

# Gaswinning Moddergat/Lauwersoog/Vierhuizen: Technische bijlage (bijlage 2) behorend bij het geactualiseerde Meet- en Regelprotocol 2020

**NAM B.V.**

<i>EP Document Nummer.:</i>	EP202005201806	<i>Owner:</i>	UIE/T/D
<i>Revision No.:</i>			
<i>Document Date:</i>	1 juli 2020	<i>Security:</i>	

The copyright of this document is vested in Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Assen, The Netherlands. All rights reserved. Neither the whole, nor any part of this document may be reproduced, stored in any retrieval system or transmitted in any form or by any means (electronic, mechanical, reprographic, recording or otherwise) without the prior written consent of the copyright owner.

© NEDERLANDSE AARDOLIE MAATSCHAPPIJ B.V., ASSEN, THE NETHERLANDS

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b><i>Inleiding</i></b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b><i>Meet- en regelcyclus - Overzicht</i></b> .....	<b>7</b>
2.1	<b>Metten</b> .....	7
2.2	<b>Analyseren Meetgegevens</b> .....	11
2.3	<b>Verifiëren bodemdalingsprognose</b> .....	12
2.4	<b>Berekenen volume en gemiddelde bodemdalingssnelheid</b> .....	13
2.5	<b>Indien nodig aanpassen productie</b> .....	13
2.6	<b>Actualiseren</b> .....	14
<b>3</b>	<b><i>Bodemdalingsmodellering Waddenzee</i></b> .....	<b>15</b>
3.1	<b>Inleiding</b> .....	15
3.2	<b>LTS-II methode</b> .....	16
3.3	<b>Ondergrondmodellen voor het M&amp;R-protocol 2020 (M&amp;R-cyclus 2019)</b> .....	17
3.3.1	<b>Reservoirmodellen om de drukken te voorspellen</b> .....	17
3.3.2	<b>Verifiëren bodemdalingsscenario's</b> .....	20
<b>4</b>	<b><i>Referenties</i></b> .....	<b>26</b>

# 1 Inleiding

Deze technische bijlage behoort bij het geactualiseerde Meet en regelprotocol voor de gaswinning Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen en is een herziening van de technische bijlage van 2012 (**Error! Reference source not found.**).

In een gasvoorkomen veroorzaakt de winning van aardgas een vermindering van de poriëndruk in de gasvoerende gesteentelaag. Daarbij wordt het gesteente in geringe mate samengedrukt onder het gewicht van de bovenliggende lagen. Dit vertaalt zich aan de oppervlakte in bodemdaling.

Ten gevolge van de gaswinning van de voorkomens Nes, Moddergat, Lauwersoog-C, -West en -Oost en Vierhuizen-Oost (Wadden voorkomens) zal ook bodemdaling optreden in de kombergingsgebieden Zoutkamperlaag en Pinkegat in de Waddenzee. In overeenstemming met artikel 3 van het Besluit winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, kenmerk ET/EM/6047343, Ministerie van EZ, is een meet- & regel proces opgezet om zorg te dragen en aan te tonen dat de belasting (B) door de bodemdalingssnelheid (gemiddeld over 6 jaar; voortschrijdend, symmetrisch) ten gevolge van de gaswinning vanaf bovengenoemde locaties en de bestaande winning, binnen de gebruiksruimte (G) van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag blijft en zal blijven ( $B < G$ ).

Hieronder volgen de definities van enkele begrippen, zoals vastgelegd in bovengenoemde documenten, die hierbij van belang zijn:

M: Onder het meegroeivermogen (M) wordt het natuurlijke vermogen verstaan van het betreffende kombergingsgebied om de relatieve zeespiegelstijging op lange termijn (over 19 jaar gemiddeld) bij te houden terwijl het geomorfologisch evenwicht en de sedimentbalans in stand blijven. De waarden voor het meegroeivermogen in de twee kombergingsgebieden, zoals hieronder weergegeven, zijn conservatief vastgesteld. Daarom zal voor de overige variabelen (Z, S, B) worden uitgegaan van de verwachtingswaarden om stapeling van conservatisme te voorkomen.

Het lange termijn meegroeivermogen M is in het Rijksprojectbesluit vastgelegd:

Pinkegat:  $M = 6$  mm/jaar

Zoutkamperlaag:  $M = 5$  mm/jaar

Z: Snelheid van de autonome relatieve zeespiegelstijging.

Z(J) is de snelheid aan begin van kalenderjaar J van de relatieve zeespiegelstijging. Overeenkomstig artikel 13 van de instemming van het Winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen vond een herziening van het zeespiegelscenario plaats vóór 2011 en vervolgens 5-jaarlijks. De meest recente herziening heeft plaatsgevonden in 2016.

S: Bodemdalingssnelheid ten gevolge van de gasproductie, jaarlijks gemiddelde over de oppervlakte van het kombergingsgebied.

B: De belasting B is de bodemdalingssnelheid S gemiddeld over 6 jaar (voortschrijdend gemiddeld, symmetrisch).

Op 1 januari van kalenderjaar J:

$$B(J) = [ S(J-3) + S(J-2) + S(J-1) + S(J) + S(J+1) + S(J+2) ] / 6 \text{ (in mm/jaar)}$$

G: Gebruiksruimte die beschikbaar is voor belasting ten gevolge van de gasproductie.

De gebruiksruimte G is (getalsmatig) bepaald door het meegroeivermogen M, verminderd met de belasting van dat meegroeivermogen door (autonome) relatieve zeespiegelstijging Z.

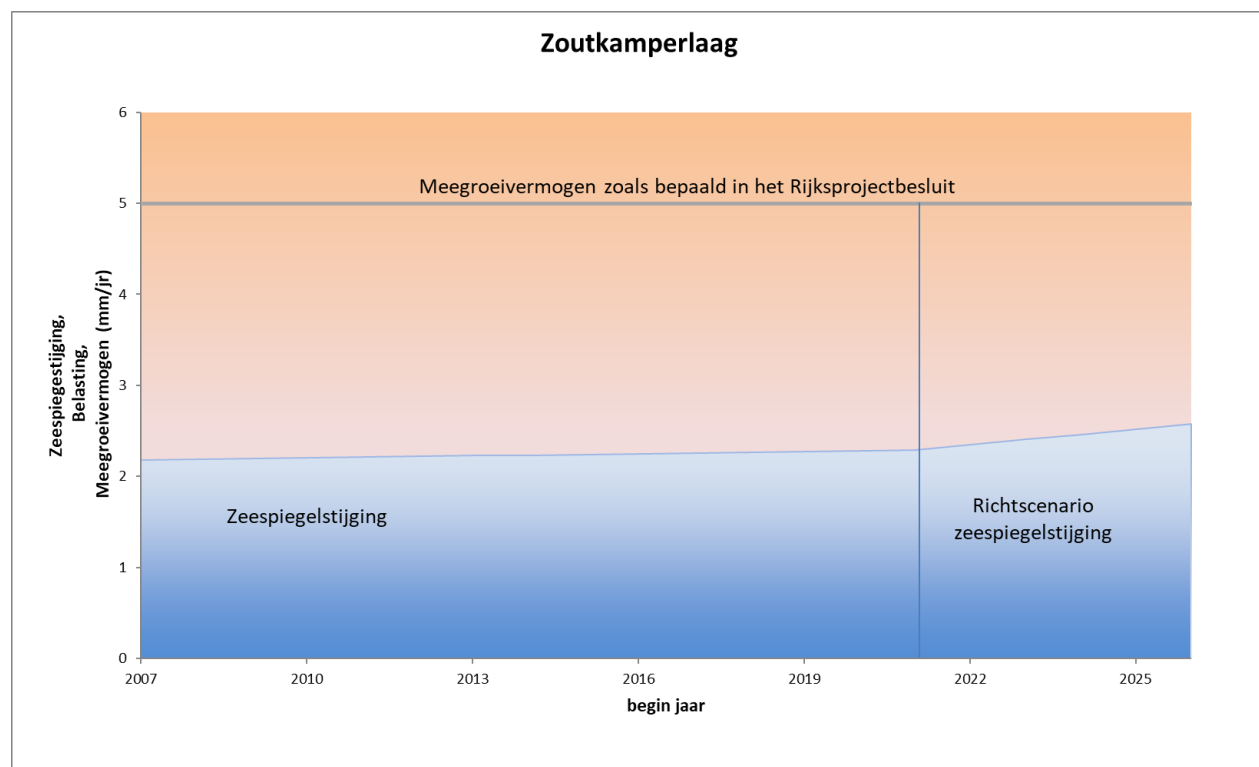
Daarom geldt voor de Gebruiksruimte G voor de kombergingsgebieden aan het begin van kalenderjaar J:

$$\begin{array}{ll} \text{Zoutkamperlaag} & G(J) = 5 - Z(J) \quad \text{mm/jaar} \\ \text{Pinkegat} & G(J) = 6 - Z(J) \quad \text{mm/jaar} \end{array}$$

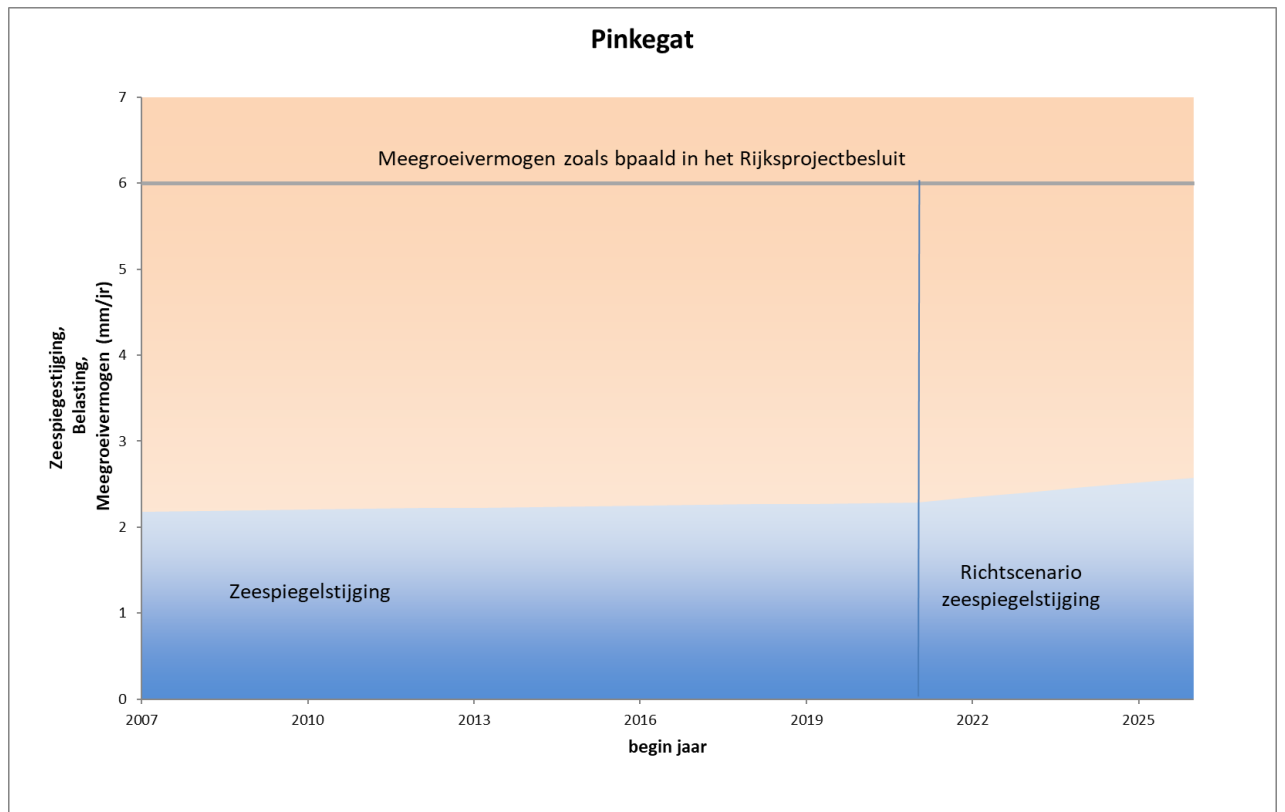
Het richtscenario van de zeespiegelstijging wordt gebruikt om duiding te geven aan artikel 13 in instemmingsbesluit van het gewijzigd winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen:

*"Artikel 13 Onverlet artikel 36 van de Mijnbouwwet gaat de Minister van Economische Zaken na advies van de inspecteur-generaal der mijnen, in ieder geval over tot wijziging van de voorschriften dan wel tot intrekking van dit besluit tot instemming met dit winningsplan, indien het in artikel 2.3, tweede lid, van het Rijksprojectbesluit "Gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen" bedoelde meegroeivermogen wordt overschreden of er een reële kans is dat dit meegroeivermogen wordt overschreden."*

De reële kans is een nieuw begrip in dit Meet- en regelprotocol. Dit begrip wordt als volgt uitgelegd: binnen de eerste 5 jaar van de geldigheidstermijn van het richtscenario zal NAM controleren of de verwachte belasting de "gebruiksruimte", die op dat moment gedefinieerd wordt door het richtscenario, overschrijdt. Bij overschrijding zal NAM de productie aanpassen om ervoor te zorgen dat ook deze dreiging van overschrijding niet zal optreden. Zoals bij de bepaling van de gebruiksruimte, ten tijde van het zeespiegelscenario, wordt ook in dit scenario uitgegaan van de verwachte belasting. Figuur 1 en Figuur 2 tonen de gebruiksruimten voor respectievelijk de kombergingsgebieden Zoutkamperlaag en Pinkegat. In deze figuren wordt tevens de periode weergegeven voor het richtscenario waarbinnen een mogelijke dreiging van overschrijding kan worden vastgesteld.

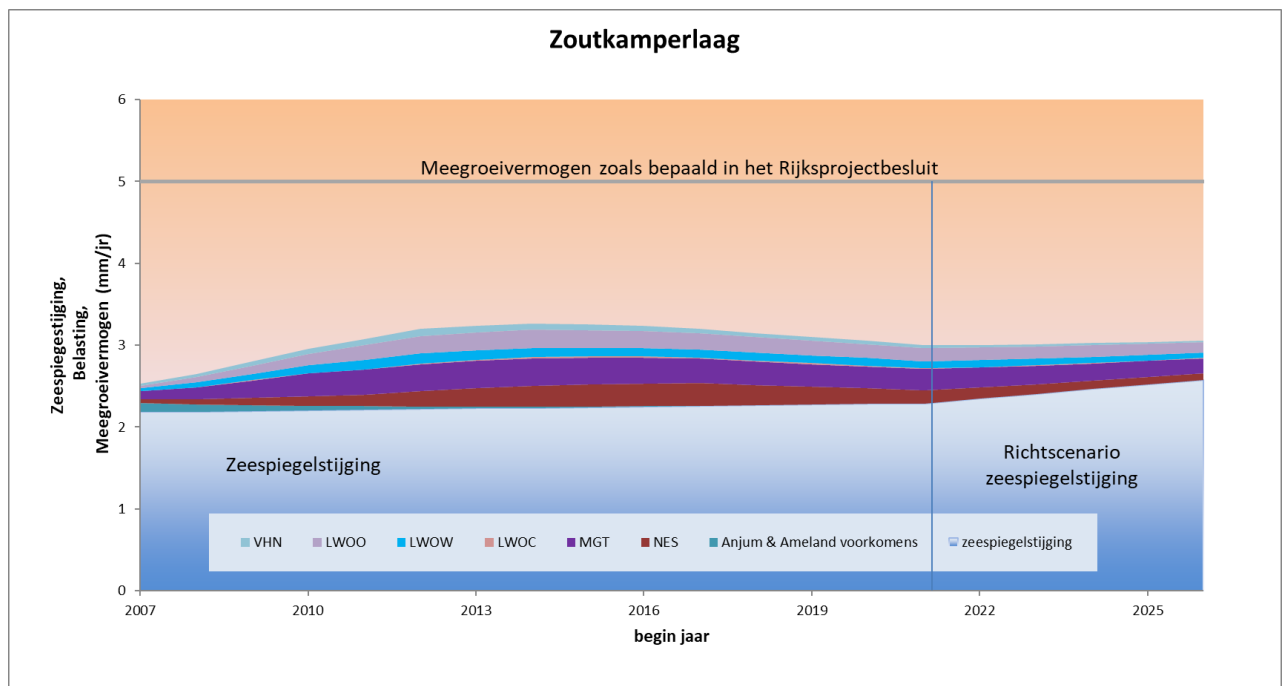


Figuur 1: Gebruiksruimte Zoutkamperlaag.



Figuur 2: Gebruiksruimte Pinkegat.

Figuur 3 toont als voorbeeld de belasting (B) voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag volgens de laatste Meet- en regelrapportage over 2019 (Ref. 2). Dit figuur laat zien dat de belasting ruim onder het meegroeivermogen blijft en dat er geen dreiging van overschrijding is.



Figuur 3: Zeespiegelstijging en Belasting (B) ten opzichte van het meegroeivermogen in Zoutkamperlaag volgens de M&R-rapportage over 2019 (Ref. 2).

Hoofdstuk 2 van deze bijlage beschrijft de technische uitwerking van de Meet- en regelcyclus voor de bodemdalingssnelheid (paragraaf 3 en 5 van het Meet- en regelprotocol). Hierin wordt beschreven hoe de Meet- en regelcyclus wordt toegepast, zodat de voor gaswinning beschikbare gebruikruimte niet wordt overschreden.

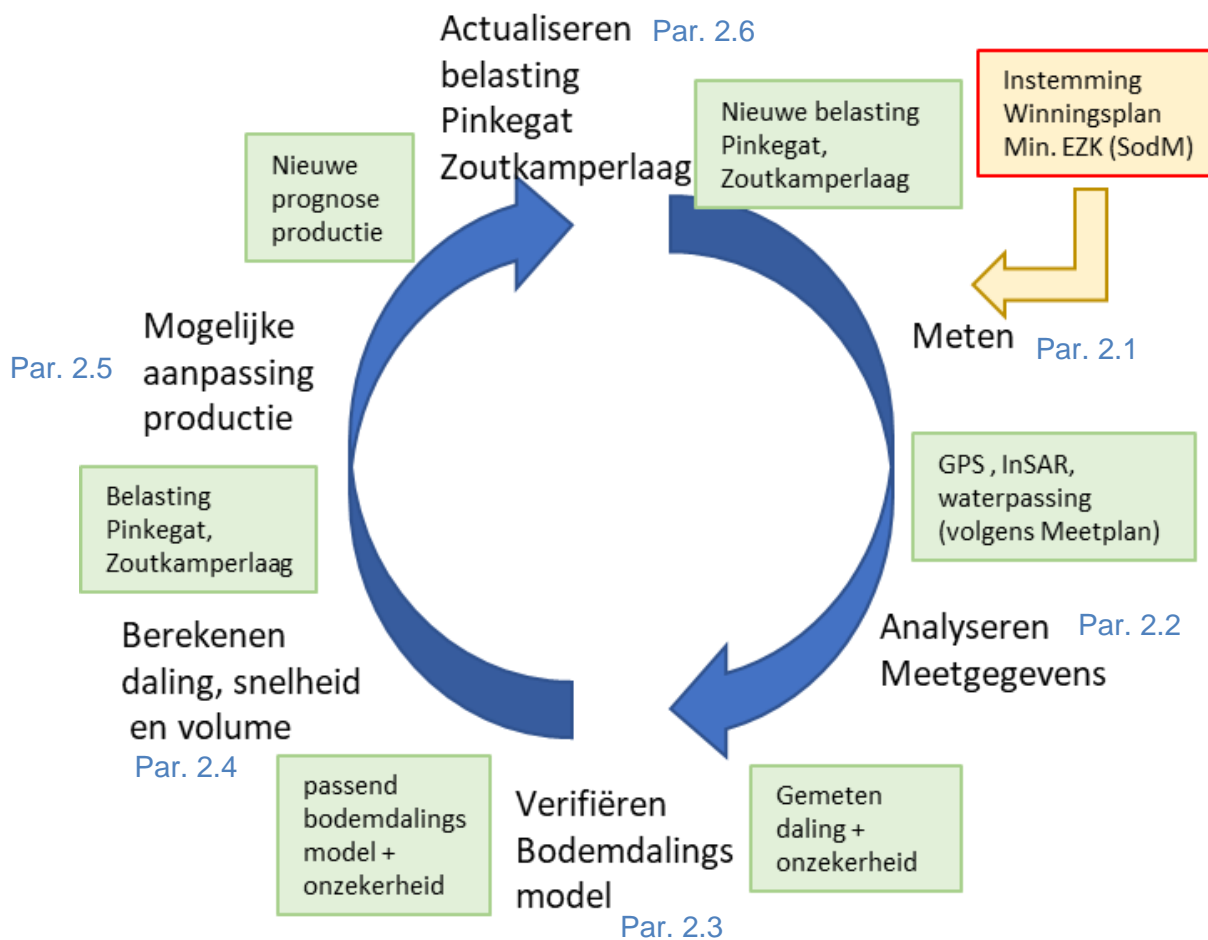
Hoofdstuk 3 van deze bijlage beschrijft in meer detail de geomechanische bodemdalingsmodellen van de Wadden voorkomens. Voor al deze voorkomens zijn tevens reservoirsimulatiemodellen gebouwd die de drukinformatie aanleveren voor de bodemdalingsprognoses.

Naast de bodemdaling ten gevolge van de productie uit de Wadden voorkomens, leveren de Anjum voorkomens (Anjum, Metslawier en Ezumazijl) en de Ameland voorkomens (Ameland-Oost, Ameland-Westgat en Ameland-N7FA) een bijdrage aan de bodemdaling in de Waddenzee. Ook voor deze voorkomens zijn reservoir- en geomechanische modellen gemaakt die in deze bijlage worden beschreven.

## 2 Meet- en regelcyclus - Overzicht

In dit deel wordt beschreven hoe de Meet- en regelcyclus wordt toegepast. Hierdoor wordt zeker gesteld dat de voor gaswinning beschikbare en door bevoegd gezag toegekende gebruiksruimte niet wordt overschreden. Het doel is tevens de continue verbetering van de bodemdalingsprognoses en de metingen (inclusief meetfrequentie en meettechniek).

Uitgangspunt van de Meet- en regelcyclus is dat de belasting binnen de gebruiksruimte in het betreffende kombergingsgebied blijft. De Meet- en regelcyclus is schematisch weergegeven in Figuur 4. Dit figuur toont de belangrijkste activiteiten die in de volgende paragrafen zullen worden beschreven. In de groene tekstvakken staan de belangrijkste technieken of producten die in iedere stap gebruikt worden of opgeleverd.



Figuur 4: Schematische voorstelling van de Meet- en regel cyclus

Voor de start van de nieuwe winningen uit de Wadden voorkomens, is in 2006 de volledige cyclus doorlopen; dit ter bepaling van de nulsituatie en als test van de procedure. De in 2006 ingewonnen additionele meetgegevens van de al langer producerende Ameland en Anjum voorkomens zijn meegenomen in deze analyse (Ref. 3). De metingen vormen de start van de Meet- en regelcyclus en worden in de volgende paragraaf beschreven.

### 2.1 Meten

Om de validiteit van de voorspelde reservoirdrukken te bepalen, worden dagelijks de hoeveelheden gas, water en condensaat gemeten. Zeker jaarlijks worden de reservoirdrukken bepaald door de druk aan het oppervlak te meten als de put een aantal dagen in ingesloten en vervolgens terug te rekenen met behulp van compositie

van het gas naar de diepte van het reservoir (zogenaamde datumdiepte). Meer informatie hierover staat in Hoofdstuk 3.

Om te kunnen bepalen of de prognoses van de bodemdaling in lijn met de waargenomen bodemdaling verlopen, worden metingen uitgevoerd volgens het meetplan Waddenzee. Deze plannen worden jaarlijks geactualiseerd en beoordeeld door het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM). De meettechnieken, die hiervoor gebruikt worden, zijn campagne GNSS (Global Navigation Satellite System, GPS, Ref. 8), continue GNSS, en optische waterpassingen en/of InSAR. Optische waterpassingen worden zo ingericht dat deze voldoen aan de eisen, die de Rijkswaterstaat Centrale Informatievoorziening (RWS-CIV) stelt aan een tweede orde nauwkeurigheidswaterpassing. Voor de andere meettechnieken (GNSS en InSAR) geldt dat de nauwkeurigheid, waarmee de bodembeweging wordt geschat, vergelijkbaar of beter is.

Voor het bepalen van hoogteverschillen op het wad wordt gebruik gemaakt van GNSS. Door gebruikmaking van een speciale geodetische GNSS-ontvanger, een gekalibreerde geodetische GNSS-antenne en een meetduur van minimaal vijf dagen worden hoogteverschillen bepaald met een precisie die ruim voldoet aan de eisen die RWS-CIV stelt aan een tweede-orde nauwkeurigheidswaterpassing.

Een groot voordeel van de GNSS-techniek is dat de precisie van een te bepalen hoogteverschil veel minder afhankelijk is van de afstand tussen twee peilmerken dan bij optisch waterpassen. Daardoor kan met behulp van GNSS over langere afstanden een hoogteverschil preciezer worden bepaald, met een standaarddeviatie in de orde van enkele millimeters. In de Long Term Subsidence study (NAM, 2017) wordt uitgebreid aandacht besteed aan de precisiebeschrijving van zowel continue als campagne GNSS.

Op het wad worden GNSS-metingen uitgevoerd op wadhoogtemerken. Zo'n wadhoogtemerk maakt deel uit van een cluster van wadhoogtemerken (minimaal drie) welke met een horizontale afstand van 5 tot 10 meter in de wadbodem zijn aangebracht. Middels nauwkeurigheidswaterpassing wordt het hoogteverschil tussen GNSS-antenne en wadhoogtemerken gemeten, waarbij tevens de onderlinge hoogteverschillen tussen de meetpunten worden gemeten opdat eventuele puntverstoring gedetecteerd kan worden.

Naast de GNSS-campagne metingen vinden continue GNSS-metingen plaats, met een jaarlijkse rapportage frequentie. Deze hebben een signaalfunctie om veranderingen in het verloop van de bodembeweging tijdig te kunnen signaleren binnen het meet/rapportage interval van de vlakdekkende metingen (huidig interval van 3 jaar). De continue GNSS-metingen vinden plaats op minimaal 3 locaties. Vanaf 2006 zijn de GNSS-stations Ameland-Oost, Anjum, en Moddergat operationeel. In 2014 zijn de stations op de offshore platforms (AME-2 en AWG-1), en in 2016 zijn Ameland-Nes (AGRS) en Ternaard, aan de monitoring toegevoegd. Een opgave van de locaties waarop continue GNSS-metingen plaatsvinden is onderdeel van het meetplan dat jaarlijks geactualiseerd wordt.

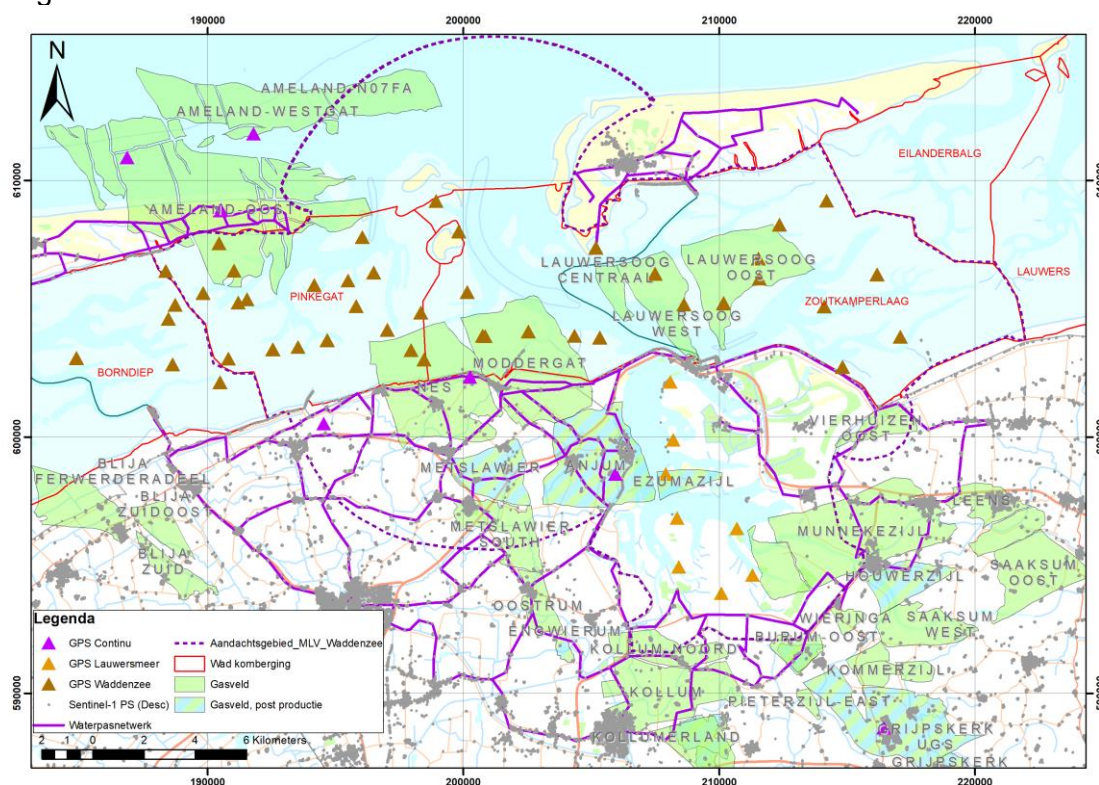
In de rapportage van de tijdseries van de continue GNSS-stations worden tevens de gemeten dalingssnelheden over het afgelopen jaar en de daarbij behorende precisie ( $1\sigma$ ) gerapporteerd. De coördinaten van de referentiestationen worden jaarlijks gecontroleerd en gerapporteerd. Voor de continue GNSS-metingen geldt, dat de onderlinge hoogte relatie tussen GNSS-antennes en nabijgelegen hoogtebouten zal worden gecontroleerd indien een afwijkend gedrag wordt geconstateerd ten opzichte van andere meettechnieken (waterpassen en/of InSAR), buiten de nauwkeurigheidsmarges.



Bodemdalingsmetingen op het land worden uitgevoerd met de technieken waterpassen en/of InSAR.

De waterpassingen worden uitgevoerd met gecertificeerde zelfregistrerende optische waterpasinstrumenten en zogenaamde barcode meetbaken, waarbij de gegevens volautomatisch worden gemeten en digitaal worden opgeslagen, volgens de specificaties van RWSCIV.

In de InSAR techniek wordt gebruik gemaakt van een tijdserie van radar opnames met een satelliet. De meetpunten (Persistent Scatterers, PS) hebben een consistente reflectie in de tijd, en corresponderen voornamelijk met bebouwing in het terrein. De meest recente InSAR deformatie metingen zijn gerapporteerd in het meetregister bij het meetplan Noord-Nederland, Groningen en Waddenzee 2018, Addendum InSAR (Ref. 9). Bovendien is in aanvulling op het meetplan 2020 een InSAR analyserapport opgeleverd dat de continuïteit met de Sentinel-1 satelliet missie aantoont (Ref. 10), inclusief een nauwkeurighedsanalyse met waterpassingen in het Lauwersmeer gebied. Het grote voordeel van gebruik van de InSAR techniek is, dat de frequentie van metingen hoog is (meerdere opnames per maand), de dichtheid van 'meetpunten' (Persistent Scatterers (PS)) groot is, en dat er geen meetploegen benodigd zijn, waardoor er geen verstoring is van het gebied en geen blootstelling aan veiligheidsrisico's.



Figuur 5: Overzicht continue (paarse driehoeken) en campagne (oranje/bruine driehoeken) GNSS-punten, de waterpasnetwerken (paarse lijnen) en de InSAR-metpunten (grijs).

Het meetinterval voor het Waddenzee gebied is bij de start van de monitoring gekozen aan de hand van de te verwachten bodemdaling en de precisie van de meettechniek (de bodemdaling is significant als deze groter is dan tweemaal de precisie ( $\sigma$ ) waarmee zij kan worden bepaald), rekening houdend met zowel de precisie van de meettechniek als de stabiliteit van meetpunten. Dit heeft geresulteerd in een meetinterval van 3 jaar. Bovendien vinden op verspreide locaties continue GNSS-metingen plaats. Op basis van de opgebouwde historie (2006-2019) en de bodemdalingssnelheden (enkele millimeters per jaar) wordt dit meetinterval van 3 jaar voortgezet. Indien het meetinterval

in de toekomst aangepast wordt, zal dit worden verwerkt in de jaarlijkse actualisatie van het meetplan Waddenzee. De precisie van de meettechnieken worden gedetailleerd beschreven de Long Term Subsidence Study resultaten (NAM, 2017).

Voorafgaand aan de gaswinning is een referentiemeting (nulmeting) uitgevoerd. De resultaten van deze meting zijn eind 2006 gerapporteerd (rapport 'Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, Vastlegging nul situatie, Meetresultaten' (Ref. 3). Tijdens de productie van bestaande en nieuwe winningen worden op gezette tijden nieuwe metingen uitgevoerd. Deze gegevens worden gebruikt om dalingssnelheden te bepalen en zijn tevens van belang om de prognosemodellen te kalibreren. De meetresultaten worden gerapporteerd aan het bevoegd gezag.

Het voor de winning ingediende meetplan tot en met de status in 2020, is samengevat in Tabel 1.

Tabel 1: Overzicht van metingen

Periode*	Interval	Activiteit	Doelstelling
Oktober 2005	-	Controlemeting wadpunten t.b.v. Amelandwinning	Kalibreren prognosemodel Ameland winning
Najaar 2005	Test	GNSS-meting Anjum locatie	Evalueren nauwkeurigheid GNSS-techniek
1e kwartaal 2006	-	Waterpasmeting op Ameland	Kalibreren prognosemodel Amelandwinning
1e kwartaal 2006	-	Waterpassing Anjum	Kalibreren prognosemodel Anjum winning
Voorjaar 2006	-	Nieuwe peilmerken in Waddenzee geplaatst	Verdichten meetnetwerk conform meetplan
Herfst 2006	-	Plaatsen nieuwe peilmerken Lauwersmeer	Verdichten meetnetwerk conform meetplan (buiten gevoelige periode)
Herfst 2006	Continu	GNSS-monitorstations: 1) AME1 (operationeel Juni '06). 2) Anjum (vanaf Juni '06 installatie) 3) Moddergat (December '06)	Signaleringsfunctie, prognosevalidatie. Resultaten kunnen aanleiding geven om extra metingen uit te voeren ter validatie van de prognose. Evaluatie meettechniek na 5 jaar
Zomer 2006		Nulmeting Waddenzee	Referentiemeting (en voor zover eerder gemeten kalibratie prognosemodel Ameland winning)
2e helft 2006	-	Nulmeting vasteland, eilanden en Lauwersmeergebied	Referentiemeting
2007/8	-	Waterpasmeting op Ameland en rond nieuwe winningen op vasteland.	Controle/kalibreren prognosemodellen
2009	3 jaar	Waterpas- en GNSS-metingen op Ameland, Schiermonnikoog, Wadden en Noordzeeplatforms**	Kalibreren prognosemodellen
2010	-	GNSS-campagne Waddenzee (deel)	Controle/kalibreren prognosemodellen
2011	3 jaar	Waterpasmetingen Lauwersmeergebied, Ameland en GNSS-campagne ***), Noordzeeplatforms (vervroegd)	Controle/kalibreren prognosemodellen
2012	3 jaar	GNSS-metingen Waddenzee en Schiermonnikoog	Controle/kalibreren prognosemodellen
2013	3 jaar	Waterpasmetingen Lauwersmeergebied (onderdeel van waterpassing Noord-Nederland) en GNSS-campagne,	Controle/kalibreren prognosemodellen
2014	3 jaar	Waterpasmetingen Ameland en GNSS-campagne.	Controle/kalibreren prognosemodellen
2015	3 jaar	Waterpasmetingen Lauwersmeergebied en Schiermonnikoog en GNSS-campagne.	Controle/kalibreren prognosemodellen

Periode*	Interval	Activiteit	Doelstelling
2016	3 jaar	GNSS-campagne.	Controle/kalibreren prognosemodellen
2017	3 jaar	Waterpasmetingen Ameland en GNSS-campagne.	Controle/kalibreren prognosemodellen
2018	3 jaar	Waterpasmetingen en InSAR Lauwersmeergebied (onderdeel van waterpassing en InSAR Noord-Nederland), waterpasmetingen Schiermonnikoog en GNSS- campagne.	Controle/kalibreren prognosemodellen
2019	3 jaar	GNSS-campagne.	Controle/kalibreren prognosemodellen
2020	3 jaar	Waterpasmetingen Ameland. GNSS-campagne gepland	Controle/kalibreren prognosemodellen
<p>*) Het genoemde jaartal is gerelateerd aan voorgenomen start van de productie Moddergat, en opvolgende winningen.  **) Volledig vlakdekkende meting  ***) GNSS -campagne-metingen worden uitgevoerd op een deel van de peilmerkclusters, zodanig, dat elk peilmerkcluster minimaal eens per 3 jaar wordt ingemeten.</p>			

Het netwerk van meetpunten wordt op basis van voortschrijdend inzicht bepaald en vastgelegd in het meetplan. NAM dient jaarlijks een actualisatie in van het meetplan bij de minister van EZK /SodM.

## **2.2 Analyseren Meetgegevens**

Voor het afleiden van bodemdaling uit waterpasmetingen worden geschatte hoogteverschillen uit vrije netwerkvereffeningen per epoche gebruikt (gerapporteerd in de zgn. 'differentiestaten' als onderdeel van het meetregister). De geschatte hoogtes zijn gerelateerd aan één referentie peilmerk. Voor aansluiting op één peilmerk is gekozen om wringing en correcties in het net ten gevolge van ongelijkmatige zakking van aansluitpunten te voorkomen.

In een InSAR meetregister worden naast een differentiestaat met de deformatie tijdreeksen van alle InSAR meetpunten zelf (de Persistent Scatterers (PS)), ook een gecombineerde differentiestaat opgeleverd met de tijdreeksen van de (historische) gewaterpaste hoogteverschillen met daarin de InSAR tijdreeksen geïntegreerd op de waterpas peilmerk locaties (voor InSAR worden dan gemiddelde tijdseries berekend van PS in de directe omgeving).

Voor GNSS worden de hoogtes van de meetpunten berekend ten opzichte van een netwerk van referentiestations.

Metingen voor het monitoren van bodembeweging zijn gerelateerd aan discrete plaatsen (tussen specifieke meetpunten) en discrete tijdstippen. De gemeten relatieve bodembeweging is samengesteld uit verschillende componenten:

- Bodemdaling door delfstofwinning (gaswinning, zoutwinning enz.).
- Daling van het object waaraan het peilmerk is bevestigd (huis, kerk, brug, enz.), doordat dit onder eigen gewicht in de bodem wegzakt, afhankelijk van de fundering en de lokale bodemgesteldheid.
- Ondiepe compactie (natuurlijke klink, veranderingen in de hydrologische omstandigheden), indien het object waaraan het peilmerk is bevestigd ondiep is gefundeerd.
- Toevallige (kleine) meetfouten.

Toevallige meetfouten worden gedetecteerd door geodetische toetsingsmethoden. Ondiepe compactie en autonome beweging van meetpunten kunnen tevens door geodetische toetsing worden geïdentificeerd zolang zij niet of zeer beperkt ruimtelijk gecorreleerd zijn. Zowel voor waterpassen als voor InSAR wordt hierbij de bodembeweging per meetpunt ten opzichte van naburige meetpunten geanalyseerd. De meetpunten die representatief zijn voor bodembeweging door diepe oorzaken worden op deze wijze geïdentificeerd.

Als input in de confrontatie met geomechanische modellen worden, voor zowel waterpassen, GNSS, als InSAR, (onafhankelijke) dubbele verschilmetingen ('double-differences') gevormd. Een dubbele verschilmeting bevat de gemeten bodembeweging tussen twee meetpunten en twee tijdstippen.

In de Long Term Subsidence (LTS) studie (NAM, 2017) is uitgebreid aandacht besteed aan de modellering van zowel de meeton nauwkeurigheid, de idealisatieprecisie (de mate waarin de beweging van de peilmerken representatief is voor het bodemdalingssignaal), als modelimperfecties in de covariantiematrix van de geodetische metingen, inclusief de samenhang (correlatie) tussen de metingen.

Bij de confrontatie tussen geodetische metingen en geomechanische modellen, beschreven in de volgende paragraaf, wordt de LTS-methodiek (zie hoofdstuk 3) toegepast.

Op basis van de originele gemeten hoogteverschillen uit waterpassen, in combinatie met de GNSS-metingen wordt tevens een geodetische ruimte-tijd analyse uitgevoerd (volgens methode Houtenbos, Ref. 11). In deze methodiek wordt toetsing uitgevoerd op meetfouten, identificatiefouten van peilmerken, verstoringen, en afwijkend deformatie gedrag ten opzichte van peilmerken in de omgeving. Naast de meeton nauwkeurigheid, wordt in deze methode ook de idealisatie precisie gemodelleerd. Het resultaat is het in ruimte en tijd gecorreleerde bodemdalingssignaal dat het best past bij de metingen. Deze wordt gebruikt om het resultaat van het verifiëren van de bodemdalingsprognoses mee te vergelijken.

### **2.3 Verifiëren bodemdalingsprognose**

#### *Verificatie reservoirmodellen*

Reservoirsimulatiemodellen van zowel de gasvoerende lagen als de aangrenzende aquifers worden gekalibreerd met behulp van gemeten gasproductie en drukdata. Hierbij worden ook nieuwe inzichten uit analoge voorkomens meegenomen. Deze gekalibreerde modellen resulteren per voorkomen in voorspellingen van de reservoirdrukken in de tijd. De drukken in mogelijke laterale aquifers worden niet gemeten als gevolg van het ontbreken van putten. Dit resulteert in een grotere onzekerheid voor deze gebieden. Om deze onzekerheid mee te nemen in de uiteindelijke bodemdalingsvoorspelling wordt er gerekend met meerdere reservoirsrealisaties.

#### *Verificatie geomechanische modellen*

Daarnaast worden de geomechanische bodemdalingsmodellen van de voorkomens waarvan de bodemdalingsskom zich uitstrekt onder de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag m.b.v. kalibratie van de integraal vereffende peilmerkaldalingen gekalibreerd. De bodemdalingsmodellen berusten op mechanismen (uitgedrukt in modelvergelijkingen), waarvan de fysische plausibiliteit wordt aangegeven. Onzekerheidsanalyses m.b.v. van deze modellen zijn gebaseerd op de

reservoirrealisaties plus de onzekerheden in de parameterswaarden in het bodemdalingsmodel. Deze analyse levert een veelvoud aan bodemdalingsscenario's.

#### Terminologie

In het document worden veelvuldig de termen *realisatie* en *scenario* gebruikt.

- Bij *realisatie* wordt bedoeld op de variatie van parameters binnen het reservoirmodel, die tot een bepaald *drukprofiel* in het *gasreservoir* en onderliggend en aangrenzend watervoerend pakket (aquifer) zal leiden.
- Bij *scenario* wordt bedoeld op een combinatie van een reservoirrealisatie en een geomechanisch model, waarbij specifieke waarden zijn geselecteerd voor de invoerparameters. Deze zullen leiden tot een bepaald *bodemdalingsprofiel* in de twee kombergingsgebieden.

Deze scenario's worden geconfronteerd met de metingen inclusief onzekerheid, waarbij de mate van passing met de metingen de waarschijnlijkheid bepaalt van een bepaald scenario. De bepaling van de waarschijnlijkheden levert een verwachtingswaarde en een onzekerheidsband. Nieuwe metingen leveren een bijstelling op van zowel de verwachtingswaarde als de onzekerheidsband die gebruikt kunnen worden voor de bijgestelde prognose. Met behulp van het scenario dat het dichtst bij de verwachtingswaarde ligt wordt de bodemdalingssnelheid en belasting bepaald per kombergingsgebied. Dit scenario is bepalend voor de beoordeling van de gebruiksruimte. Het meegroeivermogen voor de kombergingsgebieden is conservatief vastgesteld waardoor voor de overige factoren, zeespiegelstijging en belasting, uit kan worden gegaan van de verwachtingswaarden om een onrealistische stapeling van conservatieve aannames te voorkomen.

## 2.4 Berekenen volume en gemiddelde bodemdalingssnelheid

Op basis van de (bijgestelde) prognose wordt de reeds opgetreden en de te verwachten toename van het dalingsvolume ( $\text{m}^3/\text{jr}$ ) in het betreffende kombergingsgebied jaarlijks bepaald. Door de volumetoename te delen door het kombergingsoppervlak wordt de gemiddelde bodemdalingssnelheid ( $S$ ,  $\text{mm}/\text{jr}$ ) per kombergingsgebied en de belasting ( $B$ ,  $\text{mm}/\text{jr}$ ) bepaald.

Als basis voor de kombergingsgrenzen gelden GIS-files van de grenzen van de kombergingsgebieden, die door (Rijksinstituut voor Kust en Zee) RIKZ zijn geleverd. Deze grenzen zijn door RIKZ voor de Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 toegepast<sup>1</sup>. Hierbij zijn de oppervlakten voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag respectievelijk  $61 \cdot 10^6 \text{ m}^2$  en  $148 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ .

De in een bepaald jaar gerapporteerde waarde van de belasting  $B$  geldt op 1 januari van dat jaar en is het zesjaarlijkse gemiddelde over de periode die zich uitstrekt van drie jaar daarvoor tot drie jaar daarna.

## 2.5 Indien nodig aanpassen productie

Indien uit de (bijgestelde) prognose blijkt dat bij voortzetting van de productie volgens het geldende productieprofiel het 6-jarig voortschrijdend gemiddelde van de verwachtingswaarde van de dalingsnelheid (de belasting  $B$ ) de voor gaswinning toegekende gebruiksruimte ( $G$ ) zou of dreigt te overschrijden, dan wordt de productie aangepast naar een gewijzigd profiel waarbij deze overschrijding niet optreedt. Dit kan

<sup>1</sup> Bodemdalingstudie Waddenzee 2004 – Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. Rapport RIKZ / 2004.025.

mogelijk tot gevolg hebben dat één of meerdere voorkomens geheel of gedeeltelijk worden ingesloten.

Om mogelijke dreiging van overschrijding te bepalen wordt gekeken naar de belasting voor de eerste vijf jaar van de periode waarvoor het richtscenario voor het zeespiegelscenario geldt.

Rapportage van het (bijgestelde) productieprofiel zal als onderdeel van de Meet- en regelcyclus rapportage plaatsvinden vóór 1 mei volgend op het jaar, waar de rapportage betrekking heeft.

## **2.6 Actualiseren**

Op basis van de (bijgestelde) geomechanische bodemdalingsmodellen en het (nieuwe) productiescenario worden de grafieken van de te verwachten bodemdalingssnelheden voor Pinkegat en Zoutkamperlaag opgesteld. Zowel de actuele door gaswinning veroorzaakte belasting op het kombergingsgebied, als de op basis van nieuwe inzichten (metingen) gebaseerde dalingsprognoses worden hiermee geactualiseerd. Ook worden de dalingsprognoses met bijbehorende onzekerheden met de metingen van de continue GNSS-locaties vergeleken. Het bevoegd gezag zal hierover worden geïnformeerd voor 1 mei van het jaar volgend op het rapportage jaar. Op basis van voortschrijdend inzicht zal het meetplan worden geactualiseerd. Hiermee is één Meet- en regelcyclus rond.

### **3 Bodemdalingsmodellering Waddenzee**

Dit deel van de technische bijlage beschrijft hoe ondergrondmodellen worden gemaakt en welke parameters hierbij een rol spelen. De sectie beschrijft verder de methode voor het bepalen van de bodemdalingssnelheid in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Tevens wordt de bepaling van de onzekerheid van het (tempo van het) opgetreden en verwachte bodemdalingsvolume beschreven.

#### **3.1 Inleiding**

Het begrip van de ondergrond wordt gevormd door beoordelingen van experts uit diverse disciplines. Deze kennis komt uiteindelijk terecht in verschillende modellen die gegevens met elkaar uitwisselen. Een belangrijk aspect van de ondergrondmodellering is het meenemen van de onzekerheden.

Allereerst zijn er de geologische of statische modellen. Deze beschrijven de structuur en eigenschappen van de verschillende aardlagen en de grootte van het reservoir. Veel van deze aardlagen zijn onderbroken door breuken die gedurende de geologische geschiedenis zijn ontstaan. Door middel van geluidsgolven (seismiek) zijn deze lagen en breuken zichtbaar gemaakt. Door de structuur (inclusief diepte) van de aardlagen te combineren met de diepte van het gas-water contact wordt de grootte van het gasreservoir bepaald. Ook beschrijven de geologische modellen de eigenschappen van de gesteentes, zoals de porositeit en de permeabiliteit. Deze informatie komt voort uit petrofysische metingen gedaan in de putten, aangevuld met geologische inzichten zoals de omgeving waarin de sedimenten zijn afgezet. Onzekerheden in de geologische modellen die een rol spelen in voorspellingen van bodemdaling zijn bijvoorbeeld de grootte van het gasvoorkomen. In Ref. 5 en voor het Ameland voorkomen in Ref. 6 wordt verder ingegaan op de geologische beschrijvingen van de voorkomens. Hierin wordt o.a. beschreven in hoeveel putten er logs genomen zijn en gesteentekernen zijn onderzocht. Ook wordt in meer detail de depositionele omgeving omschreven waarin de sedimenten zijn afgezet van het Ameland voorkomen (zogenaamde “damp en wet sand flats”) en de Waddenvoorkomens (zogenaamde “dry sand flats”).

Deze modellen worden vervolgens gedeeld met de reservoir engineer. Deze combineert de geologische modellen met de historische productiegegevens en drukmetingen in dynamische reservoirsimulatiemodellen om de modellen te kalibreren. Na kalibratie kunnen de simulatiemodellen de historische productiegegevens en gemeten drukken reproduceren. Een voorbeeld van een geologische onzekerheid die met behulp van productie- en drukgegevens gekalibreerd kan worden is het gasvolume in het compartiment dat verbonden is met een put.

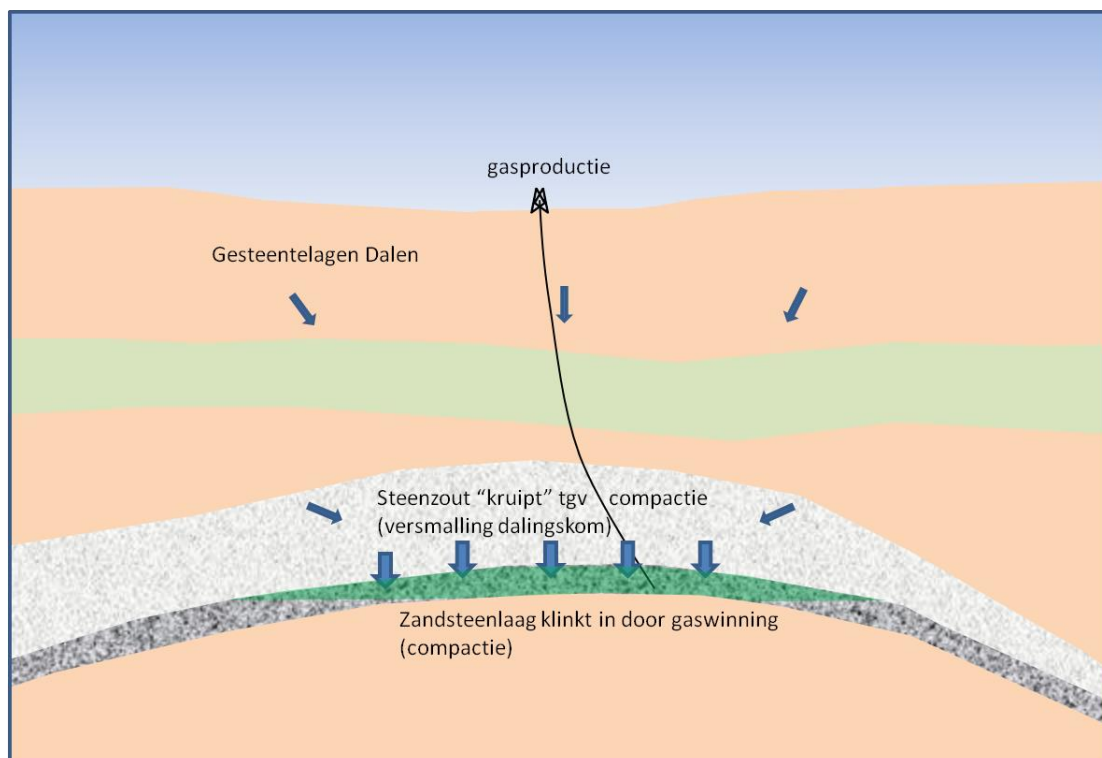
Om de onzekerheden mee te nemen, die niet gereduceerd kunnen worden met behulp van de historische productiegegevens en drukmetingen, worden er verschillende realisaties van de reservoirmodellen gemaakt. Voorbeelden van resterende onzekerheden die worden meegenomen in de verschillende realisaties zijn de mate van communicatie tussen het gasvoorkomen en het aquifer en de hoeveelheid gas in het aquifer. Op basis van de gekalibreerde modelrealisaties kan vervolgens voorspeld worden hoeveel gas gewonnen kan worden en wat de verwachte drukdaling zal zijn in het gasvoorkomen en in de aquifers.

Deze drukprognoses worden ten slotte in de bodemdalingsmodellen gebruikt om de compactie te berekenen van het gesteente en de daarmee gepaard gaande bodemdaling.

Regelmatig vindt er overleg plaats tussen de disciplines om mogelijke afwijkingen tussen meetresultaten en modellen te verklaren, zodat er een goede integratie is tussen de disciplines en hun modellen.

In een gasvoorkomen veroorzaakt de winning van aardgas een vermindering van de poriëndruk (depletie) in de gasvoerende gesteentelaag. Daarbij wordt het gesteente in geringe mate samengedrukt onder het gewicht van de bovenliggende lagen.

De samendrukbaarheid of compactie hangt af van verschillende factoren zoals de materiaaleigenschappen van het reservoirgesteente, de grootte van de drukdaling en de dikte van het depleterende reservoir (Figuur 6). Compactie wordt vervolgens vertaald in bodemdaling op maaiveldniveau. De mate van bodemdaling is afhankelijk van de diepte en omvang van het depleterende gasvoorkomen. Bij kleinere voorkomens, zoals de meeste voorkomens in Friesland, zal de maximale bodemdaling kleiner zijn dan de compactie van het reservoir. Hierbij moet rekening worden gehouden met eventuele daling van de druk in de watervoerende pakketten die grenzen aan het gasreservoir. De bodemdalingsschotel van een voorkomen beslaat een groter oppervlak dan het voorkomen zelf. Indien de gasvoorkomens dicht bij elkaar liggen kunnen de bodemdalingsschotels elkaar overlappen.



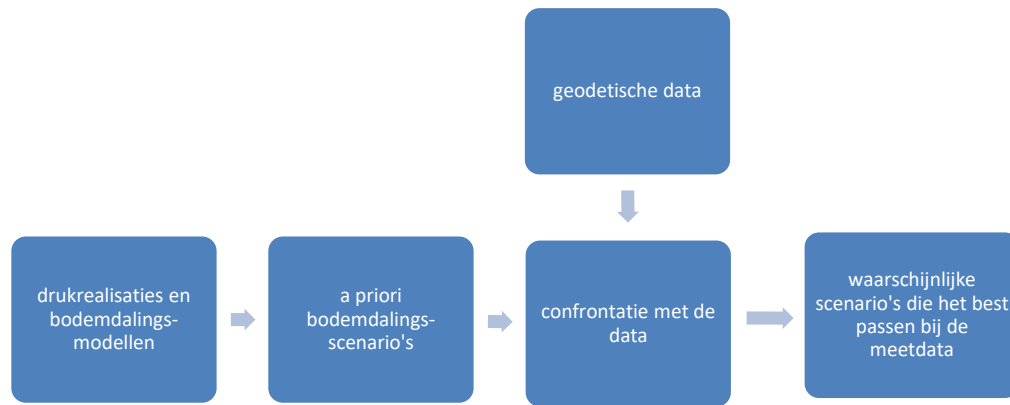
Figuur 6 Druk­daling in het reservoir resulteert in bodemdaling waarbij de boven­liggende pakketten invloed hebben op de vorm en omvang van de dalings­kom.

### 3.2 LTS-II methode

De bodemdalingsanalyses, die uitgevoerd worden voor de M&R-cyclus, zijn gebaseerd op de stochastische procedure die voortvloeit uit de Long Term Subsidence studie die door NAM in de periode 2014-2017 is uitgevoerd (Ref. 4).

Figuur 7 toont het schema dat laat zien hoe de modellen met de geodetische metingen worden geconfronteerd om tot een selectie te komen van de best passende modellen. De modelonzekerheid wordt bepaald door de onzekerheid in de mogelijke drukken en de onzekerheid in de waarden voor de parameters van het bodemdalingsmodel. Ook de onzekerheid in de geodetische metingen wordt gekwantificeerd: zowel de meet­precisie als de idealisatie­precisie (de mate waarin de beweging van de meet­punten representatief is voor bodemdaling als gevolg van gaswinning).





*Figuur 7 LTS-II-schema voor de selectie van de meest waarschijnlijke bodemdalingsscenario's.*

### **3.3 Ondergrondmodellen voor het M&R-protocol 2020 (M&R-cyclus 2019)**

Het bodemdalingsmodel zoals gebruikt in de LTS-II studie is toegepast voor alle Wadden voorkomens en de omliggende voorkomens die een invloed kunnen hebben op de bodemdaling in de Wadden (Ameland en Anjum voorkomens). Dit model bestaat uit twee componenten. De eerste component beschrijft de compactie in het reservoir en de tweede component beschrijft de vertaling van de compactie op de bodemdaling. In de volgende paragrafen wordt er in meer detail ingegaan op de reservoir- en bodemdalingsmodellen.

#### **3.3.1 Reservoirmodellen om de drukken te voorspellen**

Om de drukdaling in de diepe ondergrond als gevolg van gasproductie te voorspellen zijn gedetailleerde driedimensionale reservoirmodellen gemaakt voor:

- Ameland: Ameland-Oost en Ameland-Westgat,
- Wadden: Lauwersoog-Centraal, Lauwersoog-Oost, Lauwersoog-West, Moddergat, Nes en Vierhuizen-Oost,
- Anjum: Anjum, Ezumazijl, Metslawier.

In deze modellen wordt alle beschikbare data geïntegreerd. Een overzicht van de data en welke informatie ze geven is gepresenteerd in Tabel 2. In deze tabel staan ook de data die in het geologische model verwerkt worden. Vervolgens wordt met deze reservoirmodellen gesimuleerd hoe de druk als gevolg van gasproductie verloopt in de tijd. De gemeten drukken kunnen dan vergeleken worden met de drukken die berekend zijn door de modellen en zo nodig kunnen de modellen worden aangepast (i.e. gekalibreerd). Omdat bijvoorbeeld de Wadden en Anjum voorkomens gemiddeld al meer dan 70% van het gas hebben geproduceerd, is er veel data beschikbaar en daarom geldt de verwachting dat de drukvoorspellingen in de toekomst slechts een beperkte onzekerheid zullen hebben.

Tabel 2: Overzicht van de data die zijn gebruikt om de modellen te maken die de drukvoorspellingen geven.

Databron	Levert informatie over:
Seismische en geologische data	Geometrie, gesteentelagen, locatie van breuken, regionale variaties in eigenschappen
Gesteentekernen (24)	Porositeit, absolute en relatieve permeabiliteit, gesteentecompressibiliteit
Logs gemeten in putten (~60)	Porositeit, saturatie en gas-watercontact, capillaire druk, druk per reservoir eenheid
Gas en water PVT-analyse	Compositie, gas expansiefactor
Reservoirdrukken (jaarlijks)	Porositeit, permeabiliteit, relatieve permeabiliteit, compressibiliteit, doorlatendheid van breuken
Hoeveelheden geproduceerd gas en water (jaarlijks)	Porositeit, permeabiliteit, relatieve permeabiliteit, compressibiliteit

Om de onzekerheden mee te nemen, zijn voor elk voorkomen *meerdere* reservoirrealisaties gemaakt, die elk het historische gedrag zoals de historisch gemeten drukken kunnen voorspellen, maar verschillende voorspellingen van de toekomstige reservoirdrukken geven. Reservoirparameters waarvan de onzekerheid wordt meegenomen zijn:

- Reservoirvolume en -geometrie (incl. porositeit en saturatie)
- Breukdoorlatendheden
- Gas-Water contact
- Hoeveelheid gas in aquifer(s)
- Permeabiliteit verticaal
- Permeabiliteit horizontaal
- Permeabiliteit in aquifer(s)
- Relatieve permeabiliteit

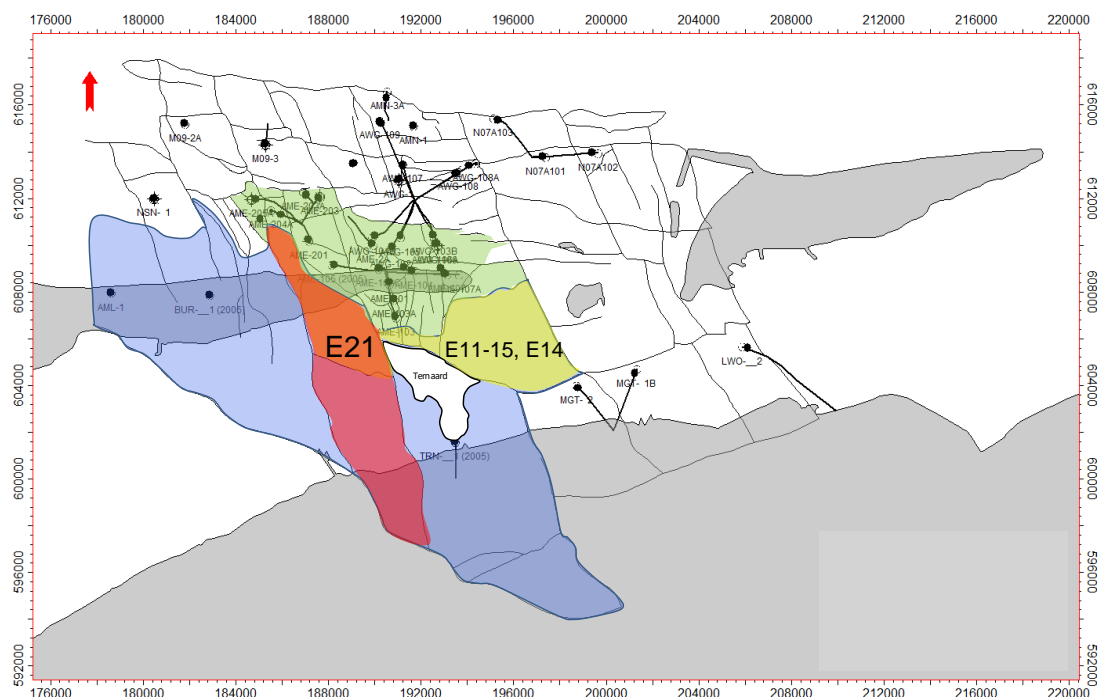
Op basis van de metingen is voor elke reservoirparameter een bereik voor de waarden bepaald. Dit wordt uitgebreid beschreven in Ref. 5 voor de Wadden en Anjum voorkomens en Ref. 4 voor het Ameland voorkomen.

Uit deze gegevens kan ook afgeleid worden of er communicatie bestaat tussen bepaalde voorkomens die begrensd worden door breuken. Als bijvoorbeeld voorkomens hun eigen initiële gas-water contact en initiële druk hebben, kan afgeleid worden dat in de geologische tijd er geen communicatie mogelijk was tussen de voorkomens. Ook een groot verzet van een breuk kan voorkomen dat er communicatie mogelijk is tussen reservoirs aan weerszijden van de breuken. Als vervolgens, na jarenlange productie van een voorkomen, de reservoirdruk gelijk blijft in een naastgelegen voorkomen dat nog niet in productie genomen is, geeft dit een bevestiging dat er geen communicatie is tussen de voorkomens tijdens de productiefase. Breuken die ondoorlatend zijn in geologische tijd zullen dat over het algemeen ook blijven gedurende de productieperiode van het voorkomen. Er zijn binnen NAM geen gevallen bekend waar een plotselinge druktoename dan wel afname gemeten werd als gevolg van een dergelijk mechanisme.

Onzekerheden die gereduceerd kunnen worden met de historische drukmetingen zijn voornamelijk de grootte van het gasvoorkomen en de permeabiliteit in het gasvoorkomen zelf. Design of Experiments (DoE) in combinatie met Monte Carlo wordt toegepast om modelrealisaties te vinden die maximaal van elkaar verschillen en toch de historische metingen kunnen reproduceren.

Om de onzekerheden mee te nemen die *in mindere mate* gereduceerd kunnen worden met behulp van de historische productiegegevens en drukmetingen, worden er verschillende realisaties van de reservoirmodellen gemaakt. Deze realisaties worden met name gemaakt om de onzekerheid in de aquifers te adresseren. Resterende onzekerheden die worden meegenomen in de verschillende realisaties zijn:

- De hoeveelheid gas in het aquifer, zogenaamd paleo-residueel gas. Deze parameter beïnvloedt hoe de druk in het aquifer reageert. Bij de aanwezigheid van meer paleo-residueel gas in de aquifer zal de druk minder dalen na gasproductie, omdat het gas in de aquifer uitzet bij drukdaling en daarbij de porieruimte en permeabiliteit verkleint. Een aquifer zonder paleo-residueel gas zal meer in druk dalen bij eenzelfde permeabiliteit.
- De mate van communicatie tussen het gasvoorkomen en het aquifer. De permeabiliteit in de aquifer bepaalt hoe de druk kan dalen in de aquifer. Voor de Anjum en Wadden voorkomens is de locatie van de aquifers eenduidiger door de seismische-, geologische- en drukdata. Voor het Ameland voorkomen is de permeabiliteit in de zuidwestelijke aquifer E21 en zuidoostelijke aquifer E11-15 en E14 (zie de rode en gele gebieden in Figuur 8) gevarieerd om de bodemdaling ten zuiden van Ameland te verklaren. De blauwe aquifers in Figuur 8 kunnen niet in druk dalen omdat deze aan alle kanten, dus ook aan de kant waar deze aan het gasvoorkomen grenst, begrensd worden door breuken met een dusdanig groot verzet dat er geen contact is tussen de reservoirs aan weerszijden van de breuken.



Figuur 8: Laterale aquifers van het Ameland voorkomen (rood en geel).

Om een goed bereik van de drukvoorspellingen te krijgen wordt met name de permeabiliteit van de aquifer en de paleo-gassaturatie gevarieerd. Andere parameters zijn zodanig aangepast dat de drukmetingen in overeenstemming zijn met de

gesimuleerde drukken. Dit is uitgebreid beschreven in Ref. 4 en Ref. 5. Dit heeft geresulteerd in modelrealisaties die de historische metingen kunnen reproduceren en verschillende drukvoorspellingen van met name de aquiferdruk geven:

- een aquifer waarvan het water niet mobiel is, waardoor vooral de druk daalt in het gasreservoir en nauwelijks in de aquifer. Dit is de lage modelrealisatie<sup>2</sup>.
- een aquifer waarvan het water beperkt mobiel is en daardoor de druk in de aquifer minder snel daalt, ook door de aanwezigheid van paleo-residueel gas. De waarden van paleo-residueel gas zijn in overeenstemming met de waarden zoals gemeten in de putten. Dit resulteert in de basis modelrealisatie.
- een aquifer die volledig mobiel is, waardoor zowel de druk daalt in het gasreservoir en in de aquifer, resulterend in meer bodemdaling. Dit is de hoge modelrealisatie.

De parameterwaarden van mogelijke realisaties zullen binnen het bereik van de gemeten waarden vallen. Ook de combinaties van parameterwaarden zijn fysisch realistisch. De gemodelleerde correlatie tussen bijvoorbeeld de porositeit en de gassaturatie is in overeenstemming met fysische principes en de logmetingen in de putten. Daarmee zijn de parameterwaarden fysisch goed onderbouwd.

Zoals eerder uitgelegd, zijn de drukmetingen in de putten voornamelijk representatief voor de reservoirdruk in het gasvoorkomen. De drukken in de watervoerende lagen verder weg van de putten, waar geen directe metingen zijn, laten grotere verschillen zien tussen de realisaties. Als de gemodelleerde aquiferdrukken nog lager zouden worden, dan zouden ofwel de drukken zoals gemeten in de put niet meer door de modellen gereproduceerd kunnen worden, ofwel de parameterwaarden zouden niet meer fysisch te onderbouwen zijn.

Om drukprognoses te maken worden de gaswinningsprognoses gebruikt die elk jaar op basis van de laatste inzichten worden vastgesteld.

### **3.3.2 Verifiëren bodemdalingsscenario's**

De bodemdalingberekeningen werden tot en met het rapportagejaar 2016 uitgevoerd met het eindige elementen programma "Geomec", een Shell-applicatie die gebaseerd is op DIANA (<https://dianafea.com>). In de LTS-II studie is aangetoond (Ref. 4) dat resultaten van de analytische modellen zeer goed overeenkomen met de resultaten die berekend worden door Geomec, met als grote voordeel dat deze analytische modellen een veel kortere rekentijd hebben. Deze analytische modellen zijn tevens geschikt om de compactie met het RTCiM (Rate type compaction model, Ref. 7) door te rekenen. Het RTCiM is het meest flexibele model dat gebruikt kan worden om een passing te zoeken tussen geodetische metingen en geomechanische modellen. Het RTCiM model is in de LTS-II studie uitgebreid met een extra deel dat het geomechanisch gedrag beschrijft op het moment dat het gasreservoir en/of watervoerende pakket zich in een staat van overdruk bevindt. Overdruk is hier gedefinieerd als een vloeistof- of gasdruk hoger dan de hydrostatische druk volgens een gradiënt van 0,11 bar/m. Op het moment dat de drukdaling het niveau van de hydrostatische druk bereikt zal de compactie zich gedragen volgens het reguliere RTCiM model.

De kruip van het zout boven het compacterende reservoir is gesimuleerd door de toepassing van een bewegend "rigid basement" proxy. Door het "rigid basement" in de tijd naar boven te bewegen zal de bodemdalingsskom smaller worden. De tijdsconstanten van deze beweging worden bepaald door de kruipparameters, waarbij

---

<sup>2</sup> De termen hoog en laag worden gekozen op basis van de invloed in het betreffende scenario op het totale bodemdalingsvolume.

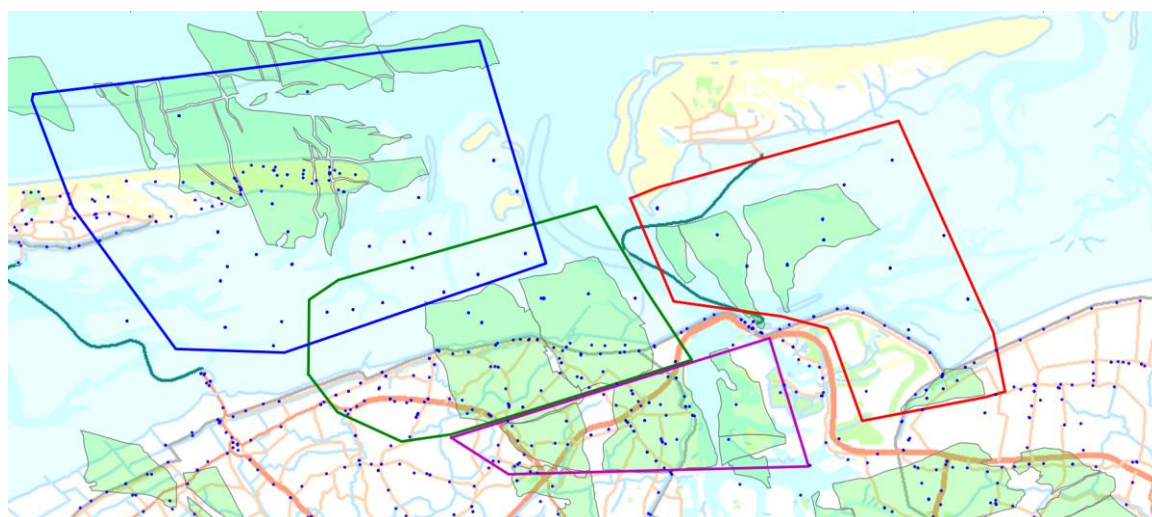
de analytische berekeningen gekalibreerd zijn aan de numerieke eindige elementen berekeningen met Geomec.

De LTS-II methodiek wordt toegepast op alle Ameland, Wadden en Anjum voorkomens waarbij voor elk voorkomen meerdere reservoirrealisaties worden gemaakt. Deze reservoirrealisaties worden met elkaar gecombineerd, waarna de bodemdalingsscenario's worden opgesteld, doorgerekend en geconfronteerd met de metingen.

### 3.3.2.1 Opstellen van bodemdalingsscenario's

Bij het vinden en opstellen van bodemdalingsscenario's, met als doel de onzekerheid in de modellering te kwantificeren, wordt gebruik gemaakt van de LTS-II aanpak waarbij er per voorkomen verschillende reservoirrealisaties worden gemaakt, zoals hierboven beschreven. Voor elk van deze reservoirrealisaties worden vele (duizenden) bodemdalingsscenario's gemaakt op basis van de onzekerheid in de waarden voor de invoergegevens in de bodemdalingsmodellen.

Voor het beoordelen van de passing tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling worden kalibratiegebieden gedefinieerd. Als voorbeeld worden in Figuur 3-9 de kalibratiegebieden getoond die gebruikt zijn in Ref. 2.



Figuur 3-9; Voorbeeld van kalibratiegebieden met gebruikte geodetische metingen (Ref. 2)

### 3.3.2.2 Confrontatie bodemdalingsscenario's en geodetische data

Per kalibratiegebied wordt voor elk scenario de passing van het scenario met de metingen uitgedrukt in een waarde voor de  $\chi^2$  toetsgrootheid. De passing van het model met de data is beter naarmate de waarde voor  $\chi^2$  toetsgrootheid kleiner wordt waarbij de waarschijnlijkheid van het betreffende scenario groter wordt.

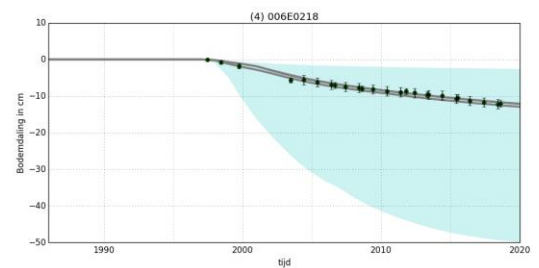
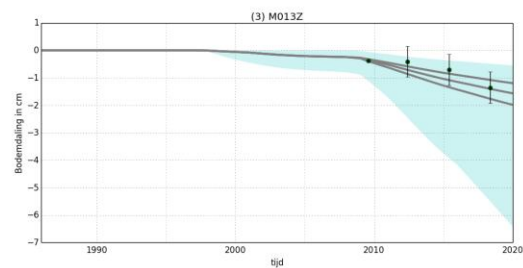
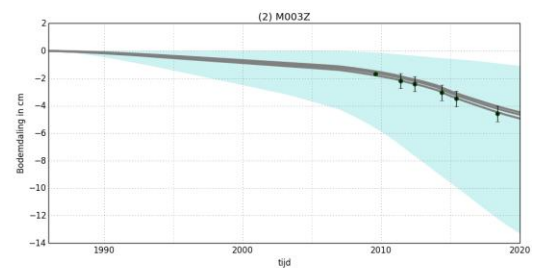
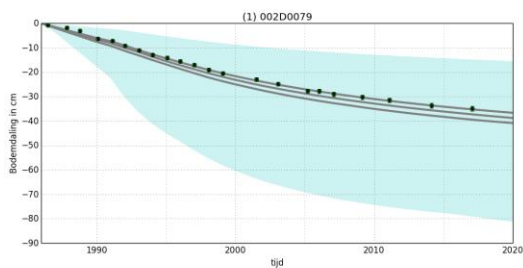
In de berekening van de  $\chi^2$  toetsgrootheid wordt een weging toegepast door middel van een covariantiematrix, waarin de meetprecisie, de idealisatie precisie, en model-imperfecties zijn gemodelleerd. De idealisatie precisie geeft de mate aan waarin de beweging van de peilmerken representatief zijn voor het bodemdalingssignaal. De model-imperfecties zijn gerelateerd aan mogelijke vereenvoudiging van de complexe werkelijkheid in de berekening van bodemdalingsmodellen.

Door middel van de waarden van de  $\chi^2$  toetsgrootheden kan er per kalibratiegebied een rangschikking worden gemaakt van de waarschijnlijkheid van de bodemdalingsscenario's. Per jaar en per parameter (zoals bv. bodemdaling op een punt, de Cm waarde en bodemdalingsvolume) kunnen hiermee statistische waarden zoals gewogen gemiddelde en betrouwbaarheidsinterval worden afgeleid.

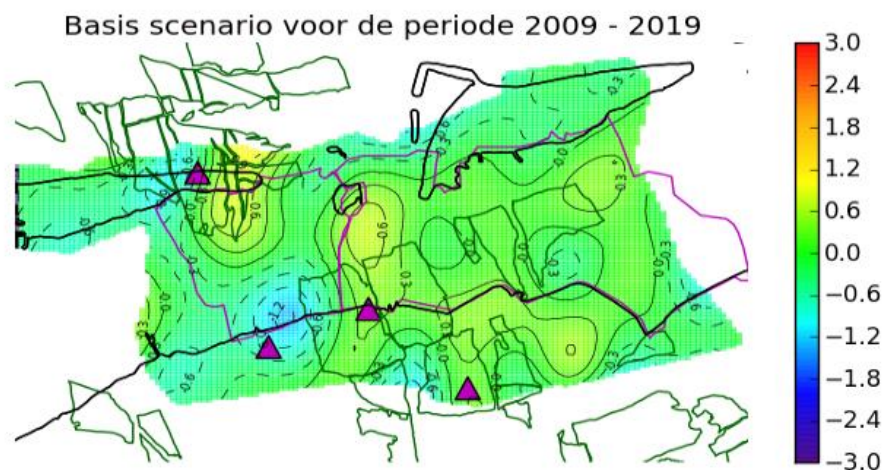
Als voorbeeld (Ref. 2) toont Figuur 10, als grijze lijnen, de statistische bodemdalinglijnen voor de 2,5% overschrijdingskans, het gewogen gemiddelde en de 97,5% overschrijdingskans. Het blauwe vlak toont de onzekerheidsruimte die a priori is

aangenomen. Tevens is de gemeten bodemdaling, met onzekerheid, als punten weergegeven in de grafieken.

In de M&R-rapportages worden de resultaten van de bodemdalingsberekeningen vergeleken met de resultaten van de geodetische ruimte-tijd analyse (methode Houtenbos (TCBB, 2009)). Deze ruimte-tijd analyse resulteert in een in ruimte en tijd gecorreleerde bodemdalingssignaal dat het best past bij de geodetische metingen. Om de vergelijking met statistische lijnen op basis van de weging van de bodemdalingsmodellen te kunnen maken, worden er discrete scenario's gekozen die dicht bij de statistisch bepaalde oplossingen liggen (gewogen gemiddelde, en 2.5% en 97.5% overschrijdingskansen). Figuur 11 toont een voorbeeld van verschilkaart tussen het geodetisch en geomechanisch model. Verschillen in bepaalde gebieden kunnen een aanleiding geven om verder onderzoek te doen naar alternatieve scenario's of andere oorzaken. De ondergrondmodellen houden bijvoorbeeld geen rekening met mogelijke compactie in de ondiepe ondergrond. Veenoxidatie en veen/klei inklinking zijn de twee meest voorkomende oorzaken van deze vorm van natuurlijke compactie. Bodemdaling die hieruit volgt wordt autonome daling genoemd. Tevens kan er daling ontstaan door het gewicht van bebouwing en infrastructuur. Deze componenten van bodembeweging worden echter zoveel mogelijk beperkt door goed gefundeerde meetpunten te gebruiken, en niet ruimtelijke gecorreleerde bewegingen van meetpunten te identificeren door middel van geodetische toetsing. Vervolgens worden de meetpunten die representatief worden verondersteld voor bodembeweging door compactie in de diepe ondergrond gebruikt in de confrontatie met de bodemdalingsmodellen.



Figuur 10; Bodemdaling op 4 punten zoals gerapporteerd in de M&R-rapportage over 2019 (Ref. 2). De grijze lijnen geven de statistische waarden voor de 2,5% overschrijdingskans, het gewogen gemiddelde en de 97,5% overschrijdingskans voor de bodemdaling weer. Het lichtblauwe gebied geeft de a priori gemodelleerde bodemdalingsruimte aan. De punten geven de waarden voor de waterpasmetingen aan, inclusief de onzekerheid (2-sigma).



Figuur 11; Voorbeeld van verschil (in cm) tussen de gemodelleerde bodemdaling volgens het geomechanisch model en het geodetische model voor de periode 2009-2019. In de blauwe gebieden, met negatieve afwijkingen, is de gemeten bodemdaling groter dan de gemodelleerde; in de gele gebieden, met positieve afwijkingen, is meer bodemdaling gemodelleerd dan gemeten. De driehoeken geven de locaties van de continue GNSS-stations aan (Ref. 2).

### 3.3.2.3 Selectie van geomechanische parameters op basis van confrontatie met gemeten data

De geomechanische parameters per kalibratiegebied volgen uit de deterministische scenario's die het best passen bij de statistische resultaten. In Tabel 3 worden de waarden getoond die volgden uit de analyse die gedaan is voor 2019 (Ref. 2). Ieder jaar zullen nieuwe kalibraties worden uitgevoerd, waarbij kalibratiegebieden en/of parameterwaarden kunnen veranderen. Bij ieder bodemdalingsscenario hoort een reservoirrealisatie. Deze realisaties kunnen bijgesteld worden door het inbrengen van nieuwe data.

De  $C_{mref}$ ,  $C_{md}$  en  $b$  in Tabel 3 zijn RTCiM parameters die het compactiegedrag van het reservoir beschrijven. Voor alle voorkomens is de relatie tussen kernplug  $C_m$  metingen met de porositeit<sup>3</sup> gebruikt om een spatiële  $C_m$  kaart te maken die als a priori informatie gebruikt wordt in de berekeningen. De  $C_{mref}$  en  $C_{md}$  zijn vermenigvuldigingsfactoren op deze kaarten.

Voor de beschrijving van het zoutgedrag worden de waarden voor de parameters  $C/k(0)$ ,  $d(c/k)$  en  $T_{salt}$  gebruikt. Voor een verdere beschrijving van de RTCiM- en zoutparameters wordt verwezen naar Ref. 4.

Tabel 3; gebruikte geomechanische parameters in Ref. 2 voor respectievelijk het laag, basis en hoog bodemdalingsscenario. Deze parameterswaarden veranderen in iedere cyclus door een nieuwe kalibratie.

RTCiM	Ameland	Anjum	Nes Moddergat	Lauwersoog Vierhuizen
$C_{mref}$ (factor) [-]	2,96 - 3,21 - 3,35	1,2 - 1,2 - 1,08	1,13 - 1,3 - 1,41	0,89 - 0,95 - 1,19
$C_{md}$ (factor)[-]	0,6 - 0,65 - 0,73	0,26 - 0,26 - 0,39	0,24 - 0,28 - 0,39	0,21 - 0,22 - 0,41
$b$ [-]	0,03 - 0,029 - 0,027	0,015 - 0,015 - 0,015	0,014 - 0,012 - 0,017	0,022 - 0,016 - 0,011
Zoutgedrag				
$C/k(0)$ [-]	0,78 - 0,78 - 0,8	0,75 - 0,75 - 0,8	0,8 - 0,77 - 0,78	0,82 - 0,79 - 0,82
$d(c/k)$ [-]	0,24 - 0,23 - 0,21	0,32 - 0,32 - 0,23	0,15 - 0,18 - 0,2	0,23 - 0,17 - 0,21
$T_{salt}$ [jaar]	19,88 - 23,28 - 21,91	24,04 - 24,04 - 16,47	26,19 - 25,92 - 27,39	18,18 - 4,88 - 12,1

<sup>3</sup> De gebruikte porositeits ( $\Phi$ ) -  $C_m$  relatie is  $C_m = 273 \Phi^3 - 68,72 \Phi^2 + 9,85 \Phi + 0,21$  waarbij de  $C_m$  in  $10^{-5}$  bar<sup>-1</sup> is en de porositeit ( $\Phi$ ) in [-].



Het geodetisch model (uit de ruimte-tijd analyse) wordt ook gebruikt om het bodemdalingsvolume en daarmee de belasting te berekenen. Deze belasting kan worden vergeleken met de belasting die uit het geomechanisch model volgt om vertrouwen te krijgen in de berekeningen met dit model. Het geomechanisch model is leidend in bepaling van de belasting omdat dit het enige model is dat ook, op basis van berekende drukken, een voorspelling van de bodemdaling in de toekomst kan maken.

## 4 Referenties

Ref. 1 NAM (2012) Gaswinning Moddergat/Lauwersoog/Vierhuizen: Technische bijlage (bijlage 3) behorend bij het geactualiseerde Meet- en Regelprotocol d.d. 1 juli 2012. EP201201210893 RevA.

Ref. 2 NAM (2020) Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Resultaten uitvoering Meet-en regelcyclus 2019. NAM-rapport EP202002200220

Ref. 3 NAM (2006) Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2006. NAM rapport EP200612205324

Ref. 4 NAM (2017) Ensemble Based Subsidence application to the Ameland gas field – long term subsidence study part two (LTS-II) continued study. NAM report EP201710200509 <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/wadden/en/b2bb2626-2cf8-4d7f-994d-04a9995e9d>

Ref. 5 Dynamic Reservoir Modelling of Wadden Fields for subsidence. Meet & Regel 2016. EP201703201178. <https://www.commissiemer.nl/projectdocumenten/00000940.pdf>

Ref. 6 Subsurface Technical Report (2010): Static Reservoir Modelling of Ameland Fields for Subsidence Prediction.

Ref. 7 TNO (2013) A general framework for rate dependent compaction models for reservoir rock. TNO 2013 R11405.

Ref. 8 06GPS (2020a) GPS Survey NAM Waddenzee (version 1.24), 20 January 2020 (zie [www.nlog.nl](http://www.nlog.nl)).

Ref. 9 NAM (2019): Meetregister bij het meetplan Noord-Nederland, Groningen en Waddenzee 2018 – Addendum InSAR. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 19 juli 2019, EP201907205139.

Ref. 10 NAM (2020b) Gebruik van InSAR in de meetregisters Noord-Nederland en Groningen Analyse beschikbaarheid en betrouwbaarheid, EP202005202312

Ref. 11 TCBB (2009): [Van Meting naar Daling – Bodemdaling door delfstofwinning](#). Technische commissie bodembeweging, November 2009.