit model wordt hieronder weergegeven.

De volumerek,  $e_{ii}$ , op een punt,  $\mathbf{x}$ , en tijdstip,  $t$ , in het reservoir kan worden beschreven door het product van de drukverandering,  $\Delta p$ , en de uniaxiale compactiecoëfficiënt,  $c_m$ , geconvolveerd in tijd,  $*_t$ , met een “time decay” functie:  $\frac{1}{\tau} \exp\left[\frac{-t}{\tau}\right]$  met  $t$  in jaren en  $\tau$  de “time decay” constante.

$$e_{ii}(\mathbf{x}, t) = \Delta p(\mathbf{x}, t) c_m(\mathbf{x}, t) *_t \frac{1}{\tau} \exp\left[\frac{-t}{\tau}\right]$$

Op basis van de meest optimale kalibratie met de beschikbare bodemdalingsmetingen in het gebied dat het Groningen veld beslaat volgt voor dit voorkomen een waarde van circa 3 jaar voor de “time decay” constante.

Bovenstaand compactiemodel is gebruikt vanwege de goede passing met de metingen in Ameland en Anjum (Winningsplan Ameland 2011, Winningsplan Anjum 2011) en het beperkte aantal (2) vrije parameters. Deze velden zijn verder in hun ontwikkeling en als analoog aangenomen, onder andere omdat het reservoir uit hetzelfde type zandsteen bestaat als het Groningen reservoir.



### ***Bi-lineair compactie model, status rapport 2010***

Het bi-lineaire compactiemodel was het door NAM gebruikte compactiemodel tot 2011. Het model voorzag in het meest eenvoudige antwoord op de versnelde bodemdaling die was waargenomen boven een aantal Nederlandse gasvelden. Het model bestaat uit twee lineaire compactie 'takken' waarbij een eerste tak met een lagere compressibiliteit bij een bepaalde druk overgaat in een tak met een hogere compressibiliteit. Dit model geeft echter geen verklaring voor de doorgaande bodemdaling die wordt geobserveerd boven het Ameland veld. Deze observatie was de belangrijkste reden om over te gaan op bovenstaande time-decay model.

## **5.5 Compactiemetingen van de ondiepe ondergrond**

Om een onderscheid te maken tussen de bodemdaling veroorzaakt door diepe compactie ten gevolge van gaswinning en ondiepe compactie, 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 20 m (fundatie meetgebouw) tot 400 m. De dalingsnelheid bleek, na de zetting van de fundering van de meetgebouwen gedurende de eerste zeven jaar, over een periode van 25 jaar 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 leidde tot de conclusie dat de ondiepe compactie van plaats tot plaats varieert en niet over grotere gebieden kan worden geëxtrapoleerd. 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. Deze metingen worden voorlopig voortgezet. De metingen in Tietjerksteradeel geven geen duidelijke trend van de ondiepe compactie. In Annerveen wordt een ondiepe compactie gemeten van gemiddeld 0,2 mm per jaar.

## 6 Modelling en prognose van de bodemdaling

### 6.1 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 0,25). 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 er voor 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. 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. Recentelijk zijn ook bodemdalingsberekeningen uitgevoerd in het kader van het aardbevingenonderzoek met het eindige elementen pakket ABAQUS (Referentie 8). Vergelijking met dit model laat 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.

Het Noord-Nederland geomechanische model is gebaseerd op de geologische en reservoirmodellen van de gasvelden. Probabilistische kalibratieberekeningen zijn uitgevoerd met de waterpasmetingen voor het Groningen veld die worden beschreven in paragraaf 7.1. De meest waarschijnlijke oplossing met bijbehorende onzekerheden wordt gebruikt voor het opstellen van de bodemdalingsprognose boven het Groningen veld.

Voor de overige velden is uitgegaan van de beste schatting van invoerparameters die past bij de gemeten bodemdaling, waarbij de gebruikte “time-decay” voor alle velden 3 jaar is.

### 6.2 Invoergegevens van de velden

In het statusrapport uit 2005 is voor alle NAM-velden in de provincies Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe een korte beschrijving van de veldgegevens opgenomen. In het statusrapport 2010 is deze beperkt tot de nieuwe in productie genomen velden. Ook in dit status rapport (2015) worden een aantal nieuwe velden meegenomen die recentelijk in productie genomen zijn of dat binnenkort zullen worden. Deze nieuwe velden worden hieronder beknopt beschreven.

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 vanzelfsprekend 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 27.



**Figuur 27**      **Overzicht van de gasvelden die in deze prognose zijn meegenomen.**

**Burum-Oost:** het Burum-Oost voorkomen bevindt zich op een diepte van ongeveer 3500 m met een gemiddelde reservoirdikte van 105 m. Het voorkomen is in 2014 in productie genomen. De verwachte compactiecoëfficiënt ( $C_m$ ) is lager dan de Groningen  $C_m$  omdat het reservoirgesteente minder poreus is in dit gebied.

**Metslawier Zuid:** Op een diepte van ongeveer 3700 m bevindt zich het Metslawier Zuid voorkomen met een gemiddelde reservoirdikte van 82 m. Het voorkomen is in 2014 in productie genomen. Op basis van de porositeit van het gesteente zal de verwachte  $C_m$  vergelijkbaar zijn met de Groningen  $C_m$ .

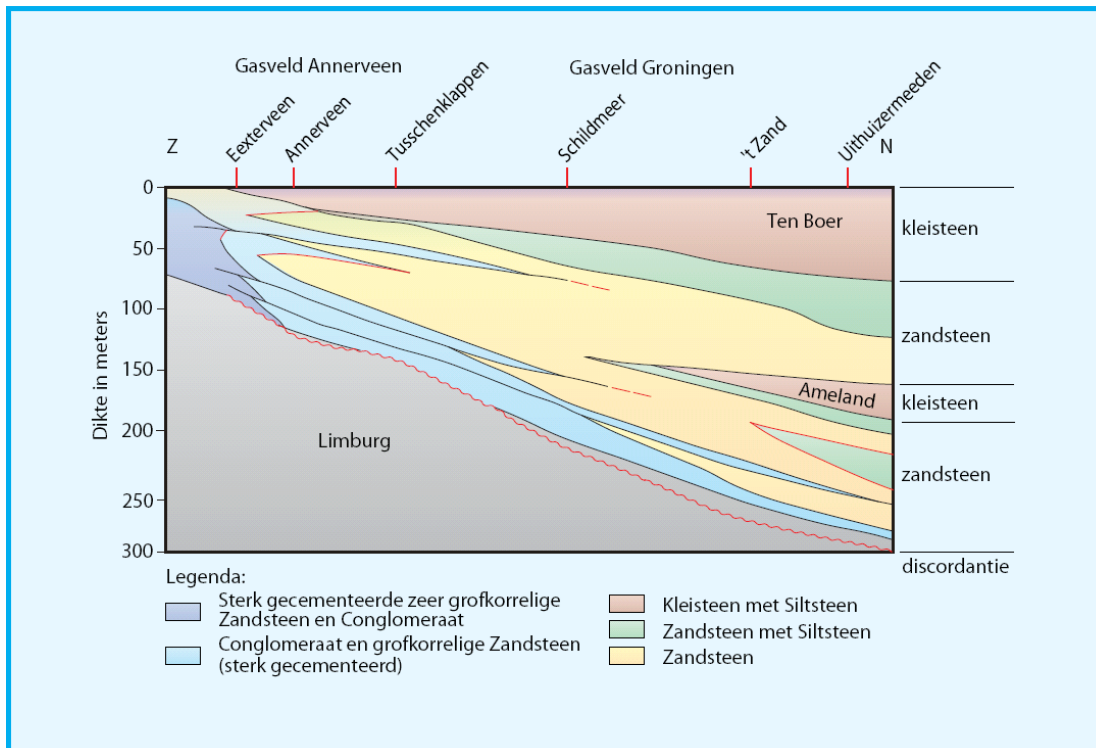
**Schildhoek:** Het Schildhoek voorkomen bevindt zich op een diepte van ongeveer 4000 m met een gemiddelde reservoirdikte van 115 m. Het voorkomen is nog niet in productie genomen. De verwachte  $C_m$  zal iets lager zijn dan de Groningen  $C_m$  omdat het reservoirgesteente minder poreus is in dit gebied.

**Pieterzyl-Oost:** Op een diepte van ongeveer 3300 m bevindt zich het Pieterzyl-Oost voorkomen met een gemiddelde reservoirdikte van 100 m. Het voorkomen is nog niet in productie genomen. De verwachte  $C_m$  is lager dan de Groningen  $C_m$  op basis van de lagere porositeit in dit gebied.

**Wieringa:** Het Wieringa voorkomen bevindt zich op een diepte van ongeveer 3600 m met een gemiddelde reservoirdikte van 108 m. Het voorkomen is in 2014 in productie genomen. De verwachte compactiecoëfficiënt ( $C_m$ ) is lager dan de Groningen  $C_m$  op basis van de lagere porositeit in dit gebied.

### 6.2.1 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 28. 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. De waarde van de compactiecoëfficiënt die het best past met de waarnemingen varieert van  $0,4 \cdot 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$  tot  $0,7 \cdot 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$ .

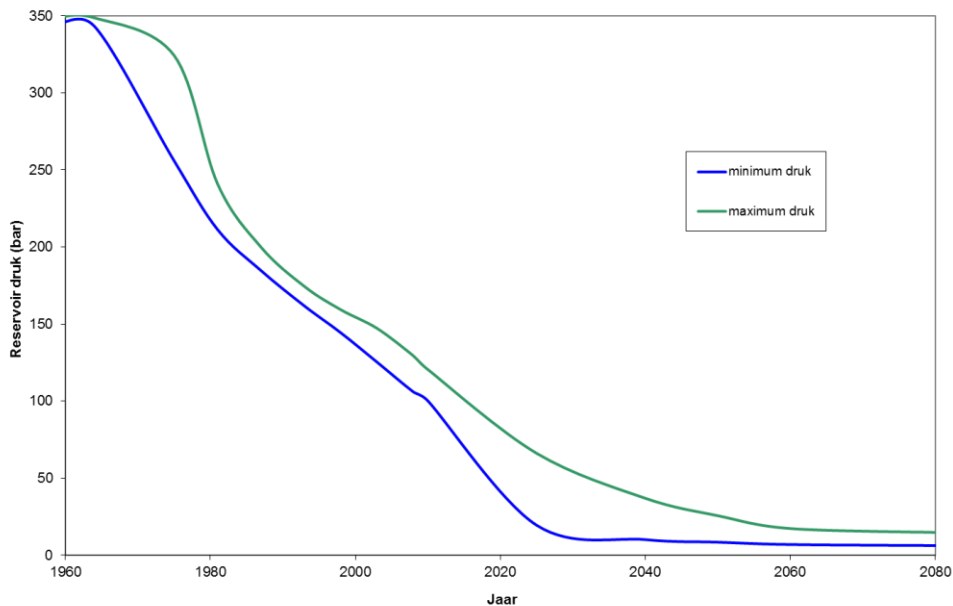


**Figuur 28** Schematische weergave van de geologie van het Groningen-gasveld.

De drukontwikkeling in het Groningen-veld is gebaseerd op de meest recente Groningen-reservoirstudie (Groningen field review) van 2015 en volgt het zgn. 33 BCM scenario zoals gedocumenteerd in Referentie 10. Er bestaat een kans dat dit scenario in de nabije toekomst zal veranderen. Nieuwe bodemdalingsprognoses voor Groningen zijn dan te vinden in de komende wijziging(en) van het Groningen winningsplan, hoewel de verwachting is dat de invloed van een nieuw productieprofiel beperkt zal zijn op de uiteindelijke drukdaling in het Groningen veld en daarmee ook op de prognoses voor de bodemdaling.

Het reservoir-simulatiemodel wordt gekalibreerd met de gemeten druk en productievolumes van gas, water en condensaat. Evenals in de statusrapportage van 2010 is bij het opstellen voor de prognose van 2050 uitgegaan van een gemiddelde velddruk van 15 bar. Voor 2080 wordt voor het Groningen-veld uitgegaan van een einddruk van circa 10 bar.

Figuur 29 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 zal ertoe leiden dat het drukverloop tussen het zuiden en het noorden verder zal toenemen.



**Figuur 29** 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	Initiële druk (bar)	Huidige druk (bar)	Einddruk* (bar)	Cm gemiddeld (10 <sup>-5</sup> /bar)	Gemiddelde delpleterende dikte (m)
Anjum	✓	1997	563	249	210	0,91	113
Annerveen	✓	1973	346	22	17	0,45	119
Appelscha	✓	1999	303	106	106	0,48	93
Assen	✓	2007	337	166	145	0,50	13
Bedum	✓	1985	345	82	50	0,52	220
Blija Zuid	✓	2011	377	310	165	0,90	112
Blija Zuid Oost	✓	2001	377	244	171	0,57	108
Blija-Ferwerderadeel	✓	1985	377	252	214	0,8	120
Blijham	✓	1984	417	47	27	0,54	75
Boerakker	✓	1998	338	39	32	0,67	190
Burum Oost		2014	421	418	418	0,54	105
Een	✓	2005	299	213	189	0,49	45
Eleveld	✓	1975	377	23	20	0,47	100
Engwierum	✓	2002	420	225	225	0,60	103
Ezumazijl	✓	1999	493	479	476	0,7	115
Faan	✓	2009	387	196	84	0,56	204
Feerwerd	✓	2000	404	252	161	0,58	115
Gasselternijveen	✓	2008	565	260	144	0,3	12,5
Grijskerk UGS	✓	1993	393	333	50	0,56	210
Groningen	✓	1963	347	95	19	0,64	162
Grootegast	✓	1979	334	41	20	0,74	150
Harkema	✓	2010	295	142	130	0,57	92
Houwerzijl	✓	2000	423	248	238	0,55	116
Kielwindeweer	✓	2003	381	162	105	0,43	117
Kollum	✓	2002	440	180	109	0,63	94
Kollum Noord	✓	2001	442	90	46	0,73	99
Kollumerland	✓	1989	343	85	80	0,60	90
Kommerzijl	✓	2001	410	134	104	0,56	214
Lauwersoog-C	✓	2012	500	495	486	0,65	116
Lauwersoog-Oost	✓	2008	480	438	395	0,68	101
Lauwersoog-West	✓	2008	479	430	369	0,67	102
Leens	✓	2003	424	153	85	0,56	123
Marum	✓	1978	281	135	127	0,59	121
Marumerlage	✓	-	287	245	245	0,46	126
Metslawier	✓	1997	559	276	191	1,00	102
Metslawier Zuid		2014	553	400	90	0,60	82
Moddergat	✓	2007	567	490	418	0,83	113
Molenpolder	✓	2001	424	125	90	0,53	200
Munnekezijl	✓	1995	424	131	108	0,55	110
Nes	✓	2007	564	469	271	1,03	107
Norg UGS	✓	1983 / 1995	327	317	304	0,57	215
Norg-Zuid	✓	1999	312	110	110	0,48	142
Oostrum	✓	2002	522	129	45	0,59	98
Oostrum Noord		2015	522	290	37	0,57	90
Opende-Oost	✓	1993	292	92	54	0,61	147
Oude Pekela	✓	1995	331	24	9	0,50	70
Pasop	✓	1997	358	140	111	0,59	173
Pieterzijl Oost		-	398	398	107	0,54	100
Roden (blok 1 / 2)	✓	1976	345	90	80	0,57	191
Rodewolt	✓	-	351	342	94	0,54	227
Saaksum(O/W)	✓	1999	412	136/177	83/110	0,59	127/120
Schildhoek		2016	480	480	133	0,50	115
Sebaldeburen	✓	1997	338	35	32	0,50	173
Suawoude	✓	1984	283	51	38	1,0	152

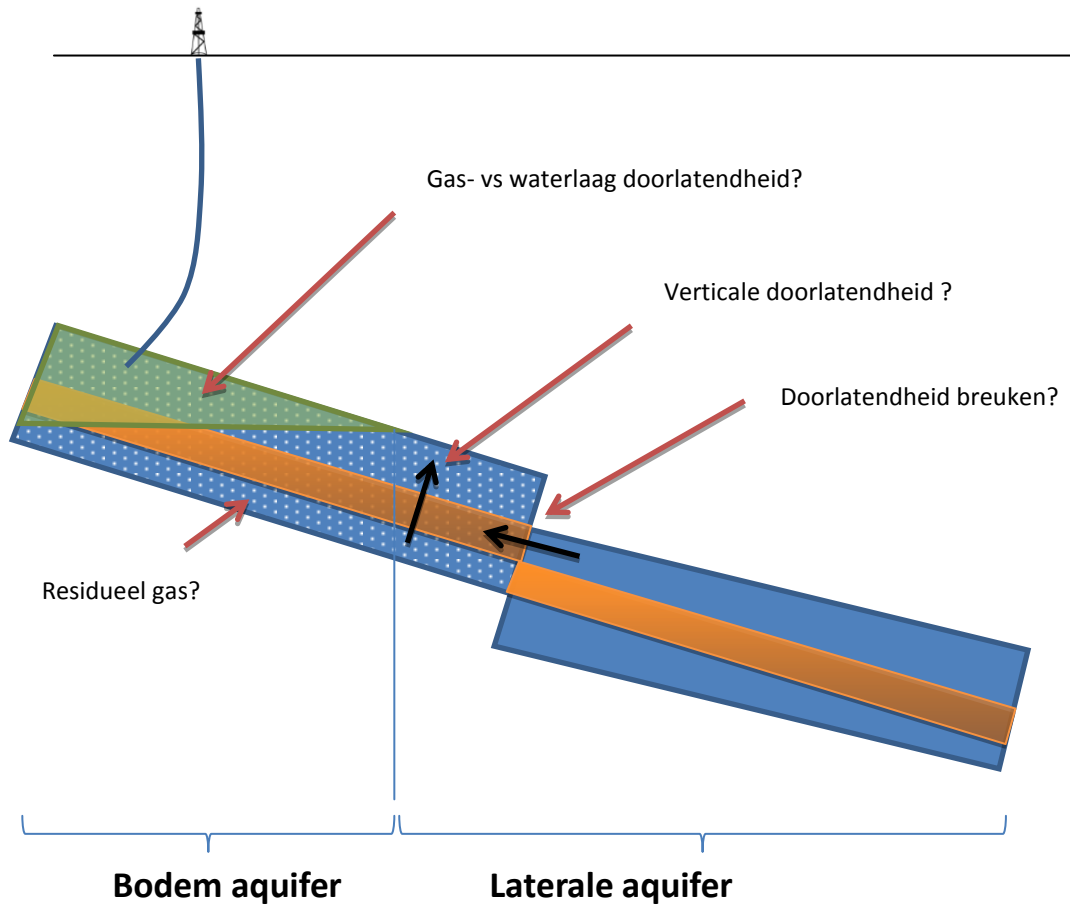
Veld	Opgenomen in vorige prognose(s)	Productie sinds	Initiële druk (bar)	Huidige druk (bar)	Einddruk* (bar)	Cm gemiddeld ( $10^{-5}$ /bar)	Gemiddelde depletierende dikte (m)
Surhuisterveen	✓	2008	292	111	87	0,53	85
Tietjerksteradeel RO	✓	1974	284	17	17	1,4	144
Tietjerksteradeel Vlieland	✓	1977	221	27	18	2,5	30
Ureterp	✓	1978	281	91	77	0,63	125
Usquert	✓	-	347	318	318	0,50	232
Vierhuizen (Oost)	✓	2008	459	432	384	0,74	117
Vries (South/Central/North)	✓	1991	362 / 356/342	266/97/78	222/85/53	0,46/0,52/0,54	145
Warffum	✓	1986	357	160	120	0,60	200
Wieringa		2014	423	226	232	0,55	108
Witterdiep	✓	2007	341	82	82	0,46	118
Zevenhuizen	✓	315	306	40	35	0,52	110
Zuidwending-Oost	✓	2006	347	19	7	0,46	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 drukkaling in de aquifers rondom deze velden is over het algemeen minder dan de drukkaling in het gasreservoir zelf. Een middeling tussen aquifer- en gasdrukken zal leiden tot een hogere gemiddelde druk relatief t.o.v. de drukkaling in alleen het gasreservoir. Voor de velden waar alleen een drukkaling is berekend voor het gasreservoir geldt over het algemeen een lagere eind druk

### 6.3 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 depletierende gasreservoir staan. In plaats van gas zit in de poriën van deze lagen (zout) water. De aquifer onder het reservoir noemen we bodemaquifer. Aquifers lateraal grenzend aan het gasreservoir worden laterale aquifers genoemd (Figuur 30).

Het voorspellen van het drukverloop in de aquifers wordt bemoeilijkt door de onzekerheid die bestaat voor de factoren die een invloed hebben op de doorlatendheid van het water naar het depletierende gasreservoir. Mogelijke factoren hierbij zijn verticale gesteente doorlatendheid, mogelijke breuken die goed of juist slecht doorlatend zijn en residueel gas dat door drukkaling kan uitzetten en zo mogelijke porieverbindingen kan blokkeren.



**Figuur 30 Drukddaling in aquifers en factoren van invloed (tekening niet op schaal).**

Tevens wordt het voorspellen van het drukverloop in de aquifers en met name de laterale aquifers bemoeilijkt doordat er daar geen putten geboord zijn en er dus geen meetgegevens zijn om de modellen aan te kalibreren.

#### *Bodem aquifer*

Het bodemwater onder het gasvoerende gedeelte van het Groningen-reservoir komt voornamelijk voor in het noordelijk deel van het gasveld. Uit drukmetingen in het watervoerende deel is gebleken dat het bodemwater aan dezelfde drukddaling onderhevig is als gevolg van de gasproductie. Voor Groningen wordt deze informatie expliciet meegenomen in de 3D reservoirmodellering. Ook voor de Waddenvelden, Norg en Grijpskerk zijn 3D reservoirmodellen opgesteld. Voor de overige velden wordt een semi-analytisch model gebruikt voor de gasdrukken. Voor de velden gemodelleerd met deze methode, wordt aangenomen dat de drukken in de bodemaquifer evenveel dalen als in het gasreservoir.

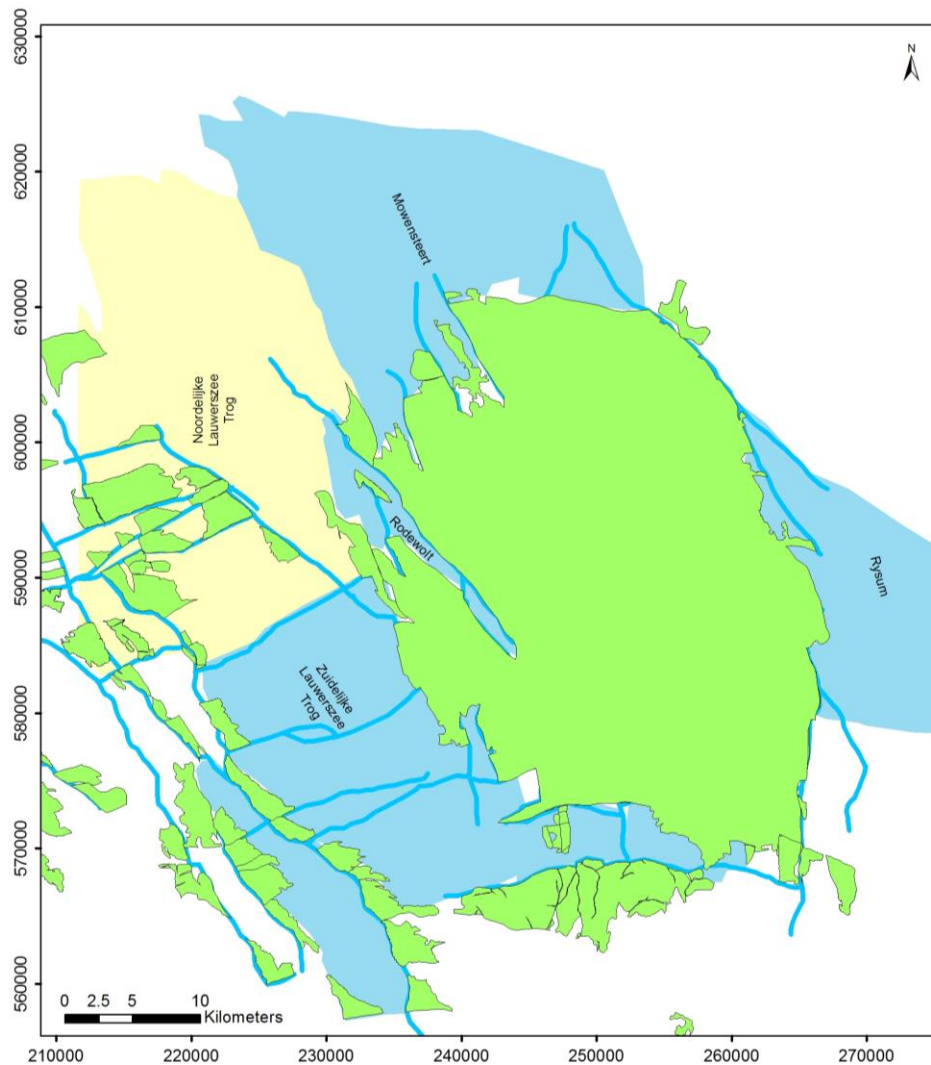
#### *Laterale Aquifers*

Het bepalen van de drukddaling in de aquifers is wellicht nog lastiger. Mogelijke breuken tussen het gasveld en aquifer en/of breuken in de aquifers kunnen de drukddaling sterk beïnvloeden. Voor Groningen is in 2015 een nieuw reservoirmodel gebouwd waarin de laterale aquifers (Figuur 31) rondom het gasveld expliciet worden meegenomen in de



berekeningen. Voor de passing van het model aan de metingen wordt naast de gemeten reservoir drukken, gas / water productie etc. ook de bodemdaling meegenomen om op deze manier de onzekerheid in de drukkaling en grootte van de laterale aquifers te begrenzen.

Voor het bepalen van de toekomstige drukkaling in de laterale aquifers is aangenomen dat de omvang van de aquifers in de toekomst niet zal veranderen. Om de drukkaling in deze aquifers van de meeste kleine velden te bepalen is het huidige percentage van drukkaling ten opzichte van het veld geëxtrapoleerd naar de toekomst. Voor deze velden is voor de eindsituatie aangenomen dat de aquifers uiteindelijk zullen depletieren tot dezelfde reservoirdruk als het gasreservoir (een conservatieve aanname). Voor een aantal middelgrote velden (zoals bijvoorbeeld Anjum en de, Norg en Grijskerk en de Waddenzee-velden) zijn zoals voor het Groningen-gasveld de aquifers expliciet meegenomen in de dynamische reservoir modellering. Eindrukken in de aquifers voor deze velden volgen direct uit de modellering.



**Figuur 31** Schematische weergave van de aquiferzones (in blauw) rond het gasveld Groningen.

## 7 Prognose tot 2080

### *Contourkaarten*

In Appendix I, Appendix II en Appendix III is de verwachte bodemdaling weergegeven als contourkaarten voor respectievelijk de jaren 2025, 2050 en 2080, het jaar waarin de productie uit het Groningen-gasveld volgens het huidige (2013) winningsplan wordt beëindigd. Naar verwachting zal de uiteindelijke bodemdaling in het diepste punt boven het Groningen-veld in 2080 circa 47 cm bedragen.

Het productiescenario dat aangenomen is voor de prognoses volgt het 33 BCM scenario zoals beschreven in Referentie 10.

Aangenomen wordt dat de velden Norg en Grijskerk voor lange tijd als UGS-veld 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. Het leegproduceren van de Norg UGS zal een extra bodemdaling opleveren van ongeveer maximaal 10 cm (Figuur 2). De productieprofielen die gebruikt zijn voor de overige velden zijn zeer vergelijkbaar met de profielen die getoond worden in de desbetreffende winningsplannen.

### **7.1 Onzekerheid**

De onzekerheid in de uiteindelijk verwachte bodemdaling veroorzaakt door gaswinning is afhankelijk van de onzekerheden in de invoergegevens en van de betrouwbaarheid van de modellen die de ondergrond beschrijven. Voor wat betreft de onzekerheden in de invoerparameters kan onderscheid worden gemaakt tussen “geologische” onzekerheden in verband met mogelijke variaties in eigenschappen van de ondergrond (compactie model, depleterende reservoir dikte, enz.) en “operationele” onzekerheden, die de marges van in meer of mindere mate beheersbare parameters weergeven (bijv. drukdaling van het gasvoerende reservoirgesteente).

#### *Compactie- en bodemdalingsmodel*

Bij het opstellen van de prognose is uitgegaan van het momenteel best beschikbare compactiemodel, waarbij het verloop met druk wordt aangenomen zoals beschreven in hoofdstuk 6. De gemeten daling sinds de start van de productie en alle tussenliggende meetintervallen wordt gebruikt om de parameters van het compactiemodel van het reservoir zo nauwkeurig mogelijk met behulp van inversie te bepalen.

Voor velden waar reeds significante bodemdaling is gemeten, kan het gebruikte compactie- en bodemdalingsmodel worden getoetst en zijn de modelparameters, gekalibreerd met behulp van inversie. Het gebruikte model zorgt ervoor dat de bodemdaling een vertraging laat zien zowel in de beginfase van de productie als in de eindfase met de gemeten en gemodelleerde drukdaling.

#### *"Geologische" onzekerheden*

De geologische structuren in de ondergrond worden gekarteerd op basis van indirecte informatie (seismiek) en directe informatie (putten). Met name de interpolatie van diepte-informatie tussen de putten introduceert een onzekerheid die verschillend is per veld afhankelijk van de hoeveelheid en kwaliteit van de data. Drukdata die worden genomen in de productiefase van een veld reduceren deze onzekerheid waarbij dit in veel gevallen leidt tot een aanpassing van de geologische structuur. De meeste velden

produceren al geruime tijd waardoor de kans op een bijstelling en de daarmee gepaarde onzekerheid voor de bodemdaling gereduceerd is.

#### *"Operationele" onzekerheden/aquiferactiviteit*

Bij het winnen van aardgas zal de druk in het reservoir dalen. De drukdaling is afhankelijk van de hoeveelheid geproduceerd gas en is dus in zekere mate beheersbaar en te monitoren door middel van regelmatige drukmetingen in productie- en observatieputten. Deze lokale metingen zijn echter slechts een momentopname, alleen representatief voor de druk in de omgeving van de put. Om voor elk veld een schatting te maken van het toekomstige drukverloop in het volledige gasvoerende reservoir en in de aquifers, moet een (dynamisch) reservoirsimulatiemodel worden gebruikt. Afgezien van onzekerheden in de drukdaling in verband met mogelijk veranderende productiescenario's zijn er daarom ook modelmatige onzekerheden die van invloed zijn op de uiteindelijke voorspelling van de bodemdaling. In dit rapport is uitgegaan van het meest waarschijnlijk drukscenario dat het best past bij de gemeten productie- en drukdata voor het betreffende veld.

#### *Onzekerheid van prognose*

De distributie in invoerparameters wordt getoetst aan de bodemdalingsmetingen door het verschil tussen de voorwaartse modellering en de metingen plus hun onzekerheid te bepalen. Hiervoor wordt voor het Groningen veld gebruik gemaakt van een Monte Carlo Markov Chain procedure waarbij de afwijking wordt uitgedrukt in de Root Mean Square (RMS) van de verschillen. De Monte Carlo Markov Chain methode zoekt naar het minimale verschil tussen de realisaties en de metingen. De best passende realisatie heeft de laagste RMS. De uiteindelijke onzekerheid (uitgedrukt in de RMS-bandbreedte) in mogelijke reservoircompactieparameters wordt bepaald door metingen en realisaties te vergelijken. Daarbij wordt gestreefd om een RMS-bandbreedte te vinden die alle meetpunten omsluit. De voorwaartse berekening wordt uitgevoerd met alle mogelijke combinaties van de compactie parameters, rekening houdend met de volledige bandbreedte van deze parameters. Uit de analyse blijkt dat de compactiecoëfficiënt goed begrensd is terwijl de diffusieconstante die zorgt voor de vertraagde respons van de bodemdaling op de drukdaling een grotere onzekerheid kent.

De onzekerheid van de prognose is een combinatie van de onzekerheden in de verschillende modelcomponenten. De waarden die hieronder genoemd worden volgen uit een schatting voor de onzekerheid die ook gehanteerd wordt in de winningsplannen:

- Boven het centrum van het Groningen-veld is de onzekerheidsmarge het kleinst en wordt geschat op 15%.
- Aan de randen van het Groningen-veld en boven de kleinere velden die al langer in productie zijn, is de onzekerheidsmarge ongeveer 25%.
- Voor de nieuw te ontwikkelen velden is de onzekerheid fors groter en moet een marge van 100% worden aangehouden.

Voor alle hierboven genoemde onzekerheden geldt een ondergrens van 2 cm.

#### *Onzekerheid bodemdalingsmetingen*

Niet alleen de berekende bodemdaling heeft een onzekerheidsmarge zoals hierboven genoemd, 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 en wordt voor de prognose een minimale onzekerheid van 2 cm aangehouden. Dat houdt dus niet in dat er altijd van uit moet worden gegaan dat er tot maximaal 4 cm bodemdaling door gaswinning zal optreden in gebieden waar geen contouren getoond zijn, maar wel dat er ook daar verschillen van enkele centimeters kunnen optreden tussen de berekende en de uit de metingen afgeleide bodemdaling door gaswinning. Deze minimale onzekerheid van 2 cm kan soms een overschatting zijn, bijvoorbeeld in gebieden waar de ontwikkeling van de bodemdalingskom al in een vergevorderd stadium is. In andere gebieden, bijvoorbeeld boven aquifers waarvan het toekomstige gedrag nog onzeker is, zal wel rekening moeten worden gehouden met een onzekerheid van 2 cm zolang de metingen nog geen significante daling hebben aangetoond. 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 onzekerheid of dat dit met grote waarschijnlijkheid een overschatting zou betekenen. Vooralsnog is het met de bestaande software helaas niet mogelijk prognoses met een gedetailleerd variërende laterale onzekerheid te maken.

## 8 Conclusies.

- De modellering van compactie is gedaan met een tijdsafhankelijk model. Dit model past beter met de geobserveerde vertraging van de bodemdaling met de drukdaling. De prognose was in 2010 uitgevoerd met het bilineaire compactiemodel. Het verschil tussen de prognoses is echter klein en daarmee is de invloed van het gebruikte compactiemodel gering gebleken.
- De resultaten van de waterpasmeting en InSAR van 2013 hebben aangetoond dat de bodemdaling door gaswinning in de provincies Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe de afgelopen jaren in het algemeen verloopt in overeenstemming met de verwachtingen zoals aangegeven in het status rapport uit 2010 (Referentie 1).
- Het drukverloop in de Groningen aquifers is met behulp van het verbeterde reservoirsimulatiemodel gekalibreerd aan de gemeten bodemdaling. Hiermee wordt de onzekerheid in de drukdaling in de laterale aquifers rondom Groningen gereduceerd.
- Naast bodemdalingmetingen door middel van waterpassingen is door de NAM in samenwerking met de Technische Universiteit Delft de radar interferometrie (InSAR) techniek toegepast om de opgetreden bodemdaling te bepalen. Over de periode 2008 – 2013 komen de resultaten van beide meetmethodes vrij goed overeen.
- De productie van het Groningen-gasveld zal worden voortgezet tot 2080 (voorheen 2070). Volgens de huidige inzichten zal de bodemdaling als gevolg van gasproductie boven het Groningen-gasveld omstreeks het jaar 2080 een waarde tussen de 40 en 54 centimeter op het diepste punt bereiken. Een waarde van 47 centimeter wordt het meest waarschijnlijk geacht.
- De onzekerheidsmarge voor de huidige prognose is niet gelijk over het hele gebied. Zo is op plaatsen boven aquifers waarvan het gedrag (nog) niet goed bekend is en ook boven nieuw te ontwikkelen velden de onzekerheid groter dan op plaatsen waar reeds significante bodemdaling is opgetreden en waar met behulp van inversie van de meethistorie de onzekerheden beperkt konden worden.  
Voor het centrum van het Groningen-veld wordt een onzekerheidsmarge van 15% aangehouden. Aan de randen van het Groningen-veld en boven de kleine velden die al langer produceren is dit 25%. Boven velden die recentelijk in productie zijn genomen of waarvan dat binnenkort zal gebeuren geldt een grotere onzekerheidsmarge van 100%. Additionele bodemdaling door tijdsafhankelijke processen (kruip, na-ijlen) is nog steeds niet goed te kwantificeren. Het effect is echter al grotendeels verwerkt in de bij de modellering gebruikte en mede op inversie van gemeten bodemdaling gebaseerde gesteentecompressibiliteit.

## 9 Referenties

Referentie 1 Bodemdaling door Aardgaswinning. NAM-velden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe. Statusrapport 2010 en Prognose tot het jaar 2070. September 2010. NAM-rapportnummer EP201006302236.

[http://www.commissiebodemdaling.nl/files/nam\\_bodemdalingsrapport2010.pdf](http://www.commissiebodemdaling.nl/files/nam_bodemdalingsrapport2010.pdf)

Referentie 2 Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2014. Mei 2015. NAM-rapportnummer EP201504206417.

Referentie 3 Gewijzigd Winningsplan Groningenveld 2013 met bijlagen

<https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2014/01/17/winningsplan-groningen-wijziging-2013/winningsplan-groningen-wijziging2013.pdf>

Referentie 4 Meetregister Noord-Nederland 2014 (NAM EP201507207215)

Referentie 5 Bodemdaling Groningen op basis van InSAR-waarnemingen 1993-2008 (NAM EP200805220295)

Referentie 6 NAM (2015) Studie naar het tijdsafhankelijke gedrag van diepe bodemdaling in de Waddenzee. NAM publicatie EP2015006213071

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 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 9 NAM (2015) In-situ compaction measurements using gamma ray markers. EP201506209302

Referentie 10 NAM (2015) Hazard and Risk Assessment for Induced Seismicity in Groningen. Interim Update November 2015. EP201511200172

Referentie 11 TNO (2013) A general framework for rate dependent compaction models for reservoir rock, 2013, Report TNO 2013 R11405

Referentie 12 NAM (2012) Bodemdaling Groningen, satellite radar interferometrie, rapportage behorende bij het meetplan Groningen 2010 (EP201203202214)

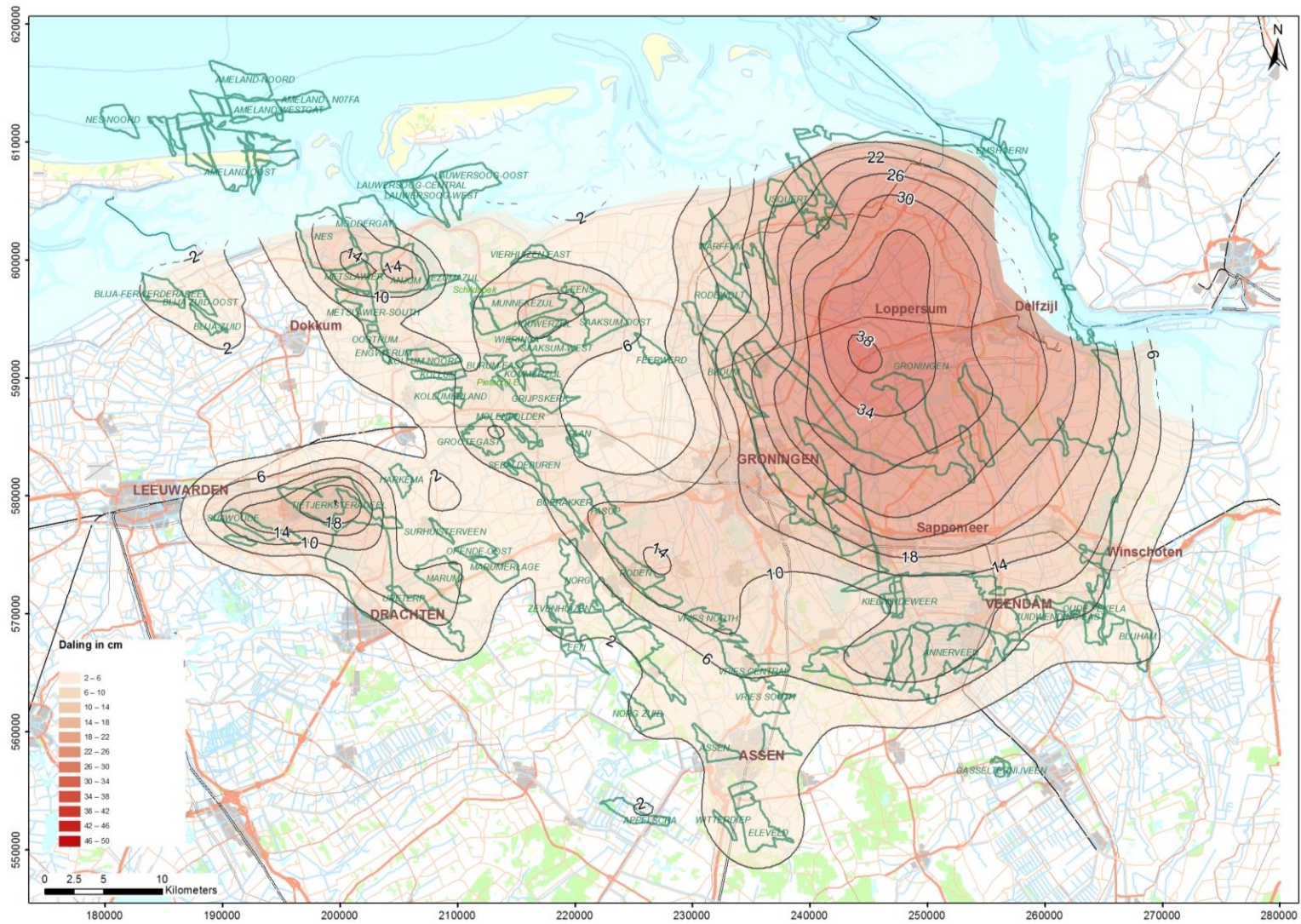
Referentie 13 NAM (2015) Continue GPS hoogtemetingen NAM Groningen, Rapportage oktober 2015 (EP201511206564)

Referentie 14 NAM (2015) Continue GPS hoogtemetingen NAM Grijpskerk, Rapportage oktober 2015 (EP201511206565)

Referentie 15 NAM (2015) Continue GPS hoogtemetingen NAM Norg, Rapportage oktober 2015 (EP201511206566)

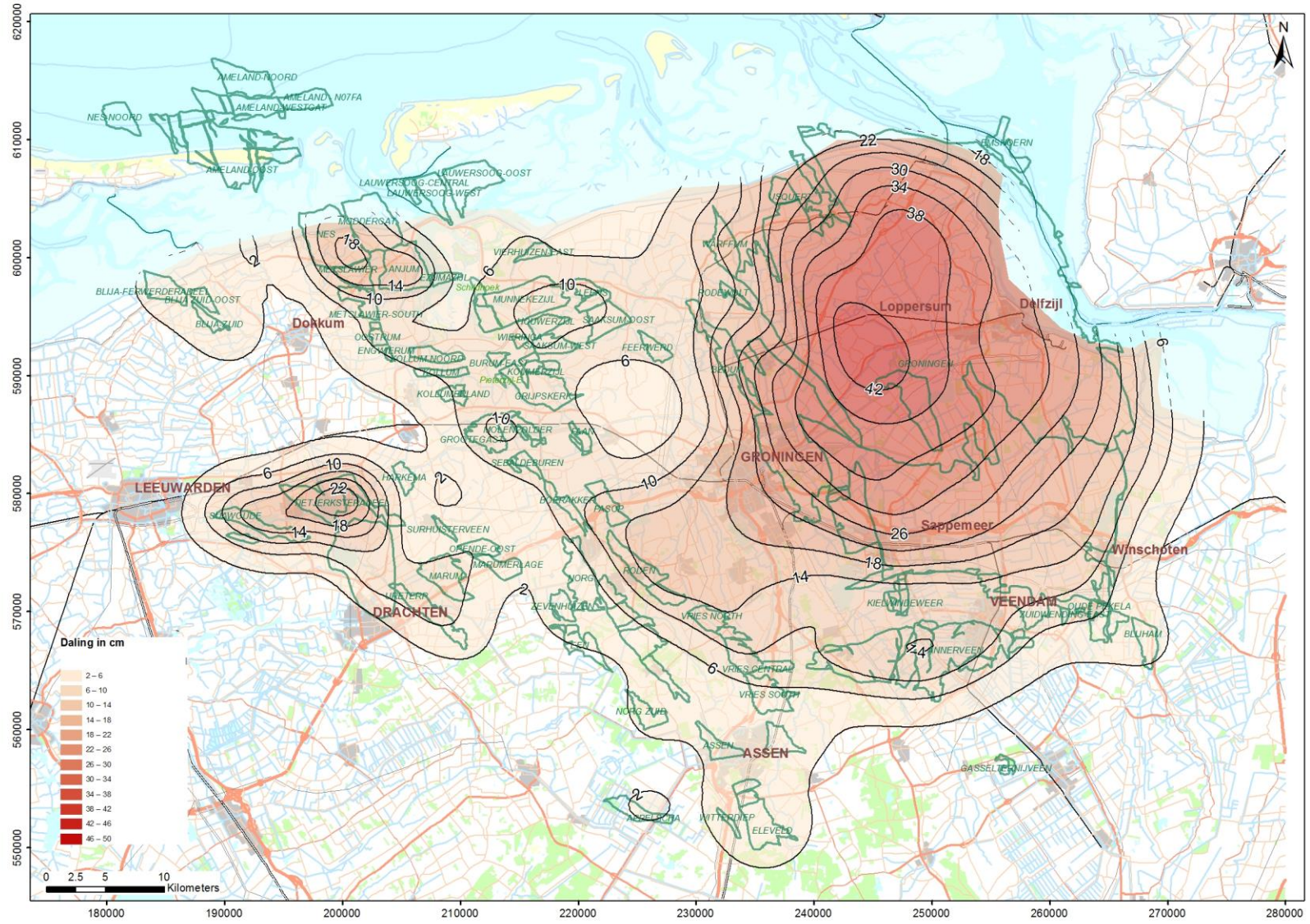


**Appendix I    Prognose voor 2025.**



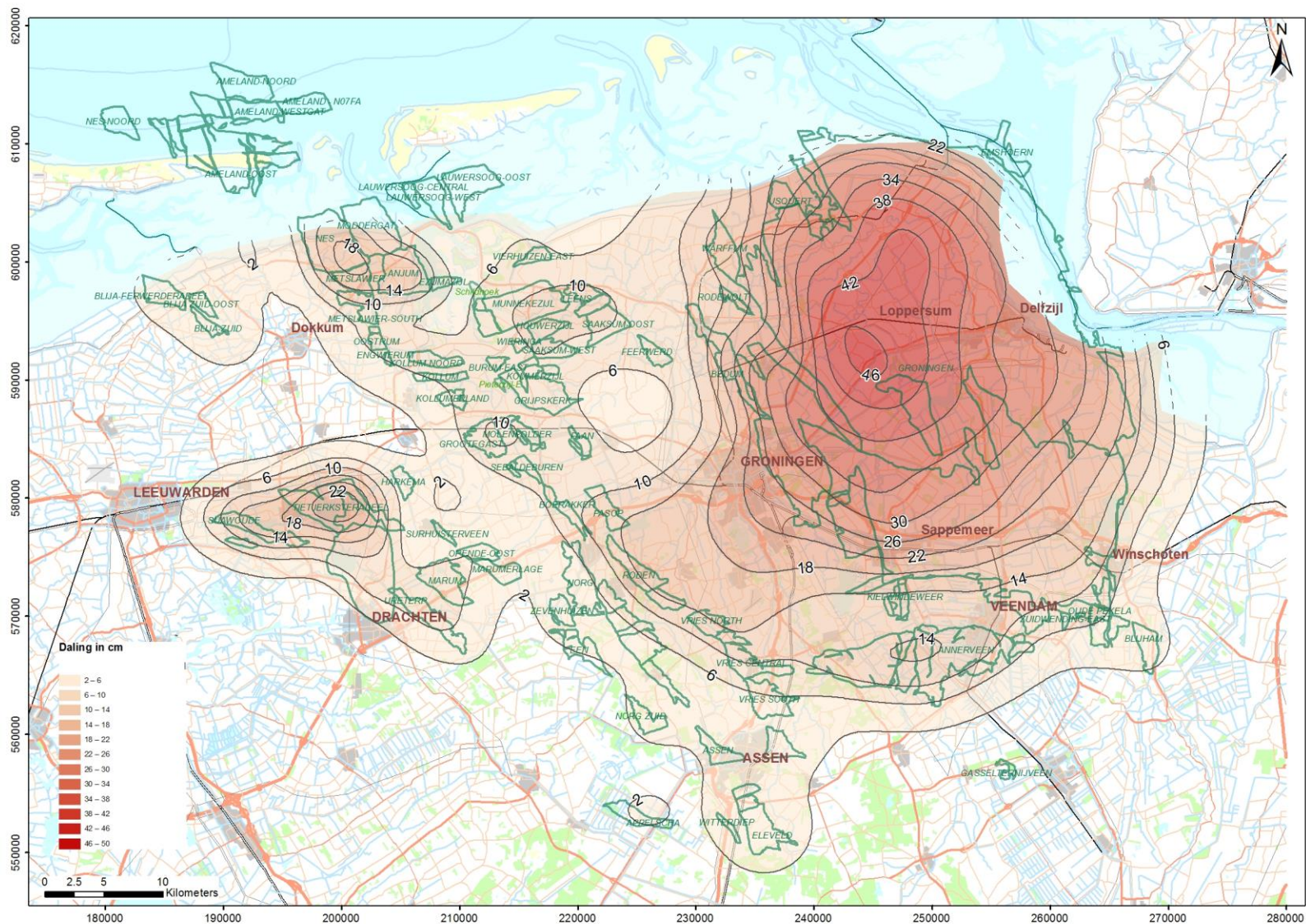


## Appendix II Prognose 2050.



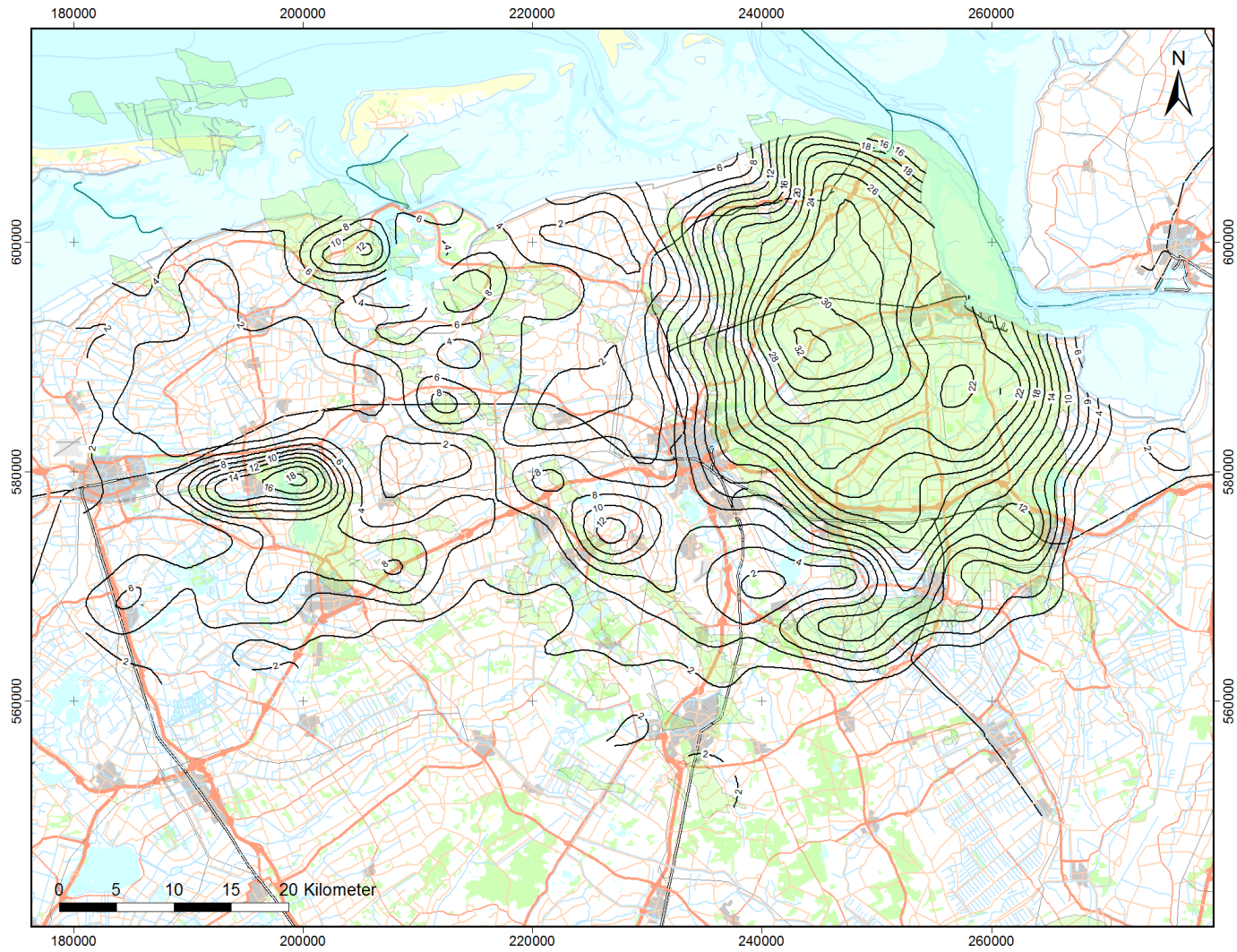


Appendix III Prognose 2080.

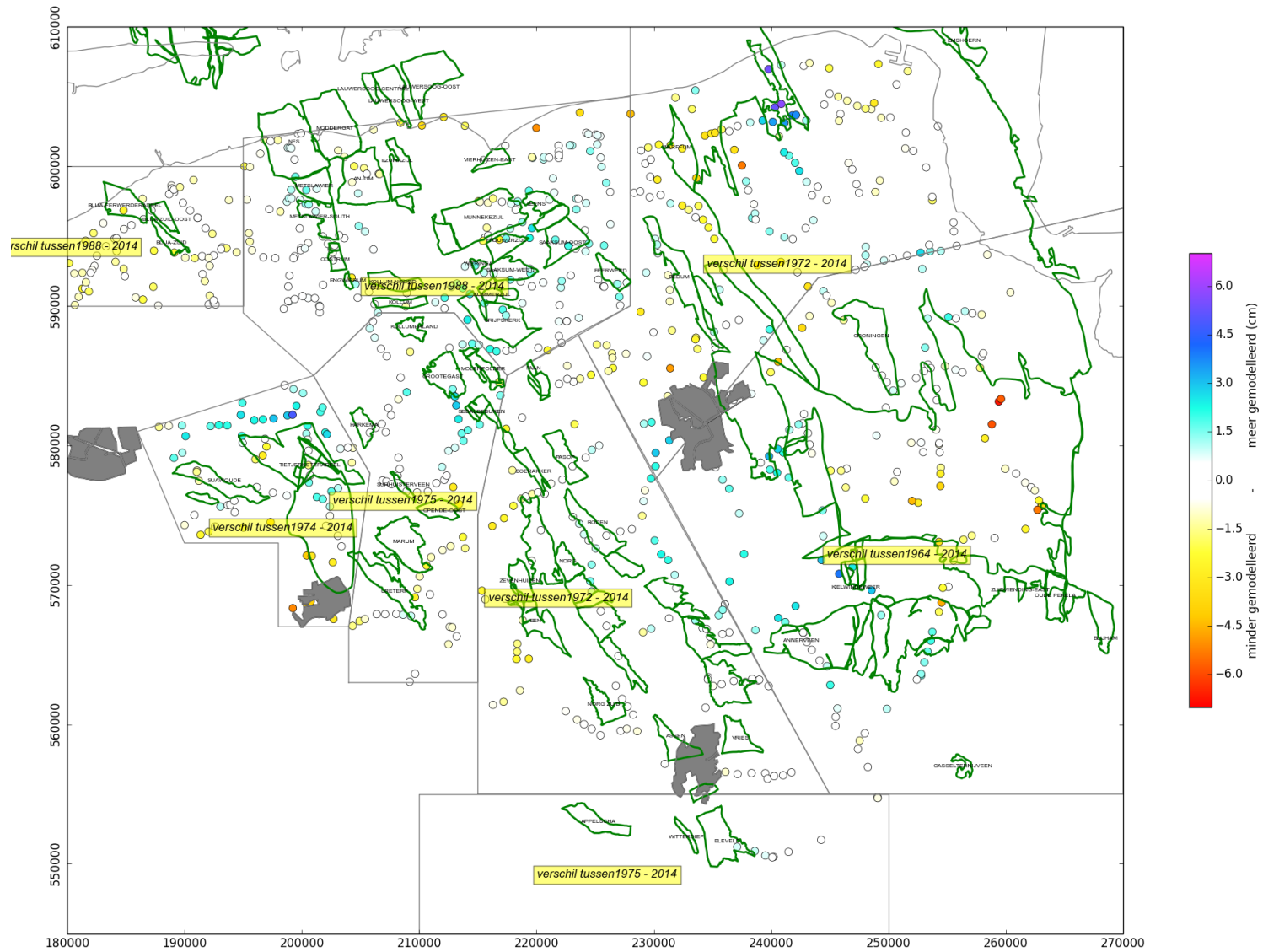




**Appendix IV    Contourkaart van de bodemdaling in 2013 op basis van ruimte-tijd analyse van waterpasdata (cm).**



**Appendix V** Verschilkaart van de gemodelleerde bodemdaling min gemeten bodemdaling (2013) op stabiele peilmerken sinds de start van de winning. Omdat de start van productie varieert per veld varieert ook het jaartal van de eerste meting.



**Appendix VI Gemeten bodemdaling in 2013 op stabiele peilmerken sinds de start van de winning. Omdat de start van productie varieert per veld varieert ook het jaartal van de eerste meting.**

