

Advies van deskundigen

betreffende de beoordeling van het
"onderzoek naar het risico van
aardbevingen en bodemverzakkingen
in het N05-A gasveld en de
omliggende prospects".
van Deltares



Zetel van de
onderneming **DMT
GmbH & Co KG** Am
TÜV 1
45307 Essen, Duitsland

Tel +49 201 172-01
Fax +49 201 172-1462
info@dmt-group.com
www.dmt-group.com

Management:
DMT Verwaltungsgesellschaft mbH, Essen
Rechtbank HRB 20420

Vertegenwoordigd door de
Gedelegeerd Bestuurders: Dr. Maik
Tiedemann (voorzitter) Jens-Peter
Lux

Plaatselijk gerechtshof Essen
HRA 9091 Voorzitter van de
raad van toezicht: Jürgen
Himmelsbach



TÜV NORD GROEP



DIN EN ISO
9001
zertifiziert

DIN EN ISO
14001
zertifiziert

Earth. Insight. Values.

Verslag nr.	CME1-2021-82			
Datum Advies van de deskundige	23.07.2021			
Aantal pagina's	28			
Bijlagen	-			
Taak	Herziening van het Deltares-rapport "Aardbevingsrisico- en bodemdalingsonderzoek N05-A gasveld en omliggende projecten" van 14.09.2020			
Klant	ONE-Dyas B.V. UNStudio, 7e verdieping Parnassusweg 815, 1082 LZ Amsterdam P.O. Postbus 78044, 1070 LP Amsterdam Nederland			
Auteur	Dr Simon Kremers			
Co-auteur	Dr Karsten Zimmermann			
Andere auteurs	Prof. Krzysztof Tajduś, Dr Tobias Neuffer, Dr Ralf Fritschen			
Meetperiode	-			
Het meten van personeel	-			
Bestandsnaam	82_Expert_opinion_Ver1.1.pdf			
Herzieningsoverzicht	Versie	Datum	Vervangt versie	Beschrijving
	1.0	25.06.2021		Eerste productie
	1.1	23.07.2021		Eerste herziening

INHOUDSOPGAVE

1. Samenvatting	4
2. Taak	5
3. Gegevensbasis	6
4. Verwachte verzakkingen	7
4.1 Inleiding	7
4.2 Gegevensbasis en parameterkeuze	7
4.3 Evaluatie van de Deltares-studie	10
4.4 Conclusies	12
5. Aardbevingsrisico	13
5.1 Oorzaken van geïnduceerde seismiciteit in aardgasreservoirs	13
5.1.1 Basis	13
5.1.2 Seismiciteit in aardgasreservoirs	14
5.2 Seismische risicobeoordeling in de studie Deltares	15
5.2.1 Procedure	15
5.2.2 Invloed parameters	15
5.2.3 Doorlichting van de kans op aardbevingen	17
5.2.4 Bepaling van Mmax	20
5.2.5 Risicoscreening	22
5.3 Schatting van v _{max}	22
5.4 Conclusies	24
6. Literatuur	26

1. Samenvatting

Het Nederlandse bedrijf ONE-Dyas is van plan het N05-A gasveld en de omliggende exploratiegebieden, die zich offshore in de Noordzee aan de Duits-Nederlandse grens op ongeveer 20 km van Borkum bevinden, te exploreren. Voor de aardgasproductie door ONE-Dyas is de goedkeuring van de Nederlandse autoriteiten vereist. Aangezien het geplande project ook gevolgen zal hebben voor Duitsland, werd de Bondsrepubliek Duitsland bij de milieu-effectbeoordeling betrokken.

In Nederland is een deskundigenadvies van Deltares (Deltares, 2020) ingevoerd om het aardbevingsrisico en de bodemdaling als gevolg van de gaswinning in aanmerking te nemen. DMT kreeg de opdracht het Deltares-rapport te evalueren en in een deskundig advies de juistheid van de gemaakte veronderstellingen, de uitvoering volgens de stand van de wetenschap en de techniek, alsmede de toepasbaarheid op het onderhavige project te beoordelen.

De studie "The Seismic Risk and Ground Subsidence Study N05-A Gas Field and Surrounding Prospects" van Deltares geeft de prognostische analyse van het toekomstige gevaar van seismische gebeurtenissen en bodemdaling voor het N05-A gasveld en de omliggende prospects.

Uit het onderzoek van de prognose van de bodemdaling is gebleken dat, ondanks enkele kritische opmerkingen over de uitgevoerde analyses en de presentatie van de resultaten, de voorspelde bodemdalingen begrijpelijkerwijs binnen een marge van enkele centimeters zullen liggen. Andere vervormingsindicatoren, zoals helling en rek, zullen ook binnen een bereik liggen dat geen gevaar oplevert voor bouwobjecten (b.v. windmolenpark Riff-gat).

Uit de evaluatie van de beoordeling van het risico op aardbevingen is gebleken dat een deel van de verstrekte informatie en de keuze van de parameters niet volledig kan worden begrepen en dat een statistisch relevante indicatie van de vastgestelde resultaatvariabelen ontbreekt. Over het geheel genomen is de beoordeling echter voorzichtig en geschikt om het heersende risico in te schatten. Uit modellering blijkt dat zelfs in een maximaal conservatief geval geen schade te verwachten is van een mogelijke geïnduceerde seismische gebeurtenis.

2. Taak

Het Nederlandse bedrijf ONE-Dyas is voornemens aardgas te produceren uit het N05-A aardgasveld en mogelijk ook uit omliggende velden. Het gebied ligt in de Noordzee aan de Duits-Nederlandse grens op ongeveer 20 km van Borkum. ONE-Dyas heeft in 2019 al toestemming gekregen om voor een periode van 30 jaar gas te produceren uit de omliggende velden N04-N05-N08.

Aangezien het studiegebied in kwestie ook op Duits soeverein grondgebied ligt, zal het project ook gevolgen hebben voor Duitsland, en daarom werd de Bondsrepubliek Duitsland bij de milieu-effectbeoordelingsprocedure betrokken.

Om het aardbevingsrisico en de bodemdaling als gevolg van de gaswinning in aanmerking te nemen, is in Nederland een rapport van Deltares (Deltares, 2020) ingevoerd. Er wordt uitgegaan van een maximaal conservatief scenario waarin een maximale gasproductie wordt verondersteld voor gasveld N05-A en de omliggende velden. Op basis van een probabilistische analyse toont het rapport een verwaarloosbaar aardbevingsrisico aan. De voorspelling van de bodemdaling leverde maximale dalingswaarden op van 1,6 cm voor veld N05-A en 2,6 cm voor de omliggende velden.

DMT kreeg de opdracht een evaluatie van het Deltares-rapport uit te voeren en in een deskundig advies de juistheid van de gemaakte veronderstellingen, de uitvoering overeenkomstig de huidige stand van wetenschap en techniek en de toepasbaarheid op het onderhavige project te onderzoeken. Het is de bedoeling dat het deskundigenadvies in combinatie met het Deltares-rapport wordt gebruikt bij de beoordeling van de milieucompatibiliteit van het project door de Bondsrepubliek Duitsland.

Naar analogie van het Deltares-rapport voert DMT een afzonderlijke evaluatie uit van de seismische risicobeoordeling en de voorspelling van verzakkingen. De voorspelling van de verzakkingen is uitgevoerd in samenwerking met Prof. Krzysztof Tajduś en Dr. Mateusz Dudek van het Strata Mechanics Research Institute van de Poolse Academie van Wetenschappen in Krakau.

3. Gegevensbasis

De gegevensbasis van de invoergegevens voor de seismische risicoanalyse en de bodemdalingsvoorspelling is gebaseerd op boorgatmetingen en boorgatkernanalyses van de boringen N05- 01-ST1, N05-01-S3, N07-04A, P1A en N04-02. Daarnaast zijn de gesteentemechanische parameters van de boorgatkernen uit de reservoirhorizont in het laboratorium bepaald (Dietl, 2019).

DMT had geen toegang tot de afzonderlijke evaluaties van de specifieke parameters, zodat wij de verkregen resultaten niet kunnen verifiëren. De beschreven procedure is echter begrijpelijk en de resultaten liggen binnen een aannemelijk bereik. Albrecht (2015) bijvoorbeeld bepaalde porositeiten uit boorkernen van de Rotliegend zandstenen in het gebied van de Noord-Duitse Gasdeposito's van 2 - 12 % en een Poisson-verhouding van 0,09. Wang (2000) geeft typische waarden voor de Biot-coëfficiënt van 0,64 - 0,85 voor zandsteen, zodat de keuze van $\alpha = 1$ een conservatieve overweging is. De genoemde waarden voor de verdichtingscoëfficiënt c_m liggen in het bereik van waarden die in andere studies worden genoemd (bijv. Asaei en Moosavi, 2013; Pimi- enta, 2017).

De classificatie van de parameters is van doorslaggevend belang voor de onderhavige studie, aangezien zij een directe invloed hebben op de verdichting van het reservoir en derhalve in het bijzonder op de bodemdaling in het projectgebied. Sommige van de gemeten variabelen zijn ook opgenomen in de seismische risico-evaluatie via de elasticiteitsmodulus en de Poisson-verhouding.

4. Verwachte verzakkingen

4.1 Inleiding

Op basis van de studie "Earthquake Risk and Ground Subsidence Study N05-A Gas Field and Surrounding Prospects" van 14 september 2020 is een analyse verricht van de verkregen resultaten van de bodemdaling tijdens de exploitatie van het N05-A-gasveld samen met de omliggende reservoirs in het scenario van maximale gasproductie.

In de studie van Deltares gebruiken de auteurs analytische methoden en de eindige-elementenmethode (Plaxis-software) om de voorspelde daling van het landoppervlak te bepalen.

4.2 Gegevensbasis en parameterkeuze

De twee belangrijkste parameters van het wiskundige berekeningsmodel zijn de c_m -afdichtingscoëfficiënt en de hoek van het belangrijkste invloedsgebied. Als gevolg van de door de productie veroorzaakte poriëndrukdaling wordt de verticale belasting die voorheen door gas werd overgebracht, in toenemende mate overgebracht op de rotsmatrix van het reservoir.

De resulterende verticale vervorming van het reservoir is de randvoorwaarde (d.w.z. de oorzaak) van de verzakking aan de oppervlakte. De compressiecoëfficiënt c_m beschrijft de verticale vervorming van het poreuze reservoirlichaam wanneer de druk in de poriën met één drukeenheid afneemt. De aanname dat het reservoirlichaam een lineair elastisch medium is volgens Biot leidt tot een verband tussen de verdichtingscoëfficiënt c_m , de Biot-coëfficiënt α en de elasticiteitsmodulus E_s :

$$mC = \frac{\alpha}{E_s}$$

Tabel 1: Basiswaarden voor de berekening van c_m .

Berekeningsparameters	c_m [GPa ⁻¹]
Edyn	0.021
Estat	0.029
η (porositeit)	0.054
Uit berekeningen voor RMS-waarden	0.035

In de studie hebben de auteurs aan de hand van verschillende gegevens en formules vier basiswaarden voor deze parameter vastgesteld (tabel 1; tabellen 3.1 en 3.3 in de Deltares studie).

Om de compressie van het reservoir bij een vaste drukval te bepalen, wordt in de studie van Deltares de formule van Fjaer (2008) gebruikt:

$$\frac{\Delta h}{h} = c_m \frac{\alpha \cdot \Delta p}{f} \quad (1)$$

waarbij:

Δh - verandering in de dikte van het reservoir,

h - dikte van de afzetting,

α - Biot's coëfficiënt,

c_m - verdichtingscoëfficiënt,

Δp - waterspanningsverandering.

De waarde van de verdichtingscoëfficiënt in de studie wordt gegeven als:

$$c_m = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)} \quad (2)$$

met ν als de Poisson verhouding.

Formule (2) - en formule (3) in de studie op bladzijde 9 - zijn omzettingen van de vergelijking van Geertsma, waarbij voor de Biot-coëfficiënt de waarde $\alpha = 1$ wordt aangenomen (3):

$$c_m = \frac{\alpha}{E_s} \quad (3)$$

waarin E_s de beperkte modulus is

$$E_s = \frac{E}{(1-\nu)(1-2\nu)} \quad (4)$$

aangewezen.
n.

Na eenvoudige transformaties van de formules (3) en (4) (en de aanname van $\alpha = 1$) verkrijgt men formule (2).

In hoofdstuk 3.4 hebben de auteurs van de studie een samenvatting gegeven van de resultaten van de voorgaande analyses, uitgaande van een reservoirdikte van 28 m en een gemiddeld drukverlies van 320 bar. Volgens de berekende gegevens in tabel 3.3 (blz. 12 van de studie) zal de waarde van de afdichting van het reservoir tussen 1,9 cm en 4,8 cm liggen (volgens formule 4 op blz. 10 van de studie).

/hier formule 1). Anderzijds, gebaseerd op dezelfde veronderstellingen, maar bovendien rekening houdend met de waarde van de Poisson-verhouding van $\nu = 0,08$, is het verkregen verdichtingsbereik 1,9 cm tot 5,5 cm. De waarde van $\nu = 0,08$ was z.

B. door Deltares gebruikt om de waarde van de Kirchhoff-modulus (G) (of Lamé-constante μ) te bepalen (formule 13 op blz. 28 van de studie).

In het verdere deel van de studie van Deltares (hoofdstuk 5) zijn de berekeningen uitgevoerd met behulp van de eindige-elementenmethode (Plaxis software). Er werd aangenomen dat de rotsmassa uit horizontale lagen bestaat en lineair-elastisch gedrag vertoont. Een deel van de berekeningen houdt rekening met de aanwezigheid van een zoutlaag, die werd gemodelleerd als elastoplastisch materiaal.

De zettingsroosters zijn berekend met behulp van het door ONE-Dyas verstrekte dPh-rooster (drukval x reservoirdikte) voor verschillende tijdstippen in het scenario met maximale gasproductie, uitgaande van vier verschillende compressiecoëfficiëntparameters. De volgende opmerkingen en vragen vloeien voort uit de analyse van dit hoofdstuk:

1. De berekeningen zijn uitgevoerd uitgaande van een drukval van 400 bar, hoewel in eerdere onderzoeken een waarde van $\Delta p = 320$ bar als basis is gebruikt. Een expliciete verklaring voor deze verandering wordt niet gegeven. Vanuit ons standpunt kan worden aangenomen dat hier is gekozen voor een conservatieve parameterbenadering, die leidt tot overschatting van de drukval en tot overschatting van de voorspelde zinkwaarden in de modellering.
2. Zout is een materiaal met sterke reologische eigenschappen. Door rekening te houden met deze eigenschappen (kruip en relaxatie) kunnen mogelijke veranderingen in de spanningstoestand en de vervorming van deze dikke laag beter worden weergegeven.
3. De analyse van de invloed van veranderingen in de cohesie op de vorm van de depressie (en op de spanningstoestand binnen de laag) volgens figuur 5.1 (blz. 35, studie Deltares) is interessant, maar noch een realistische orde van grootte, noch een realistisch variatiebereik van de gekozen waarden van de cohesie kan worden waargenomen.
4. Volgens de auteurs van de studie is de meest waarschijnlijke waarde van de verdichtingscoëfficiënt $c_m = 0,035 \text{ GPa}^{-1}$. Het is het resultaat van een berekening op basis van de formule van Het-tema & de Pater (1998). Er zij op gewezen dat deze waarde niet

is de meest ongunstige waarde vanuit het oogpunt van de bodemdaling. Er zij op gewezen dat de in de formule vervatte parameters enerzijds zeer variabel zijn in het gesteente en anderzijds moeilijk duidelijk te bepalen in laboratoriumproeven. Daarom moet in de analyses een statistische analyse van de verkregen waarden van de steenparameters (b.v. een standaardafwijking) of de aanname van de "worst case"-variant worden uitgevoerd.

5. Figuur 5.2 van de studie toont de scenario's van de bodemdaling tijdens de exploitatie van verschillende velden (N05-A, N05-A-Southeast, Diamond, Tanzaniet-East en N05-A-Noord). De maximumwaarde werd bepaald voor de werking van veld N05-A, $s_{max} = 1,6$ cm (voor de parameters vermeld in tabel 3.3). De figuur toont ook een verschuiving van de plaats van de verzakkingstrog in zuidoostelijke richting, in de richting van de Smaragd-afzetting. Deze verschuiving is ongebruikelijk voor de veronderstelling van vlak bedekte rotslagen en wordt in de studie niet verklaard.
6. Het deskundigenrapport bevat geen weergave voor de constructie van het FEM-dalingsmodel. Een dergelijke weergave van de rotsmassa samen met de uitgravingszones zou een uitgebreide beoordeling van de randvoorwaarden, de discretisatie (keuze van maasvorm, grootte, enz.) mogelijk kunnen maken. De discretisatie van het model kan een invloed hebben op de verkregen resultaten van de analyse, vooral voor de hier aanwezige kleine verzakkingen.

4.3 Evaluatie van de Deltares-studie

Om de mechanische parameters van het gesteente te bepalen, werden laboratoriumproeven uitgevoerd op monsters van twee niveaus:

- plug PS02, die gekenmerkt wordt door een relatief hoge porositeit en 5% van het reservoir vertegenwoordigt, en
- Plug PS04, die gekenmerkt wordt door een gemiddelde porositeit en 95% van de afzetting vertegenwoordigt.

In de studie ontbreekt kwantitatieve informatie over de waarde van de geschatte porositeit van het gesteente, die zich rechtstreeks vertaalt in de waarden van de parameters voor de effectieve sterkte en de Biot-coëfficiënt. Deltares meldt dat zij, om de waarden van de mechanische parameters van het gesteente uit laboratoriumproeven te bepalen, de gemiddelde waarde per plug hebben bepaald en vervolgens het gewogen gemiddelde hebben bepaald met gebruikmaking van de 95%- en 5%-verhoudingen als gewicht. Er zij echter op gewezen dat bij de bepaling van de mechanische parameters van gesteenten, die vervolgens worden gebruikt voor de berekening van de oppervlaktevervorming, waarden moeten worden gebruikt waarbij rekening wordt gehouden met hun spreidingsbreedte in relatie tot de geologische structuur (met vermelding van de standaardafwijking), de aard van de gesteentemonsters en de foutgegevens van de uitgevoerde proeven.

1. Volgens de tabellen 4.4 en 4.10 van de Deltares-studie varieert de dikte van de afzetting tussen 27 m en 31 m. Het zou zinvol zijn de berekeningen uit te voeren voor het slechtst denkbare scenario. Het zou zinvol zijn de berekeningen uit te voeren voor de waarde van 31 m, aangezien dit het "worst-case" scenario is. De maximumwaarden van de bodemdaling s_{max} worden daarom hieronder gegeven voor een eenvoudige berekening $h = 27$ m en $h = 31$ m (tabel 2 en tabel 3):

Tabel 2: Berekende vermindering s_{max} voor verschillende waarden van elasticiteit en dichtheidsverhouding en een reservoirdikte van 27 m.

E [Bar]	ν	s_{max} [mm]
4.19×10^5	0.22	18
4.19×10^5	0.08	20
2.99×10^5	0.22	25
2.99×10^5	0.08	28
1.60×10^5	0.22	47
1.60×10^5	0.08	53
2.85×10^5	0.22	27
2.85×10^5	0.08	30

Tabel 3: Berekende vermindering s_{max} voor verschillende waarden van elasticiteit en dichtheidsverhouding en een reservoirdikte van 31 m.

E [Bar]	ν	s_{max} [mm]
4.19×10^5	0.22	21
4.19×10^5	0.08	23
2.99×10^5	0.22	29
2.99×10^5	0.08	33
1.60×10^5	0.22	54
1.60×10^5	0.08	61
2.85×10^5	0.22	30
2.85×10^5	0.08	34

Voor een reservoirdikte van $h = 31$ m wordt aldus een maximale bodemdaling van $s_{max} = 6,1$ cm bepaald, voor $h = 27$ m een bodemdaling van $s_{max} = 5,3$ cm.

Uitgaande van een drukverlies van 400 bar (FEM-analyse) stijgen de waarden van de zettingen in de bovenstaande tabellen met 25 %.

De gegeven waarden van de bodemdaling zijn bepaald in de veronderstelling van een volledige extractie van het oppervlak en de vorming van een volledige bodemdalingsdepressie en vertegenwoordigen maximumwaarden voor de gebruikte parameters. De werkelijke waarden van de bodemdaling zijn afhankelijk van andere factoren, zoals de diepte van het reservoir en de beperkende hoek van het invloedsgebied, die een verlagend effect kunnen hebben op de optredende bodemdaling.

2. De verzakking wordt gekarakteriseerd door drie belangrijke parameters: verzakking, horizontale verplaatsing en begrenzingshoek van het invloedsgebied (of hoek van het belangrijkste invloedsgebied). Deze parameters beschrijven uiteindelijk de zettingsverdeling en de verwachte hellingen en krommingen in het gebied van de depressie. De auteurs van de studie hebben de resultaten alleen gepresenteerd voor de waarde van de bodemdaling en hebben de andere parameters niet in hun beschouwing betrokken.

4.4 Conclusies

De uitgevoerde analyse heeft alleen betrekking op de continue vervorming van het oppervlak (bodemdaling). Zogenaamde geassocieerde invloeden en invloeden van mogelijke discontinue vervormingen werden niet meegerekend.

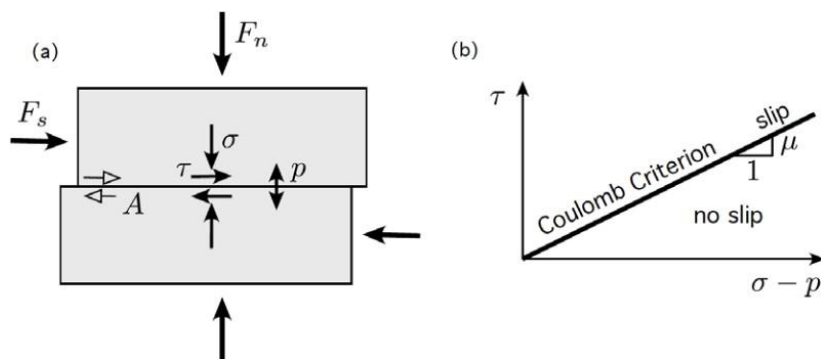
Ondanks verschillen in detail tussen het worst-case onderzoek dat in het kader van dit onderzoek is uitgevoerd en de resultaten van de bodemdalingsvoorspelling van het Deltares-onderzoek en enkele kritische opmerkingen over de uitgevoerde analyses en de presentatie van de resultaten, zijn de voorspelde bodemdalingen van een plausible omvang. Wij nemen aan dat de werkelijk optredende verzakkingen onder de beschreven randvoorwaarden niet sterk zullen afwijken van de waarden van de Deltares-Stu- dards en maximaal enkele centimeters zullen bedragen (bij continue deformatie). Andere vervormingsindicatoren, zoals helling en rek, zullen ook van een zodanige omvang zijn dat zij geen gevaar opleveren voor bouwobjecten (bv. windmolenpark Riffgat).

5. Aardbevingsrisico

5.1 Oorzaken van geïnduceerde seismiciteit in aardgasreservoirs

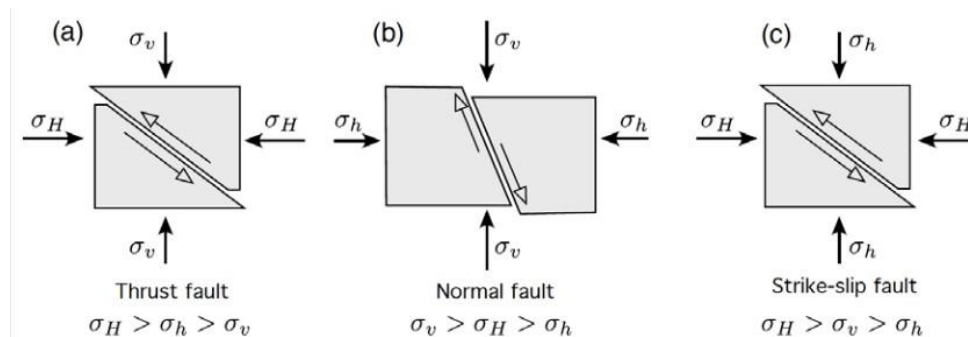
5.1.1 Basis

De aardkorst wordt doorkruist door een netwerk van reeds bestaande breuk- en breukzones. In principe kan elk van deze zones worden geactiveerd als de schuifspanning (τ) die op het breukvlak werkt, groter is dan de weerstand tegen beweging van aangrenzende rotsformaties. In de meeste gevallen is deze afschuifweerstand (of afschuifsterkte) gebaseerd op het principe van wrijving. Met andere woorden, de afschuifweerstand is evenredig met het verschil tussen de normaalspanning (σ) die op het oppervlak werkt en de druk (p) van de vloeistof die de breukzone binnendringt en het omringende gesteente (figuur 1, a)). De breukzone is stabiel (d.w.z. er is geen beweging op het breukvlak) zolang de schuifspanning kleiner is dan de wrijving $\mu(\sigma-p)$. De term $(\sigma-p)$ wordt de rms-spanning genoemd. μ is de wrijvingscoëfficiënt, die vaak tussen 0,6 en 0,8 ligt. Deze voorwaarde voor het optreden van verplaatsingen op een breukvlak wordt het Coulomb-criterium genoemd (figuur 1, b)). De parameters die het begin van de beweging op het breukvlak met de wrijvingscoëfficiënt μ bepalen zijn dus de normaalspanning, de afschuifspanning en de poriënvloeistofdruk. De normaalspanning en de afschuifspanning op het breukvlak hangen af van de oriëntatie van het vlak en de spanningstoestand in het gesteente.



Figuur 1: a) Afschuiving van een geassembleerd blok onderworpen aan de normaalkracht F_n en de afschuifkracht F_s met een vloeistof binnen het contactoppervlak bij druk p . Beweging langs het contactoppervlak wordt geïnduceerd wanneer de afschuifspanning gelijk is aan de wrijvingsweerstand $\mu(\sigma-p)$. (b) Illustratie van het Coulomb-criterium: er vindt geen beweging plaats wanneer het "punt" ($\sigma-p$) onder de kritische lijn ligt die door de helling μ wordt gedefinieerd. Figuur uit: Potentieel aan geïnduceerde seismische activiteit in energietechnologieën (2012).

De spanningstoestand in de ondergrond kan worden beschreven door drie hoofdspanningen. Gewoonlijk is één van de hoofdspanningen verticaal. Dit wordt dan σ_v genoemd en de minimale en maximale horizontale spanningen σ_h en σ_H . De richting van σ_H , alsmede de waarden van σ_v , σ_h en σ_H , bepalen in ongestoord gesteente de oriëntatie van het oppervlak dat het meest waarschijnlijk zal breken (figuur 2).



Figuur 2: Oriëntatie van breukvlakken als functie van normaal- en afschuifspanningen. (a) Stuwkrachtbreuk; (b) Normale breuk; (c) Aardverschuivingsbreuk. Figuur uit: Potentieel aan geïnduceerde seismische activiteit in energietechnologieën (2012).

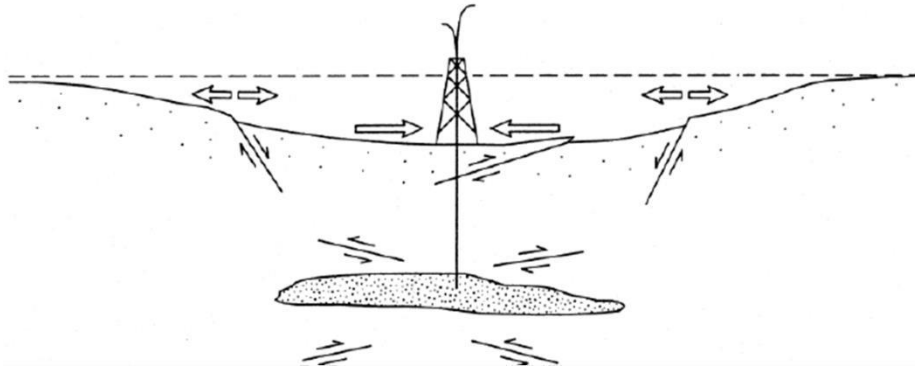
5.1.2 Seismiciteit in aardgasreservoirs

Geïnduceerde seismiciteit in of aan de rand van aardgasproductiegebieden is een wereldwijd verschijnsel. Al aan het eind van de jaren zestig deden zich merkbare gebeurtenissen voor in de Franse gasvelden (Grasso en Wittlinger, 1990), en in Texas al in 1925 (Yerkes en Castle, 1976; Frohlich, 2012). In de Nederlandse gasvelden zijn geïnduceerde gebeurtenissen waargenomen sinds eind 1986 (Van Eijs et al., 2006).

Yerkes en Castle (1976) tonen aan dat differentiële verdichting op diepte, veroorzaakt door massaverplaatsing, d.w.z. vloeistofextractie, afschuivingsbreuken kan veroorzaken, en dus aardbevingen. Volgens Segall (1989) vertoont de door de aardgaswinning geïnduceerde seismiciteit de volgende kenmerken (zie figuur 3):

1. Seismiciteit kan in de onmiddellijke nabijheid van het reservoir reeds beginnen wanneer de waterspanning met ongeveer 10 MPa is verlaagd.
2. De gebeurtenissen doen zich voor in clusters direct boven of onder het reservoir, in lagen die de neiging hebben bros te breken.

3. De meest voorkomende haardmechanismen van deze gebeurtenissen wijzen op uitstel, terwijl ab- uitstel vaker wordt waargenomen in het buitengebied.
4. Aardbevingen in zwakkere lagen zijn vaak traag, d.w.z. dat de brontijd aanzienlijk langer is in vergelijking met een typische tektonische gebeurtenis van vergelijkbare magnitude.



Figuur 3: Mechanismen van geïnduceerde seismiciteit ten gevolge van de productie van aardgasreservoirs. Bron: Segall (1989).

5.2 Seismische risicobeoordeling in de studie Deltares

5.2.1 Procedure

De seismische risicobeoordelingsberekeningen in de Deltares-studie zijn uitgevoerd volgens de huidige leidraad van het Staatsoezicht op de Mijnen (SodM, 2016) voor de analyse van geïnduceerde aardbevingen door aardgaswinning in Nederland met behulp van de DHAIS-methodiek (van Eijs et al., 2004; van Eijs et al., 2006). In dit proces wordt een eerste beoordeling uitgevoerd om te bepalen of verder onderzoek nodig is. Voor aardgasvelden die volgens deze berekeningen een verwaarloosbare kans hebben om geïnduceerde aardbevingen te veroorzaken of waar geen aardbevingen sterker dan $M = 2,5$ op de schaal van Richter te verwachten zijn, zijn geen extra onderzoeksstappen nodig en volstaat monitoring met het bestaande meetnet (van het KNMI). Voor aardgasvelden waar de kans op seismische activiteit niet te verwaarlozen is, wordt de tweede stap van de analyse uitgevoerd. Dit zal de risicocategorie bepalen.

Voor de categorieën I en II is alleen toezicht vereist. In het geval van categorie III moet een kwantitatieve risicoanalyse worden uitgevoerd.

5.2.2 Invloed parameters

De DHAIS-methode, volgens welke de beoordeling van het seismisch risico wordt uitgevoerd, evalueert de kans op aardbevingen op basis van drie parameters:

- de relatieve drukval ($DP/Pini$),
- de relatieve breukdichtheid (B),
- de relatieve stijfheid (E_{ratio}).

De relatieve drukval $DP/Pini$ beschrijft de verhouding tussen de druk aan het begin en aan het eind van de aardgasproductie. De relatieve breukdichtheid B is een maat voor de bestaande breukzones in het gasveld, de parameter E_{ratio} geeft de verhouding aan tussen de statische elasticiteitsmodulus van de *deklag* en de statische elasticiteitsmodulus van het *Rotliegend-reservoir*. Alle drie parameters vinden hun oorsprong in de studies van van Eijs et al. (2004) en van Eijs et al. (2006) en de update en voortzetting van de studie door van Thienen-Visser (2012). De studies zijn gebaseerd op de analyses van geïnduceerde seismische gebeurtenissen in de Nederlandse (onshore) aardgasreservoirs sinds 1991. Het doel van de studies was de belangrijkste parameters te identificeren die, op basis van de beschikbare gegevens, een prognose van toekomstige geïnduceerde seismiciteit - of de afwezigheid daarvan - mogelijk maken.

Volgens unanieme opvattingen (Segall, 1989; Segall and Fitzgerald, 1998; van Eijs et al., 2006; Bourne and Oates, 2017) is de drukval in het reservoir de belangrijkste oorzaak voor het optreden van geïnduceerde seismiciteit bij de productie van aardgas. Van Eijs et al. (2006) gebruiken een probabilistische benadering om een kritische drukval van 72 ± 29 bar te bepalen die moet worden overschreden om seismiciteit te induceren door aardgasproductie. De waargenomen of geplande drukval wordt daarom gebruikt als een van de belangrijkste parameters voor het mogelijk optreden van geïnduceerde seismiciteit.

Van Eijs et al. (2006) vinden ook een goede correlatie van de parameters B en E_{ratio} met de geïnduceerde seismiciteit. Andere parameters, zoals de porositeit van het reservoirgesteente, leverden echter geen goede correlatie op. Volgens de auteurs zijn de redenen voor de verschillen in geïnduceerde seismiciteit tussen het grote aantal aardgasreservoirs in Nederland enerzijds het kleine aantal breukzones in de producerende zandsteenreservoirs ($B < 1$) en anderzijds het verschil tussen klei (kleine E_{ratio}) en anhydriet deklagen (grote E_{ratio}) van het Rotliegend re-servoir.

De DHAS-methode en de belangrijkste parameters die daarin worden gebruikt, zijn dan ook gebaseerd op empirische waarnemingen van geïnduceerde seismiciteit in de Nederlandse aardgasreservoirs gedurende de afgelopen 30 jaar. Zoals beschreven in punt 5.1.1, is de kans op een natuurlijke aardbeving of een geïnduceerde seismische gebeurtenis expliciet afhankelijk van de aanwezigheid en oriëntatie van kritisch gespannen breukzones in het regionale spanningsveld. De parameters "oriëntatie van de breukzones" en "kritische voorspanning" worden niet beschouwd als sleutelparameters in de

DHAIS-methode wordt opgeroepen of gebruikt. De kritische voorspanning van een (vaak van tevoren onbekende) breukzone in de ondergrond is zeer moeilijk of zelfs onmogelijk te bepalen; deze parameter is dan ook onderworpen aan een vrij grote mate van onzekerheid in elk onderzoek naar seismische risico's. De oriëntatie van breukzones daarentegen kan belangrijke aanwijzingen geven voor de neiging tot uitglijden. In de DHAIS-methode wordt deze alleen indirect gebruikt via de breukdichtheid.

Hoewel de DHAIS-methode alleen gebaseerd is op gegevens van aardgasreservoirs op het vasteland, worden in deze studie voor het offshore-gasveld N05-A dezelfde reservoirhorizont en deklagen in aanmerking genomen. Een significante invloed van de waterkolom van 20 tot 25 m op de beschreven oorzakelijke processen voor het optreden van geïnduceerde seismiciteit en de optredende spanningsverhoudingen is niet te verwachten.

Hoewel de DHAIS-methode niet kan worden toegepast op andere projectgebieden of aardgasvelden overal ter wereld (met name die in andere reservoirgesteenten en -horizonten) wegens het ontbreken van de hierboven beschreven waarnemingsparameters, is het een geschikte methode om het seismische risico in het projectgebied te ramen, dankzij de brede gegevensbasis en de empirisch bewezen correlaties. Andere methoden om bijvoorbeeld de maximaal mogelijke omvang van een geïnduceerde gebeurtenis te schatten op basis van de lengte van de breukzones (Wells en Coppersmith, 1994) of de omvang van het reservoir (McGarr et al., 2002), zijn aanzienlijk minder nauwkeurig of slechts in beperkte mate toepasbaar.

5.2.3 Screening van de aardbevingskans

Voor elk beschouwd aardgasveld wordt de in de DHAIS-methode beschreven procedure toegepast:

1. Berekening van de relatieve drukvermindering $DP/Pini$
2. Berekening van de breukdichtheid B
3. Indien van toepassing, berekening van de verhouding E_{ratio} van de statische elasticiteitsmodulus van de deklaag en de statische elasticiteitsmodulus van het Rotligend-reservoir.

Bij een drukverlaging $DP/Pini$ beneden de drempelwaarde van 28 % is de kans op het optreden van geïnduceerde seismiciteit verwaarloosbaar klein. In dit geval worden de andere parameters buiten beschouwing gelaten. Indien $DP/Pini$ meer dan 28 % bedraagt, wordt eerst de breukdichtheid B in aanmerking genomen. Indien deze waarde lager is dan 0,86, wordt de waarschijnlijkheid van het optreden van geïnduceerde seismiciteit opnieuw als verwaarloosbaar beschouwd. Alleen in het omgekeerde geval wordt de parameter E_{ratio} extra berekend. Hier wordt een waarde van de verhouding onder $E_{ratio} = 1,01$ als niet-kritisch beschouwd, met een waarde tussen $1,01 < E_{ratio}$

< 1,33, wordt een waarschijnlijkheid van 19 % bepaald voor het optreden van een geïnduceerde seismische gebeurtenis, en voor een waarde van $E_{ratio} > 1,33$, een waarschijnlijkheid van 42 %. Indien een niet te verwaarlozen waarschijnlijkheid is vastgesteld, bestaat de volgende stap erin de mogelijke maximumomvang te bepalen. Indien deze boven een kritische waarde van $M = 2,5$ ligt (de precieze oorsprong van deze grens is niet bekend, maar hij is vermoedelijk bedoeld om mogelijke schade aan gebouwen te voorkomen), moet een verdere kwantitatieve risicoanalyse worden uitgevoerd.

De scenario's worden bekeken op basis van de door ONE-Dyas verstrekte projectdocumenten en andere geologische en geofysische gegevens. DMT beschikt niet over deze gegevens en daarom wordt ervan uitgegaan dat de gegevens in het onderstaande correct zijn opgenomen.

Drukverlaging *DP/Pini*

Het in aanmerking nemen van de geplande drukverlaging *DP/Pini* resulteert in waarden boven 28 % voor alle vijf onderzochte aardgasvelden (N05-A, N05-A-Noord, N05-A-Südost, Tanzaniet-Oost en Diamant). Er moet dus ook rekening worden gehouden met de parameters B en E_{ratio} .

Breukdichtheid B

De bepaling van de breukdichtheid is gebaseerd op door ONE-Dyas verstrekte structuurkaarten. Alle erkende breukzones binnen het reservoir en aan de rand van de velden zijn opgenomen. Uit de resultaten blijkt dat slechts twee van de beschouwde velden (Tanzaniet-Oost en N05-A-Zuid-Oost) een waarde van $B > 0,86$ hebben. Voor deze twee velden moet een extra $B > 0,86$ worden berekend. Voor deze twee velden moet nu ook de parameter E_{ratio} in aanmerking worden genomen; voor de andere velden wordt uitgegaan van een verwaarloosbare kans op het optreden van geïnduceerde seismiciteit volgens de beschreven procedure.

E_{ratio} verhouding

Van Eijs et al. (2006) gebruiken in hun schatting van de parameter E_{ratio} gemiddelde waarden voor de statische elasticiteitsmoduli, die werden bepaald uit samengestelde boorgatloggegevens. Met deze betrekkelijk ruwe en algemene schatting worden voor de twee velden een waarde van $E_{ratio} = 1,28$ en een waarschijnlijkheid van geïnduceerde seismiciteit van 19 % verkregen. Volgens de richtlijnen van de Staatstoezicht op de Mijnen (SodM, 2016) moet de mogelijke maximumomvang van een dergelijke gebeurtenis worden berekend.

Op dit punt maakt Deltares een nieuwe schatting van de parameter E_{ratio} op basis van "aanvullende informatie". De basis hiervoor is de actualisering van VELMOD, een seismisch snelheidsmodel dat in het kader van een industrieel project is ontwikkeld (van Dalfsen et al, 2007). Dit model is, evenals zijn voorgangers, gebaseerd op snelheidsgegevens van sonische logs en checkshot-gegevens, waaraan dieptemarkeringen van lithostratigrafische laaggrenzen zijn toegekend. Met deze gegevens wordt een lagen-koek snelheidsmodel geconstrueerd. Voor de huidige versie VEL- MOD 3.1 (Pluymaekers et al., 2017) waren aanzienlijk meer digitale sonische gegevens van aanzienlijk meer boorgaten beschikbaar. De gekozen aanpak van herevaluatie op grond van het aanzienlijk betere gegevensbestand is naar onze mening dan ook plausibel.

De statische elasticiteitsmoduli worden geschat met behulp van de formules (1) en (2) van de Deltares-studie volgens Eisaa en Kazi (1988). Invoerparameters zijn v_p - en v_s -snelheden en de dichtheid van de respectieve rotslaag. De v_p -snelheden uit VELMOD 3.1 worden gebruikt, v_s en dichtheid worden geschat via een gemiddelde waarde, aangezien deze waarden niet in VELMOD 3.1 zijn opgenomen. Met deze invoergegevens wordt E_{ratio} nu voor beide velden opnieuw bepaald. Uit het resultaat blijkt dat de waarden onder de grens van 1,01 liggen, maar een specifieke aanwijzing ontbreekt op dit punt.

De door Deltares gekozen procedure om de parameter E_{ratio} te bepalen is plausibel, maar de concrete uitvoering wordt onvoldoende toegelicht. Van de drie invoerparameters voor de berekening van de statische elasticiteitsmodulus is er slechts één opgenomen in de gebruikte gegevensbasis (VE-LMOD 3.1). De andere twee zijn analoog berekend uit de gegevens van de omringende boringen (*pers. comm. ONE-Dyas*), maar hierover en over de methode wordt in het deskundigenrapport niets vermeld. Hier zou een parametervariatie en de specificatie van de resulterende standaardafwijkingen wenselijk zijn om de consistentie van de verkregen resultaten te kunnen beoordelen. Hetzelfde geldt voor het gemiddelde van de elasticiteitsmoduli tussen Zechstein en Rotliegend.

Over het geheel genomen is de raming van de E_{ratio} ratio op basis van de "aanvullende informatie" alleen op basis van de gegevens in het deskundigenrapport niet begrijpelijk en door ons niet controleerbaar. De conclusie van Deltares dat de waarschijnlijkheid van het optreden van geïnduceerde seismiciteit kan worden gewijzigd van 19% in "verwaarloosbaar" is op basis van de gepresenteerde gegevens niet te begrijpen. Indien echter wordt uitgegaan van de juistheid van de aannames en berekeningen in de Deltares-studie, is de beoordeling op basis van de DHAIS-methode aannemelijk.

5.2.4 Bepaling van M_{max}

Ondanks de waarden van $E_{ratio} < 1,01$ (die, zoals hierboven beschreven, niet volledig kunnen worden begrepen) en de daarmee gepaard gaande verwaarloosbare kans op geïnduceerde seismiteit, bepaalt Deltares de potentiële maximumwaarde van een dergelijke gebeurtenis. Volgens de DHAIS-methode (van Thiessen-Visser, 2016) moet de maximummagnitude op twee verschillende manieren worden geschat:

4. Door gebruik te maken van de breukgeometrie, d.w.z. de hoogte en lengte van het breukvlak,
5. door gebruik te maken van de energiebalans, d.w.z. door gebruik te maken van de potentiële energie die in het systeem wordt gebracht in de vorm van spanning door de compressie/compressie door het onttrekken van de vloeistof.

Breuk geometrie

De schatting wordt gedaan door het seismisch moment M_0 te berekenen volgens Hanks en Kanamori (1979). De doorslaggevende invoerparameters zijn hier, naast de gegeven spanningsval (5 MPa; SodM, 2016), lengte en breedte/hoogte van het breukvlak. Voor de lengte wordt conservatief uitgegaan van een breuk over de gehele lengte van de in het beschouwde veld aanwezige breukvlakken, de hoogte wordt geschat met de gehele dikte van het reservoir. Met deze methode wordt voor beide velden een maximale magnitude van $M_w = 2,9$ geschat.

Er zij op gewezen dat hier wordt aangenomen dat de breuk uitsluitend aan de oppervlakte in het reservoir plaatsvindt. Het kan echter niet met zekerheid worden uitgesloten dat de in kaart gebrachte breukzones ook doorlopen tot in de deklaag of het vaste gesteente. Indien een breukvlakhoogte van $h = 35$ m wordt gebruikt in plaats van de reservoirdikte van 31 m, resulteert dit in een maximale magnitude van $M_w = 3,0$, op $h = 40$ m $M_w = 3,1$. Ook hier zou een variatie van de parameters nuttig zijn geweest om de betekenis van de vastgestelde maximummagnitude te beoordelen, ook al is de dikte van het reservoir volgens ONE-Dyas niet groter dan 35 m. Niettemin kan de gebruikte benadering van het breken van het gehele breukvlak als zeer conservatief worden omschreven. Lindenfeld en Leydecker (2004) bewijzen bijvoorbeeld dat de breuklengte maximaal 40% van de breuklengte bereikt voor een aardbeving met magnitudes in de orde van grootte van de beschouwde aardbeving. Een magnitude van $M_w = 2.9$ als bovengrens lijkt dus plausibel.

Energiebalans

Bij de benadering van de berekening van de maximale magnitude via de energiebalans wordt ervan uitgegaan dat de volledige energie die vrijkomt bij een geïnduceerde seismische gebeurtenis als spanning in het systeem wordt gebracht door het onttrekken van de vloeistof en de resulterende verdichting. Deze constatering is onder meer gedaan door Dost en Haak (2007): "Het is duidelijk dat, wat de spanning betreft, de drukdaling in het reservoir de drijvende kracht is achter de geïnduceerde aardbevingen, wat de rek betreft is dat de verdichting". Nepveu et al. (2016) stellen dat de seismiciteit sinds januari 2003 inderdaad verband houdt met de productie en dat verdere productie de criticiteit van de vele breuken in het reservoir lijkt te bevorderen. Het is derhalve legitiem om de maximummagnitude te schatten met behulp van de beschreven aanpak.

De berekening wordt uitgevoerd aan de hand van een gegeven relatie uit SodM (2016), die gebaseerd is op een relatie tussen de volumeverandering van het gesteente en de resulterende seismische energie volgens Kostrov (1974). Noodzakelijke invoerparameters hiervoor zijn de elasticiteitsmodulus van het reservoir, de Poisson-verhouding, de afschuifmodulus en de volumeverandering ten gevolge van de verdichting van het reservoir. De waarden voor Poisson's ratio, shear modulus en elastic modulus zijn gebaseerd op boorgatmetingen en boorkernanalyses van boorgaten in de regio (hoofdstuk 3 van de Deltares-studie). Samen met de waarden voor de veldgrootte en de geplande drukverlaging wordt hieruit de verwachte maximale grootte geschat. Helaas is er geen informatie over de berekening van de volumeverandering, zodat de berekende maximummagnitudes van $M_w = 2,4$ (N05-A-Zuidoost) en $M_w = 2,7$ (Tanzaniet-Oost) niet kunnen worden gereconstrueerd.

Over het geheel genomen liggen de vastgestelde maximummagnitudes binnen het bereik van de schatting via de breukgeometrie en lijken zij dus plausibel. Ook hier is het niet duidelijk welke invloed de onnauwkeurigheid bij de bepaling van de afzonderlijke parameters zou hebben op de schatting van de maximummagnitude. Met name variaties in de bepaling van de compressiecoëfficiënt en een eventuele grotere drukverlaging zouden vermoedelijk tot een aanzienlijke wijziging van de resultaten kunnen leiden.

Uit onze ervaring blijkt dat de maximummagnitudes die met beide methoden worden bepaald in een niet-kritisch bereik liggen - vooral voor een offshore aardgasveld. Voor de Nederlandse onshore aardgasvelden geven Dost en Haak (2007) ook een limiet voor de schadegrootte van $M_L = 3,2$ ($M_w \sim 3,1$).

5.2.5 Risicoscreening

Aangezien de berekende maximummagnitude boven de waarde van $M = 2,5$ ligt, moet volgens de specificatie een risicoscreening worden uitgevoerd. Het onderzoek is verdeeld in twee gebieden:

1. Een classificatie voor het inschatten van het gevaar te wijten aan beïnvloedende factoren van de ondergrond
2. Een classificatie voor de beoordeling van plaatselijke kwetsbaarheid (vulne- rabiliteit)

Het doel van screening is risico's die uit deze twee componenten bestaan, te kunnen opsporen en beoordelen. Screening is een nuttige beoordelingsmethode, maar is uiteraard ontworpen voor toepassing op aardgasvelden op het vasteland. Op basis van de categorieën van de screening is het dan ook niet verwonderlijk dat het resultaat de (laagste) risicocategorie I is. Naar onze mening weerspiegelt dit echter ook een realistische beoordeling van het bestaande risico.

5.3 Schatting van v_{max}

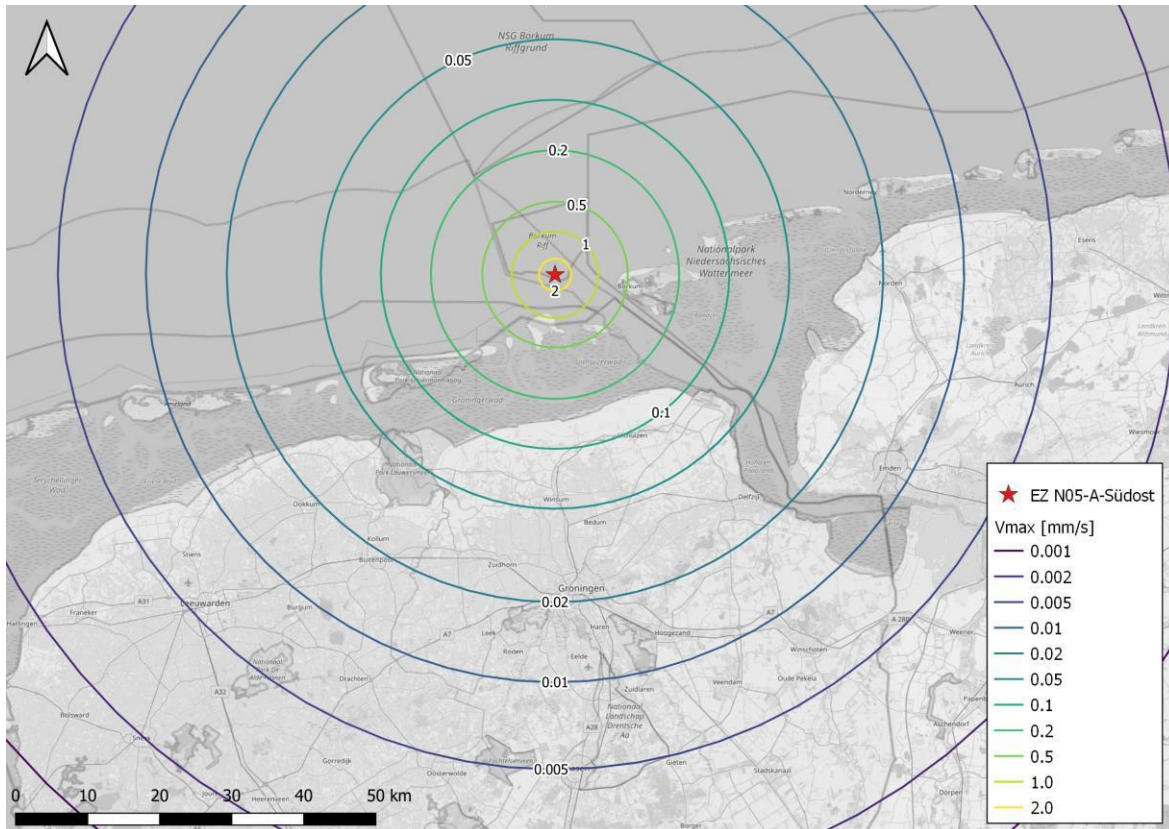
In aanvulling op de door Deltares gepresenteerde overwegingen wordt hieronder een schatting gemaakt van de maximale trillingssnelheid die aan de oppervlakte kan worden verwacht. Hiervoor wordt de *Ground Motion Prediction Equation (GMPE)* volgens Douglas et al. (2013) gebruikt. Deze relatie werd speciaal ontwikkeld voor geïnduceerde seismische gebeurtenissen en voorspelt de trillingssnelheden veroorzaakt door een seismische gebeurtenis van een bepaalde magnitude M_w als functie van de hypocentrale afstand aan het oppervlak. In het model is ook een versterkingsfactor opgenomen voor de impact van de lagen nabij de oppervlakte (Poggi et al., 2011). Modelleren met een GMPE biedt dus de mogelijkheid om de maximale trillingssnelheden aan het oppervlak in te stellen ten opzichte van een waarneming door de mens (van $v_{max} \sim 0,3 - 0,5$ mm/s) of ten opzichte van referentiewaarden in DIN-normen (5 mm/s voor normale woongebouwen).

In het onderstaande is een dergelijke modellering uitgevoerd voor een maximaal conservatief geval met de in tabel 4 gegeven invoerparameters. De hypocentrische diepte werd verondersteld 3 km te bedragen, aangezien volgens Segall (1989) de verdichting van het reservoir door de terugtrekking van de vloeistof ook de activering van breukzones boven het re-servoir mogelijk maakt. De bron werd geplaatst op de breukzone die het dichtst bij de Oost-Friese eilanden en het vasteland ligt, de brandpuntsdiepte iets ondieper dan het reservoir en de magnitude werd gebruikt met de maximaal bepaalde waarde.

Tabel 4: Inputparameters voor de modellering van een seismische gebeurtenis in het projectgebied door GMPE volgens Douglas et al. (2013).

Magnitude	Hypocentrale diepte	Bron
$M_w = 2.9$	3 km	Fout F15 (N05-A-Zuid-Oost)

De resultaten van de modellering worden als isolijnen van gelijke trillingssnelheid op een kaart weergegeven (figuur 4). Maximale waarden van de trillingssnelheid van $v_{max} \sim 1$ mm/s zijn bepaald voor Rottumerplaat, $v_{max} \sim 0,5$ mm/s voor Borkum en Schiermonnikoog en $v_{max} \sim 0,1$ mm/s voor het Nederlandse vasteland. In het hier gepresenteerde maximale conservatieve geval is een dergelijke seismische gebeurtenis derhalve niet uitgesloten, maar een overschrijding van de referentiewaarden van DIN 4150 (3 mm/s voor onder monumentenzorg vallende gebouwen; 5 mm/s voor woongebouwen; 20 mm/s voor industriële gebouwen in het frequentiebereik van 1 - 10 Hz) en dus mogelijke schade aan gebouwen zijn niet te verwachten.



Figuur 4: Berekening van de maximale trillingsnelheid v_{max} aan het oppervlak volgens Douglas et al. (2013) voor een geïnduceerde seismische gebeurtenis van magnitude $M_w = 2,9$ in veld N05- A- Suidoost (rode ster) op een diepte van 3 km. Lijnen met gelijke trillingsnelheid zijn in kleur aangegeven.

5.4 Conclusies

In deze studie van Deltares wordt het risico van het veroorzaken van een geïnduceerde seismische gebeurtenis door mijnbouw in het offshore aardgasveld N05-A en de omliggende exploratiegebieden onderzocht. De beoordeling is gebaseerd op de methodologie van de Staatstoezicht op de Mijnen (SodM, 2016), die is gebaseerd op de empirische analyse van geïnduceerde seismiciteit in de Nederlandse aardgasvelden in de afgelopen 30 jaar. Om deze reden - de plaats-specifieke empirische analyse - kan de aanpak niet worden toegepast op andere aardgasvelden in de wereld, maar dankzij de brede gegevensbasis en de bewezen correlaties is het een geschikte methode om het seismische risico in het projectgebied te beoordelen.

De kans op aardbevingen wordt beoordeeld aan de hand van de DHAIS-methode, waarbij stapsgewijs rekening wordt gehouden met bepaalde essentiële parameters. De beoordeling

met behulp van de parameters drukverlaging ($DP/Pini$) en breukdichtheid (B) is vrij duidelijk. De bepaling van de verhouding E_{ratio} van de elasticiteitsmoduli geeft echter aanleiding tot een grotere spreiding van de resultaten als gevolg van de vaak slechts onnauwkeurig te bepalen ingangsvARIABLEN (v_p en v_s snelheden, alsmede dichtheid). Helaas ontbreekt in de studie van Deltares informatie over de precieze procedure en de keuze van de parameters, zodat de betrouwbaarheid van de vastgestelde waarde voor E_{ratio} niet kan worden beoordeeld. Voor een dergelijke schatting zouden ten minste één parameter variatie en de specificatie van de resulterende standaardafwijkingen noodzakelijk zijn om de consistentie van de verkregen resultaten te kunnen beoordelen. Een besluit over de waarschijnlijkheid van het optreden van geïnduceerde seismiciteit op basis van deze parameter lijkt derhalve niet betrouwbaar te zijn.

Hoewel de kans volgens Deltares te verwaarlozen is, worden toch mogelijke maximummagnitudes geschat. Hiervoor worden twee verschillende benaderingen gebruikt - via de geometrie van de breuk en via de energiebalans. De schatting via de geometrie van de breuk is gebaseerd op een relatief eenvoudige relatie over het seismisch moment. In deze raming wordt een aantal veronderstellingen gemaakt over breuklengte en breukhoogte, die naar onze mening niet geheel juist zijn. Niettemin wordt de aanpak als conservatief beoordeeld, aangezien wordt aangenomen dat de breuk over het gehele breukvlak optreedt. Maar ook hier zou een variatie van de parameters nuttig zijn geweest om de omvang van de vastgestelde maximummagnitude te kunnen beoordelen. De raming van de energiebalans kan niet volledig worden begrepen door het gebrek aan gegevens en is ook afhankelijk van parameters die slechts met een zekere mate van onzekerheid kunnen worden bepaald (Poisson-verhouding, afschuifmodulus en elasticiteitsmodulus). Ook hier wordt geen rekening gehouden met de invloed van parameter variatie. Over het geheel genomen ligt het resultaat echter onder de schatting via de breukgeometrie, zodat de daar bepaalde maximale magnitude $M_w = 2,9$ in feite de beslissende maatstaf is.

De uiteindelijke risicoscreening is duidelijk bedoeld voor gebruik in aardgasvelden op het vasteland. De offshore-locatie van het projectgebied leidt dus tot de (laagste) risicocategorie I. Naar onze mening weerspiegelt dit echter ook een realistische beoordeling van het bestaande risico.

Bovendien heeft DMT een schatting gemaakt van de maximale trillingssnelheid die aan de oppervlakte kan worden verwacht in het geval van een geïnduceerde gebeurtenis van de vastgestelde maximumomvang in het projectgebied. Het resultaat toont aan dat voor een maximaal conservatief geval, merkbare trillingen mogelijk zijn - maar er is geen schade te verwachten.

6. Literatuur

Albrecht (2015). Onderzoek naar de invloed van spanningen op de vloeistofpermeabiliteit van Rotliegend tigt gas zandstenen. Dissertatie TU Clausthal.

Asaei, H. en Moosavi, M. (2013). Experimentele meting van samendrukbaarheidscoëfficiënten van synthetisch zandsteen in hydrostatische omstandigheden. *J. Geophys. Eng.* 10 (2013) 055002 (11pp), doi:10.1088/1742-2132/10/5/055002.

Bourne, S.J. en Oates, S.J. (2017). Ontwikkeling van statistische geomechanische modellen voor het voorspellen van seismiciteit geïnduceerd door gasproductie uit het Groningen veld. *Nederlands Tijdschrift voor Geowetenschappen - Geologie en Mijnbouw* |96 - 5 | s175-s182 | 2017.

Deltares (2020). Seismisch risico- en bodemdalingsonderzoek N05-A Gasveld en omliggende prospects, 11202042-003-BGS-0007, 14 september 2020.

Dietl, C. (2019). Poroelastische parameters N05-01-S1. Heiligenstadt, Duitsland: Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns.

DIN 4150 "Trillingen in de civiele techniek", deel 3 "Acties op constructiesystemen" (2016-12).

Dost, B. en Haak, H.W. (2007). Natuurlijke en geïnduceerde seismiciteit. *Geologie van Nederland*, Onder redactie van Th.E. Wong, D.A.J. Batjes & J. de Jager, Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, 2007: 223-239.

Douglas, J., Edwards, B., Convertito, V., Sharma, N., Tramelli, A., Kraaijpoel, D., Mena Cabrera, B., Maercklin, N. en Claudia Troise (2013). Voorspelling van grondbewegingen ten gevolge van geïnduceerde aardbevingen in geothermische gebieden. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 3, pp. 1875-1897, June 2013, doi: 10.1785/0120120197

Eissa, E.A. en Kazi, A. (1988). Verband tussen statische en dynamische Young's moduli van gesteenten. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 25-6. doi:10.1017/njg.2017.35

Fjaer, E. H. (2008). Petroleumgerelateerde gesteentemechanica (2e editie ed., Vol. *Developments in Petroleum Science* 53). Amsterdam: Elsevier.

Frohlich, C. (2012). Een overzicht van aardbevingen en injectieputlocaties in de Barnett Shale, Texas. *The Leading Edge*, Volume 31, Issue 12.

Geertsma, J. (1973). Een basistheorie van bodemdaling ten gevolge van reservoirverdichting; het homo-gene geval. Verhandelingen van het Koninklijk Nederlands geologisch mijnbouwkundig Genootschap. De analyse van de bodemdaling als gevolg van de gaswinning in de omgeving van Groningen, Nederland, "Editor Nederlandse Aardolie Maatschappij B. V.", Deel 28, 1973.

Grasso, J.R. en Wittlinger, G. (1990). TIEN JAAR SEISMISCH TOEZICHT OVER EEN GASVELD, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 80, No. 2, pp. 450-473.

Hanks, T. en H. Kanamori (1979). Moment magnitude schaal, J. Geophys. Res. 84, 2348-2350.

Hettema, M. en de Pater, C. (1998). Het poreus-mechanisch gedrag van Felser zandsteen: stress- en temperatuurafhankelijk. SPE/ISRM Eurock, (pp. 347-355). Trondheim Norway.

Induced Seismicity Potential in Energy Technologies, (2012). The National Academy of Sciences, ISBN 978-0-309-25367-3.

Kostrov, V.V. (1974). Seismisch moment en energie van aardbevingen en seismische stroming van gesteenten, Izv. Acad. Sci. USSR Phys. Solid Earth, Eng. Transl., 1, 23-44.

Lindenfeld, M. en Leydecker, G. (2004). Bepaling van de verhouding tussen breuklengte en breuklengte en resultaten van sliptendensanalyse langs neotectonische breuken in Noord-Duitsland. Federaal Instituut voor Geowetenschappen en Natuurlijke Rijkdommen Hanno- ver, 5 april 2004, 10639/04.

McGarr, A., Simpson, D. en Seeber, L. (2002). Case Histories of Induced and Triggered Seismicity. Internationale Geofysica, Volume 81, Deel A, 2002, Pagina's 647-661.

Nepveu M., van Thienen-Visser K. en Sijacic D. (2016). Statistieken van seismische gebeurtenissen in het Groningen-veld. Bull Earthq Eng 14(12):3343-3362.

Pimienta, L., Fortin, J. en Guéguen, Y. (2017). Nieuwe methode voor de meting van samendrukbaarheids- en poro-elasticiteitscoëfficiënten in poreuze en permeabele rotsen. AGU Publications, doi: 10.1002/2016JB013791.

Pluymaekers, M.P.D., J.C. Doornenbal en H. Middelburg (2017). Velmod-3.1. TNO rapport 2017 R11014 met erratum pagina 67 Definitief. Gegevens van nlog.nl.

Poggi, V., Edwards, B. en Fäh, D. (2011). Derivation of a reference shearwave velocity model from empirical site amplification, Bull. Seismol. Soc. Am. 101, no. 1, 258-274, doi: 10.1785/0120100060.

Schober, F. en Sroka, A. (1983). De berekening van grondbewegingen boven spelonken rekening houdend met temporele convergentie en rotsgedrag. Kali und Stein- salz, mei 1983, Volume 8, Issue 10, Verlag Glückauf GmbH, Essen.

Segall, P. (1989). Aardbevingen veroorzaakt door vloeistofextractie. Geologie (1989) 17 (10): 942-946.

Segall, P. en Fitzgerald, S.D. (1998). Een nota over geïnduceerde spanningsveranderingen in koolwaterstof- en geothermische reservoirs. Tectonophysics 289 (1998) 117-128.

SodM (2016). Methodiek voor risicoanalyse omtrent geïnduceerde bevingen door gaswinning. Den Haag: Staatstoezicht op de mijnen.

Sroka, A. en Schober, F. (1990). Studie naar de analyse en voorspelling van het verzakkings- en verdichtingsgedrag van het aardgasveld in de Groningen/Eemsmonding (ongepubliceerd). Clausthal-Zellerfeld, mei 1990.

Van Dalfsen, W., van Geesel, S.F. en Doornenbal, J.S. (2007). Velmod-2 Joint Industry Project, TNO rapport 2007-U-R1272C. www.nlog.nl.

van Eijs, R.M.H.E., Mulders, F.M.M. en Nepveu, M. (2004). Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit. TNO rapport NITG 04-171-C d.d. 7 april 2004.

van Eijs, R.M.H.E., Mulders, F.M.M., Nepveu, M., Kenter, C.J. en Scheffers, B.C. (2006). Correlatie tussen de eigenschappen van koolwaterstofreservoirs en geïnduceerde seismiciteit in de Neth- erlands. Engineering Geology 84 (2006) 99-111.

van Thienen-Visser, K., Nepveu, M. en Hettelaar, J. (2012). Deterministische gevarenanalyse voor geïnduceerde seismiciteit in Nederland. TNO; rapportnummer 2012 R10198. www.nlog.nl.

Wang, H. (2000). Theorie van de lineaire poro-elastische met toepassingen in de geomechanica en de hydrologie. Princeton University Press.

Wells, D. L. en Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement: Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, pp 974-1002.

Yerkes, R.F. en Castle, R.O. (1976). Recente oppervlaktebewegingen in de Baldwin heuvels, Los Angeles County, Californië. Engineering Geology, Vol. 10, pp 151-167.