



Staatstoezicht op de Mijnen
Ministerie van Economische Zaken
en Klimaat

> Retouradres Postbus 24037 2490 AA Den Haag

Nederlandse Aardolie Maatschappij
t.a.v.
postbus 28000
9400 HH Assen

Staatstoezicht op de Mijnen

Bezoekadres

Henri Faasdreef 312
2492 JP Den Haag

Postadres

Postbus 24037
2490 AA Den Haag

T 070 379 8400 (algemeen)
F 070 379 8455 (algemeen)

sodm@minez.nl
www.sodm.nl

Behandeld door

Datum 8 februari 2018
Betreft Long Term Subsidence vervolgstudie en dwangsombesluit AWG

Ons kenmerk
18003650

Uw kenmerk

Geachte ,

Bijlage(n)
3

Op 3 juli 2017 legde de Inspecteur-generaal der Mijnen (IGM) u een dwangsombesluit op, waarin de IGM de Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) gelastte om vóór 31 oktober 2017 een nadere studie toe te zenden, die ten genoegen van de IGM diende te zijn. Dit conform de instemmingsbesluiten gewijzigd winningsplan Ameland (artikel 5), Anjum (artikel 3) en het Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen (artikel 14). Deze studie, genaamd "Long Term Subsidence (LTS) study part two" (LTS-II), moet leiden tot begrip van de tijdsafhankelijke effecten in de bodemdaling door gaswinning onder de Waddenzee. Wanneer de gaswinning van nu leidt tot bodemdaling over een aantal jaren, heeft een verandering in de productie niet meteen effect. Een eventuele ingreep in het kader van de "hand aan de kraan" zou dan te laat kunnen komen.

Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) legde de last onder dwangsom aan de NAM op naar aanleiding van een op 31 januari 2017 ingediend aantal rapporten, betreffende LTS-II, aangevuld met een addendum op 17 maart 2017. Deze door de NAM uitgevoerde studie was niet ten genoegen van de IGM, zoals in het dwangsombesluit gemotiveerd. In het dwangsombesluit beschreef SodM uitvoerig de criteria waaraan de studie zou worden getoetst. De NAM kreeg tot 31 oktober 2017 de tijd om een studie aan te leveren die voldeed aan deze criteria.

Op 20 oktober 2017 zond de NAM de "Long Term Subsidence vervolgstudie" toe aan de IGM. Ik heb de studie bestudeerd, en daarbij het advies van TNO-AGE betrokken. Prof. Teatini van de universiteit van Padua heeft een tweede onafhankelijke review gedaan. Mijn conclusie is dat de studie voldoet aan de geformuleerde criteria en te mijnen genoegen is. Daarmee heeft de NAM aan de opgelegde last onder dwangsom voldaan.

In deze brief vindt u een samenvatting van de beoordeling, een beschrijving van de onafhankelijke externe beoordeling en een meer gedetailleerde beschrijving van de manier waarop NAM de opgelegde last adequaat heeft ingevuld. Tot slot vindt u in deze brief een beoordeling in het licht van de eerdere eisen aan de LTS-studie en een doorkijk naar toekomstig gebruik van de nieuwe methodiek en de mogelijke gevolgen voor de gaswinning.

Samenvatting van de beoordeling

SodM heeft in het dwangsombesluit bij de NAM aangegeven op welke zes punten de studie van maart 2017 tekortschoot (bijlage 1). De NAM heeft sindsdien verbetering geboekt op al deze punten. De voornaamste reden waarom de IGM in maart 2017 niet zijn genoeg over de studie kon uitspreken, was de grote en onverklaarde afwijking tussen de modellen en de metingen van de bodemdaling, zoals verwoord onder punt 1 van het dwangsombesluit. De andere punten zijn concrete verbeteringen, die moesten bijdragen aan het minimaliseren van deze afwijkingen.

Hieronder beschrijf ik meer in detail wat de verbeterpunten waren, en hoe de NAM hier naar mijn inschatting in voldoende mate opvolging aan heeft gegeven. Er blijft een mate van onzekerheid bestaan ten aanzien van de bodemdaling in de Waddenzee, maar de NAM heeft naar de huidige stand van de wetenschap gedaan wat in haar vermogen ligt om deze onzekerheid te minimaliseren en in kaart te brengen. De huidige studie is ten genoeg van de IGM zoals voorgeschreven in de genoemde instemmingsbesluiten.

Onafhankelijke beoordeling

De studie van de NAM, zoals die op 20 oktober 2017 is ingeleverd, is door SodM beoordeeld. De resultaten zijn ook geanalyseerd door twee externe partijen. De uitkomsten daarvan zijn meegenomen in de beoordeling door SodM.

Analyse door TNO-AGE

TNO-AGE heeft de mate waarin invulling is gegeven aan de zes verbeterpunten uit het dwangsombesluit (bijlage 2) geanalyseerd. SodM heeft de analyse van TNO-AGE gebruikt bij het opstellen van de beoordeling. TNO-AGE komt in het eerste kwartaal van 2018 met een evaluatie van de bruikbaarheid van de ontwikkelde systematiek bij andere velden, en de vraag welke implicaties de studie heeft voor de huidige praktijk van monitoring.

Analyse door Prof. Pietro Teatini

Prof. Pietro Teatini heeft op verzoek van SodM een review gedaan van de LTS resultaten (bijlage 3). De heer Teatini is verbonden aan de universiteit van Padua en is vicevoorzitter van de Unesco werkgroep voor bodemdaling. Hij heeft jarenlange ervaring in het modelleren en meten van bodemdaling als gevolg van mijnbouwactiviteiten.

De analyse van de heer Teatini komt overeen met mijn eigen analyse: de studie is op veel punten sterk verbeterd ten opzichte van de versie van maart 2017. Er ligt een indrukwekkend stuk gereedschap klaar, waarmee op basis van fysisch begrip de onzekerheden in kaart te brengen zijn. De heer Teatini noemt de gesteente-eigenschappen van het reservoir als voornaamste factor in het vertraagd optreden van bodemdaling. In de analyse komt ook een aantal specifieke vragen aan de orde die vanuit de Waddenvereniging zijn gekomen.

Invulling van de gevraagde verbeterpunten

De zes verbeterpunten uit het dwangsbesluit

Met betrekking tot de in het dwangsbesluit genoemde tekortkomingen, stel ik vast dat de NAM adequate invulling heeft gegeven aan alle zes verbeterpunten. Ik noem ze hieronder kort, en ga daarna in op de belangrijkste resultaten:

1. *Het repareren van de grote verschillen tussen de locaties van de gemodelleerde bodemdalingskommen en de werkelijk gemeten bodemdalingskommen.*

De metingen en modellen zijn door de invulling van de overige punten, en door een aantal verbeteringen die de NAM daaraan zelf heeft toegevoegd, dichter tot elkaar gekomen.

2. *Het in de modellering meenemen van het effect van de aanvankelijke grote overdruk in het Amelandveld.*
3. *Het gebruiken van vier specifieke compactie modellen in plaats van een generiek compactiemodel.*
4. *Het gebruik van realistische waarden voor de zoutkruip.*

Deze drie verbeterpunten zijn voortvarend opgepakt door de NAM. Waar mogelijk is aan deze vragen voldaan. Waar dat niet mogelijk bleek, is op basis van een heldere redenatie en in afstemming met SodM, een keuze gemaakt die vervolgens goed is gedocumenteerd in het rapport.

5. *Het verkleinen van de onzekerheidsband in de voorspelde bodemdaling door ook de verwachte covarianties in ogenschouw te nemen.*

Dit heeft mede geleid tot de genoemde sterk verbeterde overeenstemming tussen metingen en modellen.

6. *Het heroverwegen van het gebruik van het rekenprogramma Aesubs.*

Het programma is vervangen door een alternatief. Hiermee zijn de snelheid en stabiliteit van de berekeningen sterk toegenomen.

Overeenstemming tussen gemeten en gemodelleerde bodemdaling

Er zijn altijd verschillen tussen modellen en metingen van de bodemdaling. Elke meting kent een onnauwkeurigheid. Bovendien beschrijft een meting de beweging van een meetboutje, dat vastzit aan een huis of andere object. De waargenomen beweging is daardoor niet altijd één op één te interpreteren als bodemdaling door gaswinning, maar kan ook andere oorzaken hebben.

Modellen bevatten niet alle details die in de werkelijkheid een rol spelen, dus ook bij perfecte metingen zijn discrepanties onvermijdelijk. De opdracht was daarom niet om de modellen en metingen volledig te laten samenvallen. De opdracht was wél om te laten zien dat de inschatting van de foutmarges wordt bevestigd door de vergelijking van de metingen met modellen: ze moeten binnen elkaars foutmarge komen te liggen. Alleen dan kun je zeggen dat je een idee hebt van de kwaliteit van zowel meting als modellering.

De toets voor de overeenstemming tussen de bodemdaling zoals bepaald uit metingen en die zoals hij uit één van de modelscenario's komt, gebeurt door middel van de zogenaamde Chi-kwadraat waarde. Dat is een gewogen gemiddelde van de gevonden afwijkingen tussen meting en model. Daarbij hangt de weging af van de verwachte ruis op een waargenomen verschil: heel goede metingen krijgen een zwaarder gewicht dan metingen met meer ruis.

Naast de door de IGM genoemde punten uit het dwangsombesluit heeft de NAM enkele andere belangrijke verbeteringen gedaan aan de analyse. De sterk verlaagde Chi-kwadraat waarde geeft aan dat de resterende afwijkingen passen binnen het opgestelde stochastische model: dat we nu dus weten hoe goed een meting en een model op elkaar moeten passen. Dat maakt het mogelijk met meer vertrouwen de bodemdaling als gevolg van de winning bij Ameland te volgen, maar biedt ook aanknopingspunten voor de analyse van andere velden.

Verbeteringen in metingen en modellering

De NAM heeft van zowel van de kant van de metingen, als die van de modellering gewerkt aan het komen tot overeenstemming. Door een strengere toetsing zijn afwijkende meetpunten uit de dataset verwijderd. Ook zijn er veel meer en betere modellen gebruikt dan in de eerder toegezonden studie van maart 2017. Dit alles zorgt ervoor dat er nu een veel betere overeenstemming tussen de metingen en de gemodelleerde bodemdaling is gevonden.

- *Verbeteringen in de metingen*

Het weglaten van de meest afwijkende metingen heeft logischerwijs geleid tot een veel betere overeenstemming tussen modellen en de resterende metingen. De NAM laat zien dat het bij de verwijderde metingen daadwerkelijk ging om onbetrouwbare metingen. Het lukte de NAM niet om aan de set oude hydrostatische metingen op het wad een nauwkeurigheid toe te kennen die het zinvol maakte om de data mee te nemen. Dit betekent wel dat er buiten het eiland erg weinig metingen zijn gedurende de eerste twintig jaar van de winning. De NAM heeft de beschrijving van de gecombineerde meet- en modelonzekerheid sterk verbeterd (punt 5 van het dwangsombesluit).

Door de covarianties mee te nemen, weegt een enkele meting zwaarder dan meerdere vlak bij elkaar. Dat zorgt ervoor dat op het wad (waar zich maar enkele meetpunten bevinden) de metingen relatief zwaar wegen. De meetpunten op het eiland wegen elk wat minder mee, omdat ze dichter bij elkaar liggen. Dit is een belangrijke verbetering ten opzichte van de analyse van maart 2017.

- *Verbeteringen in de geomechanische modellering*

De NAM werkt nu met één, meer generiek, compactiemodel, dat een breed scala aan mogelijke gevolgen van compactie toelaat. Dit is afhankelijk van de (veelal onbekende) eigenschappen van het gesteente en de geschiedenis van drukopbouw op geologische tijdschaal (punt 3 van het dwangsombesluit). De overdruk in het reservoir is één van de componenten die nu specifiek zijn toegevoegd aan het model (punt 2). TNO-AGE constateert dat dit niet op de wiskundig gezien meest elegante manier is uitgevoerd, maar dat de resultaten daarmee niet minder valide zijn. Dit leidt tot een duidelijk kortere tijdschaal van reageren door het gesteente op veranderingen in de winning, en daarmee een verbeterde respons op een eventuele 'hand aan de kraan' ingreep.

Voor de zoutkruip is nu gebruik gemaakt van een brede range aan mogelijke parameterwaardes die zijn bepaald aan de hand van laboratoriumexperimenten. De resultaten zijn in goede overeenstemming met eerdere resultaten (punt 4). De NAM maakt aannemelijk dat verdere detaillering in de zoutmodellering waarschijnlijk niet zal leiden tot het verder terugbrengen van de afwijkingen tussen modellen en metingen.

- *Verbeteringen in de variëteit aan scenario's*

Een belangrijke verbetering die niet in de brief was benoemd, is dat de NAM nu een veel grotere variatie aan modellen gebruikt. In het gebied waar daadwerkelijk iets bekend is (namelijk onder het eiland, in de buurt van de putten) verschillen deze modellen niet veel. Naar de randen toe (waar de grote aannames zitten over onder meer de aquifers en de doorlatendheid van randbreuken) is een veel grotere variatie aan reservoirmodellen gebruikt. Het feit dat eigenlijk elk van deze modellen een even grote waarschijnlijkheid kent als het enkele standaard model dat voorheen werd gebruikt, is één van de belangrijkste constatering van deze studie.

- *Verbetering in de implementatie*

Het programma Aesubs is vervangen door een veel simpeler model (punt 6 van het dwangsombesluit). Dat levert vergelijkbare resultaten, maar is stabiel en veel sneller qua rekentijd. Hierdoor kan de NAM nu niet enkele duizenden, maar meer dan een miljoen model-scenario's doorrekenen. Daarnaast zit er meer variatie in die modellen (meer verschillende reservoir- en compactie-scenario's).

Zijn hiermee nu alle vragen beantwoord?

Op 11 november 2015 is in een brief van SodM aan de NAM een aantal voorwaarden gesteld aan de LTS studie. Die gaan over méér dan de zes punten die in het dwangsombesluit van 3 juli 2017 zijn benoemd. Het gaat dan over begrip van de mechanismes die leiden tot de bodemdaling zoals we die waarnemen onder de Waddenzee. Met dat begrip kunnen we ervan uitgaan dat we controle hebben en effectief kunnen ingrijpen wanneer de situatie daarom vraagt.

De studie zoals die er nu ligt, en die in een aantal stappen (LTS, LTS-2, LTS-2 vervolg) tot stand is gekomen, geeft op veel vragen antwoord. De NAM heeft een studie gedaan die biedt wat thans wetenschappelijk mogelijk is. De mate van onzekerheid kan duidelijk worden ingeperkt door de hypothesen uit te werken in model-scenario's en die vervolgens te toetsen aan metingen. De strategie die de NAM daarbij volgt biedt voldoende houvast om een 'ten genoegen' over de studie te kunnen uitspreken op grond van de eerder genoemde instemmingsbesluiten.

Wat heeft de LTS studie opgeleverd?

De studie laat zien dat de onzekerheden in de voorspellingen beter in beeld gebracht worden wanneer je een groot aantal modelscenario's gebruikt. Ook wordt duidelijk dat door zorgvuldig plannen, uitvoeren en analyseren van metingen de onzekerheid kan worden verkleind. Met de tijd en het beschikbaar komen van de metingen wordt de onzekerheid kleiner. Dat maakt het mogelijk om de risico's beheersbaar te houden.

Metingen aan het aardoppervlak kunnen helpen de onzekerheden gedurende de winning te verkleinen. Naast dit inzicht heeft de LTS studie resultaten opgeleverd die deels specifiek voor Ameland zijn en deels ook elders te gebruiken zijn.

- *Ameland-specifieke resultaten*

Sommige delen van de modellering, zoals de eigenschappen van breuken en aquifers, zijn specifiek voor de casus Ameland. Voor een aantal van die reservoirparameters is duidelijk geworden dat je die soms kunt bepalen vanuit de vergelijking met metingen. Voor andere parameters is dat minder het geval.

De aanwezigheid van opgelost gas dat aanwezig blijft in de watervoerende lagen is een onzekere parameter die duidelijk van invloed op de mate waarin een passend model te maken is. De westelijke aquifer lijkt niet erg actief, aangezien slechts bij lage permeabiliteit in dit gebied een passend model te vinden is. Voor de oostelijke aquifer lijkt een zekere mate van activiteit wel aangetoond. De drukcommunicatie tussen het reservoir en deze aquifer is echter niet erg sterk: aan model-scenario's met hoge waarden van de permeabiliteit in dit gebied wordt geen waarschijnlijkheid toegekend.

De mate waarin breuk 13 het zuidelijk deel van de westelijke aquifer ontkoppelt van de drukdaling in het reservoir is nauwelijks te bepalen vanuit de beschikbare

metingen. Die bieden duidelijk geen aanknopingspunt om over deze hypothese een duidelijke uitspraak te doen. Ook dat is een belangrijke constatering.

- *Resultaten die ook elders bruikbaar zijn*

Een aantal mechanismes voor vertraagde of achterlopende bodemdaling zijn uitgesloten. De parameters van het compactiemodel, die beschrijven hoe het gasreservoir inklinkt als gevolg van drukverandering, maar ook die van de zoutkruip, die de effecten van het zout boven het reservoir beschrijven, zijn voldoende bepaald vanuit metingen en in overeenstemming met waarden die elders worden gevonden. Dat geeft aan dat er een duidelijke mate van begrip is, die controle mogelijk maakt. De gevonden waarden zijn ook toepasbaar op velden in de buurt.

Toekomstig gebruik

De NAM constateert terecht dat er bij aanvang van de winning in ruime mate onzekerheid bestaat over allerlei eigenschappen van de ondergrond en dat die onzekerheid leidt tot onzekerheid in de bovengrondse effecten. Met de nu gepresenteerde studie kan die onzekerheid worden vertaald in een rationele keuze voor een meetprogramma, voor grenzen aan de aanvaardbaarheid van resterende onzekerheid op de lange termijn en voor een beredeneerde keuze voor of tegen winning in kwetsbare gebieden. TNO-AGE besteedt hier in haar evaluatie van de LTS-resultaten begin 2018 aandacht aan en SodM zal hier in een advies aan de minister van Economische Zaken en Klimaat op terugkomen.

Zoals reeds vermeld is de thans uitgevoerde studie en de daaruit voortvloeiende keuze voor een meetprogramma te mijnen genoeg. Dat betekent niet dat bij elk gasveld voortaan deze methodiek gebruikt moet worden, of dat bij elke nieuwe meting een volledige studie als deze nodig is. Per locatie kan een keuze gemaakt worden voor het vereiste detailniveau van de voorspellingen en analyses. De LTS-2 methodiek is passend voor speciale gevallen als de Waddenzee.

Met vriendelijke groet,

Ir. T.F. Kockelkoren MBA
Inspecteur-generaal der Mijnen

Bijlage 1. Zes verbeterpunten uit het dwangsombesluit (ref. 17106531)

HERSTELMAATREGELEN

De NAM kan de vastgestelde overtreding ongedaan maken, door de volgende herstelmaatregelen te nemen.

1. Het repareren van de grote verschillen tussen de locaties van de gemodelleerde bodemdalingskommen en de werkelijk gemeten bodemdalingskommen

De gemodelleerde bodemdalingskommen liggen aanzienlijk verschoven (in de orde van 500-1.000 meter) ten opzichte van de gemeten kommen. Dit is een bekend probleem dat al eerder is waargenomen bij de modellering van het Ameland veld [TNO, 2013]. Hierdoor is formele vergelijking van de voorspellingen met de metingen bij voorbaat zeer problematisch. Een goede controle op de verhouding tussen de uiteindelijk gemodelleerde bodemdaling en de metingen is onontbeerlijk.

2. Het in de modellering meenemen van het effect van de aanvankelijke grote overdruk in het Amelandveld

De juiste modellering van het tijdsafhankelijk gedrag van de compactie is kritisch afhankelijk van de aanvankelijke overdruk in het reservoir. Het effect van de aanvankelijke grote overdruk in het Amelandveld blijkt door de NAM echter niet in de modellering meegenomen. De tijdsconstanten worden daardoor te groot. Dit leidt tot na-ijl effecten die langer duren dan realistisch is.

3. Het gebruiken van vier specifieke compactie modellen in plaats van een generiek compactie model

In de LTS-II studie worden vier verschillende compactie modellen gebruikt die specifieke gevallen zijn van een meer generiek compactie model [Pruiksma, 2015]. Bij gebruik van een generiek compactie model kan de ontwikkelde workflow de parameters bepalen, hetgeen een betere uitkomst kan opleveren.

4. Het gebruik van realistische waarden voor de zoutkruip

Zoutkruip kan leiden tot geometrische en tijdsafhankelijke effecten, maar alleen bij gebruik van realistische parameters. Het is dus terecht om de effecten van zoutkruip te betrekken in de modellering. Het gebruik van realistische waarden voor het kruipgedrag is daarbij essentieel. Daarvoor moet gebruik worden gemaakt van waarden uit de literatuur en van de resultaten van de LTS-I studie. Dat is niet gebeurd. De huidige bandbreedte is te groot en bevat daardoor teveel waarden die niet leiden tot effecten op de tijdschaal van de bodemdaling ten gevolge van gaswinning onder de Waddenzee.

5. Het verkleinen van de onzekerheidsband in de voorspelde bodemdaling door ook de verwachte covarianties in ogenschouw te nemen

Waarschijnlijk is aanzienlijke winst te behalen bij het verkleinen van de bandbreedte (onzekerheidsmarge) in de voorspelde bodemdaling door niet alleen ongecorrleerde ruis op de modelresultaten te veronderstellen, maar ook de verwachte covarianties in beschouwing te nemen. Dit kan worden gedaan met de

speciaal hiervoor binnen LTS-II ontwikkelde tools voor de modellering van ruimtelijk en temporeel gecorreleerde ruis (in het kader van idealisatieruis). Deze zijn echter niet toegepast.

6. Het heroverwegen van het gebruik van het programma Aesubs

Het gebruik van het programma Aesubs waarmee de vorm van de bodemdalingskom wordt uitgerekend verdient heroverweging. De tool blijkt niet bruikbaar in situaties met substantiële stijfheidscontrasten. De niet-fysische correcties die nodig zijn op de instellingen (gelaagdheid en geomechanische parameters) van dit programma om te komen tot correcte resultaten maken het tot een ondoorzichtig en onbetrouwbaar onderdeel.

Bijlage 2. De review van TNO-AGE

Sodm heeft aan TNO-AGE gevraagd om input ten behoeve van de door de IGM te nemen beslissing over de vraag, of het door de NAM op 24-10 jl. ingediende rapport *Ensemble Based Subsidence application to the Ameland gas field – long term subsidence study part two (LTS-II) continued study* 'ten genoeg' voldoet aan de opgelegde verbeteropdracht. Die verbeteropdracht betrof zes verbeterpunten. Die punten worden hieronder weergegeven, samen met de verkorte puntsgewijze beantwoording in de Nederlandstalige versie van het NAM-rapport.

Per punt volgt in cursief een korte reactie van TNO-AGE. Die reactie is bedoeld om op hoofdlijnen aan te geven of NAM met voldoende intensiteit, doelgerichtheid en compleetheid aan de gestelde verbeteropdracht heeft voldaan. TNO-AGE werkt momenteel aan een evaluatie, waarmee op onderdelen van het NAM-rapport onafhankelijke toetsing wordt uitgevoerd; de resultaten daarvan zijn uiteraard niet meegenomen in de huidige reactie.

1. Verbeter de passing van de gemodelleerde bodemdaling met de metingen

- Een meer uitgebreide set reservoircenario's beschrijft de mogelijke variaties in het drukverloop van de aquifers. Elk van deze scenario's is zorgvuldig gekalibreerd met de historische drukgegevens in de gaslagen.
- De geomechanische modellen zijn verbeterd (zie punt 3 en 4).
- Incorrecte data zijn uit de landmeetkundige metingen gefilterd.
- Met al deze verbeteringen laten de bodemdalingsmodellen een betere passing zien met de landmeetkundige metingen.

TNO-AGE heeft in haar review van het LTS-2 rapport erop gewezen, dat de vorm en positie van de 'gemeten' kom en de modelkom niet goed overeenkomen. NAM heeft in dit rapport de pogingen beschreven om dit te verklaren. NAM concludeert dat deze effecten niet uit de overburden kunnen worden verklaard. NAM heeft daartoe de belangrijkste mogelijke verklaringen onderzocht. De passing van modelkom en metingen, alsmede de kalibratie van de reservoircenario's is onderdeel van de onafhankelijke toetsing door TNO-AGE.

2. Neem het effect van aanvankelijk grote overdruk in het Amelandveld mee in de modellering

- Het model voor de bodemdaling is aangepast en de initiële overdruk wordt nu meegenomen in de compactiemodellering.

De NAM heeft het effect van de initiële grote overdruk in het Ameland veld behandeld langs de lijn ingegeven door het proefschrift van De Waal: uitbreiding met een lineaire tak in het drukbereik van initiële druk tot hydrostatische druk. TNO-AGE ziet mogelijkheden om dit punt met haar eigen implementatie van het RTiCM model te behandelen. Vooralsnog zijn er geen aanwijzingen, dat dat tot wezenlijk andere resultaten zal leiden.

3. Gebruik 1 generiek compactiemodel

- De modellering van de bodemdaling is nu gebaseerd op 1 generiek compactiemodel. *TNO-AGE is het eens met deze aanpak. NAM stelt terecht, dat een keuze van realistische waarden voor dit generieke compactiemodel bepaalde 'end members' (lineair, bi-lineair, tim-decay) uitsluit, die wel in het voorgaande LTS-2 rapport zijn meegenomen in de workflow. Maar de gekozen parameter ranges laten wel toe, dat onderzocht kon worden of er sprake is van een tendens in de posterior riching dergelijke end members. TNO-AGE vindt het belangrijk, dat de resultaten van laboratoriumproeven aan representatief kernmateriaal zijn meegenomen in de keuze van de modelparameters: de genoemde 'end members' voldoen daar niet aan.*

4. Gebruik realistische waarden voor de zoutkruip

- Laboratoriumexperimenten van relevante zoutlagen zijn gebruikt om realistische waarden voor de zoutkruip te verkrijgen.
- De nu gebruikte waarden en de uitkomsten van simulatietesten komen goed overeen met de resultaten van onderzoek aan de Universiteit Utrecht. *TNO-AGE constateert, dat NAM a priori een zeer ruime bandbreedte voor de zoutviscositeit toelaat. NAM wil daarmee bereiken, dat 1) rekening wordt gehouden met het feit, dat zelfs de langstdurende labexperimenten niet in staat zijn geweest om meetresultaten te leveren bij zeer lage waarden voor de deviatorische spanning (orde 0,1 MPa) en 2) ook de waarden die resulteren uit het Geomec 3D FEM-model worden omvat. In die zin heeft NAM alle realistisch mogelijkheden opengehouden.*

5. Neem de verwachte covarianties en het effect hiervan op de onzekerheidsband in de voorspelde bodemdaling in ogenschouw

- Gedeeltelijk waren deze covarianties al meegenomen, in de huidige resultaten zijn ook de nog ontbrekende covarianties meegenomen in de berekening van de resultaten.
- De betekenis en het effect van de samenhang (covarianties) tussen metingen is verduidelijkt.
- Het effect op de onzekerheidsband is gevisualiseerd in figuren die zowel de bodemdalingsmodellen als de metingen weergeven.
- De betrouwbaarheid van de voorspelde bodemdaling is groter geworden en beter in beeld gebracht

TNO-AGE gaat – zoals afgesproken met Sodm - op dit moment niet in op de geodetische aspecten en laat de beoordeling daarvan over aan Sodm.

6. Los de modelleerproblemen met AEsups op

- Het programma AEsups is vervangen door een andere methode (een aangepaste versie van de Geertsma & van Opstal methode).
- Een bijkomend voordeel is de grote rekensnelheid, waardoor vele mogelijkheden kunnen worden doorgerekend. Dit is een van de redenen voor een verbetering in de passing van de modellen aan de data.

TNO-AGE onderkent, dat het gesignaleerde modelleerprobleem met Aesups niet binnen de beschikbare tijd had kunnen worden opgelost. De nu door de NAM gekozen aanpak is door TNO-AGE ook al toegepast in een studie van 2011. Het NAM-rapport laat zien, dat die aanpak goed aansluit bij de resultaten van een 3D FEM.

Staatstoezicht op de Mijnen

Ons kenmerk
18003650

Bijlage 3. De review Prof. Teatini



MATHEMATICAL
METHODS and
MODELS for
ENGINEERING



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Commessa: M3E 01/17

THE LONG TERM SUBSIDENCE STUDY OF THE WADDEN SEA REGION

Review the LTS2 Continued Study

Author: Dr Pietro Teatini

**Committente: Staatstoezicht op de Mijnen
Ministerie van Economische Zaken**

Report: Report 3

Date: December 2017





MATHEMATICAL
METHODS and
MODELS for
ENGINEERING

TABLE OF CONTENT

1	INTRODUCTION.....	3
2	PREMESIS	4
3	WORKFLOW INPUT/OUTPUT WITH RESEPECT TO THE REQUIREMENTS.....	4
3.1	Reservoir data	5
3.2	Geomechanical constitutive relationships	5
3.3	“Influence” model.....	6
3.4	Geodetic data	7
3.5	Confrontation workflow.....	8
4	LTS2 OUTPUT WITH RESEPECT TO THE REQUIREMENTS.....	9
4.1	Requested improvements.....	9
4.2	Workflow results vs study aims	10
5	MY POINT OF VIEW IN RELATION TO THE WADDEN SEA SOCIETY QUERIES	11
6	CONCLUSIONS.....	14
7	REFERENCES	15

I INTRODUCTION

NAM released on October 20, 2017, the report "Ensemble Based Subsidence application to the Ameland gas field - long term subsidence study part two (LTS II) continued study" (Doc. nr. EP201710200509) [NAM, 2017a]. The report is an update of a previous version released on April 2017 [NAM, 2017b] and incorporates the improvements developed by NAM to address the following six suggestions provided by SodM:

1. improve the fit of the subsurface models to the measured data;
2. include the effect of the large overpressure in the subsurface model;
3. using a single generic compaction model instead of 4 specific compaction models;
4. use a realistic range of salt parameter values;
5. consequently, consider some neglected co-variances;
6. resolve geomechanical modeling issues introduced by AEsubs.

The new report is written as a stand-alone document and its main goals (the main goals of the LTS2 activities) are to cast light to the following issues:

- which (combinations of) the identified physical processes can explain the observed historical behavior of the land subsidence due to gas production from the Ameland reservoir?
- which is the range of possible future volumetric subsidence rates? Which the uncertainty associated to the subsidence prediction over Ameland?
- which is the available control of the future subsidence on the basis of the production level carried out up to date? Which is the impact on the delayed subsidence on the effectiveness of the "Hand on the Tap" approach?

The review of this last report provided by NAM [NAM, 2017a] is carried out with respect to these goals taking into account the above recommendations developed by NAM.

Not only. On November 22, 2017, a meeting with _____ and _____ was held in SodM headquarter. After the reading of the last NAM report (both the version NAM [2017a] and the Dutch summary), as representatives of the Wadden Sea Society and connected stakeholders they elaborated some remarks and posed a few questions. Following the discussion and the outcome of that meeting, a premise to my review is required to make clear which are the bases of my

evaluation. Moreover, I will also provide my point of view in relation to enquiries and doubts summarized in the document by _____ dated November 21, 2017.

2 PREMESIS

I have worked at the University of Padova (Italy) on modelling anthropogenic land subsidence over the last 25 years and the studies and publications developed by Dutch scientists, since Geertsma in the early 1970s, have always represented a significant reference.

However, I never focused on geomechanical issues specifically related with hydrocarbon production from reservoirs in The Netherlands. This involvement by SodM is the first opportunity. I have no previous knowledge about Ameland and, therefore, no reason to doubt the validity of basic information provided by NAM in the LTS2 reports [NAM, 2017a; 2017b]. For example, the compartments of the Rotliegendes formation shown in Figure 4 [NAM, 2017a], and termed Ameland-Oost field, represent the whole reservoir (the “Ameland gas field”) that must be accounted for in the study; the pore pressure variations have been matched with the all the available pressure records collected from the wellbores drilled in the mineralized part of the field and no well has been intentionally neglected; the set of 58 reservoir models listed in Table 6 [NAM, 2017a] represents “the set” of scenarios with acceptable history matched pressure; the compressibility versus porosity graph reported in Figure 14 [NAM, 2017a] are derived from core plug experiments on Rotliegendes samples and are not based on some preliminary computational model.

3 WORKFLOW INPUT/OUTPUT WITH RESEPECT TO THE REQUIREMENTS

Land subsidence caused by the development of the Ameland reservoir is investigated in NAM [2017a] through a probabilistic workflow, which integrates together the best knowledge available at the date and the uncertainties that still exist in relation to:

- the reservoir parameters;
- the constitutive relationship between the stiffness of the reservoir rock and its loading history;
- the way how compaction at depth transfers to the land surface / sea bottom;
- the quantification of the land subsidence cause by the Ameland development inferable from land subsidence measurements.

With respect to the previous ESIP (Ensemble based Subsidence Interpretation and Prediction tool) workflow [NAM, 2017b], a few although significant methodological modifications have been included for the confrontation of the model results with the measured data.

3.1 Reservoir data

It is really considerable the effort put by NAM to develop a large number of scenarios that match the available wellbore information (Figures 6 and 7) and, at the same time, allow the pressure change caused by hydrocarbon production to propagate differently in the aquifers possibly connected westward and southeastward to the reservoir (Figures 8 to 13).

Although the 30-year long production history from Ameland, the complex geological architecture of the Rotliegendes formation has not permitted to draw a unique figure of the reservoir “functioning”. The set of selected 58 scenarios allows investigating a wide range of possible pressure depletion in the aquifers below the Wadden Sea. These are surely the most important blocks to test in view of understanding the reason of the observed delayed land subsidence.

3.2 Geomechanical constitutive relationships

I agree with the choice of focusing the analyses on the rate type compaction model (RTCiM) only. The use of different more simple (linear and bi-linear) and/or not-physically based (time-decay) models, as carried out in NAM [2017b], has added noise to the system and the confrontation workflow.

Laboratory tests performed on certain reservoir rocks and displacement-monitoring data that became available in the last years have evidenced a complex mechanical behavior of the reservoir rocks (such as creep, relaxation, strain rate dependency, and aging) that indicates a time and load rate dependence of the measured deformations. These evidences have been pointed out not only in The Netherlands but, for example, in Italy too [Nguyen et al., 2016; Volonté et al., 2017].

RTCiM is a constitutive model that is capable to represent these mechanical processes. The variability ranges of the RTCiM parameters for the Dutch gas reservoirs are available from previous scientific sources (Table 8) and have been accounted for in the statistical workflow.

The RTCiM model parameters can be properly tuned to simulate the elastic response of the reservoir rock in overpressure conditions.

3.3 “Influence” model

Some doubts were listed for the AEsups semi-analytical model [Fokker and Orlic, 2006] used in NAM [2017b] in relation with its capability of properly transferring the reservoir compaction at depth, through the overburden, to the land surface, the so-called “influence” model. The main criticalities dealt with: i) the weakness of AEsups to account for realistic range of salt viscosity values and ii) the possibility of a geologic structure composed of uniform-thickness layers (usually termed “layer-cake” model) to represent properly the actual three-dimensional setting from a geomechanical point of view.

The solution adopted by NAM [2017a] has been to substitute AEsups with the simpler analytical Geertsma and van Opstal [1973] model, properly “adapted” to account for the time-dependent behavior of the salt unit and the actual uneven distribution of the mechanical properties within the overburden. Geertsma and van Opstal [1973] analytical function assumes the layers over- and underlying the reservoir as elastically homogeneous. van Opstal [1974] updated the previous work removing the hypothesis of a semi-infinite medium by adding an infinitely stiff layer below the reservoir, which mimics or sum-up the presence of stiffer geologic units at a certain depth below the hydrocarbon field. The stiff-layer depth depends on case to case and must be calibrated for the specific basin (or the given elasticity profile vs depth) on hand. I really prefer this physically-based solution with respect to alternative unphysical approach as the exponential influence Knothe function.

Following TNO [2011], the van Opstal [1974] approach has been further elaborated in NAM [2017a] by introducing a function that moves the depth of the stiff basement with time. The parameters of this function have been calibrated by matching the analytical model with the output of the state-of-the-art GEOMECH finite-element model (FEM) of the Ameland reservoir. GEOMECH implements the actual 3D distribution of the geomechanical properties in the overburden and a number of scenarios were run to derive the parameter values of the analytical influence function for different realistic values of salt viscosity. Based on the results clearly presented in the report, NAM concludes that: i) the calibration parameters of the analytical model are not impacted by the thickness variation of the salt layer; 2) the position of the maximum of the subsidence bowl is negligibly affected by the actual 3D thickness of the salt layer and its geomechanical properties; 3) there is no significant time-dependent spatial influence of the salt shape of the subsidence bowl; 4) the proposed “influence”

function is a reasonable approximation of a more complex and realistic model to translate the reservoir deformation to the surface.

Although based on an unphysical assumption (the geomechanical properties of the underburden change with time), it has been demonstrated that the proposed approach can be effectively used to simulate the transfer of the Ameland compaction to the land surface. However, as stated by NAM itself in Section 4.3, the main drawback for such an unphysical approach is the need of a specific calibration of the “influence” function for each different reservoir using a proper geomechanical FEM.

3.4 Geodetic data

Levelling and GPS records from 1986 to 2017 are processed by a double-difference procedure to characterize in time and space the “observed” land subsidence bowl and the related uncertainty. The stochastic properties of the measurements are described by their full covariance matrix.

A specific procedure has been proposed to “extract the signal” of the subsidence caused by the Ameland development from the measurements. The uncertainty of geodetic observations when used to quantify the deep compaction (termed as “idealization” noise) has been initially quantified with the use of a model that accounts for a temporal component (noise related to the autonomous movement of an individual benchmark) and a spatio-temporal component (noise related to shallow processes, such as peat compaction of groundwater-pumping subsidence, which are characterized by a certain correlation in time and space).

Then, a quite complex two-step procedure has been developed to detect and remove outliers in levelling and GPS measurements. The geodetic data were initially used to estimate a spatio-temporally correlated subsidence signal that is then used in a gridding procedure to generate an approximation of the subsidence signal itself. During the analysis, outliers are detected to provide a final smooth surface of the land subsidence bowl based on geodetic measurements only.

Based on my experience in calibrating geomechanical models within a deterministic approach, I should keep the horizontal GPS observations in the confrontation workflow: although very few in number, horizontal movements can effectively “constrain” the outcome of geomechanical models. Moreover, their idealization noise can be neglected because the mechanisms responsible for shallow land subsidence do not produce horizontal displacements.

Section 5.4.4 summarized the information on the detected outliers: Figures 32 and 33 highlight that the unused observations are scattered in space and time. Therefore, even if the removal of a part of the geodetic observations as reported in NAM [2017a] pag. 55 is not completely understandable (e.g., what means “suspected settlement?”), the dataset used in the confrontation procedure seems worth to effectively “constrain” the modelling outcome in the area of highest concern, i.e. the Wadden Sea and the Ameland Island.

3.5 Confrontation workflow

A confrontation procedure between geodetic data and model outputs has been developed by NAM within a probabilistic framework. The confrontation procedure assumes that deep subsidence is caused by Ameland only, i.e. Ameland is the only hydrocarbon reservoir that have caused land subsidence in the Pinkegat area over the period 1986 to 2017.

The procedure follows the previous ESIP workflow [NAM, 2017b] with two major improvements:

- 1) the revision of the covariance matrix in the χ^2 test statistic. The model uncertainty, which is related to unmodeled subsurface processes, has been incorporated in the stochastic model by a covariance matrix. Neglecting this contribution will lead to χ^2 test statistic values much larger than expected;
- 2) the use of the probability of the χ^2 test statistic value, which is characterized by a χ^2 distribution, to estimate the probability of each ensemble member. This choice, instead of the previous multivariate normal distribution, has allowed overcoming the ensemble collapsing into a few members having a very high probability and the majority almost equal to zero. The updated approach provides a band of acceptable model members.

For each production scenario, the model members have been defined by selecting the geomechanical parameters (of the compaction and influence models) through a Latin Hyper Cube method ensuring that the range of variability of each parameter is suitably sampled. An appropriate analysis has been implemented to quantify the number of members allowing for a proper sampling of the parameter space while keeping the amount of simulations to a manageable value. The final ensemble consists of more than 10^6 members, which is really an impressive number that seems to guarantee a comprehensive investigation on the parameter-dependent model response. The confrontation procedure results in an expectation case and a 95% confidence interval. The time and space behavior

of the computed versus measured subsidence is described by a number of graphical representations showing a satisfactory match of the available records and a quite narrow 95% confidence interval.

4 LTS2 OUTPUT WITH RESPECT TO THE REQUIREMENTS

4.1 Requested improvements

The new LTS2 report has been developed by NAM to improve the previous analyses in relation to the six issues listed in the Section 1. The following comments can be provided:

- 1) improvement of the model fit: the model outcome matches satisfactorily the observations processed as described in the report. The 95% confidence interval reduces significantly with respect to NAM [2017b] because of the use of a more appropriate compaction model, the removal of noise from the geodetic measurements, and the implementation of a more effective confrontation workflow;
- 2) include the overpressure: a linear elastic behavior of the reservoir rock in overpressure conditions has been properly accounted for by an extension of the RTCiM model (creep is set null);
- 3) use a single generic compaction model: this suggestion has been appropriately implemented with the use of the RCTiM model. The model is able to describe the possible creep behavior of the reservoir rock. The range of variability of the various model parameters has been derived by bibliographic resources;
- 4) use a realistic range of salt parameters: this has been accomplished using values derived from lab tests and scientific literature. The possible salt effect has been accounted for by adopting a time-dependence of the basement depth in the Geertsma and van Opstal [1973] analytical solution, with the moving rule calibrated using the solution of a 3D FE model. The approach is non-physical, although effective in Ameland. The outcome highlights the negligible effect of the salt layer in the time evolution of the land subsidence;
- 5) covariances: the covariance matrix has been extended with a component related to the potential error of the geomechanical model;
- 6) fix AEsups limitations: AEsups has been replaced by a modified version of Geertsma and van Opstal [1973] analytical solution. This has mitigated the limitations of the previously used influence model in relation to soil geomechanical heterogeneity and the viscosity of the salt

layer. However, the drawback of this new un-physical approach is the need of a proper calibration (through a FE model application) for each reservoir.

4.2 Workflow results vs study aims

The new confrontation workflow and the results presented in NAM [2017a] cast some light to the main open issues related to land subsidence caused by the development of the Ameland field.

First of all, the analyses of the confrontation outcomes carried out in Sections 7.4 to 7.6 allow ranking the influence of the processes listed in LTSI on the observed delayed subsidence. Although none of the three processes (delayed pressure propagation in the aquifers possibly connected to the reservoir, delayed compaction of the produced formation because of creep, delayed response of the overburden because of viscous salt deformation) addressed in the simulations can be excluded from contributing to the observed historical behavior, it clearly appears that the compaction model is the mechanism playing the major role. In relation to aquifer effects, the highest probability to match the observations is obtained for a moderate to limited depletion in the western and south-eastern aquifers. Also the salt layer has an effect less important than that exerted by the compaction model, with the viscosity that will have even a smaller influence in the next future.

On the basis of the production history used in these forecasts (“full production scenario” in Figure 65), the future volumetric subsidence rate in the Pinkegat area will range between 0.5 and 0.4 mm/yr in 2020 and 2040, respectively. The uncertainty (95% confidence interval) associated to the forecast is quantified in 0.2-0.4 mm/yr. Can this level of uncertainty – that for my point of view is quite limited – be associated to the other two processes composing the “effective subsidence capacity” concept? Moreover, it is important to point out that, if the planned production history of the reservoir will change with respect to that adopted in NAM [2017a] (about 5 BNm³ from now to 2040, see Figure 65), the reasons of the possible mismatch between the subsidence observed in the future and the forecast presented in this report cannot be directly associated to a limitation of the workflow. Along the same line, an analogous consideration must be carried out for the results presented in Section 7.7. Here, the capability of the workflow to provide a reliable forecast is investigated by quantifying the width of the confidence interval associated to the predicted land subsidence with geodetic data characterized by different time length. As expected, the results show a reduction of the confidence interval as the time series becomes longer (more data are added to the confrontation), with the members characterized by a good fitting for a certain dataset that keep high probabilities with the

other datasets. A few monitoring observations seem able to quickly constrain the future subsidence, narrowing the associated confidence interval. However, this conclusion is based on the assumption that the reservoir development plan developed at the beginning of the production (or a few years later) is maintained for the whole production life of the reservoir. If the production plan will change after a few years because, for example, new blocks or pools will enter into production, the expected subsidence and the associated confidence interval could strongly increase with respect to the initial analysis, although not depending on the goodness of the "confrontation workflow" tool itself.

The report also quantifies the effectiveness of the "Hand on the Tap" approach at present and in 1996 (Figure 65). Although the production life of Ameland is almost completed at the date, an emergency stop will approximately halve the expected subsidence in about 5 years, with a value in 2040 that amounts to 0.2 mm/yr.

5 MY POINT OF VIEW IN RELATION TO THE WADDEN SEA SOCIETY QUERIES

The new report presented by NAM in October 2017 represents the conclusion of a large research activity carried out in the past 5 years. Similar to other complex reservoirs, the understating of the "Ameland system" from a geomechanical point of view is not straightforward and the effort put in LTS2 seems finally to succeed in providing an advanced tool for this kind of investigation. Measurements and models are always affected by errors and can only partially be representative or represent the process of interest. This is the reason why, from my point of view, a physically-based modelling approach, with the outcome expressed in term of expectation and confidence interval relative to a set of measurements, is always preferable to other methodologies of data interpretation (e.g., neural networks, collocation, grey correlation analysis, etc.). The physically-based approach allows the authors and the readers to suppose the physical origin of the discrepancies between computed and measured variables.

With respected to the questions listed by , a short - far from being exhaustive - response is provided below following the inquiry order:

- the proposed confrontation workflow applied to Ameland has confirmed that the delayed land subsidence in the Wadden See is caused by the superposition of different processes. However, it has also demonstrated that the most probable mechanism responsible for this occurrence is the constitutive law governing the (delayed) compaction of the Rotliegendes

formation, with the propagation of the pressure decline in the surrounding western and south-eastern aquifers and the delayed deformation of the viscous Zechstein unit playing a secondary role;

- the report [NAM, 2017a] is difficult to be completely evaluated in depth also for a single specialist, requiring the simultaneous expertise typical of reservoir engineers, geodesists, geotechnicians, and geomechanical engineers. However, with respect to the previous version [NAM, 2017b] it is much more clearly presented. The longer time available to NAM for closing the study has allowed to improve the outcome from both the scientific soundness and the qualitative representation of the results;
- the results of the probabilistic workflow have been compared in Figure 62 to that provided by a state-of-the-art deterministic 3D finite element model of the Ameland reservoir [NAM, 2016]. Even if not explicitly reported, this latter is also the outcome of a multi-step approach required to calibrate the FE model. As explained in the report, the reason of a part of the difference between the two results is due to different hypotheses in the used production scenario. Possibly, the reservoir scenario used in the deterministic modelling approach could adhere to "expectation case" selected by the LTS2 workflow, allowing for a more meaningful comparison between the results of the two approaches;
- a unique physically-determined rate type compaction model (the RTCiM model) has been used with the range of variability of the law parameters derived from lab testing on Rotliegendes samples collected from Ameland and other reservoirs. The confrontation workflow has allowed to characterize the probability distribution of (a part of) these parameters (Figure 74);
- I agree with the TNO AGE conclusion about the unlucky spatial distribution of the subsidence measurements, in particular with a lack of data in the North See side. However, from my point of view the consequence of this shortage on the main goals of the NAM 2017a] study is negligible. Indeed, the area of interest is the Wadden Sea. On one hand the monitoring sites in the Wadden Sea and Ameland Island are we relatively well distributed thus effectively constraining the subsidence bowl in these regions; on the other hand, the possible contribution to the cumulative land subsidence in the Pinkegat region due to the depletion of the off-shore aquifer, which could be inaccurately characterized with the

available measurements, is limited because of the distance (see the typical shape of the influence model);

- the results of the confrontation workflow presented in NAM [2017a] is characterized by a narrow 95% uncertainty bandwidth (less than 0.5 mm/yr). This is the most important improvement with respect to the previous analysis [NAM, 2017b];
- the strategy adopted to overcome the AEs subs limitations, as explicitly require by SodM, consists in the use of a different approach, i.e. the Geertsma and van Opstal [1973] solution. The two approaches are similar in the sense that they provide an influence function (or Green function) that, in conjunction with the reservoir data, allows to quantify the subsidence bowl for the whole reservoir that is compacting. However, Geertsma and van Opstal [1973] does not allow to account for a heterogeneous rock system (characterized by geologic units with different geomechanical properties) and the presence of viscous layers. van Opstal [1974] included the effects of a rigid basement, addressing the usual condition of an increasing rock stiffness below the reservoir. NAM has built-up a calibration procedure using a finite element model to adjust the basement depth in time in order to mimic the effect of the viscous salt layer in the overburden. Although effective, see Section 4.3 and 4.4 in NAM [2017a], the approach is obviously un-physical (the rock stiffness below the reservoir does not change during the reservoir development). Because of this choice, the confrontation workflow cannot be directly applied to other reservoirs but a preliminary calibration procedure (and hence the availability of a finite element model) will be required;
- as I already concluded the review of NAM [2017b], NAM has developed an innovative approach to properly manage land subsidence measurements and geomechanical models to reconstruct the past displacements and predict the future behavior in a stochastic framework. The improvements implemented in NAM [2017a] have allow to test positively its use in the complex case of the Ameland reservoir. Therefore, I do not agree with the evaluation that the LTS2 outcome is "only" a workflow;
- generally speaking, the model ability of providing reliable predictions relies on its capability of fitting the observations recorded in the past. The confrontation workflow developed and tested for the Ameland case study provides evidence that it is possible to match within a stochastic framework the subsidence measurements recorded over the 30-year production life with a small level of uncertainty, even if part of these records (the delayed occurrence of

significant subsidence rate) was initially unexpected. On the basis of this result and taken into account that the used modelling approach is physically-based, we can be confident that the workflow provides reliable subsidence forecast. The subsidence prediction showed in Figure 61 is much more than an “extrapolation”. Obviously, the subsidence behavior presented in Figure 61 strictly depends on the specific production planned for Ameland in the years to come (Figure 65). If the production program will be changed in the future, the measured subsidence will necessarily differ from the results of NAM [2017a] without mining the scientific sound of the approach. The same consideration holds if new reservoirs will be developed in the Ameland surroundings;

- the same confrontation workflow can be applied when the subsidence is caused by the superposition of the subsidence bowls generated by nearby reservoirs. Although technically more complex, the compaction and influence models will be developed separately for each reservoir and then the outcomes in term of land subsidence superpose before the confrontation with the available measurements;
- finally, the confrontation workflow cannot be used to predict the expected land subsidence from reservoirs in virgin conditions. In these cases, the most suitable solution to provide a first guess is the application of a deterministic approach using the value of the geomechanical parameters characterized by the highest probability as derived from previous studies on other already-developed reservoirs characterized by similar geologic conditions (same basin, similar depth, etc.).

6 CONCLUSIONS

The continued study published by NAM in October 2017 provides evidence of a significant improvement in the development of an ensemble based approach to properly manage land subsidence measurements and geomechanical models to reconstruct the past displacements and predict the future behavior in a stochastic framework. The approach has been positively applied to the Ameland reservoir, where the available knowledge (in term of subsidence observations, static and dynamic response of the reservoir and surrounding formations) has allowed figuring out a clear picture of the factors responsible for the observed subsidence with a reduced 95% confidence interval. Associating an “uncertainty” to a model outcome is the mean scientists have to be honest in communicating their results to people. Apart from the choice of using a moving rigid basement to

account for the effect of a viscous overburden (this requires a specific calibration procedure for each reservoir), the whole approach is physically-based and, consequently, usable straightforward for other reservoirs.

Taking into account the complexity of the Ameland system, the results presented in this study satisfy the main requirements of the LTS2 project plan. Necessarily, the confidence interval will result initially larger than that obtained for the Ameland case when the confrontation workflow will be applied to newly developed reservoirs. As already written above, the posterior evaluation of the workflow robustness must take into consideration the deviations of the production history from the initial development plan used as input data in the confrontation workflow.

7 REFERENCES

- Fokker, P., and Orlic, B., 2006. Semi-analytic modelling of subsidence. *Mathematical Geology*, 38(5), 565-589.
- Geertsma, J., and van Opstal, G., 1973. A numerical technique for predicting subsidence above compacting reservoirs, based on the nucleus of strain concept. *Verh. Kon. Geol. Mijnbouwk. Ge.*, 28, 63-78.
- Nederlandse Aardolie Maatschappij, 2016. Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2015. <http://www.commissiener.nl/projectdocumenten/00000929.pdf?documenttitle=MR%20rapportage%20%202015.pdf>.
- Nederlandse Aardolie Maatschappij, 2017a. Ensemble Based Subsidence application to the Ameland gas field - long term subsidence study part two (LTS II) continued study. Doc. nr. EP201710200509, October 2017.
- Nederlandse Aardolie Maatschappij, 2017b. Ensemble Based Subsidence application to the Ameland gas field - long term subsidence study part two (LTS II). Doc. nr. EP201701217189, March 2017.
- Nguyen, S.K., Volonté, G., Musso, G., Brignoli, M., Gemelli, F., Mantica, S., 2016. Implementation of an elasto-viscoplastic constitutive law in Abaqus/Standard for an improved characterization of rock materials. In: *Science in the age of experience*, Boston, 23-25 Maggio 2016.

- TNO, 2011. Toetsing van de belasting op de gebruiksruimte in de kombergingsgebieden in Pinkegat en Zoutkamperlaag door bodemdalingten gevolge van gaswinning onder de Waddenzee. TNO-060-ur-2011-020351c.
- Van Opstal, G., 1974. The effect of base-rock rigidity on subsidence due to reservoir compaction, in Advances in rock mechanics, 3rd congress Denver.
- Volonté, G., Gemelli, F., Nguyen, S. K., Musso, G., Lancellotta, R., Brignoli, M., Mantica, S., 2017. Advances in geomechanical subsidence modeling: effects of elasto-visco-plastic constitutive behavior., American Rock Mechanics Association, ARMA-2017-1043.