



1 Bodemdaling



Harry Piening, Wim van der Veen, Rob van Eijs





Inhoudsopgave

1	Bodemdaling	9
1.1	Inleiding	12
1.2	Beschrijving van de winning	12
1.2.1	Gasvelden en locaties	12
1.2.2	Geologie	13
1.2.3	Productie	13
1.3	Geodetische metingen	15
1.3.1	Waterpassen	15
1.3.2	GPS	17
1.3.3	Rapportage van meetgegevens	19
1.4	Bodemdalingsprognoses	20
1.4.1	Kalibratie methodieken	21
1.4.2	Prognoses Meet en Regelcyclus 2016	21
1.5	Bodemtrillingen	24
1.6	Literatuur	25



1.1 Inleiding

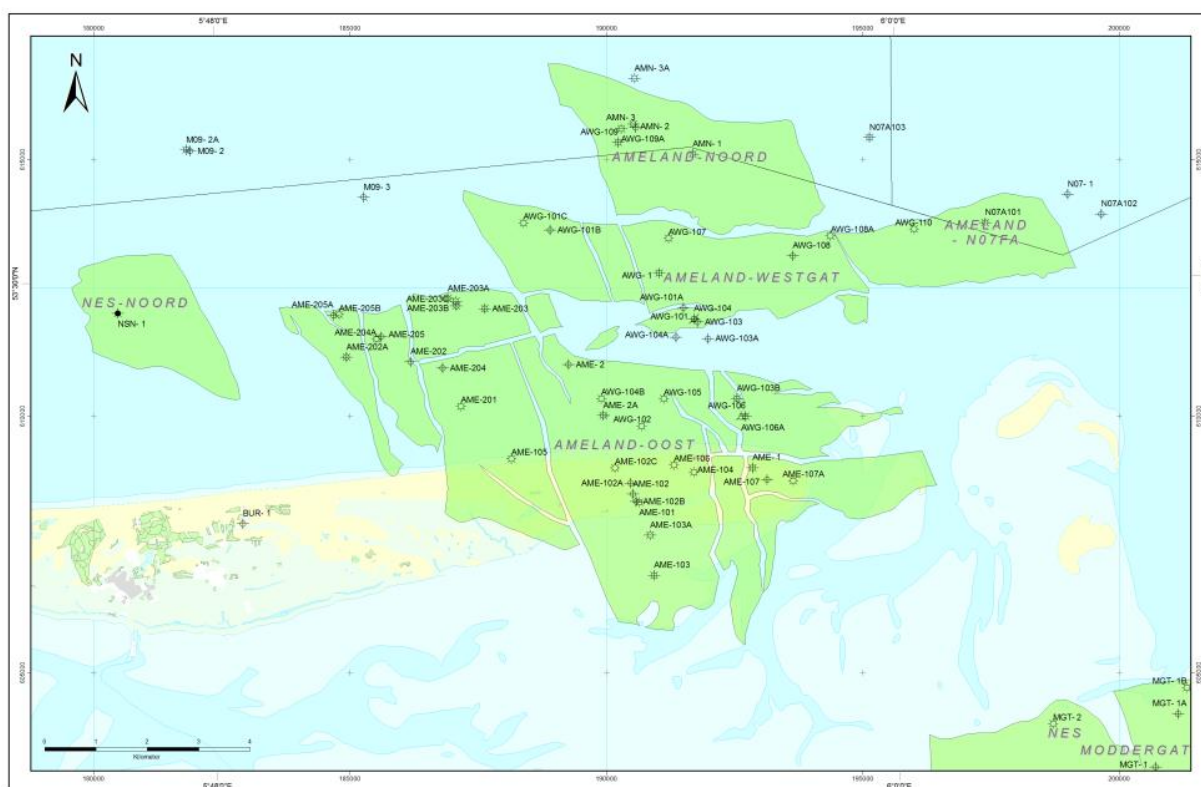
Door de winning van aardgas uit de gasvoerende gesteentelagen zal de druk in de poriën van het gesteente verminderen waardoor inklinking of compactie van de gasvoerende gesteentelagen optreedt. Dit manifesteert zich aan de oppervlakte in de vorm van daling van het maaiveld en zeebodem.

Hier iets opnemen over dat bodemdaling de oorzaak is van verschillende effecten die vervolgens weer kunnen leiden tot een bedreiging van de te beschermen waarden. Gedegen kennis en volledige en nauwkeurige data over bodemdaling is de basis voor de monitoring.

Dit hoofdstuk bevat een beschrijving van de Ameland gasvelden (geologie, productie), de metingen die zijn uitgevoerd om de bodemdaling te monitoren en de bodemdalingsprognoses. De geodetische metingen worden uitgevoerd met de technieken waterpassen en GPS. In 2011 zijn de ondergrondmodellen opnieuw gevalideerd en gekalibreerd met de bodemdalingsmetingen en is een gewijzigd winningsplan ingediend. Sindsdien is het model in het kader van de Meet en Regelcyclus jaarlijks gekalibreerd aan de gemeten bodemdaling. De verwachte bodemdaling in het diepste punt van de kom, na beëindiging van de gaswinning, ligt tussen de 40 en 45 centimeter. De na-ijling van de bodemdaling ligt rond de 7 jaar en de effecten van de na-ijling zijn verdisconteerd in de genoemde getallen voor de maximale bodemdaling.

1.2 Beschrijving van de winning

1.2.1 Gasvelden en locaties

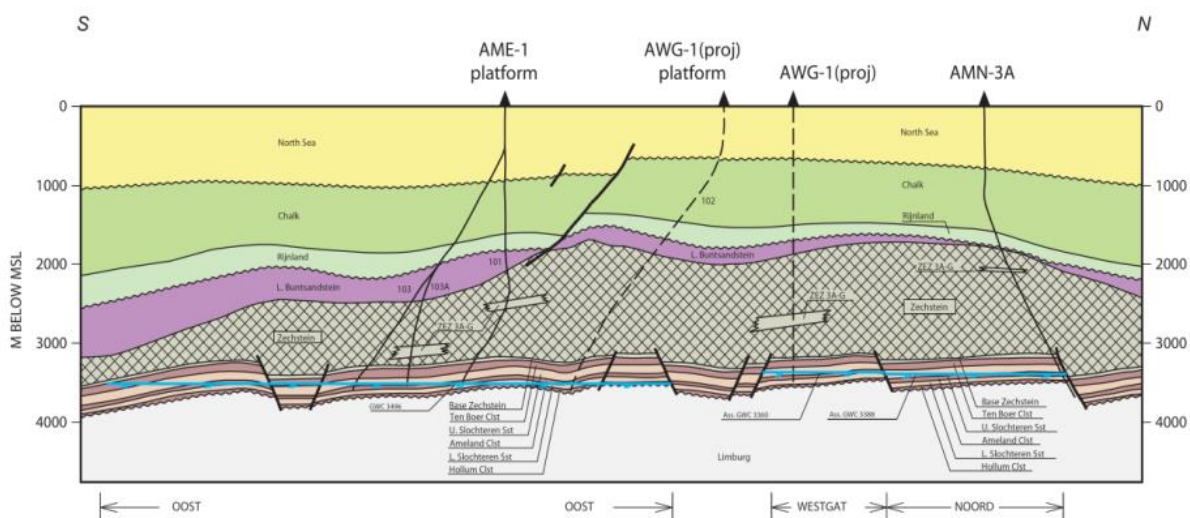




Medio 2011 is de put AWG-110 vanuit de AWG locatie naar het N07-FA voorkomen geboord en in productie genomen.

1.2.2 Geologie

Het gas is gevormd in de koollagen van het geologische tijdperk Carboon. Vervolgens heeft het gas zich verplaatst naar bovenliggende zandsteenlagen in de Rotliegend formatie. De voorkomens worden van boven afgesloten door een zoutlaag (Zechsteinformatie). Figuur 1.2 geeft de geologische doorsnede door het gasveld Ameland-Oost weer, die vergelijkbaar is met die van het gasveld Ameland-Westgat en Ameland-N07FA. De gasvelden liggen op een diepte van circa 3300 m.

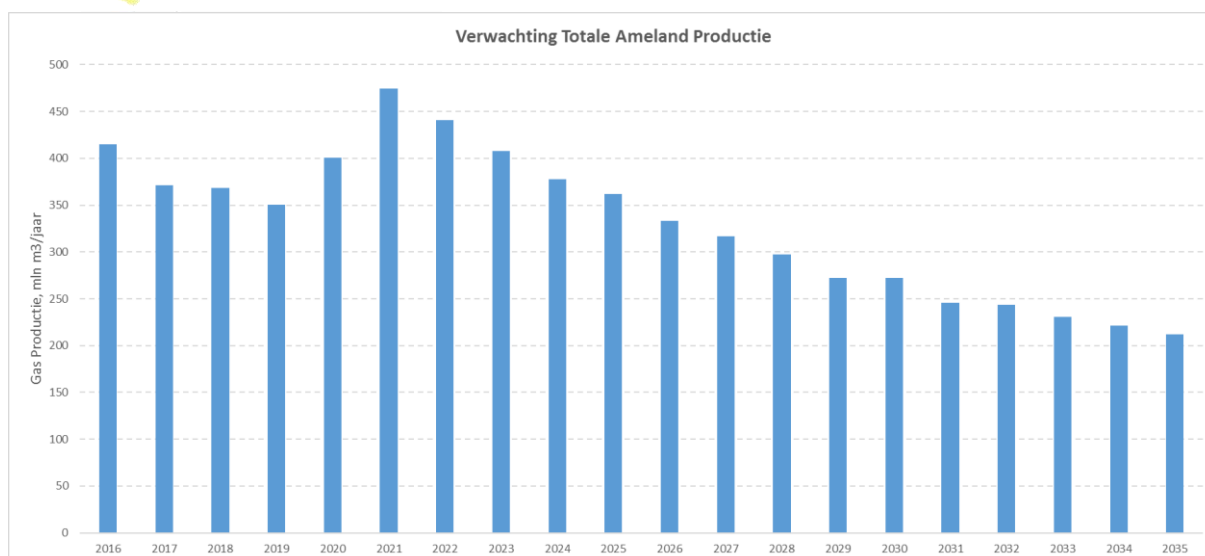


Figuur 1.2 Geologische doorsnede Ameland-Oost.

1.2.3 Productie

Figuur 1.3 toont het verwachte productievolume voor Ameland vanaf 2016 (Ameland-Oost, Ameland-Westgat en Ameland-N07-FA). Deze productiecijfers zijn gebaseerd op zowel de statische modellering (op basis van seismiek) als de dynamische modellering (gekoppeld aan het statische model met reservoir parameters gekalibreerd aan geproduceerde volumes en drukdaling) van de ondergrond.

Er zit een onzekerheidsmarge in de toekomstige productievolumes. Afwijkingen kunnen optreden om reservoir technische en/of economische redenen. Wanneer het productieprofiel of de bodemdalingsprognose wezenlijk verandert, zal er een verzoek om instemming met een gewijzigd winningsplan worden ingediend. Op dit moment toont het goedgekeurde winningsplan een einddatum van 2035. Productie na 2035 zal alleen mogelijk zijn nadat er instemming is verleend op een nieuw in te dienen winningsplan.

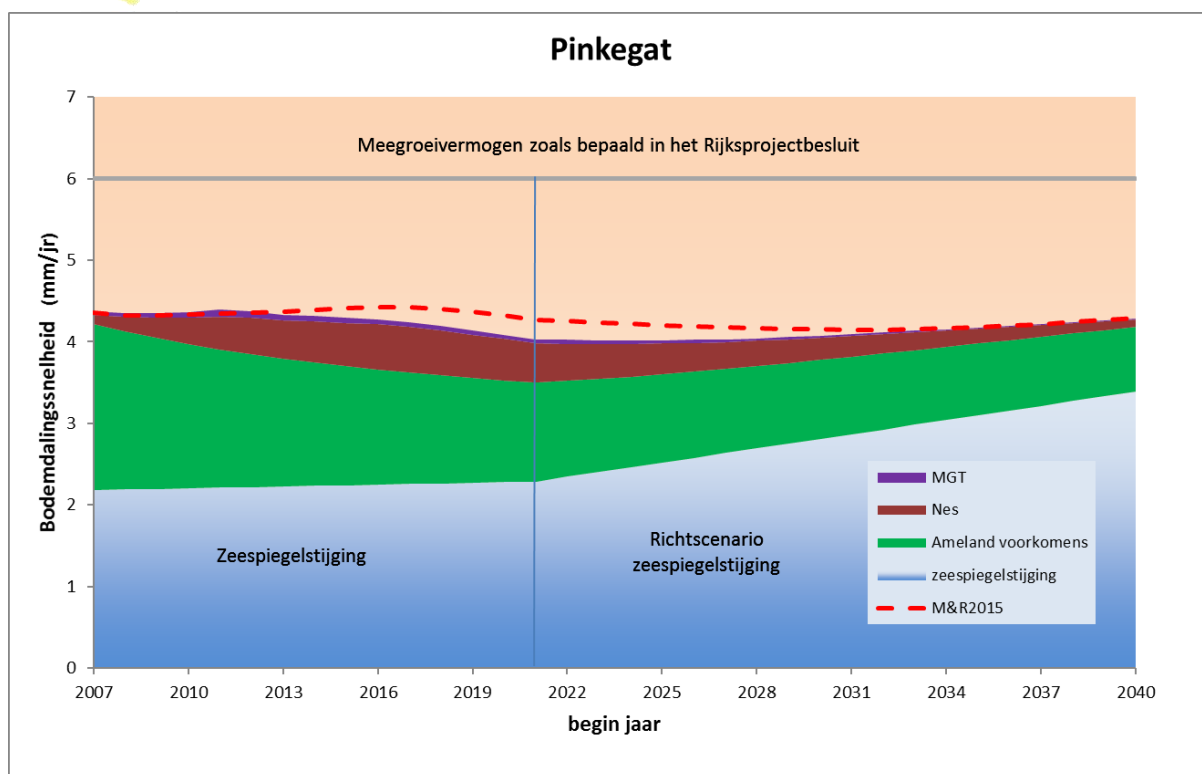


Figuur 1.3 Verwachte productievolume Ameland 2016-2035 in mln m³/jaar.

Het grootste deel van het gas is reeds geproduceerd en de druk in Ameland-Oost is inmiddels gedaald van 570 naar 50 bar. Aan het einde van de productie zal de druk daar naar verwachting nog 30 bar bedragen.

Sinds de start van de productie uit de velden Nes, Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (de zogenaamde waddenvelden) in 2007 wordt het hand aan de kraan principe toegepast voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Dit houdt in dat de bodemdalingsnelheid door gaswinning in de kombergingsgebieden en de snelheid van zeespiegelstijging samen niet groter mogen zijn dan de natuurlijke sedimentatiecapaciteit van een kombergingsgebied (de zogenaamde 'natuurgrens'). In dat geval zijn er geen significante nadelige effecten op de natuur te verwachten. Extra zekerheid hierover wordt ingebouwd door het gegeven dat de natuurgrens een conservatieve schatting is van het meegroeivermogen van het Waddensysteem. Daar de gaswinning uit het gasveld Ameland-Oost ook bodemdaling veroorzaakt in het kombergingsgebied Pinkegat wordt ook de bodemdaling door de Amelandvelden meegenomen in de jaarlijkse Meet en regelcyclus (NAM 2016) rond de winningen uit de waddenvelden.

Uit figuur 1.4 (een uitwerking en weergave van de bodemdaling en zeespiegelstijging binnen de natuurgrenzen conform het 'hand aan de kraan' principe) blijkt dat de natuurgrens van het Pinkegat tijdens de geplande productieperiode niet wordt overschreden. De bijdrage van het Ameland veld is relatief groot en wordt voornamelijk veroorzaakt door drukdaling en compactie in de watervoerende pakketten ten zuiden van het gasveld.



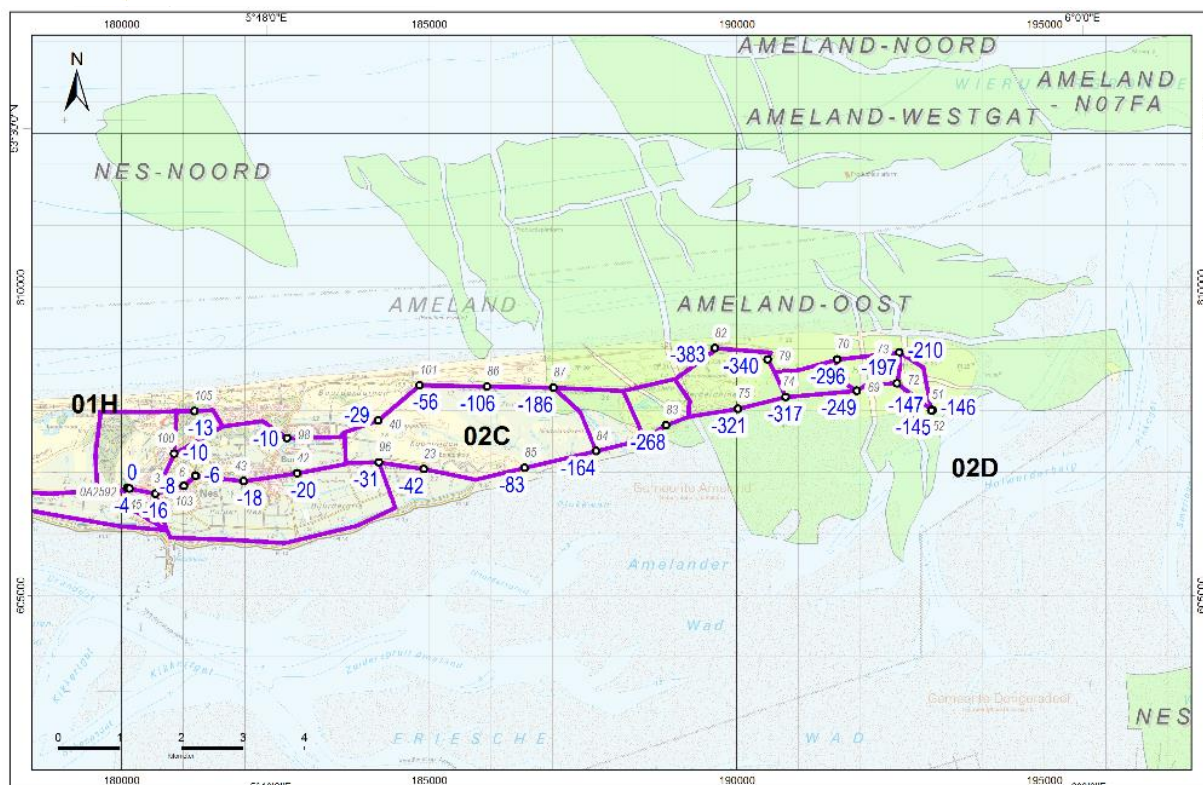
Figuur 1.4 Verwachte bodemdalingsnelheid in het Pinkegat (6-jarlijks voortschrijdend gemiddelde) door winning uit de Ameland en waddenvelden tezamen met de verwachte snelheid van zeespiegelstijging (actualisatie 2016) (Meet & Regel cyclus rapportage, 2016).

1.3 Geodetische metingen

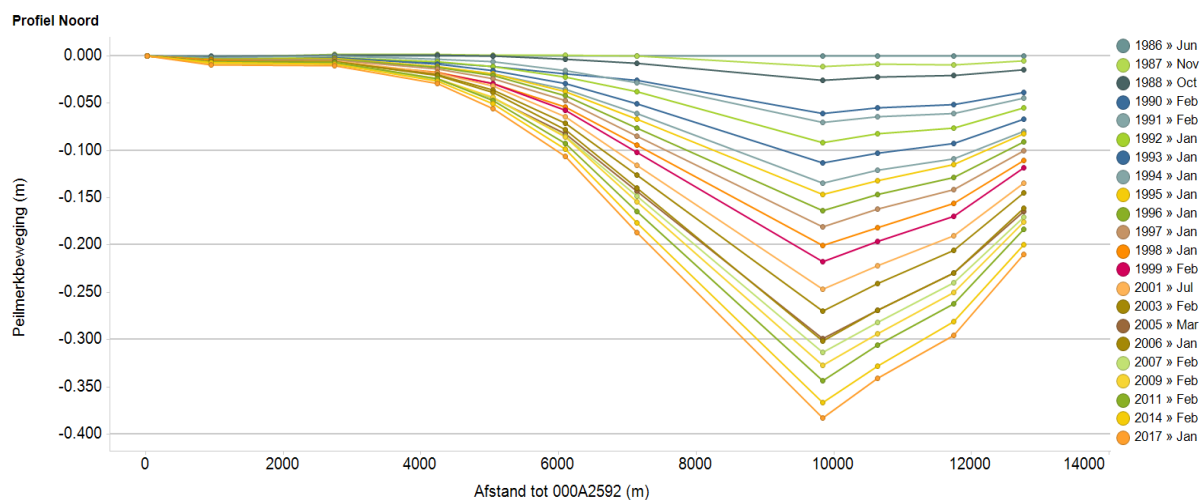
De monitoring van de bodemdaling op Ameland vindt plaats door middel van hoogteverschilmetingen met de meettechnieken waterpassen en GPS (satellietmetingen).

1.3.1 Waterpassen

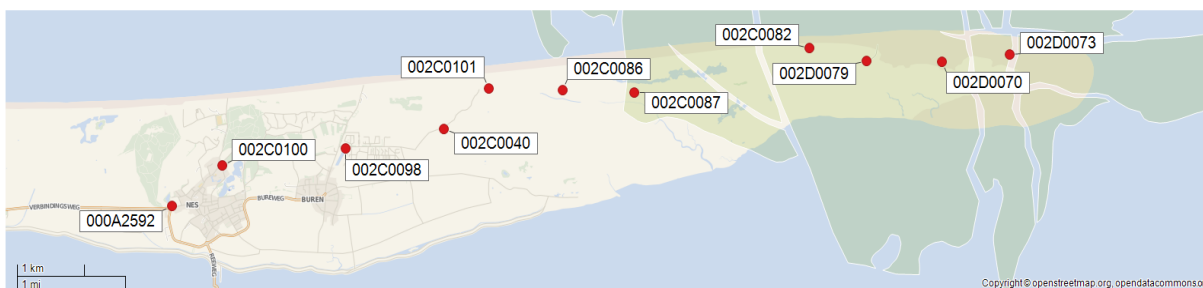
Vanaf het begin van de productie op Ameland zijn er waterpascampagnes uitgevoerd met een interval van 1-3 jaar (nulmeting in 1986). De laatste meting is uitgevoerd in 2017 en bestrijkt het gehele eiland (NAM 2017). De hoogteverschillen berekend uit opeenvolgende metingen (geodetische vrije netwerkvereffeningen per meetcampagne of epoche) worden aan SodM gerapporteerd in een zogenaamde 'differentiestaat'. In de differentiestaat staan de peilmerkbewegingen vanaf het eerste jaar van aanmeting ten opzichte van het ondergrondse merk bij NES (000A2592). Figuur 1.5 toont de beweging van deze peilmerken tussen 1986 en 2017. Figuur 1.6 en figuur 1.7 tonen de ontwikkeling in de tijd (1986-2017) van de peilmerkdaling langs twee profielen over het eiland. De zogenaamde 'primaire' peilmerken zijn zowel in 1986 als in 2017 aangemeten.



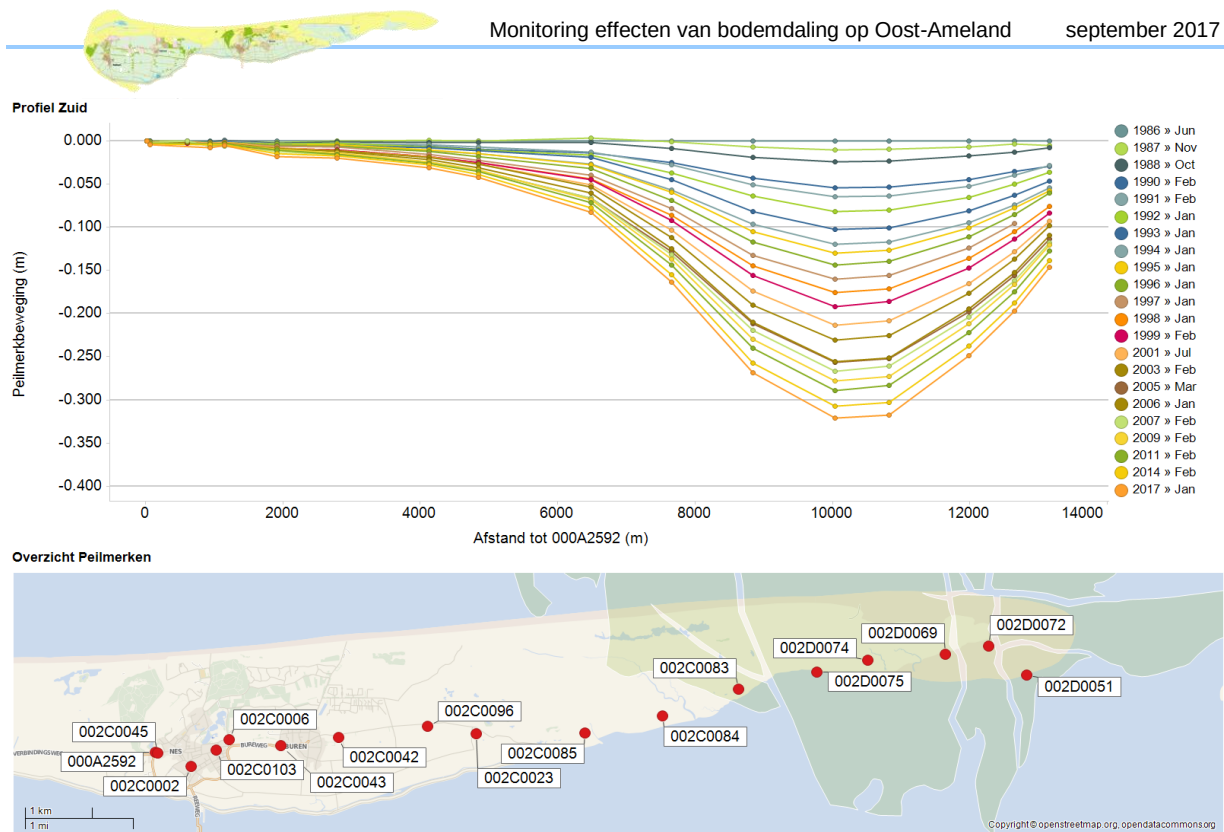
Figuur 1.5 Beweging primaire peilmerken 1986-2017 (mm).



Overzicht Peilmerken



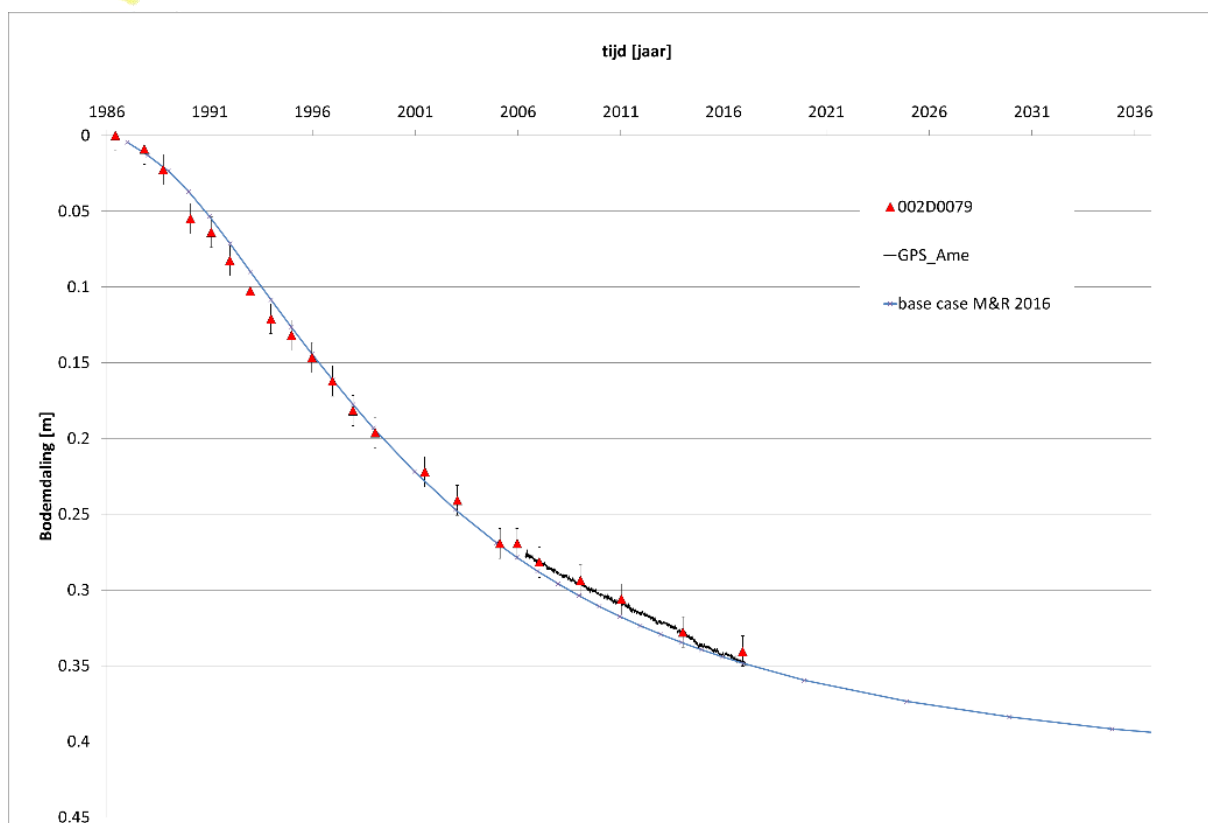
Figuur 1.6 Peilmerkbeweging langs Noord profiel 1986-2017.



Figuur 1.7 Peilmerkbeweging langs Zuid profiel 1986-2017.

1.3.2 GPS

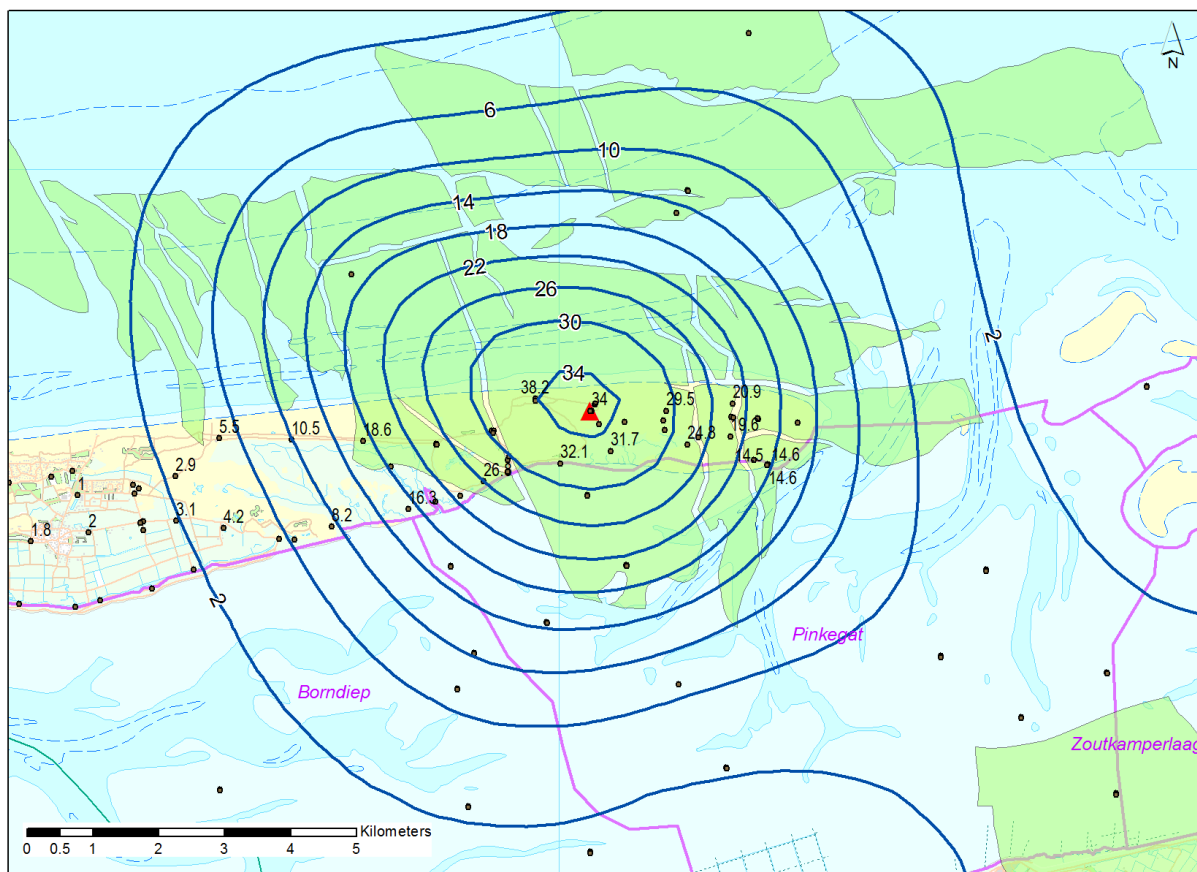
Op de productielocatie Ameland is sinds 2006 een continu GPS station ingericht dat de hoogteligging ter plaatse registreert. Ook worden waterpassingen uitgevoerd op een peilmerk ter plaatse (002D0079). Figuur 1.8 toont de GPS tijdserie, de peilmerkbeweging op basis van de waterpassingen voor het peilmerk 002D0079 en de prognose voor het diepste punt van de bodemdalingskom in één figuur (NAM, 2016). Deze grafiek is voornamelijk bedoeld om de goede passing van de gemodelleerde bodemdaling met de gemeten daling in tijd te tonen.



Figuur 1.8 Bodemdaling op de productielocatie Ameland eiland volgens het verwachte model (blauwe lijn) vergeleken met de continue GPS metingen (zwarte lijn) en waterpassing op punt 002D0079 (rode driehoeken).

Evenals op de locatie Ameland-Oost worden ook GPS metingen uitgevoerd in de Noordzeekustzone op de platforms AME-2 en AWG-1. Eerder werden deze metingen uitgevoerd met een interval van 3 jaar, maar sinds 2014 is op elk van deze productieplatforms een permanent GPS station geïnstalleerd. Analyse na meer dan een jaar meten wijst uit, dat de metingen sterk afhankelijk zijn van temperatuurschommelingen, waardoor eerst correcties uitgevoerd moeten worden, alvorens deze te gebruiken in de kalibratie van de geomechanische modellen.

In het kader van de Meet en Regelcyclus rond de winningen uit de waddenvelden (paragraaf 1.1.3) worden met een interval van 3 jaar GPS metingen uitgevoerd in de Waddenzee, zie figuur 1.9.



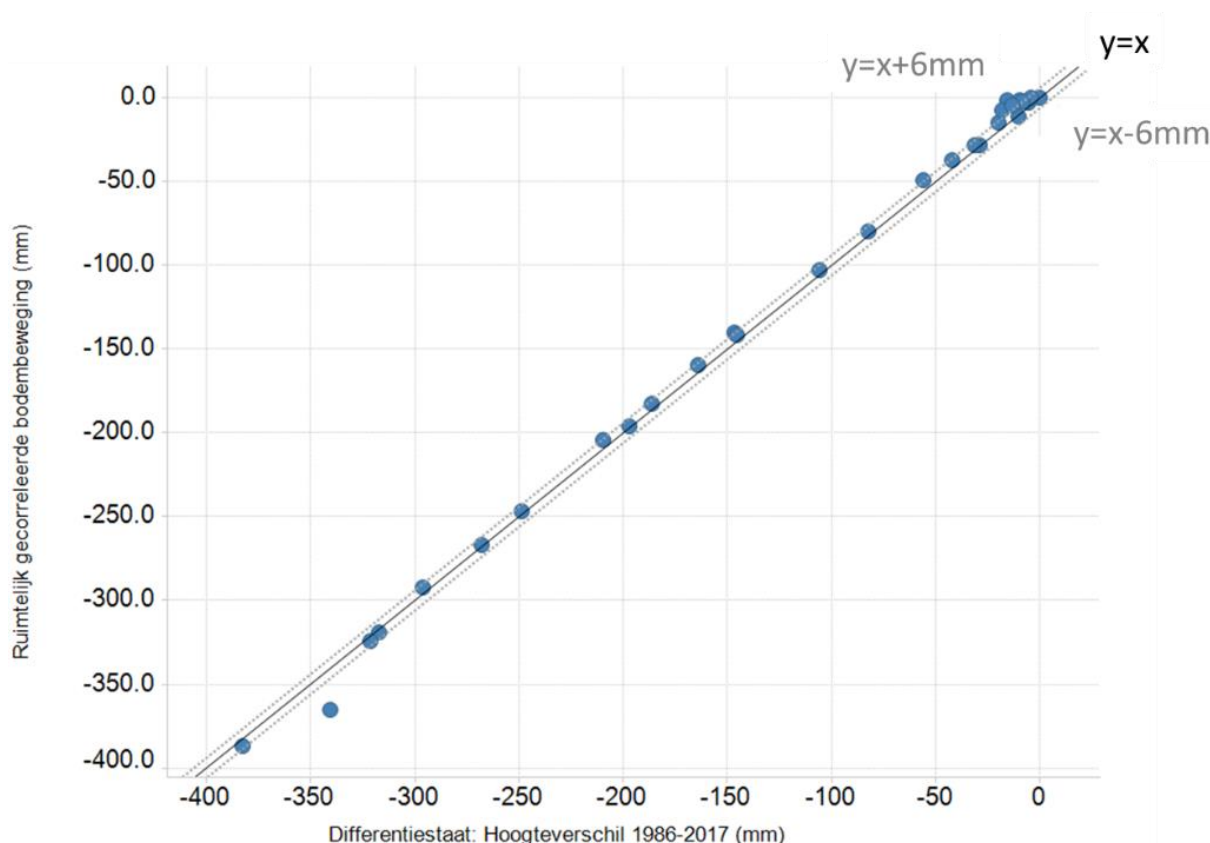
Figuur 1.9 Totale bodemdaling (status contour 1-1-2017) door gaswinning sinds de start van de Ameland en Anjum en Waddenvelden productie. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling. De rode driehoek geeft de positie aan van de continue GPS metingen aan die uitgevoerd zijn sinds 2007.

1.3.3 Rapportage van meetgegevens

De gegevens van alle metingen worden op verschillende wijze gerapporteerd. De GPS metingen worden gerapporteerd in het kader van de Meet en regel cyclus rond de waddenwinningen. De waterpassingen worden gerapporteerd in het meetregister, waarvan de differentiëtoestand (hoogteverschillen tussen epochen) een onderdeel is. Identificatiefouten en autonome beweging van peilmerken kunnen in een dergelijke 'per epoche' analyse niet worden gedetecteerd.

Ten behoeve van de monitoring is additioneel een integrale ruimte-tijd analyse uitgevoerd zodat op locaties binnen het monitoringsgebied de bodemdaling op een bepaald tijdstip kan worden bepaald. Hierbij wordt uit alle gemeten hoogteverschillen de ruimtelijk gecorreleerde bodembeweging geschat door toepassing van geodetische vereffenings- en toetsingstechnieken. De resultaten van deze ruimte-tijd analyse worden niet formeel gerapporteerd, maar als een excel rekenbestand beschikbaar gesteld aan de onderzoekers betrokken bij het monitoringprogramma zoals opgesteld door de BegeleidingsCommissie Monitoring Bodemdaling Ameland (BCMBA). Zij kunnen hiermee op iedere gewenste locatie op en rondom het eiland de ruimtelijk gecorreleerde bodembeweging bepalen. Hierbij moet rekening worden gehouden met het feit dat de ruimtelijk gecorreleerde bodembeweging niet identiek kan worden verondersteld aan de bodemdaling als gevolg van gaswinning (in verband met een mogelijke kleine autonome of ondiepe component). De bodemdaling als gevolg van gaswinning alleen wordt gegeven door de prognoses, die op basis van ondergrondse modellen zijn gemaakt, welke op hun beurt zijn gekalibreerd met metingen.

Op de berekende ruimtelijk gecorreleerde bodembeweging met behulp van het excel rekenbestand dient een foutenmarge van +/- 2 centimeter te worden toegepast. Deze foutenmarge geeft de onzekerheid weer in de modellering van de ruimtelijk gecorreleerde bodembeweging, het verschil met de gemeten peilmerkbewegingen en de interpolatiefouten. Figuur 1.10 toont de verschillen tussen de ruimtelijk gecorreleerde bodembeweging en de peilmerkbewegingen in 2017. De verschillen hebben een standaardafwijking van 6 mm (1-sigma), met een maximaal verschil van 2,5 cm.



Figuur 1.10 Peilmerkbeweging differentiestaten (1986-2017, in mm) versus geschatte ruimtelijk gecorreleerde bodembeweging. De verschillen hebben een standaardafwijking van 6 mm, de maximale afwijking is 2,5 cm.

1.4 Bodemdalingsprognoses

In het kader van de Meet en Regelcyclus zijn de bodemdalingsprognoses boven Ameland opnieuw gekalibreerd.

In de jaren na 2003 werd een doorgaande bodemdaling geconstateerd boven het Ameland gasveld, terwijl de verdere drukdaling beperkt was, iets dat in latere modellen werd meegenomen. Echter, de fysische achtergrond van dit proces was niet duidelijk en daarom heeft de NAM in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en SodM de studie "Long Term Subsidence" (Fase I) uitgevoerd, die als doel had de mechanismen achter dit niet-lineaire gedrag van bodemdaling nader te onderzoeken. Deze studie liep van 2013 t/m 2015.

Na kennis te hebben genomen van de resultaten van dit onderzoek heeft SodM de NAM opgedragen de onderzoekresultaten van deze LTS Fase I studie toe te passen op de modellering van de Amelandproductie (LTS Fase II).

Met LTS-II dient de onzekerheidsruimte van de modellen op een objectieve manier in kaart te worden gebracht, waarbij de voorspellingen van de bodemdaling die voortkomen uit deze studie worden vergeleken met voorspellingen die gedaan zijn in voorgaande studies. De studie is inmiddels afgerond en een publieksvriendelijke samenvatting van de resultaten is te vinden in bijlage 4 van de Meet- en Regelcyclus rapportage 2016 (zie referenties). Op basis van een negatief oordeel van SodM over de LTS-II zal NAM een aantal verbeteringen implementeren om een betere passing van de bodemdalingskom met de data te bereiken. Het resultaat van deze studie moet worden opgeleverd voor 1 november 2017.



1.4.1 Kalibratie methodieken

De aanpassingen in de ondergrondse modellering die ten grondslag liggen aan de herziene bodemdalingprognoses sinds 2011 zijn de volgende:

1. actualisering van het geologische en het dynamische reservoir model,
2. het inbrengen van een op diffusie gebaseerd compactie mechanisme voor het reservoir,
3. het inbrengen van een kruipmechanisme in de steenzout laag boven het reservoir.

Het diffusie mechanisme veroorzaakt een zekere mate van vertraging tussen de productie van gas en de bodemdaling die daar het gevolg van is. Het inbrengen van dit mechanisme in de modellering leidt tot een betere overeenstemming tussen prognose en metingen en biedt ook een verklaring voor de langer doorgaande bodemdaling in de eindfase van de productie, zoals nu wordt waargenomen boven Ameland-Oost.

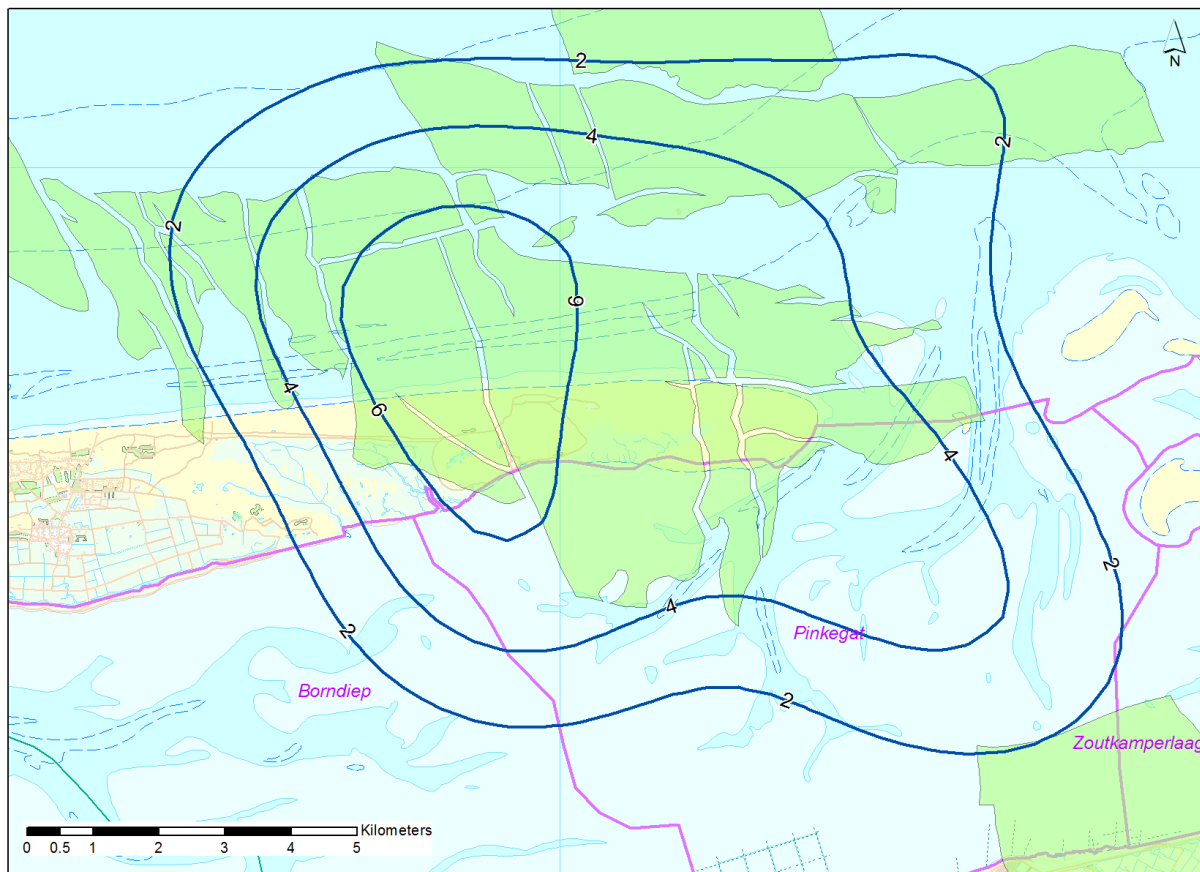
Vervolgens is bepaald welk scenario voor de ondergrondse modellering het best bij de gemeten data past. Hierbij wordt de totale fout tussen metingen en model geminimaliseerd. De gemeten data omvatten alle waterpascampagnes op Ameland sinds 1986, de continue GPS data op de locatie Ameland (sinds 2006) en de GPS campagnes op de wadpunten.

De GPS metingen in de Waddenzee tussen Nes en Ameland tonen sinds 2014 een significante bodemdaling. De metingen voor 2011 toonden aan dat de mobiliteit van de aquifer en daarmee gepaarde drukdaling waarschijnlijk gering is/was. De huidige metingen (na 2014) laten bodemdaling ten zuiden van het gasveld zien, waarvoor de meest waarschijnlijke verklaring drukdaling in de aquifer onder deze meetpunten is.

De laatste waterpasmetingen op het eiland dateren van februari 2017 (figuur 1.5) en laten zien dat de gemeten bodemdaling op de Ameland productielocatie lager is dan de gemeten daling volgens de GPS. Deze GPS meting ligt echter binnen de onzekerheidsbandbreedte van de waterpasmetingen. Het model, dat de afgelopen 3 jaar niet gewijzigd is, laat in de nabijheid van het diepste punt van de bodemdalingskom een goede passing zien met de metingen (zie figuur 1.8). Het meetpunt op de NAM-locatie Ameland-Oost 1 daalt wat sneller en wijkt daarmee af van nabij gelegen meetpunten. Zie hiervoor ook figuur 1.14.

1.4.2 Prognoses Meet en Regelcyclus 2016

De herziene modellen geven een verbeterde overeenkomst tussen de gemodelleerde en de gemeten bodemdaling in tijd en plaats, zowel in het centrum van de bodemdalingskom als in de Waddenzee (GPS campagne metingen vanaf 2006). De verschillen tussen de peilmerkbewegingen en de prognose voor de periode 1986-2017 hebben een standaard afwijking van ongeveer 1cm. De nog te verwachten bodemdaling op basis van het actuele geomechanische model, de reservoir parameters en het productiescenario, wordt weergegeven in figuur 1.11.



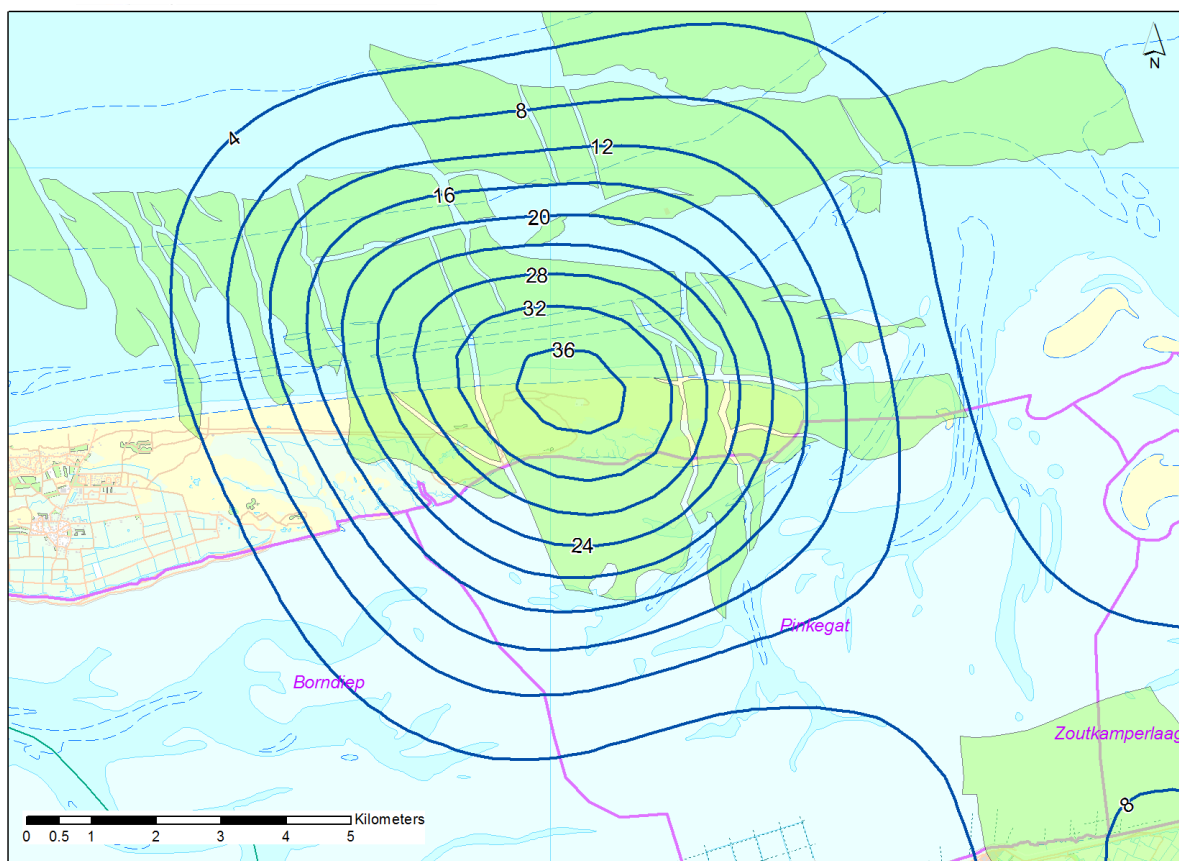
Figuur 1.11 Nog te verwachten bodemdaling in cm (2017-2050) ten gevolge van gaswinning uit de Ameland voorkomens.

Deze prognose is gebaseerd op de in de voorgaande paragrafen beschreven modellering van de ondergrond. De gemiddelde waarden van een vereenvoudigde representatie worden gegeven in de volgende tabel.

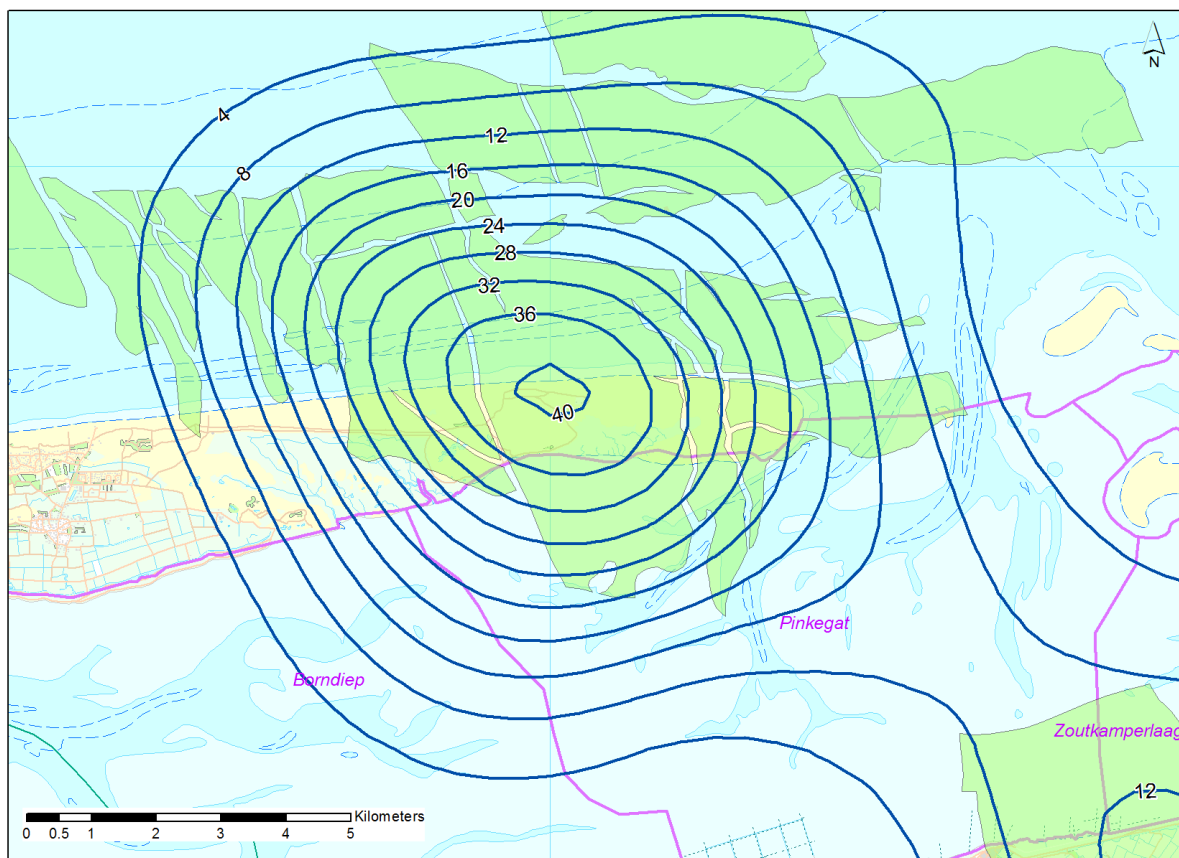
Tabel 1.1 Modelparameters Ameland voorkomens. Model parameters Ameland fields.

	Ameland-Oost	Ameland-Westgat	Ameland-N07-FA
Diepte veld [m]	3300	3250	3350
Dikte reservoir (depleterend) [m]	110	80	50
Initiële Druk [bar]	570	570	570
Druk in 2011 [bar]	100	300	570
Eind druk [bar]	30	30	270
R _{max} [km]	5	3,5	2
R _{min} [km]	3	1	1
C _m [10 ⁻⁵ bar ⁻¹]	1	0,8	0,8

De prognoses voor 2025 en de eindprognose voor 2050 worden weergegeven in figuur 1.12 Figuur 1.12 en figuur 1.13.



Figuur 1.12 Bodemdalingsprognose voor 2025 (in cm) van de totale bodemdaling door gaswinning uit de Ameland en naburige voorkomens.



Figuur 1.13 Bodemdalingsprognose voor 2050 (in cm) van de totale bodemdaling door gaswinning voor Ameland en naburige voorkomens na beëindiging van de gaswinning van de Ameland gasvelden in 2050.

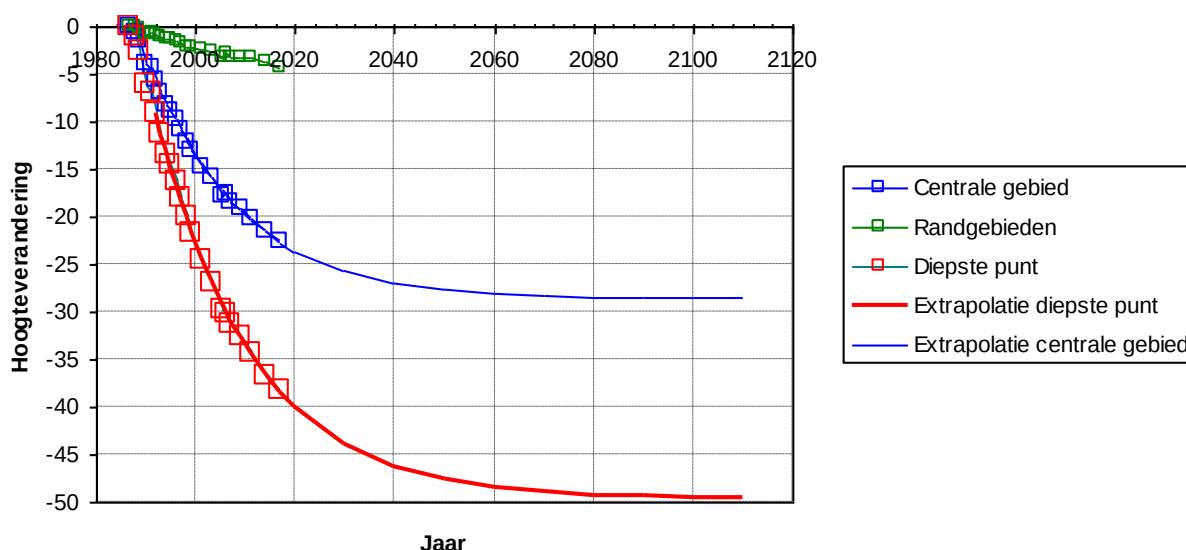


In de loop der tijd zijn de prognoses bijgesteld naar aanleiding van de verbeterde modellering van de ondergrond en de nieuwe metingen, wat tot verschillen in de prognoseresultaten heeft geleid. Naast de maximale diepte en oppervlakte van de bodemdalingsschotel, is ook het volume van de bodemdalingsskom van belang om voor de kust en wadplaten te kunnen bepalen hoeveel zand en slib nodig is om de bodemdaling weer ongedaan te maken.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de gemodelleerde daling in het diepste punt en het bodemdalingvolume volgens de verschillende prognoses die in de loop van de winning zijn gemaakt. Ook de zandhonger van de Waddenzee als gevolg van de volumevergroting van kombergingen door gaswinning wordt vermeld; deze is gedefinieerd als het volume van de bodemdalingsskom gelegen in de kombergingen van de Waddenzee.

Tabel 1.2 Verwachte bodemdaling nabij het diepste punt van de kom, het volume van de kom en het zandhonger volume zoals bepaald is voor de verschillende versies van de prognoses.

Prognose	Diepte in cm	Volume (10^6 m^3)	Bijdrage zandhonger Waddenzee (10^6 m^3)	Bijdrage zandhonger Ameland (10^6 m^3)	Bijdrage zandhonger Noordzeekustzone (10^6 m^3)
1985	21-31 (26)	28	22,5		
1991	14-22 (18)	18	14,5		
1998	28-32 (28)	14-18	10		
2003	31-37 (34)	22	9		
2011	37-42 (39)	20	5	3	12
2016	39-42 (41)	23	8	4	11

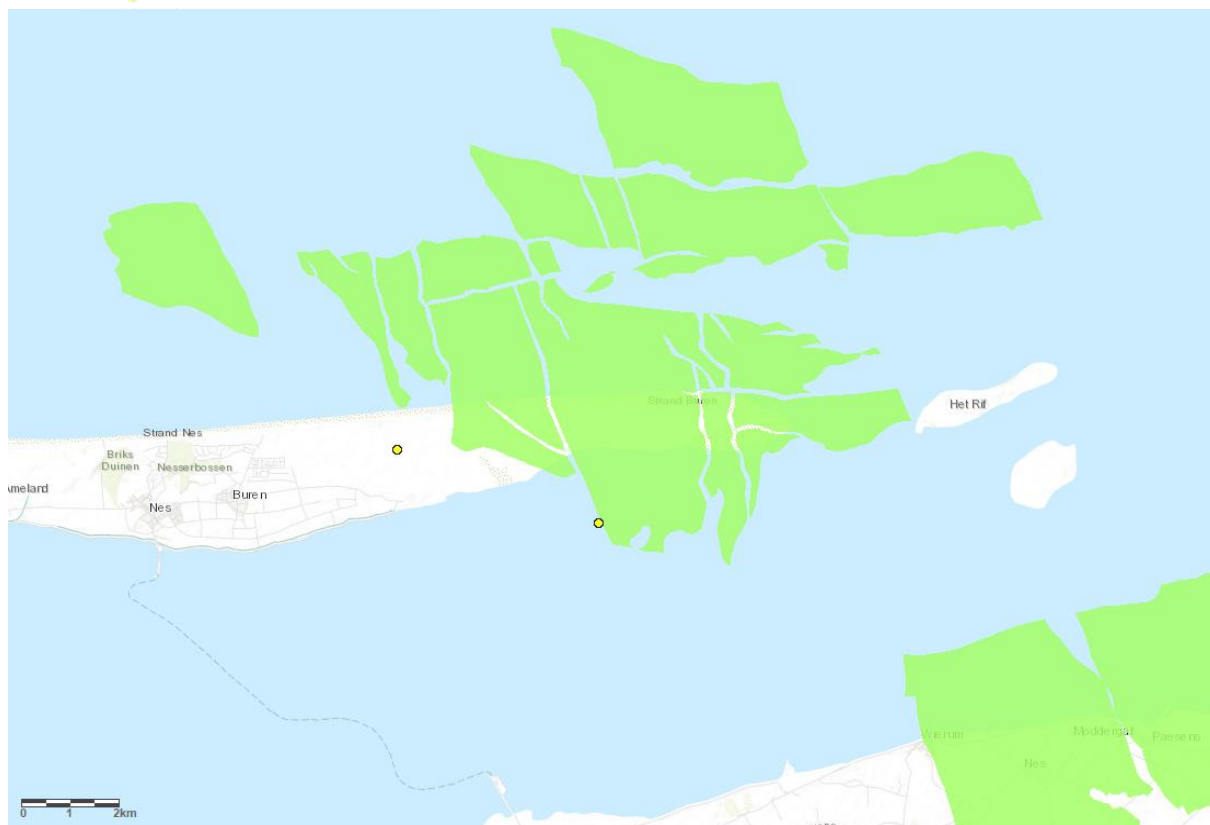


Figuur 1.14 Bodemdalingsprognose geëxtrapoleerd uit de gemeten daling.

1.5 Bodemtrillingen

Drukdaling in de gasvoerende lagen kan onderlinge beweging tussen gesteentelagen veroorzaken. Dit kan zich soms aan de oppervlakte manifesteren in de vorm van bodemtrillingen. De monitoring van deze bodemtrillingen wordt uitgevoerd door KNMI met behulp van een daartoe aangelegd netwerk van seismische registratieapparatuur.

Sinds het begin van de gasproductie uit de Ameland velden zijn er 2 lichte aardbevingen door het KNMI boven Ameland-Oost geregistreerd. Beide bevingen geregistreerd in respectievelijk 2005 en 2013 hadden een magnitude van 1,8 op de schaal van Richter (zie figuur 1.15). Doorgaans worden bevingen met deze magnitude niet gevoeld. Er zijn dan ook geen meldingen bekend van deze bevingen.



Figuur 1.15 Epicentra voor de geregistreerde bevingen (gele punten) die gekoppeld worden aan de productie uit het Ameland-Oost voorkomen.

Boven Ameland-Westgat en Ameland-N07-FA zijn geen aardbevingen opgetreden.

1.6 Literatuur

Meetregister bij het meetplan Waddenzee 2017; Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Ameland 2017, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., EP201703201664, april 2017.

NAM (2016) Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen; Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2016, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., EP201702245479, mei 2017.

Bodemdaling door Aardgaswinning; NAM-gasvelden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., EP201511213444, december 2015.