

# Long Term Subsidence vervolgstudie

juli – oktober 2017

NAM, 20 oktober 2017

Doc nr. EP201710200509

*30 jaar monitoring van bodemdaling*

*in dynamisch waddengebied*

*Met de “hand aan de kraan” controle op bodemdaling*



## Samenvatting

Dit rapport markeert het eindresultaat van een uitgebreide studie naar tijdafhankelijkheid in het gedrag van de bodemdaling in de Waddenzee: de “*Long Term Subsidence*” (LTS) studie. Vooral langetermijneffecten zijn onderzocht om een beter inzicht te krijgen in het gedrag van de bodemdaling.

Het eerste deel van de studie (LTS-I) onderzocht de mogelijke fysische verklaringen voor tijdafhankelijkheid in het bodemdalingsgedrag. Het tweede deel van de studie (LTS-II) richtte zich op het verwerken van de meest aannemelijke verklaringen in modellen, om hiermee de bodemdaling beter te kunnen voorspellen. Deze modellen zijn nu integraal getoetst tegen de historische gegevens van productie en bodemdaling van het Amelandgasveld. De betrouwbaarheid van voorspellingen van de bodemdaling was hierbij een belangrijk aandachtspunt.

In de recente LTS-II vervolgstudie heeft NAM de nadruk gelegd op het verbeteren van de passing van de modellen aan de historische metingen en het verhelderen van de betrouwbaarheid en de waarschijnlijkheid van de voorspellingen van de toekomstige bodemdaling. Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) noemde in haar brief van 3 juli 2017 een aantal punten die verbeterd moesten worden. Al deze punten zijn geadresseerd in deze vervolgstudie en hebben geleid tot een betere passing van de modellen aan de data. Tevens is de betrouwbaarheid van de modeluitkomsten sterk toegenomen. Dit heeft geleid tot een scherper gedefinieerd betrouwbaarheidsinterval van de voorspelling van de bodemdalingssnelheid in het Pinkegat gebied.

De resultaten bevatten een aantal belangrijke conclusies over bodemdaling:

- (1) De studie laat zien dat met de ontwikkelde workflow de verwachte bodemdaling op de lange termijn in beeld gebracht wordt, evenals de waarschijnlijkheid van de voorspelling.
- (2) Het meegroeivermogen van de Waddenzee is nooit overschreden door bodemdaling als gevolg van de productie van gas uit de Ameland velden;
- (3) De strikte gebruiksruimte grens aan de bodemdaling zal ook in de toekomst veilig zijn.
- (4) De studie bevestigt de effectiviteit van het “*hand aan de kraan principe*” om de grens te bewaken van de toelaatbare bodemdaling door gasproductie. De studie toont aan dat bij een dreigende overschrijding van de grens, een vermindering in de productie snel en effectief de bodemdaling zal verminderen.

De geldende regels en de praktijk van de Meet- & Regelcyclus, met onafhankelijk toezicht, bewaken al 10 jaar effectief de grens aan de bodemdaling. Tevens zijn er effectieve middelen om in te grijpen.

Naar de opvatting van NAM is met de recente aanpassingen aan de modellen en de methode, en de hiermee gerealiseerde resultaten voldaan aan de doelstelling zoals die was gesteld bij de aanvang van de studie in 2013, om een beter inzicht te krijgen in het tijdsafhankelijke gedrag en de mogelijke consequenties voor de bodemdaling op de langere termijn.

## Leeswijzer

Vanwege het complexe karakter van het onderzoek, is deze rapportage opgedeeld in 3 delen. Zo probeert NAM de informatie voor een breed publiek toegankelijk te maken.

### **Deel 1: Samenvatting (Nederlands)**

Een enkele pagina in het Nederlands met een beschrijving van de achtergrond en de belangrijkste resultaten van het onderzoek. In de conclusies wordt kort ingegaan op de betekenis voor het toezicht op de bodemdaling en de handhaving van de gebruiksruijnte in de Waddenzee.

### **Deel 2: Hoofdrapport (Nederlands)**

In het hoofdrapport wordt de volledige studie in het Nederlands behandeld. De belangrijkste begrippen en definities die worden gebruikt in de technische bijlagen worden uitgelegd. De resultaten worden kort en op overzichtelijke wijze getoond en besproken.

Het hoofdrapport is bedoeld om een brede groep geïnteresseerde lezers toegang te geven tot de complexe materie van deze studie. Dit gedeelte kan als leidraad worden gebruikt voor de technische bijlagen.

### **Deel 3: Technische bijlagen (Engels)**

Dit deel van het rapport is bedoeld voor technische experts. De bijlagen zijn geschreven in het Engels zodat buitenlandse specialisten de kwaliteit van het werk kunnen beoordelen. Technisch inhoudelijke voorkennis is nodig om dit deel van het rapport te kunnen begrijpen.

## Contents

Samenvatting .....	2
Leeswijzer.....	3
1. Onderzoek naar bodemdaling: een overzicht.....	5
1.1. Waarom dit onderzoek? .....	5
1.2. De regels voor gaswinning onder de Waddenzee in het Rijksprojectbesluit .....	6
1.3. De inhoud van het onderzoek en de belangrijkste conclusies .....	7
2. De onderzoeksopdracht.....	13
2.1. LTS-I studie .....	13
2.2. LTS-II studie .....	13
2.3. LTS-II “vervolgstudie” .....	14
3. Integrale toetsing tegen historische veldgegevens .....	15
3.1. De “Monte Carlo” rekenmethode.....	16
3.2. De “confrontatie” tussen de modelberekeningen en de bodemdalingsmetingen.....	17
3.3. De dubbele verschilmeting en het verwijderen van uitschieters .....	18
3.4. Verbetering in de beschrijving van de drukontwikkeling in de reservoirs .....	19
3.5. Zoutkruip.....	19
3.6. Covariantie in de idealisatie precisie en model-imperfecties.....	19
3.7. Geomechanische modelering .....	20
4. Resultaten .....	22
4.1. Peilmerkbeweging van 1986 tot 2040 .....	22
4.2. Ontwikkeling van de bodemdalingskom vanaf 1986 .....	26
4.3. Peilmerk beweging zonder gaswinning .....	28
4.4. Bodemdaling in Pinkegat door de Ameland gaswinning .....	30
4.5. De betrouwbaarheid van voorspellingen.....	30
5. Conclusies en aanbevelingen .....	33

# 1. Onderzoek naar bodemdaling: een overzicht

## 1.1. Waarom dit onderzoek?

Dit rapport markeert het eindpunt van een diepgaand en waardevol onderzoek naar bodemdaling, de “Long Term Subsidence” (LTS) studie, uitgevoerd onder leiding van specialisten van NAM in samenwerking met partners aan de Technische Universiteit Delft, de Universiteit Utrecht en TNO.

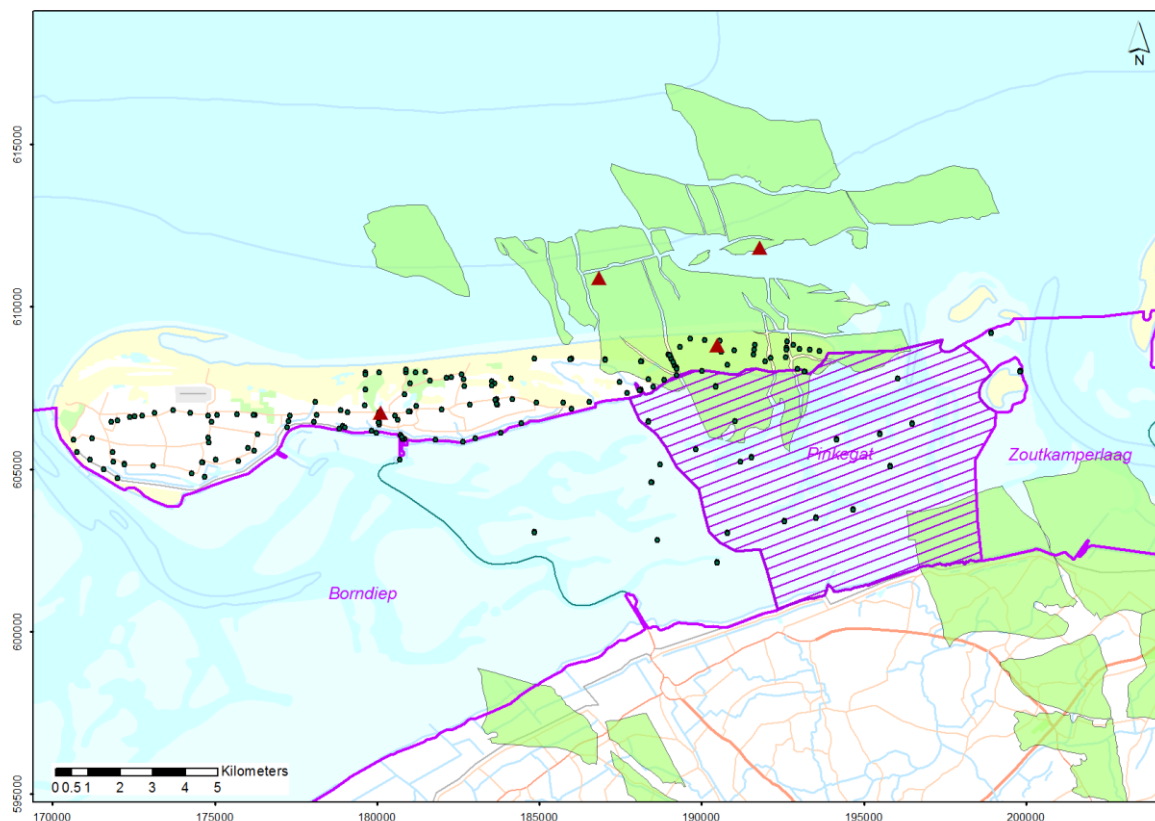
### **Bodemdaling of in vakjargon “subsidence”**

De daling van de bodem ten opzichte van een vast referentieniveau en vanaf een bepaald tijdstip, meestal uitgedrukt in millimeters.

### **Bodemdalingsnelheid of “subsidence rate”**

De snelheid waarmee de bodem daalt, meestal weergegeven in millimeters daling per jaar. Op ieder punt in de bodemdalingskom is de snelheid van dalen verschillend. In de LTS-studie wordt niet de snelheid op één punt, maar de gemiddelde snelheid van dalen voor kombergingsgebied Pinkegat berekend, zie Figuur 1.

De uitvoering van deze studie is door de Minister van Economische Zaken (EZ) als voorwaarde opgenomen in zijn besluit van 21 maart 2013 tot instemming met de wijziging van het winningsplan voor de gasvelden Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Dezelfde verplichting heeft de Minister opgenomen in de winningsplannen voor de velden Ameland en Anjum.



Figuur 1 –Het eiland Ameland, met de gasvelden in groen, in paars de gebieden in de Waddenzee waar de bodemdaling streng wordt gecontroleerd, kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. De zwarte stippen zijn de locaties van de peilmerken waar de bodemdaling wordt gemeten rondom het Amelandgasveld. De rode driehoeken zijn GPS-stations.

Het doel van de LTS-studie is, in de woorden van de Minister: “...om een nog diepgaander inzicht te krijgen in de eventuele consequenties van de waargenomen tijdsafhankelijke effecten in het bodemdalingsgedrag en de mogelijke gevolgen daarvan voor de bodemdalingssnelheid door de gaswinning op de langere termijn”.

#### **Winningsplan**

Voor alle gasvelden in Nederland met actieve winning bestaat een door de Minister van EZ ingestemd winningsplan. Dit document bevat naast een verwachting voor de productie ook een beschrijving van de verwachte bodemdaling.

Het laatste deel van de LTS-studie (LTS-II), was gericht op een integrale toetsing van de ontwikkelde methoden en theorieën tegen historische velddata van het Amelandgasveld. Hierbij is ook uitgebreid ingegaan op de betrouwbaarheid in de voorspellingen van de bodemdaling.

## 1.2. De regels voor gaswinning onder de Waddenzee in het Rijksprojectbesluit

#### **Kombergingsgebied**

Getijdebekken achter een zeegat tussen twee Waddeneilanden en tussen de wantijen dat onder invloed van de getijdenstromen afwisselend vol- en leegloopt.

#### **Meegroeivermogen**

Het vermogen van de Waddenzee om bodemdaling en zeespiegelstijging teniet te doen door de instroom van slib en zand, in millimeters per jaar. Dit meegroeivermogen is wettelijk vastgelegd per kombergingsgebied. Effectief wijzigt de diepte van de Waddenzee in het kombergingsgebied niet zolang bodemdaling binnen het meegroeivermogen blijft.

#### **Zeespiegelstijging**

Naast de gaswinning heeft ook de zeespiegelstijging tot gevolg dat de Waddenzee dieper wordt. Iedere vijf jaar (meest recent in 2016) actualiseert de Minister van EZ het beleidsscenario zeespiegelstijging. Dit is de van overheidswege, opgelegde officiële raming, die wordt uitgedrukt in millimeters per jaar.

#### **Gebruiksruimte**

De gebruiksruimte is gelijk aan het meegroeivermogen minus de zeespiegelstijging en is de maximaal toelaatbare bodemdalingssnelheid in millimeters per jaar. De gebruiksruimte is gedefinieerd als een gemiddelde snelheid over het kombergingsgebied.

Het regelkader is vastgelegd in bepalingen in de instemmingsbesluiten voor de Winningsplannen en in artikel 2.3, tweede lid, van het Rijksprojectbesluit “*Gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen*”. Het artikel luidt als volgt:

### “2.3. Winningsfase

1. *Gewaarborgd wordt dat gaswinning wordt gestopt of beperkt indien de bodemdaling in combinatie met de zeespiegelstijging meer dan het meegroeivermogen van de betreffende kombergingsgebieden bedraagt;*

2. *Het meegroeivermogen van de betreffende kombergingsgebieden Zoutkamperlaag en Pinkegat is bepaald op 5 mm respectievelijk 6 mm per jaar over een 19-jaarlijkse periode. Autonome bodemdaling en de zeespiegelstijging maken deel uit van het meegroeivermogen. De met het winningsplan begrensde dalingssnelheid van de ondergrond door gaswinning zal worden gecontroleerd aan de hand van het door de Projectminister goedgekeurde meetplan artikel 30 van het Mijnbouwbesluit. Tevens zal het bij de vergunning krachtens artikel 19d van de Natuurbeschermingswet 1998 vereiste monitoringsplan deel uitmaken van deze controle;*
3. *Bij overschrijding of bij een reële kans op overschrijding van het vastgestelde meegroeivermogen vindt overleg plaats tussen de projectminister en de Minister van Landbouw Natuur en Voedselkwaliteit en, in voorkomende gevallen, andere betrokken Ministers;*
4. *De Minister van EZ beperkt of stopt de gaswinning als de bodemdaling in combinatie met de zeespiegelstijging het meegroeivermogen overschrijdt of dreigt te overschrijden.*
5. *NAM rapporteert jaarlijks aan de Minister van Economische Zaken en de Minister van LNV over de uitkomst van de uitgevoerde metingen.*
6. *Deze rapportages en de onderliggende gegevens worden door de Minister van EZ en de Minister van LNV onverwijld en integraal ter advies aan de Auditcommissie gaswinning onder de Waddenzee gestuurd."*

Naast het reguliere toezicht zal de Commissie m.e.r. onder de naam "Auditcommissie gaswinning onder de Waddenzee" de rol van onafhankelijke auditor vervullen. Het geheel van regels, onderzoeksverplichtingen en onafhankelijke controles heeft geleid tot een goed werkend kader, dat transparant en onafhankelijk gecontroleerd wordt. Samen met de mogelijke beheersmaatregelen zoals het geheel of gedeeltelijk insluiten van de gaswinning garandeert dat de bodemdaling in de Waddenzee nu en in de toekomst, binnen de toelaatbare grenzen zal blijven.

### 1.3. De inhoud van het onderzoek en de belangrijkste conclusies

Met de oplevering van dit rapport beoogt NAM te voldoen aan de voorwaarden die de Minister van EZ had gesteld bij zijn wijzigingsbesluiten van de voornoemde winningsplannen.

Het doel van het onderzoek is om beter begrip te krijgen van de fysische processen in de ondergrond die de bodemdaling veroorzaken, hoe deze processen kunnen veranderen in de tijd en wat de invloed van deze veranderingen zou kunnen zijn op de bodemdaling en dan vooral de effecten die zich manifesteren op de lange termijn.

Op aangeven van de Minister van EZ is de inhoud en het werkplan afgestemd met de Inspecteur-generaal der Mijnen (IGM), zodat het onderzoek in ambtelijke termen "ten genoeg van de IGM" zou worden uitgevoerd met een opleverdatum vóór 1 juli 2015.

Om op een goede manier antwoord te kunnen geven op de gestelde vragen was grensverleggend en zeer fundamenteel wetenschappelijk onderzoek nodig. Het accuraat voorspellen van de benodigde tijd om dergelijke studies uit te voeren en naar tevredenheid van alle partijen af te ronden is lastig. Vooral ook het testen van de gevonden hypothesen tegen beschikbare velddata van het Ameland gasveld was aanzienlijk ingewikkelder dan op voorhand ingeschat. Speciaal voor deze toepassing hebben de onderzoek partners bij TNO en TU Delft nieuwe programmatuur ontwikkeld voor het

valideren van grote hoeveelheden berekeningen tegen de beschikbare meetgegevens van bodemdaling. Ontwikkeling van zowel een nieuwe methodiek als ook de nieuwe software is een zeer tijdrovend proces. Deze complicatie is ook onderkend door de expert die door het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) is ingeschakeld om het werk van NAM te beoordelen (Dr. Pietro Teatini, Universiteit van Padova).

Het onderzoek heeft zich gericht op bodemdaling in het algemeen en meer specifiek op bodemdaling op Ameland en onder de Waddenzee. Gezien de gevoeligheid van het gebied, is kwaliteit van de studie steeds belangrijker is geweest dan de specifieke opleverdatum. Met voortdurend toezicht heeft SodM, met hulp van externe experts, het onderzoekstraject gaandeweg uitgebreid en bijgestuurd.

#### **Het voorspellen van toekomstige bodemdaling**

Een voorspelling van bodemdaling wordt gemaakt met een serie modellen.

#### **Reservoirmodel**

Een model dat beschrijft hoe de druk in poreuze gesteentelagen op 3000 meter diepte verandert als gevolg van de productie van gas.

#### **Compactiemodel**

Een compactiemodel beschrijft hoe diepe, poreuze gesteentelagen in elkaar gedrukt worden (compactie) als de druk in de poriën daalt.

#### **Influencemodel**

Influencemodellen berekenen hoe de compactie van het reservoir op 3000 meter diepte de bodemdaling aan het aardoppervlak op Ameland en in de Waddenzee beïnvloedt.

#### **Bodemdalingsmodel**

De integratie van bovenstaande modellen die een uitkomst levert over de mogelijke bodemdaling ten gevolge van gaswinning.

#### **Het meten van bodemdaling**

Bodemdaling wordt landmeetkundig gemeten op peilmerken. Peilmerken zijn in het algemeen bouten in een goed gefundeerd object, bijvoorbeeld de muur van een gebouw of een diep in de grond geslagen paal.

Het LTS-onderzoek bestaat uit drie stappen: [1] Om de geobserveerde tijdsafhankelijke effecten te verklaren zijn verschillende hypothesen ontwikkeld die onderbouwd worden door gesteente mechanische en hydraulische principes. [2] Deze hypothesen zijn verwerkt in bodemdalingsmodellen. [3] Deze modellen zijn gevalideerd met de bodemdaling zoals gemeten aan peilmerken (zie Figuur 2). In de technische bijlagen wordt uitgebreid verslag gedaan van de resultaten. De figuren en grafieken laten zien hoe de modellen passen op de data en hoeveel bodemdaling nog verwacht wordt in de toekomst. Ook wordt uitvoerig ingegaan op de betrouwbaarheid van de berekeningen.





*Figuur 2 – Voorbeelden van peilmerken op Ameland. Linksboven: een bout in de muur van een gebouw (Bron: Rijkswaterstaat); Rechtsboven: in de duinen een diep in de grond geslagen paal (Bron: Rijkswaterstaat); Linksonder: een peilmerk in de bodem van de Waddenzee; Rechtsonder: het plaatsen van een tijdelijk GPS-station op een peilmerk in de Waddenzee. Hier wordt een paar dagen met behulp van GPS het niveau van een peilmerk zorgvuldig gemeten. Uit het verschil in hoogte tussen alle gemeten peilmerken wordt met landmeetkundige methodes de bodemdaling in kaart gebracht.*

De studie heeft aan de ene kant een algemeen karakter met een brede geldigheid voor het gedrag van bodemdaling door gaswinning op andere plaatsen in Nederland. De toetsing tegen historische velddata van Ameland maakt het mogelijk meer specifieke conclusies te trekken over bodemdaling door gaswinning bij Ameland.

Voor verschillende delen van de Waddenzee is een “gebruiksruimte” vastgesteld om te garanderen dat het ecosysteem van het waddengebied als gevolg van menselijk handelen niet fundamenteel veranderd. Deze “gebruiksruimte” is bepaald door twee factoren: [1] de zeespiegelstijging (volgens het meest recente beleidsscenario dat wordt vastgesteld door de Minister van EZ) en [2] het

“meegroeivermogen”, de mate waarin door natuurlijke afzetting van zand en klei in de Waddenzee deze de zeespiegelstijging kan bijhouden. Het beleid is erop gericht dat de verwachte zeespiegelstijging plus potentiële bodemdaling als gevolg van gaswinning niet groter mogen zijn dan het “meegroeivermogen”.

Figuur 3 laat de situatie zien voor het kombergingsgebied het Pinkegat, het in paars gearceerde gebied van Figuur 1. In dit gebied is het “meegroeivermogen” door de overheid vastgesteld op 6 millimeter per jaar. De verwachting uit deze studie, de rode doorgetrokken lijn in de grafiek, is dat de bodemdaling van het Pinkegat als gevolg van gaswinning uit Ameland momenteel ongeveer een halve millimeter per jaar bedraagt en gestaag afneemt. Uit het betrouwbaarheidsinterval, de rode stippellijnen aan weerszijden van de doorgetrokken lijn, kan worden geconcludeerd dat de werkelijk optredende dalingsnelheid ongeveer een kwart millimeter per jaar hoger of lager uit kan vallen dan de verwachting. Daarmee blijft de bodemdalingssnelheid veroorzaakt door de productie uit het Ameland veld ruimschoots binnen de gebruikruimte.



Figuur 3 – Berekening van de invloed van winning uit de gasvelden rond Ameland op de gemiddelde snelheid waarmee het kombergingsgebied Pinkegat zal dalen de komende decennia.

Een belangrijke algemene conclusie is dat de bodemdaling door gaswinning gestaag afneemt als de drukdaling tegen het einde van de productie afneemt. Dit geeft vertrouwen in de huidige praktijk van het jaarlijks actualiseren van een vooruitblik voor de komende vijf jaar. Deze aanpak is vastgelegd in het “Meet- & Regelprotocol”, de methode die gebruikt wordt om ervoor te zorgen dat de bodemdalingssnelheid in de Waddenzee binnen de gebruikruimte blijft.

**Meet- & Regelprotocol**

Op basis van het Meet- & Regelprotocol is NAM verplicht om met een door de Minister van EZ goedgekeurd meetplan de bodemdaling te meten. Elk jaar publiceert NAM een rapport met de meest recente metingen en een geactualiseerde verwachting voor de bodemdaling voor de komende jaren, met medeneming van de laatste inzichten.

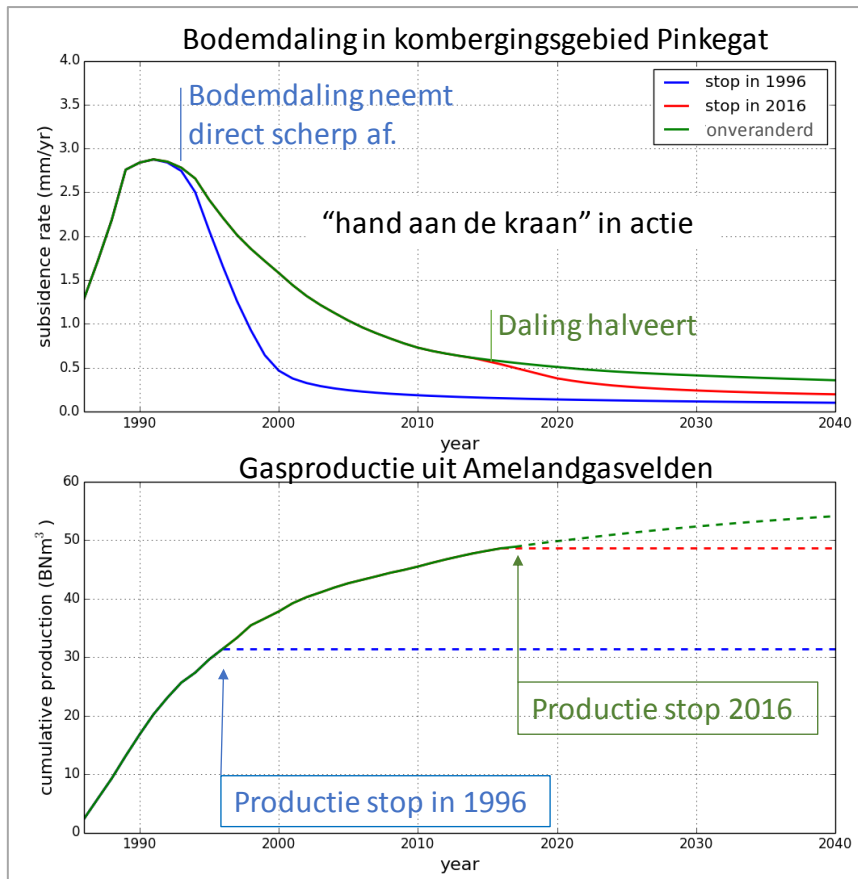
Een andere belangrijke, algemene conclusie is dat insluiten van de gasproductie een effectief middel is om de bodemdalingssnelheid snel te verminderen. Het regelkader rondom gaswinning uit gasvelden onder de Waddenzee voorziet in de mogelijkheid om de productie in te sluiten als de gebruiksruijme dreigt te worden overschreden. De studie laat duidelijk zien dat “hand aan de kraan” (HAK) een effectieve beheersmaatregel is.

**“Hand aan de kraan” (HAK)**

Het verminderen van gasproductie is het belangrijkste middel om dreigende overschrijding van de gebruiksruijme tegen te gaan, vandaar de naam “hand aan de kraan”.

Figuur 4 laat zien hoe de bodemdalingssnelheid in het Pinkegat afneemt na insluiting van de productie. Aan het begin van de productiefase, als de druk in het gasveld nog hoog is, neemt bij het stoppen van de productie de bodemdalingssnelheid zeer snel af. Ook aan het eind van de productiefase, als de druk in het gasveld al ver is gedaald, blijkt het stoppen van de productie nog steeds een effectief middel om bodemdalingssnelheid te reduceren. Ook in deze late fase neemt de bodemdalingssnelheid snel af en halveert binnen enkele jaren. De groene lijn laat zien dat de daling momenteel nog ongeveer een halve millimeter per jaar bedraagt en gestaag afneemt. Deze bodemdalingssnelheid blijft ruim binnen de gebruiksruijme.

Dit is een bemoedigend resultaat. Het toont de effectiviteit aan van de waarborgen in de wet die moeten garanderen dat de gebruiksruijme niet zal worden overschreden. Zelfs als de jaarlijkse rapportage in de Meet- & Regelcyclus zou aantonen dat de bodemdalingssnelheid de gebruiksruijme dreigt te overschrijden, is er een effectief snelwerkend middel om er iets aan te doen.



Figuur 4 – Deze figuur brengt in beeld dat de bodemdaling kan worden bijgestuurd door het nemen van productiemaatregelen. Een productiestop in 1996 of 2016 vermindert de bodemdaling. In de onderste figuur is te zien hoe bij een productiestop in 1996 (blauwe stippellijn) de cumulatieve productie niet verder stijgt, evenals bij een productiestop in 2016. De bovenste figuur toont de bijbehorende vermindering van de bodemdalingssnelheid.

## 2. De onderzoeksoopdracht

In de instemmingsbesluiten op de winningsplannen voor een aantal gasvelden onder de Waddenzee (Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, Anjum, en Ameland) heeft de Minister van EZ aan NAM gevraagd om diepgaand onderzoek te verrichten naar de tijdafhankelijkheid in het gedrag van de bodemdaling en de mogelijke consequenties voor de bodemdaling op de lange termijn. Met dit onderzoek wilde de Minister van EZ een dieper inzicht krijgen in het gedrag van de bodemdaling ter ondersteuning van het regelkader ter bewaking van de maximaal toelaatbare grens aan de bodemdaling in de Waddenzee.

### 2.1. LTS-I studie

NAM is in 2013 begonnen met deze studie en op diverse momenten in de afgelopen jaren zijn resultaten en rapporten opgeleverd aan SodM en openbaar gemaakt.

In maart 2014 heeft SodM haar verwachtingen omtrent de studie verduidelijkt en aangegeven dat een integrale toets van de gevonden verklaringen van tijdsafhankelijke langetermijneffecten van bodemdaling tegen beschikbare historische velddata van productie en bodemdaling deel moet uitmaken van deze studie.

In januari 2015 heeft NAM voorgesteld om de meest aannemelijke hypothesen die tot dan toe uit het lopende onderzoek naar voren waren gekomen op het Amelandveld te toetsen. Voor dit veld zijn namelijk lange reeksen productiedata en bodemdalingsmetingen vanaf 1986 tot 2017 beschikbaar, waardoor modellen goed kunnen worden getoetst tegen bestaande data.

In maart 2016 is de IGM, na enkele technische kanttekeningen, akkoord gegaan met het werkplan voor de integrale toets tegen historische velddata.

### 2.2. LTS-II studie

In januari 2017 heeft NAM een rapport opgeleverd aan SodM, aangevuld met een Addendum in maart 2017 met de resultaten van de integrale toets tegen historische velddata van de Amelandgasvelden.

In mei 2017 heeft de IGM aangegeven dat de kwaliteit van de LTS-II studie en het opgeleverde rapport plus addendum op een aantal specifieke punten onvoldoende waren en daarmee niet “ten genoegen van de IGM” zijn uitgevoerd.

De IGM heeft NAM op 3 juli 2017 gevraagd vóór 31 oktober 2017 de studie en de rapportage op zes specifieke punten te verbeteren.

### 2.3. LTS-II “vervolgstudie”

De IGM heeft de verwachte verbetering als volgt geformuleerd:

*“Nadere analyse van de onderzoeksresultaten heeft een aantal belangrijke technische onvolkomenheden in de LTS-II studie blootgelegd. Op zes belangrijke punten is de kwaliteit van de studie nog onvoldoende. Het betreft:*

- (1) het laten bestaan van grote verschillen tussen de locaties van de gemodelleerde bodemdalingskommen en de werkelijk gemeten bodemdalingskommen;*
- (2) het niet in de modellering meenemen van het effect van de aanvankelijke grote overdruk in het Amelandveld;*
- (3) het gebruiken van vier specifieke compactiemodellen in plaats van een generiek compactiemodel;*
- (4) het gebruik van onrealistische waarden voor de zoutkruip;*
- (5) het groot houden van de onzekerheidsband in de voorspelde bodemdaling door niet de verwachte covarianties in ogenschouw te nemen; en*
- (6) modelleerproblemen door het gebruik van het programma AEsups.*

*De toegestuurde rapporten zijn derhalve, inclusief addendum, niet ten genoeg van de IGM. Gelet op het verstrijken van de daarvoor gestelde termijn, levert dit nog steeds een overtreding op van de hierboven genoemde artikelen uit de instemmingsbesluiten.”*

Dit rapport rapporteert over de LTS-II vervolgstudie en geeft een volledig overzicht van de methode die gevolgd is met daarbij de gebruikte modellen en resultaten. De verbeteringen die door NAM zijn uitgevoerd op de zes bovengenoemde punten komen uitgebreid aan bod.

### 3. Integrale toetsing tegen historische veldgegevens

Deze rapportage laat zien hoe de integrale toetsing van de ondergrondmodellen tegen historische velddata is uitgevoerd voor de bodemdaling boven het Amelandgasveld. Het rapport concentreert zich vooral op de verbeteringen op zes specifieke punten waar SodM om heeft gevraagd. In de LTS-II vervolgstudie heeft NAM deze specifieke punten geadresseerd en de gewenste verbeteringen aangebracht. Deze zijn kort omschreven in Tabel 1.

*Tabel 1 – Deze tabel toont de gewenste verbeteringen in de LTS-II studie en de bijbehorende herstelactie*

	<b>Op te lossen onvolkomenheid</b>	<b>Ondernomen actie en resultaat</b>
1	verbeter de passing van de gemodelleerde bodemdaling met de metingen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Een meer uitgebreide set reservoirscenario's beschrijft de mogelijke variaties in het drukverloop van de aquifers. Elk van deze scenario's is zorgvuldig gekalibreerd met de historische drukgegevens in de gaslagen.</li> <li>- De geomechanische modellen zijn verbeterd (zie punt 3 en 4).</li> <li>- Incorrecte data zijn uit de landmeetkundige metingen gefilterd.</li> <li>- Met al deze verbeteringen laten de bodemdalingsmodellen een betere passing zien met de landmeetkundige metingen.</li> </ul>
2	neem het effect van aanvankelijk grote overdruk in het Amelandveld mee in de modellering	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Het model voor de bodemdaling is aangepast en de initiële overdruk wordt nu meegenomen in de compactiemodellering.</li> </ul>
3	gebruik 1 generiek compactiemodel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- De modellering van de bodemdaling is nu gebaseerd op 1 generiek compactiemodel.</li> </ul>
4	gebruik realistische waarden voor de zoutkruip	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Laboratoriumexperimenten van relevante zoutlagen zijn gebruikt om realistische waarden voor de zoutkruip te verkrijgen.</li> <li>- De nu gebruikte waarden en de uitkomsten van simulatietesten komen goed overeen met de resultaten van onderzoek aan de Universiteit Utrecht.</li> </ul>
5	neem de verwachte covarianties en het effect hiervan op de onzekerheidsband in de voorspelde bodemdaling in ogenschouw	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gedeeltelijk waren deze covarianties al meegenomen, in de huidige resultaten zijn ook de nog ontbrekende covarianties meegenomen in de berekening van de resultaten.</li> <li>- De betekenis en het effect van de samenhang (covarianties) tussen metingen is verduidelijkt.</li> <li>- Het effect op de onzekerheidsband is gevisualiseerd in figuren die zowel de bodemdalingsmodellen als de metingen weergeven.</li> <li>- De betrouwbaarheid van de voorspelde bodemdaling is groter geworden en beter in beeld gebracht</li> </ul>
6	los de modelleerproblemen met AEsups op	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Het programma AEsups is vervangen door een andere methode (een aangepaste versie van de Geertsma &amp; van Opstal methode).</li> <li>- Een bijkomend voordeel is de grote rekensnelheid, waardoor vele mogelijkheden kunnen worden doorgerekend. Dit is een van de redenen voor een verbetering in de passing van de modellen aan de data.</li> </ul>

De meest aannemelijke hypothesen voor tijdafhankelijk gedrag van de bodemdaling die uit de LTS-I studie naar voren zijn gekomen, en de fysische processen achter deze hypothesen zijn verwerkt in de

modellen die de bodemdaling beschrijven. Deze modellen bevatten parameters waarvan de waarde niet precies bekend is. Wel is uit meetgegevens van de ondergrond bekend binnen welk bereik deze parameters kunnen variëren.

Een voorbeeld van een parameter in het model voor de bodemdaling die niet expliciet gemeten wordt, is de drukontwikkeling in de watervoerende diepe gesteentelagen, de aquifers. Voor dit onderzoek zijn 58 reservoirmodellen gemaakt om de mogelijke variatie in de drukontwikkeling in de aquifers te beschrijven. Een ander voorbeeld is de relatie tussen drukdaling en compactie. Hoeveel compactie iedere bar drukdaling tot gevolg heeft is niet exact bekend. Wel is met laboratoriumexperimenten bepaald binnen welke grenzen dit kan variëren.

### 3.1. De “Monte Carlo” rekenmethode

De beschikbare meetgegevens met betrekking tot processen in de diepe ondergrond zijn zeer uiteenlopend, van productiedata en drukmetingen in het gasreservoir tot bijvoorbeeld laboratoriumtesten van gesteentekernen die de mate van compactie bepalen en experimenten om de viscositeit van zoutlagen te bepalen.

Met een specifieke keuze voor de waarde van iedere parameter berekent het model de bodemdaling boven het gasveld van 1986 tot 2040. De vraag die beantwoord moet worden is:

*“Met welke combinatie van parameterwaarden kan het bodemdalingsmodel de gemeten bodemdaling aan het aardoppervlak goed beschrijven en wat is de betrouwbaarheid van het voorspelde gedrag in de toekomst?”*

Voor de periode van 1986 tot heden is het mogelijk de berekening te vergelijken met de daadwerkelijk gemeten bodemdaling op elk van de peilmerken boven het gasveld. Gezien de grote dataset van 30 jaar meetgegevens kunnen de modelparameters goed gekalibreerd worden. Dit komt de betrouwbaarheid van de voorspelling van de toekomstige bodemdaling ten goede.

In deze studie wordt een beproefde rekenmethode, de Monte Carlo methode, gebruikt om de vele mogelijke combinaties van verschillende keuzes voor de waarde van iedere parameter gestructureerd te onderzoeken.

#### **Monte Carlo simulatie**

Een simulatietechniek waarbij een fysiek proces niet één keer maar vele malen wordt gesimuleerd, elke keer met andere aannames. Het resultaat van deze verzameling simulaties is een beschrijving van en de kansverdeling binnen het hele gebied van mogelijke uitkomsten.

Deze methode kiest voor iedere onzekere parameter binnen de opgegeven grenzen willekeurig een specifieke waarde en rekent vervolgens de bodemdaling uit voor ieder jaar van 1986 tot 2040. Vervolgens kiest de methode een nieuwe waarde voor alle parameters en rekent alles opnieuw uit.

Voor elk van de eerdergenoemde 58 verschillende reservoirmodellen en bijbehorende drukontwikkeling is voor 20.000 verschillende combinaties van de parameters in het geomechanische model de ontwikkeling van de bodemdaling uitgerekend van 1986 tot 2040. Dit geeft ongeveer 1,2 miljoen verschillende oplossingen. Met de beschikbare meetgegevens wordt nu bepaald welke van deze 1,2 miljoen mogelijkheden de historische data goed beschrijven. Zo



ontstaat de “integrale toetsing” tegen de historische velddata, en kan het lange termijn gedrag van de bodemdaling worden onderzocht, zoals omschreven in de onderzoeksopdracht.

### 3.2. De “confrontatie” tussen de modelberekeningen en de bodemdalingsmetingen

Elk van de 1,2 miljoen berekeningen wordt vervolgens geconfronteerd, gevalideerd, met de beschikbare landmeetkundige bodemdalingsmetingen. Deze metingen zijn hiervoor in de vorm van ‘dubbele verschilmetingen’ omgerekend, zoals verder wordt uitgelegd in sectie 3.3.

Deze confrontatie berekent een maat voor de nauwkeurigheid van een modelberekening vergeleken met de meetgegevens aan de peilmerken. De maat voor de nauwkeurigheid is in deze studie de  $\chi^2$ -waarde. Een strenge wiskundige (statistische) procedure zorgt ervoor dat alleen de beste modellen worden geaccepteerd, gebruikmakend van een uit de wiskunde bekende kansverdeling in de maat voor de nauwkeurigheid ( $\chi^2$ ).

De modelberekeningen met de grootste nauwkeurigheid krijgen vervolgens ook de grootste waarschijnlijkheid, en daarmee de zwaarste weging. Hieruit volgt een kansverdeling voor de modelvoorspellingen en daarmee de kans voor het optreden van een bepaalde bodemdaling. Op basis van deze verdeling kan ook het gewogen gemiddelde van alle oplossingen worden berekend. Verder wordt een 95% betrouwbaarheidsinterval bepaald. In de technische bijlagen wordt dit uitvoerig beschreven.

#### **Confrontatie**

Een modelberekening van de bodemdaling wordt gevalideerd met ongeveer 1400 ‘dubbele verschilmetingen’ van de bodemdaling. Deze 1400 metingen zijn verspreid over de tijd tussen 1986 tot heden, en verspreid over de vele peilmerken op Ameland en in de Waddenzee. De metingen variëren van waterpasmetingen tot GPS-metingen. Deze confrontatie wordt gedaan door een computerprogramma dat hieruit een score voor de nauwkeurigheid van het model berekend. Deze score, vergeleken met de score voor alle andere 1,2 miljoen modellen, bepaalt de weging van een specifieke modelberekening.

De betrouwbaarheid van een model zoals is afgeleid uit de confrontatie van dat model met metingen uit het verleden wordt vervolgens doorgezet naar de toekomst. Hierbij is de aanname dat een model dat een goede beschrijving geeft van de afgelopen 31 jaar (1986 – 2017) ook een goed beeld geeft van de nog te verwachten bodemdaling in de komende 23 jaar (2017 – 2040).

In de oorspronkelijke LTS-II studie heeft NAM, op basis van consultatie met de betrokken kennispartners en in overleg met SodM, een confrontatiemethode uit de wetenschappelijke literatuur geselecteerd. Deze methode is in staat om oplossingen snel met de circa 1400 metingen te vergelijken. De beste modellen worden geselecteerd en daarom wordt deze techniek een filtertechniek genoemd, het filtert namelijk de goede oplossingen uit het totaalaanbod van mogelijke oplossingen.

Uit de beschrijving van de originele methode in de literatuur was de indruk ontstaan dat deze methode in staat zou zijn om tot een goede beschrijving van de bodemdaling te leiden zonder gedegen landmeetkundige toetsing en zonder zorgvuldig gekalibreerde reservoirmodellen. Aan het eind van het studietraject in maart 2017 bleek dit echter niet het geval. NAM heeft de methode

daarna uitgebreid onderzocht. In de technische bijlage is hierover uitvoerig gerapporteerd. Diverse aanpassingen aan de methode, die zijn besproken met de onderzoekspartners bij TNO en TU-Delft, hebben ertoe geleid dat de methode toch met vertrouwen kon worden ingezet voor Ameland.

### 3.3. De dubbele verschilmeting en het verwijderen van uitschieters

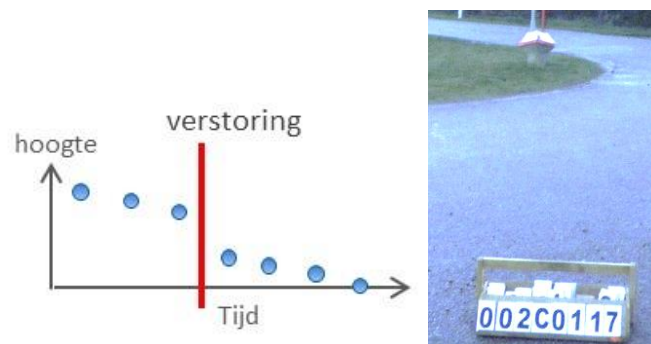
De landmeetkundige metingen zoals ze in deze studie worden gebruikt voor het valideren van de modellen zijn zogenaamde dubbele verschilmetingen, die als voordeel hebben dat ze niet ten opzichte van een vast punt hoeven te worden gemeten. Ze bieden ook het voordeel dat een meetserie met een verstoring, zoals te zien in Figuur 5, toch grotendeels kan worden gebruikt.

#### **Dubbele verschilmeting (“double-difference”)**

Bodemdaling, of *subsidence*, wordt gemeten door de hoogte van peilmerken ten opzichte van elkaar in millimeters te meten. In deze studie wordt gebruik gemaakt van de dubbele verschilmeting, in de technische rapporten aangeduid met “*double-difference*”. Het dubbele verschil is de verandering van hoogteverschil tussen twee peilmerken over een bepaalde tijdsperiode ten opzichte van elkaar.

De metingen worden uitgevoerd aan peilmerken (zie Figuur 2) door middel van een waterpassing of op basis van GPS-metingen. Deze meetgegevens zijn beschikbaar van 1986 tot 2017.

In de metingen van bodemdaling aan peilmerken kunnen uitschieters of sterk afwijkende metingen voorkomen. Zo kan een jarenlange meetserie ineens verstoord raken en vervolgens weer jarenlang het verwachte gedrag vertonen, bijvoorbeeld door een aanrijding of een andere oorzaak. Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 5. Doordat de methode gebruik maakt van de dubbele verschilmeting, kan het grootste deel van de data behouden blijven. De meetserie wordt in twee stukken geknipt, en het gedrag vóór en ná de verstoring kan nog steeds gebruikt worden om het model te valideren.



*Figuur 5 – Een voorbeeld van een verstoring van een peilmerk. Op de foto rechts is in de verte een peilmerk te zien dat een verstoring heeft ondergaan. Een ANWB-wegwijzer (“paddenstoel”) is aangereden en staat nu scheef.*

Landmeetkundigen (geodeten) bij NAM hebben met beproefde en gangbare geodetische methodes uitschieters uit de peilmerkmetingen gefilterd. Het gaat hier om het verwijderen van verstoringen, fouten in de identificatie van peilmerken, en verkeerde aflezingen. Een klein percentage van de dubbele verschilmetingen wordt zo uit de peilmerkmetingen verwijderd. In het hoofdstuk over “outlier removal”, in de technische bijlagen, wordt uitgebreid verslag gedaan van dit proces, waarbij precies wordt aangegeven hoeveel metingen zijn verwijderd, waarom ze zijn verwijderd en waar de betreffende peilmerken liggen.

Het verwijderen van uitschieters verhoogt de nauwkeurigheid bij de validatie van modelresultaten met betrouwbare data. Subtiele verschillen in de berekeningen van de modellen worden nu beter zichtbaar. Dit is een belangrijke verbetering in de passing van de modellen en het aanscherpen van het betrouwbaarheidsinterval in de berekeningen.

### 3.4. Verbetering in de beschrijving van de drukontwikkeling in de reservoirs

Zoals eerder genoemd zijn er 58 scenario's gemaakt voor de mogelijke ondergrondse drukontwikkeling in de tijd zowel in het gasveld als in de waterhoudende lagen rond het gasveld die zich uitstrekken onder het waddegebied (aquifers). Hierbij is ervoor gezorgd dat ieder scenario zorgvuldig gekalibreerd is aan de beschikbare productie- en drukgegevens. Hierdoor is de variatie klein op plekken waar de kennis door historische velddata groot is, terwijl op plekken waar geen directe metingen bestaan (bijvoorbeeld aquifers) zoveel mogelijk variatie wordt behouden. Op deze manier kan de invloed van mogelijke drukveranderingen in de aquifers op de bodemdaling goed worden onderzocht.

### 3.5. Zoutkruip

Het gedrag van het zout en vooral de parameters die de viscositeit van het zout beschrijven, zijn uitgebreid onderzocht in de literatuur en op basis van de gegevens uit laboratorium testen op relevante zoutkernen. Deze gegevens zijn vervolgens getest in modellen. De resultaten die door NAM zijn verkregen zijn vergeleken met werk dat is gedaan aan de Universiteit Utrecht. Er is een goede overeenstemming tussen deze volledig onafhankelijk verkregen onderzoeksresultaten. In de technische bijlage wordt uitvoerig verslag gedaan van het studiewerk dat is verricht om zeker te zijn dat realistische waarden van de zoutkruip ten grondslag liggen aan de hier gepresenteerde resultaten.

### 3.6. Covariantie in de idealisatie precisie en model-imperfecties

De confrontatie van de modeluitkomsten met de metingen bepaalt de nauwkeurigheid van de passing van elk model met de data. Bij de berekening van deze "nauwkeurigheds-score" dient rekening gehouden te worden met het verband tussen de metingen in tijd en in plaats. Deze samenhang heet de covariantie, en al deze verbanden staan in een soort tabel, de covariantiematrix.

#### **Covariantie**

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

De covariantie was door NAM voor de meetonnauwkeurigheid al volledig meegenomen. De uitbreiding die nu doorgevoerd is houdt aanvullend ook rekening met de "idealisatie precisie" van de peilmerken en de "model-imperfecties". De covariantie van alle elementen is nu consistent meegenomen in de berekeningen.

Verder is de eerdergenoemde covariantie, en de formulering van de covariantiematrix onderzocht. Ook dit, wiskundige proces, en de overwegingen die hierin naar voren zijn gekomen, worden in de technische bijlage verder uitgelegd.

Ook zonder gaswinning is de bodem in beweging. Van een gebied in Friesland waaronder geen gaswinning plaatsvindt, is de beweging van peilmerken bestudeerd om te kijken hoe groot deze beweging zonder gaswinning kan zijn. Dit onderzoek is gebruikt voor het beschrijven van de “idealiserende precisie” en tevens gerelateerd aan de model-imperfectie.

**Idealiserende precisie**

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

**Model-imperfecties**

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

### 3.7. Geomechanische modellering

Tenslotte zijn de geomechanische modellen verbeterd zodat ze beter het mechanisch gedrag van de ondergrond beschrijven. Hierin zijn de gesteente-mechanische inzichten zoals verkregen in de LTS-I studie volledig meegenomen. Er wordt gebruik gemaakt van één, generiek compactiemodel dat aangepast is aan de specifieke ondergrondse condities van Ameland. Hierin wordt ook van het effect van de aanvankelijke grote overdruk in het Amelandveld op een goede manier meegenomen. Het gasreservoir is dan nog heel erg stijf omdat het ooit in het verleden in druk is gestegen gedurende de periode van gasvulling. Als de druk verder is gedaald, verandert het gedrag van de compactie en verhouden zich de druksinking en de compactie niet langer als een rechte lijn.

AEsubs is software om bodemdaling te berekenen. De toepassing van het programma op het gasveld bij Ameland heeft een aantal problemen aan het licht gebracht die te maken hebben met de opbouw van de ondergrond boven het gasveld. NAM heeft deze problemen in eerdere rapporten beschreven, en nu vastgesteld dat AEsubs nog niet ver genoeg is ontwikkeld om te kunnen worden toegepast op Ameland.

AEsubs is nu vervangen door een ander model om de bodemdaling te berekenen. NAM heeft gekozen voor de methode Geertsma & van Opstal. Deze methode wordt veel toegepast in de literatuur, om bodemdaling te berekenen en is de standaard voor bodemdalingsberekeningen in nieuwe winningsplannen. Het model is uitgebreid met een tijdafhankelijke vormfactor om het zoutgedrag van de zoutlaag boven het veld te simuleren.

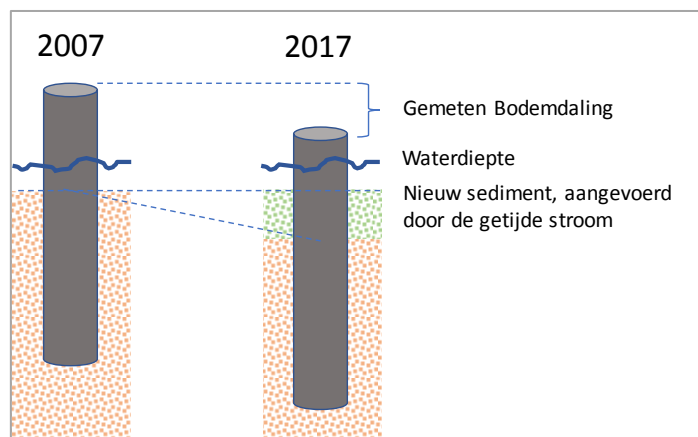
Een bijkomend voordeel van het gebruik van één compactiemodel in combinatie met het nieuwe programma voor de berekening van de bodemdaling is de mogelijkheid om de Monte Carlo methode veel meer modelsimulaties te laten uitvoeren. Dit biedt de mogelijkheid om de waarde van iedere parameter met zeer kleine stapjes te veranderen. Hierdoor is het mogelijk om voorspellingen te genereren die nog beter passen aan de historische data.

Al deze veranderingen hebben tot gevolg gehad dat de berekeningen van de bodemdaling overal in de bodemdalingskom en op alle momenten in de tijd nauwkeuriger passen aan de lange set meetgegevens aan de peilmerken.

## 4. Resultaten

### 4.1. Peilmerkbeweging van 1986 tot 2040

Op het eiland manifesteert daling zich als daling van het land. In de Waddenzee echter niet als daling van de zeebodem. Zie in Figuur 6 schematisch hoe daling wordt gemeten aan diep in de bodem geslagen palen terwijl instroom van sedimenten deze daling van de bodem tenietdoet.



*Figuur 6 – Bij meting blijkt een peilmerk te zijn gedaald, de diepere bodem is gedaald, maar door sediment aanvoer met de getijdestroom, het “meegroeivermogen”, is het niveau van de bodem (de waterdiepte) niet veranderd.*

De volgende plaatjes, vanaf Figuur 7, tonen de resultaten van de modelberekeningen vergeleken met de gemeten bodemdaling. Voor een aantal verschillende peilmerken is hier de beweging te zien in de tijd, en de voorspelling van de nog te verwachten beweging in de verre toekomst, en de betrouwbaarheid van die berekening. Aan de grafieken is te zien dat de modelberekening in de diepere gedeelten in de bodemdalingsskom op sommige plaatsen enkele centimeters méér en op andere plaatsen enkele centimeters minder bodemdaling voorspellen dan er daadwerkelijk is gemeten aan de peilmerken. In de minder diepe gedeelten van de kom zijn deze verschillen kleiner. Bodemdaling heeft ook andere oorzaken die niets met gaswinning te maken hebben. Deze zijn niet verwerkt in de modellen en daarmee mogelijk een verklaring voor de verschillen. In sectie 4.3 is deze beweging met grafieken zichtbaar gemaakt.

Ook zijn er een aantal voorbeelden opgenomen van peilmerken in de Waddenzee. Hieraan is ook weer te zien dat het gewogen gemiddelde van de modelberekeningen op sommige plaatsen iets meer en op andere plaatsen iets minder daling voorspelt dan de metingen aangeven. Dit is het gevolg van de in deze studie gebruikte methode, die kijkt namelijk voor het bepalen van de nauwkeurigheid van een modelberekening, naar alle peilmerkgegevens in de hele kom van de bodemdaling op ieder moment in de tijd.

De methode voor de jaarlijkse verplichte rapportage in de Meet- & Regelcyclus daarentegen, legt de nadruk specifiek op kombergingsgebied Pinkegat, waar maar enkele meetpunten zijn, en maakt gebruik van een ander compactiemodel. De passing aan de meetgegevens op locaties buiten het kombergingsgebied Pinkegat is minder belangrijk, en het is duidelijk dat die passing niet zo goed is als de in deze studie behaalde resultaten.

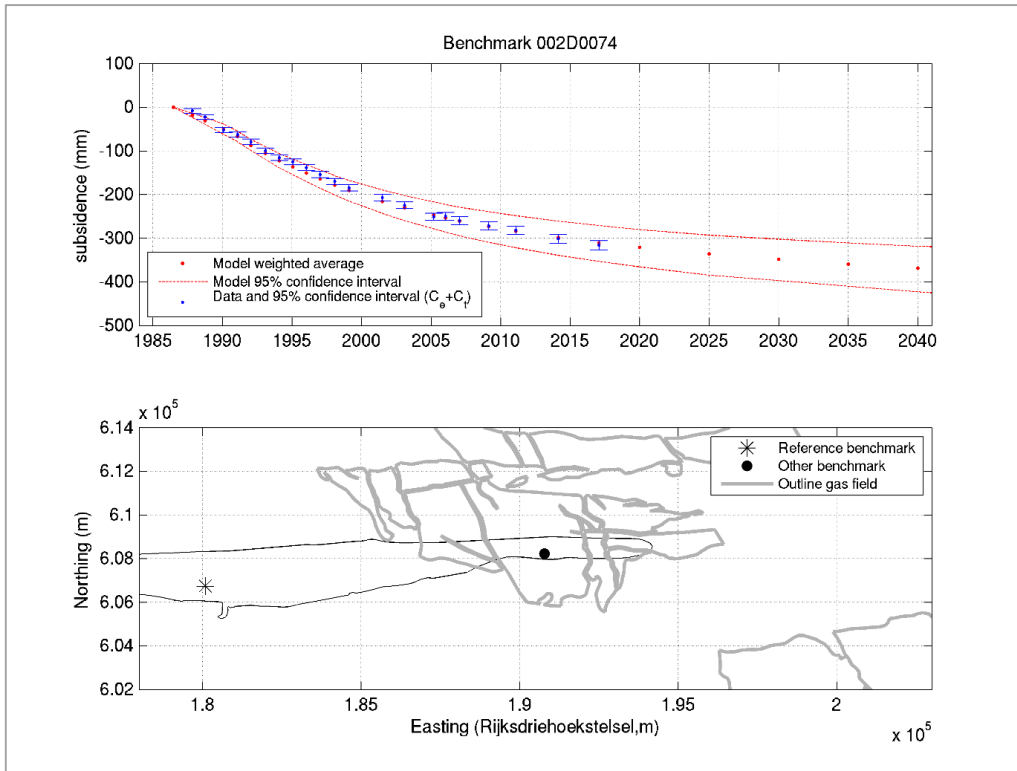
Een vergelijking met de resultaten uit deze studie toont aan dat de meest recente Meet- & Regelrapportage een overschatting geeft van de bodemdaling in het kombergingsgebied Pinkegat.

De voorspelling op grond van de Meet- & Regelcyclus, is dan ook niet een-op-een te vergelijken met de resultaten van deze studie waarbij de gehele bodemdalingskom zorgvuldig in ogenschouw is genomen.

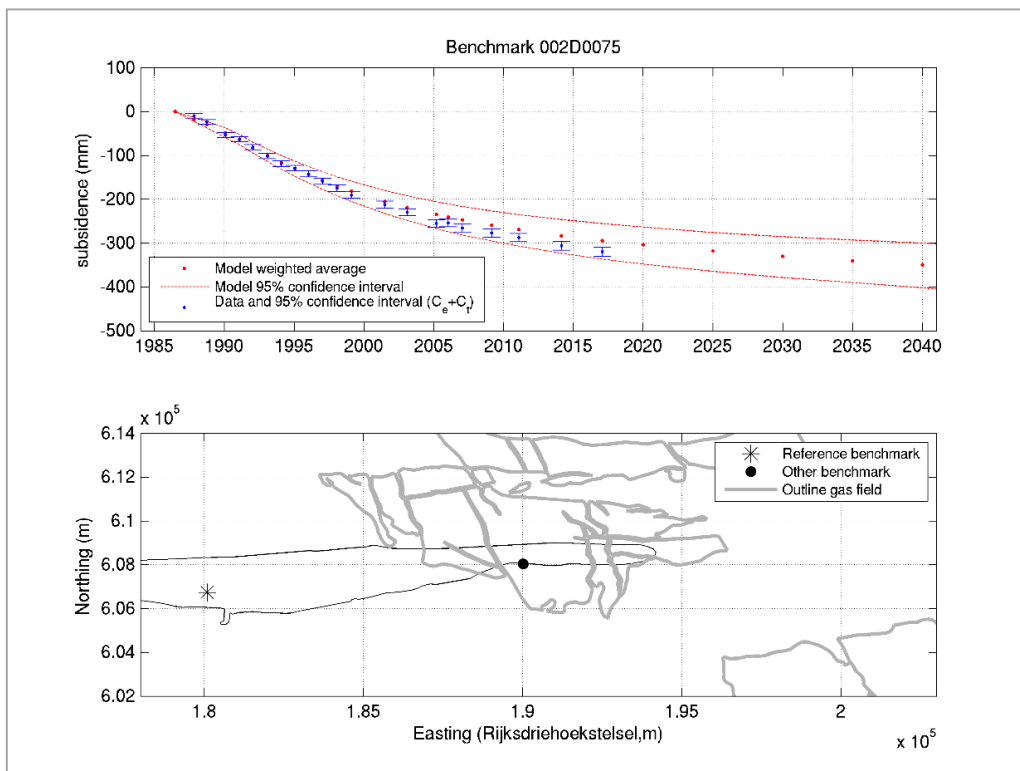
In dit gedeelte zijn enkele voorbeelden opgenomen van gemeten en voorspelde bodemdaling. De grafieken tonen ook het betrouwbaarheidsinterval in de voorspelling, de meeton nauwkeurigheid inclusief de potentiële peilmerkinstabiliteit. Voor de visualisatie zijn de dubbele verschilmetingen en de covariantiematrix getransformeerd naar een eenduidige referentie in tijd en plaats. In de technische bijlagen zijn de grafieken opgenomen voor alle peilmerken.

Deze figuren brengen een groot aantal gegevens overzichtelijk bij elkaar met een kaartje aan de bovenzijde en daaronder een bodemdalingsprofiel:

- 1) Het kaartje onder de grafiek toont het volgende:
  - Het peilmerk waarop de grafiek betrekking heeft.
  - De grijze lijnen tonen de omtrek van de gasreservoirs (op 3000m diepte).
  - De zwarte lijn is het eiland Ameland.
  - De ster is het punt dat is gekozen als relatief stabiel referentie punt ten opzichte waarvan de daling van het betreffende peilmerk in beeld wordt gebracht.
- 2) De grafiek toont de daling van een peilmerk in het verleden en de berekening voor de toekomst. Op de horizontale as staat de tijd, op de verticale as de hoogteverandering van het peilmerk in millimeters ten opzichte van het referentie peilmerk:
  - De blauwe punten zijn de meetgegevens.
  - De donkerblauwe streepjes geven de meeton nauwkeurigheid inclusief de potentiële peilmerk instabiliteit weer.
  - De rode stippen geven het gewogen gemiddelde van de modellen aan.
  - De rode stippellijnen zijn boven en ondergrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval van de modellen.

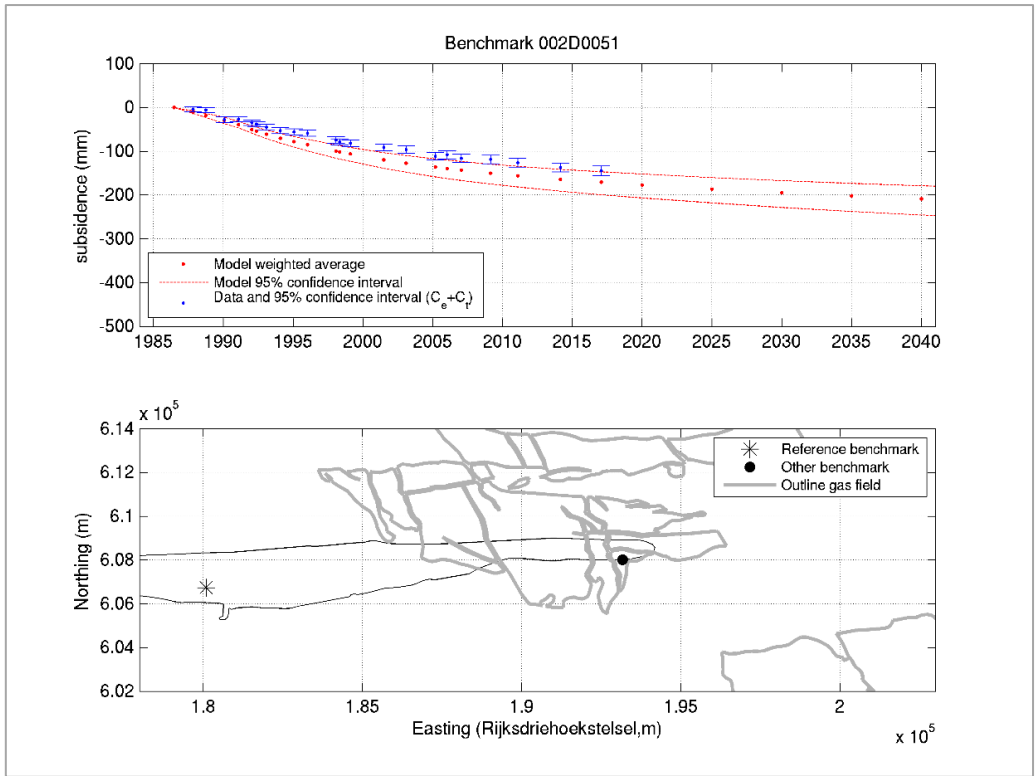


Figuur 7 – Een peilmerk dat zeer nauw het gewogen gemiddelde van de modelberekeningen volgt.

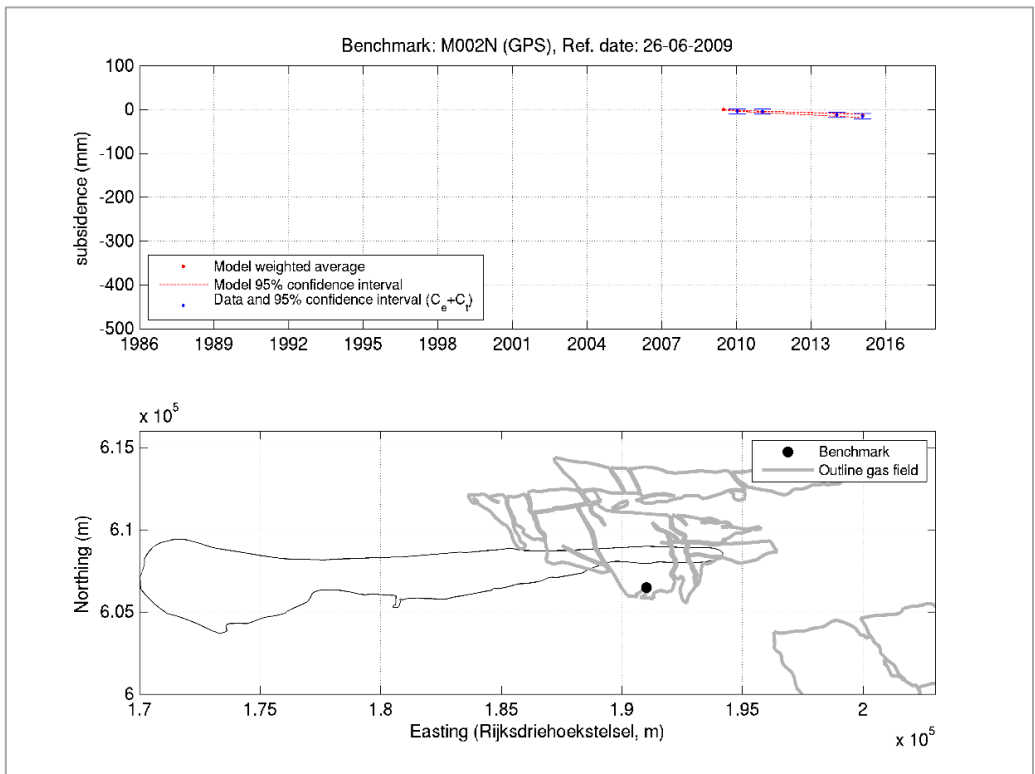


Figuur 8 – Een peilmerk dat iets verder is gezakt dan het gewogen gemiddelde van de modelberekeningen.

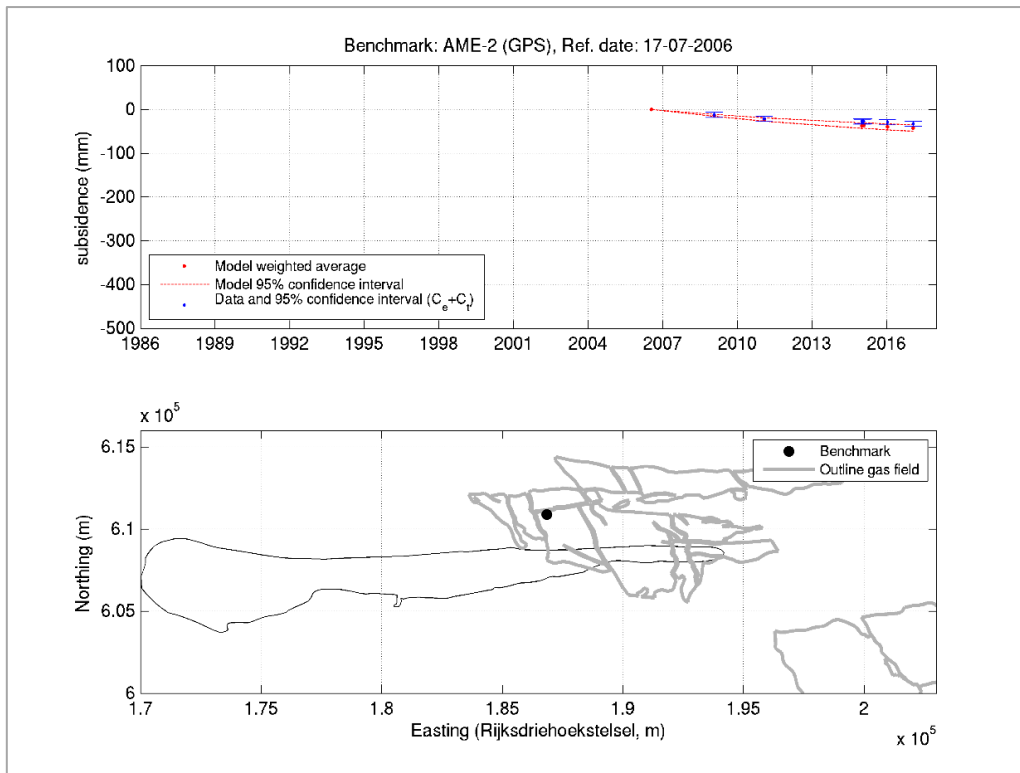




Figuur 9 – Een peilmerk dat minder is gezakt dan het gewogen gemiddelde van de modelberekeningen.



Figuur 10 – Bodemdaling in de Waddenzee.



Figuur 11 – Bodemdaling ten noorden van Ameland.

## 4.2. Ontwikkeling van de bodemdalingskom vanaf 1986

De volgende figuren laten zien hoe de kom van de bodemdaling zich ontwikkelt in de tijd, de modelberekeningen en de metingen aan de peilmerken op Ameland. De grafieken tonen ook het betrouwbaarheidsinterval in de voorspelling, de meetonauwkeurigheid inclusief de potentiële peilmerkinstabiliteit.

Te zien is dat de metingen binnen het betrouwbaarheidsinterval vallen, maar ook dat het gewogen gemiddelde van de berekeningen op sommige plaatsen in de kom de daling overschat, en op andere plaatsen onderschat.

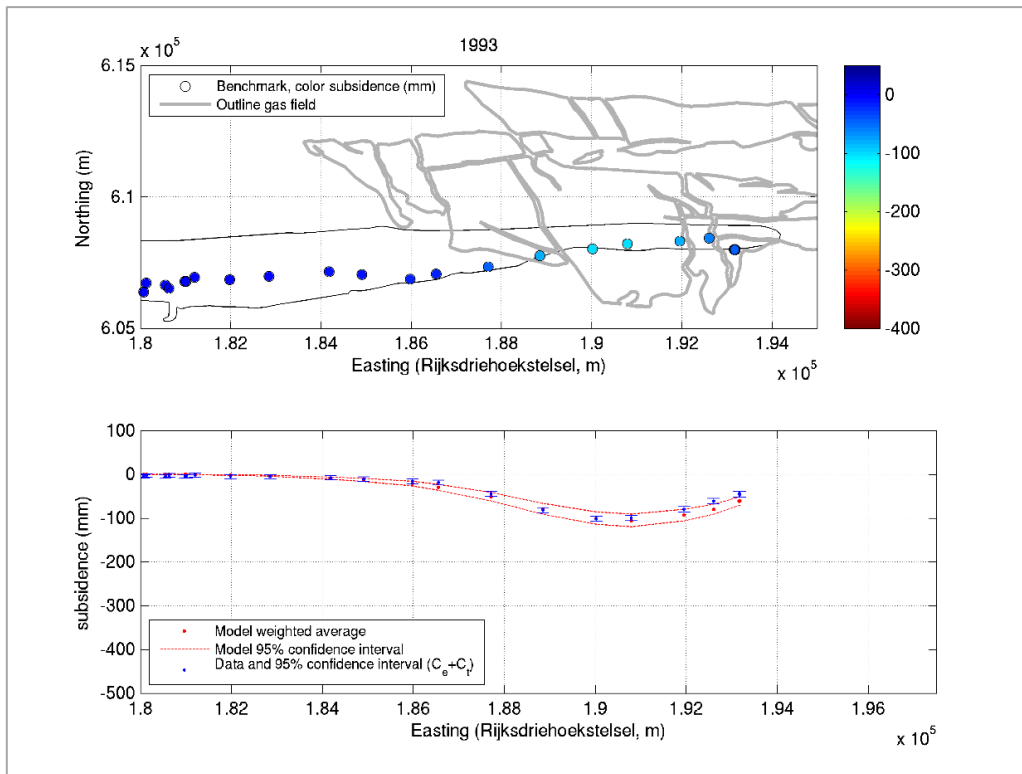
De figuren brengen al deze gegevens op een overzichtelijke manier bij elkaar. Elk plaatje bestaat uit een combinatie van een kaart en een grafiek.

De kaart toont:

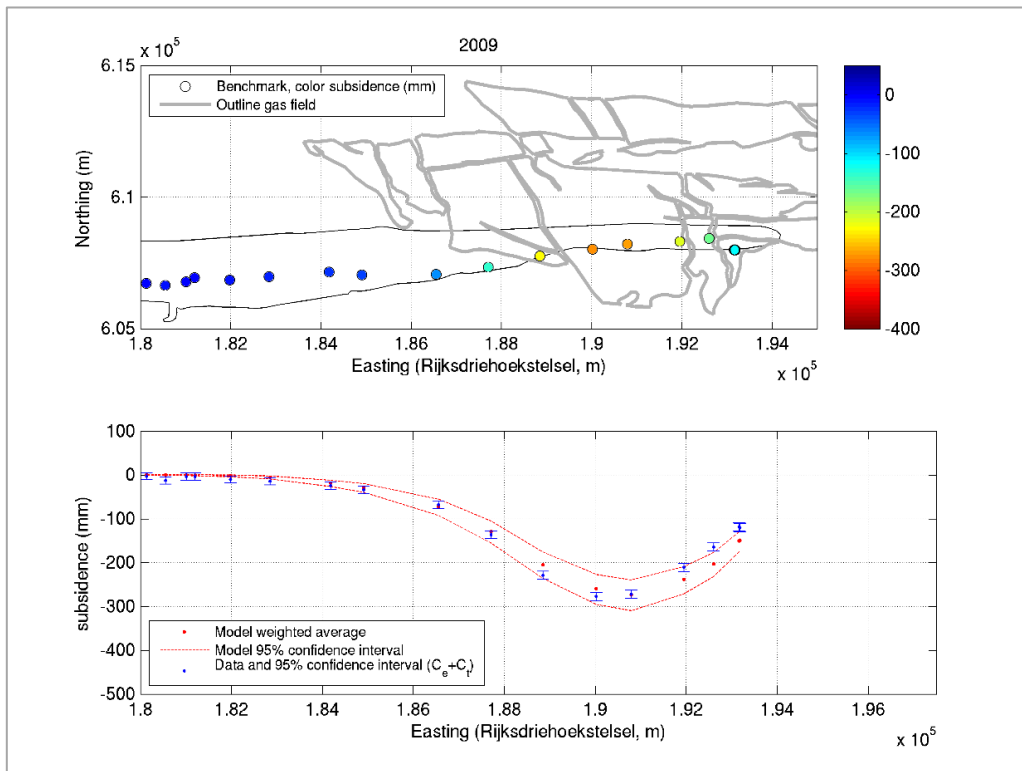
- Het eiland Ameland met de gasreservoirs en het jaartal boven de kaart.
- Op de assen staan de coördinaten volgens het Rijksdriehoekstelsel
- Elke gekleurde stip is de locatie van een peilmerk op Ameland waarvan de bodemdaling in de grafiek eronder is weergegeven.
- Op de kleurschaal rechts kan in millimeters de bodemdaling van de gekleurde stippen worden afgelezen.

De grafiek toont de daling van elk gekleurd peilmerk in de kaart erboven in het gegeven jaar ten opzichte van 1986. Op de horizontale as staat weer de coördinaat net als op de kaart erboven. Op de

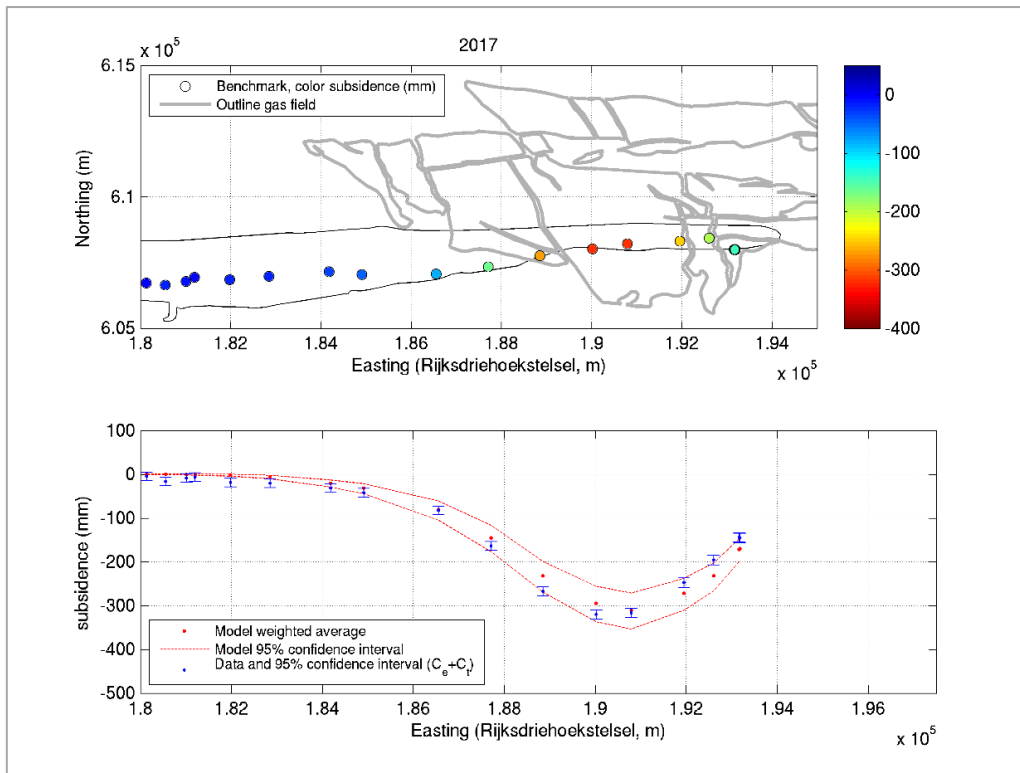
verticale as staat de hoogte van het peilmerk in millimeters ten opzichte van het referentie peilmerk. Verder zijn alle gegevens hetzelfde als in de vorige sectie.



Figuur 12 – Bodemdalingssom in het jaar 1993



Figuur 13 – Bodemdalingssom in het jaar 2009

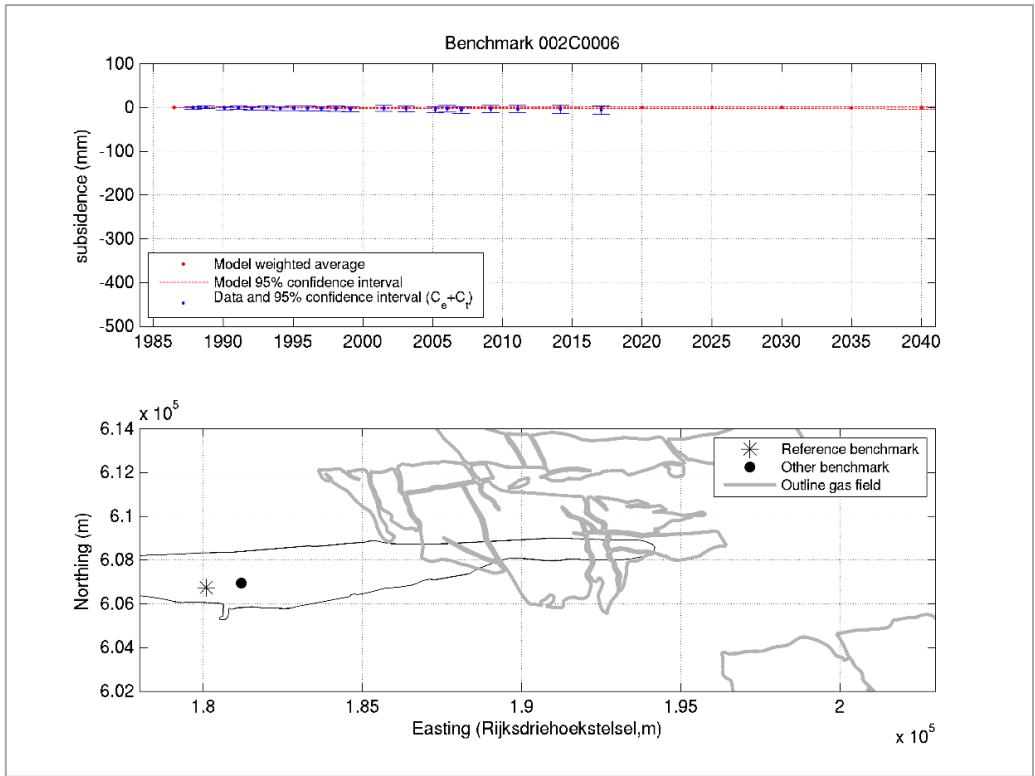


Figuur 14 – Bodemdalingskom in het jaar 2017

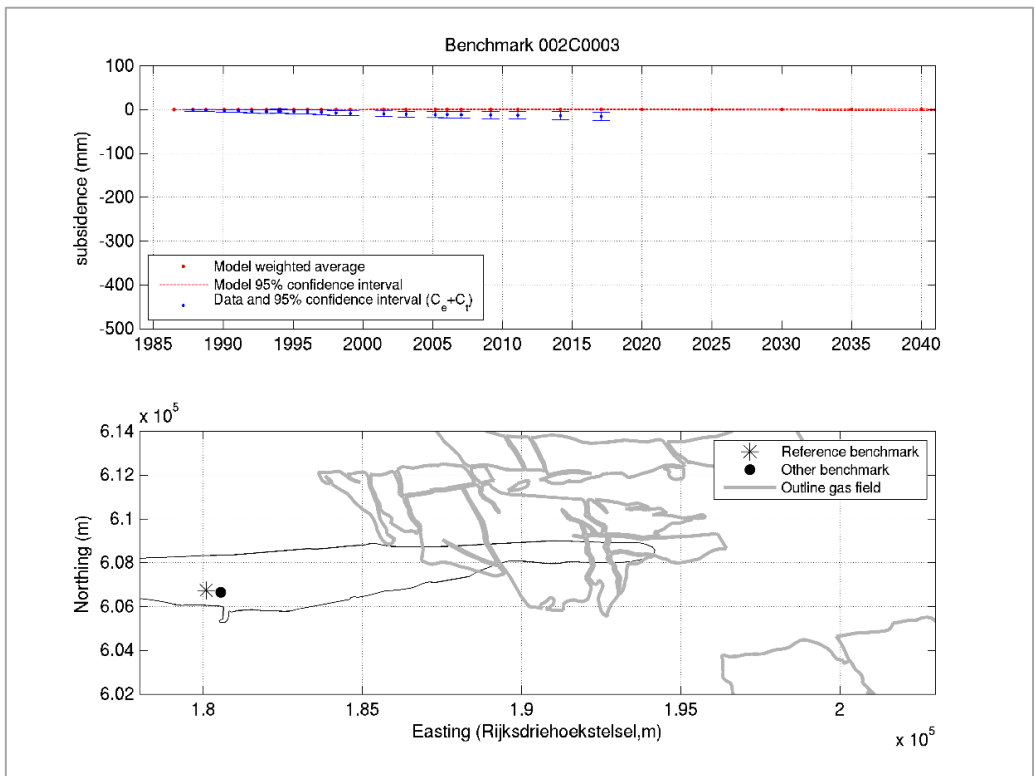
### 4.3. Peilmerk beweging zonder gaswinning

De volgende grafieken brengen de “idealiserende precisie” in beeld. Hieruit blijkt ook de noodzaak om dit zorgvuldig mee te nemen bij het valideren van modelberekeningen aan de metingen.

Figuur 15 en Figuur 16 tonen 2 peilmerken dicht bij elkaar. De ene daalt anderhalve centimeter en de andere niet. Deze daling kan zijn veroorzaakt door bijvoorbeeld grondwater-extractie, heterogeniteit in de ondergrond, of instabiliteit van de fundering.



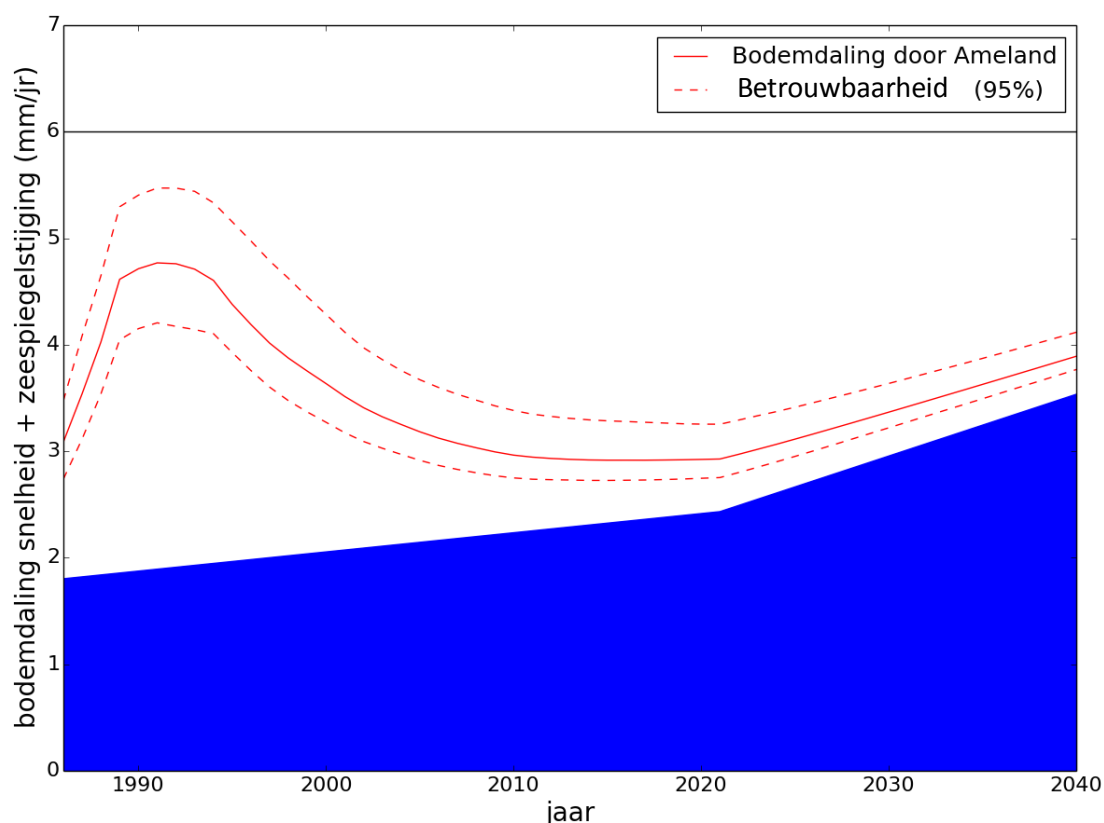
Figuur 15 - Een peilmerk buiten de invloedssfeer van de gaswinning. Dit peilmerk vertoont geen beweging ten opzichte van het referentie peilmerk.



Figuur 16 - Peilmerk buiten de invloedssfeer van de gaswinning dat wel enige daling vertoont.

#### 4.4. Bodemdaling in Pinkegat door de Ameland gaswinning

Figuur 17 toont de invloed van de gaswinning op kombergingsgebied Pinkegat van het begin van de gasproductie in 1986 tot in de verre toekomst in 2040. De snelheid van daling in het kombergingsgebied Pinkegat is in dit plaatje bovenop de geschatte zeespiegelstijging gezet, om zo het totale effect van de verdieping te kunnen vergelijken met het meegroeivermogen van 6 mm per jaar. De doorgetrokken rode lijn is het gewogen gemiddelde van alle berekeningen na confrontatie met de data van 1986 – 2017. De rode stippellijnen boven en onder de doorgetrokken streep geeft het betrouwbaarheidsinterval van de modellen weer. In sectie 4.5 is uiteengezet hoe deze is bepaald.



Figuur 17 – De snelheid van daling van de bodem in kombergingsgebied Pinkegat door de Ameland gaswinning.

Let wel, zoals uitgelegd in paragraaf 4.1 wordt de invloed van gaswinning in het kombergingsgebied tenietgedaan door de instroom van sedimenten wanneer de totale bodemdalingssnelheid onder het meegroeivermogen blijft.

#### 4.5. De betrouwbaarheid van voorspellingen

In sectie 3.1 is uiteengezet hoe de vrije ofwel onbekende parameters binnen vastgestelde grenzen worden gevarieerd om 1,2 miljoen keer de hele ontwikkeling van de bodemdalingsskom te berekenen van 1986 – 2040. Elk van de berekeningen wordt vervolgens geconfronteerd met de data, en krijgt van de methode een score voor de nauwkeurigheid. Deze score bepaalt de weging van een specifieke berekening in het totale ensemble van alle berekeningen.

Figuur 18 toont nogmaals de gemiddelde snelheid van daling in kombergingsgebied Pinkegat, inclusief betrouwbaarheidsinterval. De bovenste grafiek toont weer de gemiddelde daling in

Pinkegat in mm per jaar, de stippellijnen zijn weer de boven- en ondergrens van het betrouwbaarheidsinterval. Nu is er echter meer informatie toegevoegd over de kansverdeling binnen het betrouwbaarheidsinterval. De drie onderste grafieken tonen de kansverdeling van modellen die passen aan de metingen. Deze kansverdeling geeft een beeld van de onzekerheid van de gemiddelde bodemdaling in het gehele gebied, waar metingen lokaal en pas sinds 2006 in de Waddenzee plaatsvinden. De roze band is de bandbreedte tussen de stippellijnen, de rode lijn is weer het gewogen gemiddelde in de bovenste grafiek.

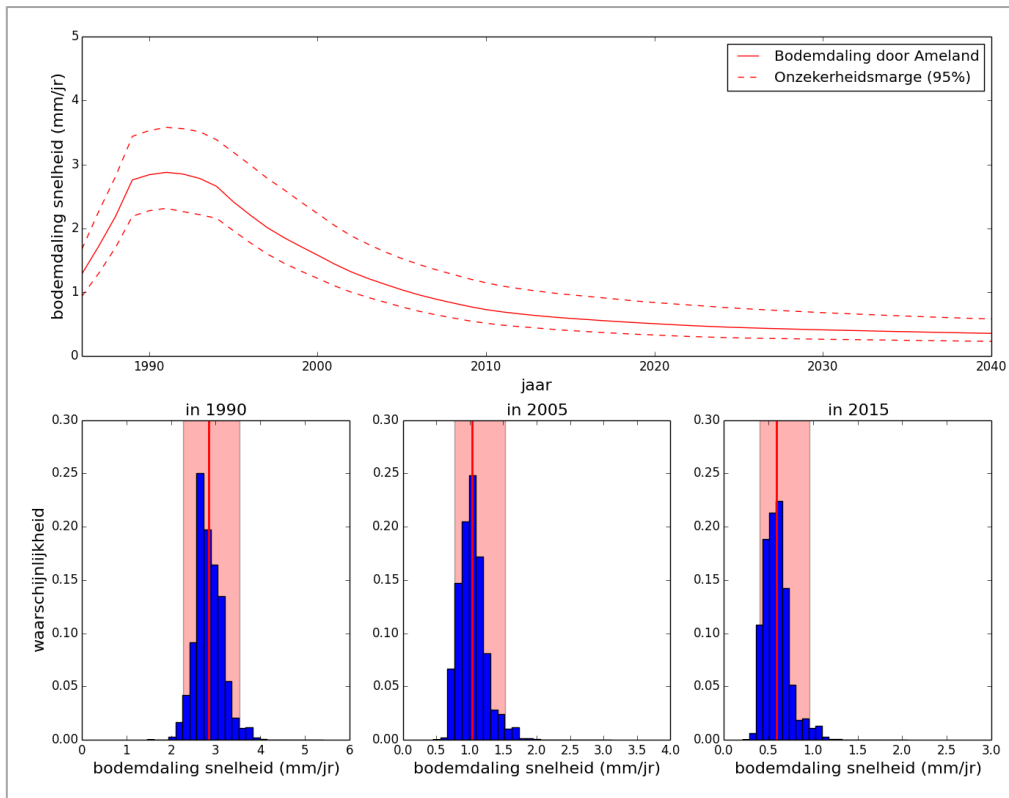
De kans op een bepaalde snelheid van bodemdaling in het verleden is enigszins verwarrend. Toch is dit de enige manier om de daling in het verleden zorgvuldig te analyseren. Hoewel bodemdalingmetingen op Ameland direct in 1986 met de eerste gasproductie zijn begonnen, is het meten van bodemdaling in de Waddenzee pas gestart in 2006. Verder geeft de grafiek een gemiddelde dalingsnelheid voor een groot gebied, wat momenteel alleen op basis van modellen kan worden berekend, en niet (nauwkeurig) uit metingen kan worden bepaald.

Elk van de 1,2 miljoen modelberekeningen heeft in deze methode een weging gekregen zoals beschreven in sectie 3.2. Deze weging bepaalt het gewicht waarmee het model meetelt in de bepaling van het gemiddelde, dat is weergegeven in de rode lijn. Het gewicht geeft ook de kans op elk van de 1,2 miljoen modelberekeningen. Deze informatie is weergegeven voor 3 specifieke jaren in de drie “kansverdeling” grafieken. Om de Pinkegat-grafiek te maken wordt deze kansverdeling analyse uitgevoerd in elk jaar van 1986 –2040.

Deze beschrijving van de betrouwbaarheid is een belangrijke doorbraak van dit laatste deel van de LTS-studie.

**Kansverdelingsfunctie**

Een grafiek die de waarschijnlijkheid van het optreden van een bepaalde gebeurtenis beschrijft. Deze gebeurtenis kan bijvoorbeeld de snelheid van bodemdaling in 1992 zijn.



Figuur 18 – De betrouwbaarheid van de berekening van de voorspelling van de snelheid van bodemdaling.



## 5. Conclusies en aanbevelingen

De IGM heeft NAM gevraagd voor eind oktober 2017 de onvolkomenheden in resultaten en rapporten te verbeteren. Op alle gevraagde punten is nu grote vooruitgang geboekt en zijn de onvolkomenheden naar de opvatting van NAM verholpen.

Zo zijn de landmeetkundige meetgegevens onderworpen aan een zorgvuldige toetsing en is de covariantie volledig meegenomen. De initiële overdruk in de gasreservoirs wordt expliciet meegenomen in de compactiemodellen en het programma voor het berekenen van de bodemdaling is vervangen door een ander veel sneller standaardmodel.

De resultaten van de bodemdalingsmodellen passen nauwkeuriger aan de gemeten bodemdaling. Al deze aanpassingen hebben ertoe geleid dat de betrouwbaarheid van de voorspellingen is vergroot. De beschrijving van kansverdeling binnen het betrouwbaarheidsinterval is nu veel transparanter.

De resultaten bevatten een aantal belangrijke conclusies over bodemdaling:

- (1) De studie laat zien dat met de ontwikkelde workflow de verwachte bodemdaling op de lange termijn in beeld gebracht wordt, evenals de waarschijnlijkheid van de voorspelling.
- (2) Het meegroeivermogen van de Waddenzee is nooit overschreden door bodemdaling als gevolg van de productie van gas uit de Ameland velden;
- (3) De strikte gebruiksruimte grens aan de bodemdaling zal ook in de toekomst veilig zijn.
- (4) De studie bevestigt de effectiviteit van het *"hand aan de kraan principe"* om de grens te bewaken van de toelaatbare bodemdaling door gasproductie. De studie toont aan dat bij een dreigende overschrijding van de grens, een vermindering in de productie snel en effectief de bodemdaling zal verminderen.

De geldende regels en de praktijk van de Meet- & Regelcyclus, met onafhankelijk toezicht, bewaken al 10 jaar effectief de grens aan de bodemdaling. Tevens zijn er effectieve middelen om in te grijpen.

De resultaten van de LTS-studies tonen aan dat het bodemdalingsgedrag boven Ameland verklaard kan worden door een combinatie van fysische processen, zoals drukdaling, compactie en mechanisch gedrag van de lagen die boven het gasreservoir liggen. In deze studie zijn geen processen aan het licht gebracht die nog geen deel uitmaken van de jaarlijkse rapportages aan de Minister van Economische Zaken.

In de loop van het LTS-onderzoek is een workflow ontwikkeld die beter inzicht geeft in de betrouwbaarheid van de modelresultaten en belangrijker, de betrouwbaarheid in de voorspelling van de bodemdaling. Dit rapport is de verslaglegging van de test tegen historische velddata.

Het nadeel van deze workflow is de complexiteit. Dit maakt het lastig voor derden om de resultaten te toetsen en nog moeilijker om er helder over te communiceren met externe betrokkenen. Dit Nederlandse rapport is daartoe een eerste aanzet.

Mogelijk kunnen de inzichten uit deze studie worden gebruikt om deze jaarlijkse rapportages te verbeteren. NAM zal met het bevoegd gezag en de auditcommissie overleggen of en op welke wijze de bevindingen nuttig kunnen worden ingezet.