



Minister van Economische Zaken en Klimaat
Directie Wetgeving en Juridische zaken
Postbus 20401
2500 EK DEN HAAG

Datum: Harlingen, 12 april 2018

Kenmerk: AWo/18052

Betreft: Stukken bezwaar

Geachte heer, mevrouw,

Ten behoeve van de hoorzitting over de bezwaren van de Waddenvereniging e.a. tegen de vaststelling van de gebruiksruimte voor de gaswinning vanuit de velden Moddergat. Lauwersoog en Vierhuizen doe ik u nog een tweetal notities toekomen opgesteld door ir. A. Houtenbos (hierna Houtenbos). Deze notities ondersteunen de stelling van de Waddenvereniging e.a. dat de bodemdaling na het stoppen of verminderen van de gaswinning uit de genoemde velden langer zal na-ijlen dan in 2006 verondersteld is bij het verlenen van toestemming voor deze winningen.

De eerste notitie 'Bodemdaling: Model versus meting' (Houtenbos, 03-03-2018) betreft een review op de LTS-studie. Uit de LTS-studie bleek al, dat de bodemdaling langer na-ijlt zoals in de brief van 29 maart 2018 onder 1 tot en met 3 is aangegeven. Uit deze notitie van Houtenbos blijkt dat *'modellering volgens de LTS-methode de werkelijke na-ijling klaarblijkelijk achteraf niet (kan) reproduceren en dus ook vooraf niet voldoende betrouwbaar voorspellen.'* Op grond van het voorzorgsbeginsel zal dus met een langere en hogere na-ijling van de bodemdaling rekening moeten worden gehouden.

De tweede notitie 'Monitoring Wadden Sea subsidence by GPS' (Houtenbos, september 2017) geeft dat in de middelste figur p pagina 5 nog eens weer voor de gaswinning Moddergat: *From 2012 production rates dropped 40% while subsidence rates increased 20%, demonstrating that reducing production is incapable of stopping subsidence*

Waddenvereniging Droogstraat 3 Postbus 90 8860 AB Harlingen
tel (0517) 493 693 fax (0517) 493 601
info@waddenvereniging.nl www.waddenvereniging.nl

Rabobank IBAN NL07 RABO 0342 4267 10
BIC RABONL2U
KvK 40000475



173
200
1
100
1
100
100
100
100
100



acceleration over over periods of 5 years'.

Ook hierom is het noodzakelijk om bij de toepassing van 'Hand aan de Kraan' op grond van het voorzorgbeginsel rekening te houden met een langere periode na-ijlen van de bodemdaling en tevens met een hogere dalingssnelheid gedurende die langere periode.

Waddenvereniging
Hoogachtend,



Waddenvereniging Droogstraat 3 Postbus 90 8860 AB Harlingen
tel (0517) 493 693 fax (0517) 493 601
info@waddenvereniging.nl www.waddenvereniging.nl

Rabobank IBAN NL07 RABO 0342 4267 10
BIC RABONL2U
KvK 40000475



Bodemdaling: Model versus meting

Ir. A.P.E.M. Houtenbos, onafhankelijk bodemdalingsanalist, voormalig afdelingshoofd Geomatics NAM

Twintig jaar geleden werd intern bij NAM geconstateerd dat bodemdaling door gaswinning sterker na-ijlde en steilere bodemdalingssommen produceerde dan geomechanische modellering aangaf. Na een reeks van onderzoeken met de recente 'Long Term Subsidence' studie (NAM, 2017) als sluitstuk, is dat nog altijd zo.

In deze notitie worden de uitkomsten van de LTS studie vergeleken met die van de onafhankelijke integrale ruimte-tijd analyse van de metingen tot 2011 (Houtenbos, 2011).

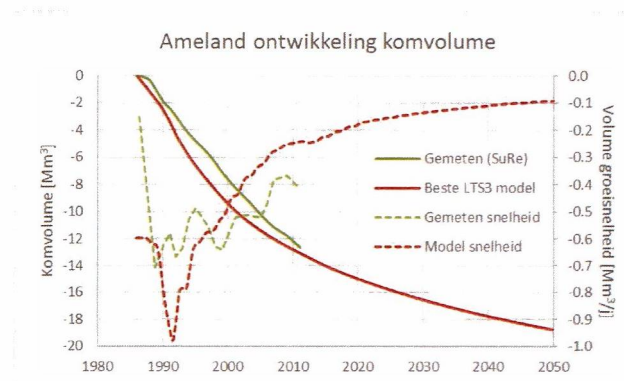


Fig. 1: Ontwikkeling bodemdalingsvolume en volumesnelheid in de tijd

Na 1992 (start Ameland Westgat winning) volgt de gemeten snelheid van de bodemdalingsvolumegroei (groene stippellijn) de drukdaling driemaal trager dan de snelheid volgens het best passende LTS-model (rode stippellijn). Modellering volgens de LTS-methodiek kan de werkelijke na-ijling klaarblijkelijk achteraf niet reproduceren en dus ook vooraf niet voldoende betrouwbaar voorspellen.

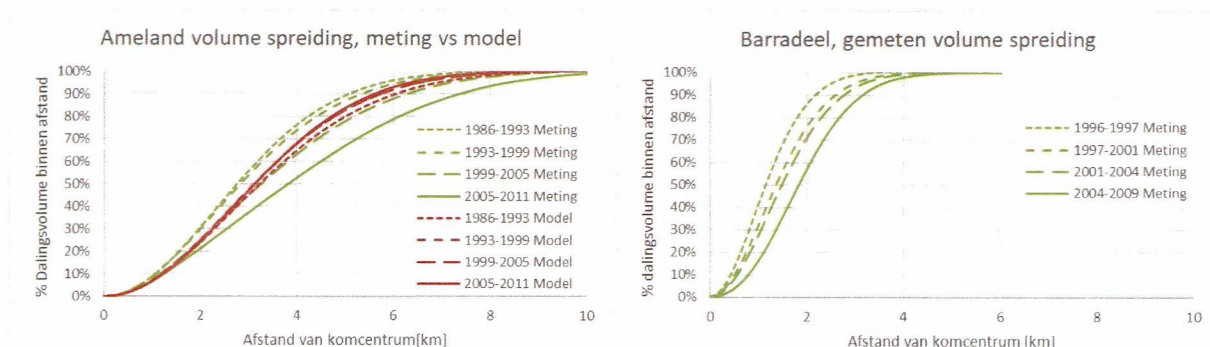


Fig. 2: Percentage van de bodemdaling dat zich binnen een bepaalde afstand van het komcentrum voordoet. Links, door de gaswinning op Ameland, als gemeten (groen) en gemodelleerd (rood). Rechts door de zoutwinning in Barradeel, als gemeten (groen).

Fig. 2 toont het percentage van het bodemdalingsvolume over een bepaalde periode, dat zich binnen een bepaalde afstand van het komcentrum voordoet. De afstand waarbinnen 50% van de bodemdaling tot 1993 volgens het best passende LTS model (rood) optreedt, is 18% groter dan die volgend uit de metingen (groen). Ook bij modellering volgens de LTS-methodiek wordt dus nog een te brede kom voorspeld. Dit bevestigt het al lang bestaande vermoeden dat de zogenaamde 'influence' functie, die de komvorm t.g.v. een klein geconcentreerd volumeverlies in de diepe ondergrond beschrijft, te vlak en te breed is.

Na 1993 (zie legenda) breidt de gemeten kom zich verder uit, terwijl de gemodelleerde kom zelfs iets krimpt. Het best passende LTS model slaagt er duidelijk niet in de cruciale uitbreiding van de bodemdalingssom naar omliggende aquifers te reproduceren.

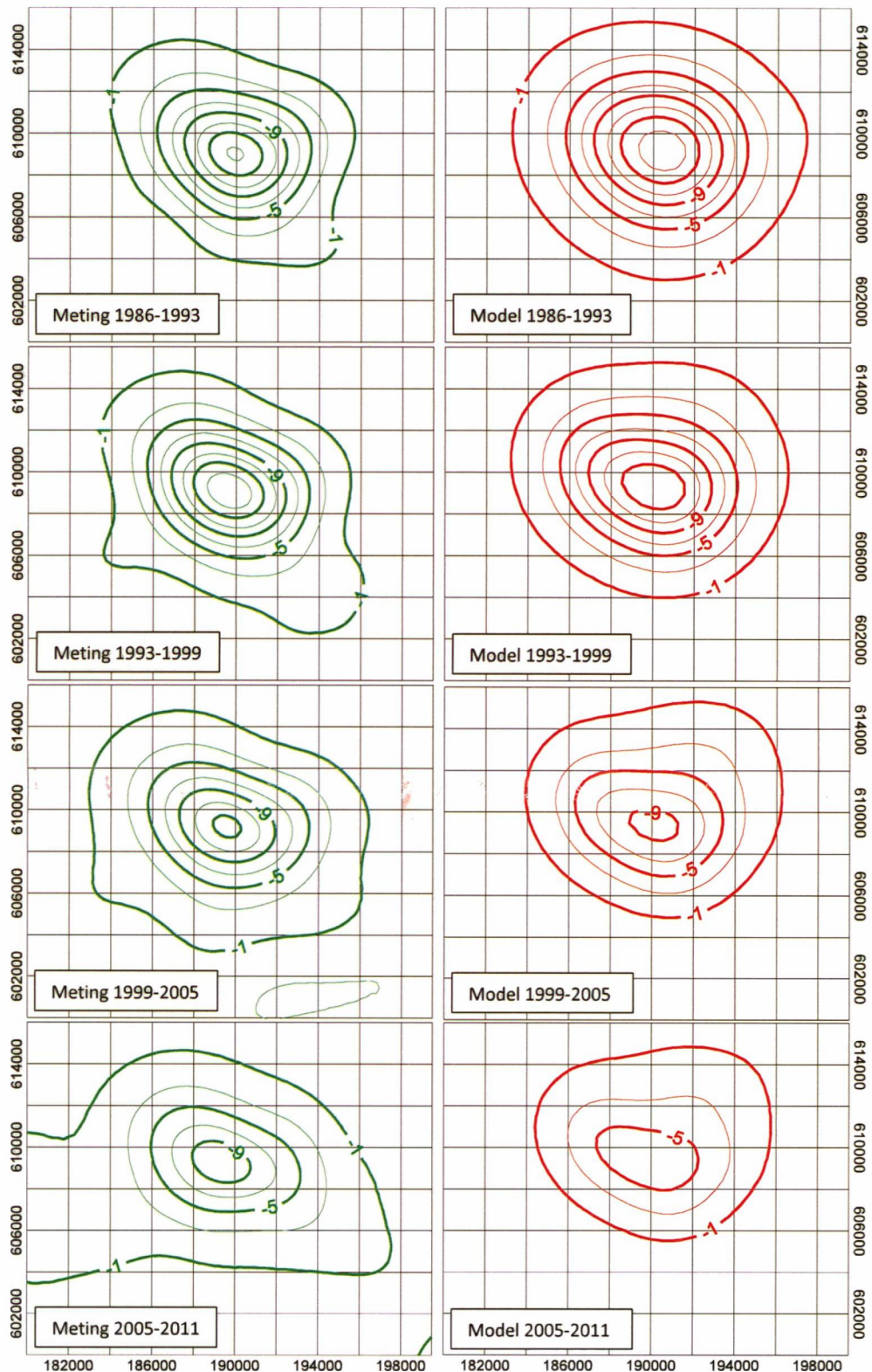


Fig. 3: Gemeten en gemodelleerde dalingssnelheid in vier opeenvolgende periodes van 6 jaar

Ook de vergelijking van de ontwikkeling van de kombreedte bij gaswinning uit het Amelandveld met die van zoutwinning uit het Zechstein bij Barradeel (Fig. 2, rechts) wijst op een smallere *influence* functie, dan in LTS gemodelleerd, en significante compactie buiten de grenzen van het gasveld. De beide winningen zijn nagenoeg even diep, maar het Barradeel-zoutreservoir bestrijkt een veel groter gebied dan het Ameland-gasreservoir. Toch is de breedte van de startende (kort gestippeld) Barradeel-kom, maar de helft van die van

de Ameland-kom. De beide kommen breiden zich in de loop van de tijd steeds verder uit door beweging van zout in de richting van de caverne, respectievelijk expansie van water in de rondom aquifers richting gasveld.

Fig. 3 illustreert de gemiddeld gemeten en gemodelleerde dalingsnelheid over vier opeenvolgende periodes van ongeveer zes jaar aan de hand van contourkaarten. De gemeten bodemdalingskom over de eerste periode tot 1993 is nauwer en steiler dan de gemodelleerde kom. Terwijl de gemeten kom afvlakt en zich in zuidoostelijke en zuidwestelijke richting verbreed, krimpt de gemodelleerde kom zonder noemenswaardige vormverandering. Waar de ontwikkeling van de vormvaste, gemodelleerde bodemdaling gekarakteriseerd kan worden door de ontwikkeling op één enkel signaleringspunt, is dat bij in werkelijkheid dynamisch vervormende bodemdalingssommen niet mogelijk. De snelheid van bodemdaling boven omliggende aquifers kan toenemen, terwijl die boven het gasveld af neemt.

Fig. 4 toont het verschil tussen de gemodelleerde en gemeten daling in 2011 tegen de achtergrond van gasvelden, aquifers en locaties waarop meetreeksen beschikbaar zijn. De ligging van de verschilpatronen is scherp gecorreleerd met de ligging van de gasvelden en aquifers. De relatieve daling tussen meetpunten op het eiland en die op en bij het AWG-platform verschilt meer dan 12 cm. Ook op het dicht bemeten eiland zijn de verschillen veel groter dan statistisch mag worden verwacht van meet- en zettingsruis.

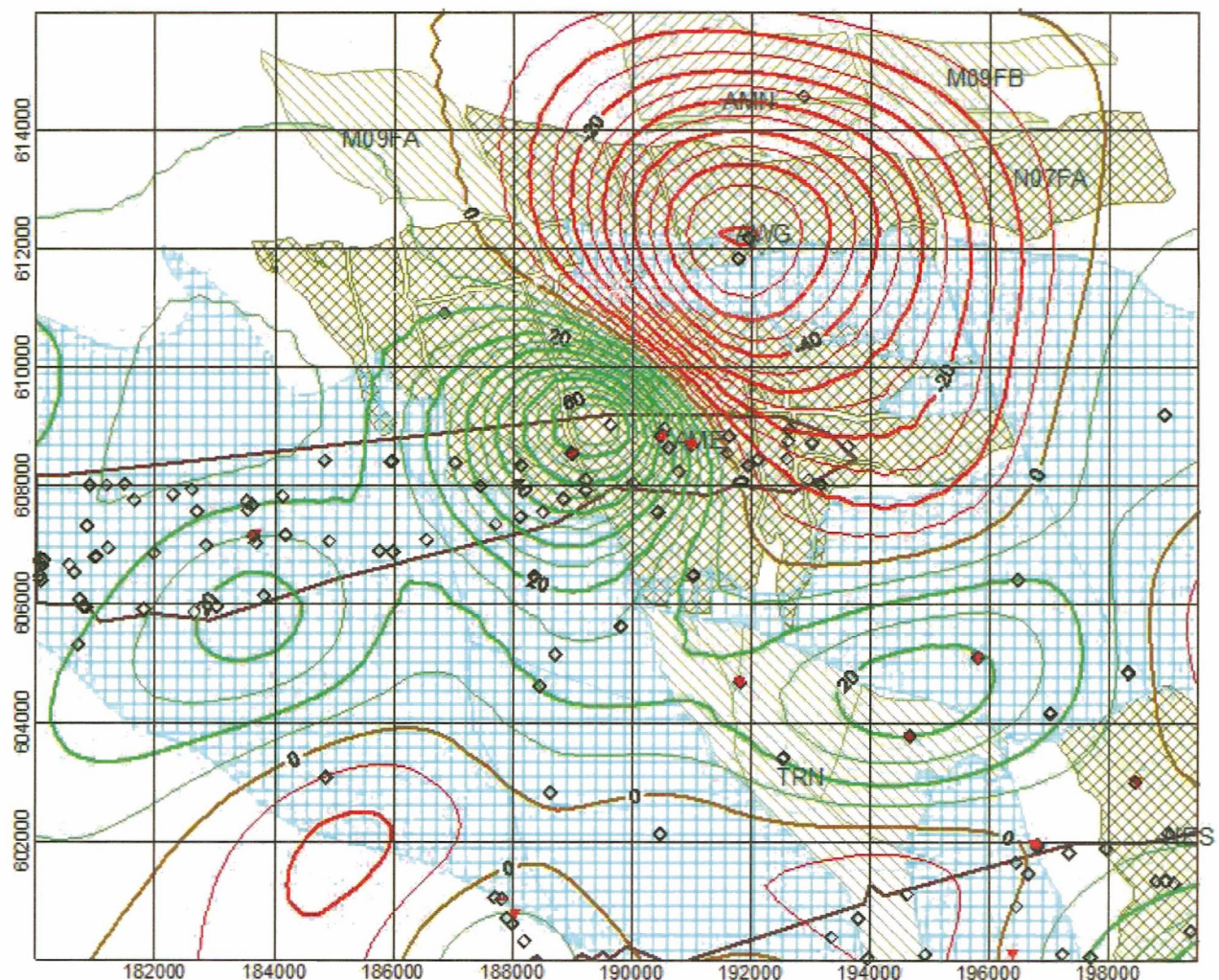


Fig. 4: Verschil tussen gemodelleerde en gemeten bodembeweging in mm over de periode 1986-2011. Rood is meer, groen minder gemodelleerd dan gemeten. Groen/blauw gearceerde vlakken zijn gasvelden/aquifers, zwarte ruitjes/rode pijltjes meetpunten met consistente/abnormale meetreeksen.

Uitschieters in de verschillen tussen gemodelleerde en gemeten daling kunnen zijn veroorzaakt door meetfouten, onregelmatige meetpuntzetting of modelfouten. Zonder statistische analyse van de verschil

patronen in ruimte en tijd kan niet worden vastgesteld welke oorzaak het waarschijnlijk is. Meetfouten veroorzaken uitschieters op een enkele plaats en tijd, onregelmatige zetting afwijkingen op een enkele plaats over langere tijd en modelfouten coherente verschillen over grote gebieden en langere periodes. Met grote zekerheid kan daarom worden concludeert dat de verschillen in bovenstaande figuren zijn veroorzaakt door modelfouten, niet door meetruis of zetting van meetpunten. Wel is het in theorie mogelijk dat de verschillen in Fig. 4 zijn veroorzaakt door fenomenen als differentiële veenoxidatie of klink, maar de sterke correlatie tussen plaats en tijd van de ontwikkeling van de drukdaling door gaswinning en het verschil tussen meting en model sluit deze mogelijkheid in de praktijk uit.

De oppervlakte van het totale drukdelende, gas- of watervoerende reservoir kan viermaal groter zijn dan dat van het gasveld alleen. Het totale bodemdalingsvolume kan daarom ook viermaal groter zijn dan dat gemodelleerd door drukdaling in het gasveld alleen.

Terwijl het best passende model uit de LTS methodiek de gemeten na-ijling en bodemdaling niet kan reproduceren, wijst analyse van de verschil patronen in ruimte en tijd (figuren 1 tot en met 5) de weg naar beter passende combinaties van geofysische parameters. Anders dan onder de LTS methodiek, zou uitgegaan moeten worden van het meest simpele model. Hiervan zouden iteratief de verschillen tussen meting en model integraal en synchroon getoetst moeten worden op alle mogelijke meet-, zettings- en modelfouten, maar alleen de meest waarschijnlijke gecorrigeerd moeten worden. Ruiscriteria voor toetsing dienen uit de verschillen tussen model en metingen van het project zelf te worden afgeleid. (Houtenbos, 2017).

Samenvattend:

1. Anders dan geconcludeerd in (SodM, 2018) kloppen de resultaten van de LTS modellering in het geheel niet met de metingen. De verschillen lopen op tot 12 cm. De veronderstelde, betere passing is slechts schijn. Niet de modellen zijn beter, maar de criteria zijn verruimd.
2. De ruimere LTS ruis criteria verhullen de ook elders waargenomen bodemdaling boven aquifers en de consequenties daarvan: veel sterker na-ijlende bodemdaling, verbreding van de kom naar omliggende aquifers en een tot viermaal groter uiteindelijk bodemdalingsvolume.

Referenties

Houtenbos, A. (2011). *Bodemdaling Waddenzee 1977-2011*.

www.researchgate.net/publication/311717967_Bodemdaling_Waddenzee_1977-2011.

doi:10.13140/RG.2.2.15994.49609

Houtenbos, A. (2017). *Review: 'Long Term Subsidence' study 3*. Researchgate.

doi:10.13140/RG.2.2.30487.88486

NAM. (2017). *Ensemble based subsidence application to the Ameland gas field -long term subsidence study part two (LTS-II) continued study*.

SodM. (2018). Brief 'Long Term Subsidence vervolgstudie en dwangsombesluit AWG' aan NAM. Retrieved from https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/publicaties/2018/02/08/nam-studie-over-de-voorspelling-van-de-bodemdaling-waddenzee-nu-wel-buikbaar/Brief+LTS+vervolgstudie+en+dwangsombesluit+AWG+080218_Redacted.pdf

Monitoring Wadden Sea subsidence by GPS

September 2017, Adriaan P.E.M. Houtenbos, subsidence@houtenbos.org

Introduction

To keep subsidence cause by mineral extraction within accepted limits it is - in the Netherlands - continuously monitored by GPS stations. This article extends the analysis of (Houtenbos, 2011) and describes the results after ten years of monitoring subsidence due to gas extraction from three field clusters.

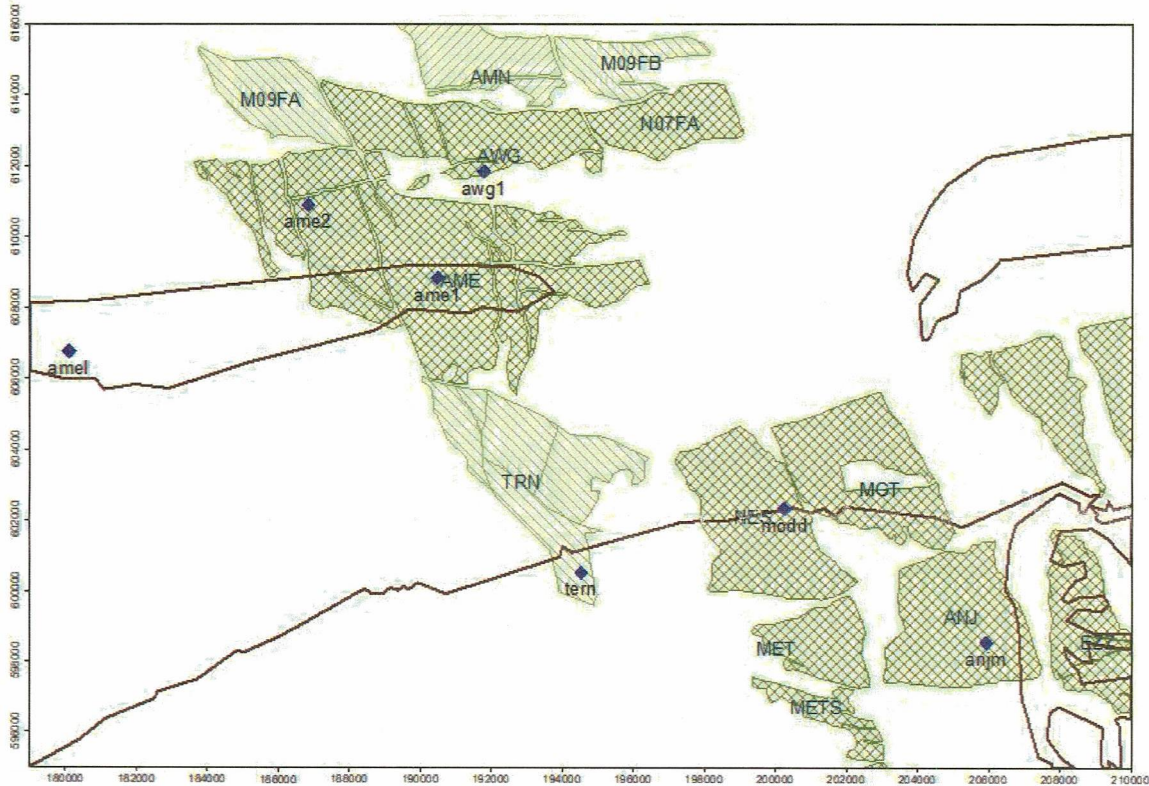


Figure 1: Monitored area. GPS station in blue diamonds, producing gas field in dark green, non-producing fields in light green, topography brown. Timeseries for GPS stations ame2 and awg1 not yet made available.

GPS Station	AME1	MODD	ANJM
Gasfield 1	Ameland-Oost > 1986	Nes > 2007	Anjum > 1997
Gasfield 2	Ameland-Westgat > 1993	Moddergat > 2007	Metslawier > 1997
Gasfield 3	N07-FA > 2011		Ezumazijl > 1999
Start extraction	01-01-1986	01-02-2007	01-08-1997
Start GPS	25-05-2006	15-12-2006	01-06-2006
End GPS	29-04-2017	29-04-2017	29-04-2017

Table 1: Primary GPS time series

Apart from the 3 GPS stations listed above, shorter time series were available for the stations AMEL and TERN. The first is located near the benchmark, that served as the reference point for all previous the levelling surveys over the subsidence area, the second on a gas field, planned to go in production shortly.

Processing

The dataset comprises hourly latitude, longitude and height positions of the GPS antennas with respect to a set of presumably stable reference stations. Monthly production data per gas field from January 2003 allows investigation of the relation between antenna displacement and gas extraction.

GPS measured latitude, longitude and heights are converted to national RD/NAP x, y and z values. Spikes, steps, high frequency noise, daily and yearly variations are removed.

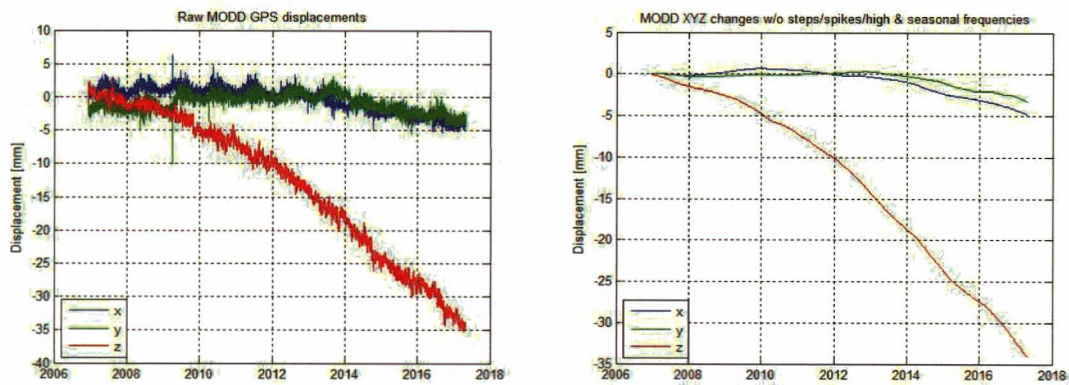


Figure 2: Raw and processed version of the Modd x-, y- and z-displacement.

Finally, vertical and horizontal displacement rates and the bearing on the horizontal displacement is computed at monthly intervals for comparison with monthly production rates.

Results

The time series for AMEL and TERN were too short and/or too far away from the subsidence bowls to allow analysis of all aspects. Figure 4 does however reveal some peculiar aspects of these time series.

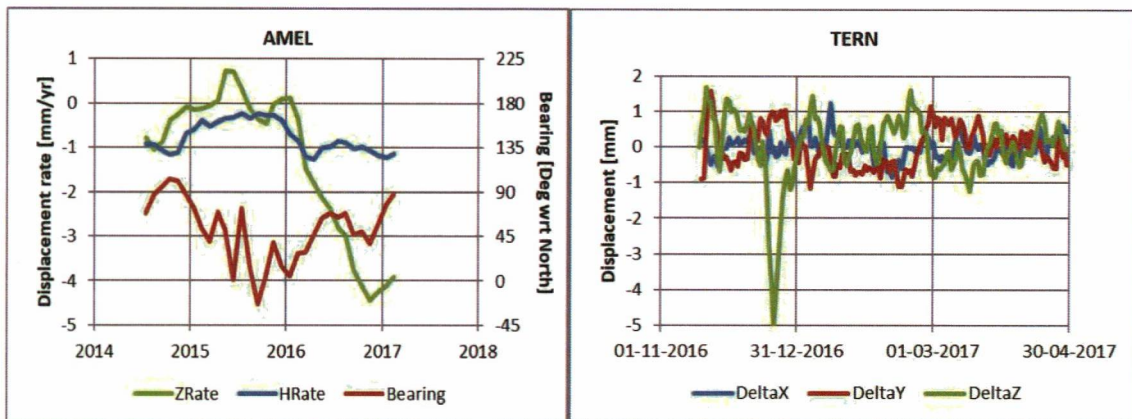


Figure 3: Displacement rates and bearing of station AMEL and displacements of station TERN.

The 'amel' GPS station is part of the national AGRS network, on which all official positioning in the Netherlands is based. The station is located on the Rijkswaterstaat building at the Ballumerweg, Nes, Ameland, near underground height marker 000A2592, which in turn has served as the presumed stable reference point for all subsidence levelling surveys on the island. The GPS timeseries indicate the vertical displacement rate increasing from 0 to 4 mm/year in the last year recorded. In the same period, the horizontal displacement rate increased to 1 mm year in the direction of the Ameland gas fields.

The time series for the 'tern' GPS station shows a symmetrical dip of 5 mm over 2-week period. It is not clear what the cause (instrumental artefact, elastic displacement of the antenna w.r.t. surrounding area or displacement of the antenna with the elastically subsiding surrounding area) has been nor what the reaction of inspectors would/should have been, if such an anomaly occurred on a producing gas field.

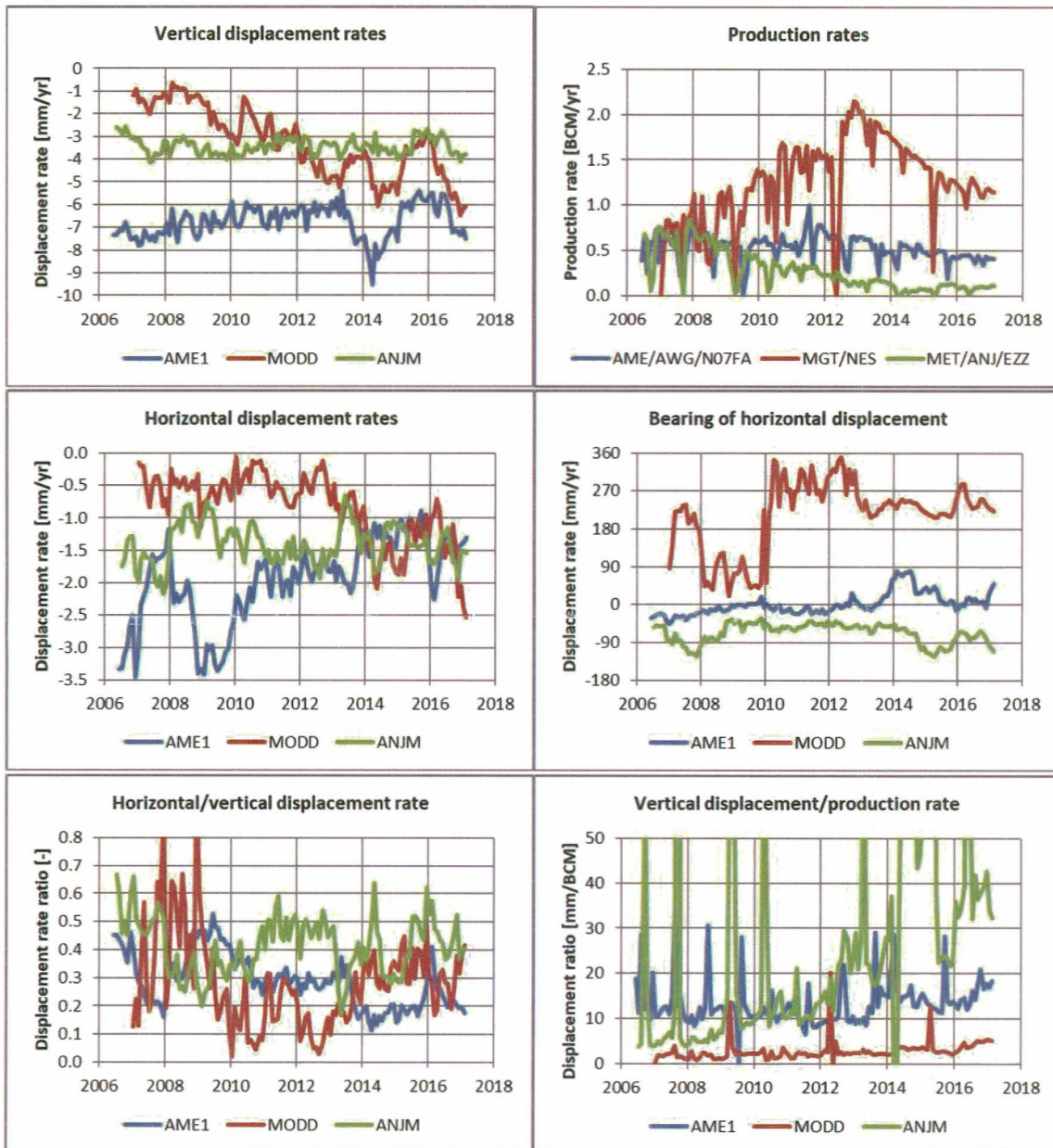


Figure 4: Results of the 3 primary GPS stations. From upper left to bottom right: vertical displacement rate, production rate, horizontal displacement rate, bearing of the horizontal displacement, ratio between horizontal and vertical displacement and finally ratio between production and vertical displacement rate.

Over the past 5 years subsidence per billion cubic meters (BCM) produced gas doubled over the Ameland field cluster and roughly tripled over the Moddergat/Nes and Metslawier/Anjum/Ezumazijl clusters.

GPS Station	AME1	AMEL	MODD	ANJM
Vertical rate [mm/yr]	7.2	4.0	6.2	4.0
Horizontal rate [mm/yr]	1.4	1.2	2.4	1.5
Direction hor.displ. [deg]	0	80	230	100
Production rate [BCM/yr]	0.42	0.42	1.17	0.10
Hor./vert.displ. ratio [-]	0.19	0.30	0.39	0.38
Vert./prod.rate ratio [mm/BCM]	17.1	-	5.3	40.0

Table 2: Displacement characteristics at the end of the monitoring period early 2017.

GPS measures the instantaneous 3D displacement of its antenna, not the maximum horizontal and vertical displacement rates. The relation between the rates measured at the GPS location and the maximum rates can be described by the following equations:

$$\begin{aligned} \dot{z}(x, y, t) &= \dot{z}_{max}(t) \cdot e^{-\frac{1}{2}r^\delta} \\ \dot{h}(x, y, t) &= \dot{h}_{max}(t) \cdot \left(\frac{\delta \cdot e}{2(\delta - 1)} \right)^{(\delta-1)/\delta} r^\delta \cdot e^{-\frac{1}{2}r^\delta} \\ r^2 &= \left(\frac{(x - x_{mid}) \cdot \sin\alpha + (y - y_{mid}) \cdot \cos\alpha}{a} \right)^2 + \left(\frac{(x - x_{mid}) \cdot \cos\alpha - (y - y_{mid}) \cdot \sin\alpha}{b} \right)^2 \end{aligned}$$

in which x_{mid} , y_{mid} , a , b and α are the x and y- coordinates of the centre, the semi-major, semi-minor axis and the bearing respectively of the contour at 60% ($e^{-1/2}$) of maximum subsidence, δ the flattening of the subsidence bowl, and $\dot{z}$ and $\dot{h}$ the vertical and horizontal displacement rates. The maximum horizontal rate is reached at:

$$r = \left(\frac{2(\delta - 1)}{\delta} \right)^{1/\delta}$$

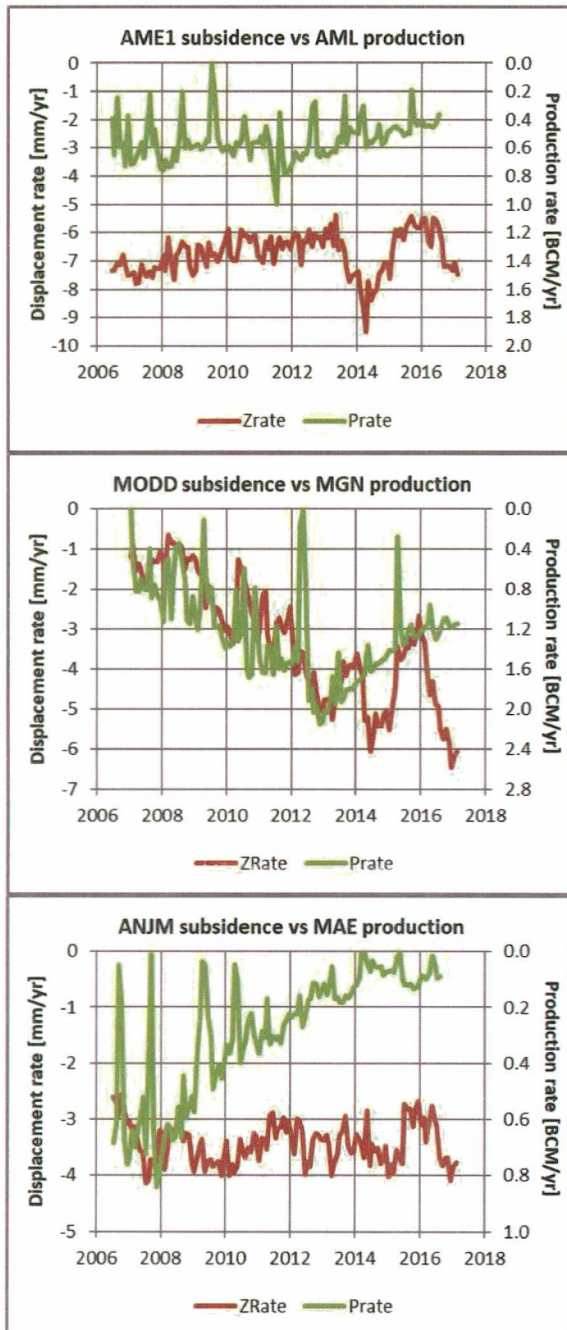
which for a typical δ value of 2 equates to the 60%- z_{max} -contour above the edge of the reservoir. This horizontal displacement is of particular importance for the derivation of subsidence from InSar as it distorts the relation between measured line of sight displacement and the vertical displacement sought.

GPS Station / Field Cluster	AME1/AML	MODD/MGN	ANJM/MAE
Maximum vertical rate [mm/yr]	7.8	6.7	4.3
Maximum horizontal rate [mm/yr]	1.9	3.3	2.9

Table 3: Implied maximum displacement of the AME/AWG/N07FA, MGT/NES en MET/ANJ/EZZ field clusters.

Interpretation

The relation between subsidence at the GPS location and production is complex. The contribution of a specific production volume to measured subsidence decreases with the distance of the specific block from which the volume is produced to the GPS station. Even at constant overall production rates measured GPS displacement will therefore vary with the instantaneous geographical distribution of producing wells.



While total AME/AWG/N07-FA production rates halved from 2011 to 2017, the subsidence rate at the GPS station increased from 6.4 to 7.2 mm per year. While the centre of gravity of production shifted towards N07-FA in 2011, it appeared too far away and too early to explain the subsidence rate peaking in 2014.

Just prior to the 2007 start of production from the MGT/NES fields the MODD GPS station subsided already 1 mm per year. This may have been caused by production from the nearby MET/ANJ/EZZ fields. It does however complicate the translation of GPS results into action to control subsidence due to further production. From 2012 production rates dropped 40%, while subsidence rates increased 20%, demonstrating that reducing production is incapable of stopping subsidence acceleration, let alone decelerate subsidence over periods of 5 years.

Decimation of the production rate from the MET/ANJ/EZZ cluster over the last 10 years had no effect on associated subsidence rates.

Discussion

The prime concern in Wadden Sea area is the conservation of ecological values. Initial subsidence predictions assumed pressure depletion and compaction in the gas bearing portions of the reservoir rock only. Under this assumption, the reduction of pressure divided by the gas expansion factor is proportional to production volumes. There is growing evidence that pressure depletion and compaction extends to aquifers beneath and around producing gas fields.

- (NAM, 2017) reports: "Note that the AWG-110 well found the Ameland-N07FA reservoir depleted by some 60 bar compared to the N07-2 discovery well. As the only 2 producing fields in the vicinity are Ameland-Oost and Ameland-Westgat, it is likely that the Ameland-

N07FA structure is connected to either one of them. There is 1 production well drilled into Ameland-N07FA field: AWG-110.” The pressure development in the various compartments of the fields suggest pressure communication between AME and N07FA via AWG. This implies pressure communication across faults with throws larger than reservoir thickness, through gas/water contacts and through the lateral aquifer between AWG and AME. As similar conditions prevail all around the Ameland fields, pressure communication between gas and water bearing portions of the reservoir is likely all around Ameland (see Figure 5).

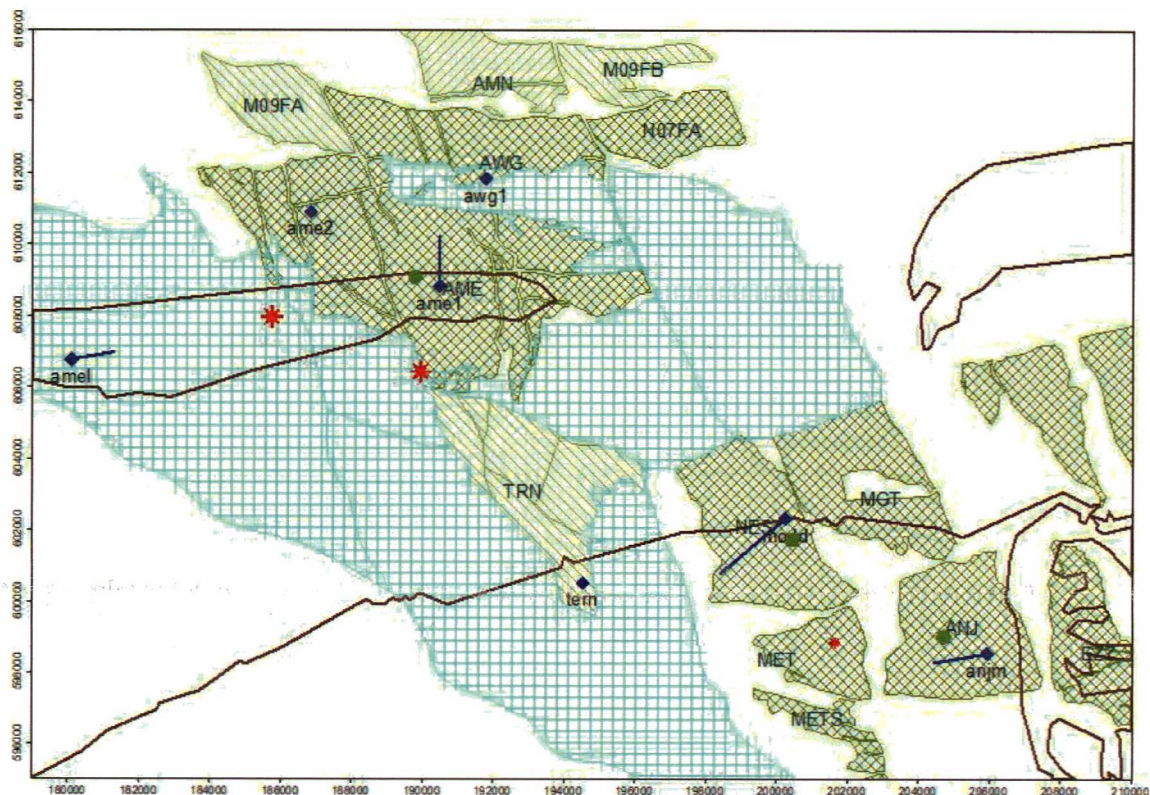


Figure 5: Subsidence area with previously determined, cumulative bowl centres as green dots, 2017 instantaneous horizontal displacement rate vectors in dark blue, aquifers in light blue and earthquake locations as red stars.

- KNMI reports 2 induced earthquakes of magnitude 1.8, one in 2005 and one in 2013, near faults between gas and water bearing reservoir compartments. The driving mechanism is worrisome, as reactivation of normal faults implies more compaction on the water bearing than on the gas bearing side of these faults.
- The magnitude and direction of horizontal and vertical displacements of GPS station 'amel' (see Figure 3 and Figure 5) suggest a subsidence sink, such as the aquifer, nearby.

Currently, an exponentially decaying compaction response to pressure depletion is the prevailing explanation for the observed lagging of subsidence behind production. The explanation is undercut by more recent observations:

- The time decay constant, needed to bring modelled subsidence in agreement with measured subsidence, is not constant but lengthens as production progresses.
- Subsidence, reservoir pressure and balance of produced and injected gas volumes vary in perfect synchrony without delay through injection/production cycles in the Norg underground gas storage facility.

It would appear that the time lag between production and subsidence is not to be found in the relation between pressure depletion and compaction, but in the relation between pressure depletion in gas and water bearing portions of the reservoir. Significant differences in permeability and viscosity cause a far slower propagation of pressure waves in water bearing than in a gas bearing reservoir rock.

Under the assumption of a time decay function governing compaction of gas bearing rock only the compaction and subsidence volume increase asymptotically to the limit of uniaxial compaction coefficient times reservoir thickness times gas bearing area times the pressure depletion: $V_{\text{subs}} = V_{\text{comp}} = c_m \cdot h \cdot A_{\text{gas}} \cdot \Delta P$. Under the assumption of a direct compaction response to pressure depletion and sluggish pressure communication between gas and water bearing portions of the reservoir the ultimate volume limit will be: $V_{\text{subs}} = V_{\text{comp.gas}} + V_{\text{comp.water}} = c_m \cdot h \cdot (A_{\text{gas}} + A_{\text{water}}) \cdot \Delta P$. In the Ameland case the subsidence volume may be up to 4 times larger than due to depletion of gas bearing reservoir alone, be it that it is likely to take much longer before pressure is evened out over the entire gas and water bearing reservoir.

Conclusions

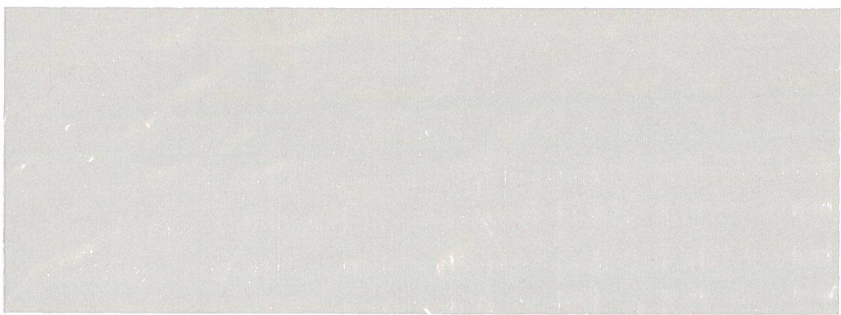
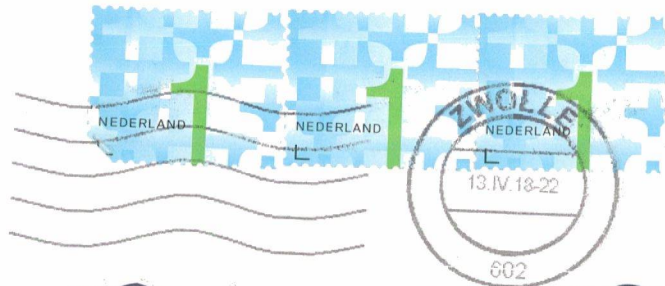
1. Over the last 5 years subsidence per cubic meter produced gas increased by a factor 2 to 3.
2. Major reduction of production rates failed to slow down subsidence above the Metslawier/Anjum/Ezumazijl gas fields. 40% reduction of the production rate from Subsidence above the Moddergat/Nes fields even continued to accelerating despite slowing down production by 40%.

Recommendations

1. Focus on subsidence volume rather than subsidence in the deepest point of the bowl. Derive and compare separate fully continuous spatio-temporal subsidence models from geodetic and geomechanical input, interpolating between discrete data points, based on the covariance of respectively geodetic and geomechanical input.
2. Improve verification of aquifer depletion models. Monitor development of pressure and depth of gas-water-contacts in aquifer penetrating wells, such as AME-103A. Monitor potential widening of the subsidence bowl due to aquifer depletion by an additional GPS station between 'amel' en 'ame1'.

References

- Houtenbos, A. (2011). *Bodemdaling Waddenzee 1977-2011*.
www.researchgate.net/publication/311717967_Bodemdaling_Waddenzee_1977-2011.
 doi:10.13140/RG.2.2.15994.49609
- NAM. (2017). *Ensemble Based Subsidence application to the Ameland gas field – long term subsidence study part two (LTS II)*.



Waddenvereniging Postbus 90 8860 AB Harlingen

W82



Z19CC #5541X0X#DD#DDDD#

