

Statusrapport
2010 en
Prognose tot
het jaar 2070

September 2010



Bodemdaling door Aardgaswinning

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

EP Document Nummer:
EP201006302236

Document Date:
September 2010

Bodemdaling door Aardgaswinning is een uitgave
van NAM UIE/T/DPE (Bodembeweging)
i.s.m. NAM ITUI/AW (Geodesie)

Grafische vormgeving en begeleiding: Reclameadviesbureau
Unicom bv, Groningen
m.m.v. NAM afdeling Communicatie

© Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. 2010

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.

Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.



Inhoudsopgave

1) Samenvatting	pag. 4
2) Verklarende woordenlijst	pag. 5
3) Inleiding	pag. 6
4) Observaties & nieuwe ontwikkelingen sinds 2005	pag. 8
5) Metingen en analyse	pag. 10
5.1 Metingen	pag. 10
5.2 Differenties	pag. 10
5.3 Stabiliteit	pag. 11
5.4 Hoogterefenties	pag. 12
5.5 Bodemdaling door gaswinning	pag. 12
5.6 Profielen	pag. 14
5.7 InSAR	pag. 16
6) Modelling van compactie	pag. 19
6.1 Laboratoriumexperimenten	pag. 19
6.2 Compactiemetingen in diepe observatieputten	pag. 20
6.3 Compactie-modelparameters bepalen met behulp van inversie	pag. 23
6.4 Toegepaste compactiemodel	pag. 23
6.5 Compactiemetingen van de ondiepe ondergrond	pag. 23
7) Modelling en prognose van de bodemdaling	pag. 24
Bodemdalingsmodel	pag. 24
Invoergegevens van de velden	pag. 24
8) Prognose tot 2070	pag. 32
9) Conclusies	pag. 35
10) Referenties	pag. 36
Bijlagen	pag. 37
Bijlage 1	pag. 38
Bijlage 2	pag. 40
Bijlage 3	pag. 42

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 2005. 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 2008 gemeten bodemdaling gemiddeld kleiner dan 10%. Gezien de onzekerheden die inherent zijn aan de prognose en de metingen, geven deze verschillen geen aanleiding tot aanzienlijke bijstelling van de prognose in dit gebied. Een herevaluatie van de grote laterale aquifers van Groningen bevestigt in het algemeen de aannames die hiervoor voor de vorige prognose waren gemaakt. Reductie van de depleterende reservoirdikte in de aquifers ten noorden van het Groningen-gasveld heeft echter wel geresulteerd in een bijstelling naar beneden van de te plaatse te verwachten bodemdaling. Als gevolg van een aangepaste modellering van de aquifers bij het veld Tietjerksteradeel is de te verwachten bodemdaling daar naar boven bijgesteld. Ook is er sinds 2005 weer een 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 2007 ingediende en door de minister van Economische Zaken goedgekeurde aanpassing van het Groningen-winningsplan geeft aan dat de productie uit het Groningen-gasveld zal worden voortgezet tot 2070 (voorheen 2050). Volgens verwachting zal de bodemdaling in het centrum van de schotel in het jaar 2070 ongeveer 47 cm bedragen. Voor 2050 wordt een maximale bodemdaling van 45 cm verwacht, iets hoger dan de 42 cm die in 2005 voor het jaar 2050 was voorspeld.

In 2008 is in Noord-Nederland opnieuw de vijfjaarlijkse grote waterpassing uitgevoerd met het doel de opgetreden bodemdaling door gaswinning te bepalen. Hieruit is gebleken dat de bodemdaling die tot 2008 in het centrum van de schotel boven het gasveld Groningen is opgetreden circa 30 cm bedraagt. Dit is iets hoger dan de verwachting op basis van de prognose die in 2005 werd uitgebracht.

De bodemdaling is berekend voor de jaren 2025, 2050 en 2070, de eindfase van het Groningen-gasveld. In de prognoses zijn de laatste gegevens verwerkt met betrekking tot zowel de parameters van het reservoirmodel, zoals dikte, druk en diepte van de reservoirs, als de parameters van het compactiemodel.

Dit rapport is primair bedoeld voor de besluitvorming over te nemen maatregelen in verband met bodemdaling door gaswinning op land en gaat niet in op bodemdaling in de Waddenzee. De NAM voert elk jaar een meet- en regelcyclus in het Waddenzee-gebied uit om zorg te dragen dat de bodemdaling door gaswinning daar binnen de gebruiksruimte blijft. De resultaten hiervan worden jaarlijks separaat gerapporteerd.

In een samenwerkingsverband met de Technische Universiteit Delft is er sinds 2003 fundamenteel onderzoek verricht naar de toepasbaarheid van radar interferometrie (InSAR) voor het bepalen van de opgetreden bodemdaling. De goede overeenkomst tussen de bodemdaling bepaald met respectievelijk waterpassing en InSAR over de periode 2003 - 2008 toont aan dat InSAR beschouwd kan worden als alternatieve techniek voor het monitoren van bodemdaling.

De metingen die de afgelopen vijf jaar zijn uitgevoerd in de diepe compactieobservatieputten geven aan dat de compactie in het reservoir volgens verwachting lineair verloopt met de reservoirdrukdaling.

2) Verklarende woordenlijst

Aquifer (lateraal)	watervoerend deel van het reservoir gesteente (naast het reservoir gelegen)
Cm	uniaxiale compactiecoëfficiënt; materiaaleigenschap die de mate van samendrukbaarheid aangeeft
Compactie	het samendrukken van het reservoirgesteente door het gewicht van bovenliggende gesteenten
Compressibiliteit	samendrukbaarheid
Depletie	het onttrekken van koolwaterstoffen (gas/olie) of water uit gesteente, waardoor drukdaling optreedt
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 (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 en het totale volume van het reservoir
Probabilistisch	rekenmethode waarin door het berekenen van een groot aantal variaties de meest waarschijnlijke oplossing bepaald wordt
Sintef	Noors instituut voor wetenschappelijk en industrieel onderzoek
TNO	Nederlandse organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek

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.

3) 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 getroffen kunnen worden 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 veldmetingen gedaan.

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 lagen. Deze zogenaamde compactie van het reservoir hangt af van verschillende factoren zoals de materiaaleigenschappen van het reservoirgesteente, de grootte van de drukdaling en de dikte van het depleterende reservoir (figuur 3.1). 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 zeer 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 bodemdaling aan het aardoppervlak slechts een fractie van de compactie van het reservoirgesteente bedragen (figuur 3.2).

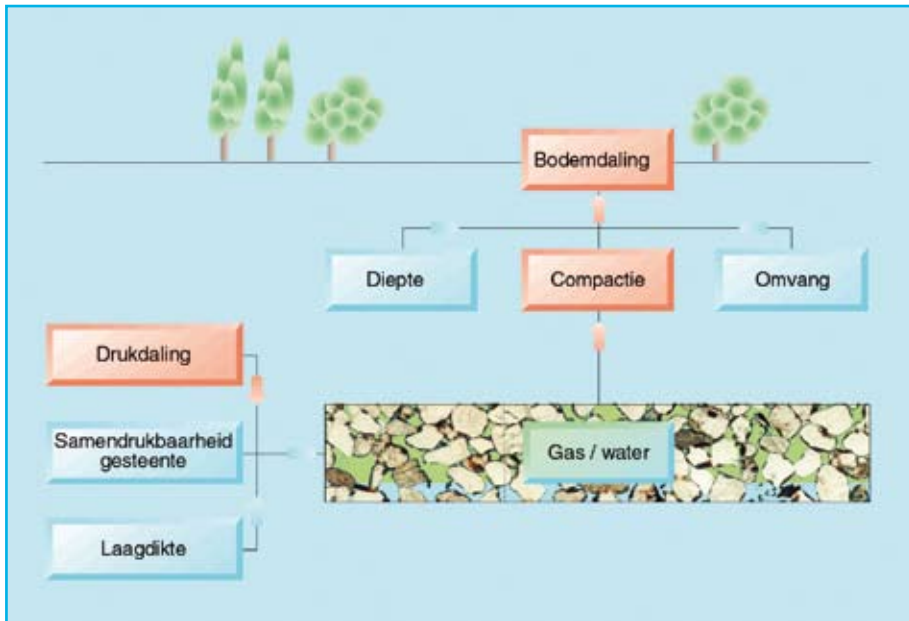
De bodemdalingsschotel van een veld beslaat een groter oppervlak dan het veld zelf (figuur 3.2). In Noord-Nederland zijn veel gasvelden zo dicht bij elkaar gelegen dat de bodemdalingsschotels elkaar overlappen.

De door gaswinning veroorzaakte bodemdaling manifesteert zich in de vorm van een platte, zeer gelijkmatige schotel. Die 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 ontstaat. 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 hoogte van het maaiveld ten opzichte van het zeeniveau, wordt verstoord.

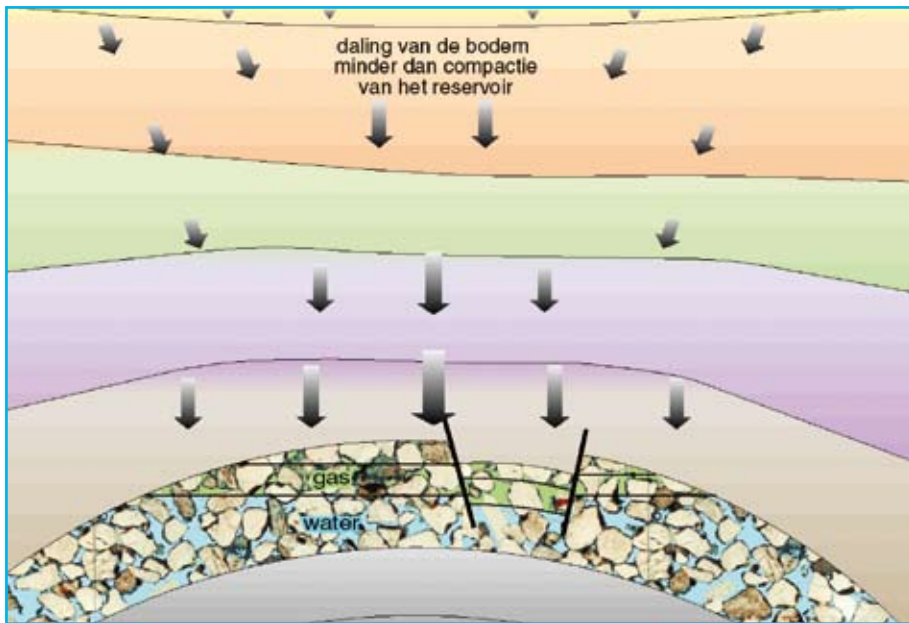
Om een regeling te treffen voor de vergoeding van kosten, die teruggevoerd kunnen worden op bodemdaling ten gevolge van gaswinning in de provincie Groningen, werd op 31 augustus 1983 de overeenkomst Groningen-NAM inzake de regeling vergoeding kosten bodemdaling aardgaswinning aangegaan. Deze overeenkomst 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 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 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.



Figuur 3.1 Drukdaling in het reservoir resulteert in bodemdaling. Factoren van invloed.



Figuur 3.2 De bodemdalingsschotel beslaat een groter oppervlak dan het reservoir. De grootte van de bodemdaling is echter kleiner dan de reservoircompactie.

4) Observaties & nieuwe ontwikkelingen sinds 2005

Omdat het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) nieuwe eisen heeft gesteld aan de analyse van meetgegevens, wordt gemeten bodemdaling – anders dan in het statusrapport 2005 – nu alleen nog voor individuele peilmerken gerapporteerd. Dat heeft gevolgen voor de manier waarop de gemeten bodemdaling wordt weergegeven, zoals met kaarten zonder contouren en met profielen langs gemeten trajecten. Daarnaast zijn er bij de verschillende analysemethodes andere referentiehoogtes gebruikt. Daardoor is, volgens de meest recente analyse van de metingen, de bodemdaling in 2003 (opgetreden sinds het begin van de gasproductie) in het algemeen ca. 1 cm hoger dan in het vorige statusrapport werd vermeld.

De in situ compactiemetingen in het Groningen-veld zijn voortgezet. Over de afgelopen vijf jaar zijn er in drie observatieputten metingen uitgevoerd. In lijn met eerdere observaties blijkt de compactie lineair met de drukkaling te zijn toegenomen (zie hoofdstuk 6).

De laatste jaren wordt de satelliet radar interferometrie (InSAR) techniek ingezet door de NAM in samenwerking met de Technische Universiteit Delft, synchroon aan de waterpascampagnes. Uit faseverschilmetingen van radaropnamen wordt de deformatie geschat van objecten op het aardoppervlak (veelal gebouwen). In dit rapport worden de bodemdalingsprofielen getoond tussen 2003 en 2008 zowel op basis van waterpasmetingen, als op basis van InSAR (Envisat-satelliet). De twee technieken tonen de bodembeweging onafhankelijk van elkaar. Door de grote ruimtelijke en temporele waarnemingsfrequentie (opname interval van de Envisat-satelliet is 35 dagen) kan uit InSAR extra informatie omtrent bodemdalingsgedrag worden gehaald. De duur van de Envisat-satellietmissie is echter korter dan de geplande monitoringsperiode, dus om continuïteit veilig te stellen is de NAM reeds begonnen met het opbouwen van een nieuwe tijdserie van Radarsat-2 beelden.

Zoals in het aangepaste Groningen-winningsplan (Referentie 3) is aangegeven, is de NAM voornemens de productieperiode van het Groningen-gasveld te verlengen. Voor dit statusrapport is daarom, naast de bodemdalingsprognose voor 2025 en 2050, ook de bodemdalingsprognose bij geplande abandonnering in 2070 (voorheen 2050) getoond.

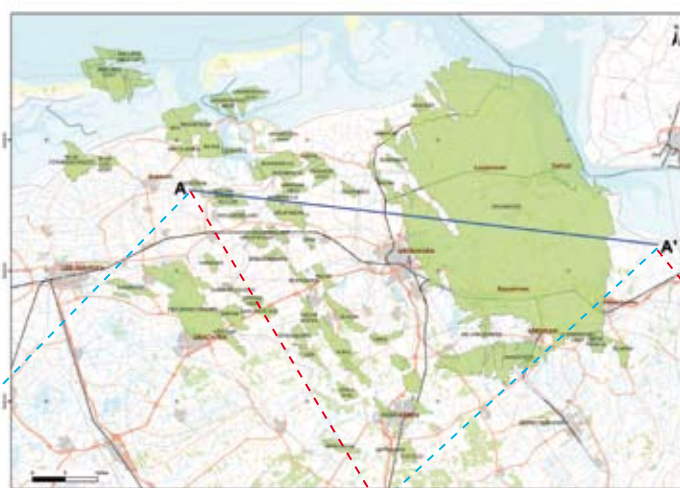
Sinds de vorige prognose zijn de velden Assen, Een, Faan, Gasselternijveen, Harkema, Surhuisterveen, Witterdiep, Zuidwending-Oost, Zevenhuizen en de Waddenzee-velden Nes, Moddergat, Lauwersoog-West, Lauwersoog-Oost en Vierhuizen-Oost in productie genomen. Op sommige velden is compressie geïnstalleerd, waardoor er meer gas geproduceerd kan worden. In 2009 is een integrale studie uitgevoerd naar de laterale aquifers van het Groningen-veld. Hierbij is de doorlatendheid van de randbreuken van het gasvoerende reservoir met de laterale aquifers opnieuw bekeken. De inversieresultaten van de gemeten bodemdaling zijn hierbij meegenomen. Over het algemeen kwamen de resultaten overeen met de conclusies van de aquiferdepletie-evaluatie die voor de rapportage van 2005 was uitgevoerd. Wel heeft een herevaluatie van de geologie geresulteerd in een reductie van de depleterende diktes in het model van de laterale aquifers ten noorden van het Groningen-veld. De gemodelleerde bodemdaling in het noorden van Groningen is hierdoor verminderd.

De bodemdalingprognose voor het Tietjerksteradeel-veld is gecompliceerd omdat er gas uit zowel de Slochteren-zandsteenformatie als uit de Vlieland-formatie wordt geproduceerd. De modellering van de drukkaling van de laterale aquifer van het Slochteren-reservoir is herzien, rekeninghoudend met de ter plaatse gemeten bodemdaling, hetgeen resulteerde in een verhoogde gemodelleerde bodemdaling boven het Tietjerksteradeel-veld.

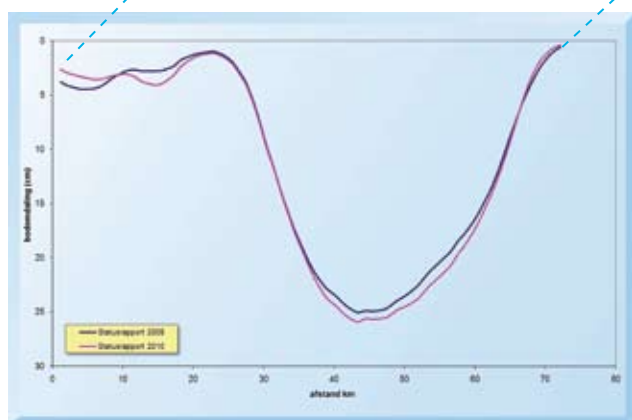
Als onderdeel van de Waddenzee Meet- en regelcyclus 2009 (Referentie 2) zijn behalve voor de velden Anjum en Metslawier voor de nieuwe velden Nes, Moddergat en de Lauwersoog-velden nieuwe geologische en reservoirsimulatiemodellen opgezet. De reservoirsimulatiemodellen zijn vervolgens gekalibreerd met de gemeten druk en productiedata. De resultaten hiervan duiden voor de velden Nes, Moddergat en de Lauwersoog-velden op een significant lagere drukkaling in de aquifers. Deze aangepaste drukkalingen zijn meegenomen in de bodemdalingsmodellen.

In 2005 is voor de modellering en prognose van de bodemdaling gebruik gemaakt van het geomechanische bodemdalingsmodel voor Noord-Nederland dat gekalibreerd was met de resultaten van de toen best beschikbare ruimte-tijd-analyse van de waterpasmetingen tot en met 2003. Volgens de meest recente analysemethode was de bodemdaling in 2003 (sinds het begin van de gasproductie) echter ca. 1 cm hoger dan in het vorige statusrapport werd vermeld. De absolute verschillen vallen weliswaar binnen de onzekerheidsmarge van de prognose en de precisie van de relatieve peilmerkdalingen, maar herkalibratie aan de waterpasmetingen volgens de meest recente analysemethode heeft geleid tot een lichte aanpassing van de parameters in het bodemdalingsmodel. Dit heeft uiteraard een direct effect op de uitkomst van de huidige prognoseberekningen. Voor het centrum van de bodemdalingskom in de provincie Groningen is de verwachte maximale bodemdaling in 2050 nu ongeveer 45 cm. Deze aanpassing valt binnen de onzekerheidsmarge zoals aangegeven bij de vorige bodemdalingprognose. Daarnaast zijn lokaal de verschillen tussen de prognose en opgetreden bodemdaling, met name in het oosten en noorden, iets groter geworden. Wanneer voor het bepalen van de parameters door middel van inversie en kalibratie alleen de gemeten bodemdaling tot en met 2003 wordt gebruikt, komt de prognose zeer goed overeen met het resultaat waarbij voor inversie en kalibratie ook gebruik is gemaakt van waterpasmetingen uit 2008. Dit geeft vertrouwen in deze aangepaste bodemdalingsprognose.

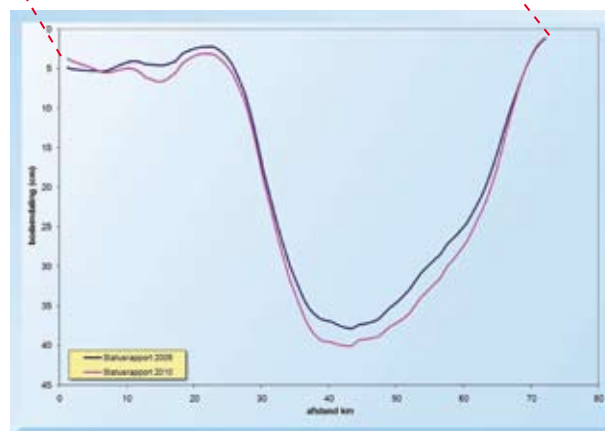
De op grond van bovengenoemde observaties en nieuwe ontwikkelingen sinds 2005 doorgevoerde aanpassingen van de prognose, komt tot uitdrukking in de doorsnede van de bodemdalingskom zoals weergegeven in figuur 4.1 – 4.3.



Figuur 4.1 Overzichtskartaal van de velden die in de bodemdalingsprognose zijn meegenomen, met de doorsnede AA' die in de figuren 4.2 en 4.3 wordt getoond.



Figuur 4.2 Doorsnede van de bodemdalingskom in Friesland en Groningen. Vergelijking van de gemodelleerde bodemdaling in 2010 volgens het statusrapport 2005 en het statusrapport 2010.



Figuur 4.3 Doorsnede van de bodemdalingskom in Friesland en Groningen. Vergelijking van de gemodelleerde bodemdaling in 2050 volgens het statusrapport 2005 en het statusrapport 2010.

5) Metingen en analyse

5.1 Metingen

Om de opgetreden bodemdaling als gevolg van de gaswinning te bepalen worden hoogteverschilmetingen 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 uitgevoerd onder verantwoordelijkheid van de NAM en is gecontroleerd door RWS-DID. Sinds de publicatie van het statusrapport Bodemdaling Groningen 2005 (EP200512202238, Referentie 1) zijn er twee waterpassingen uitgevoerd:



Figuur 5.1

Periode	: Feb-Mei 2006
# Peilmerken	: 283
# Metingen	: 482
# Kilometers	: 176
Meetregister	: Groningen 2006 EP200612203978

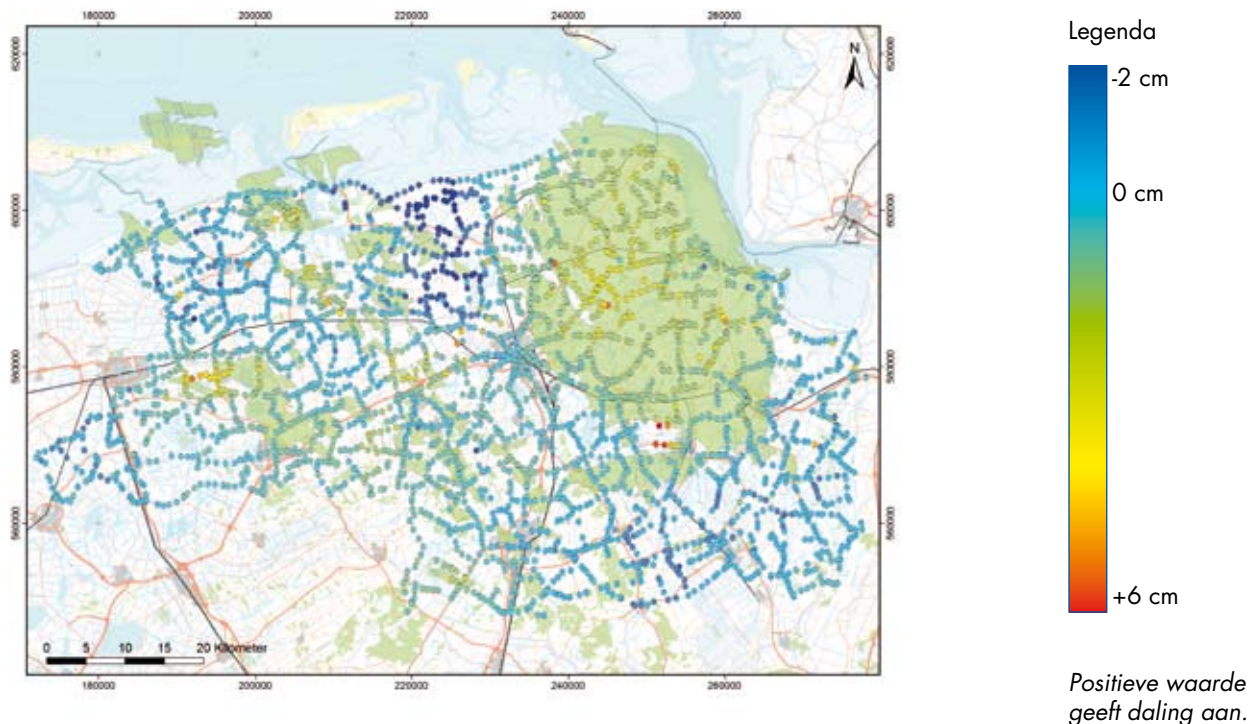


Figuur 5.2

Periode	: Maart-Dec 2008
# Peilmerken	: 3924
# Metingen	: 8462
# Kilometers	: 3223
Meetregister	: Noord-Nederland 2008 EP200903235982

5.2 Differenties

Door het hoogteverschil op twee tijdstippen tussen twee peilmerken van elkaar af te trekken kan de relatieve peilmerkdaaling (differentie) worden berekend. De berekende differenties in een netwerk zijn onafhankelijk van het gekozen referentiepeilmerk. De standaardafwijkingen (~4-18mm) van de differenties nemen echter toe naarmate de peilmerken verder van het referentiepunt liggen. De NAM rapporteert, in lijn met de eisen van SodM, 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. De gerapporteerde differenties uit het meetregister Noord-Nederland 2008 (2003-2008) (Referentie 4) worden weergegeven in figuur 5.3.



Figuur 5.3 Relatieve peilmerkbeweging (cm) 2003-2008.

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.

De resultaten van de ruimte-tijdanalyse 2008 voor het Groningen-gasveld zijn vergeleken met de gerapporteerde verschillen en met de resultaten in het statusrapport van 2005 (eveneens een ruimte-tijdanalyse). Hieruit blijkt dat de resultaten met elkaar overeenkomen binnen de marges van de standaardafwijkingen van de verschillende methoden.

5.3 Stabiliteit

Peilmerken kunnen bewegen door een combinatie van verschillende oorzaken:

- 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).

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. Uit deze definitie volgt dat stabiele peilmerken significant minder snel dalen dan andere peilmerken in de directe omgeving. Vaak zijn er lange tijdseries van gemeten hoogteverschillen voorhanden zodat stabiele peilmerken op een statistisch objectieve wijze kunnen worden gedetecteerd. Rekening houdend met de precisie van de gemeten hoogteverschillen en de vorm van de bodemdalingsskom worden bij deze analyse alle beschikbare gemeten hoogteverschillen gebruikt.

Het resultaat van de stabiliteitsanalyse staat afgebeeld in figuur 5.4. In sommige gebieden zijn aanmerkelijk minder stabiele peilmerken te vinden dan in andere. In de gebieden met minder stabiele peilmerken is vaak ook het verschil in peilmerk daling met de omgeving groter (tot +6.6 mm/jaar). Het merendeel van de geanalyseerde peilmerken vertoont echter relatieve bewegingen van ~0.2 mm/jaar.



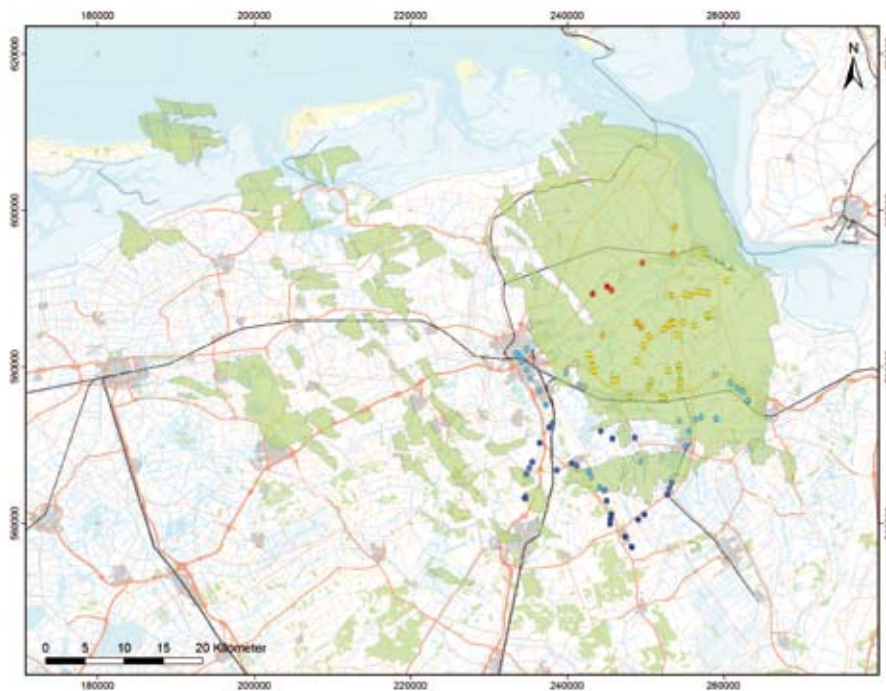
Figuur 5.4 Relatieve peilmerkbeweging (mm/jaar) van de directe omgeving ten opzichte van stabiele peilmerken.

5.4 Hoogterefereenties

Hoogteverschillen tussen peilmerken, en daardoor ook peilmerkhogten en bewegingen, zijn per definitie relatief ten opzichte van een referentie. De keuze voor een hoogterefereentie is in principe vrij. In de praktijk is de hoogterefereentie afhankelijk van de beschikbare metingen/peilmerken en de analysemethode. Zo kan het voorkomen dat twee waterpasnetwerken een verschillende hoogterefereentie hebben. Om relatieve peilmerkbewegingen (differenties) zuiver te bepalen moet voor een eventueel verschil in hoogterefereentie worden gecorrigeerd: een constante waarde voor alle peilmerkhogten en bewegingen. Zo kan het gebeuren dat er een verschuiving van 1 cm is opgetreden tussen de waarden voor de gemeten bodemdaling door gaswinning in 2003 (sinds begin gasproductie) zoals die nu gerapporteerd worden en de waarden zoals vermeld in het vorige statusrapport.

5.5 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 2008 staan afgebeeld in figuur 5.5.



Legenda

0 cm



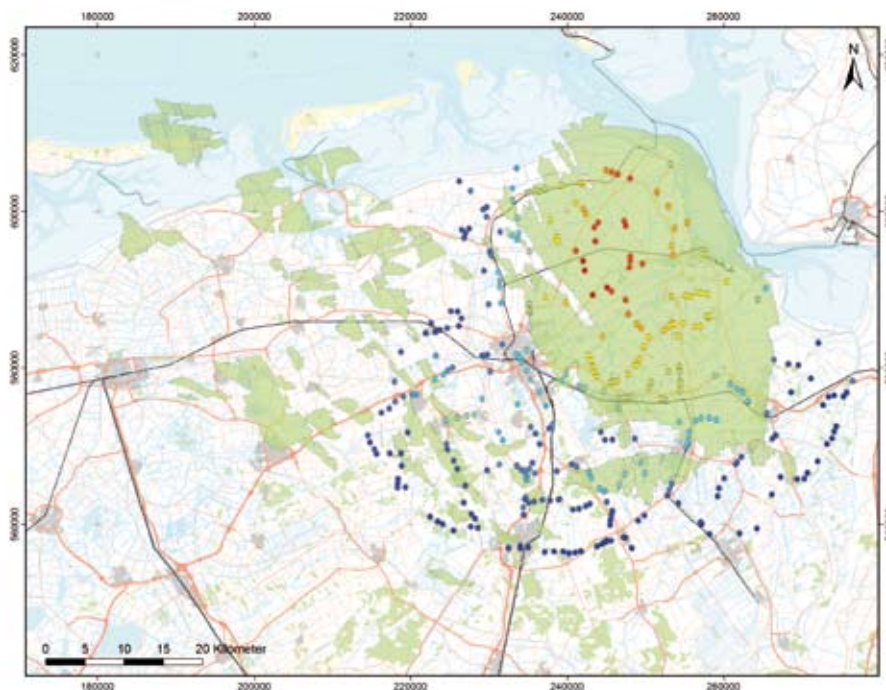
+30 cm

Positieve waarde geeft daling aan.

Figuur 5.5 Relatieve peilmerkbeweging (cm) stabiele peilmerken, 1964 - 2008.

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 2008 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 2008 berekend. Deze worden weergegeven in figuur 5.6.



Legenda

0 cm

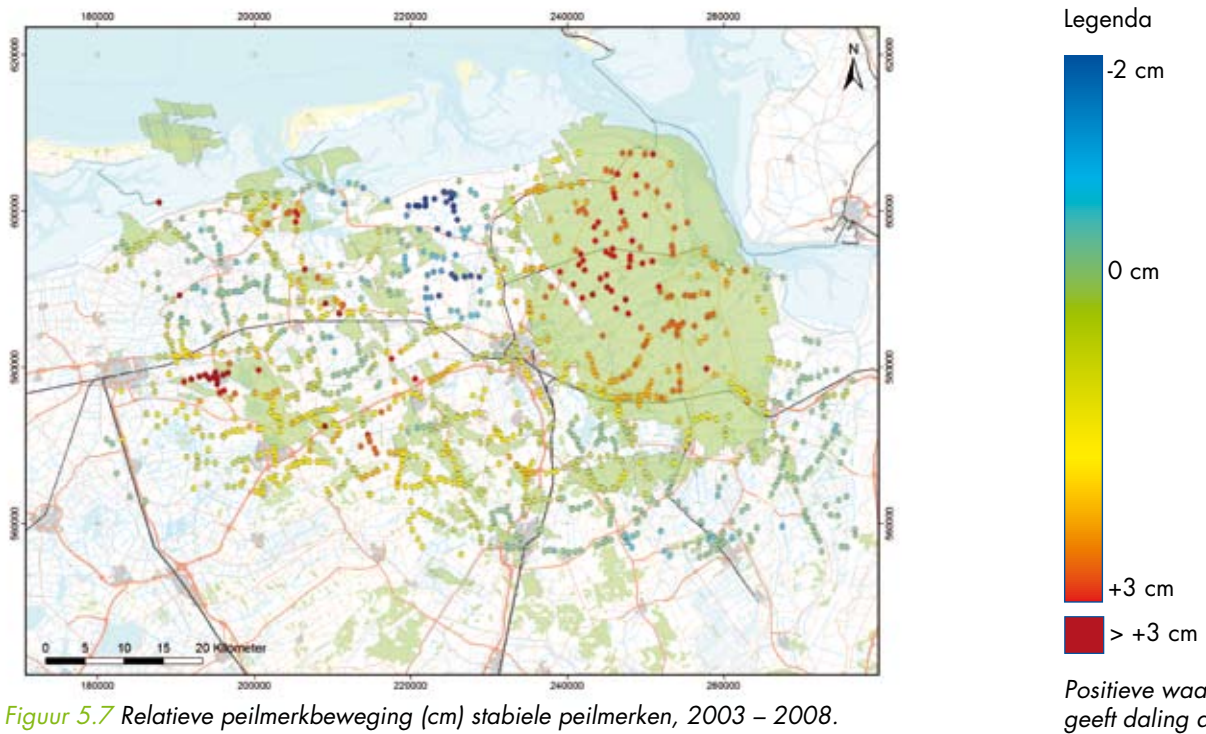


+29 cm

Positieve waarde geeft daling aan.

Figuur 5.6 Relatieve peilmerkbeweging (cm) stabiele peilmerken, 1972 - 2008.

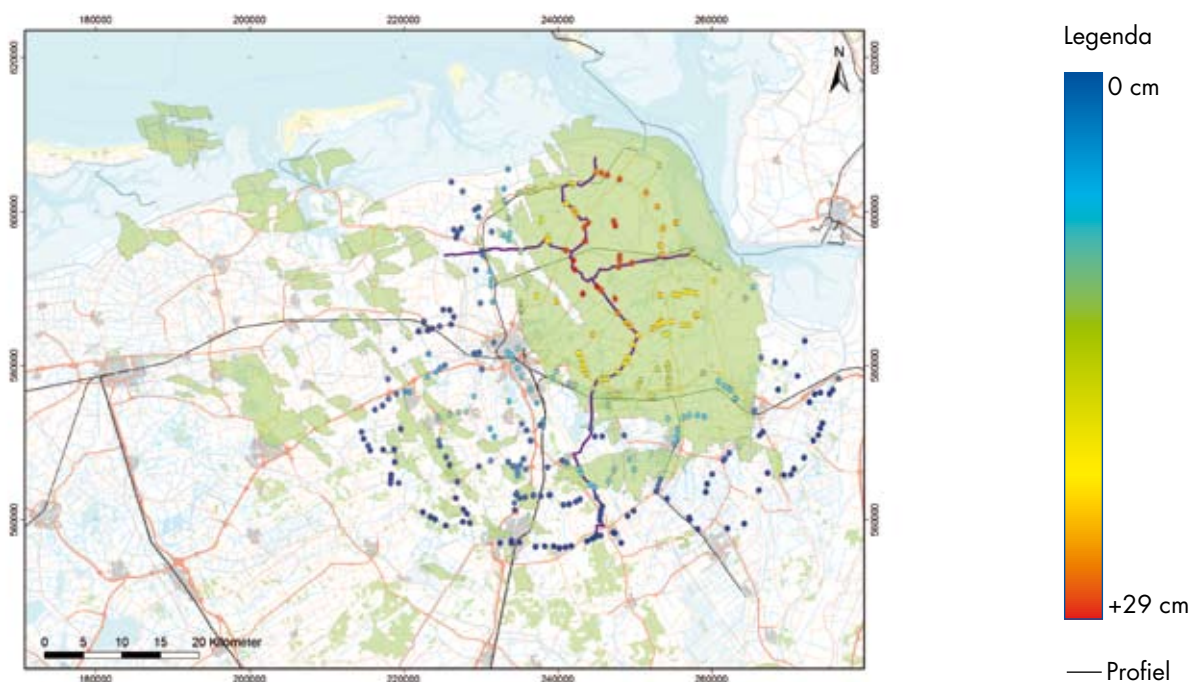
Figuur 5.7 geeft de relatieve peilmerkbewegingen weer tussen de twee laatste grote waterpassingen in Noord-Nederland (2003 en 2008).



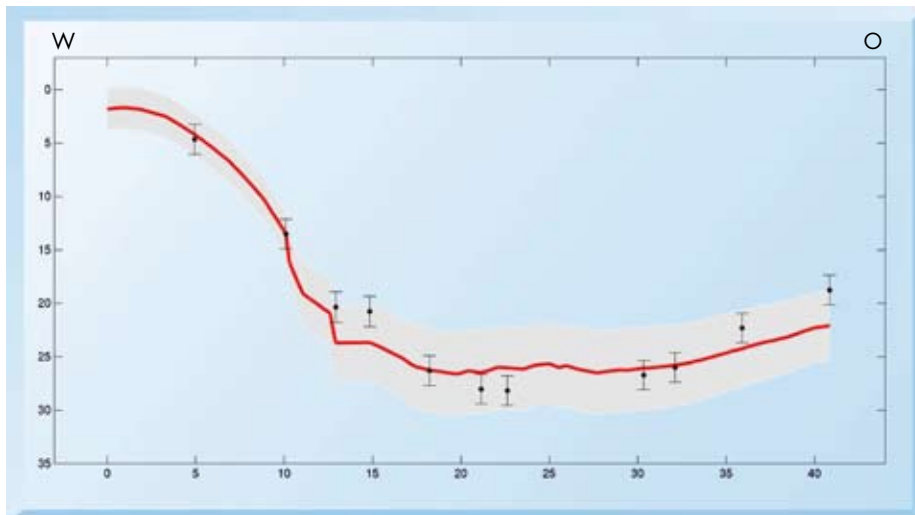
Figuur 5.7 Relatieve peilmerkbeweging (cm) stabiele peilmerken, 2003 – 2008.

5.6 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. Omdat de gemeten bodemdaling niet langer met een (continue) ruimte-tijdanalyse wordt gerapporteerd, 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 5.8. De profielen (west-oost en zuid-noord) zijn weergegeven in figuren 5.9 en 5.10.





Figuur 5.8 Overzicht profielen over stabiele peilmerken 1972 – 2008.



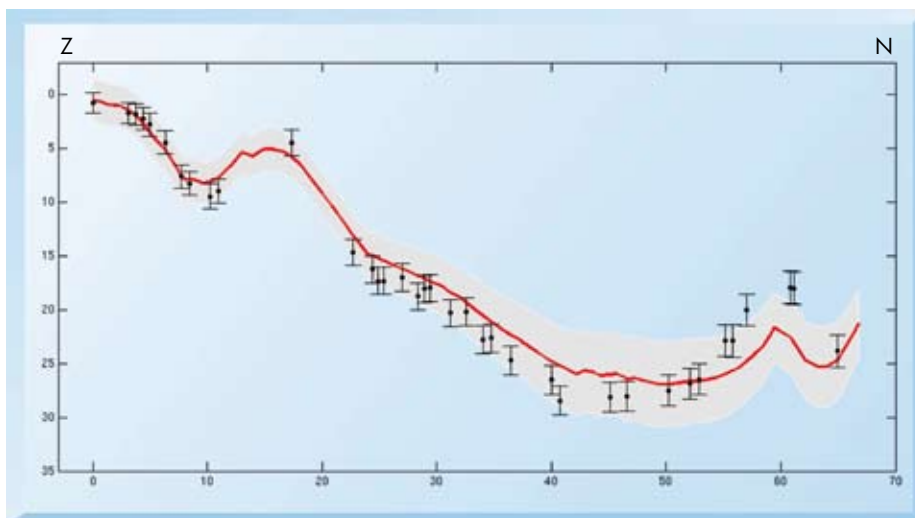
Afstand langs profiel (km)

Legenda

-  Relatieve peilmerkbeweging met precisie (3σ)
-  Prognose met onzekerheidsmarge



Positieve waarde geeft daling aan

Figuur 5.9 West-oost profiel: relatieve peilmerkbewegingen (cm) stabiele peilmerken, 1972 - 2008.



Afstand langs profiel (km)

Legenda

-  Relatieve peilmerkbeweging met precisie (3σ)
-  Prognose met onzekerheidsmarge

Positieve waarde geeft daling aan.

Figuur 5.10 Zuid-noord profiel: relatieve peilmerkbewegingen (cm) stabiele peilmerken, 1972 - 2008.

Uit de profielen blijkt dat de peilmerken op de flanken in het oosten en noorden minder dalen dan verwacht en in het centrum van de schotel juist iets meer dalen dan verwacht. De absolute verschillen vallen binnen de onzekerheidsmarge van de prognose en precisie van de relatieve peilmerkbewegingen.

In figuur 5.11 zijn de bodemdalingscontouren volgens de aan de metingen gekalibreerde modelberekening voor het jaar 2008 getoond (bodemdaling sinds het begin van de gasproductie).



Figuur 5.11 Contourkaart voor bodemdaling door gaswinning opgetreden tussen start van de productie en de waterpassing in 2008, bepaald met het aan de metingen gekalibreerde geomechanisch model.

5.7 InSAR

In de periode van 1 oktober 2003 tot 1 oktober 2007 is in een samenwerkingsverband tussen de NAM en Technische Universiteit Delft (TU Delft) het Fundamenteel onderzoek Radar Interferometrie uitgevoerd. Dit onderzoek vond plaats in het kader van de Regeling Technologische Samenwerking en werd ondersteund met een subsidie van SenterNovem, agentschap van het ministerie van Economische Zaken. In dit onderzoek is de toepasbaarheid van radar interferometrie (InSAR) voor het schatten van de bodemdaling als gevolg van de gaswinning onderzocht.

Bij de InSAR-methodiek worden uit faseverschilwaarnemingen 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. De dichtheid in landelijk gebied (0-25 PS/km²) is dan ook lager dan in stedelijk gebied (> 100 PS/km²). De gemiddelde dichtheid in het gebied in Noord-Nederland dat onderhevig is aan bodemdaling is echter hoog genoeg (~40 PS/km²) om het signaal van de bodemdaling te schatten. De precisie (2-sigma) van een enkele PS-InSAR deformatieschatting is ongeveer 6-10 millimeter. Om de betrouwbaarheid van de techniek te bepalen zijn de deformatieschattingen op basis van waarnemingen uit onafhankelijke, overlappende satellietbanen vergeleken. Hieruit is gebleken dat de gemiddelde bodemdaling in de periode 1992-2005 één millimeter per jaar of minder verschilt tussen de verschillende banen.

Aansluitend is een vergelijking uitgevoerd met de bodemdaling berekend uit waterpassingen tot en met 2008. Hierbij is rekening gehouden met de meetnauwkeurigheid van beide technieken. Alhoewel InSAR en waterpassingen verschillende meetpunten (PS en peilmerken) gebruiken is de correlatie tussen de bodemdaling berekend uit beide technieken 94%.

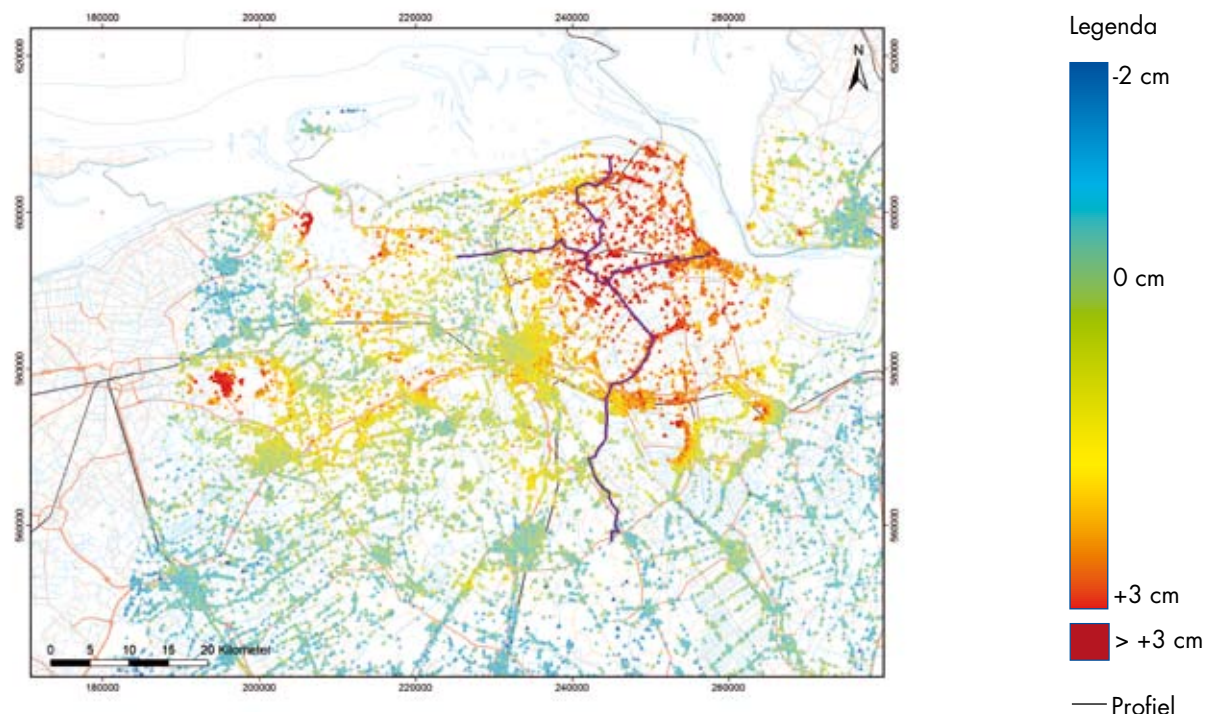
Uit de hoge correlatie tussen deformatieschattingen uit PS-InSAR en waterpassingen blijkt dat InSAR geschikt is als alternatieve techniek voor het monitoren van bodemdaling. Naast het reduceren van veiligheidsrisico's (meten vanuit de

ruimte in plaats van meten langs drukke wegen), is de hogere ruimtelijke en temporele dichtheid (meetfrequentie) een voordeel ten opzichte van de conventionele waterpassingen.

De NAM heeft na afloop van het Fundamenteel onderzoek Radar Interferometrie de samenwerking met TU Delft voortgezet. Als onderdeel van het huidige onderzoek worden per kwartaal updates geleverd voor Noordoost-Nederland. Deze kwartaal updates zijn gebaseerd op de opnamen van de Envisat-satelliet, met een interval van 35 dagen. Voorafgaand aan de grote waterpassing in 2008 kon de bodembeweging daarom al op grond van de InSAR-data worden gerapporteerd. Op basis van de beschikbare Envisat-data tot januari 2008 is de geschatte deformatie tussen de grote waterpassingen (juni 2003 en augustus 2008) aan SodM en de Commissie Bodemdaling Groningen gerapporteerd (NAM: EP200805220295, Referentie 5). Nadat de grote waterpassing in 2008 was afgerond zijn correlaties van respectievelijk 87% en 93% tussen de geschatte InSAR-deformatie en de bodembeweging uit waterpassingen vastgesteld. Deze correlaties komen overeen met de berekende correlaties over een periode van vijf jaar in het Fundamenteel onderzoek Radar Interferometrie.

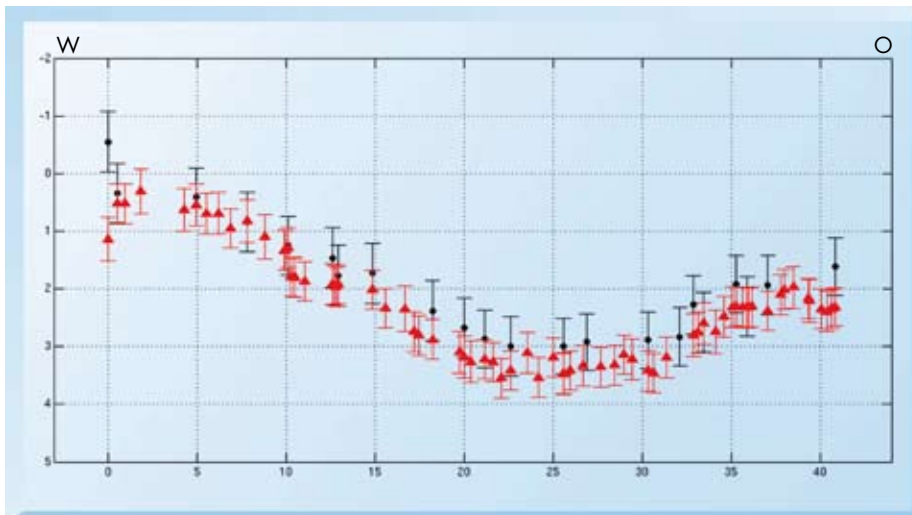
Figuur 5.12 toont de geschatte bodembeweging uit InSAR-waarnemingen tussen juni 2003 en augustus 2008 op basis van de kwartaal-updates tot eind 2008 (na verwijdering van autonoom bewegende scatterers). Omdat de ruimtelijke dichtheid van de scatterers groot is kunnen autonoom bewegende scatterers worden geïdentificeerd op basis van ruimtelijke correlatie.

Figuren 5.13 en 5.14 tonen de geschatte bodembeweging uit InSAR en waterpassingen langs de twee geselecteerde waterpastrajecten (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.



Figuur 5.12 Relatieve beweging (cm) ruimtelijk gecorreleerde Persistent Scatterers uit InSAR, 2003 – 2008.

— Profiel
 Positieve waarde geeft daling aan.



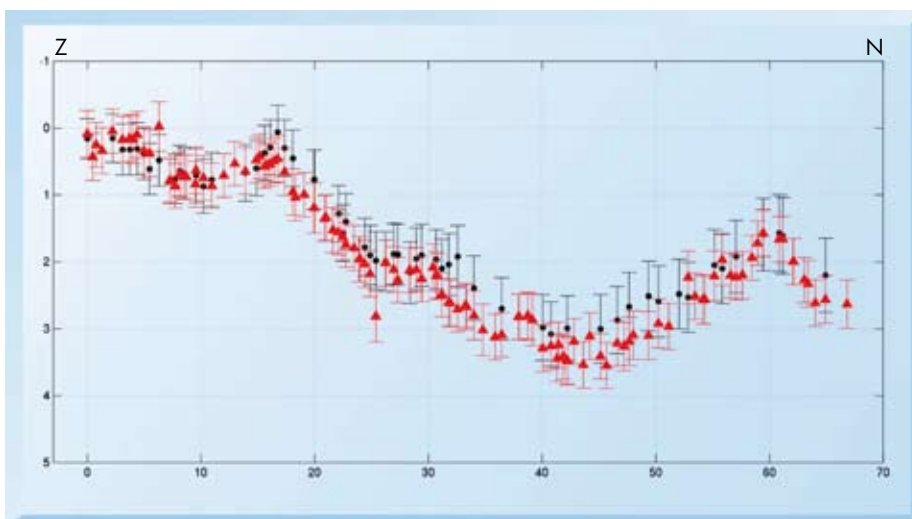
Afstand langs profiel (km)

Legenda

- ▴ PS-InSAR deformatie met precisie (3σ)
- Relatieve peilmerkbeweging met precisie (3σ)

Positieve waarde geeft daling aan.

Figuur 5.13 West-oost profiel: vergelijking PS-InSAR en waterpassingen (cm), 2003 – 2008.



Afstand langs profiel (km)

Legenda

- ▴ PS-InSAR deformatie met precisie (3σ)
- Relatieve peilmerkbeweging met precisie (3σ)

Positieve waarde geeft daling aan.

Figuur 5.14 Zuid-noord profiel: vergelijking PS-InSAR en waterpassingen (cm), 2003 – 2008.

6) Modelling van compactie

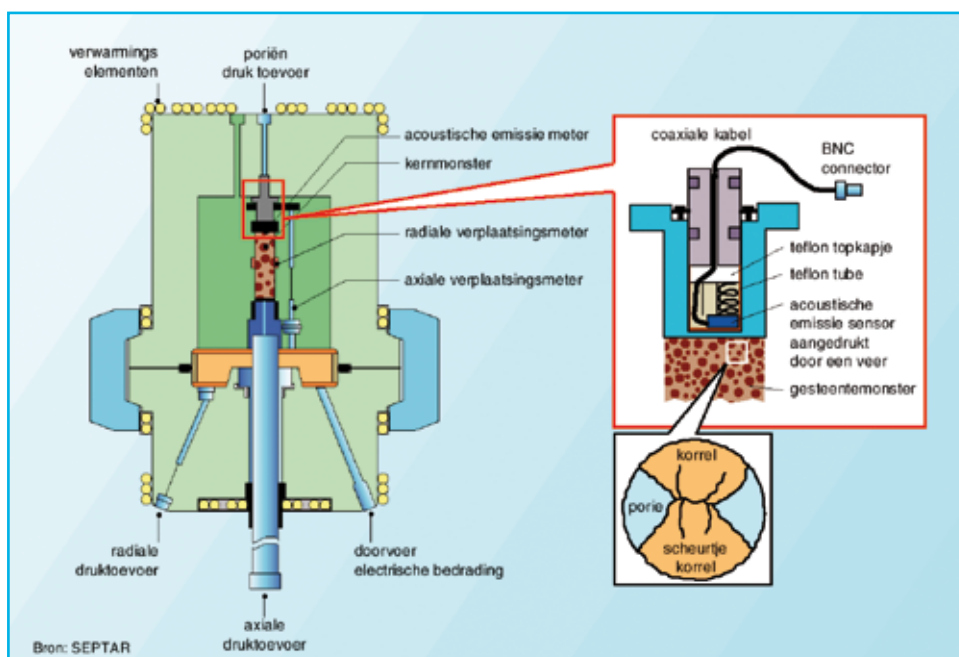
Zoals in de inleiding is aangegeven, veroorzaakt gasproductie uit een gasveld drukdaling in de gasvoerende gesteente-laag, de reservoirformatie. Hierdoor wordt deze formatie langzaam iets samengedrukt onder het gewicht van de bovenliggende lagen. In hoeverre de reservoirformatie wordt samengedrukt, compacteert, 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 gemeten drukken in de productieputten 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 depletende 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. Derhalve moet een empirisch model worden afgeleid uit macroscopische waarnemingen, zoals veldmetingen en compactie-experimenten in het laboratorium.

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.

6.1 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 gesteente in totaal. De monsters worden zo georiënteerd dat ze in het experiment in dezelfde richting vervormd worden als in het reservoir gebeurt. De omstandigheden in het experiment worden zodanig gekozen dat ze overeenkomen met de situatie in het reservoir (zie Figuur 6.1). De verticale en horizontale spanningen zijn gelijk aan die die in het veld heersen, 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 6.1
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. Een mogelijke oorzaak hiervoor is kernschade. Om dit effect te kunnen kwantificeren is uitgebreid onderzoek naar dit proces gedaan.

Modellering van kernschade

Door de NAM, in samenwerking met het Shell-laboratorium in Rijswijk en Sintef Petroleum Research, een kennisinstituut uit Noorwegen, is bestudeerd waardoor kernschade precies wordt veroorzaakt en wat de gevolgen zijn. Onderzocht werd hoe kernschade mogelijk ontstaat door het uitboren en het vervolgens naar het aardoppervlak brengen van het gesteente, waarbij het gesteente een zeer snelle verandering van belasting ondergaat. Om dit te testen werden synthetische gesteentemonsters gemaakt onder omstandigheden die hetzelfde zijn als in het reservoir. Deze monsters werden zo geprepareerd dat hun eigenschappen (bijvoorbeeld grootte van de zandkorrels en porositeit) zoveel mogelijk lijken op de zandsteen in het Groningen-reservoir. Van elke set van twee van deze monsters werd er één onder de omstandigheden zoals in de diepe ondergrond (druk en temperatuur) gehouden en werd het gaswinningsproces direct nagebootst. Bij een tweede monster werd eerst het uitboren uit de diepte en het naar boven brengen van het gesteente nagebootst en werd het compactie-experiment pas daarna uitgevoerd. Hoewel verder onderzoek nodig is om een methode te vinden om voor de ontstane kernschade te corrigeren, werd een duidelijk verschil in compactiegedrag waargenomen. Experimenten met het monster waarbij het uitboren werd nagebootst, gaven een lineaire relatie tussen reservoirdruk en compactie van het gesteente. Dit komt overeen met de resultaten van de compactie-experimenten die zijn uitgevoerd op kernen van de Slochteren-formatie. Echter de experimenten die waren uitgevoerd met het gesteentemonster dat niet was uitgeboord (en dus meer representatief zou moeten zijn voor de situatie in het veld), toonden aan dat de compressibiliteit initieel lager is en dat pas na enige drukdaling een lineaire relatie tussen druk en compactie van het gesteente wordt bereikt. Deze observatie komt overeen met de resultaten van inversie (zie 6.3 en 6.4).

6.2 Compactiemetingen in diepe observatieputten

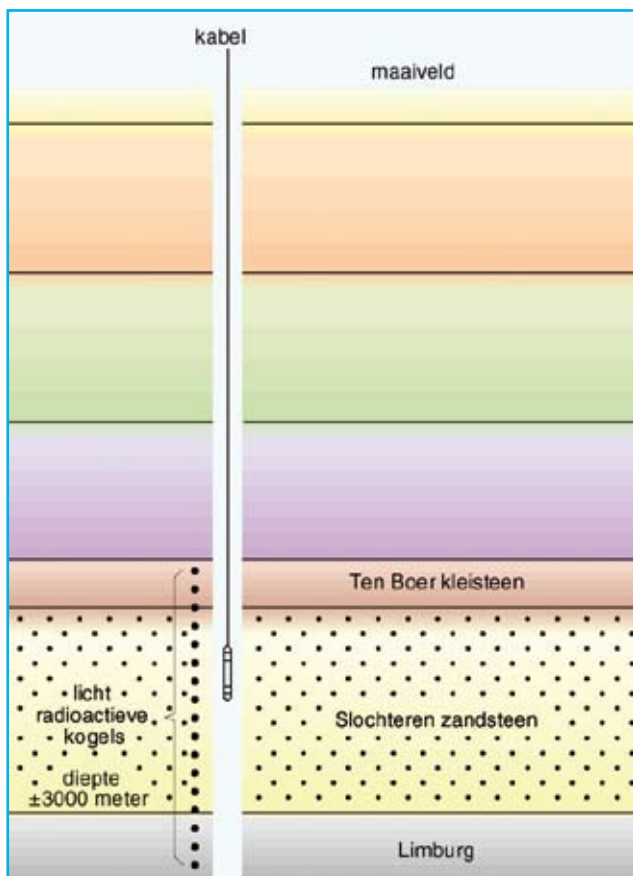
Enkele jaren na het begin van de gasproductie uit het Groningen-veld werd besloten een meetprogramma op te zetten om de samendrukbaarheid (compressibiliteit) van het reservoirgesteente in het reservoir zelf te meten.

Hiertoe zijn in het verleden in elf observatieputten laag-radioactieve kogels om de tien meter over het gehele reservoir geschoten. Van deze observatieputten zijn er nu nog zeven in gebruik (zie Figuur 6.2). Door periodiek de (verandering van de) afstand tussen de kogels te bepalen, kan inzicht in de reservoircompactie worden verkregen. De putten zijn over het veld verspreid, zodat alle variaties in gesteenten vertegenwoordigd zijn. Om informatie te verkrijgen omtrent de 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 precisiedieptemeter 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), waarmee meer nauwkeurige compactiemetingen konden worden gedaan. Om de afstand tussen elk aangrenzend paar kogels te bepalen, wordt het meetinstrument, waarin zich een aantal gammadetectoren bevindt, in het gat gelaten en aan een (elektrische) kabel langs de kogels geleid (Figuur 6.3). Als een van de detectoren zich recht tegenover een kogel bevindt, is het aantal door die detector ontvangen gammastralen per tijdseenheid maximaal. Dit maximum geeft zo de positie van de kogel aan. Het huidige meetinstrument, FSMT, bevat vier detectoren. Wanneer de bovenste twee detectoren de gammastraling opvangen van de bovenste kogel van elk paar, registreren de onderste twee detectoren de gammastraling van de onderste kogel. Uit de onderlinge afstand van de maxima en de afstand tussen de detectoren kan de afstand tussen twee naburige kogels worden berekend. Door deze afstand voor elk paar naburige kogels periodiek te meten en de resultaten te combineren, kan de in het reservoir optredende compactie worden bepaald.



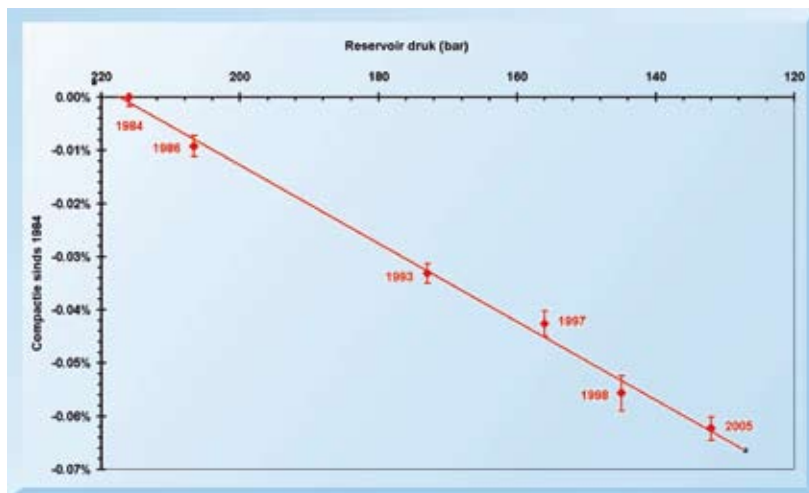
Figuur 6.2 Overzichtskaart van de locaties van de diepe compactieputten en ondiepe compactieputten. De drie putten waarin regelmatig diepe compactiemetingen worden uitgevoerd zijn in rood aangegeven.



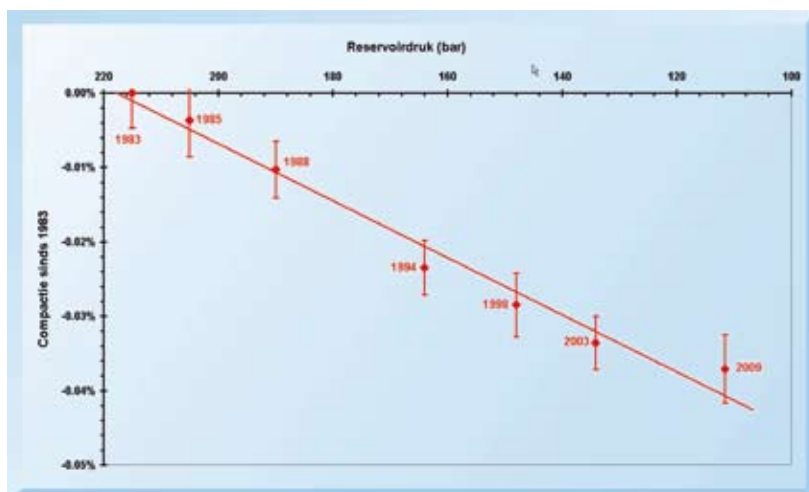
Figuur 6.3 Principe van in situ reservoir-compactiemetingen.

Sinds het begin van de metingen met de FSMT in 1983, is een lineaire toename van de compactie met drukdaling gemeten. Ook uit de metingen die de afgelopen vijf jaar zijn uitgevoerd, blijkt de compactie nog steeds lineair met de drukdaling te zijn toegenomen. De compactiecoëfficiënt (C_m) die uit de metingen in de drie geselecteerde putten is bepaald varieert tussen $0,4 \times 10^{-5}$ en $0,7 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$. In Figuur 6.4 is uit de FSMT-metingen afgeleide compactie als functie van de reservoirdruk weergegeven voor de putten Stedum, Roode Til en De Hond. Hieruit blijkt dat de in situ gemeten compactie sinds 1983 goed beschreven wordt door een lineair compactiemodel.

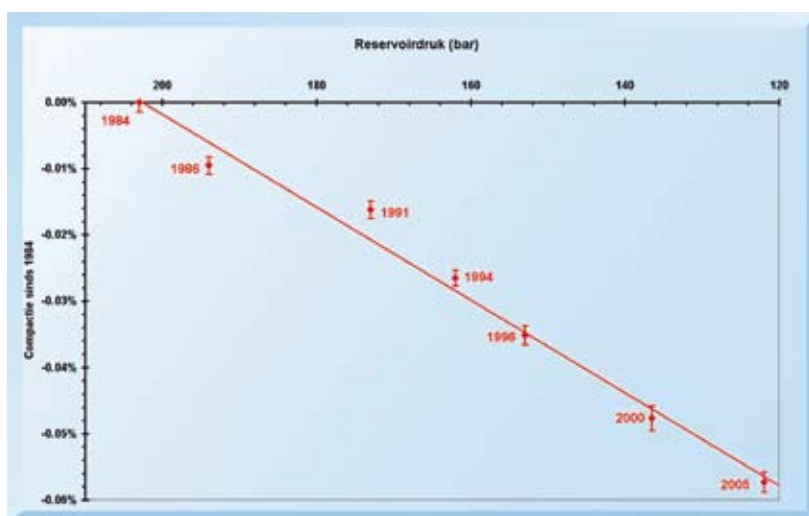
Uit analyse van de resultaten van de FSMT-metingen over de afgelopen jaren blijkt, dat het compactieproces niet wezenlijk verschilt van put tot put. Zoals in de 2000-prognose genoemd, is op grond hiervan besloten om alleen in situ compactiemetingen uit te voeren in drie representatieve, over het veld verspreide, observatieputten, te weten Stedum, Roode Til en De Hond (zie Figuur 6.2). De andere vier putten worden goed onderhouden, zodat ook daarin metingen gedaan kunnen worden als daar aanleiding voor mocht zijn. De momenteel relatief geringe gasproductie uit het Groningen-veld heeft tot gevolg dat het compactieproces zeer langzaam verloopt. Hierdoor is het niet noodzakelijk de regelmatige in situ compactiemetingen in elk van de drie genoemde putten vaker dan eens per vijf jaar uit te voeren.



Figuur 6.4a In situ compactiemetingen Stedum.



Figuur 6.4b In situ compactiemetingen De Hond.



Figuur 6.4c In situ compactiemetingen Roode Til.

Figuur 6.4 Resultaten van in situ compactiemetingen in Stedum, De Hond en Roode Til.

6.3 Compactie-modelparameters bepalen met behulp van inversie

Naast de methode van compactie-experimenten op kernen en in situ compactiemetingen in de observatieputten in het Groningen-gasveld is gebruik gemaakt van een inversiemethode. Inversie houdt in dat uit de gemeten bodemdaling en de geologische structuur wordt afgeleid wat het compactiegedrag van het reservoir in de diepte is. Zoals eerder beschreven is de compactie van de reservoirformatie afhankelijk van de drukkaling, de depleterende dikte en het compactiemodel. Waar veel putten zijn, zoals bijvoorbeeld in het centrum van het Groningen-gasveld, zijn de reservoirdruk en depleterende dikte van het reservoir goed bekend. In dit gebied is inversie gebruikt om het compactiemodel vast te stellen. Dit compactiemodel wordt dan weer toegepast om een betere indicatie te krijgen van bijvoorbeeld de drukkaling in de aquifers van dezelfde formatie.

6.4 Toegepaste compactiemodel

Gebaseerd op met name de resultaten van inversie is voor de velden in Noord-Nederland een zogenaamd bilineair compactiemodel toegepast. Vanaf de start van de drukkaling in het reservoir verloopt de compactie lineair met drukkaling in het reservoir (constante compactiecoëfficiënt; C_{mpre}). Bij een bepaalde reservoirdruk, het transitiepunt (P_{tran}), vindt er een toename van de compressibiliteit plaats waarbij de compactie vervolgens weer lineair met de drukkaling in het reservoir verloopt (constante compactiecoëfficiënt; C_{mpost}). Zowel voor als na het transitiepunt wordt het lineaire compactiegedrag beschreven door:

$$\Delta H = C_m * H_0 * \Delta P$$

ΔH : Compactie (m)
 C_m : Compactiecoëfficiënt (1/bar); functie van de porositeit van de reservoirformatie.
 H_0 : Initiële reservoirdikte (m)
 ΔP : Drukkaling (bar)

Voor het beschrijven van het compactiegedrag van het reservoir moeten de volgende waarden worden bepaald:
 C_{mpre} : Initiële Compactiecoëfficiënt (1/bar) voor $\Delta P \leq (P_{ini} - P_{tran})$
 C_{mpost} : Uiteindelijke compactiecoëfficiënt (1/bar) voor $\Delta P > (P_{ini} - P_{tran})$
 P_{tran} : Transitiepunt (bar)
 P_{ini} : Initiële reservoirdruk (bar)

Dit compactiemodel is hetzelfde model als dat is toegepast voor de vorige prognose. Inversie met de opnieuw geanalyseerde bodemdalingmetingen zoals beschreven in hoofdstuk 5 resulteerde echter in licht aangepaste modelparameters. Inversie geeft aan dat het transitiepunt rond 1983 optrad, omstreeks dezelfde tijd als werd overgegaan van de PDM in situ compactiemeter naar de huidige FSMT-compactiemeting. De compactiecoëfficiënten bepaald met FSMT in situ compactiemetingen in de Groningen-monitoringputten komen goed overeen met de C_{mpost} die door middel van inversie voor het Groningen-veld is bepaald en met tweede cycle compactiemetingen in het laboratorium.

6.5 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 gemeten. De ondiepe compactie werd gemeten tussen 20 m (fundatie meetgebouw) en 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 geëxtrapolerd. 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. Hierdoor wordt de bodemdaling ten gevolge van de ondiepe compactie meegenomen in de totale gemodelleerde bodemdaling.

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/jaar.

7) Modelling en prognose van de bodemdaling

Bodemdalingsmodel

Voor de meeste velden worden de bodemdalingsberekeningen uitgevoerd met behulp van SUBCAL. Dit computerprogramma is gebaseerd op het analytische "Geertsma & Van Opstal Rigid Basement" model, waarbij de enige gesteente-mechanische parameter die van invloed is op de mate waarin compactie in bodemdaling wordt vertaald de Poisson's ratio is (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 5 km diepte wordt aangenomen.

Naast de berekeningen met SUBCAL zijn in het verleden voor het Groningen-gasveld ook bodemdalingsberekeningen uitgevoerd met het eindige-elementenprogramma Geomec, een door Shell en TNO-bouw ontwikkeld programma. Als basis voor deze software is het eindige elementen programma DIANA van TNO gebruikt, waarmee ook eerder bodemdalingsberekeningen zijn uitgevoerd. Een eindige-elementenmethode berekent spanningen en vervormingen in (in dit geval) aardlagen 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. Het 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 over alle combinaties van tijdsintervallen sinds de start van de productie. De probabilistische methode doet een groot aantal berekeningen waarbij telkens de parameters die van belang zijn binnen de onzekerheidsgrenzen worden gevarieerd. Naast de onzekerheid in modelparameters zijn de meetfouten van de metingen meegenomen. Na een groot aantal berekeningen ontstaat dan een beeld van de meest waarschijnlijke oplossing en de onzekerheid.

Het voordeel van de probabilistische methode is dat voor elke parameter aangegeven kan worden met welke mate van betrouwbaarheid deze bekend is en ook welke parameters in bepaalde gebieden het best gekend zijn. Zo zijn bijvoorbeeld in het centrum van het Groningen-veld, waar veel putten zijn, de reservoirdruk en dikte van het veld goed bekend maar heeft de drukkaling in de aquifers waar geen putten zijn geboord een grote onzekerheid.

De meest waarschijnlijke oplossing met bijbehorende onzekerheden wordt gebruikt voor het opstellen van de bodemdalingsprognose.

Invoergegevens van de velden

In het vorige 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 de huidige prognose beperkt de lijst zich tot gasvelden die bodemdaling veroorzaken op het vaste land en waarvoor de gegevens zijn bijgewerkt aan de hand van nieuwe metingen of gewijzigde inzichten. Daarnaast is ook een aantal velden meegenomen die recentelijk in productie genomen zijn of dat binnenkort zullen worden.

De naam, ligging en status van de betrokken velden zijn in figuur 7.1 en tabel 7.1 weergegeven. De basisgegevens die in deze studie worden gebruikt zijn als overzicht weergegeven in tabel 7.1. Deze (gemiddelde) 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) meegenomen.

De variatie in reservoirdruk waarbij de verschillende velden verlaten worden is mede afhankelijk van het productie-mechanisme, het putgedrag, de economische levensduur van een veld en het al dan niet installeren van compressie. In het geval van een actief aquifer zal in het algemeen geen compressie worden geïnstalleerd. De einddruk hangt in dat geval af van het tijdstip waarop het water de putten bereikt. Bij afwezigheid van een actief aquifer zal, wanneer dit economisch verantwoord is, compressie worden geïnstalleerd en zal de einddruk lager zijn. In een aantal gevallen betreft het al dan niet installeren van compressie nog een voorlopige planning die in de toekomst gewijzigd kan worden afhankelijk van het gedrag van het gasveld en nieuwe technische ontwikkelingen.



Figuur 7.1 Overzicht van de gasvelden die in deze prognose zijn meegenomen.

Assen: Op een diepte van ongeveer 3000 m bevindt zich het veld Assen met een gemiddelde dikte van 145 m. Het veld is in 2007 in productie genomen. Het veld depleteert echter enigszins via het Norg-veld. De samendrukbaarheid is lager dan die van het Groningen-reservoir.

Blija-Ferwerderadeel: Het veld is verdeeld in drie blokken en werd in 1985 in productie genomen. De initiële reservoirdruk van het Blija-Ferwerderadeel-veld was 377 bar en de verwachte abandoneringsdruk is 245 bar ten gevolge van de lage doorlaatbaarheid van het reservoir. Een veldstudie die sinds de vorige rapportage van 2005 is uitgevoerd geeft aan dat de dikte van de reservoirformatie die onderhevig is aan drukkaling significant lager is (van gemiddeld 93 naar 38 m) dan bij de vorige prognose was aangenomen. De gesteentesamendrukbaarheid komt overeen met die van het Groningen-gasveld.

Een: Het veld bevindt zich op een diepte van 2725 m en heeft wegens de slechte doorlaatbaarheid een depletende dikte van slechts 10 m. De initiële druk is 299 bar. Het veld dat in 2003 ontdekt is, heeft maar kort geproduceerd en is in 2007 ingesloten bij een einddruk van 131 bar.

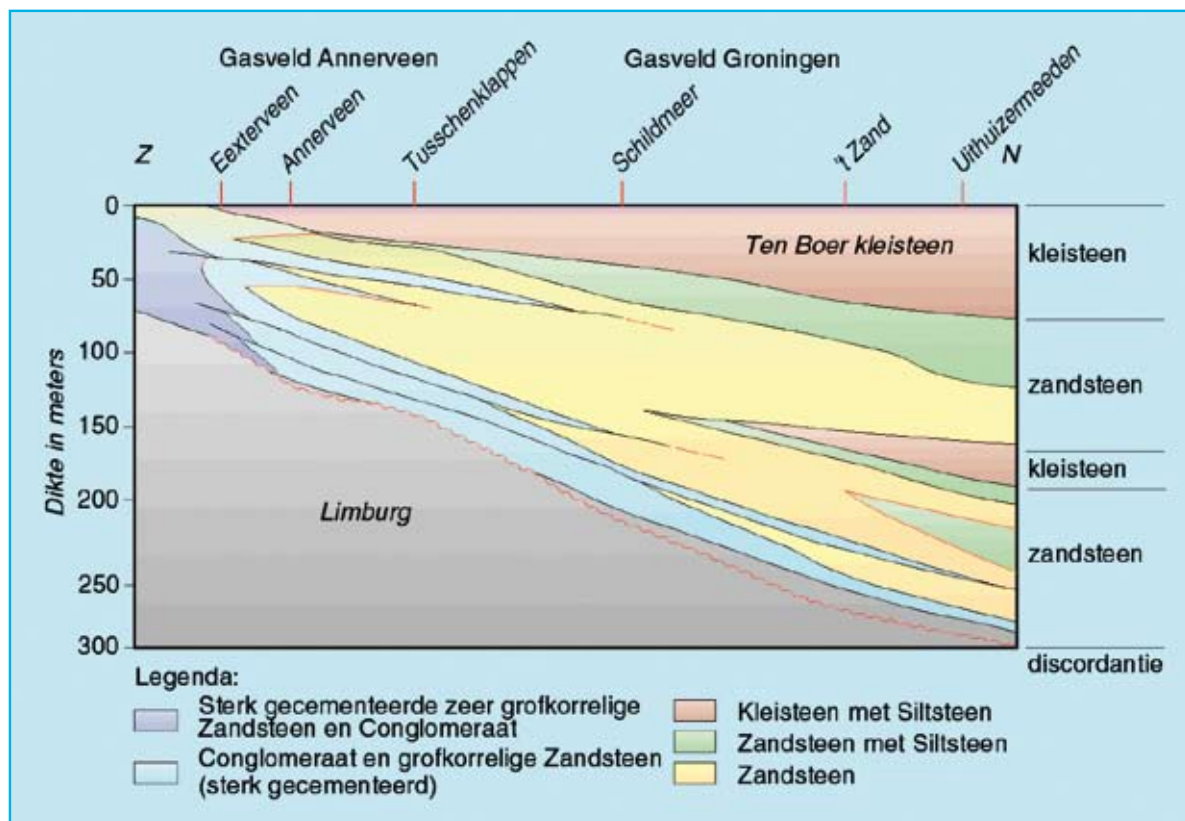
Engwierum: Het veld bevindt zich op een diepte van 3200 m en heeft een gemiddelde dikte van 103 m. De initiële druk was 405 bar. Het veld is in 2002 in productie genomen maar is in 2003 ingesloten vanwege waterproductie.

Faan: Het veld is in 2009 in productie genomen en bevindt zich op een diepte van 3275 m en heeft een gemiddelde dikte van 204 m. De initiële druk is 387 bar en het veld wordt verlaten bij een einddruk van 59 bar. De gesteentesamendrukbaarheid is iets lager dan die van het Groningen-reservoirgesteente

Gasselternijveen: Het veld is in 2008 in productie genomen en bevindt zich op een diepte van 3500 m en heeft een gemiddelde dikte van 20 m. De initiële druk is 565 bar en het veld wordt verlaten bij een einddruk van 25 bar. De gesteente-samendrukbaarheid is lager dan die van het Groningen-reservoirsteente. Het veld produceert uit de Zechstein-2C carbonaatformatie en het produceert zuur gas dat wordt gezuiverd in de Gaszuiveringsinstallatie(GZI) te Emmen.

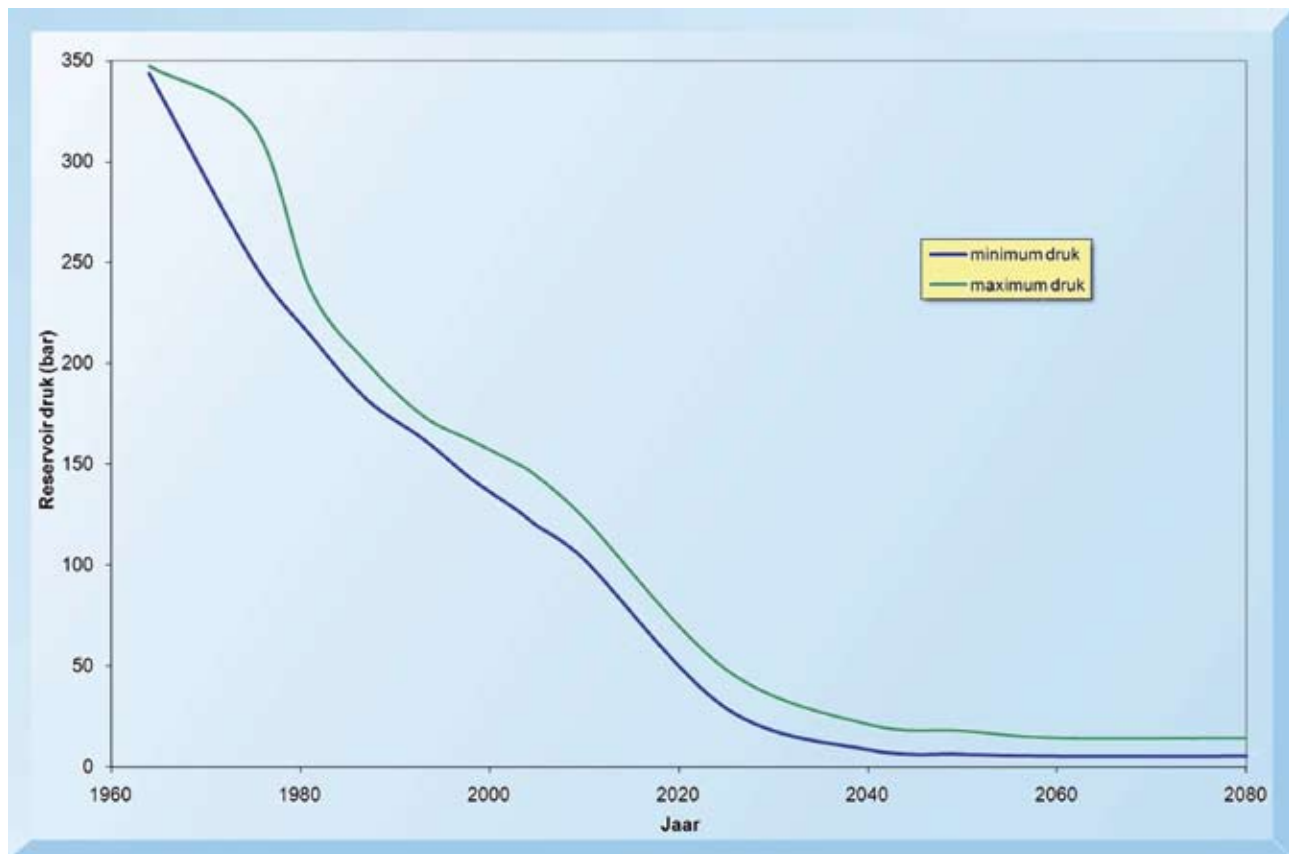
Grijskerk: Het veld had een oorspronkelijke druk van 393 bar. Het veld wordt voor Ondergrondse Gas Opslag (UGS) gebruikt. Derhalve is voor de prognose de druk aangenomen die voor januari van het betreffende jaar is voorspeld. De einddruk die na productie van het veld verwacht wordt in 2070 is 50 bar.

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 en heeft niet volledig uniforme eigenschappen over het hele veld. Zo varieert de diepteligging van het veld van zuid naar noord, in het zuiden ligt de top van het reservoir op zo'n 2750 m, in het noorden is dit op 2900 m diepte. De dikte van de gesteente-laag die depleteert is bepaald uit seismiek en putgegevens en beslaat de hele Rotliegendes zandformatie. Deze varieert van ongeveer 100 m dik in het zuiden van het veld tot zo'n 200 m in het noorden. Een schematisch doorsnede van het veld is getoond in figuur 7.2. De compactie van het Groningen-gasreservoir varieert over het veld. De variatie in de compactiecoëfficiënt is met behulp van inversie bepaald als een functie van de porositeit. De porositeit over het veld is bepaald door middel van gegevens uit putten. De waarden van de compactiecoëfficiënt variëren van $0,4 \cdot 10^{-5}/\text{bar}$ tot $0,7 \cdot 10^{-5}/\text{bar}$



Figuur 7.2 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 2003. Het reservoir-simulatiemodel wordt gekalibreerd met de gemeten druk en productievolumes van gas, water en condensaat. Evenals in 2005 is bij het opstellen voor de prognose van 2050 uitgegaan van een druk van 15 bar. Voor 2070 wordt voor het Groningen-veld uitgegaan van een einddruk van circa 10 bar. De reservoirdruk is niet over het gehele Groningen-veld exact gelijk, zoals ook in figuur 7.3 te zien is.



Figuur 7.3 Spreiding van reservoirdrukken in het Groningen-veld .

Harkema: Het veld is in 2010 in productie genomen en bevindt zich op een diepte van 2570 m. De depleterende dikte is circa 92 m. De initiële druk is 295 bar en het veld zal worden verlaten bij een einddruk van 185 bar. De gesteentesamendrukbaarheid is iets lager dan die van het Groningen-reservoir.

Kommerzijl: Het veld is in 2001 in productie genomen en heeft een initiële druk van 410 bar en zal met een druk van 62 bar verlaten worden. Het reservoir ligt 3476 m diep. Een herevaluatie van het gasveld heeft aangetoond dat ook de Onder Slochteren formatie in druk daalt, resulterend in een verhoging van de depleterende dikte naar 183 m.

Lauwersoog-Oost: Dit veld is in 2008 in productie genomen en heeft een initiële druk van 480 bar en zal met een druk van 270 bar verlaten worden. Het reservoir ligt 3975 m diep en de depleterende dikte is 95 m. De gesteentesamendrukbaarheid is iets lager dan die van het Groningen-reservoir.

Lauwersoog-West: Dit veld is in 2008 in productie genomen en heeft een initiële druk van 479 bar en zal met een druk van 200 bar verlaten worden. Het reservoir ligt 3910 m diep en de depleterende dikte is 90 m. De gesteentesamendrukbaarheid is iets lager dan die van het Groningen-reservoir.

Moddergat: Dit veld is in 2007 in productie genomen en heeft een initiële druk van 567 bar en zal met een druk van 400 bar verlaten worden. Het reservoir ligt 3685 m diep en de depleterende dikte is 105 m. De gesteentesamendrukbaarheid is lager dan die van het Groningen-reservoir.

Nes: Dit veld is in 2007 in productie genomen en heeft een initiële druk van 564 bar en zal met een druk van 300 bar verlaten worden. Het reservoir ligt 3680 m diep en de depleterende dikte is 105 m. Het compactiegedrag van het reservoir komt overeen met dat van Anjum. Studie heeft aangetoond dat de reserves groter zijn dan aanvankelijk aangenomen. Aangezien de geplande productie nog niet evenredig is aangepast is de einddruk relatief hoog. Mogelijke verdere ontwikkelingen van het veld worden overwogen.

Norg: Het veld had een oorspronkelijke druk van 327 bar en wordt thans als Ondergrondse Gas Opslag (UGS) gebruikt. Aangenomen wordt dat het veld voor lange tijd als UGS-veld wordt gebruikt en dat pas tegen 2070 de druk wordt verlaagd naar een abandonneringsdruk van 25 bar. Derhalve is voor de prognose de druk aangenomen die voor januari van het betreffende jaar is voorspeld. Het reservoir ligt 2650 m diep en heeft een dikte van 169 m. Het reservoirgesteente heeft een lagere samendrukbaarheid dan het Groningen-reservoirgesteente.

Surhuisterveen: Het veld is in 2008 in productie genomen. De reservoirdruk is 292 bar en de geplande abandonneringsdruk is 39 bar. Het reservoir ligt op een diepte van 2500 m en heeft een gemiddelde dikte van 85 m. De gesteentesamendrukbaarheid is lager dan die van het Groningen-reservoirgesteente.

Vierhuizen: Het veld blijkt voor een groot deel watervoerend te zijn met alleen in het oosten en westen een gasvoerend gedeelte. De initiële druk is 459 bar. In 2008 is het oostelijk gasvoerend gedeelte in productie genomen waarvan de geplande einddruk 189 bar is. Voor het westelijk gedeelte bestaan nog geen ontwikkelingsplannen. Het reservoir ligt 3900 m diep en de dikte van de depleterende formatie is gemiddeld 91 m. De gesteentesamendrukbaarheid is lager dan die van het Groningen-reservoir.

Witterdiep: Het veld is in 2007 in ontwikkeling genomen. De reservoirdruk is 341 bar en de geplande abandonneringsdruk is 14 bar. Het reservoir ligt op een diepte van 3500 m en heeft een gemiddelde dikte van 122 m. De gesteentesamendrukbaarheid komt overeen met die van Groningen.

Zevenhuizen: Het veld is in 2008 in productie genomen bij een initiële druk van 306 bar en zal worden verlaten bij een einddruk van 35 bar. Het reservoir op een diepte van 2600 m heeft een slechte doorlaatbaarheid, waardoor de depleterende dikte slechts 14 m is. De gesteentesamendrukbaarheid is lager dan die van het Groningen-reservoirgesteente.

Zuidwending-Oost: Dit veld is in 2006 in productie genomen en heeft een initiële druk van 347 bar en zal met een druk van 23 bar verlaten worden. Het reservoir ligt 2900 m diep en de depleterende dikte is 70 m. De gesteentesamendrukbaarheid lager dan die van het Groningen-reservoir.

Veld	Opgenomen in vorige prognose(s)	Productie sinds	Initiële druk (bar)	Huidige druk (bar)	Einddruk (bar)	Cm gemiddeld (10-5/bar)	Gemiddelde delpleterende dikte (m)
Anjum	✓	1997	563	90	20	0,45	109
Annerveen	✓	1973	346	15	10	0,36	119
Appelscha	✓	1999	303	89	74	0,52	93
Assen	✓	2007	337	186	67	0,52	145
Bedum	✓	1985	345	118	33	0,60	220
Blija Zuid	✓	-	377	377	377	0,60	100
Blija Zuid Oost	✓	2001	377	282	136	0,58	102
Blija-Ferwerderadeel	✓	1985	377	262	245	0,49	38
Blijham	✓	1984	417	55	40	0,54	70
Boerakker	✓	1998	338	40	37	0,63	190
Een	✓	2005	299	131	131	0,54	10
Eleveld	✓	1975	377	25	15	0,50	100
Engwierum	✓	2002	405	225	225	0,51	103
Ezumazijl	✓	1999	493	91	25	0,40	113
Faan		2009	387	300	59	0,51	204
Feerwerd	✓	2000	404	289	143	0,58	115
Gasselternijveen		2008	565	300	25	0,30	20
Grijskerk UGS	✓	1993	393	370	50	0,49	223
Groningen	✓	1963	347	130	10	0,63	165
Grootegast	✓	1979	334	60	26	0,66	87
Harkema		2010	295	291	185	0,56	92
Houwerzijl	✓	2000	423	224	81	0,58	118
Kielwindeweer	✓	2003	381	231	129	0,46	115
Kollum	✓	2002	440	343	279	0,48	94
Kollum Noord	✓	2001	442	131	63	0,58	99
Kollumerland	✓	1989	343	45	17	0,64	90
Kommerzijl	✓	2001	410	194	62	0,59	183
Lauwersoog-C	✓	-	500	500	480	0,40	95
Lauwersoog-Oost	✓	2008	480	450	270	0,40	95
Lauwersoog-West	✓	2008	479	450	200	0,40	90
Leens	✓	2003	424	221	81	0,59	123
Marum	✓	1978	281	146	100	0,45	121
Marumerlage	✓	-	287	245	110	0,42	128
Metslawier	✓	1997	559	100	20	0,40	110
Moddergat	✓	2007	567	535	400	0,30	105
Molenpolder	✓	2001	424	163	70	0,54	92
Munnekezijl	✓	1995	424	120	70	0,56	110
Nes	✓	2007	564	516	300	0,30	105
Norg UGS	✓	1983 / 1995	327	305	25	0,49	169
Norg-Zuid	✓	1999	317	90	90	0,45	142
Oostrum	✓	2002	522	137	65	0,60	99
Opende-Oost	✓	1993	292	137	62	0,64	147
Oude Pekela	✓	1995	331	33	33	0,57	66
Pasop	✓	1997	358	164	124	0,61	173
Roden (blok 1 / 2)	✓	1976	345	89 / 270	89 / 270	0,47	191
Rodewolt	✓	-	351	342	94	0,54	227
Saaksum(O/W)	✓	1999	412	207/200	105/90	0,19	127/120
Sebaldeburen	✓	1997	338	50	18	0,58	173
Suawoude	✓	1984	283	53	33	1,05	143
Surhuisterveen	✓	2008	292	144	39	0,63	85
Tietjerksteradeel RO	✓	1974	284	47	15	0,95	140
Tietjerksteradeel Vlieland	✓	1977	221	20	20	1,40	30
Ureterp	✓	1978	281	55	35	0,61	125
Usquert	✓	-	347	318	318	0,50	232
Vierhuizen (Oost)	✓	2008	459	459	189	0,50	91
Vries (South/North)	✓	1991	362 / 356	84/164	45/139	0,45/0,60	140
Warffum	✓	1986	357	212	38	0,67	213
Witterdiep		2007	341	59	14	0,45	122
Zevenhuizen	✓	2008	306	35	35	0,57	14
Zuidwending-Oost	✓	2006	347	137	23	0,54	70

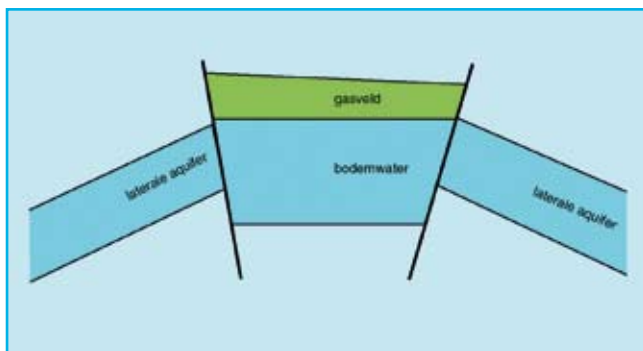
Tabel 7.1 Overzicht van de gegevens die zijn gebruikt in deze bodemdalingstudie.

Aquifer

Inleiding

Zoals in eerdere prognoses al is aangegeven kunnen de diepte en omvang van een bodemdalingsschotel sterk worden beïnvloed door de aanwezigheid van aquifers die in verbinding met het depletende gasreservoir staan. Onder de term aquifers wordt verstaan het watervoerende reservoirgesteente dat in drukcommunicatie kan staan met het gasreservoir. Is dit watervoerende gesteente gelegen onder het gasvoerende gesteente, dan wordt dit omschreven met bodemwater. In het geval dat het water naast het reservoir is gelegen, dan is er sprake van een laterale aquifer (figuur 7.4).

Met name de verhouding van de volumes van aquifer en gasveld is bepalend voor het verloop van de druk gedurende de productie van het gasvoerende gesteente. Is deze verhouding relatief groot (water ten opzichte van gas), dan kan er sprake zijn van drukondersteuning door de aquifer met als gevolg een geringere drukdaling. Is de omvang van de aquifer relatief klein, dan heeft de gasproductie een grote invloed op de druk van het aquifer.



Figuur 7.4 Watervoerende lagen rond het gasveld.

De wijze waarop de aquifer bij depletie van een gasveld reageert is tevens afhankelijk van een aantal andere factoren. Als gasveld en aquifer gescheiden zijn door een breuk, of een systeem van breuken zal de drukcommunicatie in het algemeen moeilijker verlopen dan wanneer de begrenzing van het gasveld gevormd wordt door een hellingsgebonden structuur zonder breuken. In het laatste geval zal voornamelijk de doorlaatbaarheid (permeabiliteit) van het gesteente bepalend zijn voor de mate van aquifer activiteit.

In het algemeen is er veel meer informatie beschikbaar over het gasvoerende gesteente dan over het watervoerende gesteente. In het geval van het Groningen-veld is dit ook zo, omdat de aquifer geen merkbare drukondersteuning levert. De belangrijkste leemte in de kennis over aquifers (wat betreft het voorspellen van bodemdaling) ligt in de drukverdeling; er zijn nagenoeg geen putten in de aquiferzone geboord.

Bodemwater

Het bodemwater onder het gasvoerend gedeelte van het Groningen-reservoir is voornamelijk gesitueerd in het noordelijk deel van het gasveld. Uit drukmetingen in het watervoerende deel is gebleken dat het bodemwater aan drukdaling onderhevig is als gevolg van de gasproductie. In sommige delen van het veld blijft de drukdaling iets achter bij het gasvoerend deel door een verminderde doorlaatbaarheid van het gesteente.

De verminderde doorlaatbaarheid wordt naar alle waarschijnlijkheid veroorzaakt door dunne kleilagen die met name in het noordelijk deel van het reservoir zijn afgezet (figuur 7.2). Omdat deze kleilagen niet continu zijn over het gehele Groningen-reservoir, zal de drukachterstand naar verwachting in de loop der tijd verdwijnen.

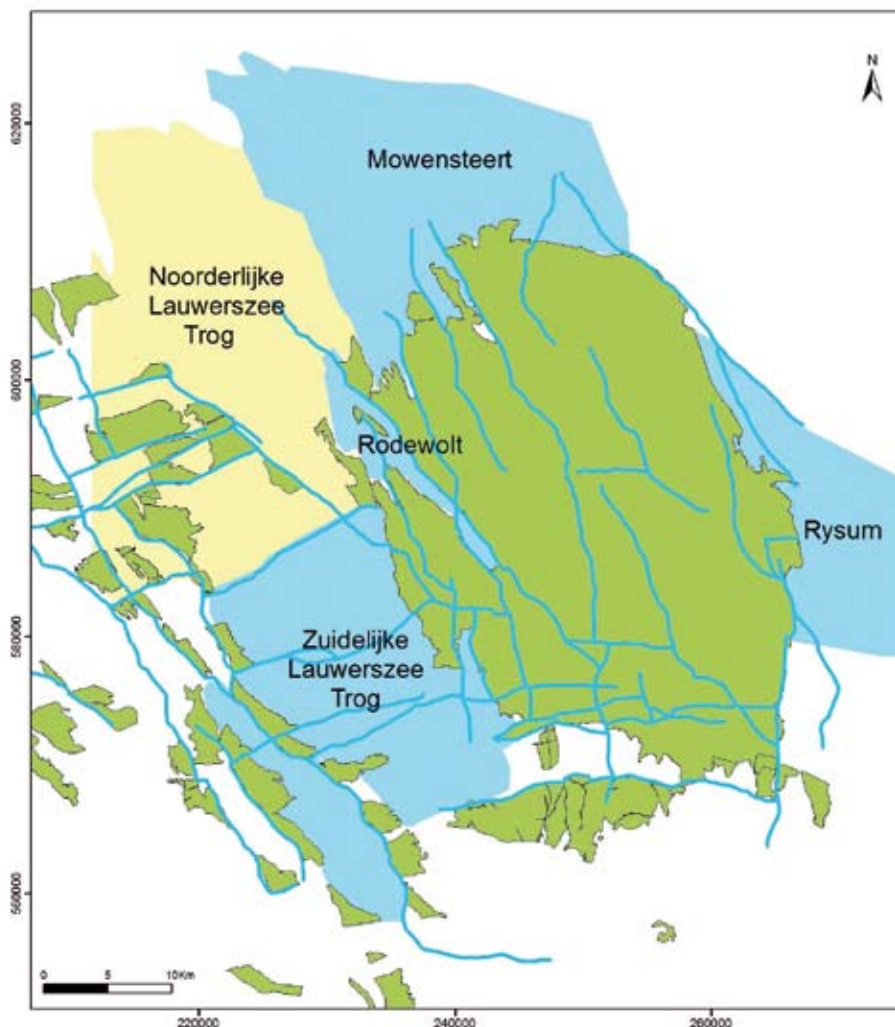
Het Ameland-kleisteel beïnvloedt ook de drukdaling in het bodemwater onder de andere velden. In de meer noordelijk gelegen gebieden is deze kleilaag niet doorlatend en wordt aangenomen dat er alleen drukdaling in het bovenste deel van de Slochteren-Zandsteenformatie zal optreden. Verder naar het zuiden is de kleilaag dunner en kan er ook depletie in de onderste Slochteren-Zandsteenlaag plaatsvinden. Afhankelijk van het al dan niet optreden van drukdaling in de lagen is de depletende dikte van het reservoir aangepast.

Laterale aquifers

Het Groningen-veld wordt voornamelijk begrensd door breuken. Aan de randbreuken bevindt zich het gasvoerende reservoir van de Slochteren Zandsteen tegenover de Ten Boer-kleisteel, de Slochteren Zandsteen of de Zechsteinformatie van de laterale aquifer. Het is mogelijk dat een randbreuk, die aanvankelijk afsluitend is, door het verlagen van de druk aan gasveldzijde, doorlatend wordt. Er ontstaat dan drukcommunicatie tussen het reservoir en de laterale aquifer en er stroomt water naar het reservoir.

Er worden in de huidige prognose vier laterale aquifers voor het Groningen-veld onderscheiden (figuur 7.5). Aangezien er geen putten in deze aquifers zijn en er dus ook geen metingen kunnen plaatsvinden is er een grote onzekerheid met betrekking tot de opgetreden drukkaling. In 2009 is er een integrale laterale aquiferstudie voor Groningen uitgevoerd. Na de studie van de breuken in het geologische model is een herevaluatie van de mogelijke doorlatendheid van breuken in het (dynamische) Groningen-reservoir simulatiemodel uitgevoerd. Daarnaast zijn door middel van de probabilistische kalibratieberekeningen met de gemeten bodemdaling de reservoirdrukdalingen in de verschillende laterale aquifers bepaald waarmee het reservoir-simulatiemodel werd gekalibreerd. Dit heeft niet geleid tot grote aanpassingen van het model zoals gerapporteerd in 2005. Het aquifer aan de westkant van het Groningen-veld (zie figuur 7.5) blijkt tot nu toe nog steeds niet in druk te zijn gedaald en dus geen drukcommunicatie te hebben met het Groningen-veld.

Voor het bepalen van de toekomstige aquiferactiviteit is aangenomen dat de omvang van de aquifers in de toekomst niet zal veranderen. Om de drukkaling voor 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 veilige aanname). Voor een aantal middelgrote velden (zoals bijvoorbeeld Annerveen, Anjum en Munnekezijl) zijn zoals voor het Groningen-gasveld de aquifers meegenomen in de dynamische reservoirmodellering en is hiermee de einddruk berekend.



Figuur 7.5 Schematische weergave van de aquiferzones rond het gasveld Groningen.

8) Prognose tot 2070

Contourkaarten

In de bijlagen I tot en met III zijn contourkaarten van de verwachte bodemdaling weergegeven voor respectievelijk de jaren 2025, 2050 en 2070, het jaar waarin de productie uit het Groningen-gasveld wordt beëindigd. Naar verwachting zal de uiteindelijke bodemdaling in het diepste punt boven het Groningen-veld in 2070 circa 47 cm bedragen.

Aangenomen wordt dat de velden Norg en Grijskerk voor lange tijd als UGS-veld worden gebruikt en dat pas tegen het jaar 2070 de druk zal worden verlaagd. Derhalve is voor de prognose de druk aangenomen die aan het eind van het winterseizoen van het betreffende jaar is voorspeld.

In tegenstelling tot de prognoses die getoond worden in de winningsplannen, is voor de prognoseberekeningen in deze rapportage niet vastgehouden aan reeds goedgekeurde productieprofielen, maar is uitgegaan van de meest waarschijnlijke eindsituatie.

Onzekerheden

Algemeen

De onzekerheid in de uiteindelijk verwachte bodemdaling veroorzaakt door gaswinning is afhankelijk van de onzekerheden in de invoergegevens en van de betrouwbaarheid van het gebruikte gesteentemechanische model. 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 (compactiemodel, depleterende reservoirdikte, enz.) en "operationele" onzekerheden, die de marges van in meer of mindere mate beheersbare parameters weergeven (bijv. drukdaling van het gasvoerende reservoirgesteente).

Door gebruik te maken van probabilistische modellering wordt inzicht verkregen in de wijze waarop de onzekerheden in de verschillende parameters doorwerken in de precisie van de uiteindelijke bodemdalingsprognose. Deze methode maakt gebruik van een groot aantal modellen, waarbij steeds de invoerparameters worden gevarieerd binnen de voor elke parameter gegeven onzekerheidsmarge. Zodoende wordt een breed scala aan rekenresultaten verkregen waaruit de meest waarschijnlijke bodemdalingsprognose en de bijbehorende standaarddeviatie of onzekerheid afgeleid kunnen worden.

De verschillende bronnen van onzekerheid worden hieronder nader toegelicht.

Compactie- en bodemdalingsmodel

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

Boven het centrum van het Groningen-veld zal de bodemdaling nagenoeg gelijk zijn aan de reservoircompactie en speelt de onzekerheid in de vertaling van compactie naar bodemdaling een relatief ondergeschikte rol. Aan de randen van het Groningen-veld en bij de kleinere velden zal de onzekerheid in de verwachte bodemdaling ten gevolge van de vertaling van compactie naar bodemdaling groter zijn.

Voor velden waar reeds significante bodemdaling is gemeten, kon het gebruikte compactie- en bodemdalingsmodel worden getoetst en zijn de modelparameters gekalibreerd met behulp van inversie. Hierdoor is tevens het effect van kruip op de uiteindelijk optredende bodemdaling al grotendeels verwerkt in de bij de modellering gebruikte gesteentecompressibiliteit. Een zekere mate van onzekerheid wat betreft het optreden van additionele bodemdaling na beëindiging van de gaswinning door tijdsafhankelijke processen (kruip/na-ijlen) blijft echter bestaan. Deze eenzijdige onzekerheidsmarge (alleen naar boven) in de prognose van uiteindelijke bodemdaling komt effectief grofweg overeen met het nog enkele jaren doorgaan van de bodemdaling na beëindiging van de winning.

“Geologische” onzekerheden

Compactie en bodemdaling zijn afhankelijk van “geologische” reservoirparameters als dikte, diepte en compressibiliteit.

De onzekerheden in deze parameters zullen gevolgen hebben voor de nauwkeurigheid van de prognose.

De genoemde parameters zijn bepaald uit directe of indirecte metingen (logs, seismiek, metingen in analoge voorkomens, inversie bodemdalingsmetingen). Voor reeds producerende voorkomens hebben deze parameters een onzekerheid variërend van circa 10% tot 25%, terwijl voor nieuw te ontwikkelen voorkomens grotere onzekerheden zijn aangehouden.

“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 directe 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) reservoirmodel worden gebruikt. Afgezien van onzekerheden in de drukdaling in verband met mogelijk veranderende productiescenario's zijn er daarom ook modelmatige onzekerheden wat betreft de door de gaswinning volgens een bepaald scenario veroorzaakte drukdaling in het reservoir en de aquifers.

Onzekerheid in de drukdaling in de aquifers is moeilijk in te schatten wanneer er nog geen significante bodemdaling boven deze aquifers is gemeten. Zolang dat het geval is, wordt meestal uitgegaan van de ‘worst case’, waarbij wordt aangenomen dat uiteindelijk de drukdaling na het verlaten van het veld gelijk zal zijn aan de drukdaling in het aangrenzende gasreservoir. Aangezien er boven de aquifers rond het Groningen-veld inmiddels echter voldoende meethistorie is opgebouwd, is in de huidige prognose een scenario gebruikt, waarbij de grootte van de aquifers en de te verwachten drukdaling daarin waar mogelijk zijn bepaald door inversie van de gemeten bodemdaling en (voor een aantal velden) met behulp van dynamische reservoir modellering. Zoals eerder beschreven toont de integrale Groningen-aquiferstudie die in 2009 is uitgevoerd aan dat de aanpassingen in drukdaling van deze aquifers zoals vastgesteld in het statusrapport van 2005 nog steeds gelden. Voor de nieuwe Waddenzee-velden Nes, Moddergat, de Lauwersoog-velden en de al producerende velden op het vasteland Anjum en Ezumazijl zijn nieuwe reservoir-simulatiemodellen opgezet die resulteren in een betere modellering van de aquifers. Ook voor het Tietjerksteradeel-veld is de modellering van de laterale aquifers aangepast. Verdere herziening van de reservoirsimulatie van de aangesloten aquifers zal mogelijk resulteren in een lichte verdere bijstelling van de bodemdalingsprognose.

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 gebruikt 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 compactieparameters, rekeninghoudend met de volledige bandbreedte van deze parameters.

In het algemeen kan met betrekking tot de onzekerheid in de prognoses van berekende bodemdaling het volgende worden gesteld:

- Boven het centrum van het Groningen-veld is de onzekerheidsmarge het kleinst en bedraagt zo'n 15%.
- Aan de randen van het Groningen-veld en boven de kleinere velden die al langer in productie zijn, is de onzekerheidsmarge ongeveer 25% van de uiteindelijk verwachte daling.
- Voor de nieuw te ontwikkelen velden is de onzekerheid groter en moet een marge van 30% worden aangehouden.

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

In deze onzekerheden is het effect van kruip grotendeels impliciet verwerkt. Dit omdat door de lange productieperiode het grootste gedeelte van de kruip al is opgetreden en meegenomen bij de kalibratie van de modelparameters aan de gemeten daling.

Bij de opgegeven onzekerheden moet de kanttkening worden geplaatst dat de berekende bodemdaling niet symmetrisch, of normaal verdeeld is rond de meest waarschijnlijk geachte waarde. Voor de geologische parameters geldt in het algemeen wel dat deze beschreven kunnen worden door een normale verdeling, maar voor operationele parameters, die afhankelijk zijn van aquifer activiteit of de additionele bodemdaling door kruip is dit niet het geval. Wanneer de in dit rapport gepresenteerde bodemdalingsprognose voor 2070 wordt verhoogd met de genoemde onzekerheid, wordt een maximum waarde verkregen die met een waarschijnlijkheid van 95% niet zal worden overschreden als gevolg van onjuist geschatte waarden voor de model invoerparameters.

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 bodemdaling 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.

9) Conclusies

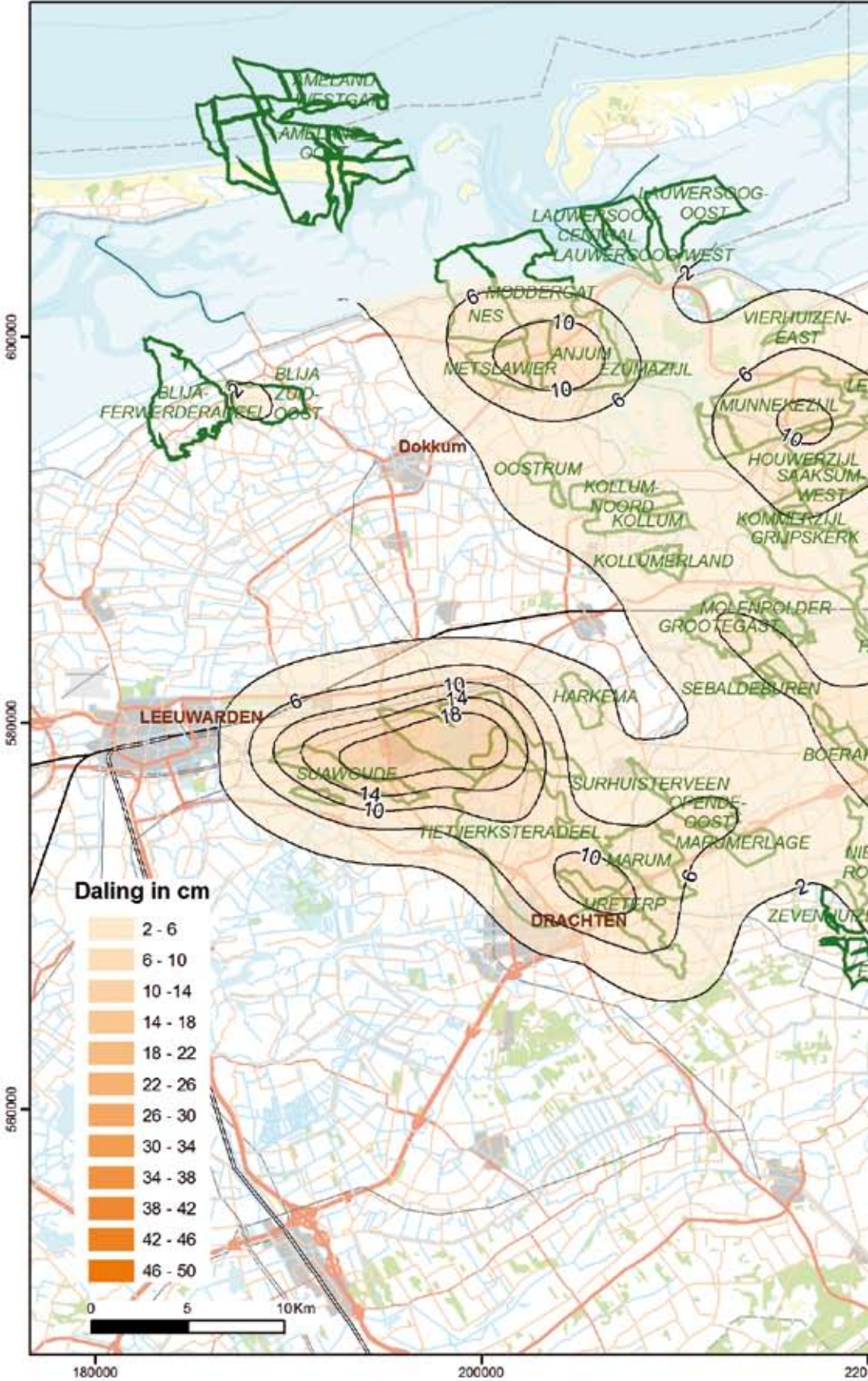
- De resultaten van de waterpasmeting van 2008 hebben aangetoond dat de bodemdaling door gaswinning in de provincies Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe de afgelopen jaren in het algemeen is verlopen in overeenstemming met de verwachtingen zoals aangegeven in de vorige prognose. Mede door een aangepaste analysemethode van de metingen is de gemeten bodemdaling in het centrum van de schotel met een waarde van rond 30 cm ongeveer 2 cm hoger dan gemodelleerd in 2005.
- De bij de vorige prognose uitgevoerde inversie van de gemeten bodemdaling toonde aan dat de drukdaling in de aan het Groningen-gasveld grenzende aquifers en in de aquifers van sommige velden in Friesland lager was dan eerder werd aangenomen. De integrale Groningen-aquiferstudie die in 2009 is uitgevoerd, heeft dit bevestigd. Volgens de laatste inzichten is de depleterende reservoirdikte van de aquifers ten noorden van het Groningen-gasveld kleiner dan in 2005 werd aangenomen. Dit heeft geresulteerd in een bijstelling naar beneden van de te verwachten bodemdaling. Voor de laterale aquifer grenzend aan het gasveld Tietjerksteradeel gaf inversie een indicatie van een hogere drukdaling en dientengevolge hogere uiteindelijke bodemdaling.
- Naast bodemdalingsmetingen 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 2003 – 2008 komen de resultaten van beide meetmethodes zeer goed overeen.
- De productie van het Groningen-gasveld zal worden voortgezet tot 2070 (voorheen 2050). Volgens de huidige inzichten zal de bodemdaling als gevolg van gasproductie boven het Groningen-gasveld omstreeks het jaar 2070 een waarde tussen de 40 en 54 centimeter (95% betrouwbaarheidsinterval) 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 30%. 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.

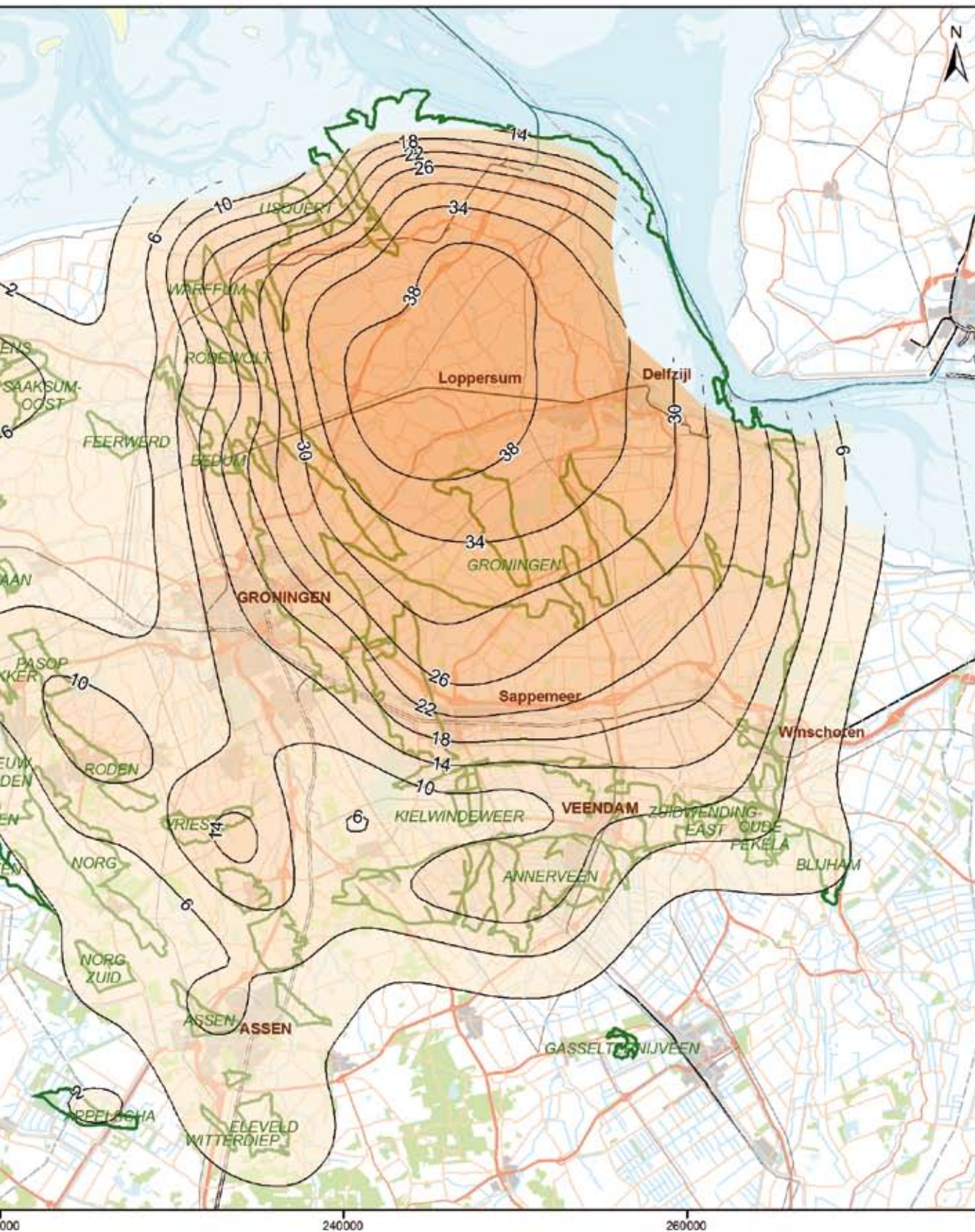
10) Referenties

- Referentie 1 Bodemdaling door Aardgaswinning.
NAM-velden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe.
Statusrapport 2005 en Prognose tot het jaar 2050.
December 2005.
NAM-rapportnummer EP200512202238.
- Referentie 2 Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen.
Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2009.
Mei 2010.
NAM-rapportnummer EP201005315203.
- Referentie 3 Verzoek om wijziging voor winningsplan Groningen.
Mei 2007
- Referentie 4 Meetregister Noord-Nederland 2008
(NAM EP200903235982)
- Referentie 5 Bodemdaling Groningen op basis van InSAR-waarnemingen 1993-2008
(NAM EP200805220295)

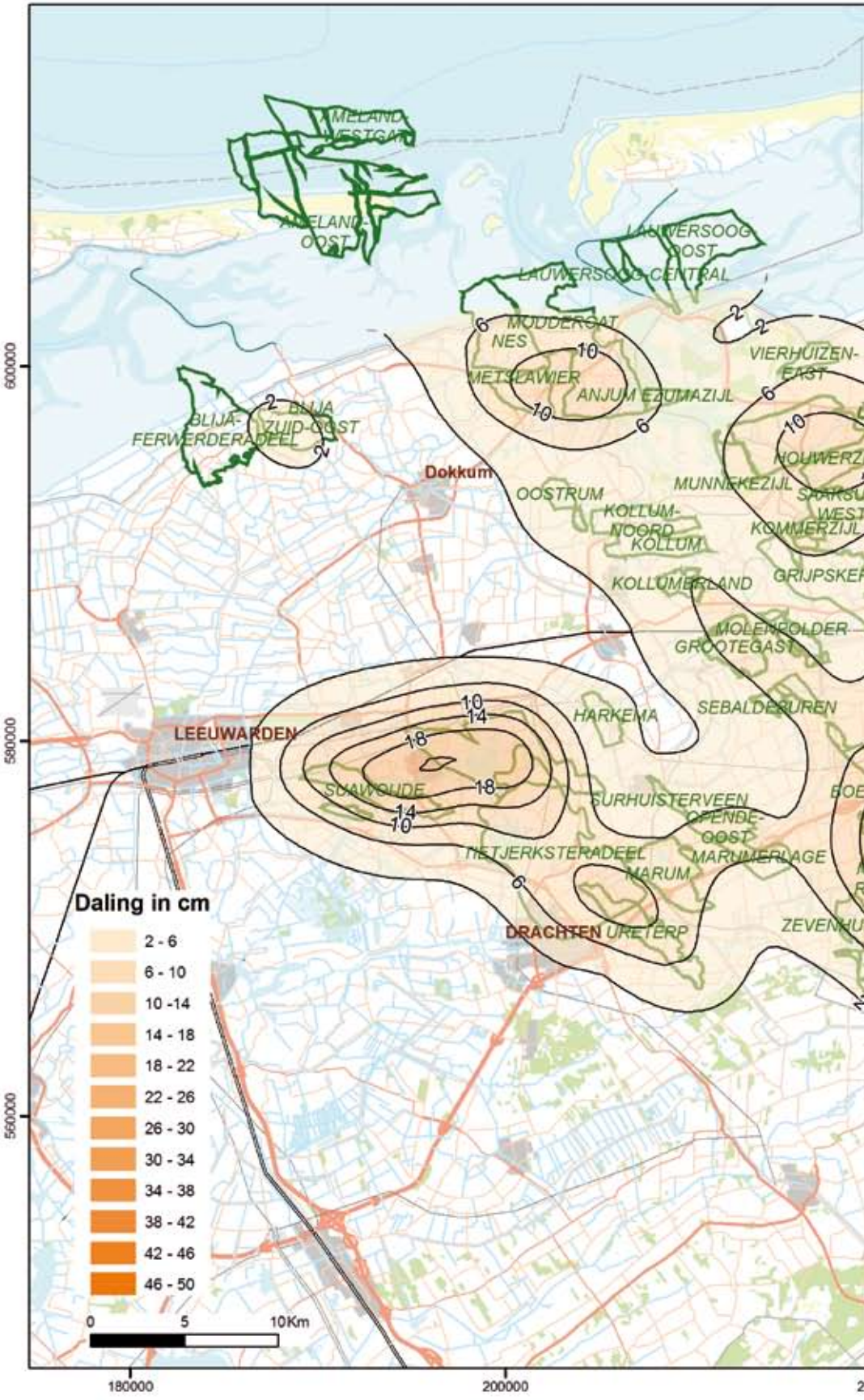
Bijlagen

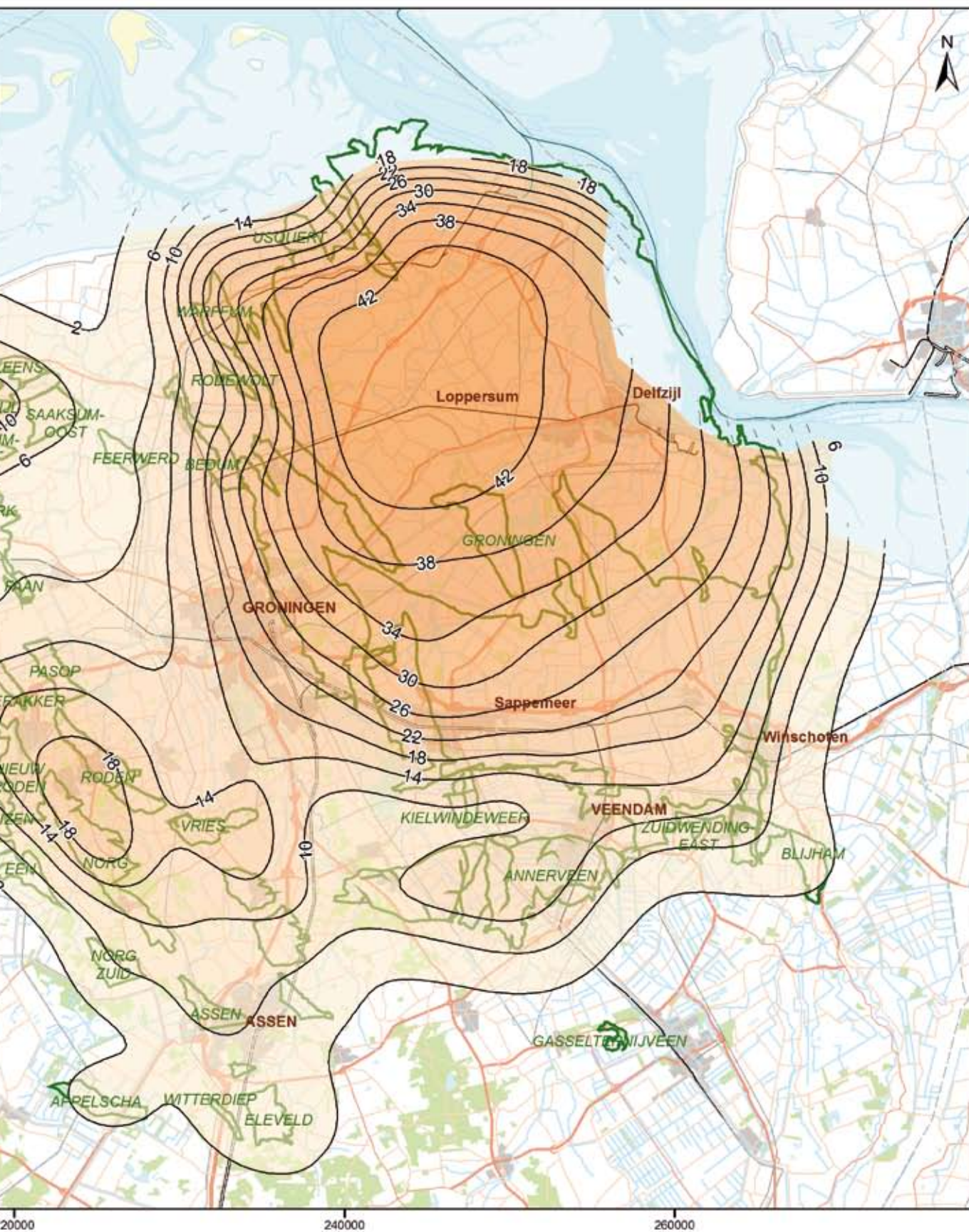
Bijlage 1 (Prognose voor 2025)



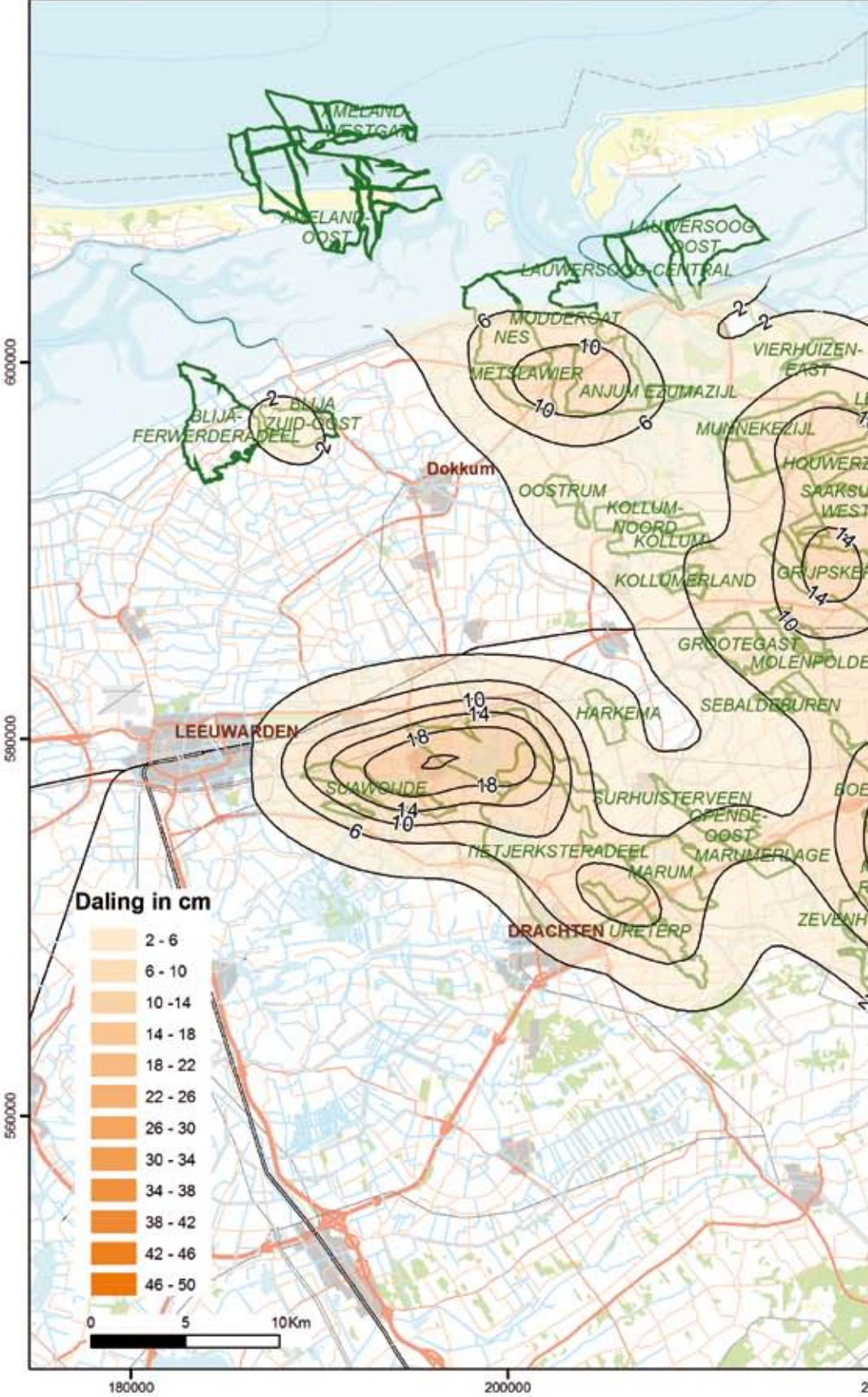


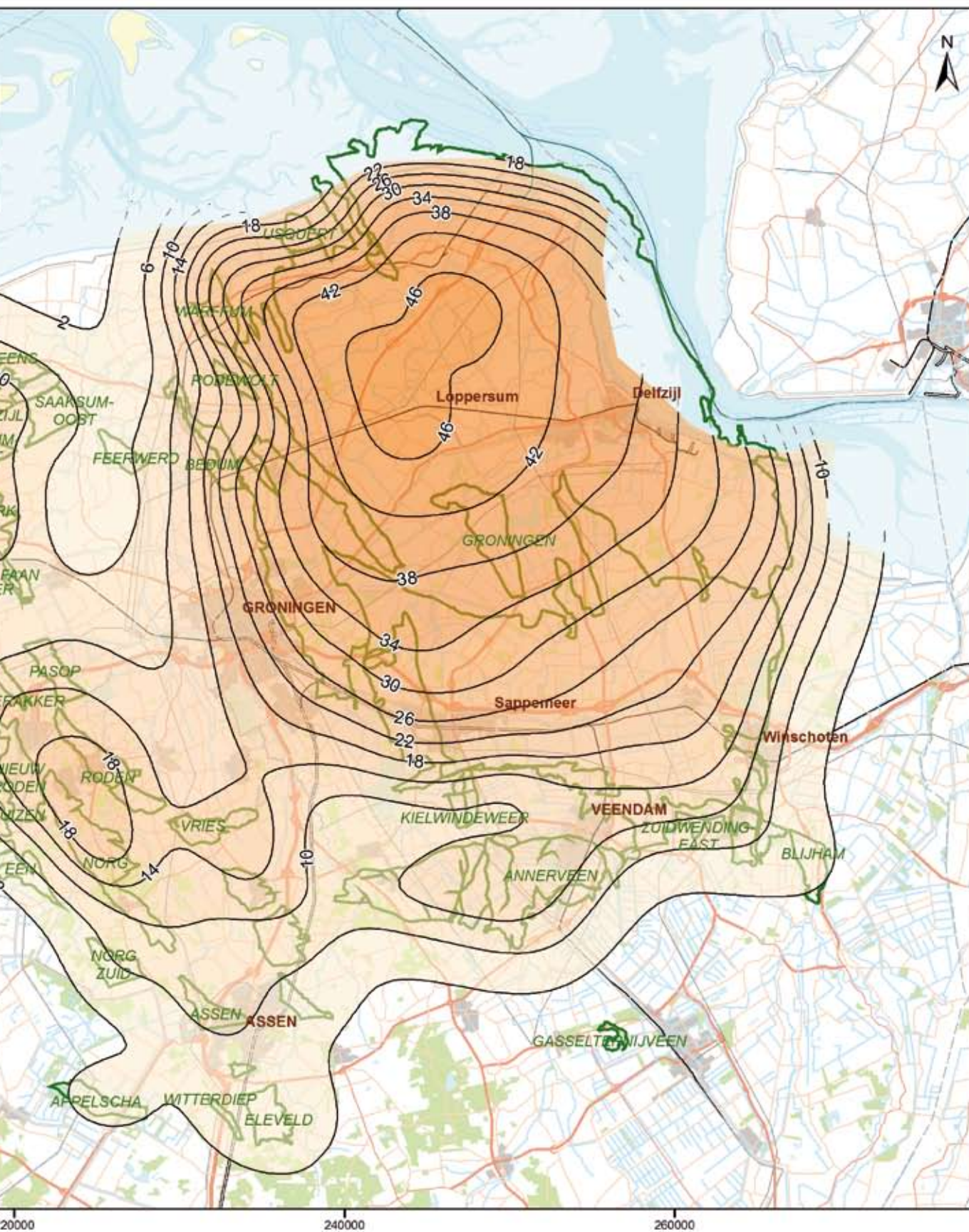
Bijlage 2 (Prognose voor 2050)





Bijlage 3 (Prognose voor 2070)







NAM