

## Aanvullende achtergrondinformatie

### Commentaren van de Stuurgroepleden die gedurende 2013-2015 betrokken waren bij de Long Term Subsidence (LTS) studie fase 1 – nadere detaillering

De voorwaarden zoals genoemd bij de beschikkingen Winningsplan 2013 voor de winningsplannen Moddergat/Lauwersoog/Vierhuizen, Anjum en Ameland, stelden dat NAM vóór 1 juli 2015 een studie diende op te leveren naar de fysieke achtergronden van de waargenomen tijdsafhankelijke effecten in het bodemdalingsgedrag en de mogelijke gevolgen daarvan voor de bodemdaling op langere termijn.

Om deze studie uit te voeren is in 2013 door de NAM een “Terms of Reference” (ToR) opgesteld die is afgestemd met SodM. In overleg met SodM en de Waddenvereniging is toen besloten een onafhankelijke commissie (“stuurgroep”) aan te stellen met daarin wetenschappers uit de relevante werkvelden. De taak van deze stuurgroep was het onderzoek te volgen en te becommentariëren. Aan de Waddenacademie is gevraagd deze commissie te leiden en samen met de stuurgroepleden de studie te evalueren. Op 30 juni 2015 heeft de NAM 16 rapporten met betrekking tot deze studie aangeboden aan de Inspecteur Generaal op de Mijnen (IGM), samen met een beoordeling die de Waddenacademie na overleg met de stuurgroep voor de studie had opgesteld.

Zowel de NAM, SodM, de bovengenoemde stuurgroep, de Waddenacademie als de Waddenvereniging hebben aangegeven dat implementatie en toetsing van de studieresultaten op een gasveld gewenst is, waarbij een sterke voorkeur is uitgesproken om dit te doen op het Ameland gasveld, omdat de bodemdaling in dit veld na-ijlgedrag vertoont.

In de tabel hieronder zijn de opmerkingen geïnventariseerd die de verschillende stuurgroepleden hebben uitgesproken aan het eind van de uitgevoerde studie (“LTS fase 1”). Veel van deze opmerkingen hebben betrekking op de vraag hoe de implementatie van de resultaten van LTS fase 1 in een vervolgfase (“LTS fase 2”) gestalte kan krijgen.

Als zodanig zal de tabel essentiële input leveren voor de vaststelling van de ToR en het werkplan voor LTS fase 2. Tijdens het vaststellen van dit werkplan zal daarnaast moeten worden bepaald aan welke opmerkingen reeds invulling is gegeven, welke van toepassing zijn op LTS fase 2 en welke daar buiten vallen.

In de tabel staan in de linker kolom de geïnventariseerde opmerkingen van de stuurgroepleden. In de rechter kolom staat met betrekking tot een aantal opmerkingen een reactie van NAM.

Commentaren van leden van de stuurgroep die betrokken waren bij LTS fase 1 (periode 2013-juni 2015)	Reactie van NAM
<p><b>Transparantie</b> Stuurgroepleden adviseerden het volgende:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• “Clearly address public concerns.”</li> <li>• “Make data public.”</li> <li>• “Openbaarheid van alle voor bodembeweging essentiële parameters, inclusief drukmetingen en aquiferbegrenzingsen.”</li> <li>• “Geef Moddergat/Nes data en modellering vrij.”</li> <li>• “Stimulatie van een diversiteit aan meningen en een openbaar debat.”</li> <li>• “Provide a description of NAM’s finite element modelling.”</li> </ul>	<p>- De notulen van de stuurgroep vergaderingen zijn publiek beschikbaar gemaakt. Wel zijn ze voor dit doel eerst aangepast met als doel de tekst voor het publiek leesbaar te maken, hetgeen mogelijk de gedachte heeft gevoed dat informatie werd achtergehouden. Invulling geven aan de behoefte tot transparantie en samenwerking met belanghebbenden ziet NAM als een randvoorwaarde van LTS fase 2.</p>
<p><b>Aanpassen van het project</b> Bij aanvang van de LTS studie hebben Stuurgroepleden commentaar geleverd op de voorgestelde projectaanpak:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• “Test eerst of er eigenlijk wel een probleem is.”</li> <li>• “Carry out a full problem analysis and describe what discrepancies occur where, when and to what extent, before studying subjects such as a possible role for “heterogeneous permeability structure.”</li> <li>• “Make an overview of the available geodetic data for each NAM gas field.”</li> <li>• “The hypothesis that extraction of fluids causes reservoir contraction should not remain unchallenged.”</li> <li>• “Focus on testing alternatives for inadequate predictions, not on alternatives for already adequate geodetic measurements.”</li> <li>• “Allow project changes during the course of the project.”</li> </ul>	<p>- In LTS fase 1 is er na afstemmen van de ToR tussen NAM en SodM weinig ruimte gelaten om het project te wijzigen. De belangrijkste reden hiervoor was dat de ToR die onderwerpen bevatte die de afgelopen jaren ter discussie hadden gestaan. De NAM en SodM achtten het daarom goed juist deze punten nader te bestuderen. De vastgestelde ToR en oplopende tijdsdruk leidden tot een situatie waarin voor grote verandering in het plan van aanpak weinig ruimte was.</p> <p>- In LTS fase 1 is relatief veel aandacht besteed aan een alternatieve geodetische meetmethode (InSar). Het advies vanuit de Stuurgroep luidt om te focussen op het verkleinen van de onzekerheden in de modelvoorspellingen. Het uitwerken van methodes voor een beter gebruik van InSar-data had volgens sommige stuurgroepleden geen prioriteit.</p>
<p><b>Succesvol overleg</b> Gedurende LTS fase I was er vaak te weinig tijd voor stuurgroep leden om zich voor te bereiden op vergaderingen. De oorzaak hiervoor lag in het soms laat aanleveren van de benodigde stukken. De volgende opmerkingen daarover zijn in de adviezen van de stuurgroep leden terug te vinden.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• “Provide enough time to review research proposal to up-front.”</li> <li>• “Give a minimum of two weeks preparation time to give feedback on reports, etc.”</li> <li>• “Provide steering committee members with detailed information one month before a meeting, latest.”</li> <li>• “Experts and committee members should meet as often as possible to discuss the content, find common ground and make progress.”</li> <li>• “Seek intense collaboration between geodesists and geomechanics for successful problem analysis.”</li> </ul>	<p>- De NAM deelt de mening dat relevante stukken (onderzoeksrapporten, gesprekverslagen, etc.) geruime tijd (bijvoorbeeld 10 dagen) voor bespreking beschikbaar dienen te zijn. Dit is een leerpunt voor LTS fase 2.</p> <p>- Gedurende LTS fase 1 is er mogelijk te weinig ruimte voor overleg tussen de stuurgroepleden geweest. Dit werd bemoeilijkt omdat deze experts vanuit verschillende landen werden ingevlogen. Deze experts hebben dan ook vooral monodisciplinair gefunctioneerd. Hierdoor is er een beperkt gezamenlijk beeld over de studie gevormd. Integratie van studieonderdelen door stuurgroepleden was hierdoor dan ook niet mogelijk. De Waddenacademie heeft als procesbegeleider een overzicht van de studie geschetst in haar beoordeling.</p> <p>- In LTS fase 2 moet een accent worden gelegd op integratie door middel van intensieve samenwerking tussen commissieleden, waarbij er voor gekozen kan worden om onderzoeksgroepen beperkt te houden en mensen te betrekken die tijd kunnen vrijmaken en uit de Benelux afkomstig zijn.</p>

<p><b><u>Gesteenteonderzoek</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• “To model creep, an option would be to use an empirical expression for the strain rate (after Brantut et al. 2014). Alternatively use the models of (Brzesowsky et al. 2014a and 2014b).”</li> <li>• “More data on the stress-dependence of the strain rate will be necessary...”</li> <li>• “Additional experiments to test existing models: <ul style="list-style-type: none"> <li>- rock failure under uniaxial strain conditions.</li> <li>- depletion creep experiments monitoring several damage proxies.</li> <li>- study the stress-dependence of strain rate.”</li> </ul> </li> <li>• “Study creep behavior of cap-rock (Ten Boer shale) is a logical follow-up.”</li> <li>• “Compare the compaction behavior of rock in the lab with in situ compaction in Groningen reservoir.”</li> <li>• “Study in situ compaction versus earthquakes.”</li> </ul>	<p>- Ook in het kader van de Groninger gasproductie wordt onderzoek gedaan naar bodemdaling. Waar relevant kunnen de uitkomsten daarvan in LTS fase 2 worden meegenomen.</p>
<p><b><u>Additionele metingen</u></b></p> <p>“Consider preparing wells in the Wadden Sea for in situ compaction measurements over the entire well trajectory.”</p>	<p>- In Groningen put Zeerijp-3 is NAM’s eerste real time compaction imager geplaatst. Resultaten hiervoor zullen publiek worden gemaakt en ook van dienst kunnen zijn voor LTS fase 2. Het meten van compactie over de volledige lengte van een put is alleen mogelijk voor nieuwe putten (Fibre Optic compaction measurements).</p>
<p><b><u>Zoutkruip</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• “Reduce the uncertainty in the characteristic time for salt creep.”</li> <li>• “Test the shape of the subsidence bowl resulting from salt flow against geodetic measured shape changes.”</li> <li>• “To better understand a possible role for salt mechanics, evaluate why the predicted 60% rebound after cessation of salt extraction at Barradeel did not materialize.”</li> <li>• “Test the role of salt flow against real geodetic data for reservoirs with and without salt cover.”</li> <li>• “Drop further research on salt flow. It is incompatible with observed volumetric subsidence behavior.”</li> </ul>	<p>- Een aantal van de commentaren van de stuurgroepleden op het gebied van zoutkruip is in de loop van LTS fase 1 behandeld. Het gedrag van zout is een belangrijke component in het temporele gedrag van bodemdaling. Resultaten van Barradeel kunnen worden meegenomen in de geomechanische modellen.</p>
<p><b><u>Aquifer depletie</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• “Study what happens in the water bearing portion of the reservoir.”</li> <li>• “Quantify uncertainties in reservoir simulation related to aquifer depletion (current conclusions are weak because uncertainties are not quantified).”</li> <li>• “Clarify the impact of slow depletion zones (Aquifers, shales).”</li> <li>• “Analyse subsidence as a function of pressure depletion for Suawoude and Roden gas fields and test role of aquifer depletion for these fields.”</li> <li>• “Study the effects of gravity Geertsma’s model, RTCM and slow aquifer depletion.”</li> </ul>	<p>- In LTS fase 1 is aandacht besteed aan aquifer depletie. Hierin heeft men gewerkt met de aanname dat de mate van aquifer depletie gestuurd wordt door de aanwezigheid van residueel gas, dat een barrière vormt in de overgang van gas naar water. Gekeken is in hoeverre het waargenomen na-ijleffect verklaard kan worden door de hoeveelheid residueel gas. Andere adviezen zoals het quantificeren van de onzekerheden zijn deels terug te vinden in de Meet- en Regelrapportage, maar niet verder aan de orde geweest binnen LTS fase 1. Bij de toetsing van alternatieve hypothesen in LTS fase 2 zullen verschillende scenario’s voor aquifer depletie aan bod komen. Objectieve testmethodes moeten scenario’s accepteren danwel uitsluiten.</p>

<p><b>Modelling</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• “Study and review fundamental assumptions in Geertsma and van Opstal.”</li> <li>• “Consider anisotropic conditions in the overburden in the modelling.”</li> <li>• “Long-standing controversies on the realism of reservoir bottom uplift and rebound against gravity forces should be addressed.”</li> <li>• “The hypothesis that extraction of fluids causes reservoir compaction should not remain unchallenged. It could also lead to arching and increased friction along faults rather than an increase of effective stress.”</li> <li>• “Examine the fact that simulations assume that the reservoir deformed elastically.”</li> <li>• “De relatie tussen de diameter van de bodemdalingsschotel en de diepte waarop het reservoir ligt zou experimenteel getest moeten worden.”</li> <li>• “Statistical modelling of upper bound (worst case) for subsidence due to reservoir compaction.”</li> <li>• “Use experimental and theoretical methods to link elastic behavior and creep of reservoir rock.”</li> <li>• “Reduce the number of parameters in geomechanical modelling. Exploit spatio-temporal correlation in parameters such as pressure, compaction coefficient and permeability to achieve this.”</li> <li>• “Adopt the physics based RTCM model rather than the empirical time decay model in case both perform equally”</li> <li>• “Objectively validate/verify the conceptual validity of geomechanical models. Make clear where empiricism is relied upon.”</li> <li>• “Explain what would be the minimum deformation signal relevant to modelling.”</li> <li>• “Derive the nucleus of strain displacement functions associated with the new insights of Mossop (2015)”</li> <li>• “Modelling of temporal changes in spatial pressure distribution in reservoir pressure. Cusp-like reservoir depletion around wells may lead to misinterpretation of the overall reservoir depletion.”</li> <li>• “Numerical testing of scale-dependent diffusivity in the classical diffusion equation.”</li> <li>• “Propose a physical model for creep of Permian sandstone “</li> <li>• “Focus on different prediction models (3D deviatoric patterns), rather than different model parameters”</li> <li>• “Het overschatten van meetruis van geodetische data maakt dat veel modeloplossingen passen.”</li> </ul>	<p>- De hiernaast genoemde discussiepunten hebben betrekking op verder onderzoek/ testen van alternatieve modellen voor het voorspellen van de bodemdaling rond het gasveld Ameland, waarbij ook wordt gekeken naar het fenomenologisch RTCM model en naar complexere modellen. Opgemerkt dient te worden dat RTCM geen “physics based” model is. Gebruik van de huidige versie komt in feite neer op “parameter fitting”.</p> <p>- Aan de bovenste 2 bullets hiernaast is aandacht besteed in LTS fase 1. Voor de laatste drie bullets geldt dat er reeds onderzoek plaatsvindt in het kader van de Groninger gaswinning. Ook hiervoor geldt dat de onderzoekopzet en resultaten onderwerp van discussie moeten zijn binnen LTS fase 2.</p> <p>- Met betrekking tot de opmerkingen t.a.v. “cups-like reservoir depletion” is relevant dat er met “cupping” en “coning” in de “gebruikelijke “RE modellering” rekening wordt gehouden. Daarom wordt een put voor een druktest altijd geruime tijd ingesloten.</p>
<p><b>Geomatics</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• “Focus on idealisation noise rather than measurement noise. Point noise uncertainties of InSar persistent scatterers will be much larger than that of leveling benchmarks”</li> <li>• “Consider using SuRe software for spatio-temporal detecting prediction errors. “</li> <li>• “Develop a GPS noise model, similar to levelling or InSar”</li> <li>• “In geodetic analysis, where the uncertainty range or probability distribution is merely guessed, the implications for the modelling process needs to be recognized.”</li> <li>• “Leveling measurement noise and uncertainties in the coupling between these benchmarks and the top Peistocene should not be lumped together.”</li> <li>• “Explain why we need minimal sampling rate for proper modeling”</li> <li>• “Combine different types of geodetic data. Decide case-to-case what combination of data from different sources is most appropriate.”</li> <li>• “Evaluate the use of GPS to assess horizontal deformation”</li> <li>• “Fund development of a TNO capacity to derive cause by cause subsidence from double differences (SuRe or equivalent)”</li> </ul>	<p>- Voor de matching van modelberekeningen en geodetische data voor Ameland ligt een vergelijking tussen een 2D en een 3D berekening van de temporele ontwikkeling van hoogteverschillen voor de hand.</p> <p>- Software waarin de toetsing van geomechanische modellen tegen geodetische data geïntegreerd plaatsvindt is een stip op de horizon. Idealiter levert LTS fase 2 de functionele specificaties voor een dergelijke work-flow.</p>

### **Testen van alternatieve modellen in fase II**

In LTS fase 2 staat toetsing van voorspelde bodemdaling tegen geodetische data centraal. Aanbevelingen ten aanzien van de projectaanpak hebben daarom grotendeels betrekking op dat onderwerp. SC-leden schreven:

- “Comprehensively review the current methods, models, data and workflows”
- “As part of the problem analysis, study what is the range of possible outcomes? How can knowing the outcome improve predictability? How can theory be verified?”
- “Do not start with inversion or simulations until issues related to theoretical model assumptions are resolved.”
- “Discuss to understand why the in situ compaction/depletion ratio appears to be smaller and more constant than the one measured in the laboratory”
- “Patterns of spatio-temporal differences should be used as indications of what alternative constitutive law may generate measured subsidence”
- “Integrate geodesist and geodetic R&D into the subsidence modelling workflow”
- “Start the follow-up study with the explicit specification of the covariance matrix of geomechanical parameters and functional relations between these parameters and predicted subsidence under the different hypotheses”
- “Develop/choose a framework to make geodetic estimates of surface deformation, to compare them to model predictions (hypothesis testing)”
- “Compare purely geomechanical predictions produced without the use of geodetic data to geodetically measured subsidence.”
- “Avoid tests where both geomechanical and geodetic data are generated using the same depletion to subsidence relations.”
- “doe de confrontatie tussen geomechanisch model en geodetische metingen in het bodemdalingsdomein ,niet in dat van compactie. Vergelijk uitsluitend gemodelleerde tegen gemeten double differences op basis van volle covariantie matrices aan beide zijden van de vergelijking.”
- “Only use real data test cases, as they provide the only true reference for detecting errors in geomechanical prediction models.”
- “Consider empirical models besides physical models”
- “Geertsma and Van Opstal and Knothe equations produce different bowl shapes. The best approximation should be determined by real life verification.”
- “Consider using RTCM. “
- “When modelling, do not introduce different Green functions/rigid basement depths for the same overburden above gas and salt extraction at the same location.”
- “Investigate the volumetric relation between subsidence and compaction.”
- “Make sure to test based on spatial subsidence differences. Not poor quality of geodetic data, but the incorrect use of it causes a threat to future predictions.”
- “Do not use InSar data to match with model prediction at this stage because of its unresolved significant biases ”
- “Follow-up work should include testing of linear, bi-linear, time decay and rate type compaction models against the measured temporal behavior of both subsidence and compaction.”
- “Testing hypotheses in different circumstances (high/low heterogeneous porosity; with/without salt cover) may point out directions towards the correct constitutive law.”
- “It was agreed to test on real data. Do not simulate data.”
- “Use the B-method of testing. It finds the most likely hypothesis, even if hypotheses have of testing hypotheses of different dimensions”

- Waar gepleit wordt om geen inverse modellering toe te passen zolang er te veel onzekerheid is over de correctheid van de modellen, lijkt het vanuit de NAM optiek niet mogelijk om zonder data voorspellingen te doen. Een alternatieve middenweg kan zijn om bv een deel van de data te gebruiken voor model/scenario kalibratie en een ander deel te gebruiken voor model validatie. Daarbij staat NAM open voor alternatieve modellen zoals het RTCM model dat al door NAM gebruikt wordt in de M&R cyclus. Optimalisatie van modellen (fast models en proxies) zal een belangrijk onderdeel vormen voor LTS fase 2.

- De toepassing van de B-methode voor het vergelijken van geomechanische modellen moet in LTS fase 2 uitgebreid worden onderzocht.

<p><b>Ander onderzoek</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• “Check the possible use of InSar for studying sedimentation in the Wadden Sea”</li> <li>• “Include the role of sediment compaction in the study”</li> <li>• “Research sedimentation rates Wadden Sea (re-evaluation)”</li> </ul>	<p>- Dit type onderzoek valt buiten de scope van LTS fase 1/2.</p>
---	--

Het onderstaande schema is na afronding van de LTS fase 1 studie, in de voorbereiding op LTS fase 2 door één van de voormalige stuurgroepleden voorgesteld. Het betreft een mogelijk stappenplan voor het uitvoeren van LTS fase 2. Het is voorzien dat samen met de andere commentaren van de stuurgroepleden, dit voorgestelde stappenplan in de afstemming van het werkplan voor LTS fase 2 overwogen wordt.

<p><b>Een voorstel voor LTS fase 2:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Specify source and covariance of the subsidence prediction input data available before the start of production and those becoming available during production.</li> <li>2. Define the standard subsidence prediction formulae from planned production via pore pressure development in both gas and water bearing parts of the reservoir, increased effective stress on the rock matrix to predicted compaction and subsidence in time and place, using exclusively data available prior to production.</li> <li>3. Compute the covariance associated with the predicted spatio-temporal development of compaction and subsidence for Ameland according to the standard a priori null hypothesis exclusively using data available prior to the start of production.</li> <li>4. Define the standard subsidence prediction formulae from planned production via pore pressure development in both gas and water bearing parts of the reservoir, increased effective stress on the rock matrix to predicted compaction and subsidence in time and place, using exclusively geophysical data available at the time of prediction, i.e. including measured well pressures and production up to the time of prediction, but excluding geodetic observations.</li> <li>5. Predict the development of compaction and subsidence in space and time for each of the Ameland reservoirs according to the standard null hypothesis procedure given data available up to the time of prediction plus planned future production. Compute the associated covariance matrix of the predictions.</li> <li>6. Derive spatial subsidence differences from measured height differences with its associated covariance by an integrated 3D adjustment procedure such as SuRe.</li> <li>7. Test the difference between predicted spatial subsidence differences and the equivalent values derived from geodetic observations following the B-method of testing using full covariance matrices of measured and predicted results.</li> <li>8. Compute predicted differential subsidence according to each of the alternative hypotheses and test the results against the residuals of the null hypothesis adjustment by the B-method of testing. Alternative hypotheses include:       <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Skin effects distorting the dynamic relation between pressure, measured in the well and predicted reservoir pressure.</li> <li>b. Different pressure diffusion coefficient in gas bearing reservoir parts</li> <li>c. Different pressure diffusion coefficient in water bearing reservoir parts</li> <li>d. Overestimated depletion due to equidistant gridding of the highly cuspy spatial pressure distribution around extraction wells</li> <li>e. Delayed conversion of pressure depletion into effective matrix stress increase through arching around wells and friction build-up along faults.</li> <li>f. Subsidence bowl shape and volume related to a nucleus of strain according to Geertsma, Geertsma/van Opstal and Knothe.</li> <li>g. Volumetric subsidence development in time according to Geertsma's, rate type compaction and the time decay model.</li> <li>h. Slower pressure depletion and hence compaction of bottom and lateral aquifers</li> </ol> </li> <li>9. Compute the marginally detectable subsidence volume and volume rate error at five year intervals after realignment with measured subsidence.</li> </ol>
---