



> Retouradres Postbus 24037 2490 AA Den Haag

De minister van Klimaat en Groene Groei
drs. S. Th. M. Hermans
Postbus 20401
2500 EK Den Haag

Datum 28 november 2025
Betreft Advies over de modelontwikkeling van de SDRA voor het Groningen-
gasveld

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)

info@sodm.nl
www.sodm.nl

Behandeld door

5.1.2.e

T 5.1.2.e

Ons kenmerk

SODM / 101599970

Uw kenmerk

Bijlage(n)

4

Hooggeachte mevrouw Hermans,

Het Groningen-gasveld is in april 2024 gesloten. De laatste seismische dreiging- en risicoanalyse (verder: SDRA) voor het Groningen-gasveld is in het voorjaar van 2023 door de Nederlandse organisatie voor toegepast-wetenschappelijk onderzoek (verder: TNO) uitgevoerd. Sindsdien is er veel onderzoek gedaan naar de ontwikkeling van de seismische activiteit, onder andere omdat er aan het eind van de productieperiode en na de sluiting van het gasveld meer bevingen werden waargenomen dan verwacht. Begin 2025 heeft u SodM gevraagd om advies te geven over het verder ontwikkelen van de modellen achter de SDRA, volgens de nieuwste wetenschappelijke inzichten. Ik baseer mijn aanbevelingen in deze brief onder andere op het advies dat ik over een groot aantal van de studies heb uitgevraagd bij het KEM-subpanel.¹

SodM is tevreden te constateren dat het (tijdelijk) optreden van meer seismische activiteit dan verwacht zich niet heeft doorgezet en statistisch niet significant is gebleken. De uitkomsten van de vele studies die de laatste jaren gedaan zijn laten bovendien zien dat het seismisch risico niet hoger is dan op grond van de SDRA uit 2023 werd verwacht. Dat betekent dat de inzichten in de veiligheidssituatie in Groningen in verband met het seismisch risico niet zijn veranderd. Wel is er nu meer bekend over de ondergrondse processen die in het Groningen-gasveld optreden. In dat kader vindt SodM het belangrijk om ook de processen die tot seismische activiteit leiden in het watervoerend pakket ten noorden van het Groningen-gasveld nader te onderzoeken.

SodM kan zich voorstellen dat omwonenden ongemak of onrust ervaren, of ervaren hebben, door het (tijdelijk) afwijken van het aantal bevingen van de voorspelling. Ook het aanpassen van de modellen die leiden tot de voorspelling kan daaraan bijdragen. Mede daarom adviseert SodM om de SDRA-modellen niet

¹ Het subpanel van het Kennisprogramma Effecten Mijnbouw Advies, 'KEM sub-panel advice to SodM on the "Development of seismicity during pressure equilibration in the Groningen gas field", 06-02-2025. Dit advies is als bijlage toegevoegd aan deze brief.

te blijven doorontwikkelen voor het Groningen-gasveld als er, zoals nu het geval is, niet direct een andere veiligheidssituatie wordt verwacht.

De laatste jaren neemt de seismische activiteit zoals verwacht verder af. Dat biedt enerzijds ruimte om in Groningen te concentreren op het snel en goed realiseren van de versterkingsopgave en daarmee het verbeteren van het welzijn van omwonenden. Anderzijds kan de kennis die is opgedaan gedurende de ontwikkeling van de SDRA voor het Groningen-gasveld, nu ook gebruikt worden om andere soorten mijnbouw in Nederland veilig in te richten. SodM adviseert daarom om de opgedane kennis in te zetten bij andere soorten mijnbouw in Nederland. Dit is belangrijk om het gebruik van de ondergrond in de energietransitie veilig te doen plaatsvinden.

In deze brief leest u achtereenvolgens de achtergrond van dit advies en het advies zelf. In bijlage 1 vindt u de onderbouwing van de overwegingen van SodM hierbij. Bijgevoegd bij deze brief vindt u daarnaast een overzicht van de meegewogen studies (bijlage 2) en het KEM-subpanel advies over de studies naar de hoger dan verwachte seismische activiteit.

Achtergrond

Aanleiding tot onderzoek

SodM baseert zich in dit advies op verschillende studies die de afgelopen jaren gedaan zijn door diverse wetenschappelijke instituten. Een groot deel hiervan heeft zich voornamelijk toegespitst op het compactiemodel en het seismologisch bronmodel van de SDRA.² Aanleiding voor dit onderzoek was dat SodM in december 2021 constateerde dat het aantal aardbevingen in het Groningen-gasveld sinds het gasjaar 2016/2017 een trend van hoger dan verwachte seismische activiteit liet zien.³ Alleen in het gasjaar 2018/2019 was de activiteit niet hoger dan verwacht, terwijl in de gasjaren 2019/2020, 2021/2022 en 2022/2023 deze zelfs buiten de onzekerheidsbandbreedte kwam. Deze periode kwam overeen met de fase waarin de gaswinning werd afgebouwd, en waarin drukvereffening het leidende proces werd voor seismische activiteit.

Hoewel in 2021 nog niet kon worden vastgesteld dat er sprake was van een statistisch significante afwijking, had SodM, gezien de trend in deze afwijkingen, zorgen over de voorspellende waarde van de SDRA op de langere termijn. Deze was ontwikkeld voor, en gekalibreerd aan, een producerend veld. De waargenomen trend vroeg dan ook om een evaluatie of deze modellen ook de processen tijdens de fase van drukvereffening adequaat beschrijven. Als dit niet het geval zou blijken, zou een eventuele bijstelling van de SDRA-modelketen nodig zijn om ook ná sluiting van het Groningen-gasveld de seismische activiteit goed te kunnen voorspellen.

SodM heeft daarom de Nederlandse Aardolie Maatschappij (verder: NAM) gevraagd om te evalueren of de modellen waarmee de seismische activiteit

² De SDRA is een keten van modellen die het veiligheidsrisico van alle gebouwen als gevolg van de gaswinning in Groningen berekent. De SDRA bestaat uit een serie van acht complexe, opeenvolgende modellen. De uitkomsten van het ene model zijn de inputgegevens voor het volgende model.

³ SodM "Beoordeling SodM halfjaarrapportage seismiteit Groningen, overschrijding grenswaarde aardbevingsdichtheid & beving Garrelswaer" (OV-8077), 9 december 2021.

voorspeld wordt, goed genoeg zijn voor de fase van drukvereffening.⁴ Ook heeft SodM u destijds geadviseerd om hier nader onderzoek naar te laten doen door TNO.³ In de afgelopen jaren zijn er regelmatig bijeenkomsten geweest tussen de betreffende (onderzoeks)partijen, uw ministerie, het KEM-subpanel en SodM om de voortgang van deze onderzoeken te bespreken. De resultaten zijn vastgelegd in verschillende rapporten en wetenschappelijke publicaties (zie bijlage 2). Zo is er onder andere gekeken naar de tijdsafhankelijkheid van processen in het Groningen-gasveld, en of die een rol kunnen spelen of mogelijk hebben gespeeld in de ontwikkeling van de seismische activiteit. De studies laten zien dat er een vertraging lijkt te zijn geweest tussen de drukvereffening in het gasveld en de optredende seismische activiteit.

Behalve de studies naar de hoger dan verwachte seismische activiteit heeft SodM ook gekeken of de resultaten van andere studies effect hebben op de inschatting van het seismisch risico van het Groningen-gasveld. Zo is er een aantal KEM-studies uitgevoerd die zijn begeleid en beoordeeld door het KEM-panel^{5,6}. In KEM-36 is bijvoorbeeld de nieuwste versie van het grondbewegingsmodel voor Groningen geëvalueerd. In KEM-19b is onderzoek gedaan naar het seismisch risico in het watervoerend gesteentepakket (aquifer) ten zuidwesten van het Groningen-gasveld (KEM-19b). Hieruit blijkt dat de kans op seismische activiteit in deze aquifer klein is en dat deze ook met de tijd verder zal afnemen.

Huidige seismiciteit

De laatste voorspelling van de seismische activiteit, in de SDRA voor het gasjaar 2023/2024, komt beter overeen met de waargenomen aantallen bevingen en laat daardoor de trend van hoger dan verwachte seismische activiteit in de jaren daarvoor niet meer zien. Alle tot dan toe opgetreden seismische activiteit valt nu binnen de voorspelde bandbreedte: er is geen afwijking meer te zien. Dit komt doordat voor deze voorspelling ook de waargenomen seismische activiteit in de afwijkende jaren is meegewogen in de kalibratie van de modelparameters. Daardoor is het model beter afgestemd op de werkelijkheid.

Ook in de periode sinds de laatste voorspelling in 2023 is de gemeten seismische activiteit verder afgenomen. Het aantal waargenomen bevingen valt sinds 2023 ook binnen de verwachting.

De waarnemingen en de herkalibratie laten zien dat als tijdsafhankelijke processen een rol spelen in het Groningen-gasveld, het effect daarvan waarschijnlijk klein en kortdurend was. De huidige seismische activiteit laat namelijk geen afwijking meer zien van de voorspelling. Omdat de waarnemingen en het model inmiddels goed op elkaar aansluiten verwacht SodM in de toekomst geen grote tijdsafhankelijke effecten meer. Het meenemen van de bestudeerde tijdsafhankelijke processen zal dus waarschijnlijk niet leiden tot een substantieel

⁴ SodM brief aan NAM, "Verzoek tot doen van nader onderzoek naar de afwijking tussen de voorspelde en waargenomen seismische activiteit in het Groningengasveld", dd. 14 april 2022.

⁵ Het Kennisprogramma Effecten Mijnbouw heeft ook een wetenschappelijk panel van experts (KEM-panel) dat onderzoek naar mijnbouw vraagstukken in heel Nederland begeleidt en beoordeelt. Zie: kemprogramma.nl.

⁶ De aanleiding en uitkomsten van de studie en de beoordeling van het KEM-panel zijn te vinden op kemprogramma.nl: [KEM-36-Onderzoeksvraag-Vervolg-op-KEM-04,-de-data-gedreven-studie-naar-seismische-respons-op-3D-geologische-structurenphase-1-and-2](#) | [KEM programma](#) en [KEM-19b SW aquifer depletie, bodemdaling en seismiciteit na sluiting van het Groningen gasveld](#) | [KEM programma](#).

andere voorspelling van de seismische activiteit en het seismisch risico. SodM ziet daarom geen reden om de kennis over de tijdsafhankelijke processen nu verder te ontwikkelen in het kader van de SDRA voor het Groningen-gasveld.

Advies KEM-subpanel

Op 6 februari 2025 heeft het KEM-subpanel, op basis van de uitgevoerde onderzoeken in het kader van de hoger dan verwachte seismische activiteit, SodM geadviseerd over verdere modelontwikkeling van de SDRA. Het KEM-subpanel concludeert in dit advies dat het seismologisch model de seismische activiteit in het Groningen-gasveld al goed weet te voorspellen. Daarin zijn dan ook geen aanpassingen nodig. Wel adviseert het KEM-subpanel dat TNO een laatste SDRA uitvoert, zodat de meest recente kennis over alle deelmodellen daarin kan worden toegepast. Ook adviseert het KEM-subpanel om de kennis van het Groningen-gasveld te gebruiken en door te ontwikkelen voor seismische risicoanalyses voor andere soorten mijnbouw. Daarbij benadrukt het KEM-subpanel het belang van een risicogerichte, nationale aanpak.

Wat adviseert SodM?

SodM heeft de uitgevoerde studies en het KEM-subpanel advies over de hoger dan verwachte seismische activiteit bestudeerd. Deze zijn navolgbaar en van goede kwaliteit en vormen een goede basis voor onderstaand advies. U leest hieronder ook een korte toelichting van de belangrijkste overwegingen bij dit advies. In Bijlage 1 vindt u een uitgebreidere uitleg daarover.

Geen verder onderzoek nodig naar trend in seismische activiteit

Het herkalibreren van de voorspelling op de seismische activiteit die ook in de fase van drukvereffening heeft plaatsgevonden, heeft ervoor gezorgd dat er geen afwijking meer is tussen de waarnemingen en de voorspelling. Ook de bevingen die tegen het eind van de gaswinning optraden vallen nu binnen de onzekerheidsbandbreedte van de voorspelling. De hoger dan verwachte seismiciteit is dus niet statistisch significant gebleken.

De seismische activiteit sinds het stopzetten van de gaswinning is zoals verwacht verder afgenomen. De bevingen in de afgelopen jaren vallen ook binnen de voorspelde bandbreedte van de SDRA uit 2023. Deze trend in seismische activiteit geeft geen aanleiding tot verder onderzoek naar de modellen achter de voorspelling.

SDRA-modellen hoeven nu niet aangepast of verder ontwikkeld te worden

SodM onderschrijft het advies van het KEM-subpanel dat het seismologisch model in de SDRA goed in staat is om de seismische activiteit in het Groningen-gasveld te voorspellen. Ook omdat de waargenomen seismische activiteit nu overeenkomt met de modelvoorspelling ziet SodM daarom nu geen aanleiding voor verdere ontwikkeling van het seismologisch model.

SodM verwacht op dit moment ook niet dat verdere ontwikkeling van andere modellen in de SDRA, zoals het grondbewegingsmodel en het kwetsbaarheids- en gevolgmodel, zal leiden tot een andere inschatting van het seismisch risico. De ontwikkelingen die hierop hebben plaatsgevonden (bijvoorbeeld in KEM-36) leiden niet tot andere inzichten dan wat al is meegenomen in de SDRA van 2023 (zie bijlage 1). Het uitvoeren van een 'finale' SDRA, zoals het KEM-subpanel adviseert, zou volgens SodM nu alleen interessant zijn om de laatste wetenschappelijke ontwikkelingen toe te passen en om recht te doen aan het werk dat de afgelopen

jaren verzet is. Echter, omdat er geen substantiële veranderingen verwacht worden voor het seismisch risico vindt SodM dat op dit moment niet nodig.

Benut de opgedane kennis voor andere mijnbouw

SodM adviseert, net als het KEM-subpanel, om de rijke kennis van het Groningen-gasveld, de modelketen en de vergaarde data, breder te benutten. Zo kunnen de beschikbare kennis, modellen en data aangepast en toegepast worden om de risico's van het gebruik van de diepe ondergrond binnen de energietransitie in heel Nederland beter in te schatten. SodM adviseert om TNO te laten evalueren welke kennis van het Groningen-gasveld gebruikt, aangepast en/of doorontwikkeld kan worden om elders van toepassing te kunnen zijn. Het KEM-subpanel kan een rol spelen in het prioriteren van die toepassing en adviseren over de manier waarop dat gebeurt.

Onderzoek de seismische activiteit in de noordelijke aquifer

De belangrijkste uitkomsten van KEM-19b zijn dat het seismisch risico van de zuidwestelijke aquifer laag is, en dat deze met de tijd en met de afstand tot het gasveld verder afneemt. Zo worden er in de komende 30 jaar niet meer dan 3 aardbevingen met een kracht groter of gelijk aan 1,5 op de schaal van Richter verwacht. SodM zal ook in de toekomst de seismische activiteit in de zuidwestelijke aquifer in de gaten blijven houden en deze toetsen aan de verwachting uit KEM-19b. Ook als er seismische activiteit optreedt in de overige aquifers rondom het Groningen-gasveld zal SodM deze bestuderen en waar nodig besluiten om daar verder onderzoek naar te laten doen.

Op dit moment is behalve de zuidwestelijke aquifer alleen de noordelijke aquifer seismisch actief.⁷ Daar, in het gebied tussen Usquert en Warffum, lijkt de seismische activiteit de laatste jaren ook toe te nemen. SodM adviseert daarom om de lange termijn ontwikkeling van de seismische activiteit, de seismische dreiging en het seismisch risico in deze noordelijke aquifer nader te laten onderzoeken. Een dergelijk onderzoek kan op dezelfde manier worden uitgevoerd als het onderzoek naar de zuidwestelijke aquifer (KEM-19b) en hoeft geen direct effect te hebben op de SDRA van het Groningen-gasveld.

Ten slotte

Het kan in de toekomst nodig blijken om een nieuwe SDRA uit te voeren. Hoewel SodM op dit moment geen reden ziet voor verdere ontwikkelingen van de SDRA-modellen, lopen er nog verschillende onderzoeken naar de weerstand van gebouwen tegen trillingen en het onderzoek naar de invloed van wierden op de groundbeweging. Deze ontwikkelingen aan de bouwveiligheidskant van de SDRA zijn op dit moment nog niet meegenomen in dit advies, maar kunnen in de toekomst wel aanleiding geven tot aanpassingen van de modellen en mogelijk impact hebben op de seismische risico's. SodM zal u hierover na afronding van deze studies zo nodig nader adviseren.

⁷ Niet alle aquifers staan in verbinding met het Groningen-gasveld en dalen dus mee in druk. Daarvan is dus niet te verwachten dat er seismische activiteit optreedt door drukdaling of drukvereffening in het Groningen-gasveld. In andere aquifers kan de druk ook worden beïnvloed door andere mijnbouw, zoals ten zuiden van het Groningen-gasveld waar ook het Annerveen gasveld (productie gestopt in 2021) en de mijnbouw rond Zuidwending gelegen is. De drukcommunicatie tussen het Groningen-gasveld en de omliggende aquifers is onderzocht in de 'Groningen aquifer study' van de NAM in 2019.

Ik zou u daarnaast ook willen attenderen op het actueel houden van de gebouwendatabase die in de SDRA wordt meegenomen. Voor een goede inschatting van de actuele risico's moet de uitgevoerde versterking van gebouwen worden verwerkt in de gebouwendatabase.

Ik hoop u hiermee voldoende geïnformeerd te hebben. Vanzelfsprekend ben ik bereid om mijn advies verder toe te lichten.

Hoogachtend,

De Inspecteur-generaal der Mijnen,

namens deze:

5.1.2.e



drs. F. Kiewiet-de Jonge

Directeur Centrale Expertise en Toezicht

Bijlage 1: Overwegingen bij dit advies

Hieronder leest u een nadere toelichting van het advies van SodM. Hierin wordt een aantal conclusies uit de uitgevoerde studies in meer detail besproken.

Tijdsafhankelijke processen in het reservoir

De onderzoeken die zijn uitgevoerd naar de hoger dan verwachte seismische activiteit in het Groningen-gasveld laten zien dat de processen in het reservoir waarschijnlijk gedeeltelijk tijdsafhankelijk zijn. Dit wordt goed beschreven met een snelheidsafhankelijke relatie tussen drukdaling en compactie in plaats van een lineaire relatie in het compactiemodel.⁸ Een alternatief compactiemodel waarin alleen tijdsafhankelijkheid meeweegt, geeft een algeheel langzamere afname van seismische activiteit, waardoor deze in de voorspelling ook op de lange termijn hoger uitvalt dan eerder gedacht. Dat zou ook betekenen dat het seismisch risico hoger is dan eerder werd gedacht. Als de compactie in het Groningen-gasveld volledig tijdsafhankelijk is, dan zou er ook nu meer seismische activiteit moeten plaatsvinden dan voorspeld. Dit is niet het geval.

Daarnaast is onderzocht in hoeverre de seismische activiteit afhankelijk kan zijn van de snelheid waarmee gas is gewonnen.⁹ In dit model is het aantal bevingen dat ontstaat in een bepaald tijdsinterval afhankelijk van de snelheid waarmee de spanning wordt opgebouwd. Gebeurt dit snel, dan kunnen er meer bevingen optreden dan wanneer de spanningsopbouw langzaam plaatsvindt. Ook dit model kent een tijdsvertraging tussen de verandering in de spanning en de seismische activiteit. Hierdoor gaan ook maandelijkse fluctuaties in productiesnelheden, waardoor de snelheid van de spanningsopbouw wordt veranderd, een duidelijke rol spelen. Dit model, dat wordt toegepast in combinatie met het tijdsafhankelijke compactiemodel zoals hierboven beschreven, voorspelt een doorgaande, maar vertraagde afname van de seismische activiteit als reactie op de afname van de gaswinning. De voorspelling van dit model komt ook goed overeen met de waarnemingen van het afgelopen anderhalf jaar en met de voorspelling van de huidige SDRA voor de komende jaren.

De waargenomen seismische activiteit van het afgelopen anderhalf jaar en, zoals in de adviesbrief aangegeven, de meest recente modelkalibratie laten zien dat de trend van hoger dan verwachte seismische activiteit zich niet heeft voortgezet. De afgelopen twee jaar bevond de seismische activiteit zich weer rond de verwachtingswaarde van de modelvoorspelling. Waarschijnlijk betrof het dus een tijdelijke afwijking. SodM concludeert hieruit dat er inderdaad een vertraging lijkt te zijn geweest van de seismische activiteit ten opzichte van de drukvereffening. Hoewel dit goed voorspeld wordt door het model¹⁰ waarin verschillende tijdsafhankelijke effecten meegenomen worden, zijn de implicaties voor de modelvoorspelling voor de komende jaren zeer beperkt. Omdat er nu geen afwijking meer is van de modelvoorspelling en de modellen een vergelijkbare voorspelling voor de komende jaren geven (de afwijking was een tijdelijke vertraging) verwacht SodM niet dat de seismische activiteit en het seismisch risico

⁸ Aben, F.M., J. P. Pruiksmas, D. Kraaijpoel, S. Osinga, M. P. D. Pluymaekers (2025). A stress model for nonlinear reservoir compaction and application to the post shut-in Groningen gas field, *Geophysical Journal International*, Volume 241, Issue 3, Pages 1495–1518.

⁹ Kaveh, H., P. Battle, M. Acosta, P. Kulkarni, S. J. Bourne, and J. P. Avouac (2024). Induced Seismicity Forecasting with Uncertainty Quantification: Application to the Groningen Gas Field, *Seismol. Res. Lett.* 95 (2A): 773–790, doi: 10.1785/0220230179.

in het Groningen-gasveld de komende jaren hoger zullen zijn dan voorspeld in de SDRA van 2023.

SodM verwacht dat de seismische activiteit zoals voorspeld steeds verder zal afnemen. Als er in de toekomst weer afwijkingen waargenomen worden dan kan dat op dat moment reden zijn voor verder onderzoek en eventuele aanpassing van de modelketen. De in de afgelopen jaren uitgevoerde onderzoeken vormen daar dan een uitstekende basis voor.

Grondbewegingsmodel

In 2022 heeft NAM het nieuwste grondbewegingsmodel, GMMv7, opgeleverd. Deze is in de laatste SDRA uit 2023 nog niet toegepast, met name omdat de seismische dreiging in het model onderschat wordt. SodM heeft u op 16 oktober 2023¹⁰ geadviseerd om diezelfde reden het GMMv7 nog niet toe te passen in de SDRA. Ook in het KEM-36 onderzoek dat in 2024 is opgeleverd, waarin het GMMv7 geëvalueerd wordt, wordt de onderschatting van de seismische dreiging benoemd, maar de oplossing hiervoor is nog niet evident. SodM ziet op basis van deze studie geen reden om af te wijken van haar advies over GMMv7 uit 2023.

Taper of geen taper

De verschillende standpunten over het staartverloop van de Gutenberg-Richter relatie tussen magnitude en frequentie van optreden, zijn het afgelopen jaar door experts geëvalueerd. De experts benadrukken hierin het belang van simpliciteit in de keuze tussen een lineair staartverloop (geen taper) en een afgestompt verloop (taper). In de laatste SDRA is gekozen voor de meest conservatieve variant: geen taper. Dit betekent dat er mogelijk een overschatting van zwaardere bevingen wordt meegenomen in het seismologisch model. Omdat bij het implementeren van een afgestompt verloop van de Gutenberg-Richter relatie ook veel aannames gedaan zullen moeten worden, en omdat de experts adviseren om dat juist zo min mogelijk te doen, ziet SodM op dit moment geen aanleiding om dit op een andere manier te implementeren in de SDRA.

Seismische activiteit in de watervoerende lagen

In sommige watervoerende lagen rondom het Groningen-gasveld (de zogenoemde aanliggende aquifers) neemt de druk ook af vanwege de drukvereffening als gevolg van de gaswinning.¹¹ Dat kan ook daar leiden tot aardbevingen. In de afgelopen jaren is vooral de noordelijke aquifer, tussen Usquert en Warffum, seismisch actief. Ook in de omgeving van de stad Groningen is een aantal bevingen gemeten, wat heeft geleid tot KEM-19b, waarin onderzocht is in welke mate seismische activiteit daar in de toekomst nog zou kunnen optreden.¹²

Volgens KEM-19b zijn er in de afgelopen 20 jaar 6 bevingen geweest in de zuidwestelijke aquifer met een lokale magnitude (M_L) groter dan 1,5. Voor de komende 30 jaar is berekend dat de kans op een aardbeving boven de 1,5 per jaar steeds kleiner en dat er in totaal niet meer dan 3 van zulke bevingen zullen optreden. SodM kan de conclusies van de onderzoekers dat de seismische dreiging

¹⁰ SodM "Advies over toepassing grondbewegingsmodel versie 7" (kenmerk: 36573235), 16 oktober 2023.

¹¹ Groningen aquifer study, 2019, NAM.

¹² [KEM-19b SW aquifer depletie, bodemdaling en seismiciteit na sluiting van het Groningen gasveld | KEM programma](#) waarin ook wordt verwezen naar [KEM-19a Lange termijn vloeistofmigratie, putlekkage en hydromechanische risico's en monitorstrategie Groningen | KEM programma](#).

in de zuidwestelijke aquifer klein is en dat deze naar verwachting de komende tientallen jaren zal blijven dalen, volgen. Ook wordt duidelijk dat de seismische dreiging afneemt met de afstand van het Groningen gasveld.

Als er in het gebied waarin de zuidwestelijke aquifer zich bevindt nog extra spanningen zouden worden toegevoegd (bijvoorbeeld door het toepassen van een andere soort mijnbouw), zou heel lokaal wel een grotere kans op seismische activiteit kunnen optreden. Bij de overweging voor het toepassen van andere ondergrondse activiteiten in deze regio zal dus (vanzelfsprekend) rekening gehouden moeten worden met de al aanwezige spanning op breuken in dit gebied.

De resultaten van KEM-19b kunnen op zichzelf gezien worden als een voorspelling van de lokale seismiciteit en kunnen zo in de toekomst gebruikt worden om de gemeten seismiciteit in dit gebied aan te toetsen. Met het lage risico dat verwacht wordt ziet SodM niet dan ook geen reden om de uitkomsten van deze studie op te nemen in de SDRA voor het Groningen-gasveld.¹³

SodM merkt op dat behalve de zuidwestelijke aquifer, ook de noordelijke aquifer (gelegen tussen Usquert en Warffum) seismisch actief is. In het afgelopen jaar zijn daar relatief zware bevingen waargenomen, tot $M_L=2,2$. SodM verwacht niet dat daarmee het seismisch risico in dat gebied groter is dan gedacht, maar ziet wel waarde in het nader onderzoeken van dit gebied, op eenzelfde manier als voor de zuidwestelijke aquifer gedaan is. De ontwikkeling van seismische activiteit in dit gebied kan namelijk anders zijn dan in het gasveld zelf. SodM adviseert een vergelijkbaar onderzoek voor deze aquifer, waaruit duidelijk wordt wat de lokale seismische dreiging en het risico is, zou daarom gewenst zijn. Ten aanzien van alle overige aquifers rondom het Groningen gasveld zal SodM de komende tijd (in het kader van de nazorg) systematisch bekijken in hoeverre nader onderzoek noodzakelijk is en u hierover waar nodig nader adviseren.

Seismische risicoanalyses voor andere ondergrondse activiteiten

SodM ziet dat de risicoanalyses voor andere ondergrondse activiteiten elders in Nederland nog relatief minder ver ontwikkeld zijn, terwijl veel van de kennis en modelontwikkeling die in Groningen is opgedaan, hiervoor ingezet zou kunnen worden. SodM vindt het essentieel om nu in te zetten op een betere verkenning en analyse van de seismische risico's voor deze activiteiten en dus het benutten van de kennis die voor Groningen is opgedaan. Dit is belangrijk in het kader van voorzorg en omdat de overheid in de energietransitie sterk inzet op ander gebruik van de ondergrond. SodM denkt ook dat de tijd hier rijp voor is, omdat de seismische activiteit in het inmiddels ingesloten Groningen-gasveld sterk afneemt en de voorspelling van seismische activiteit goed functioneert.

Veiligheid in Groningen

De veiligheidssituatie in Groningen in het kader van de voormalige gaswinning uit het Groningen-gasveld heeft als belangrijke randvoorwaarde dat de huizen van omwonenden aan de veiligheidsnorm voldoen. Om dat te kunnen borgen is de versterkingsopgave ingericht. Toen de gaswinning afnam, nam ook het seismisch risico af. De uitgevoerde studies laten zien dat deze dalende trend zich zoals verwacht blijft doorzetten nu het gasveld definitief gesloten is.

¹³ De versterkingsopgave houdt niet op aan de rand van het Groningen-gasveld maar strekt zich ook uit tot in de aquifers.

SodM kan zich voorstellen dat afwijkingen van de modelvoorspelling en aanpassingen van de achterliggende modellen vragen en onzekerheid oproepen bij omwonenden. Ook daarom adviseert SodM om de SDRA-modellen niet te blijven door ontwikkelen als er niet direct een andere veiligheidssituatie verwacht wordt.

Bijlage 2 Lijst van uitgevoerde en meegewogen studies

SodM heeft de volgende studies bestudeerd en meegewogen in dit advies:

- KEM-19b (beoordeeld door het KEM-panel)
- KEM-36 (beoordeeld door het KEM-panel)
- De reviews van twee experts over de 'b-value taper' (confidentieel)
- De studies naar de hoger dan verwachte seismische activiteit, zoals gedeeld met het KEM-subpanel (lijst hieronder)

Onderstaande literatuurlijst (toelichting in het Engels) is meegestuurd met het adviesverzoek aan het KEM-subpanel. Daarbij zijn ook nog een aantal andere documenten meegestuurd:

- Statusrapportage TNO, 2023
- Statusrapportage TNO, 2024
- NAM Progress report: Development seismicity during pressure equilibration in the Groningen gas field, July 2024 (bijlage 4)
- Discussion of the application of rate dependent compaction models to the Groningen gas field. Florian Lehner, Teng Fong Wong, Anthony Mossop, Peter Schutjens, Chris Spiers, Mateo Acosta and Jean-Phillipe Avouac, August 2024. <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/e3fd5d83-4f40-4004-b1dd-f2c2960cbb0e>

In het advies van het KEM-subpanel zelf is de volledige literatuurlijst opgenomen zoals die door het KEM-subpanel bestudeerd is.

Relevant studies commissioned by NAM

Recalibration of seismicity:

- [1] Seismicity Recalibration 2023, NAM, Valesca Peereboom and Marc Broersma (Feb 2023). <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/8b90b8b6-bbbc-489d-993a-d3a9cec866b2>
- [2] Recalibration of the Seismicity Model, NAM, Valesca Peereboom and Marc Broersma (Feb 2023). <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/23a87270-9d7c-40cd-a03f-f9d86729a1f2>

Dynamic reservoir model:

- [3] Groningen Dynamic Model Update 2023, NAM, Anke Jannie Landman, July 2023. <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/b77a608e-a83c-4857-a75b-1da910bdc4b9>
- [4] Evaluatie Monitoring Strategie Groningenveld, Anke Jannie Landman and Jan van Elk, June 2022. <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/8126390a-c6e4-4de2-b0a5-8cf1c94ca3c0>
- [5] Recent Reservoir Pressure Measurements in the Groningen gas field Anke Jannie Landman, March 2024. <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/8126390a-c6e4-4de2-b0a5-8cf1c94ca3c0>

app.nl/reports/download/groningen/en/107baa38-767e-494a-b70a-b30c142bf962

- [6] An integrated framework for surface deformation modelling and induced seismicity forecasting due to reservoir operations, H. Meyer, J.D. Smith, S.J. Bourne and J.P. Avouac (2023), Geological Society, London, Special Publications 528 (1), SP528-2022-169. <https://doi.org/10.1144/SP528-2022-169>

Delay in compaction:

- [7] The effect of loading rate on mechanical behavior and deformation mechanisms in Slochteren sandstone, Mark Jefferd, Taka Shinohara, Ronald P. J. Pijenburg, Suzanne J. T. Hangx, Christopher J. Spiers, 25 November 2021.
- [8] Compaction in Slochteren sandstone of the Groningen Gas Field, Utrecht University, Suzanne Hangx, August 2023. <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/9fed8939-687d-49ec-bf45-0cb622946a20>
- [9] Rate-dependent compaction models for reservoir rock, Florian Lehner, Teng-Fong Wong, Anthony Mossop, Peter Schutjens and Mateo Acosta, June 2024.
- [10] Reconciling the long-term relationship between reservoir pore pressure depletion and compaction in the Groningen region. Smith, J. D., Avouac, J.-P., White, R. S., Copley, A., Gualandi, A., & Bourne, S. (2019), Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124, 6165–6178. <https://doi.org/10.1029/2018JB016801>.
- [11] Insar monitoring of elastic and inelastic deformation in compacting reservoir due to surface operations, Y. Li, M. Acosta, K. Sirorattanakul, S.J. Bourne, and J.-P. Avouac, submitted to Remote Sensing of Environment.
- [12] Shinohara, Takahiro and Jefferd, Mark A. and Spiers, Christopher J. and Hangx, Suzanne J. T., The Effect of Strain Rate on Inelastic Strain Development in Porous Sandstones Deformed Under Reservoir Conditions. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4778411> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4778411>
- [13] Reconciling the long-term relationship between reservoir pore pressure depletion and compaction in the Groningen region. Smith, J. D., Avouac, J.-P., White, R. S., Copley, A., Gualandi, A., & Bourne, S. (2019), Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124, 6165–6178. <https://doi.org/10.1029/2018JB016801>.
- [14] Nederlandse Aardolie Maatschappij (2020) Groningen long term subsidence forecast. NAM report EP202008201822 <https://nam-onderzoeksrapporten.dataapp.nl/reports/download/groningen/en/d8970d78-f51a-4a3b-85d4-f80f42d055af>
- [15] Bierman, S., Towe, R. (2020) Statistical methodology for forecasting of subsidence above the Groningen gas field For the Rate Type Compaction isotach Model (RTCiM) for reservoir compaction. Shell report SR.20.00973 <https://nam->

onderzoeksrapporten.dataapp.nl/reports/download/groningen/en/78d6b182-87d8-4f92-b76b-6fdbce28510d

Delay in earthquake nucleation:

- [16] Earthquake nucleation characteristics revealed by seismicity response to seasonal stress variations induced by gas production at Groningen, M. Acosta, J.P. Avouac, J.D. Smith, K. Sirorattanakul, H. Kaveh and S.J. Bourne (2023), Geophysical Research Letters 50 (19), <https://doi.org/10.1029/2023GL105455>.
- [17] Stress-based forecasting of induced seismicity with instantaneous earthquake failure functions: Applications to the Groningen gas reservoir, J.D. Smith, E.R. Heimisson, S.J. Bourne and J.P. Avouac (2022), Earth and Planetary Science Letters 594, 117697. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117697>
- [18] Coulomb threshold rate-and-state model for fault reactivation: application to induced seismicity at Groningen, E.R. Heimisson, J.D. Smith, J.P. Avouac and S.J. Bourne (2022), Geophysical Journal International 228 (3), 2061-2072. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab467>

Delay due to aftershocks:

- [19] Aftershock analysis of Groningen earthquake catalogues using the method of Zaliapin and Ben-Zion, Steve Oates, June 2023. <https://nam-onderzoeksrapporten.dataapp.nl/reports/download/groningen/en/8e625c40-322d-41df-82a2-6edce23155ef>
- [20] Burst of fast propagating swarms of induced earthquakes at the Groningen gas field, K. Sirorattanakul, J.D. Wildig, M. Acosta, Y. Li, Z.E. Ross, S.J. Bourne and J.-P. Avouac, 2024, manuscript submitted to Seismological Research Letters.
- [21] Research Note: Groningen seismicity catalog generation, John Wilding, March 2023.
- [22] Enhanced catalogue Groningen seismicity, John Wilding, March 2023.

Relevant references to alternative, published seismological models for Groningen

- [1] Kühn D, Hainzl S, Dahm T, Richter G, Vera Rodriguez I. A review of source models to further the understanding of the seismicity of the Groningen field. Netherlands Journal of Geosciences. 2022;101:e11. [doi:10.1017/njg.2022.7](https://doi.org/10.1017/njg.2022.7)
- [2] Dempsey, D. E., and J. Suckale (2023). Physics-Based Forecasting of Induced Seismicity at Groningen Gas Field, The Netherlands: Post Hoc Evaluation and Forecast Update, Seismol. Res. Lett. 94(3), 1429-1446, <https://doi.org/10.1785/0220220317>.
- [2] Dempsey, D. E., and J. Suckale (2017). Physics-based forecasting of induced seismicity at Groningen gas field, the Netherlands. Geophysical Research Letters. <https://doi.org/10.1002/2017GL073878>
- [3] Zöller, G., and S. Hainzl (2022). Seismicity Scenarios for the Remaining Operating Period of the Gas Field in Groningen, Netherlands, Seismol. Res. Lett. 94(2A), 805-812, <https://doi.org/10.1785/0220220308>.

- [4] Molly Luginbuhl, John B Rundle, Donald L Turcotte, Natural time and nowcasting induced seismicity at the Groningen gas field in the Netherlands, *Geophysical Journal International*, Volume 215, Issue 2, November 2018, Pages 753–759, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy315>
- [5] Richter, G., Hainzl, S., Dahm, T. et al. Stress-based, statistical modeling of the induced seismicity at the Groningen gas field, The Netherlands. *Environ Earth Sci* 79, 252 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08941-4>
- [6] Lele, Suvrat P., Hsu, Sheng-Yuan, Garzon, Jorge L., DeDontney, Nora , Searles, Kevin H., Gist, Grant A., Sanz, Pablo F., Biediger, Erika A., and Bruce A. Dale. "Geomechanical Modeling to Evaluate Production-Induced Seismicity at Groningen Field." Paper presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2016. doi: <https://doi.org/10.2118/183554-MS>
- [7] DeDontney, N. & Lele, S., 2018. Impact of production fluctuations on Groningen seismicity – geomechanical modelling using rate and state friction. Technical report, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV. Available at <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/6b2e9b94-a995-4089-864a-67ec5ffda839>
- [8] Lanz, F., Bisdorn, K., Barbaro, E., Limbeck, J., Park, T., Harris, C. & Nevenzeel, K., 2019. Evaluation of a machine learning methodology for spatio-temporal induced seismicity forecasts within the Groningen field - machine learning. Technical report, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV. Available at <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/e5535713-46e2-4523-a479-4124f674c55f>
- [9] Limbeck, J., Lanz, F., Barbaro, E., Harris, C., Bisdorn, K., Park, T., Oosterbosch, W., Jamali-Rad, H. & Nevenzeel, K., 2018. Evaluation of a machine learning methodology to forecast induced seismicity event rates within the Groningen field. Technical report, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV. Available at <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/d5be89f6-fcea-4237-bc07-6cda25e151d9>
- [10] Shapiro, S. A. (2018). Seismogenic index of underground fluid injections and productions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 7983–7997. <https://doi.org/10.1029/2018JB015850>
- [11] Zbinden, D., Rinaldi, A.P., Urpi, L. & Wiemer, S., 2017. On the physics-based processes behind production-induced seismicity in natural gas fields. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 122(5): 3792–3812. <https://doi.org/10.1002/2017JB014003>