

Bodemdeling Ameland Rapportage 2023

NAM B.V

EP Document Number:	EP202307200397	Owner:	NAM-UPC/T
Document Date:	1/4/2024	Security:	Unrestricted

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.

Samenvatting

Dit hoofdstuk bevat een beschrijving van de Ameland velden (geologie, productie), de metingen die zijn uitgevoerd om de bodemdaling te monitoren en de bodemdalingsprognoses op basis van geomechanische modellen. De geodetische metingen voor het monitoren van bodemdaling boven de Ameland velden worden uitgevoerd met de technieken waterpassen en GNSS (Global Navigation Satellite System, GPS).

In 2017 is het bodemdalingsmodel aangepast naar aanleiding van uitkomsten uit de Long Term Subsidence Study- phase 2 (LTS-II). Ook is in deze studie een nieuwe stochastische techniek gebruikt, waarbij de waarschijnlijkheid van bodemdalingsscenario's bepaald worden door de passing met de gemeten data. De modellen, waaronder de modellen van de Ameland velden, worden in het kader van de Meet- en Regelcyclus jaarlijks gekalibreerd aan de gemeten bodemdaling. De verwachte bodemdaling in het diepste punt van de bodemdalingsskom zal, na beëindiging van de gaswinning, rond de 50 cm liggen.

This chapter contains a description of the Ameland fields (geology, production), the measurements conducted to monitor subsidence, and the subsidence forecasts. Geodetic measurements for monitoring subsidence above the Ameland fields are performed using leveling and GNSS (Global Navigation Satellite System, GPS) techniques. In 2017, the subsidence model was improved following the results from the Long Term Subsidence Study-phase 2 (LTS-II). This study also employed a new stochastic technique, which determines the probability of subsidence scenarios based on the fit with the measured data. The models, including those of the Ameland fields, are annually calibrated to the measured subsidence as part of the Measurement and Control Cycle. The expected subsidence at the deepest point of the subsidence bowl, after the cessation of gas production, will be approximately 50 cm.

Inhoudsopgave

1	Bodemdaling	5
1.1	Beschrijving van de winning	5
1.1.1	Gasvelden en locaties	5
1.1.2	Geologie	5
1.1.3	Productie	6
1.2	Geodetische metingen	8
1.2.1	Waterpassen	8
1.2.2	GNSS	10
1.2.3	Rapportage van meetgegevens	11
1.3	Bodemdalingsmodellen	11
1.3.1	Kalibratie van de ondergrondmodellen aan de gegevens	12
1.3.2	Prognoses (Meet en Regelcyclus 2022)	12
1.4	Aardbevingen	16
1.5	Referenties:	17

1 Bodemdaling

Door de winning van koolwaterstoffen uit de gasvoerende gesteentelagen zal de druk in de poriën van het gesteente verminderen waardoor, als gevolg van de druk door het bovenliggende gesteentepakket, compactie van de gasvoerende lagen optreedt. Dit manifesteert zich aan de oppervlakte in de vorm van bodemdaling.

1.1 Beschrijving van de winning

1.1.1 Gasvelden en locaties

De ondergrondse gasvelden (voorkomens) Ameland-Oost, Ameland-Westgat en Ameland-N07FA worden geproduceerd via het moederplatform Ameland-Westgat (AWG) en de satellieten AME-1 (de productielocatie op het eiland Ameland), AME-2 en N07-FA-1 (Figuur 1-1). Sinds 1986 wordt er gas gewonnen uit dit gebied. Het huidige Winningsplan loopt tot en met 2035.



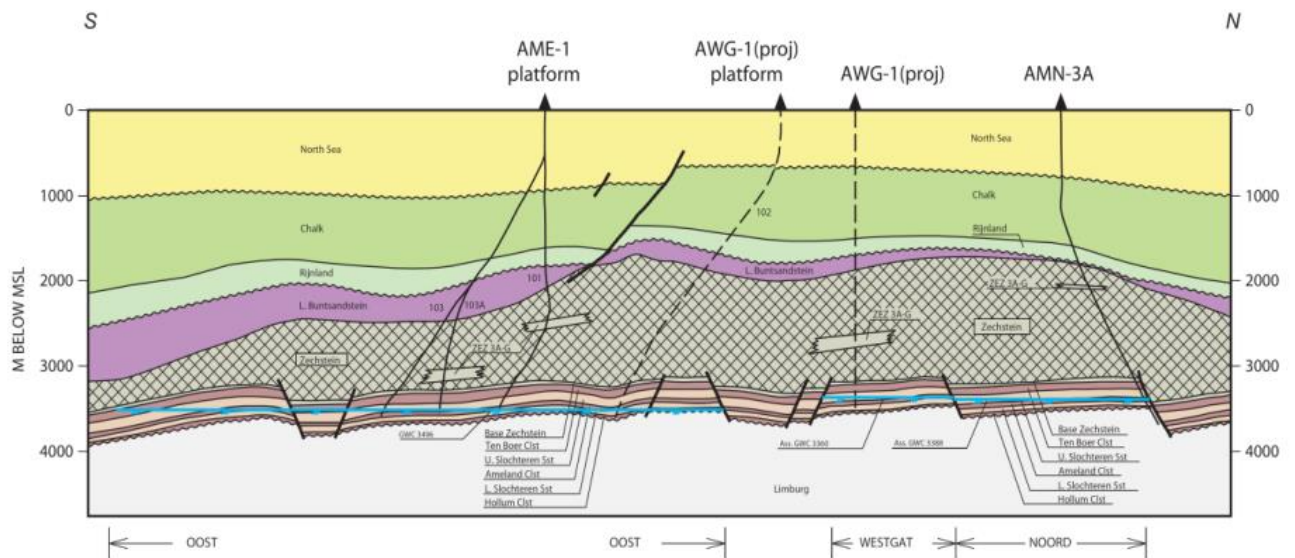
Figuur 1-1: Overzicht ligging Ameland gasvelden en putten.

Overview location Ameland gas fields and Wells.

1.1.2 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 (tijdperk Perm). De voorkomens worden van boven afgesloten door een zoutlaag (Zechstein Groep, ook afgezet in het Perm). 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.



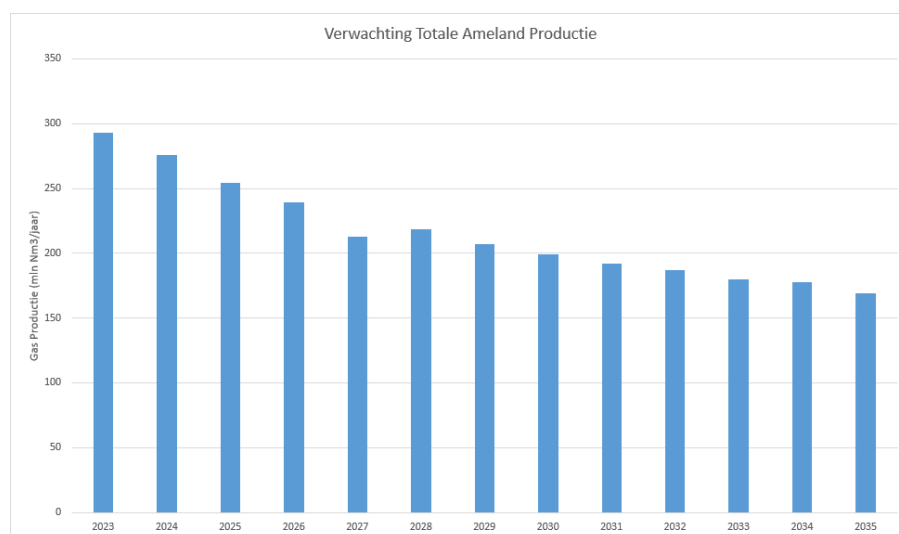
Figuur 1-2: Geologische doorsnede Ameland-Oost.

Geological cross section of Ameland-Oost.

1.1.3 Productie

Figuur 1-3 toont het verwachte productievolume voor Ameland vanaf 2023 (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 reservoirparameters 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.



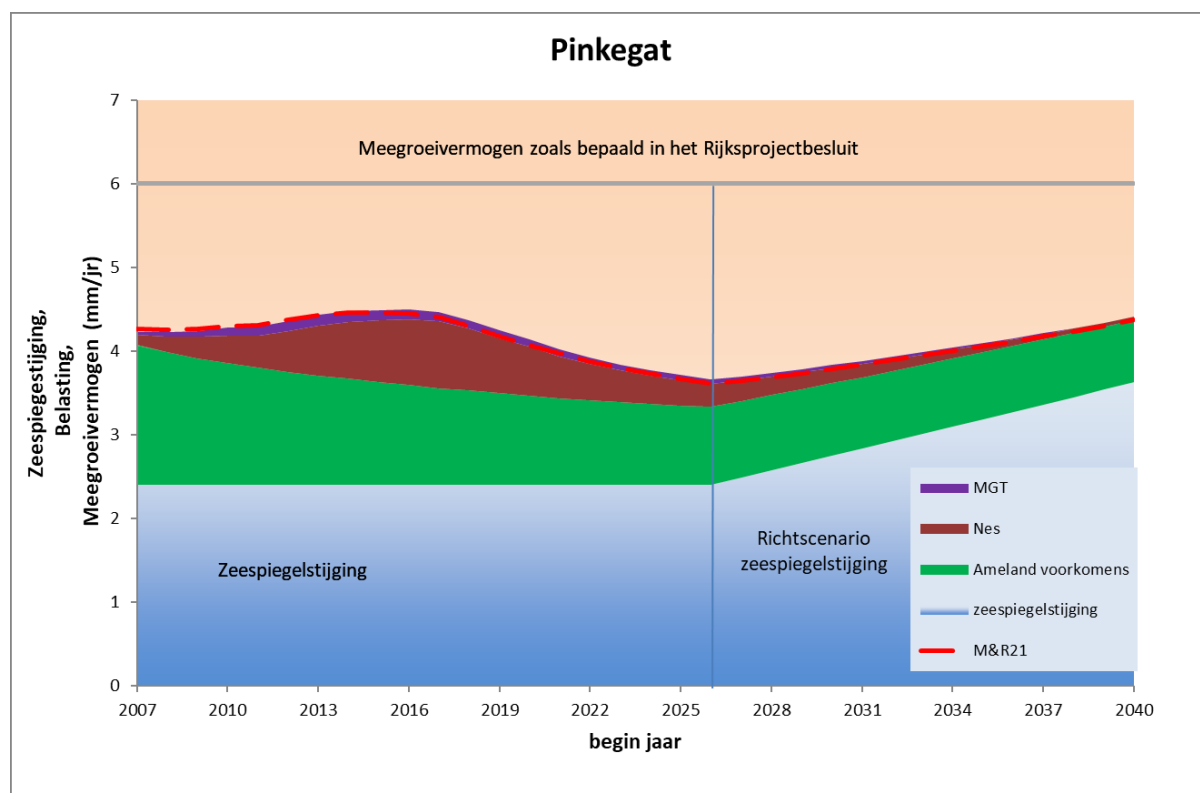
Figuur 1-3: Verwachte productievolume Ameland 2023 tot en met 2035 in mln m³/jaar.

Expected production volume Ameland 2023 up to and until 2035 in mln m³/year.

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 (HAK) 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 het meegroeivermogen dat vastgesteld is in het rijksprojectbesluit "Gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen". Het meegroeivermogen is conservatief vastgesteld op 6 mm/jr voor het kombergingsgebied Pinkegat. Daar de gaswinning uit het gasveld Ameland-Oost ook bodemdaling veroorzaakt in het kombergingsgebied Pinkegat wordt ook de bodemdaling door de Ameland velden meegenomen in de jaarlijkse Meet- en regelcyclus (NAM 2023a).

Uit Figuur 1-4 (de meest recente uitwerking en weergave van de bodemdaling en zeespiegelstijging binnen de natuurgrenzen conform het 'hand aan de kraan' principe) blijkt dat het meegroeivermogen van het Pinkegat tijdens de geplande productieperiode niet wordt overschreden.



Figuur 1-4: Verwachte bodemdalingsnelheid in het Pinkegat (6-jaarlijks voortschrijdend gemiddelde) door winning uit de Ameland en waddenvelden tezamen met de verwachte snelheid van zeespiegelstijging; actualisatie 2022 (NAM 2023a).

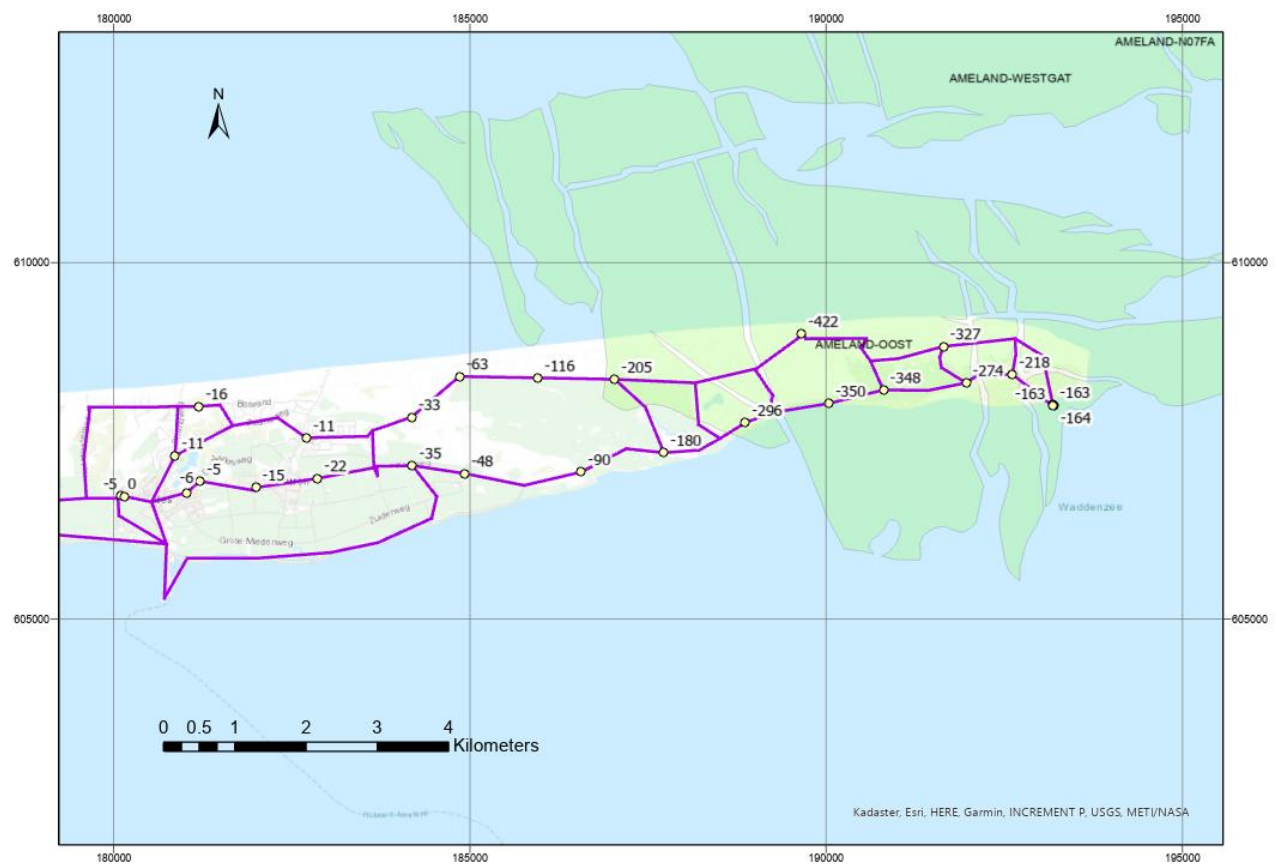
Subsidence velocity in Pinkegat (moving average with 6-year window) by gas extraction from the Ameland and Wadden Sea fields (Nes, Moddergat). The expected sea level rise (actualisation 2022) is accounted for (NAM 2023a).

1.2 Geodetische metingen

De monitoring van de bodemdaling boven de Ameland velden vindt plaats door middel van hoogteverschilmetingen met de meettechnieken waterpassen en GNSS (Global Navigation Satellite System, GPS).

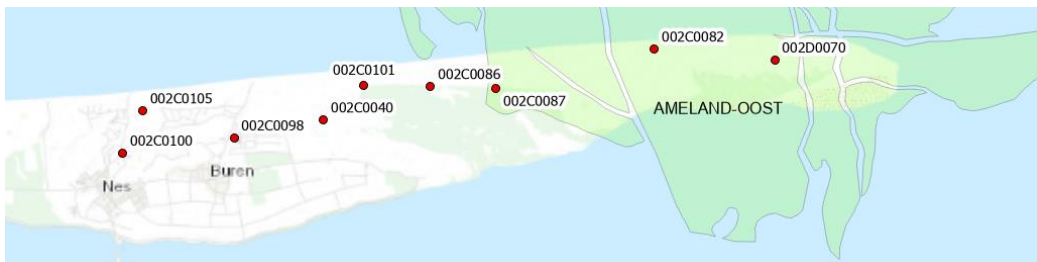
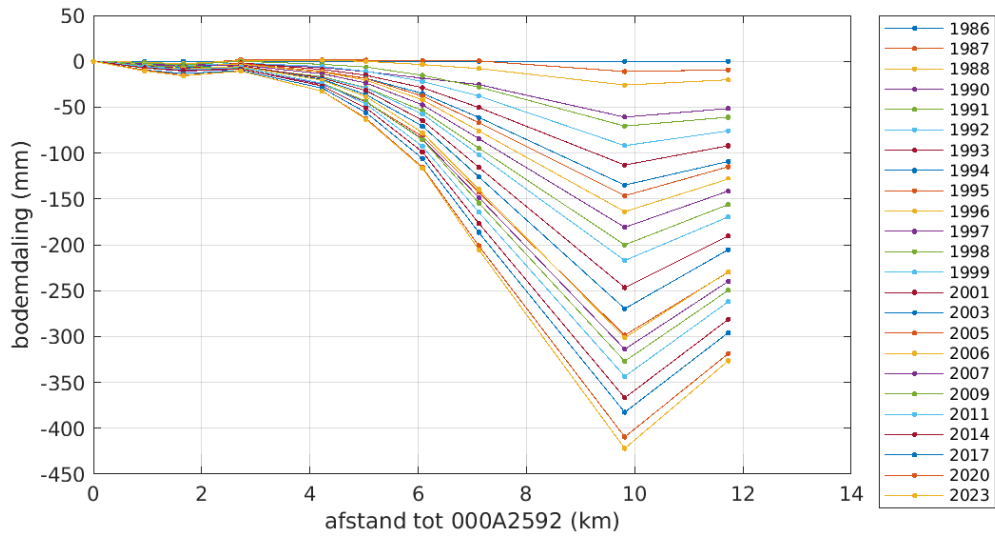
1.2.1 Waterpassen

Vanaf het begin van de productie op Ameland zijn er waterpascampagnes uitgevoerd met een interval van 1 tot 3 jaar (nulmeting in 1986). De laatste meting is uitgevoerd in 2023 en bestrijkt het gehele eiland (NAM 2023b). De hoogteverschillen, berekend uit opeenvolgende metingen (geodetische vrije netwerkvereffeningen per meetcampagne of epoche) worden aan Staatstoezicht op de Mijnen (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 1-7). Figuur 1-5 toont de beweging van de primaire peilmerken tussen 1986 en 2023 (de primaire peilmerken zijn in beide campagnes aangemeten). Figuur 1-6 en Figuur 1-7 tonen de ontwikkeling in de tijd (1986-2023) van de peilmerkdaling langs twee profielen over het eiland.



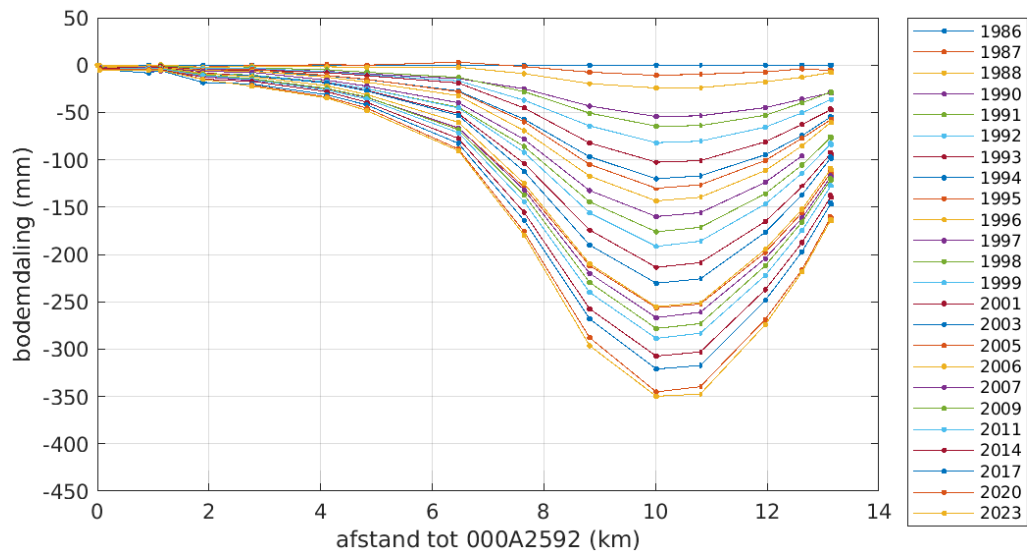
Figuur 1-5: Overzicht van de primaire peilmerken 1986-2023 (mm).

Overview of primary benchmarks 1986-2023 (mm).



Figuur 1-6: Peilmerkbeweging langs Noord profiel 1986-2023.

Movement benchmarks along North profile 1986-2023.



Figuur 1-7: Peilmerkbeweging langs Zuid profiel 1986-2023.

Movement benchmarks along South profile 1986-2023.

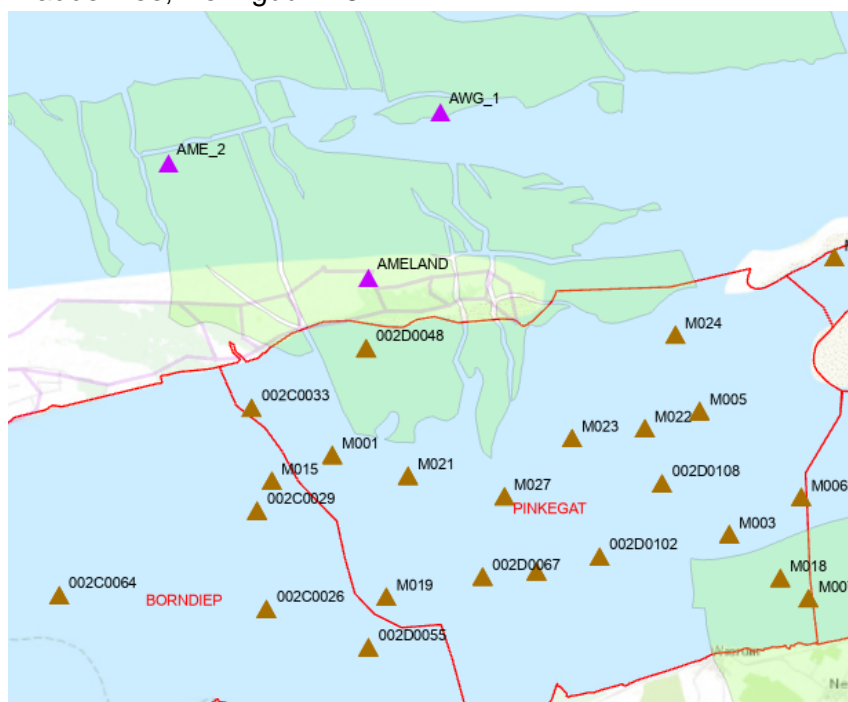
Ter verbetering van het waterpas netwerk zijn in 2019 twee diepgefundeerde peilmerken geplaatst op basis van sonderingen. Eén aan de oostzijde van de NAM-locatie op Ameland en de andere bij peilmerk 002C0082 (strandpaal, zie Figuur 1-6).

Het (voorheen) primaire peilmerk 002D0079 in het controlegebouw van de NAM-locatie, is afgebroken in 2019. Het hoogteverschil tussen 002D0079 en het nieuw geplaatste diepgefundeerde peilmerk nabij de NAM-locatie (002D0137) is gemeten voordat de bout afbrak. Tevens zijn er 2 nieuwe peilmerken geplaatst in het NAM-controlegebouw, welke vanaf 2020 in de waterpassing zijn meegenomen.

1.2.2 GNSS

Op de productielocatie Ameland is sinds 2007 een continu GNSS-station ingericht dat de hoogteligging ter plaatste registreert. Tot en met de waterpassing van 2017 is peilmerk 002D0079 aangemeten; gesitueerd in hetzelfde controlegebouw waaraan het GNSS-station is bevestigd. De tijdserie van 002D0079 kan worden voortgezet met de tijdserie van het nabijgelegen diepgefundeerde peilmerk 002D0137 vanaf de waterpassing van 2020. Evenals op de locatie Ameland-Oost worden ook GNSS-metingen uitgevoerd in de Noordzeekustzone op de platforms AME-2 en AWG-1. Sinds 2014 is op elk van deze productieplatforms een permanent GNSS-station geïnstalleerd (daarvoor werden GNSS-campagne metingen uitgevoerd met een interval van 3 jaar). Deze metingen zijn sterk afhankelijk van temperatuurschommelingen, waardoor eerst correcties uitgevoerd moeten worden, alvorens deze te gebruiken in de kalibratie van de geomechanische modellen. Deze correcties worden beschreven in Van der Marel (2020).

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 GNSS-campagne metingen uitgevoerd in de Waddenzee, zie Figuur 1-8.



Figuur 1-8: Locaties van de campagne GNSS-metingen (bruine driehoeken) en de continue GNSS-metingen (paarse driehoeken).

Locations of the campaign (brown triangles) and continuous (purple triangles) GNSS measurements.

1.2.3 Rapportage van meetgegevens

De gegevens van alle metingen worden op verschillende wijze gerapporteerd.

De campagne GNSS-metingen worden gerapporteerd als Meetregister aan SodM en in het kader van de Meet- en regel cyclus rond de Waddenwinningen.

De continue GNSS-metingen worden volgens het actuele meetplan per kwartaal gerapporteerd aan SodM (NAM 2024a, 2024b). De tijdserie van het AGRS (Actief GNSS Referentie Systeem) station Ameland-Nes wordt ook aan deze rapportage toegevoegd. De snelheid van het GNSS station op locatie Ameland-Oost 1 was in 2023 -6,6 mm/jaar, met een standaardafwijking van 0,6 mm/jaar.

De waterpassingen worden gerapporteerd als Meetregister, waarvan de differentiestaat (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 toetsings-technieken. 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. 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 ruimtelijke 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.

1.3 Bodemdalingsmodellen

In de jaren na 2003 werd boven Ameland geconstateerd dat de bodemdaling met ongeveer dezelfde snelheid doorgaat terwijl de snelheid van de drukkaling sterk afnam. De bodemdalingsmodellen van het vigerende winningsplan uit 2011 konden dit effect beschrijven, echter de fysische achtergrond van dit proces was niet duidelijk. Daarom heeft de NAM in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en SodM de studie "Long Term Subsidence Study – Phase 1" (LTS-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. De uitkomsten van deze studie wezen uit dat het waargenomen verloop van de bodemdaling verklaard kan worden door meerdere oorzaken, zoals het mechanisch gedrag van de zoutlaag boven het reservoir, het compactiegedrag (inklinking van het reservoir door drukkaling) van het reservoir en de mogelijke drukkaling in de aangrenzende watervoerende lagen.

Na kennis te hebben genomen van de resultaten van dit onderzoek heeft SodM de NAM opgedragen de onderzoekresultaten van deze LTS-I studie toe te passen op de bodemdalingsmodellering van de Ameland velden (LTS-II). Deze studie heeft uitgewezen dat de Ameland bodemdaling het best kan worden beschreven door een model dat gebruik maakt van een niet-lineair compactiemodel en waarbij de zoutlaag boven het reservoir wordt beschreven als een viskeuze laag (NAM, 2017). Het nieuwe bodemdalingsmodel is vanaf 2017 gebruikt om de bodemdaling te modelleren van Ameland en de velden onder de Waddenzee (Nes, Moddergat en Lauwersoog).

Naast de drukdaling in het gasveld kan er ook drukdaling ontstaan in de aangrenzende (aan het gasveld) watervoerende lagen. De GNSS-metingen in de Waddenzee tussen Nes en Ameland tonen sinds 2014 een significante bodemdaling, waarbij de meest waarschijnlijke verklaring de drukdaling van de watervoerende laag ten zuidoosten van het Ameland-Oost veld is.

1.3.1 Kalibratie van de ondergrondmodellen aan de gegevens

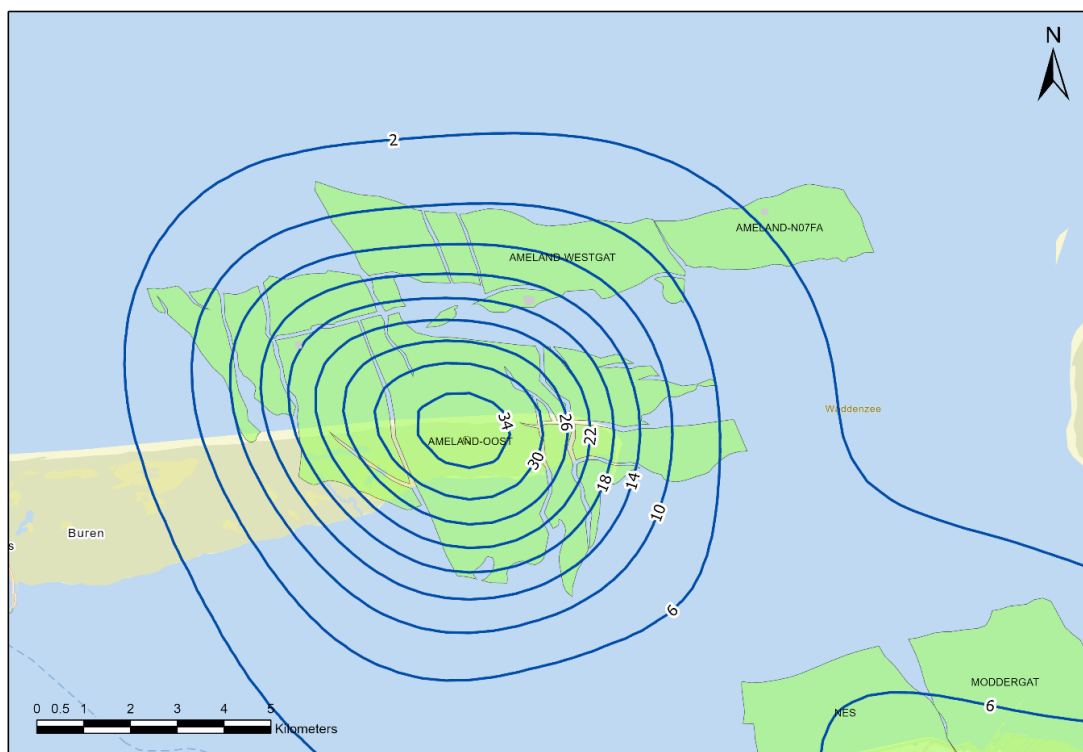
Naast het bodemdalingsmodel is er ook een model nodig om de structuur van de ondergrond te beschrijven (geologisch model) en een model om de drukken te beschrijven die veranderen in het reservoir door de productie van het gas (reservoir model). Deze modellen worden gekalibreerd aan de hand van gemeten data, zoals bv. gemeten drukken in de gasputten. De nieuwe bodemdalingsprognoses die gebruik maken van de uitkomsten uit deze modellen en het nieuwe bodemdalingsmodel, zoals beschreven in de vorige paragraaf, leiden tot een betere overeenstemming tussen prognose en metingen en bieden ook een verklaring voor de langer doorgaande bodemdaling in de eindfase van de productie, zoals wordt waargenomen boven het gasveld Ameland-Oost.

De LTS-II methodiek biedt ook de mogelijkheid om verschillende drukrealisaties van de watervoerende lagen te vergelijken met de gemeten bodemdalingsdata. De onzekerheid van de drukken in de watervoerende lagen is relatief groot omdat er geen putten in deze gebieden zijn geboord, die de druk kunnen meten. Elke drukrealisatie wordt in de procedure gecombineerd met de onzekerheid van het mechanisch gedrag van de gesteentelagen. Voor Ameland zijn hiermee honderdduizenden bodemdalingsscenario's gevormd die vergeleken zijn met de gemeten data. Na dit vergelijk ontstaat een kansverdeling van de scenario's op basis van de passing met de metingen. Deze kansverdeling voorziet in de definitie van het best passende scenario en een bepaling van het betrouwbaarheidsinterval.

1.3.2 Prognoses (Meet en Regelcyclus 2022)

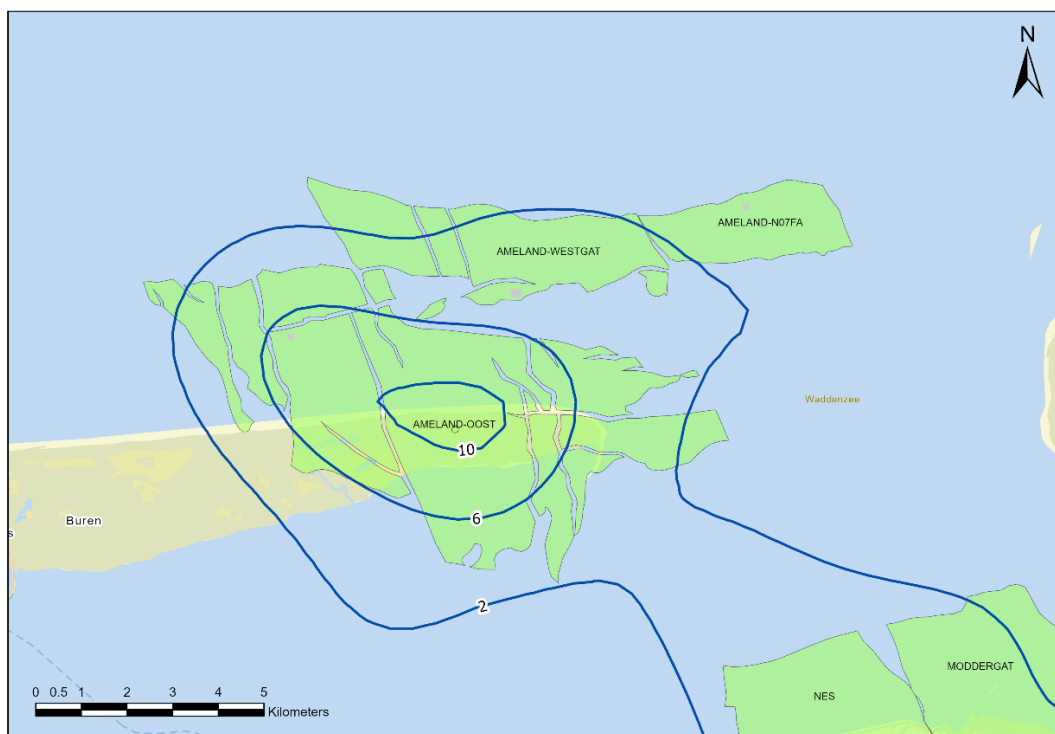
De herziene modellen geven een verbeterde overeenkomst tussen de gemodelleerde en de gemeten bodemdaling in tijd en plaats, zowel in het centrum van de bodemdalingsskom als in de Waddenzee (GNSS-campagne metingen vanaf 2006). Echter blijven er gebieden over waar het model de gemeten daling overschat en gebieden waar het model de gemeten data onderschat. De modeluitkomsten geven bijvoorbeeld een goede passing met de gemeten bodemdaling op de productielocatie, maar onderschatten de bodemdaling in het punt waar de gemeten daling maximaal is nl. 002C0082 (strandpaal, zie Figuur 1-6). Redenen hiervoor kunnen bv imperfecties van het ondergrond model en mogelijke autonome bodemdaling zijn. Beide zijn lastig te kwantificeren of te optimaliseren.

De totale bodemdaling tot 1-1-2023 wordt getoond in Figuur 1-9. De nog te verwachten bodemdaling op basis van het actuele geomechanische model, de reservoirparameters en het productiescenario, wordt weergegeven in Figuur 1-10. De prognose voor 2050, 15 jaar na afloop van de gasproductie, wordt weergegeven in Figuur 1-11.



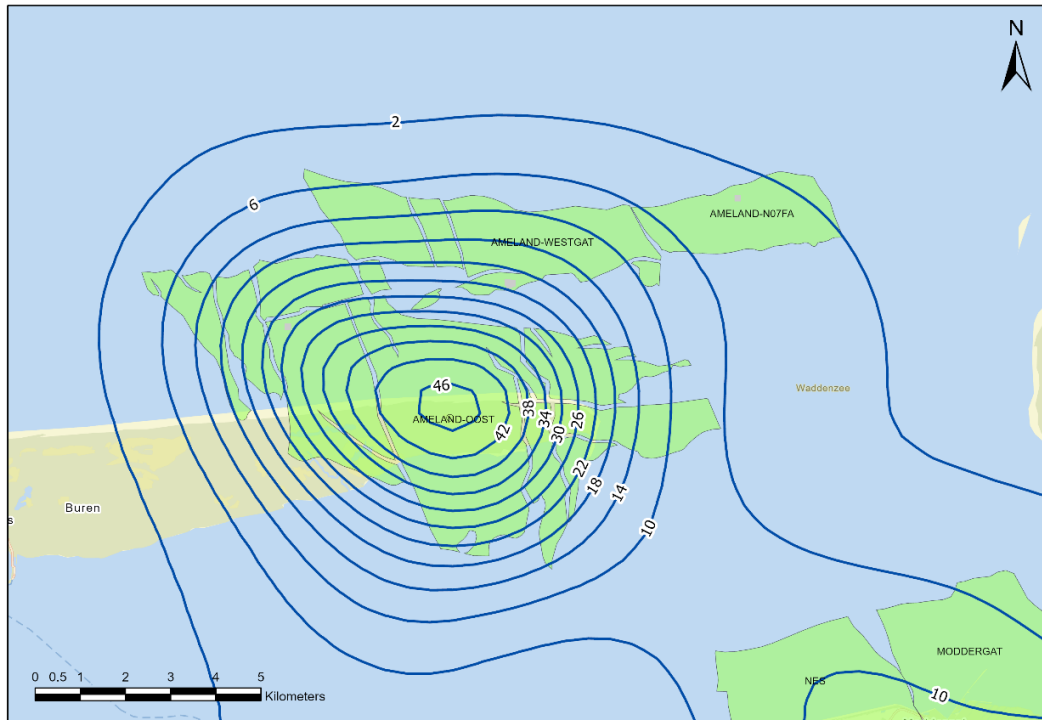
Figuur 1-9: Totale bodemdaling in cm (status modelcontour in blauw: 1-1-2023) sinds de start van de gaswinning in het gebied (1986).

Total subsidence in cm (status 1-1-2023) since start production in the region (1986).



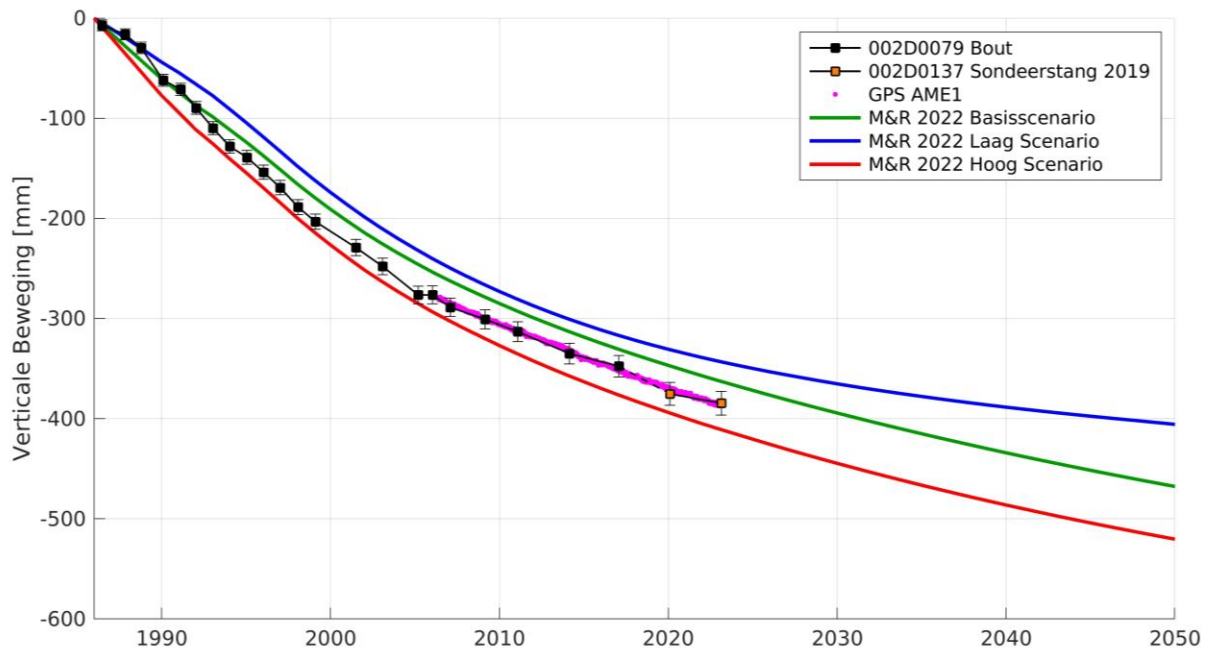
Figuur 1-10: Nog te verwachten bodemdaling (basisscenario) in cm (2023-2050) ten gevolge van gaswinning uit de Ameland voorkomens en Wadden voorkomens (Nes, Moddergat).

Expected subsidence ((base case) in the period 2017-2050 (cm) because of gas extraction from the Ameland fields and the Wadden Fields (Nes, Moddergat).



Figuur 1-11: Bodemdalingsprognose (basisscenario) voor 2050 (in cm) van de totale bodemdaling door gaswinning voor Ameland en naburige voorkomens ruim na beëindiging van de gaswinning van de Ameland gasvelden in 2050. Subsidence prognosis (base case) for 2050 (cm) for total subsidence due to gas extraction from the Ameland and neighboring fields, far after stop of production from the Ameland fields in 2050.

Figuur 1-12 toont de GNSS-tijdserie, de peilmerkbeweging op basis van de waterpassingen voor de peilmerken 002D0079 en 002D0137, en de prognoses (laag, basis hoog) van de Meet en Regelcyclus over het jaar 2022 op deze locatie van de bodemdalingskom in één figuur (NAM, 2023a). De hoogte tussen 002D0079 en 002D0137 is overgebracht door het gemeten hoogteverschil in 2019.



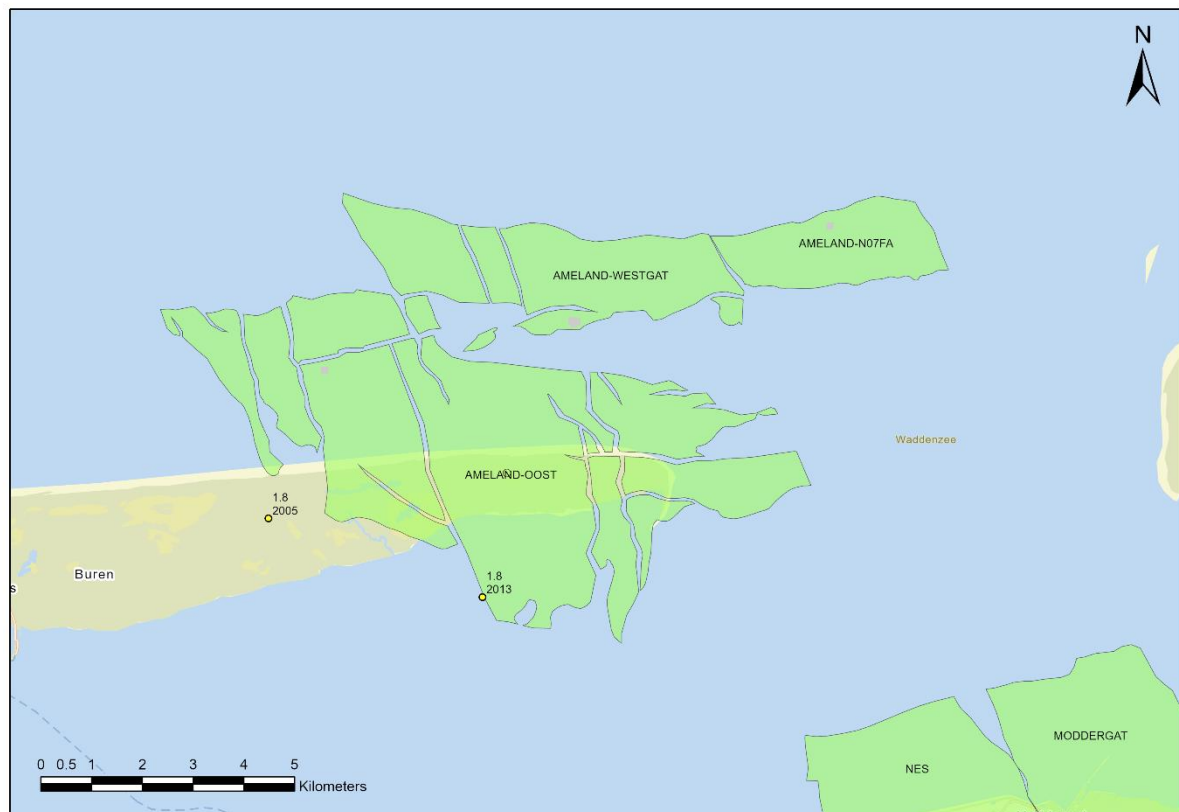
Figuur 1-12: Bodemdaling op de productielocatie Ameland eiland volgens het bodemdalingsmodel (laag, basis en hoog scenario's) vergeleken met de continue GNSS-metingen (paarse lijn) en waterpassingen op de peilmerken 002D0079 en 002D0137 (zwart).

Subsidence on production location Ameland according to the subsidence model (low, base and high scenarios) compared with continuous GNSS measurements (purple line) and levelling on the benchmarks 002D0079 and 002D0137 (black).

1.4 Aardbevingen

Als gevolg van de drukdaling in het gasveld treden in het reservoirgesteente spanningsveranderingen op. Spanningsverandering op een ondergrondse breuk kunnen leiden tot geïnduceerde bewegingen van het gesteente langs deze breuk. Wanneer deze beweging schoksgewijs plaatsvindt kan dit gevoeld worden als een aardbeving. De kans op een aardbeving in een gasveld hangt onder meer af van de hoeveelheid breuken, de drukdaling en de grootte en dikte van het reservoir. De monitoring van aardbevingen 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 1-13). Doorgaans worden bevingen met deze magnitude niet gevoeld. Er zijn dan ook geen meldingen bekend van deze bevingen. Na 2013 zijn geen bevingen meer geregistreerd boven Ameland en de Waddenvelden. In NAM 2023a is een uitgebreidere beschrijving te vinden over mogelijke aardbevingen en gevolgen in het Waddengebied.



*Figuur 1-13: Geregistreeerde bevingen die gekoppeld worden aan de productie uit het Ameland-Oost voorkomen.
Registered tremors that are correlated to the production of gas from the Ameland-East gas field*

1.5 Referenties:

NAM (2017) Long Term Subsidence vervolgstudie ([link](#))

NAM (2020) Bodemdaling door Aardgaswinning; NAM-gasvelden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., EP202011201629, december 2020

Van der Marel (2020) Comparison of GNSS Processing Methodologies for Subsidence Monitoring. NAM GNSS APM Project Report, TU Delft, 2020.

NAM (2023a) Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen; Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2022, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., EP202303212588, april 2023 ([link](#))

NAM (2023b) Meetregister bij het meetplan Waddenzee 2023; Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Ameland 2023, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., EP202305200042, juni 2023

NAM (2024a) Continue GPS hoogtemetingen NAM Waddenzee Rapportage 4^e kwartaal 2023, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., EP202401221086, januari 2024

NAM (2024b) Continue GPS hoogtemetingen NAM Noordzee Rapportage 4^e kwartaal 2023, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., EP202401221087, januari 2024