



Effect van drukhandhaving door injecteren op het seismische risico (KEM24/ IUC202003010)

Rapport A |

1020-169309.R01 01 | 30 September 2022

Klant: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat

Partner: DynaFrax



Document Controle

Document Informatie

Project Titel	Studie naar het effect van drukhandhaving door injecteren op het seismische risico
Document Titel	Effect van drukhandhaving door injecteren op het seismische risico (KEM24/ IUC202003010)
Fugro Project No.	1020-169309
Fugro Document No.	1020-169309.R01
Versie Nummer	01
Status	Definitief

Client Information

Klant	Klant: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Klant Adres	Procurement Office, Postbus 93144, 2509 AC Den Haag
Klant Document No.	KEM24/ IUC202003010

Revisie Historie

Versie	Datum	Status	Commentaar en inhoud	Opgesteld door	Controle door	Vrijgegeven door
01	30 September 2022	Definitief	Ter acceptatie	Fugro	DynaFrax	Project Management

Project Team

Naam	Onderdeel
Fugro	Project Management, Geologisch en dreiging/risico team, WP0 en WP5, verzamelrapport
DynaFrax	Technisch Project Management, WP1 tot WP5, deel van WP0
Dr. ■■■	Review gedurende eerste fase van de studie, reservoir engineering en overall review
Prof. ■■■	Externe review van rapport B

1. Inleiding

Fugro ontving van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat de opdracht voor het uitvoeren van een studie voor het Kennisprogramma voor de Effecten van Mijnbouw. Dit programma, afgekort KEM (www.kemprogramma.nl) is een opvolging van de aanbeveling van de Onderzoeksraad voor Veiligheid (OVV) en heeft tot doel om de kennis over de dreiging en risico van mijnbouwactiviteiten in Nederland te vergroten. KEM 24 is een studie naar het effect van drukhandhaving door gas- en/of vloeistofinjectie op het seismische risico. Het KEM 24 team bestaat uit internationale specialisten vanuit verschillende vakgebieden. Onze partner voor deze studie is DynaFrax; zij zijn experts in het gekoppeld modelleren van dynamica van breuken in gesteenten en dreiging en risicoanalyses. DynaFrax is een spin-off van het Helmholtz Centre Potsdam, German Research Centre for Geosciences (GFZ).

Wereldwijd leidt de winning van aardgas uit poreuze reservoirs tot bodemdaling en geïnduceerde aardbevingen. Geïnduceerde aardbevingen worden over het algemeen veroorzaakt door het verschuiven van breuken, door drukafname en drukverschillen (direct en indirect via compactie). Injectie gedurende of na de winning van gas is een maatregel die de druk in het gasveld kan beheersen en daardoor de compactie (in het gasveld) en bodemdaling (op maaiveldniveau) kan beperken. Deze ingreep kan resulteren in een kleiner risico op geïnduceerde aardbevingen vergeleken met scenario's zonder injectie en maakt het mogelijk om de gaswinning te verhogen of voort te zetten.

Doel van de studie

In Nederland heeft gaswinning bij tientallen velden geleid tot aardbevingen. Deze KEM-studie is bedoeld als proof of concept om het netto voordeel te kunnen inschatten van injectie om het risico van aardbevingen en de bodemdaling te minimaliseren. In 2020 heeft het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (hierna: de klant) het Groningenveld voorgesteld om het concept van injectie te onderzoeken, niet omdat het daadwerkelijk wordt overwogen om injectie toe te passen in het Groningenveld, maar omdat er veel informatie over dit gasveld beschikbaar is: geologie, aardbevingen, hoeveelheid gaswinning en reservoirdruk. Dit maakt het mogelijk om resultaten van modelsimulaties te vergelijken met waarnemingen.

Het eerste doel van de studie is om te onderzoeken en te identificeren wat de beste methode is om het effect van injectie op het verwachte seismische risicoprofiel te modelleren en te kwantificeren. Er wordt gekeken naar twee hoofdonderdelen:

- (1) verschillende injectiestoffen (N_2 , CO_2 en water) of een mix van aardgas en een injectiestof, en
- (2) verschillende injectie configuraties, inclusief het hergebruiken van bestaande productiefaciliteiten.

Het tweede doel is om een betrouwbare methode te vinden om te beoordelen of vloeistof- of injectie zelf leidt tot extra aardbevingen en om te bepalen welke factoren, omstandigheden of injectie

configuratie en volume de kans vergroten op aardbevingen. Het overkoepelende doel is om te bepalen of het netto effect van injectie op het seismisch risicoprofiel positief kan zijn en om aanbevelingen te geven hoe de risico afname kan worden geoptimaliseerd tegen zo laag mogelijk kosten.

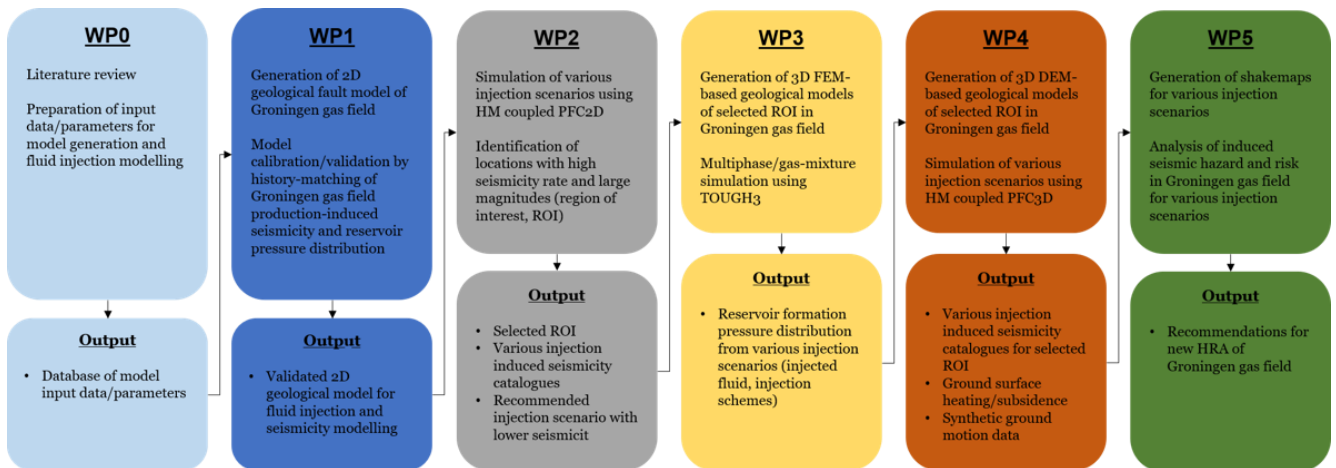
In het verleden is onderzoek gedaan door TNO en NAM op de haalbaarheid van drukhandhaving door grootschalig injectie (2013-2016). Er werd geconcludeerd dat met injectie de reservoirdruk van leeg rakende velden, zoals het Groningenveld, kan worden gehandhaafd en dat injectie technisch haalbaar is. Echter, het netto-effect van grootschalige injectie op het seismisch risicoprofiel is niet gekwantificeerd en het seismisch risico dat injecteren met zich meebrengt is alleen op een kwalitatieve manier onderzocht. Daarom is het onbekend of injectie gebruikt kan worden om het seismisch risico in leeg rakende gasvelden te minimaliseren. Een haalbaarheidsstudie voor het Groningen-gasveld (NAM, 2016) duidt erop dat het nauwelijks mogelijk is om op korte termijn een grootschalige injectieoperatie uit te voeren, vanwege de enorme investeringen die nodig zijn voor het produceren van grote volumes injectiestof (5 miljard Euro), en ook vanwege de tijd die nodig is om de infrastructuur te bouwen. Er is daarom door NAM besloten om hier niet verder mee door te gaan. Echter, verschillende experts beargumenteren om deze optie nader te onderzoeken, vooral voor het Groningen-gasveld. Dat zou een uitbreiding noodzakelijk maken van het huidige seismische dreigings- en risicoanalyse (HRA) model dat gebruikt wordt voor het beoordelen van het seismisch risico door gaswinning uit het Groningen-gasveld. Dit model is ontwikkeld door NAM en omgebouwd door TNO en heet nu SDRA. De huidige versie heeft niet de mogelijkheid om het effect van injecteren op het seismisch risico te onderzoeken.

De onderzoeksvragen van de studie zijn als volgt:

1. Wat zijn mogelijke injectiescenario's voor drukhandhaving gedurende winning of voor het minimaliseren van drukverschillen in het veld nadat de productie is gestopt?
2. Wat zijn de reservoirspanningen en -drukken voor verschillende injectiescenario's (van vraag 1) rondom injectieputten en over het hele gasveld?
3. Hoe moet de Groningen seismische module in de SDRA worden aangepast voor drukverhoging en drukverlaging?
4. Wat is het effect van injecteren op het totale seismische risico?
5. Wat is het effect van injecteren op aardbevingen nabij injectieputten?
6. Wat is de optimale configuratie van injectiebronnen?
7. Wat is het effect van injectie op seismiciteit en wat zijn de aanbevelingen voor het Groningen HRA model?

2. Opzet van de studie

De stappen van dit project zijn verdeeld over zes werkpakketten, zoals weergegeven in figuur 1. Deze werkpakketten beschrijven de werkstroom, van het genereren van het 2D geologisch model van het Groningen-gasveld tot seismische dreigingskaarten voor de grootste gesimuleerde aardbevingen.



Figuur 1: Werkpakketten en hun relaties.

WP0: Review van beschikbare studies en verzameling van invoer data/parameters voor Groningen-gasveld modellering

WP0 is de voorbereidingsfase waarin eerdere studies met betrekking tot het Groningen-gasveld zijn bestudeerd ter voorbereiding van de datasets die nodig zijn voor het numeriek model van het Groningen reservoir.

WP1: Modelleren van geïnduceerde seismiciteit in het Groningen-gasveld, met gebruik van 2D modellering van hydromechanisch gekoppelde discrete elementen

In de eerste fase van dit project is 2D modellering van hydromechanisch gekoppelde discrete elementen (Yoon et al., 2014) gebruikt om de seismiciteit te simuleren ten gevolge van drukverlaging in het Groningen-gasveld. We modelleerden het gehele Groningen-gasveld met een grootte van 40 x 50 km, inclusief de belangrijkste reservoirbreuken.

De historische gasproductie is nauwkeurig gesimuleerd, om veranderingen in de geomechanische processen van het breuksysteem te monitoren. De modellering genereert een seismische catalogus. Deze catalogus is vergeleken met geobserveerde aardbevingen die zijn gerapporteerd door KNMI, om het geologische model verder te verfijnen. Het model met de beste overeenkomst qua drukverlaging en seismiciteit is gebruikt om injectiescenario's te ontwerpen, met het doel om grote gebieden met drukverlies te compenseren en het aantal aardbevingen te verminderen.

WP2: Modelleren van verschillende injectiescenario's in het Groningen-gasveld en seismiciteit, met gebruik van 2D modellering van hydromechanisch gekoppelde discrete elementen

Na het modelleren van de geïnduceerde aardbevingshistorie zijn meerdere injectiescenario's gesimuleerd met PFC2D, om te begrijpen hoe het breuksysteem zou reageren op injectie. Deze scenario's zijn ontworpen met de intentie om de reservoirdruk te verhogen richting de oorspronkelijke druk, zodat voor een extreem injectiescenario kan worden beoordeeld wat het effect op seismiciteit is nabij de injectieputten en in de rest van het gasveld. De injectielocaties zijn gekozen in het centraal oost cluster, nabij het gebied met de grootste drukverlaging. Er zijn scenario's doorgerekend met en zonder simultane productie op andere locaties. Er zijn niet alleen toekomstige scenario's doorgerekend, maar ook is het effect op seismiciteit gesimuleerd als er eerder begonnen was met injecteren.

WP3: Modelleren van meergefasige gasmengsel injectie met TOUGH3

In dit werkpakket is injectie van stikstof en CO₂ in een reservoir met een mengsel van aardgas en water gemodelleerd met TOUGH3 software. De genoemde injectiegassen en hun menging met aardgas en water in een reservoir zijn getest. Het verloop van de drukverandering in het reservoir is daarna gebruikt in de PFC2D modellering.

WP4: Modelleren van breuk activering door injectie met 3D modellering van hydromechanisch gekoppelde discrete elementen

Breukactivering door injectie is gemodelleerd in een PFC3D model. De 3D modellering is bedoeld om de dynamische reactie van nabijgelegen breuken op injectie te simuleren, met name in de omgeving van Loppersum.

WP5: Beoordeling van geïnduceerde seismische dreiging

De numerieke seismische catalogus die in WP2 is gegenereerd is geanalyseerd om te komen tot een geïnduceerde seismische dreiging van het Groningen-gasveld. De dreigingsanalyse is uitgevoerd met de uitkomst van de PFC2D modellering, die is afgestemd met de opdrachtgever en het KEM-panel in 2021 (gepresenteerd in de bijlage van Rapport B). Daarna is de ontwikkeling van de modellen door DynaFrax doorgedaan. Zoals afgesproken met de opdrachtgever, zijn er geen aanvullende dreigingsanalyses uitgevoerd op basis van de laatste output van de PFC2D modellering, vanwege de onzekerheid van de output van de PFC2D analyses.

3. Producten

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de technische rapporten waaruit de uitkomsten van dit project bestaan.

Tabel 3.1: Overzicht van technische rapporten

Technisch rapport no.	Titel	Rapport
1020-169309.R01 V01, 30 september 2022	KEM-24 Effect van drukhandhaving door injecteren op seismische risico <i>Verzamelrapport</i>	Rapport A hoofdauteur: Fugro
KEM24 Eindrapport, 30 september 2022	KEM-24 WP0 to WP4 Effect van drukhandhaving door injecteren op het seismisch risico <i>Simulering van seismiciteit door productie en injectie met PFC2D modellering van het Groningen geologisch breuk model, inclusief externe review</i>	Rapport B hoofdauteur: DynaFrax
172147-REP01- FNV_SHA_KEM24 V03, 30 september 2022	KEM-24 WP5 Effect van drukhandhaving door injecteren op seismische risico <i>Seismische dreigingsanalyse</i>	Rapport C hoofdauteur: Fugro

De data die gebruikt is als invoer voor de studie en de databestanden die door het KEM24 team zijn gegenereerd zullen digitaal ter beschikking worden gesteld aan de opdrachtgever en het KEM. Vanwege de hoeveelheid en grootte zal de data separaat worden geleverd.

Gedurende de studie zijn enkele veranderingen ten opzichte van de oorspronkelijke offerte overeengekomen met de opdrachtgever, hetgeen een verklaring is voor het feit dat de rapporten, planning en antwoorden niet volledig aansluiten bij de oorspronkelijke scope en planning:

- Nadat Fugro het WP0 rapport als invoer voor DynaFrax had opgesteld, is er aanvullende informatie en data verzameld door DynaFrax. Daarnaast is in overleg met interne en externe deskundigen informatie vastgesteld. Beide worden gerapporteerd door DynaFrax.
- Er is veel tijd en energie besteed aan WP1 en WP2. Hoewel de eerste resultaten veelbelovend waren, bleek het moeilijk te zijn om een acceptabele overeenstemming te bereiken tussen berekende en waargenomen verdeling van seismiciteit en reservoirdrukken. Desondanks werd er significante vooruitgang geboekt door het verder aanpassen van het model aan bekende en aannemelijke eigenschappen, hetgeen leidde tot een complexer model.
- De 3D analyses van WP3 en WP4 bleken alleen mogelijk voor een relatief klein gebied en met een minder complexe breukstructuur, vanwege reken-technische beperkingen. Het was niet mogelijk om verticale processen zoals compactie in het model in te bouwen.
- WP5 is uitgevoerd door Fugro gebaseerd op tussentijdse modelresultaten van DynaFrax (zie bijlage in rapport B). Vanwege de grote onzekerheid van de uitvoer van DynaFrax, was het niet relevant om het WP5 rapport af te actualiseren op de latere resultaten van DynaFrax. De overall conclusies van WP5 zijn meegewogen in dit verzamelrapport A tezamen met de resultaten van DynaFrax.

4. Samenvatting van studieresultaten

Op basis van de beste inschatting van geofysische parameters en drukverloop in de verschillende delen van het gasveld hebben we geprobeerd om de door gaswinning geïnduceerde aardbevingen van de afgelopen 60 jaar, over de periode van 1960 tot 2020, te simuleren. De ruimtelijke verdeling en orde-grootte van seismiciteit van de eerste modellen kwamen overeen met de observaties van KNMI, hetgeen betekent dat de 2D simulaties in staat zijn om aardbevingen op locaties te simuleren waar de breukspanningen kritiek waren. Echter, het (gemiddelde) drukverloop in het veld bleek niet te kloppen: de gemiddelde drukverlaging in het model werd onderschat en de randen van het reservoirmodel waren te doorlatend. Het effect was dat bij stoppen van productie de druk op de gesloten productielocaties zo snel opliep dat injecteren geen meerwaarde zou hebben.

Het bleek nodig om alle ruim 300 productiebronnen afzonderlijk te modelleren om de gemiddelde drukverlaging meer in lijn te brengen met de metingen. Dit was in eerste instantie als niet relevant beschouwd en ter vereenvoudiging was slechts een deel van de bronnen gesimuleerd. Ook werd de buitengrens van het gasveld ondoordringbaar gemaakt en de doorlatendheid van de breuken werd afgestemd op de geologische verschuiving over de breuk.

De gemiddelde drukhistorie klopte door deze aanpassingen aanzienlijk beter met de waarnemingen, en de ruimtelijke verdeling en de seismiciteit kwamen deels overeen met de KNMI aardbevingscatalogus, hoewel minder aardbevingen werden gegenereerd met de PFC2D simulaties dan opgetreden tussen 1992 en 2020. Uiteindelijk kon het model de ruimtelijke verdeling van aardbevingen boven een lokale magnitude van ML 2.0 goed berekenen, met een ruimtelijke verdeling die overeenkwam met die van de KNMI aardbevingscatalogus. Echter, het model vertoonde niet de sterke toename van seismiciteit na 30 tot 40 jaar gaswinning, zoals waargenomen. Dit kan mogelijk worden verklaard door het feit dat de verticale component en compactie, die in de loop van de tijd oploopt, niet direct is meegenomen in het 2D model.

We hebben toekomstige seismiciteit gesimuleerd, ervan uit gaande dat de gaswinning stopt in het jaar 2020 en dat alle productiebronnen werden gesloten. Er werd erg weinig seismiciteit gegenereerd tijdens de periode na de sluiting van het Groningen-gasveld. De injectiescenario's die zijn ontworpen zijn qua seismiciteit vergeleken met het scenario zonder injectie. Zowel CO₂ als stikstof-injectie zijn getest. De stikstof injectie bleek veel effectiever te zijn, omdat CO₂ beter oplosbaar is in water. Ook maakt stikstof injectie het gas niet onbruikbaar, omdat het al een significant percentage stikstof bevat. Bijmenging met hoogcalorisch gas zou dan uitkomst kunnen bieden om de kwaliteit te handhaven.

De injectiesnelheid is relatief hoog gekozen in alle injectiescenario's, om meer zekerheid te krijgen over eventuele negatieve effecten (aardbevingen) ten gevolge van het injecteren. De onzekerheid over de modelparameters is namelijk onbekend en het is niet duidelijk welke parameters de resultaten het meest beïnvloeden. De injectiescenario's zonder gelijktijdige gaswinning zijn vergeleken met injectiescenario's met gelijktijdige gaswinning. Als testcase werd het injecteren gemodelleerd in het centraal oost cluster en de winning werd voortgezet in de andere clusters. Dit werd gedaan voor injectiescenario's die in 2020 startten en ook voor "wat-als" scenario's met injecteren vanaf 2000 en 2010.

De resultaten van injectiescenario's en "wat-als"-scenario's met en zonder doorgaande gaswinning zijn niet overtuigend over het netto effect van injecteren. Injectie leidt namelijk in alle onderzochte scenario's tot seismiciteit. De injectiescenario's die in hoofdstuk 8 van rapport B zijn behandeld, duiden erop dat een combinatie van stikstof injectie in het centraal oostelijke cluster leidt tot de beperkte seismiciteit, zonder de productie in andere clusters geheel te stoppen. Echter, belangrijke parameters zijn niet gevarieerd en injectie- en productiesnelheid en injectielocaties zijn niet verder onderzocht. Calibratie van gemodelleerde gaswinning en injectie naar realistische volumes moet nog plaatsvinden.

Wanneer doorgaande gaswinning wordt overwogen voor Groningen, met of zonder injectie, zou de studie moeten worden aangepast aan de realiteit: beschikbaarheid van productie- en injectielocaties en het introduceren van realistische scenario's voor productie en injectie. Een aantal uitgangspunten dient te worden vastgesteld, zoals de mogelijkheid van verdunning van het gewonnen gas en het vermijden van injectie nabij kritieke breuken. Een haalbaarheidsstudie lijkt urgent, gezien de huidige situatie met kwetsbare leveringszekerheid en extreme gasprijzen die lijden tot spanningen en ontwrichting. Nederland en Europa waren ingesteld op onbelemmerde beschikbaarheid van goedkoop gas. De afbouw van de productie in Groningen versterkt de spanning op de energiemarkt. De huidige hoge gasprijzen hebben op 3 manieren invloed op de haalbaarheid van injectiescenario's:

- De forse investeringen die gemoeid gaan met injecteren zijn sneller terugverdiend bij hoge gasprijzen
- Injectie zou ervoor kunnen zorgen dat betrouwbare toegang tot goedkoop gas op lange termijn gewaarborgd is binnen de geaccepteerde norm voor het risico van instorting (lokaal persoonlijk risico $LPR < 0,001\%/jaar$)
- Lagere energieprijzen hebben economische en maatschappelijke voordelen; hoe hoger de prijzen van te importeren gas, des te groter het te behalen voordeel van eigen productie

Voorgesteld wordt om naast het huidige scenario 1 dat uitgaat van sluiting van het veld in 2023, 2 scenario's te onderzoeken door middel van een haalbaarheidsstudie:

- Injectiescenario 2 op basis van bestaande criterium $LPR < 0,001\%/jaar$ en injectie vanwege voorbereidings- en bouwtijd startend in 2026. Inschatting voor dit scenario is een productie van 4 tot 8 bcm in gasjaar 2022-2023, dalend naar 3 tot 6 bcm in 2025-2026. Daarna injectievolume ongeveer gelijk aan productievolume op 3 tot 6 bcm/gasjaar.
- Injectiescenario 3 gericht op het waarborgen van beschikbaarheid van goedkoop aardgas, en verzachten van spanningen en ontwrichting door hoge prijzen. Injectie vanwege voorbereidings- en bouwtijd startend in 2025. Inschatting voor dit scenario is een productie van 20 bcm in gasjaar 2022-2023, dalend naar 5 tot 10 bcm in 2023-2024 en 3 tot 6 bcm in 2024-2025. Daarna injectievolume ongeveer gelijk aan productievolume op 3 tot 6 bcm/gasjaar. In dit scenario kan het fysieke risico van een aantal panden (binnen het bestaande versterkingsprogramma) de norm tijdelijk overschrijden,

Het is op dit moment niet mogelijk om definitieve beslissingen te nemen met betrekking tot wenselijkheid van voortgezette productie, vanwege een combinatie van factoren:

1. de geopolitieke situatie en kwetsbaarheid van de energiestromen, die op dit moment kritiek zijn
2. spanning op de energiemarkt, die ook zeer variabel is
3. onvoldoende kennis of en in hoeverre productiebeperking leidt tot minder stress-gerelateerde gezondheidsklachten en minder ontwrichting in Groningen
4. onvoldoende kennis of en in hoeverre productiebeperking leidt tot meer problemen met de betaalbaarheid van energie, stress-gerelateerde gezondheidsklachten en ontwrichting in Nederland (en Europa)
5. onvoldoende kennis over de effectiviteit van injecteren als middel om het aanwezige gas goedkoop en veilig te winnen
6. scenario's met voortgezette gaswinning zijn niet doorgerekend in de publieke SDRA. Daardoor is niet gekwantificeerd welke extra gaswinning mogelijk is binnen de bestaande veiligheidsnorm (gebaseerd op instortingsgevaar). De scenario's met voortgezette en hogere productie (met variatie koud-gemiddeld-warm weer) zijn weliswaar door NAM in een eerdere fase doorgerekend en daaruit bleek een beperkte afhankelijkheid van seismiciteit van de extra productie, echter deze analyses zijn niet meer actueel.
7. de tegenstrijdige en/of onvolledige informatie over instortingsgevaar voor de bestaande gebouw-voorraad

Geadviseerd wordt om voor zover mogelijk duidelijkheid te verkrijgen met betrekking tot bovenstaande onzekerheden.

5. Beantwoording van de onderzoeksvragen

Van het Groningen-gasveld is veel informatie beschikbaar van de geologie, breuken, drukken, gaswinning en seismiteit. Echter, op detailniveau ontbreekt er nog veel informatie die niet in een model kan worden opgenomen. Belangrijke parameters zoals doorlatendheid van het gesteente en de breuken en sterkte van breuken, kunnen ruimtelijk variëren, zowel horizontaal als verticaal, en het is onmogelijk om dit betrouwbaar in een model te stoppen. Daarom zal het resultaat van de studie altijd een mate van onzekerheid met zich meebrengen. Deze kan worden verkleind door een haalbaarheidsonderzoek, waarbij de relevante parameters worden gevarieerd.

Het was niet mogelijk om een relevant, betrouwbaar en werkend 3D model van de regio Loppersum te maken, waar in de praktijk alle zwaardere aardbevingen hebben plaatsgevonden in een gebied van 10x10 km². Het belangrijkste resultaat van de studie bestaat uit 2D analyses die werden vergeleken met de waarnemingen. In het algemeen geeft dit een andere beperking: 2D analyses kunnen de verticale component niet goed meenemen. De dikte van het gasveld varieert significant. Ook is de compactie van het veld veel groter in het midden van het veld. De spanningen in de breuken zijn groter bij grotere compactie en reservoirdrukverschillen. De verticale component leidt tot een concentratie van seismiteit in het gebied met de grootste compactie. Reken-technisch was een 3D model van het gehele veld echter niet haalbaar. Eventuele verschillen tussen de berekeningsresultaten en de waarnemingen kunnen deels worden verklaard door de beperkingen van het model.

In het algemeen moet geconcludeerd worden dat de KEM24 studie als eerste stap moet worden gezien om een methode te ontwikkelen om injectiescenario's te simuleren en om te berekenen of, en zo ja welke, netto positieve resultaten worden bereikt. Verder is de studie niet gestart als haalbaarheidsstudie voor het Groningen- gasveld, maar als een proof-of-concept studie. Verschillende uitgangspunten waren theoretisch, zoals beschikbaarheid van injectieputten en mogelijke injectiesnelheden. De antwoorden op de onderzoeksvragen moeten in dit licht worden gezien. Er is nog veel onzeker dat dient te worden onderzocht om injectie te testen, en mogelijke injectiescenario's voor het Groningen-gasveld te ontwikkelen.

De onderzoeksvragen kunnen als volgt worden beantwoord:

1. *Wat zijn mogelijke injectiescenario's voor drukhandhaving gedurende winning en om de drukverschillen in het veld te minimaliseren nadat de productie is gestopt?*
 - a. Injectiescenario tijdens gaswinning in het Groningen-gasveld: het is nog niet duidelijk of injecteren een netto voordeel heeft (of er minder aardbevingen zouden plaatsvinden) en welke injectiesnelheid optimaal is. De hoeveelheden productie en injectie zijn in de huidige studie niet gekalibreerd. Berekeningsresultaten geven aan dat:
 - i. Injectie zou moeten worden vermeden in/nabij het Loppersum gebied, vanwege de kritieke spanning in het breuksysteem in deze regio.
 - ii. Injectie zou moeten worden vermeden nabij producerende putten, teneinde scherpe drukverschillen te vermijden.

- iii. Injectiescenario's dienen aangepast te worden aan uitgangspunten betreffende mogelijke verdunning van productiegas en haalbaarheid van injectie- en productiesnelheden en locaties. Als voorbeeld is injectie gesimuleerd in het centrale oostelijke cluster van het veld; waarschijnlijk was de geteste injectiesnelheid conservatief/ hoog, omdat de simulatie gepaard ging met een zeer forse drukverhoging; een lagere druktoename bij de injectieputten en het gevolg voor het voorkomen van aardbevingen dient verder worden onderzocht;
 - b. Injectiescenario na de stop van de gasproductie in het Groningen-gasveld: het lijkt erop dat in geval van een volledige productiestop er geen voordeel is te behalen met injectie met het oog op seismiciteit. Mogelijk zou de compactie wel kunnen worden gestopt, echter dit is niet onderzocht. De resultaten duiden erop dat:
 - i. Injecteren niet leidt tot een (significante) afname van seismiciteit op korte termijn.
 - ii. Sluitingsscenario's zonder injectie laten een scherpe afname van seismiciteit na sluiting zien.
 - iii. Enkele injectiescenario's laten geen significante stijging zien van de seismiciteit in de 2D simulaties als injectie na de stop van gasproductie wordt gebruikt.
- 2. *Wat zijn de reservoirspanningen en -drukken voor verschillende injectiescenario's (van vraag 1) rondom putten en over het hele gasveld?*
 - a. Spanningen rondom injectieputten, (zie WP3 en WP4 voor voorlopige resultaten); aanpassing van scenario's aan praktische uitvoerbaarheid is noodzakelijk. Het 2D model moet worden gekalibreerd op basis van volume-druk verhoudingen
 - b. Spanningen over het gehele gasveld (zie WP2); houd er rekening mee dat het model zonder injectie niet volledig aansluit bij de historische drukverdeling en seismiciteit, en het effect van injecteren is sterk afhankelijk van de injectiesnelheid, het aantal bronnen en de locaties. Gevoeligheidsberekeningen zouden nodig zijn om de afhankelijkheid van de resultaten van de modelering op de variatie van verschillende parameters te testen.
- 3. *Hoe moet de Groningen seismische module worden aangepast voor drukverhoging en drukverlaging?*
 - a. Deze vraag kan niet worden beantwoord, echter, het team is beschikbaar voor overleg met de opdrachtgever en TNO.
- 4. *Wat is het effect van injecteren op het seismische risico?*
 - a. Het effect hangt sterk af van welke injectie, de injectiesnelheid en locatie. In zijn algemeenheid, lijkt injecteren voor Groningen in het scenario van (bijna) stoppen van productie niet nodig of wenselijk. Echter, het effect op de seismiciteit van zeer beperkte injectie, met lage injectiesnelheid, is nog niet onderzocht. In theorie kan een evenredige toename van gasdrukken de spanningen op de lange termijn laten afnemen.
 - b. In geval van significante extra gaswinning uit het Groningen-gasveld is aanvullende studie nodig, inclusief gevoeligheidsanalyse, om te bepalen of injecteren nodig of gewenst is om de seismiciteit te beperken.

5. *Wat is het effect van injecteren op aardbevingen nabij injectieputten?*
- De studie is uitgevoerd met grote injectiehoeveelheden en hoge injectiesnelheden. Nabij injectieputten is geen significante seismiciteit gemodelleerd. Verdere studie wordt aangeraden om mogelijke negatieve effecten (seismiciteit) van injectie te minimaliseren.
6. *Wat is de optimale configuratie van injectieputten?*
- In theorie: zie antwoord 1a. In theorie zijn er meerdere opties. In de loop van de studie zijn diverse injectielocaties getest, echter niet allemaal met een model met bevredigende correlatie van drukken en seismiciteit met de waarnemingen. Uiteindelijk is het centraal oost cluster gebruikt als injectielocatie, omdat dit cluster in de buurt ligt van de delen waar de drukverlaging dient te worden beperkt. Ook is injecteren nabij Loppersum of de zuidelijke productielocaties ongewenst. Het is echter mogelijk om andere injectielocaties te onderzoeken.
 - In de praktijk: als aanvullende winning en injectie worden overwogen, dienen praktische uitgangspunten te worden meegenomen in een haalbaarheidsonderzoek. De huidige beschikbaarheid van putten is beperkt, maar het centraal oostelijke cluster is nog beschikbaar voor injectie, in combinatie met voortgaande productie in de zuidelijke clusters. Het wordt geadviseerd om al deze putten niet te sluiten zolang er geen duidelijkheid is over de punten die zijn vermeld in hoofdstuk 4. Gebaseerd op de huidige beschikbaarheid van productieputten zijn er geen alternatieve locaties beschikbaar voor injectie. Als een haalbaarheidsstudie laat zien dat alternatieve locaties de voorkeur genieten, dan is het aannemelijk dat er nieuwe injectieboringen moeten worden uitgevoerd.
7. *Wat is het effect van injectie op de seismiciteit en wat zijn de aanbevelingen voor het Groningen HRA model?*
- Het effect van een realistische, beperkte maar langdurige injectie kan in theorie positief zijn, echter die is nog niet aangetoond met de huidige studie. Aanvullende studie is nodig om hier meer duidelijkheid over te verkrijgen door o.a. variatie van injectielocatie, injectiesnelheid, injectieduur en parameters. In zijn algemeenheid wordt het aangeraden om zorgvuldig en met een beperkte druk en snelheid te injecteren om instabiliteit van nabije breuken door drukverhoging te voorkomen en instabiliteit van verre breuken te voorkomen. Als verdunning van productiegas acceptabel is, dan zou de productie kunnen worden voortgezet gedurende meerdere decennia.
 - Met betrekking tot seismische dreigings- en risicoanalyses: het is aannemelijk dat de in het verleden vastgestelde systematiek een onvolledig inzicht geeft bij het afwegen van de effecten van gaswinning en injecteren. De productiebeperking van de afgelopen 10 jaar heeft op basis van de jaarlijkse kennisopbouw en evaluatie geleid tot een beperking van het seismisch risico voor gebouwen tot onder de norm. De stress-gerelateerde gezondheidsklachten zijn in dezelfde periode juist sterk gestegen, en terwijl het niet is aangetoond dat sluiting van het Groningen-gasveld effectief is voor het verminderen van de indirecte risico's, worden deze wel gebruikt als argument voor de sluiting van het veld. Het actuele probleem van het niet beschikbaar zijn van

goedkoop aardgas wordt versterkt door de sluiting van het Groningen-gasveld. Gezien de gewijzigde omstandigheden en het feit dat een productiestop niet alleen voordelen heeft, zou een integrale analyse van directe en indirecte risico's kunnen worden overwogen. Het biedt voordelen om technische risico's en voordelen van injectie, alsmede de niet technische risico's ook op te nemen in de HRA, zodat de kennisopbouw gewaarborgd is en de emotionele risico's beter worden beoordeeld en effectiever worden verminderd.

- c. Beste injectiestoffen om te gebruiken: drie opties zijn overwogen: water, N₂ en CO₂, met de volgende resultaten:
- i. Water wordt niet geadviseerd, omdat het niet kan leiden tot een significante toename van de gemiddelde reservoirdruk in de diverse delen van het gasveld. Daarnaast kunnen er aardbevingen ontstaan door afkoeling (hetgeen is bestudeerd in KEM15).
 - ii. CO₂ lost beter op in water dan stikstof, waardoor stikstof effectiever is in het verhogen van de reservoirdruk met een vergelijkbare hoeveelheid gas.
 - iii. Op basis van deze studie is stikstof de beste optie, ook omdat het huidige gas ook N₂ bevat en in geval van verdunning van productiegas met hoogcalorisch gas, kan, mits er niet teveel verdunning optreedt, alsnog de oorspronkelijke Groningen gaskwaliteit worden verkregen. Het risico van verdunning dient in een haalbaarheidsonderzoek te worden onderzocht.

Rapport A

1020-169309.R01 V01,

30 september 2022

KEM-24 Effect van drukhandhaving door injecteren op
aardbevingsrisico

Verzamelrapport

Rapport B

KEM24 Definitief rapport,

30 september 2022

KEM-24 WP0-WP4 Effect van drukhandhaving door injecteren op
aardbevingsrisico

*Simulering van seismiciteit door productie en injectie met PFC2D
modellering van het Groningen geologisch breuk model, inclusief externe
review*

Rapport C

172147-REP01-FNV_SHA_KEM24 V03,

30 september 2022

KEM-24 WP5 Effect van drukhandhaving door injecteren op het
seismische risico

Seismische dreigingsanalyse