

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56
F +31 88 866 44 75

TNO-rapport 2021 R10977

Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit (DHAIS), actualisatie 2021

Datum	18 februari 2022
Auteur(s)	J.A. Roholl, L.G. Brunner, N. Versteijlen, J. Hettelaar en M. Wilpshaar
Exemplaarnummer	1.3
Oplage	
Aantal pagina's	74 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	4
Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Projectnaam	Beleidsadviesing seismiciteit
Projectnummer	060.47419/01.03.13

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2021 TNO

Versie	Datum	Wijzigingen
1.0	2-jun-21	Review versie
1.1	23-jun-21	Kleine aanpassingen ter verduidelijking. Ondertekende versie
1.2	6-sep-21	Typo datum eerste beving Kommerzijl in tabel 4-2 en 5-2 gecorrigeerd
1.3	18-feb-22	Typo formule 3.1 gecorrigeerd

Managementsamenvatting

DHAIS methodiek

De statistische analyse om de kans op geïnduceerde seismiciteit als gevolg van olie- of gaswinning van kleine velden te beschrijven wordt afgekort als DHAIS. Deze afkorting staat voor 'deterministische dreiging (*hazard*) analyse voor geïnduceerde seismiciteit' en is voor het eerst beschreven in 2004. De DHAIS methode beschrijft een statistische relatie tussen bepaalde veld- en productiekenmerken en het optreden van seismiciteit. Deze relatie geeft een kans op beven tijdens de productieperiode veroorzaakt door olie- of gasproductie. De kans wordt bepaald aan de hand van de waarden van drie indicatorparameters DP/P_{ini} , B en E. De drie indicatorparameters zijn een maat voor:

1. drukval (DP/P_{ini}) in het olie- of gasvoerende reservoirgesteente door productie
2. breukdichtheid (B) van het reservoirgesteente en
3. het stijfheidscontrast (E) van het reservoirgesteente met de afsluitende laag.

Een veld heeft een kans op beven als alle drie indicatorparameters een grenswaarde overschrijden. Belangrijk is te benadrukken dat de door de DHAIS vastgestelde relatie enkel ziet op de kans dat er zich één beving voordoet. De methode geeft geen inzicht in de magnitude van de beving, noch de kans op het optreden van meerdere bevingen.

Actualisatie

Periodiek wordt de DHAIS geactualiseerd om de dataset uit te breiden met nieuwe data zoals recente seismiciteit, nieuw in productie genomen voorkomens (velden) en veranderde reservoirdrukken. De laatste actualisatie is in 2012 uitgevoerd. In dit rapport is de beschikbare data tot en met 1 maart 2021 verwerkt. Elke nieuwe actualisatie heeft een grotere dataset en zal nieuwe grenswaarden opleveren voor de drie indicatorparameters. In deze actualisatie is daarnaast ook de definitie voor de B-waarde nauwkeuriger vastgesteld. Hierdoor zijn voor enkele velden de B-waarde uit de voorgaande studies aangepast. Daarnaast is bij deze actualisatie gebruik gemaakt van een grotere verbeterde E-waarde dataset.

Reeds bevende voorkomens	
$DP/P_{ini} \geq 20\%$	$B \geq 0,84$ en $E \geq 1,07$: Kans op beven
	$B < 0,84$ en/of $E < 1,07$: Verwaarloosbare kans
$DP/P_{ini} < 20\%$	Verwaarloosbare kans

Resultaat

Het resultaat van deze actualisatie wat betreft de grenswaarden van de drie indicatorparameters in vergelijking met de voorgaande studies uit 2004 en 2012 is als volgt:

- De grenswaarde van de relatieve drukval is iets lager (was 0,28 en is nu 0,20). Dit betekent dat er bij een iets een kleinere drukverlaging bevingen kunnen optreden. Aangezien het overgrote deel van de velden al (ruim) boven de vorige grenswaarde depleteerden heeft dit geen grote impact.
- De grenswaarde van breukdichtheid (B) is nagenoeg hetzelfde gebleven (was 0,86 en is nu 0,84). Er zijn geen velden die op basis van deze verlaging van de

B-grenswaarde van de categorie 'verwaarloosbare kans op beven' naar de categorie 'kans op beven' verschuiven.

- De E-grenswaarde heeft nu een (iets) hogere waarde (was 1,01 en is nu 1,07). De E-parameter blijft een proxy voor de waarneming dat een aantal "reservoir-afsluitende laag" combinaties een grotere kans op beven hebben dan andere.
- De dataset van deze actualisatie laat daarnaast zien dat de twee kans-klassen van beven uit de voorgaande studies (hoge kans op beven en lage kans op beven) niet meer statistisch van elkaar te onderscheiden zijn. De voorkomens zijn daarom ingedeeld in een verwaarloosbare kans op beven, een kans op beven en reeds bevende voorkomens.

Toetsing aan SRA

Een seismische risico analyse (SRA) van een olie- en gasveld is een wettelijk onderdeel vastgelegd in de Mijnbouwwet. Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) heeft voor de uitvoering van de SRA in 2016 een leidraad opgesteld. De DHAIS, gebaseerd op de voorgaande actualisatie uit 2012, maakt onderdeel uit van deze leidraad. De SRA koppelt de bevingskans van de DHAIS aan de mogelijke gevolgen wat het uiteindelijke risico bepaalt. In deze actualisatie is onderzocht of de voorspellingen van de DHAIS methode omtrent de kans op beven robuust waren. De conclusie is dat er geen aardbeving is voorgekomen in de voorkomens met een verwaarloosbare kans op beven.

Daarnaast is vastgesteld, hoewel geen onderdeel van de DHAIS, dat er geen bevingen met een hogere magnitude zijn waargenomen dan de *realistisch sterkst mogelijke beving* van een voorkomen volgens de leidraad, de zogeheten M_{\max} . In de meeste gevallen zijn de bevingen één magnitudepunt of meer lager dan de M_{\max} . In enkele gevallen ligt de hoogst geobserveerde beving dicht bij de M_{\max} tot maximaal een 0,5 magnitudepunt.

Inhoudsopgave

	Managementsamenvatting	2
1	Inleiding	5
2	Introductie DHAIS	6
3	Data & Methode.....	7
3.1	Data geïnduceerde seismiciteit	7
3.2	Indicatorparameters.....	9
4	Resultaten: Geïnduceerde seismiciteit sinds 2010.....	11
4.1	Toetsing geïnduceerde bevingen aan DHAIS	12
5	Actualisatie grenswaarden	15
5.1	Relatieve drukval: DP/P_{ini}	16
5.2	E-parameter.....	18
5.3	B-parameter.....	19
6	Resultaten: actualisatie kans op beven	21
6.1	Hypothese verhoogde kans op beven met hoge E-waarde	21
6.2	Geactualiseerde kans op beven	24
6.3	Analyse kans op beven $M_L \geq 1,5$	26
7	Discussie	27
7.1	Impact detectiegrens en locatiebepaling (3D) geïnduceerde bevingen	27
7.2	Indicatorparameters.....	27
7.3	Kans op beven.....	29
7.4	Geregistreerde bevingen en M_{max} van de SRA	30
8	Conclusies.....	33
9	Referenties	35
10	Ondertekening	39

Bijlage(n)

- A Overzicht geïnduceerde seismiciteit 10 mei 2010 –1 maart 2021
- B Indicatorparameters alle voorkomens
- C Beschrijving statistiek methode DHAIS
- D Beschrijving bepaling E-parameter

1 Inleiding

In het kader van de Mijnbouwwet¹ moeten de risico's op en eventuele gevolgen van bodemtrillingen (seismiciteit) in de beschrijving van de winning (Winningsplan) van een olie- en gasveld opgenomen worden. Het gaat hier om geïnduceerde seismiciteit als gevolg van olie- of gaswinning. In 2004 hebben TNO en KNMI een studie over dit onderwerp gepubliceerd over de kleine velden² op land en binnen de 3-mijls zone. Onderdeel van die studie (TNO & KNMI, 2004) is de rapportage 'deterministische dreiging (*hazard*) analyse voor geïnduceerde seismiciteit' (TNO, 2004), afgekort DHAIS.

In het DHAIS rapport wordt een statistische relatie gelegd tussen bepaalde veld- en productiekenmerken en het optreden van (historische) seismiciteit. Deze relatie geeft een inschatting van de kans op beven (over de productieperiode) veroorzaakt door olie- of gasproductie. Deze kans wordt bepaald aan de hand van grenswaarden van drie zogeheten indicatorparameters; drukval (Dp/P_{ini}), breukdichtheid (B) en stijfheidscontrast (E) tussen het gasvoerende (reservoir) gesteente en afsluitende gesteentelaag. Periodiek wordt de DHAIS geactualiseerd door de dataset uit te breiden met recente seismiciteit, nieuw in productie genomen velden en actualisatie van de reservoirdrukken. In 2012 (TNO, 2012) is het rapport uit 2004 geactualiseerd met nieuwe data met als peildatum 10 mei 2010.

Daarnaast is in 2016 een seismische risico analyse (SRA) als onderdeel van het winnings- en opslagplan opgenomen in de Mijnbouwwet. Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) heeft voor de uitvoering van de SRA een leidraad opgesteld (SodM, 2016). De DHAIS 2012 studie maakt onderdeel uit van de in de leidraad beschreven procedure.

Dit rapport in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) is een actualisatie van de DHAIS studie uit 2012. De actualisatie maakt gebruik van de meest recente gegevens van geïnduceerde seismiciteit en drukdata tot en met 1 maart 2021.

¹ https://wetten.overheid.nl/BWBR0014168/2020-07-01#Hoofdstuk4_Paragraaf4.1_Artikel34

² Kleine velden zijn alle velden in Nederland met uitzondering van het Groningenveld

2 Introductie DHAIS

De DHAIS methodiek is in 2004 (TNO, 2004) ontwikkeld met als doel een gekwantificeerde schatting te geven van de kans op een geïnduceerde beving in een producerend of een nog te produceren voorkomen aan de hand van (te meten) eigenschappen (geologische, productietechnische, mechanische) van dat voorkomen. Een voorkomen is een gasvoerend gesteente (reservoir) dat druktechnisch gescheiden is van andere gasvoerende gesteenten. Een (olie- of) gasveld kan uit meerdere voorkomens bestaan, zoals gestapelde reservoirs van verschillende ouderdom en/of breukbegrensd reservoirs van dezelfde ouderdom.

Een voorwaarde voor de te ontwikkelen methodiek was dat de data op eenvoudige manier verzameld en geraadpleegd moest kunnen worden. Er is daarom gekozen om de studie met name te baseren op de data beschikbaar uit openbare winningsplannen.

De 2004 studie heeft verschillende reservoir eigenschappen onderzocht die eventueel met het optreden van een beving te correleren zijn, zogeheten 'indicatorparameters'. Een indicatorparameter wordt in de 2004 studie beschreven als een parameter die één of een combinatie van factoren die van belang zijn bij het optreden van een beving meeneemt. Naast relatief eenvoudig te bepalen moesten indicatorparameters ook aan de volgende criteria voldoen. Allereerst een fysische relevante verklaring geven waarom de parameter van belang is bij het optreden van een beving. Daarnaast een onderscheidend vermogen hebben tussen bevende en niet-bevende voorkomens. Aan de hand van een statische analyse (zie uitgebreide uitleg in Bijlage C) zijn de volgende indicatorparameters van belang:

1. drukval (DP) in het reservoir (gasvoerende gesteentelaag),
2. E-parameter, die de verhouding tussen de Young's moduli (stijfheid) van de overburden (afsluitende gesteentelaag) en het reservoir geeft,
3. en B-parameter die een maat is voor de breukdichtheid.

Het blijkt dat voorkomens enkel beven als deze drie indicatorparameters boven een grenswaarde liggen, bepaald uit de statische analyse. Met andere woorden, voorkomens met een van deze indicatorparameters onder de grenswaarde, zullen op basis van deze methodiek niet (gaan) beven. Op basis van statistisch onderzoek (zie Bijlage C) naar de combinatie van deze parameters en gebruikmakend van informatie over de voorkomens die gebeefd hebben, zijn de voorkomens ingedeeld in vier verschillende kansklassen. De indeling bestaat uit voorkomens met een verwaarloosbare kans op beven, een lage en een hoge kans op beven en voorkomens die al gebeefd hebben.

In de 2012 actualisatie (TNO, 2012) is de drukval indicator aangepast naar relatieve drukval (DP/P_{ini}) zodat deze indicatorparameter net als de andere twee ook dimensieloos is. De grenswaarden van de indicatorparameters en de kansklassen zijn in 2012 geactualiseerd tot de peildatum van 10 mei 2010.

3 Data & Methode

De onderliggende data voor de DHAIS studies zijn met name afkomstig uit de openbare winningsplannen (www.nlog.nl) en de aardbevingscatalogus van de KNMI (www.knmi.nl³). Een voorkomen is hierbij gedefinieerd als een druktechnisch gescheiden reservoir met eigen indicatorparameterwaarden. De voorkomens die meegenomen zijn in de dataset zijn alle voorkomens die in productie zijn geweest of in productie zijn op 1 maart 2021.

3.1 Data geïnduceerde seismiciteit

De data voor deze actualisatie en de twee voorgaande DHAIS studies (TNO, 2004 & 2012) is afkomstig uit de aardbevingscatalogus van het KNMI³.

3.1.1 *Detectiegrens en onzekerheid locatiebepaling*

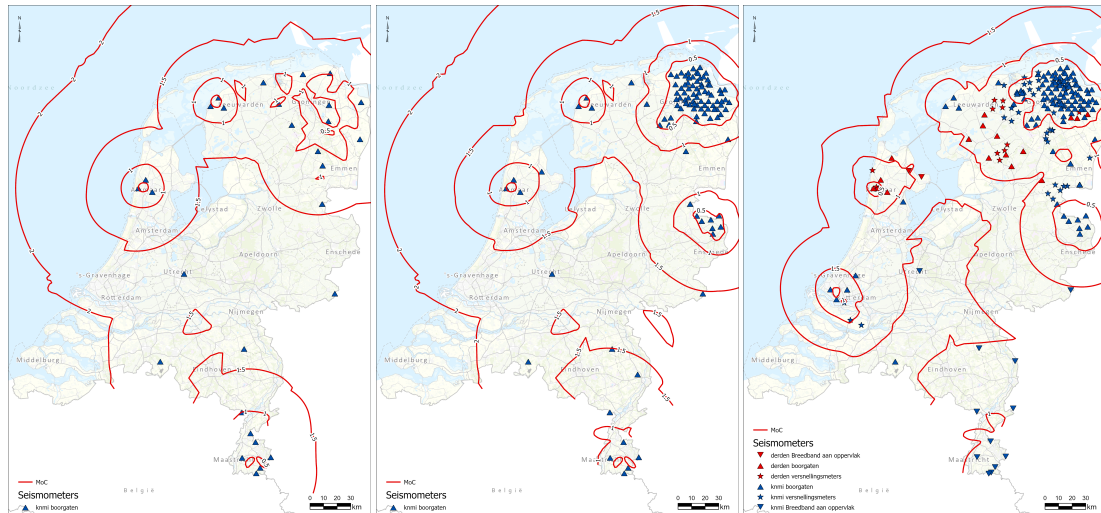
De detectiegrens en locatiebepaling van bevingen zijn afhankelijk van de dichtheid en gevoeligheid van het meetnetwerk en de lokale geologie (Dost et al., 2017; Kruiver et al., *in druk*). De detectiegrens is de minimale magnitude die het netwerk kan detecteren. Hierdoor varieert de nauwkeurigheid van de locatiebepaling en de hoogte van de detectiegrens zowel geografisch als door de tijd. Het netwerk in Noordoost-Nederland is bijvoorbeeld dichter dan het zuidwesten van Nederland (Figuur 3-1). Daarnaast zijn het netwerk en daarmee de detectiegrens en locatiebepaling door de tijd heen verbeterd.

Dost et al. (2017) en recent Kruiver et al. (*in druk*)⁴, geven een overzicht van de minimale magnitude die het netwerk kan detecteren. Deze varieert tussen de $M_L=1,5$ en $M_L=2,0$ voor het zuidwesten van Nederland tot ongeveer 0,5 in het noordoosten van Nederland boven het Groningenveld. In de praktijk betekent dit dat voor met name zuidwest Nederland eventuele kleine bevingen, lager dan $M_L=1,5$, gemist kunnen zijn in de dataset. Daarnaast is de toename van het aantal geregistreerde lichtere bevingen ($< M_L=1,5$) boven het Groningenveld vanaf 2014 deels het gevolg van uitbreiding van het meetnetwerk (bijv. KNMI, 2020 & NAM, 2019). In deze actualisatie is net als in de voorgaande studies gekozen om alle geregistreerde bevingen mee te nemen. Om de invloed van het eventueel missen van bevingen met een lage magnitude te kwantificeren is in deze studie ook gekeken naar de uitkomsten wanneer alleen bevingen van boven de $M_L=1,5$ mee worden genomen (zie Resultaten en Discussie).

De onzekerheid in het bepalen van de locatie van bevingen is gekwantificeerd in een aantal studies van TNO, KNMI en NAM (TNO, 2016a-b; NAM, 2015; Dost et al., 2017; Jagt et al., 2018). De onzekerheid in de locatie is er ook wat betreft de diepte. Bevingen veroorzaakt door gaswinning krijgen van het KNMI een standaard diepte van 3 kilometer toegewezen. Het maakt het daarom lastig om bevingen die optreden bij velden met verticaal gestapelde voorkomens met zekerheid toe te kennen aan een specifiek voorkomen binnen het veld.

³ <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/dataset/aardbevingscatalogus>

⁴ <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/seismische-meetstations>



Figuur 3-1 Magnitude grenswaarde voor lokalisatie van het seismisch netwerk voor (links), na (rechts) verbetering van het netwerk in 2014, Dost et al., 2017 en huidige netwerk (Kruiver et al., in druk, zie ook: www.knmi.nl).

3.1.2 Hoe zijn bevingen toegekend aan voorkomens?

Een geïnduceerde beving in deze studie wordt alleen toegekend aan een producerend voorkomen. Wanneer een voorkomen nog niet in productie is ten tijde van de beving kan de productie van (olie- of) gaswinning per definitie niet de oorzaak zijn van de beving. De oorsprong van een geïnduceerde beving wordt gerelateerd aan een (natuurlijk) breuksysteem van een olie- of gasvoorkomen. Omdat er een onzekerheid in de locatiebepaling van de bevingen bestaat is er gekozen om te kijken of een beving binnen een straal van 3 km van de omtreklijn van een producerend voorkomen ligt. Dit is in lijn met voorgaande publicaties, zoals Vorös et al. (2019) waar een buffer van 2.5 km is gebruikt.

Om de DHAIS-statistiek te kunnen toepassen kan een beving slechts aan één voorkomen worden toegekend. Als er binnen een straal van 3 kilometer meerdere voorkomens liggen die in productie zijn ten tijde van de beving zal net als in voorgaande studies gekozen worden om de bevingen toe te kennen aan het dichtstbijzijnde voorkomen. Als het een veld betreft met gestapelde voorkomens wordt allereerst gekeken naar de omtrek van de voorkomens en aan het dichtstbijzijnde voorkomen toegekend. Over het algemeen geldt dat, tenzij het expliciet in Bijlage A anders is benoemd, de toekenning van de bevingen aan voorkomens uit de 2004 en 2012 studie zijn overgenomen.

3.1.3 Aanpassingen t.o.v. 2012 studie

In de 2012 DHAIS studie zijn enkele bevingen buiten de 3-mijls zone in de buurt van de gasvelden Q04-A, Q04-B en Halfweg (Q1) meegenomen. In deze actualisatie is gekozen om alleen te kijken naar de voorkomens op land (inclusief de 3-mijls zone). De keuze hiervoor is dat er geen (KNMI) meetnetwerk offshore aanwezig is. Hierdoor worden alleen bevingen van een relatief hoge magnitude geregistreerd en van alleen voorkomens relatief dicht bij de kust. Of andere offshore velden wel of niet gebeefd hebben is daarmee onzeker waardoor een ongewenste statistische bias ontstaat.

Voor enkele bevingen is het toekennen aan voorkomens verschillend aan de voorgaande studie uit 2012. Deze keuzes worden in Bijlage A toegelicht.

3.2 Indicatorparameters

De indicatorparameters waarop de DHAIS is gebaseerd zijn de relatieve drukval (DP/P_{ini}), de breukdichtheid (B) en het stijfheidscontrast (E). Hieronder wordt beschreven hoe deze drie indicatorparameters zijn bepaald. Dit betreft de data waarmee de indicatorparameters per voorkomen zijn bepaald en welke keuzes er zijn gemaakt wat betreft de data of de toepassing van de methodes in vergelijking met de voorgaande studies.

3.2.1 DP/P_{ini}

In de 2004 DHAIS studie werd gekeken naar de absolute drukval (DP) die was opgetreden op het moment van de eerste beving. Voor de in de DHAIS toegepaste (Bayesiaanse) statistiek gaat de voorkeur echter uit naar dimensieloze parameters en mede hierom is in de DHAIS 2012 actualisatie gekozen voor de relatieve drukval van het veld. Deze is gedefinieerd als de verhouding tussen de absolute drukval (DP) op een bepaalde peildatum en de initiële druk (P_{ini}). In deze studie is de DHAIS 2012 benadering en methode overgenomen. Voor de analyse van de grenswaarde DP/P_{ini} is voor de voorkomens de relatieve drukval op de peildatum 1^e beving van belang en voor alle andere voorkomens de relatieve drukval op de peildatum 1 maart 2021. Voor het bepalen van de kans op beven van een voorkomen dat (nog) niet heeft gebeefd is daarnaast ook de einddruk noodzakelijk voor het inschatten van de kans op beven. Als primaire bron voor de waarde van de initiële druk en einddruk is gebruikgemaakt van de winningsplannen. Het bepalen van de relatieve drukval op de peildatum 1^e beving is gelijk aan de benadering en methode van de actualisatie uit 2012 (TNO, 2012).

3.2.2 B -waarde

De parameter B is bepaald door de verhouding tussen de breukoppervlakte en het bruto gesteentevolume van een voorkomen. Deze parameter is specifiek per voorkomen. Als gevolg van nieuwe inzichten en/of nieuwe data (putgegevens, seismiek) kunnen de inputgegevens voor de bepaling van de B -waarde veranderen. In de 2004 DHAIS studie is de parameter B als volgt gedefinieerd:

$$B = \frac{\text{breukoppervlakte}^{\frac{3}{2}}}{\text{brutogesteentevolume}} = \frac{l_b^{\frac{3}{2}} \cdot h^{\frac{3}{2}}}{A \cdot h} = \frac{l_b^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{h}}{A} \quad (3.1)$$

Hierbij is h de maximale dikte van de gaskolom, l_b de totale breuklengte van de rand- en intra-reservoir breuken en A de oppervlakte van het voorkomen (gemeten binnen de gaswater contour). De totale breuklengte en de oppervlakte worden gedefinieerd op de (top) reservoir structuurkaarten uit de winningsplannen. De definitie van h is in deze actualisatie aangescherpt door zowel de hoogte van de gaskolom als de totale netto reservoirdikte te beschouwen. Het minimum van deze twee wordt gekozen voor de berekening van de “ B ” waarde omdat deze een fysische relevante verklaring geeft voor de kans op beven. Er vindt namelijk voornamelijk depletie plaats binnen het gasvoerend deel van het reservoir. Daarmee is de drukval en geassocieerde spanningsbouw voornamelijk in het gasvoerend reservoir.

In voorgaande studies is dit onderscheid niet consequent gemaakt waardoor in enkele gevallen de berekende B-waarde niet in overeenstemming is met de definitie. Voorbeelden van een te hoge B waarde zijn de voorkomens met dunne reservoir zanden (zoals Ten Boer zanden) die een vele malen hogere gaskolom kunnen hebben. Depletie vindt alleen plaats in de dunne gasvoerende zandlaagjes en de netto dikte is daarmee een stuk kleiner dan de gaskolom. In dit geval wordt voor de definitie van h de totale reservoirdikte beschouwd. Een voorbeeld van een te lage B waarde is als de hoogte van de gaskolom kleiner is dan de reservoirdikte. Depletie vindt voornamelijk plaats in het gasvoerende gedeelte van het reservoir. In deze gevallen wordt voor de definitie van h de hoogte van de gaskolom beschouwd.

De B-waarde is daarom waar mogelijk voor alle voorkomens uit voorgaande studies opnieuw berekend op basis van bovenstaande definitie. De hoogte van de gaskolom is bepaald door het verschil te nemen van de apex van de top reservoir kaart van het voorkomen en het (olie- of) gaswater contact. Het (olie- of) gaswater contact is overgenomen uit de winningsplannen en bijbehorende structuurkaarten. De breuklengtes en oppervlakten zijn overgenomen van de voorgaande studies tenzij er een actualisatie van het winningsplan heeft plaatsgevonden waarbij de structuurkaart van het veld is aangepast.

3.2.3 *E-waarde*

De E-parameter beschrijft het contrast in stijfheid, de mate waarin een gesteente zich tegen elastische vervorming verzet, tussen de afsluitende laag (seal) en het reservoir. Deze E waarde is een gemiddelde waarde specifiek voor de seal/reservoir combinatie, niet voor het individuele voorkomen. Een nadere uiteenzetting over de achtergrond van de E parameter is te vinden in Bijlage D.

In de voorgaande studies is de E-parameter beschreven als de verhouding tussen de Young's moduli van de *overburden* en het reservoir. De term *overburden* kan verwarrend zijn voor het bepalen van de E-waarde omdat in principe alléén de direct boven het reservoirgesteente liggende afsluitende laag wordt bedoeld en niet de gehele *overburden*. In het vervolg van deze rapportage wordt daarom gesproken over de afsluitende laag of seal in plaats van *overburden*.

In de originele studie is voor elk type reservoir en afsluitende laag een gemiddelde E-waarde bepaald. Deze is gebaseerd op de gemiddelde snelheid van seismische drukgolf (V_s) en seismische schuifgolf (V_p) data per reservoirinterval zoals vastgesteld in 16 putten verspreid over Nederland. Deze gemiddelde V_s en V_p zijn gebruikt om de dynamische Young's modulus uit te rekenen. Deze dynamische waarden zijn vervolgens omgerekend naar statische waarden d.m.v. een empirische relatie uit Eissa en Kazi (1988). De V_s en V_p data in de originele studie was toentertijd alleen op papieren en sepija logs beschikbaar waardoor er slechts een visueel gemiddelde over bepaalde trajecten bepaald is. In TNO (2012) zijn de E-waarden uit de originele studie overgenomen.

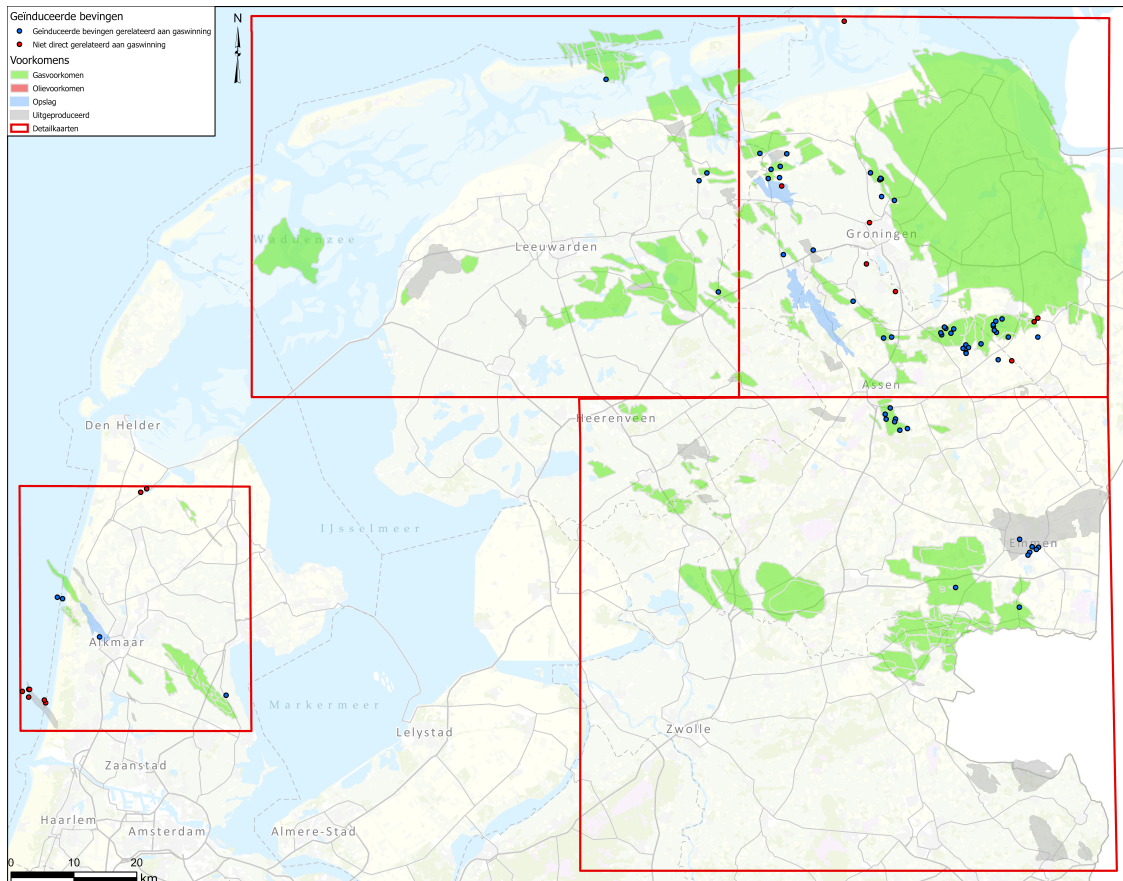
Recent zijn door TNO-AGE van een groot aantal putten de sonic-logs geanalyseerd en is er per reservoir-interval de gemiddelde V_s en V_p bepaald. Op basis van deze data is voor elke seal-reservoir combinatie de E-parameter opnieuw berekend op een vergelijkbare manier als in 2004 (zie Bijlage D). Tabel D-1 in Bijlage D toont de E-parameter per seal-reservoir combinatie.

4 Resultaten: Geïnduceerde seismiciteit sinds 2010

In het 2012 DHAIS rapport zijn alle geïnduceerde bevingen meegenomen tot en met 10 mei 2010. Sinds 10 mei 2010 tot en met 1 maart 2021 zijn er in totaal 1087 geïnduceerde bevingen geregistreerd door het KNMI. Figuur 4-1 geeft een overzicht van alle bevingen onshore (de bevingen binnen de Groningen contour worden wegens het grote aantal niet getoond). Onder de lijn Amsterdam-Arnhem zijn net als in de voorgaande DHAIS studies geen geïnduceerde bevingen gerelateerd aan olie- of gaswinning opgetreden. Tabel 4-1 geeft een overzicht van de toekenning van de oorzaak van deze bevingen in deze periode op basis van de in Hoofdstuk 3 besproken methode van toekennen van bevingen. In totaal zijn 995 bevingen aan het Groningen gasveld toegekend en 64 bevingen aan de kleine velden. Daarnaast zijn er 15 bevingen geregistreerd onshore die niet direct te relateren zijn aan gaswinning. Ook zijn er in de database 10 bevingen offshore en 3 in Duitsland geregistreerd. Deze bevingen en de bevingen zonder directe relatie met gaswinning worden verder buiten beschouwing gelaten in de actualisatie van de DHAIS studie. In Bijlage 1 wordt een overzicht gegeven van alle geïnduceerde bevingen onshore (zowel gerelateerd aan gaswinning als niet direct gerelateerd) buiten het Groningenveld en hun waarschijnlijke oorzaak.

Tabel 4-1 Overzicht toekenning geïnduceerde bevingen in periode 10 mei tot en met 1 maart 2021

Toekenning aan:	Aantal bevingen
Groningen	995
Andere voorkomens (kleine velden)	64
Niet (direct) gerelateerd aan gaswinning	15
Offshore (buiten 3-mijlzone)	10
Buitenland	3



Figuur 4-1 Overzichtsfiguur met alle geïnduceerde bevingen (knmi.nl) buiten het Groningenveld in de periode 10 mei 2010 tot 1 maart 2021. Bevingen gerelateerd aan gaswinning (binnen contour of binnen 3 km contour van een producerend voorkomen) zijn in blauw aangegeven, bevingen die niet direct gerelateerd zijn aan gaswinning in rood. Productiestatus van de voorkomens is weergegeven op peildatum van 1 maart 2021 (N.B. niet ten tijde van desbetreffende beving). Een grotere variant van dit figuur en detailkaarten zijn weergegeven in Bijlage A.

4.1 Toetsing geïnduceerde bevingen aan DHAIS

Alle door (olie- of) gaswinning geïnduceerde bevingen in de kleine velden zijn getoetst aan de kansberekening van de DHAIS 2012 studie.

4.1.1 Waarnemingen

Een overzicht van alle kleine velden waar zich sinds 10 mei 2010 geïnduceerde bevingen hebben voorgedaan is opgenomen in Tabel 4-2. De bevingen staan geordend op chronologische volgorde van de eerste beving in het veld. De kleine velden waarvan de eerste beving zich heeft voorgedaan in de onderzochte periode vanaf 10 mei 2010 zijn dik gedrukt. Sinds de voorgaande DHAIS studie zijn er bij 20 kleine velden bevingen geregistreerd. Daarnaast zijn er 11 voorkomens die eerder hebben gebeefd, maar niet nogmaals sinds 10 mei 2010.

De vierde kolom van Tabel 4-2 laat zien dat alle 9 voorkomens met een eerste beving in de onderzochte periode van deze studie volgens de DHAIS methodiek uit 2012 ook een kans op beven hadden. Anders gezegd geen van de voorkomens met een verwaarloosbare kans op beven volgens de DHAIS 2012 is gaan beven.

Bij het grootste deel van de bevende voorkomens (14) zijn in de onderzochte periode 1 of 2 bevingen opgetreden (Tabel 4-2). Boven Saaksum-West en Vries-Noord zijn 3 bevingen geregistreerd. Er zijn vier voorkomens waar 5 of meer bevingen zijn opgetreden: Annerveen (20), Bedum (7), Eleveld (7) en Emmen (6). Voor al deze voorkomens geldt dat er voor 10 mei 2010 ook al meerdere bevingen zijn geweest. Boven Annerveen waren dat er 75 bevingen, boven Bedum 5, boven Emmen 7 en boven Eleveld 44.

Tabel 4-2 Voorkomens met datum 1^e beving, aantal (nieuwe) bevingen en hoogste magnitude geregistreerd in de periode 10 mei 2010 - 1 maart 2021. Voorkomens die dikgedrukt zijn, zijn velden die voor het eerst zijn gaan beven in de periode 10 mei 2010 - 1 maart 2021.

Voorkomens	Datum 1 ^e beving	Bevingen 10-5-2010 t/m 1-3-2021	DHAIS 2012	Hoogste magnitude na 10-5-2010
Eleveld Rotliegend	December 1986	7	Bevend	2,0
Emmen Zechstein 2 Carbonaat	Oktober 1991	6	Bevend	2,3
Groningen Rotliegend	December 1991	995	Bevend	3,6
Annerveen Rotliegend	Augustus 1994	21	Bevend	2,4
Bergermeer Rotliegend	Augustus 1994	1	Bevend	0,7
Dalen Zechstein 2 Carbonaat	Augustus 1996	1	Bevend	2,0
Vries-Noord Rotliegend	December 1996	3	Bevend	1,8
Vries-Centraal Rotliegend	Juli 2000	2	Bevend	1,0
Bergen Rotliegend	Oktober 2001	2	Bevend	1,8
Schoonebeek Gas Zechstein 2 Carbonaat	December 2002	1	Bevend	1,2
Bedum Rotliegend	Mei 2004	7	Bevend	1,6
Ameland-Oost Rotliegend	Maart 2005	1	Bevend	1,8
Pasop Rotliegend	Juli 2012	1	42%	0,9
Kollum Rotliegend	Oktober 2012	1	19%	1,1
Saaksum-West Rotliegend	September 2013	2	19%	1,7
Munnekezijl - Oost Rotliegend	Maart 2015	2	19%	1,4
Kollum-Noord Rotliegend	Oktober 2016	1	19%	1,5
Kommerzijl Rotliegend	April 2018	2	19%	1,0
Middelie Rotliegend	Juni 2018	1	42%	2,5
Boerakker Rotliegend	Augustus 2019	1	19%	0,7
Marum Rotliegend	Februari 2020	1	19%	1,4

5 Actualisatie grenswaarden

In dit hoofdstuk wordt aan de hand van de deterministische methode uit de DHAIS 2004 studie met de geactualiseerde indicatorparameterwaarden van alle voorkomens de grenswaarden voor het mogelijk optreden van geïnduceerde seismiciteit opnieuw bepaald. Het gaat hierbij om de relatieve drukval (DP/P_{ini}), de breukdichtheid (B) en het stijfheidscontrast (E). De generieke formule ter bepaling van de grenswaarden wordt hieronder gegeven. Bijlage C geeft een uitgebreide beschrijving van de methodiek en een afleiding van deze formule.

$$A = a_1 - \frac{(m-1) \cdot [(a_1 - a_0)^{-m+2} - a_1^{-m+2}]}{(m-2) \cdot [(a_1 - a_0)^{1-m} - a_1^{1-m}]} \quad [5.1]$$

Hierbij is A de grenswaarde van de betreffende indicatorparameter, a_0 de laagste waarde van een bevend voorkomen in de dataset, a_1 de hoogste waarde in de dataset, onafhankelijk of het een bevend voorkomen betreft, en m het aantal voorkomens die gebeefd hebben. De bijbehorende standaardafwijking van de grenswaarde A wordt berekend met de formule 13 uit Bijlage C. De grenswaarden worden in het volgende hoofdstuk gebruikt om de kans op beven te bepalen.

In Tabel 5-1 wordt per indicatorparameter de waarde van a_0 en a_1 gegeven met het desbetreffende voorkomen. De laagste waarde a_0 van een bevend voorkomen in de dataset is voor de DP/P_{ini} 0,23 van het Witterdiep voorkomen (zie Bijlage A.2.2), voor de E-parameter 1,13 (zie Tabel D.1) van het Roswinkel voorkomen en voor de B-parameter is afgerond 1,10 van het Metslawier voorkomen. De hoogste waarde in de dataset a_1 is voor de DP/P_{ini} 0,99 van onder meer het Botlek en Metslawier voorkomen (zie: Winningsplan NAM; Botlek 2017; Metslawier 2011), voor de E-parameter 2,82 van meerdere Rotliegend reservoirs met Zechstein evaporiet/anhydriet afsluitende laag (zie Tabel D.1) en voor de B-parameter afgerond 9,66 van het Coevorden voorkomen (zie Winningsplan NAM, Coevorden 2018). In Tabel 5-2 worden alle voorkomens waarboven ooit een beving is geregistreerd weergegeven. Het aantal bevende voorkomens m is 32 (incl. het Groningen gasveld, conform originele DHAIS studie). Naast de voorkomens in de DHAIS 2012 studie en de voorkomens die voor het eerst zijn gaan beven, zijn er nog drie voorkomens meegenomen waarboven historisch bevingen zijn geregistreerd (Vries-Zuid, Warffum en Witterdiep, zie Bijlage A).

Tabel 5-1 Per indicatorparameter (DP/P_{ini} , E-parameter, B-parameter) de laagste waarde van een bevend voorkomen a_0 , de hoogste waarde in de gehele dataset a_1 en bijbehorend voorkomen voor het uitvoeren van de grenswaarde berekening.

Indicatorparameter	a_0 : Laagste waarde bevend voorkomen	a_1 : Hoogste waarde in de dataset
DP/P_{ini}	0,23 (Witterdiep Rotliegend)	0,99 (bijv. Botlek, Metslawier)
E-parameter	1,13 (Roswinkel Bunter)	2,82 (Rotliegend reservoirs met Zechstein evaporiet/anhydriet afsluitende laag)
B-parameter	1,095 (Metslawier Rotliegend)	9,663 (Coevorden Limburg)

Tabel 5-2 Bevende voorkomens met datum 1^e beving.

Voorkomen	Datum 1 ^e beving
Ameland-Oost Rotliegend	Maart 2005
Annerveen Rotliegend	Augustus 1994
Appelscha Rotliegend	Juni 2002
Bedum Rotliegend	Mei 2004
Bergen Rotliegend	Oktober 2001
Bergermeer Rotliegend	Augustus 1994
Boerakker Rotliegend	Augustus 2019
Coevorden Zechstein 2 Carbonaat	Februari 1997
Dalen Zechstein 2 Carbonaat	Augustus 1996
Eleveld Rotliegend	December 1986
Emmen Zechstein 2 Carbonaat	Oktober 1991
Emmen – Nieuw Amsterdam Zechstein 2 Carbonaat	September 1994
Groningen Rotliegend	December 1991
Kollum Rotliegend	Oktober 2012
Kollum-Noord Rotliegend	Oktober 2016
Kommerzijl Rotliegend	April 2018
Marum Rotliegend	Februari 2020
Metslawier Rotliegend	Mei 2005
Middelie Rotliegend	Juni 2018
Munnekezijl-Oost Rotliegend	Maart 2015
Pasop Rotliegend	Juli 2012
Roden Rotliegend	Oktober 1995
Roswinkel Bunter	Juni 1992
Saaksum-Oost Rotliegend	December 2006
Saaksum-West Rotliegend	September 2013
Schoonebeek Gas Zechstein 2 Carbonaat	December 2002
Ureterp Rotliegend	April 1999
Vries-Centraal Rotliegend	Juli 2000
Vries-Noord Rotliegend	December 1996
Vries-Zuid Rotliegend	November 2011
Warffum Rotliegend	April 2006
Witterdiep Rotliegend	Januari 2008

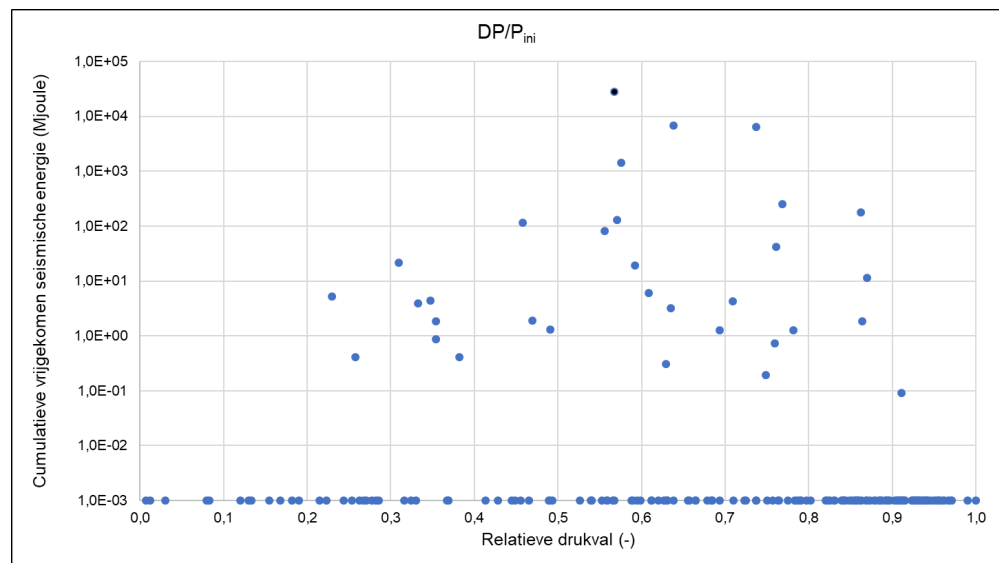
5.1 Relatieve drukval: DP/P_{ini}

De relatieve drukval is gedefinieerd als de drukval (DP) waarbij de eerste beving heeft plaatsgevonden ten opzichte van de initiële druk (P_{ini}) van het reservoir. In Figuur 5-1 wordt de relatieve drukval per 1 maart 2021 als functie van de cumulatieve vrijgekomen seismische energie getoond conform de voorgaande DHAIS studies. De vrijgekomen seismische energie is berekend met de empirische relatie tussen het seismisch moment (M_0) en M magnitude van Hanks & Kanamori (1979):

$$\log_{10} M_0 = 9,1 + 1,5 M \quad [5.2]$$

De seismische energie van voorkomens met meerdere bevingen is gesommeerd conform de voorgaande studies. Voor de bevende voorkomens is de relatieve drukval getoond toen de 1^e beving plaatsvond, voor voorkomens waar geen beving

is geregistreerd is de relatieve drukval ingeschat per 1 maart 2021. Aangenomen is dat hier geen seismische energie is vrijgekomen.



Figuur 5-1 Vrijgekomen seismische energie als functie van relatieve drukval per 1 maart 2021. Voor de bevende voorkomens is de relatieve drukval ten tijde van 1^e beving getoond. Voorkomens waarboven (nog) geen beving is waargenomen zijn op de x-as geprojecteerd.

Net als in de voorgaande DHAIS studies wordt de hypothese getest of er een minimale relatieve drukval bestaat voordat voorkomens potentie hebben om te beven. Het bepalen van de grenswaarde waaronder geen bevingen worden verwacht wordt aan de hand van formule 5.1 bepaald. De laagste waarde a_0 voor de relatieve drukval voor een voorkomen waarbij een beving heeft plaatsgevonden is 0,23 voor het Witterdiep voorkomen (Tabel 5-1). In 2012 is voor hoogste waarde a_1 voor de relatieve drukval een waarde van 1 aangenomen, aangezien een voorkomen niet meer in druk kan dalen dan de waarde van de initiële druk. In deze actualisatie is voor de bovengrens 0,99 genomen, de hoogste waarde in de dataset van de verwachte relatieve drukval na eind van productie. Hierdoor is de keuze voor de bovengrens namelijk consistent met de andere indicatorparameters, waar op eenzelfde wijze de bovengrens is bepaald. Met de deterministische methode van 2004, dat wil zeggen formule 5.1 en formule 13 uit Bijlage C, wordt de grenswaarde voor de relatieve drukval en bijbehorende standaardafwijking nu bepaald op:

$$(DP/P_{ini})_{grens} = 0,20 \pm 0,03$$

De grenswaarde is in deze actualisatie iets lager dan de grenswaarde bepaald in 2012 (zie Tabel 5-2). Het verschil wordt veroorzaakt doordat een beving uit 2008 in deze actualisatie (bij nader inzien) is toegewezen aan het Witterdiep voorkomen in plaats van aan Eleveld (zie Bijlage A2.2). De relatieve drukval bij de 1^e beving bij Witterdiep was iets lager dan de grenswaarde in 2012. Het nemen van een waarde van 1 voor a_1 gelijk aan TNO (2012) geeft ook een waarde van 0,20.

Tabel 5-3 Vergelijk in grenswaarden voor DP/P_{ini} in de verschillende DHAIS-studies

$(DP/P_{ini})_{grens\ 2004}$	$(DP/P_{ini})_{grens\ 2012}$	$(DP/P_{ini})_{grens\ 2021}$
In de 2004 studie werd met totale drukval gerekend	$0,28 \pm 0,03$	$0,20 \pm 0,03$

In totaal zijn er 12 voorkomens met een relatieve drukval lager dan de nieuwe grenswaarde van 0,20. Voor 6 van deze voorkomens is de verwachting dat de relatieve drukval niet boven deze grens komen, omdat het voorkomen al uitgeproduceerd is of omdat op basis van de verwachte einddruk de DP/P_{ini} niet boven de grenswaarde komt. Voor deze voorkomens worden geen bevingen verwacht. De andere 6 voorkomens hebben een relatieve drukval op de peildatum van 1 maart 2021 onder de grenswaarde. Naar verwachting zal de einddruk (na einde productie) boven de DP/P_{ini} grenswaarde komen. De andere 189 voorkomens uit de database hebben op de peildatum van 1 maart 2021 een hogere relatieve drukval dan de grenswaarde.

5.2 E-parameter

De E-parameter is in de DHAIS 2004 studie gedefinieerd als de verhouding tussen de Young's modulus van afsluitende gesteentelaag (seal) en het gasvoerende reservoirgesteente. Zoals beschreven in hoofdstuk 3 is gelijk aan voorgaande studies gekozen om één gemiddelde waarde te gebruiken voor alle gasvelden met dezelfde combinatie van seal en reservoir.

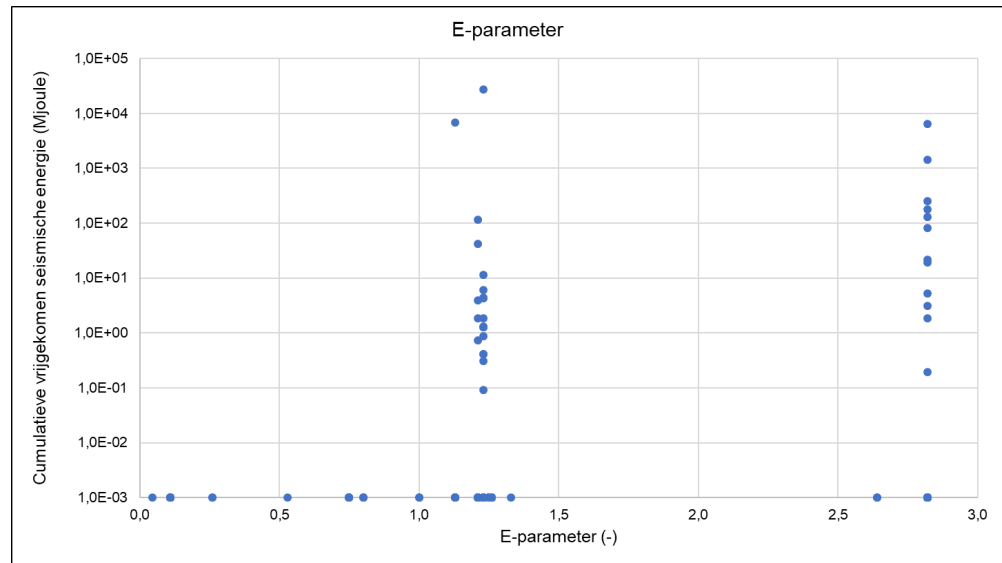
De gevonden grenswaarde voor de E-parameter in 2004 was $0,93 \pm 0,03$. In de actualisatie van 2012 komt de kritische grens op $1,01 \pm 0,08$.

In Figuur 5-2 wordt de E-parameter getoond als functie van de cumulatieve vrijgekomen seismische energie per 1 maart 2021. Hierbij is, net als in Figuur 5-1, de seismische energie van voorkomens met meerdere bevingen per voorkomen gesommeerd.

De grenswaarde voor de E-parameter net als de grenswaarde voor DP/P_{ini} aan de hand van formule 5.1 bepaald. De waarde a_0 wordt bepaald door de E-parameter van de reservoir-seal combinaties met de laagste waarde waar een beving heeft plaatsgevonden. Dit gaat om het Roswinkel voorkomen met een Onder-Volpriehausen zandsteen reservoir en Röt Kleisteen afsluitende laag, welke combinatie een E-waarde van 1,13 heeft. De hoogste waarde in de dataset a_1 is 2,82 voor voorkomens met Rotliggend reservoir en een Zechstein (anhydriet) seal (Tabel 5-1). Met formule 5.1 en formule 13 uit Bijlage C wordt respectievelijk de grenswaarde en bijbehorende standaardafwijking voor de E-parameter bepaald op:

$$E_{grens} = 1,07 \pm 0,06$$

In deze actualisatie is de kritische grens omhoog gegaan t.o.v. voorgaande studies (Tabel 5-4). Het heeft met name te maken doordat de onderliggende dataset waarop de E-parameter is gebaseerd in deze rapportage is uitgebreid en geactualiseerd (zie paragraaf 3.2.3 en Bijlage D). De meeste seal-reservoir combinaties hebben in deze nieuwe analyse een iets hogere E-waarde. Er zijn geen voorkomens uit de DHAIS 2012 studie die op basis van de E parameter nu een kans op beven hebben gekregen in plaats van een verwaarloosbare kans. Er zijn in totaal 33 voorkomens met een E-waarde lager dan de kritische grens en 156 voorkomens met een E-waarde boven de kritische grens.



Figuur 5-2 Vrijgekomen seismische energie per veld (blauwe punt) als functie van E-parameter per 1 maart 2021. Bevingen zijn voornamelijk opgetreden bij bepaalde reservoir-seal combinaties. Bij een Onder-Volprieausen zandsteen reservoir en Röt Kleisteen afsluitende laag (E-waarde 1,13), bij Zechstein carbonaat reservoir en Zechstein evaporiet afsluitende laag (E-waarde 1,21), bij voorkomens met Rotliegend reservoir en een Ten Boer Kleisteen afsluitende laag (E-waarde 1,23) en bij voorkomens met Rotliegend reservoir en een Zechstein (anhydriet) seal (E-waarde 2,82). Boven voorkomens met een ander reservoir-seal combinatie zijn (nog) geen bevingen waargenomen en deze plotten daarom op de x-as (eventueel meerdere over elkaar heen).

Tabel 5-4 Vergelijk in grenswaarden voor E-parameter in de verschillende DHAS-studies.

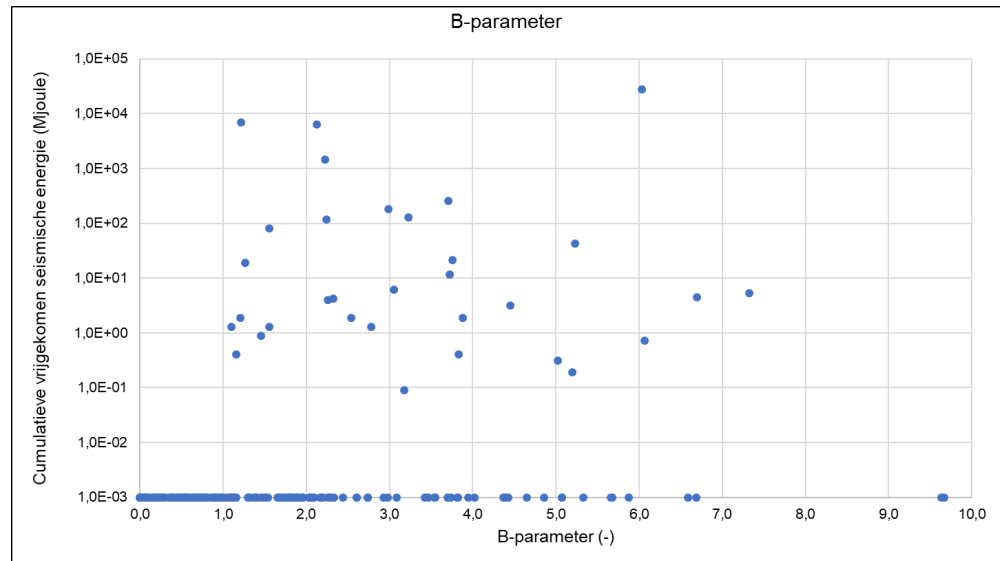
E _{grens} 2004	E _{grens} 2012	E _{grens} 2021
0,93 ± 0,03	1,01 ± 0,08	1,07 ± 0,06

5.3 B-parameter

In Figuur 5-3 wordt de B-parameter getoond als functie van de cumulatieve vrijgekomen seismische energie waarbij de seismische energie van voorkomens met meerdere bevingen per voorkomen is gesommeerd.

De waarde a_0 wordt bepaald door de laagste B-parameter van het voorkomen waar een beving heeft plaatsgevonden, dat is het voorkomen Metslawier Rotliegend met een waarde van 1,10. De hoogste waarde a_1 in de dataset is 9,66 voor het voorkomen Coevorden Limburg (Tabel 5-1). Met formule 5.1 en formule 13 uit Bijlage C is de grenswaarde en bijbehorende standaardafwijking geactualiseerd:

$$B_{grens} = 0,84 \pm 0,23$$



Figuur 5-3 Vrijgekomen seismische energie als functie van B-parameter per 1 maart 2021. Elk blauw punt stelt een voorkomen voor waarbij op de x-as de B waarde is weergegeven en de cumulatieve seismische energie op de y-as. Voorkomens waarboven (nog) geen beving is waargenomen zijn op de x-as geprojecteerd.

In deze actualisatie is de kritische grens iets omlaag gegaan t.o.v. voorgaande studies. De B_{grens} was in 2004 en 2012 respectievelijk $0,98 \pm 0,16$ en $0,86 \pm 0,29$ (zie Tabel 5-4). Dit heeft te maken met de manier waarop de B-parameter voor de dataset opnieuw is berekend (zie paragraaf 3.2.2) en niet omdat voorkomens met een B-waarde onder de kritische grens bepaald in 2012 zijn gaan beven. Er zijn daarnaast geen voorkomens die in de DHAS 2012 studie een B-waarde groter gelijk dan 0,84 maar kleiner dan 0,86 hadden. In totaal hebben 60 voorkomens een B-waarde onder de grenswaarde en 129 voorkomens een B-waarde boven de grenswaarde.

Tabel 5-5 Vergelijk in grenswaarden voor B-parameter in de verschillende DHAS-studies.

B_{grens} 2004	B_{grens} 2012	B_{grens} 2021
$0,98 \pm 0,16$	$0,86 \pm 0,29$	$0,84 \pm 0,23$

6 Resultaten: actualisatie kans op beven

In dit hoofdstuk wordt op basis van de opnieuw bepaalde grenswaarden voor de indicatorparameter de kans op beven geactualiseerd. In de voorgaande studies is er een onderscheid gemaakt tussen de kans op beven voor voorkomens met een relatieve lage E-waarde en velden met een relatief hoge E-waarde. In deze actualisatie wordt deze hypothese opnieuw getest. De formule voor de kans op beven wordt hieronder gegeven. In Bijlage C wordt de achterliggende statistiek beschreven en hoe deze formule is afgeleid.

$$p(\text{bevend}) = \frac{(R + 1)}{(N + 2)} \quad [6.1]$$

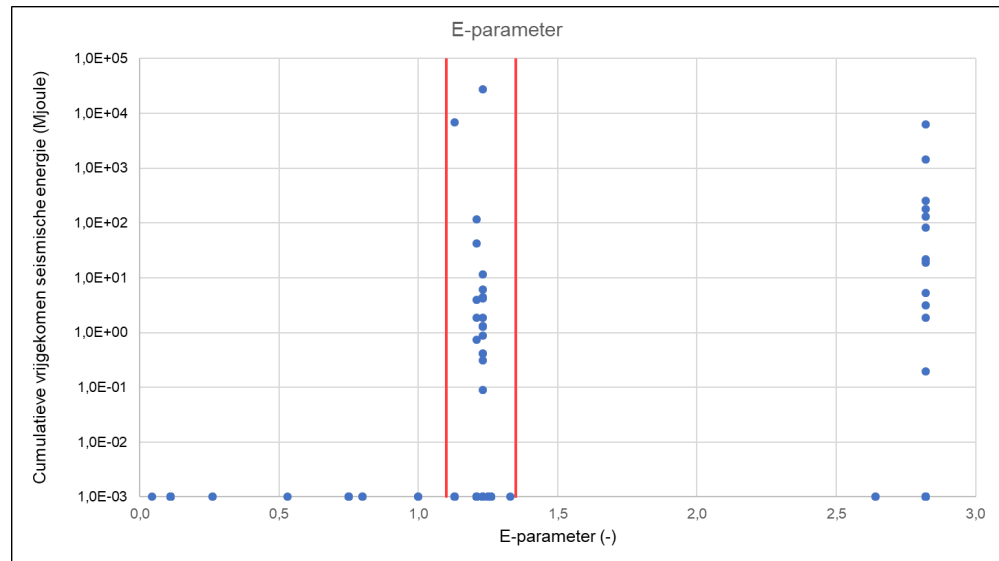
Hierbij is $p(\text{bevend})$ de kans op beven voor een voorkomen, R het aantal bevende voorkomens boven alle grenswaarden en N het totaal aantal voorkomens boven alle grenswaarden.

De standaarddeviatie behorend bij $p(\text{bevend})$ is als volgt:

$$\sigma = \sqrt{\frac{p(\text{bevend}) \cdot (1 - p(\text{bevend}))}{N + 3}} \quad [6.2]$$

6.1 Hypothese verhoogde kans op beven met hoge E-waarde

In de voorgaande studies werd de hypothese getest dat voorkomens met relatief lage E-waarde (tussen de grenswaarde en 1,34) een kleinere kans op beven hadden dan voorkomens met E-waarde boven de 1,34. In beide studies werd dit bevestigd met een significant verschil tussen de kansen. Zoals te zien in Figuur 6-1 lijken er ook in deze actualisatie twee clusters te zijn van voorkomens met een bepaalde E-waarde die beven. Daarom wordt hier ook de hypothese op eenzelfde manier getoetst als in de voorgaande studies. De hypothese die getest wordt is of voorkomens met een E-waarde boven de 1,34 een hogere kans op beven hebben dan voorkomens met een E-waarde tussen de 1,07 en 1,34.



Figuur 6-1 Vrijgekomen seismische energie per veld (blauwe punt) als functie van E-parameter per 1 maart 2021. Voorkomens die beven hebben of een E-waarde tussen de 1,07 en 1,34 (weergegeven tussen de rode lijnen) of een (veel) hogere E-waarde groter dan 1,34. Voorkomens waarboven (nog) geen beving is waargenomen zijn op de x-as geprojecteerd.

De voorkomens die op 1 maart 2021 een relatieve drukval hebben boven de kritische grens van 0,20 (189 voorkomens) worden verdeeld in vier groepen. Door voor elk voorkomen aan te geven of hun B-waarde en E waarde lager of hoger en/of gelijk aan de grenswaarde ligt (respectievelijk 0,84 en 1,07) krijg je vier mogelijke combinaties (Tabel 6-1).

Tabel 6-1 Karakteristiek van de voorkomens boven de relatieve drukval grenswaarde. E⁺ B⁺ geeft de groep van voorkomens aan met E-waarde boven de grens en B-waarde boven de grens. E⁻ B⁺ geeft de groep van voorkomens met E-waarde onder de grens, maar B-waarde boven de grens etc.

Karakteristiek	Aantal voorkomens
E ⁺ B ⁺	123
E ⁻ B ⁺	6
E ⁺ B ⁻	33
E ⁻ B ⁻	27

Er hebben 32 voorkomens van de 123 voorkomens in de (E⁺ B⁺) gebeefd. Alle voorkomens worden beschouwd als experimenten met als enige toets 'beven' of 'niet beven', d.w.z. een veld met één beving wordt hetzelfde beschouwd als een veld met meerdere bevingen. Ook de magnitude van de beving is niet van belang, de enige toets is of een voorkomen heeft gebeefd. Voor voorkomens die al gebeefd hebben en voor velden die uitgeduceerd zijn, maar niet zijn gaan beven, is het experiment afgelopen. Deze voorkomens hebben respectievelijk 'bevend' of 'niet bevend' als uitkomst gekregen. Voor voorkomens in de E⁻ B⁺, E⁺ B⁻ en E⁻ B⁻ categorie geldt dat de voorkomens, volgens de hypothese, niet gaan beven aangezien zij onder de grenswaarde van minstens één van de indicatorparameters vallen. Deze voorkomens krijgen een verwaarloosbare kans op beven. In de voorgaande DHAS studies is de hypothese getest dat voorkomens die een relatieve drukval en B-waarde boven de grenswaarde hebben in combinatie met een E-waarde boven 1,34 een hogere kans op beven hebben dan bij een

combinatie met een E-waarde tussen 1,07 (E_{grens}) en 1,34. Om deze hypothese wederom te testen worden de velden in de groep met potentie tot beven ($E^+ B^+$) ook nu onderverdeeld in deze twee subgroepen. De eerste subgroep P_{laag} bestaat uit voorkomens met E-waarden kleiner of gelijk aan 1,34. In de tweede subgroep P_{hoog} zitten de voorkomens met E-waarden groter dan 1,34. In Tabel 6-2 wordt de onderverdeling tussen bevende en niet bevende voorkomens getoond voor de twee subgroepen.

Tabel 6-2 Onderverdeling bevende en niet bevende voorkomens met $E \leq 1,34$ en E waarde $> 1,34$.

Karakteristiek	Bevende voorkomens (R)	Niet bevende voorkomens	Totaal aantal voorkomens (N)
E waarde $\leq 1,34$	20	68	88
E waarde $> 1,34$	12	23	35

Op basis van formule 6.1 en 6.2 kan de kans op beven en standaardafwijking van deze kans voor de verschillende subgroepen berekend worden. De achterliggende methodiek gebaseerd op de Laplace regel (Jaynes, 2003; TNO, 2004; Van Eijs et al., 2006) wordt toegelicht in Bijlage C. Gebruikmakend van formule 6.1, 6.2 en de waardes voor R en N voor beide subgroepen uit Tabel 6-2 is de kans op beven voor de subgroepen:

$$P_{\text{laag}} = 0,23 \pm 0,04$$

$$P_{\text{hoog}} = 0,35 \pm 0,08$$

In vergelijking met de voorgaande DHAIS studies is de kans op beven in de lage klasse P_{laag} groter terwijl de kans op beven in de hoge klasse P_{hoog} lager is geworden (zie Tabel 6-3). De P_{laag} en P_{hoog} kansklassen zijn bij het groter worden van de dataset van elke actualisatie steeds dichter naar elkaar toe bewogen.

Tabel 6-3 Vergelijking in de kans op beven tussen de verschillende DHAIS studies.

Kansklasse	DHAIS 2004	DHAIS 2012	DHAIS 2021
P_{laag}	0,10 \pm 0,05	0,19 \pm 0,05	0,23 \pm 0,04
P_{hoog}	0,52 \pm 0,10	0,42 \pm 0,08	0,35 \pm 0,08

In andere woorden, er zijn relatief steeds meer nieuwe bevingen geweest in velden in de lagere kansklasse met de lagere E-waarde en relatief steeds minder nieuwe bevingen in de velden met een hogere E-waarde. In voorgaande studies werd gesteld dat het verschil tussen de kansklassen significant was. Dit werd onderbouwd met het gegeven dat de absolute waarde in het verschil tussen beide kansklassen in deze studies meer dan twee keer zo groot was als $\sqrt{(\sigma_l^2 + \sigma_p^2)}$, waarbij σ_l en σ_p de standaard deviaties zijn van de 2 klassen.

Als dit opnieuw gedaan wordt voor de berekende kansen in deze actualisatie volgt dat de absolute waarde in het verschil tussen de kansklassen minder dan twee keer zo groot is als $\sqrt{(\sigma_l^2 + \sigma_p^2)}$. Dat is namelijk respectievelijk 0,12 (absolute verschil in de tussen de beoogde kansklassen) en 0,18 (2 keer $\sqrt{(\sigma_l^2 + \sigma_p^2)}$). Hiermee is de hypothese verworpen en er is geen significant verschil in de kans op beven tussen voorkomens met een hoge E-waarde en een relatief lagere E-waarde.

6.2 Geactualiseerde kans op beven

Omdat, zoals hierboven is aangetoond, het verschil in kans op beven tussen de voorkomens met een hogere en lagere E waarde niet significant is wordt er voor gekozen om kans op beven te bepalen over de gehele dataset.

Tabel 6-4 Onderverdeling bevende en niet bevende voorkomens met indicatorparameters boven alle grenswaarden.

Karakteristiek	Bevende voorkomens (R)	Niet bevende voorkomens	Totaal aantal voorkomens (N)
Voorkomens boven grenswaarden	32	91	123

In Tabel 6-4 wordt de onderverdeling tussen bevende en niet bevende voorkomens getoond voor alle voorkomens met indicatorparameters boven alle grenswaarden. Gebruikmakend van formule 6.1, 6.2 en de waardes voor R en N voor beide subgroepen uit Tabel 6-4 is de kans op beven over de hele dataset als volgt:

$$P_{\text{dataset}} = 0,26 \pm 0,04$$

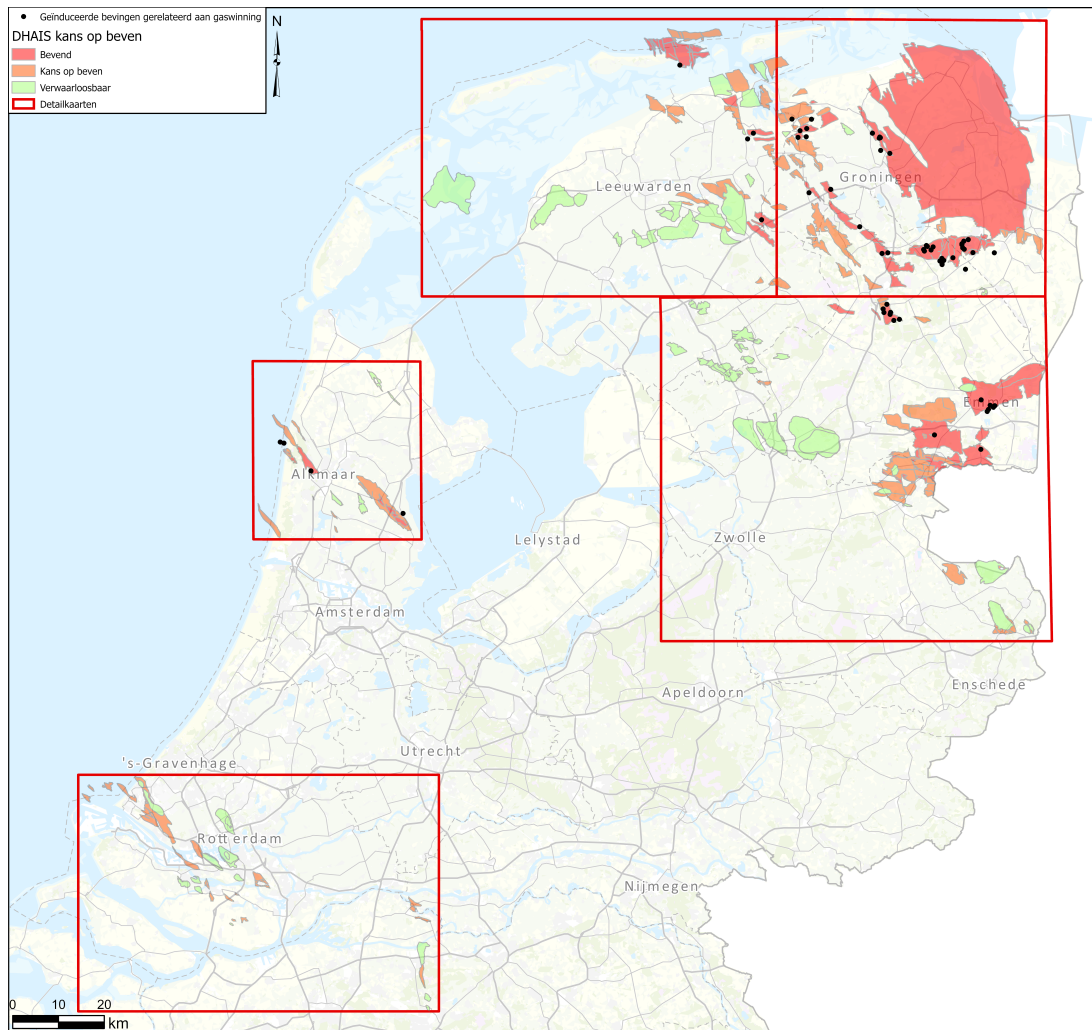
Dit is een minimale kans voor deze dataset, aangezien nog niet alle velden zijn uitgeproduceerd en daarmee nog nieuwe bevingen kunnen optreden in velden die nog in productie zijn.

Figuur 6-2 geeft schematisch de nieuwe indeling in kansklassen weer.

Reeds bevende voorkomens	
DP/P _{ini} ≥ 20%	B ≥ 0,84 en E ≥ 1,07: Kans op beven: P = 0,26 ± 0,04
	B < 0,84 en/of E < 1,07: Verwaarloosbare kans
DP/P _{ini} < 20%	Verwaarloosbare kans

Figuur 6-2 Indeling in kansklassen op basis van indicatorparameters (DP/P_{ini}, B en E-parameter) van deze actualisatie: verwaarloosbare kans (groen), kans op beven (oranje) en reeds bevende voorkomens (rood).

Figuur 6-3 geeft een overzicht van alle voorkomens in deze actualisatie met bijbehorende kans op beven. Detailkaarten per regio zijn weergegeven in Bijlage B.



Figuur 6-3 Overzichtsfiguur met voorkomens meegenomen in deze actualisatie met bijbehorende kans op beven (zie Tabel B-1 in bijlage B voor overzicht alle voorkomens). Bevende voorkomens zijn weergegeven in rood, voorkomens met een kans op beven in oranje en voorkomens met een verwaarloosbare kans op beven in groen. Geïnduceerde aardbevingen uit de catalogus van KNMI gerelateerd aan gaswinning (behalve Groningen gasveld), periode 10 mei 2010 tot en met 1 maart 2021, zijn weergegeven in zwart. In Bijlage B staan detailkaarten van de roodomrande gebieden.

Om de berekende kans op beven in context te plaatsen van de voorgaande studie is ook de kans op beven berekend over de hele dataset uit de DHAIS 2004 en uit DHAIS 2012 studies. Tabel 6-5 geeft de onderverdeling tussen bevende en niet bevende voorkomens met indicatorparameters boven alle grenswaarden voor de 2004 en 2012 DHAIS studies.

Tabel 6-5 Onderverdeling bevende en niet bevende voorkomens met indicatorparameters boven alle grenswaarden voor de 2004 en 2012 DHAIS studie.

Karakteristiek	Bevende voorkomens (R)	Niet bevende voorkomens	Totaal aantal voorkomens (N)
Voorkomens boven grenswaarden DHAIS studie 2004	16	48	64
Voorkomens boven grenswaarden DHAIS studie 2012	23	61	84

Gebruikmakend van formule 6.1, 6.2 en de waardes voor R en N voor beide subgroepen uit Tabel 6-5 is de kans op beven over de hele dataset voor de voorgaande DHAIS studies als volgt:

$$P_{\text{dataset2004}} = 0,26 \pm 0,05$$

$$P_{\text{dataset2012}} = 0,28 \pm 0,05$$

De kans op beven over de gehele dataset in deze actualisatie ($0,26 \pm 0,04$) en is daarmee vergelijkbaar aan vorige studies.

6.3 Analyse kans op beven $M_L \geq 1,5$

Zoals beschreven in hoofdstuk 3 is er een detectiegrens waaronder bevingen van een bepaalde magnitude niet (met zekerheid) wordt gemeten. Dit is afhankelijk van de dichtheid van het meetnetwerk en de lokale geologie (Dost et al., 2017 en Kruiver et al., *in druk*). In de praktijk betekent dit dat voor met name zuidwest Nederland in het verleden eventuele kleine bevingen, lager dan $1,5 M_L$ niet geregistreerd zijn. Het netwerk is uitgebreid in 2019 en 2020, waardoor de detectiegrens op dit moment een stuk lager ligt. Een manier om te onderzoeken welke invloed deze bias in de data geeft is om alleen bevingen boven de $1,5 M_L$ mee te nemen in de analyse.

Het meenemen van enkel bevingen met magnitude van 1,5 of hoger heeft de volgende impact. De grenswaarden veranderen iets ten opzichte van het meenemen van alle bevingen, zoals hieronder te zien is in Tabel 6-6. De grenswaarden voor de B- en E-waarde zijn lager wanneer er alleen bevingen worden meegenomen met een magnitude boven en gelijk 1,5. De grens voor de DP/P_{ini} wordt iets hoger, omdat bij het Witterdiep voorkomen een beving is geregistreerd lager dan $1,5 M_L$ die was gerelateerd aan de laagste DP/P_{ini} waarde in de dataset. Doordat die wordt geëlimineerd neemt de DP/P_{ini} grenswaarde iets toe.

Het bepalen van de kans dat er een beving optreedt tijdens de productie wordt in sterkere mate beïnvloed door het meenemen van alle geregistreerde bevingen of alleen de dataset met bevingen met 1,5 of hoger. De kans op beven over de gehele dataset is lager. Dit is te verklaren doordat er een deel van de bevende voorkomens geen bevingen boven de $M_L \geq 1,5$ heeft gehad.

In de voorgaande DHAIS studies en deze actualisatie heeft het de voorkeur om optimaal gebruik te maken van alle geregistreerde bevingen van de KNMI data set en niet alleen bevingen boven $M_L \geq 1,5$. Daarnaast laat deze analyse zien dat de impact op de grenswaarden beperkt is.

Tabel 6-6 Vergelijk tussen uitkomst in de indicatorparameters en kans op beven wanneer alle geregistreerde bevingen zijn meegenomen of alleen bevingen met $M_L \geq 1,5$.

Parameter	Alle geregistreerde bevingen	Alleen bevingen $M_L \geq 1,5$
DP/P_{ini}	$0,20 \pm 0,03$	$0,24 \pm 0,03$
E-waarde	$1,07 \pm 0,06$	$1,05 \pm 0,08$
B-waarde	$0,84 \pm 0,23$	$0,78 \pm 0,26$
Kans op beven hele dataset	$0,26 \pm 0,04$	$0,20 \pm 0,04$

7 Discussie

Uit deze actualisatie zijn nieuwe grenswaarden voor de indicatorparameters en kans op beven berekend. In dit hoofdstuk wordt de impact van de onzekerheden in de methode en dataset besproken en de resultaten geduid.

7.1 Impact detectiegrens en locatiebepaling (3D) geïnduceerde bevingen

7.1.1 *Impact detectiegrens*

Omdat de detectiegrens van het seismisch meetnet in de loop der tijd is verbeterd (ook lagere magnitude kunnen worden waargenomen) kan dit invloed hebben op de resultaten door het eventueel gemist hebben van beving met lage magnitudes. In Hoofdstuk 6 is een vergelijk gemaakt tussen het meenemen van alleen bevingen met $M_I \geq 1,5$ en alle geregistreerde bevingen. Dit geeft een inschatting van hoe het verschil in de detectiegrens van invloed is op de resultaten. Deze analyse wijst erop dat voor kritische grenzen van de indicatorparameter de invloed gering is en dat daarmee de bepaling van de grenswaarden (vrij) robuust is. De kans op beven is daarentegen een stuk lager als alleen bevingen met $M_I \geq 1,5$ worden meegenomen. Dit is verklaard door dat er minder bevingen zijn meegenomen. Aangezien met de DHAIS-methodiek een minimale kans op beven wordt berekend is dat geen opvallend resultaat.

7.1.2 *Impact onzekerheid locatie en diepte bepaling*

De onzekerheid in locatiebepaling van een beving zou er eventueel toe kunnen leiden dat een beving is toegekend aan een verkeerd voorkomen. Dit geldt zowel in de horizontale als verticale richting (diepte). Dat laatste leidt tot onzekerheid voor bevingen die optreden bij velden met verticaal gestapelde voorkomens. In de DHAIS 2004 studie is bijvoorbeeld gekozen om de bevingen geregistreerd bij het (gestapelde) Coevorden veld toe te kennen aan het Zechstein voorkomen. Het kan echter niet uitgesloten worden dat één van de andere voorkomens in het Coevorden veld gebeefd heeft.

Het is niet waarschijnlijk dat dit grote impact heeft op de resultaten. De grenswaarde wordt namelijk enkel bepaald door de laagste waarde (van een bevend voorkomen) en hoogste waarde (totaal) in de dataset. Het blijkt dat voor die voorkomens die de kritische grens bepalen, i.e. de bevende voorkomens met de laagste E, B of DP/P_{ini} parameterwaarde in de dataset, is er geen tot weinig onzekerheid in het toekennen van de beving aan het voorkomen. Daarnaast komt het voor de periode waarnaar gekeken is in deze actualisatie maar een klein aantal keer de situatie voor waarin een beving mogelijk aan een meerdere voorkomens toegekend kan worden (zie Tabel A-1 in Bijlage A).

7.2 Indicatorparameters

7.2.1 *DP/P_{ini}*

Van de 189 voorkomens die in deze actualisatie zijn geanalyseerd zullen er 6 voorkomens aan het einde van productie een verwachte relatieve drukval onder de kritische grens van 0,20 houden (zie Bijlage B). Dit komt bijvoorbeeld omdat de voorkomens een sterke aquifer support ondervinden waardoor er weinig drukdaling is of olievoorkomens zijn met lage drukdaling. Daarnaast hebben enkele

voorkomens een reservoirkwaliteit van dusdanige (slechte) kwaliteit dat er relatief weinig productie en daarmee drukval plaatsvindt. Er is uit de data wel een duidelijke grenswaarde die overschreden is in alle bevende velden, maar het onderscheidend vermogen van de DP/P_{ini} factor lijkt beperkt, aangezien bijna elk voorkomen zal produceren boven deze kritische grens.

De DP/P_{ini} factor gaat uit van totale drukveranderingen en niet van de snelheid van drukveranderingen. In de literatuur wordt een relatie gelegd tussen snelheid van Coulomb spanningsveranderingen en seismiciteit (Dieterich, 1994; Segall et al., 2016; Candela et al., 2019). Nepveu et al. (2016) en Sijacic et al. (2017) vinden voor het Groningenveld een mogelijk verband tussen de opgetreden seismiciteit en de productiesnelheid en daarmee de snelheid van drukverandering. Het Groningenveld is qua omvang en productiestrategie niet representatief voor de kleine velden. Recentelijk hebben Baisch et al. (2019) onderzocht of er een relatie te vinden is tussen de maandelijkse productiesnelheden van de kleine velden in Nederland en seismiciteit. De auteurs concluderen dat op basis van de beschikbare data er voor de kleine velden niet kan worden bevestigd noch ontkracht dat er een correlatie is tussen de maandelijkse productie en seismiciteit. De relatie tussen productiesnelheid en seismiciteit valt buiten de scope van deze studie en is niet verder onderzocht.

7.2.2 *B-parameter*

Van de 193 voorkomens die in deze actualisatie zijn geanalyseerd hebben 59 voorkomens een B-waarde onder de kritische grens van 0,84. De B-parameter lijkt daarmee een redelijk onderscheidend vermogen voor het inschatten van bevende en niet bevende voorkomens. Er zijn geen voorkomens aanwezig die door de (kleine) verandering van de B grenswaarde een andere inschatting van beven zouden krijgen in vergelijking met de DHAIS 2012 studie.

Voor de breuklengte l_b en de oppervlakte A worden met name de (top reservoir) structuurkaarten in het winningsplan gebruikt. In de mijnbouwwet is niet beschreven in welk detail de geologische structuurkaart moet worden aangeleverd. Voor het bepalen voor de breuklengte is van belang tot in welk detail intra-reservoirbreuken zijn opgenomen in de top-reservoir structuurkaart. In voorgaande studies werd al benoemd dat dit onzekerheid en spreiding geeft in de bepaling van B-waarden bij de verschillende voorkomens. Nieuwe interpretatie van oude dan wel nieuwe of vernieuwde seismische data kan een andere (resolutie) structuurkaart opleveren. Ook kan herinterpretatie van het gas-watercontact een andere breuklengte l_b en/of oppervlakte A opleveren. De methode gaat verder alleen uit van intra-reservoirbreuken en randbreuken die zich binnen het gas-watercontact bevinden en neemt niet het eventuele risico van het optreden van bevingen in met het reservoir verbonden aquifer mee.

7.2.3 *E-parameter*

De hypothese dat het stijfheidsverschil tussen reservoir en seal een hogere kans op beven hebben wordt volgens de DHAIS 2004 studie gegeven door Mulders (2003). Mulders (2003) laat door middel van numerieke analyses zien dat de schuifspanningen op steile *normal faults* (rekbreuken) in het reservoir hoger zijn als het omliggende gesteente een hogere stijfheid heeft dan bij dezelfde stijfheid. Er is dus aanleiding dat een stijfheidsverschil tussen reservoir en omliggende gesteentes een rol kan spelen in seismiciteit. De Young's modulus, de parameter die de

stijfheid van een gesteente aangeeft, is echter alleen een goede indicator voor het mechanisch gedrag van het afsluitend en omliggend gesteente als deze zich elastisch gedraagt. Het Zechstein zout vertoont (inelastisch) kruipgedrag op de tijdschaal van gaswinning (bijv. Wassing et al., 2017). Zechstein zout is door zijn geologische verspreiding alleen in Noord Nederland te vinden als seal. Voor zowel de onder- als overburden geldt dat kruipgedrag (in zowel zout als schalies) zal leiden tot hogere horizontaalspanningen (bijv. Sone & Zoback, 2013, 2014 en Kohli & Zoback, 2013) en daarmee een verhoogd risico op een beving. Pijnenburg et al. (2019) laten zien dat plasticiteit in het reservoirgesteente (en aangrenzende gesteenten) het seismisch potentieel kunnen verminderen ('relaxatie' van spanningen). Matig geconsolideerde zandstenen, zoals de Delft zandsteen⁵, hebben waarschijnlijk minder seismisch potentieel dan Rotliegend zandstenen (Buijze et al., 2019a). Dit soort mechanisch gedrag wordt niet beschreven met het stijfheidscontrast uit de E-parameter en valt buiten de scope van de studie.

Van de 189 voorkomens die in deze actualisatie zijn geanalyseerd hebben er 36 voorkomens een E-waarde onder de kritische grens van 1,07. De E-parameter lijkt daarmee een redelijk onderscheidend vermogen voor het inschatten van bevende en niet bevende voorkomens. In Bijlage D (Tabel D-1) is een overzicht gegeven van alle reservoir-seal/seal-reservoir combinaties en het aantal voorkomens dat per type combinaties gebeefd heeft. Het is duidelijk dat het grootste deel van de voorkomens dat gebeefd heeft, zowel totaal als relatief, een Rotliegend reservoir heeft met daarboven een afsluitende laag van Zechstein ouderdom (Anhydriet/Zout/Carbonaat). Ook voorkomens waarbij het Rotliegend reservoir wordt afgesloten door een Ten Boer kleisteen hebben relatief vaak gebeefd ten opzichte van andere reservoirs. In het grootste deel van deze voorkomens liggen boven de Ten Boer kleisteen ook nog Zechstein evaporieten, zoals bij het Groningenveld. Het lijkt daarmee dat de E-waarde een proxy is voor bepaalde reservoir-seal combinaties die een verhoogde kans op beven hebben. Het locatie specifiek berekenen van de E-parameter (de Young's modulus van de afsluitende laag en het reservoir bepalend a.d.h.v. V_s - V_p waarden van een lokale put) kan daarom voor een verkeerde inschatting zorgen. Aangezien voor de dataset met een gemiddelde is gewerkt kan het voorkomen dat een lokale waarde toevallig onder de grenswaarde valt, terwijl de gemiddelde waarde voor de seal-reservoir combinatie wel boven de grenswaarde valt. Het is daarom statistisch van belang de E-waarden bepaald in deze actualisatie te gebruiken in relatie tot de grenswaarden en kans op beven. Daarbij is het bepalen van de E-waarde voor reservoir-seal combinaties die niet zijn meegenomen in deze actualisatie complex. In zo een geval is het aan te bevelen om de dichtstbijzijnde analoog te gebruiken met de E-waarden zoals in deze actualisatie is gebruikt.

7.3 Kans op beven

De DHAIS methodiek geeft een inschatting van de kans op minimaal één beving gedurende de totale productieperiode van een voorkomen. De kans op beven die in deze actualisatie is uitgerekend is de minimale kans op beven over de huidige dataset. Dit houdt in dat in de toekomst de kans op beven kan veranderen door voorkomens die alsnog gaan beven of met door het eventuele uitbreiden van de dataset met nieuwe voorkomens. Het is daarom van belang de berekende kans op

⁵ www.dinoloket.nl/nl/stratigraphic-nomenclator

beven in dat licht te bekijken, dus als een inschatting en niet een vaststaand percentage. Vandaar dat er eens in de zoveel tijd de DHAIS moet worden geactualiseerd (2004, 2012 en nu 2021). Een andere manier om hier naar te kijken is als volgt: de DHAIS methodiek geeft onderscheid tussen voorkomens met karakteristieken (DP/P_{ini} , E- en B-waarde onder de grenswaarde) die een verwaarloosbare kans op beven hebben en voorkomens die met karakteristieken (DP/P_{ini} , E- en B-waarde boven de grens) potentieel hebben om te beven. Van de groep potentieel bevende voorkomens is ongeveer een kwart van de voorkomens in het verleden gaan beven.

De DHAIS methodiek geeft geen kans op de frequentie of het aantal bevingen, noch een inschatting op de magnitude die op zal treden. Een beving met een magnitude van 1,0 wordt in deze statistiek op eenzelfde manier gewogen als een beving met een magnitude van 3,0. Het is dus niet mogelijk om deze kans op het optreden van een beving te koppelen aan een inschatting van de theoretisch maximale magnitude die in de SRA (SodM, 2016) wordt berekend.

In de literatuur (bijv. Van Geuns & Van Thienen-Visser, 2017; Vorös et al., 2019; Buijze et al., 2017) worden bijvoorbeeld differentiële compactie, drukval, breukeigenschappen, breukoriëntatie, (lokale) spanningsveld genoemd als parameters die van belang zijn voor het optreden van geïnduceerde seismiciteit. Een deel van deze parameters is direct of indirect meegenomen in de indicatorparameters van deze studie. De drukval is bijvoorbeeld meegenomen in DP/P_{ini} parameter meegenomen, maar bijvoorbeeld breukeigenschappen of het lokale spanningsveld niet. Het is buiten de scope van deze actualisatie om te kijken naar andere indicatorparameters, maar het is mogelijk dat hierin een verklaring ligt waarom een deel van de voorkomens boven de kritische grens van de gebruikte indicatorparameters tot nu toe niet heeft gebeefd.

7.4 **Geregistreerde bevingen en M_{max} van de SRA**

Een seismische risico analyse (SRA) is een wettelijk onderdeel van het winnings- en opslagplan vastgelegd in de Mijnbouwwet. Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) heeft voor de uitvoering van de SRA in 2016 een leidraad opgesteld. Alhoewel geen onderdeel van de DHAIS is onderzocht of er bevingen met hogere magnitudes zijn waargenomen dan de M_{max} , de *realistisch sterkste beving*, volgens de SRA leidraad.

Om de sterkte van de bevingen te toetsen aan de uitkomsten van de SRA zijn de volgende gegevens opgenomen in Tabel 7-1:

- de hoogste gemeten magnitude over gehele productieperiode van het voorkomen,
- de theoretische maximale magnitude (volgens Bijlage 2; SodM, 2016) en
- de SRA risicocategorie.

Tabel 7-1 Voorkomens met hoogste magnitude over gehele productie periode tot en met 1 maart 2021, theoretisch maximale magnitude op basis van de SRA en indeling in SRA risico categorie.

Voorkomen	Hoogste magnitude	Mmax SRA *	SRA-Categorie**
Ameland-Oost Rotliegend	1,8	3,6/4,2	Cat. I
Annerveen Rotliegend	2,4	4,0/3,8	Cat. II
Bedum Rotliegend	1,6	3,8/3,3	Cat. II
Bergen Rotliegend	2,7	3,9/3,2	Cat. I
Bergermeer Rotliegend	0,7	3,9/3,9	Cat. II
Boerakker Rotliegend	0,9	3,9/3,1	Cat. I
Dalen Zechstein 2 Carbonaat	2,2	3,3/3,2	Cat. I
Eleveld Rotliegend	2,8	3,6/3,5	Cat. II
Emmen Zechstein 2 Carbonaat	2,3	3,7/3,9	Cat. II
Kollum Rotliegend	1,1	3,6/3,3	Cat. I
Kollum-Noord Rotliegend	1,5	3,6/3,1	Cat. II
Kommerzijl Rotliegend	1,0	3,5/3,1	Cat. I
Marum Rotliegend	1,4	3,7/3,3	Cat. I
Middelie Rotliegend	2,5	4,0/3,2	Cat. II
Munnekezijl-Oost Rotliegend	1,4	3,7/3,7	Cat. I
Pasop Rotliegend	0,9	3,7/3,3	Cat. I
Saaksum-West Rotliegend	1,7	3,4/3,0	Cat. II
Schoonebeek Gas Zechstein 2 Carbonaat	1,4	3,6/3,5	Cat. I
Vries-Centraal Rotliegend	1,2	3,7/3,3	Cat. I
Vries-Noord Rotliegend	1,9	3,5/3,3	Cat. I

* Theoretisch maximale magnitude op basis van breukgeometrie en op basis van energiebalans respectievelijk (Sodm, 2016). Deze 'Mmax' is gebaseerd op TNO-AGE berekeningen aan de hand van o.a. openbare winningsplannen.

** De SRA categorie is gebaseerd op TNO-AGE berekeningen aan de hand van o.a. openbare winningsplannen

De hoogst gemeten magnitude in de kleine velden in de periode na 1 april 2010 tot 1 maart 2021 is de beving van M_i 2,5 geassocieerd aan het Middelie Rotliegend voorkomen. Voor elk voorkomen geldt dat de geobserveerde bevingen boven het

veld lager is dan de theoretische maximale magnitude gebaseerd op SRA-methodiek. In de meeste gevallen zijn de bevingen één magnitudepunt of meer lager dan de M_{max} , wat betekent dat het seismisch moment (de hoeveelheid energie die vrijkomt) van de bevingen ongeveer 30 keer lager is dan de bij de M_{max} . In enkele gevallen ligt de hoogst geobserveerde beving dicht bij M_{max} , maar niet dicht dan een 0,5 magnitudepunt. Dit betekent dat het seismisch moment van deze bevingen ongeveer 6 keer lager is dan de het seismisch moment bij de M_{max} .

8 Conclusies

Dit rapport beschrijft de actualisatie van de deterministische hazard analyse (DHAIS) studies uit 2004 en 2012 (TNO, 2004; TNO, 2012). Hierbij zijn nieuwe data omtrent seismiciteit (KNMI) en veldgegevens tot en met 1 maart 2021 gebruikt om de grenswaarden van de indicatorparameters en kans op beven te actualiseren. Figuur 8-1 geeft een overzicht van de resultaten van deze actualisatie.

Reeds bevende voorkomens	
DP/P _{ini} ≥ 20%	B ≥ 0,84 en E ≥ 1,07: Kans op beven
	B < 0,84 en/of E < 1,07: Verwaarloosbare kans
DP/P _{ini} < 20%	Verwaarloosbare kans

Figuur 8-1 Indeling in kansklassen op basis van indicatorparameters (DP/P_{ini}, B en E-parameter) van deze actualisatie: verwaarloosbare kans (groen), kans op beven (oranje) en reeds bevende voorkomens (rood).

Actualisatie grenswaarden indicatorparameters

Deze actualisatie betreft de 3 indicatorparameters zoals bepaald in de DHAIS studie uit 2012, i.e. DP/P_{ini}, de B-parameter en de E-parameter. De indicatorparameters zijn geactualiseerd voor zowel de nieuw in productie genomen voorkomens als de voorkomens al beschouwd in de voorgaande DHAIS studies en de seismiciteit zoals waargenomen tot en met 1 maart 2021.

- De DP/P_{ini} is geactualiseerd met de nieuwe productiegegevens
- De B-parameter is voor alle voorkomens in de dataset opnieuw berekend op basis van een aanscherping (geen verandering) van de definitie.
- De E-parameter is opnieuw bepaald inclusief recente V_s-V_p log data (zie Bijlage D).

Deze analyse geeft de volgende nieuwe grenswaarden:

- (DP/P_{ini})_{grens} = 0,20 ± 0,03
- E_{grens} = 1,07 ± 0,06
- B_{grens} = 0,84 ± 0,23

Vaststelling kans op het optreden van een beving

Aan de hand van de nieuwe grenswaarden is op eenzelfde manier als in de voorgaande DHAIS studies de kans bepaald dat er een beving optreedt gedurende de productiefase van een olie- of gasveld. Tabel 8-1 geeft de geactualiseerde kansklassen, met de resultaten uit voorgaande DHAIS studies.

Tabel 8-1 Vergelijking in de kans op beven tussen de verschillende DHAIS studies.

Kansklasse	DHAIS-studie 2004	DHAIS-studie 2012	DHAIS-studie 2021
P _{laag}	0,10 ± 0,05	0,19 ± 0,05	0,23 ± 0,04
P _{hoog}	0,52 ± 0,10	0,42 ± 0,08	0,35 ± 0,08

De lagere kansklasse P_{laag} is gestegen terwijl de hogere kansklasse P_{hoog} iets is afgenomen. De kansklassen zijn daarmee nog dichter naar elkaar toe gekomen. Op

basis van de statistische analyse is er op basis van deze actualisatie geen significant verschil meer in de kans op beven tussen voorkomens met een hoge E-waarde en een relatief lagere E-waarde. Dit onderscheid is daarmee komen te vervallen. De kans op beven voor de gehele dataset is daarmee als volgt:

$$P_{\text{dataset}} = 0,26 \pm 0,04$$

Dit is een minimale kans voor de huidige dataset. Dit houdt in dat in de toekomst de kans op beven kan veranderen door voorkomens die alsnog gaan beven of door het eventuele uitbreiden van de dataset met nieuwe voorkomens. Alhoewel de berekende kans op beven een inschatting op basis van de huidige dataset is en niet een vaststaand percentage is de kans vergelijkbaar met de voorgaande DHAIS studies.

DHAIS 2012 en SRA

Als laatste is er onderzocht of de geïnduceerde seismiciteit die is opgetreden overeenkomt met de verwachtingen van de DHAIS 2012 studie en de Seismische Risico Analyse (SRA) zoals beschreven in de leidraad (SodM, 2016). Op basis van deze studie kan er geconcludeerd worden dat er geen bevingen zijn geregistreerd die in tegenspraak zijn met de DHAIS 2012 studie of de SRA.

Geregistreeerde bevingen en M_{max} van de SRA

Daarnaast, hoewel geen onderdeel van de DHAIS, is vastgesteld dat er geen bevingen gelijk aan of met hogere magnitudes zijn waargenomen dan de M_{max} , de *realistisch sterkste beving*, volgens de SRA leidraad.

9 Referenties

Baisch, S., Koch, C., Muntendam-Bos, A., (2019). Traffic light systems: to what extent can induced seismicity be controlled, *Seis. Res. Let.*, Vol 90, 3

Buijze, L., Van den Bogert, P., Wassing, B., Orlic, B., & Ten Veen, J. (2017). Fault reactivation mechanisms and dynamic rupture modelling of depletion-induced seismic events in a Rotliegend gas reservoir. *Netherlands Journal of Geosciences*, 96(5), S131-S148. doi:10.1017/njg.2017.27

Buijze, L., Van Bijsterveldt, L., Cremer, H., Paap, B., Veldkamp, H., Wassing, B.B.T., Van Wees, J.-D., Van Yperen, G.C.N., Jaarsma, B. & Ter Heege, J.H. (2019) Review of induced seismicity in geothermal systems worldwide and implications for geothermal systems in the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences*, 98, E13. doi: 10.1017/njg.2019.6

Candela T., Osinga S., Ampuero, J-P., Wassing., Pluymaekers M., Fokker P. A., van Wees, J-D., de Waal, H. & Muntendam-Bos G. (2019). Depletion-Induced Seismicity at the Groningen Gas Field: Coulomb Rate-and-State Models Including Differential Compaction Effect. *JGR Solid Earth*.

Dieterich, J. (1994): A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *J. of Geophys. Research*, 99 B2, 2601-2618.

Dost, B., Ruigrok, E., & Spetzler, J. (2017). Development of seismicity and probabilistic hazard assessment for the Groningen gas field. *Netherlands Journal of Geosciences*, 96(5), S235-S245. doi:10.1017/njg.2017.20

Eissa, E.A. and Kazi, A. (1988): Relation between static and dynamic Young's Modulus of rocks, *Int. J. Rock Mech. Min Sci.*, Vol. 25, No. 6, pp. 479-482

Feller, W. (1957). *An Introduction to Probability Theory and Its Applications*, Volume 1. John Wiley & Sons, Inc.

Fjær, E., R.M. Holt, P. Horsrud, A.M. Raaen, R. Risnes. (1992). *Petroleum-Related Rock Mechanics*. Developments in Petroleum Science 33. Elsevier Science.

Hangx, S. J. T., Spiers, C. J., and Peach, C. J. (2010). Mechanical behavior of anhydrite caprock and implications for CO₂ sealing capacity, *J. Geophys. Res.* 115, B07402, doi:10.1029/2009JB006954.

Hanks, T., and H. Kanamori (1979). Moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.* 84, 2348-2350.

Hol, S., van der Linden, A., Bierman, S. et al. (2018). Rock Physical Controls on Production-induced Compaction in the Groningen Field. *Sci Rep* 8, 7156 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25455-z>

Jagt, L., Ruigrok, E., & Paulssen, H. (2017). Relocation of clustered earthquakes in the Groningen gas field. *Netherlands Journal of Geosciences*, 96(5), S163-S173. doi:10.1017/njg.2017.12

Jaynes, E.T., (2003). *Probability Theory – The Logic of Science*. Cambridge University Press. 758 pp.

KNMI (2017). Winschoten events, 19-11-2017 KNMI, Dept. R&D Seismology and Acoustics.

Kohli, A.H., Zoback, M.D. (2013). Frictional properties of shale reservoir rocks, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, doi: 10.1002/igrb.50346.

Kruijver, P., Dost, B., Ruigrok E., Spetzler J., van den Hazel, G.J., Campmans, T., Evers, L., *in druk*, KNMI Technical report; TR-391, Ontwerp monitoringsnetwerk voor geïnduceerde seismiteit ten gevolge van mijnbouwactiviteiten

Mulders, F.M.M. (2003) Modelling of stress development and fault slip in and around a producing gas reservoir. Proefschrift, TU Delft.

NAM (2016). Winningsplan Westerveld: <https://www.nlog.nl/field-web/rest/field/document/2812878400>

NAM (2018). Actualisatie Seismische Risico Analyse voor 23 NAM velden-1 juli 2018

NAM (2019). https://www.nam.nl/nieuws/2019/48-uurs-rapportage-beving-westerwijdterd/_jcr_content/par/textimage.stream/1558681046301/e168d2e685db1a3d3f85e5bc2a5ed55ef27a632c/periodieke-rapportage-seismiciteit-groningen-mei-2019.pdf

Nepveu, M., van Thienen-Visser K., en Sijacic D. (2016). Statistics of seismic events at the Groningen field, *Bull. Earthq. Eng.* 14, 3334–3362.

Pijenburg, R. P. J., Verberne, B. A., Hangx, S. J. T., & Spiers, C. J. (2018). Deformation behavior of sandstones from the seismogenic Groningen gas field: Role of inelastic versus elastic mechanisms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 5532– 5558. <https://doi.org/10.1029/2018JB015673>

Pijenburg et al., (2019). Inelastic deformation of the Slochteren Sandstone: Stress-Strain Relations and implications for Induced Seismicity in the Groningen Gas Field. *JGR Solid Earth* 2019.

Segall, P., Lu, S. (2015). Injection-induced seismicity: Poroelastic and earthquake nucleation effects, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 5082-5103, doi: 10.1002/2015JB012060.

Sodm (2016). Methodiek voor risicoanalyse omtrent geïnduceerde bevingen door gaswinning. Tijdelijke leidraad voor adressering mbb. 24.1.p, versie 1.2

Sone, H., Zoback, M.D. (2013). Mechanical properties of shale gas reservoir rocks – Part 2: Ductile creep, brittle strength, and their relation to the elastic modulus. *Geophysics* Vol. 78, No.5: 393-402.

Sone, H., Zoback, M.D. (2014). Time-dependent deformation of shale gas reservoir rocks and its long-term effect on the in situ state of stress. *International Journal of rock Mechanics & Mining Sciences* 69: 120-132.

Teatini, P., Zoccarato, C., Ferronato, M., Franceschini, A., Isotton, G., Frigo, M., Janna, C. (2019). *Safe operational bandwidth of gas storage reservoirs*. KEM-01-studie:
<https://kemprogramma.nl/file/download/57979432/KEM01%20WP1%20literatuur%20inventarisatie.pdf>

TNO & KNMI (2004). (Wassing, B. B. T., van Eck, T. en van Eijs, R. M. H. E.), Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Integratie van deelstudies. TNO rapport NITG 04-244-B, KNMI publicatie 208, ISBN 90-369-2263-1

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

TNO (2012). (Thienen-Visser, K., Hettelaar, J. en Nepveu, M.). Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit in Nederland. TNO-rapport 2012 R10198

TNO (2015). (Thienen-Visser, K., Kempen, B., Paalvast, L., Sijacic, D., Nepveu, M.). Seismiciteit van de Drenthe velden. TNO 2015 R10314

TNO (2016a). Evaluatie mogelijke oorzaak aardbevingen bij Anna Paulowna in juni 2015. TNO 2016 R11209

TNO (2016b). Evaluatie mogelijke oorzaak aardbevingen nabij Castricum-Zee in oktober – november 2013. TNO R11210

TNO, *in druk*, Geomechanical parameters derived from compressional and shear sonic logs for main geothermal targets in the Netherlands'

Van Eijs, R. M. H. E., Mulders, F. M. M., Nepveu, M., Kenter, C. en Scheffers, B.C., (2006). Correlation between hydrocarbon reservoir properties and induced seismicity in the Netherlands. *Engineering Geology*, 84, 99-111

Vöros R., Baisch, S. (2019). Geomechanical study- Small Gas Fields in the Netherlands <https://www.kemprogramma.nl/file/download/57979559/KEM-07%20Small%20gas%20field%20seismic%20risks%20final%20report.pdf>

Van Geuns, L., & Van Thienen-Visser, K. (Ed.) (2017). Induced Seismicity in the Groningen Gas Field, the Netherlands [special issue], *Netherlands Journal of Geosciences*, 96 (5)

Wassing B., Buijze L., Ter Heege, J. Orlic B. & Osinga, S. (2017). The impact of viscoelastic caprock on fault reactivation and fault rupture in producing gas fields. ARMA 2017

Yale, D. P., en V. Swami. (2017). "Conversion of Dynamic Mechanical Property Calculations to Static Values for Geomechanical Modeling." Paper presented at the 51st U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, California, USA, June 2017

Zoback, M. (2007). Reservoir Geomechanics. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511586477

10 Ondertekening

Utrecht, 6 september 2021

TNO

Hoofd Adviesgroep Economische Zaken en Klimaat

Auteur

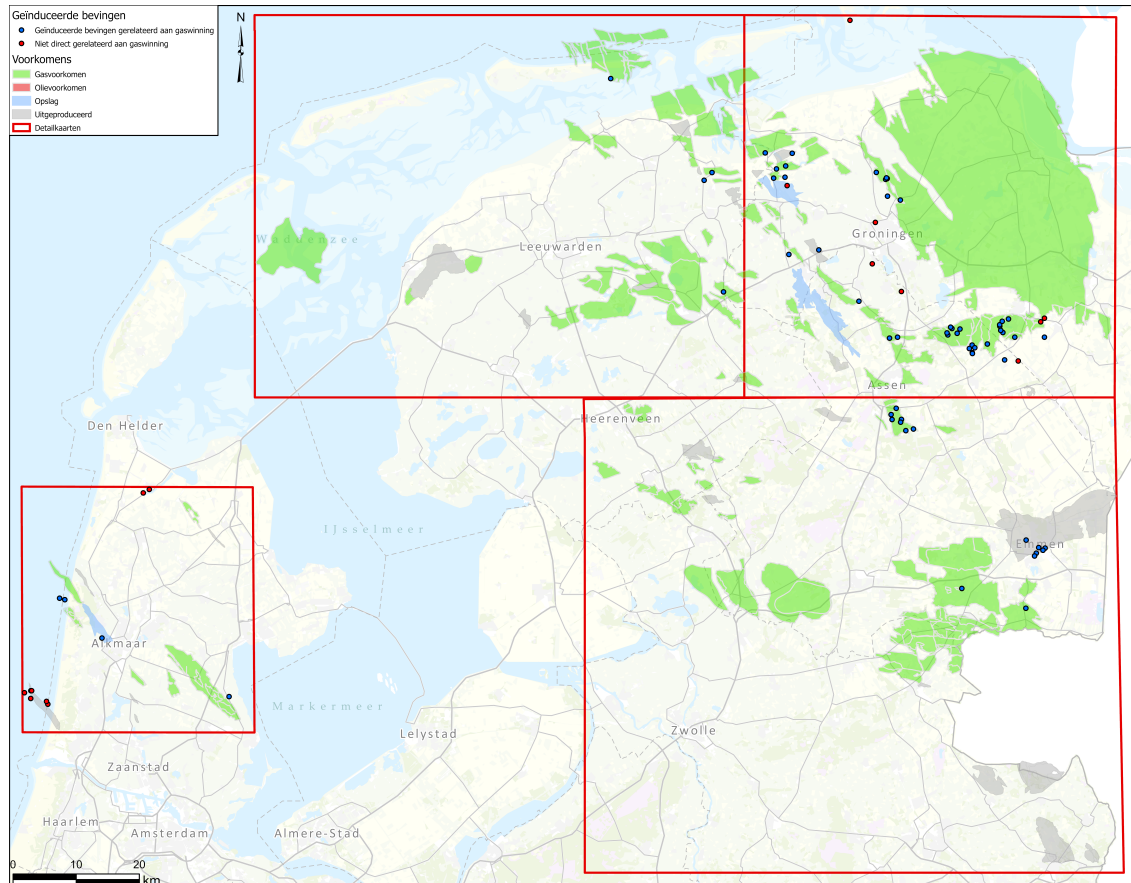
A Overzicht geïnduceerde seismiciteit 10 mei 2010 –1 maart 2021

Deze bijlage geeft een overzicht van de geïnduceerde bevingen in de dataset van KNMI in de periode 10 mei 2010 tot en met 1 maart 2021. Daarnaast wordt een toelichting gegeven op toekenning van bevingen aan voorkomens verschillend aan de voorgaande studie uit 2012 (bevingen voor 10 mei 2010).

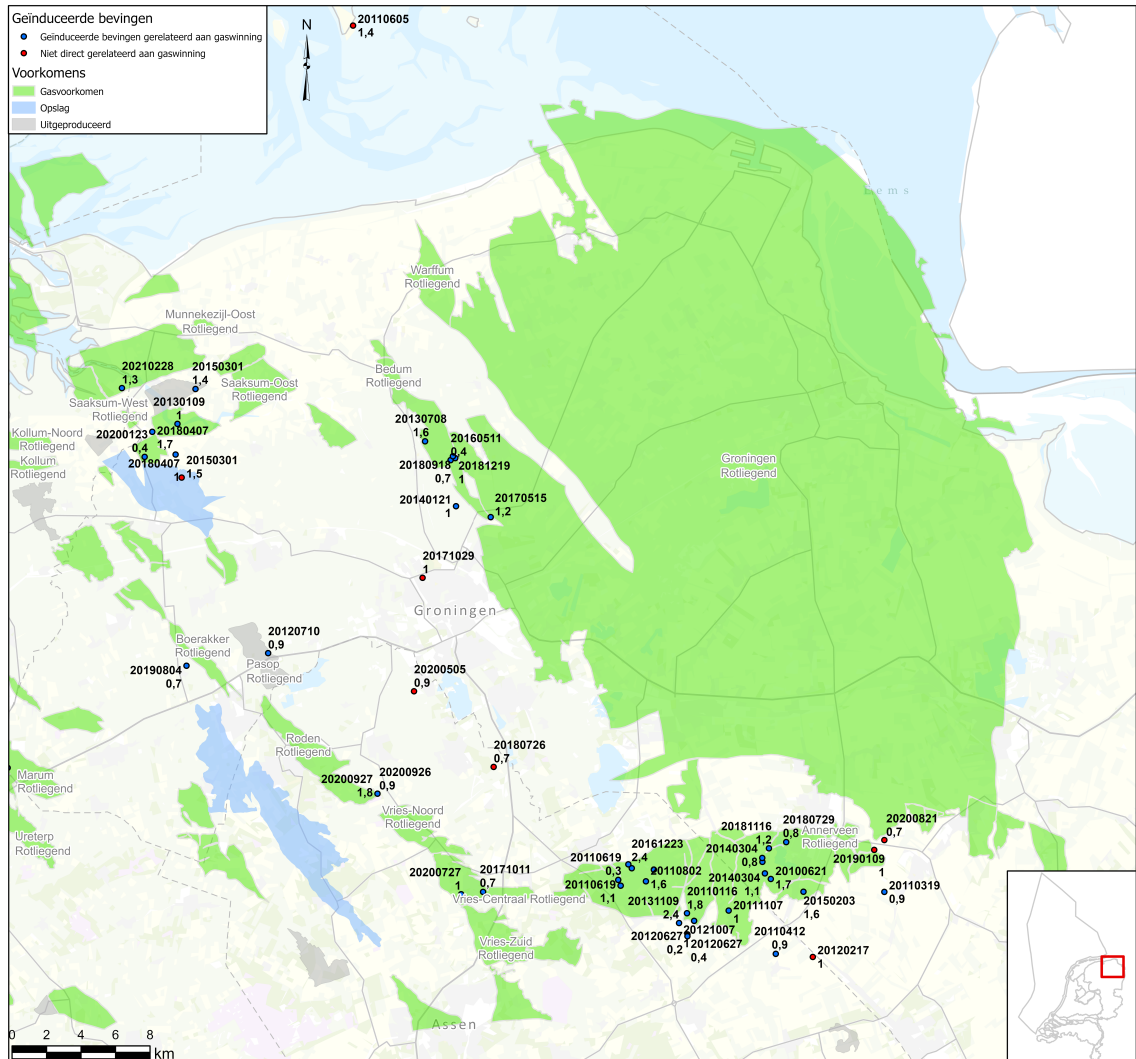
In deze bijlage worden alle bevingen die gerelateerd zijn aan de 'kleine velden' getoond (Tabel A-1) en alle bevingen buiten de contour van het Groningen gasveld/voorkomen die aan Groningen gerelateerd zijn (Tabel A-2). Daarnaast zijn ook enkele bevingen geregistreerd waar geen directe link met een producerend (gas)voorkomen is. Tabel A-3 toont deze bevingen en geeft waar bekend ook de waarschijnlijke oorzaak. Logischerwijs zijn de bevingen in Tabel A-3 niet meegenomen in deze actualisatie aangezien er geen directe relatie met (olie- of) gaswinning is. Figuur A-1 is een uitvergroting van Figuur 4-1 en geeft een overzicht van alle bevingen die in de Tabellen A-1, A-2 en A-3 worden getoond. Figuren A-2, A-3 en A-4 zijn uitvergrotingen van Figuur A-1.

A.1 Overzicht geïnduceerde bevingen kleine velden

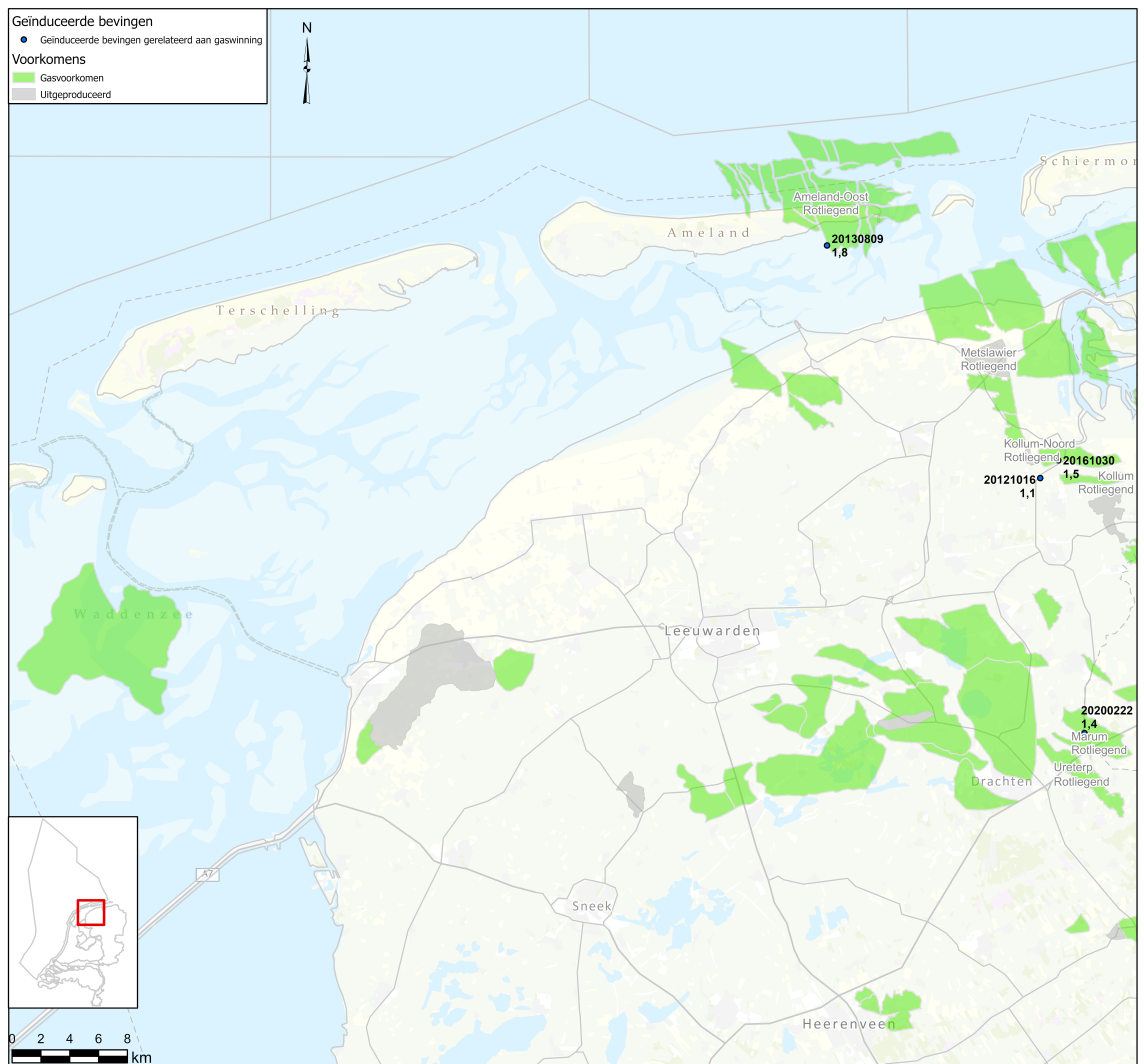
A.1.1 Overzichtsfiguren



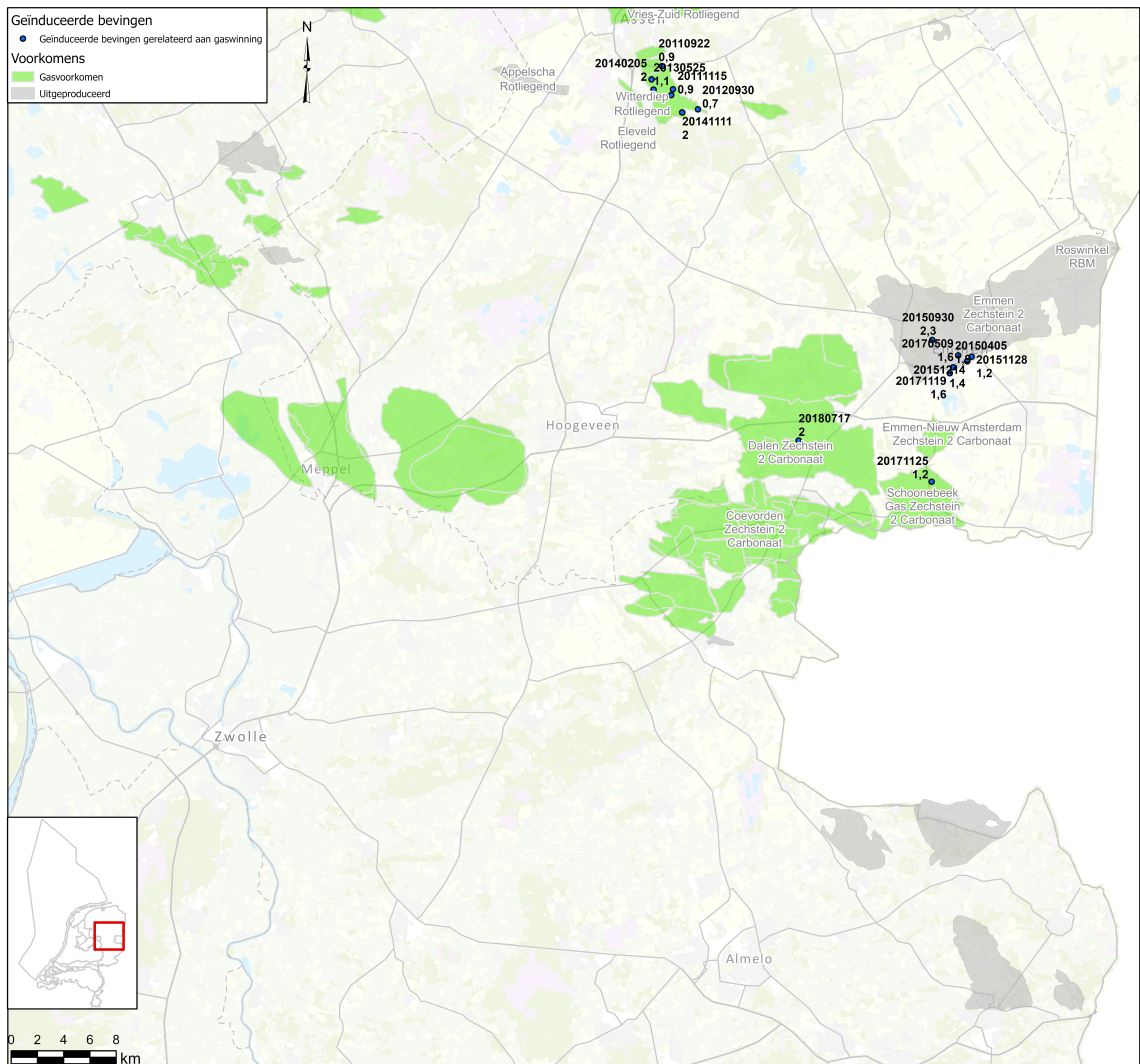
Figuur A-1 Aardbevingen uit de catalogus van KNMI, periode 10 mei 2010 tot en met 1 maart 2021, niet gerelateerd aan het Groningen gasveld. Onder de lijn Amsterdam-Arnhem zijn geen geïnduceerde bevingen als gevolg van olie- en gaswinning door het KNMI geregistreerd. Rode omliggende gebieden zijn uitvergrotingen en worden hieronder weergegeven.



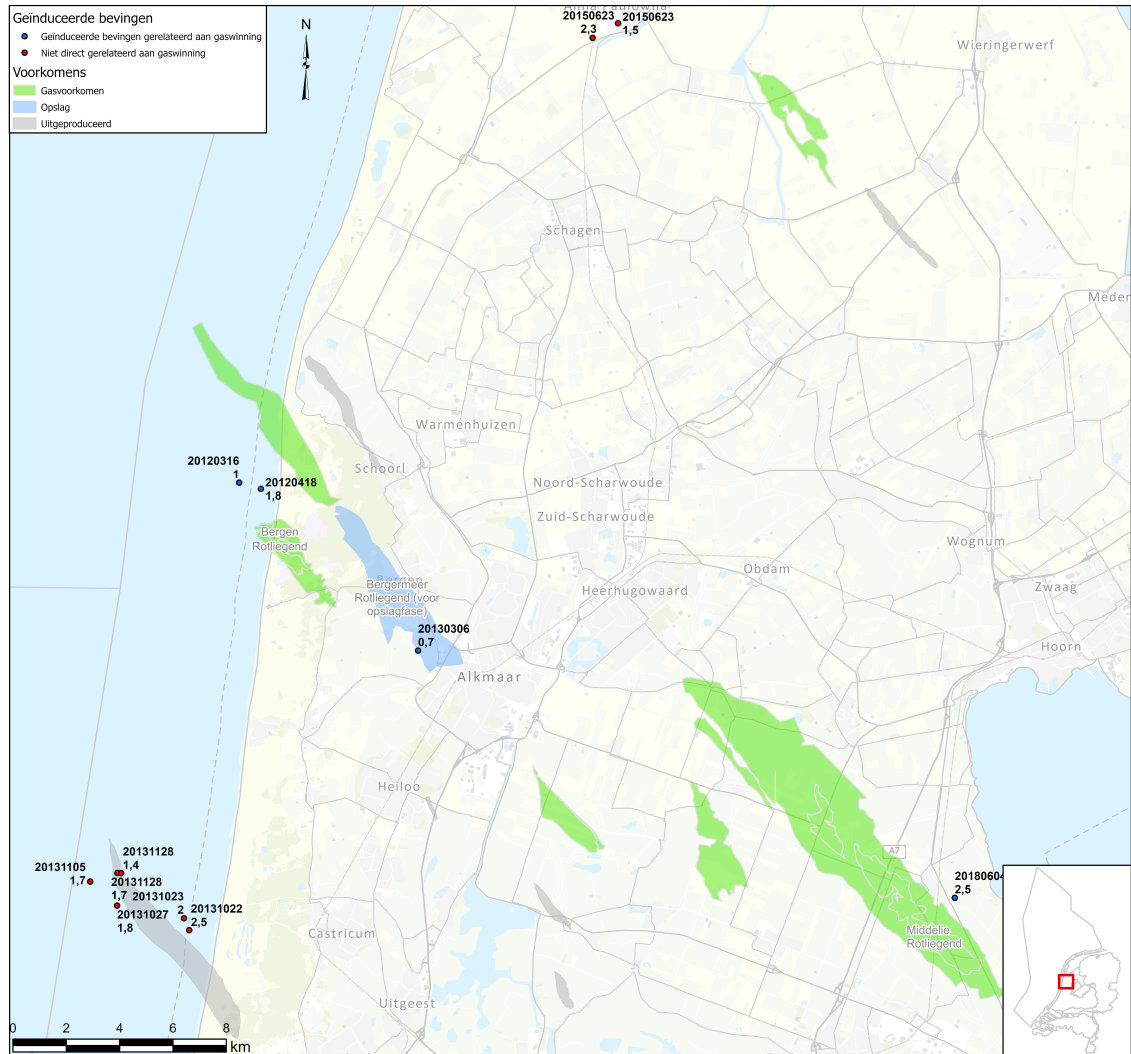
Figuur A-2 Uitvergroting van Figuur A-1. Aardbevingen met lokale magnitude en datum van registratie uit catalogus van KNMI, periode 10 mei 2010 tot en met 1 maart 2021, niet gerelateerd aan het Groningen gasveld. In blauw de aardbevingen die in deze studie gerelateerd zijn aan gaswinning (zie Tabel A-1), in rood de aardbevingen die niet direct gerelateerd aan gaswinning (zie Tabel A-2). Bevende voorkomens zijn aangegeven met naam van het voorkomen.



Figuur A-3 Uitvergroting van Figuur A-1. Aardbevingen met lokale magnitude en datum van registratie uit catalogus van KNMI, periode 10 mei 2010 tot en met 1 maart 2021, niet gerelateerd aan het Groningen gasveld. In blauw de aardbevingen die in deze studie gerelateerd zijn aan gaswinning (zie Tabel A-1). Bevende voorkomens zijn aangegeven met naam van het voorkomen.



Figuur A-4 Uitvergroting van Figuur A-1. Aardbevingen met lokale magnitude en datum van registratie uit catalogus van KNMI, periode 10 mei 2010 tot en met 1 maart 2021. In blauw de aardbevingen die in deze studie gerelateerd zijn aan gaswinning, (zie Tabel A-1). Bevende voorkomens zijn aangegeven met naam van het voorkomen.



Figuur A-5 Uitvergroting van Figuur A-1. Aardbevingen met lokale magnitudo en datum van registratie uit catalogus van KNMI, periode 10 mei 2010 tot en met 1 maart 2021. In blauw de aardbevingen die in deze studie gerelateerd zijn aan gaswinning (zie Tabel A-1), in rood de aardbevingen die niet direct gerelateerd aan gaswinning (zie Tabel A-2). Bevende voorkomens zijn aangegeven met naam van het voorkomen.

A.1.2 Overzicht bevingen gerelateerd aan gaswinning

Tabel A-1 geeft een overzicht van alle geïnduceerde bevingen binnen de 3 mijlzone gerelateerd aan alle voorkomens, uitgezonderd Groningen, in de periode 10 mei 2010 tot en met 1 maart 2021. Tabel A-2 geeft een overzicht van alle bevingen binnen de 3 km contour van het Groningengasveld (dus niet er direct boven) die aan het Groningen gasveld zijn toegekend.

Tabel A-1 Geïnduceerde seismiteit (KNMI) gerelateerd aan alle voorkomens, uitgezonderd Groningen in de periode 10 mei 2010 – 1 maart 2021; datum, locatie, magnitude (M) en waarschijnlijke oorzaak. Diepte alleen gegeven wanneer niet op 3 km diepte geregistreerd.

Datum beving	Locatie	M	(Waarschijnlijke) oorzaak
2010-06-21	Wildervank	1,7	Gaswinning Annerveen (binnen contour voorkomen)
2011-01-16	Annen	1,8	Gaswinning Annerveen (binnen contour voorkomen)
2011-03-19	Nieuwe Pekela	0,9	Gaswinning Annerveen (binnen 3 km contour voorkomen)
2011-04-12	Gieterveen	0,9	Gaswinning Annerveen (binnen 3 km contour voorkomen)
2011-06-19	Zuidlaren	1,1	Gaswinning Annerveen (binnen contour voorkomen)
2011-06-19	Zuidlaren	0,3	Gaswinning Annerveen (binnen contour voorkomen)
2011-08-02	Zuidlaren	1,6	Gaswinning Annerveen (binnen contour voorkomen)
2011-09-22	Assen	0,9	Gaswinning Eleveld (binnen contour voorkomen)
2011-11-07	Eexterveen	1,0	Gaswinning Annerveen (binnen contour voorkomen)
2011-11-15	Ekehaar	0,9	Gaswinning Eleveld (binnen contour voorkomen)
2012-03-16	Noordzee	1,0	Gaswinning Bergen (binnen 3 km contour voorkomen)
2012-04-18	Noordzee	1,8	Gaswinning Bergen (binnen 3 km contour voorkomen)
2012-06-27	Eextertzandvoort	0,2	Gaswinning Annerveen (binnen 3 km contour voorkomen)
2012-06-27	Eext	0,4	Gaswinning Annerveen (binnen 3 km contour voorkomen)
2012-07-10	Lettelbert	0,9	Gaswinning Pasop (binnen 3 km contour voorkomen)
2012-09-30	Grolloo	0,7	Gaswinning Eleveld (binnen contour voorkomen)
2012-10-07	Annen	1,0	Gaswinning Annerveen (binnen contour voorkomen)
2012-10-16	Kollum	1,1	Gaswinning Kollum (binnen 3 km contour voorkomen)
2013-01-09	Houwerzijl	1,0	Gaswinning Saaksum-West (binnen contour voorkomen)
2013-03-06	Alkmaar	0,7	Gaswinning Bergermeer (binnen 3 km contour voorkomen). Diepte 2 km
2013-05-25	Geelbroek	1,1	Gaswinning Eleveld (binnen contour voorkomen)
2013-07-08	Wetsinge	1,6	Gaswinning Bedum (binnen contour voorkomen)
2013-08-09	Waddenzee (nabij Buren)	1,8	Gaswinning Ameland Oost (binnen 3 km contour voorkomen)
2013-09-24	Zuidlaren	1,1	Gaswinning Annerveen (binnen contour voorkomen)
2013-11-09	Annen	2,4	Gaswinning Annerveen (binnen 3 km contour voorkomen)
2014-01-21	Noordwolde	1,0	Gaswinning Bedum (binnen 3 km contour voorkomen)
2014-02-05	Assen	2,0	Gaswinning Eleveld (binnen contour voorkomen)
2014-03-04	Wildervank	0,8	Gaswinning Annerveen (binnen contour voorkomen)
2014-03-04	Wildervank	0,8	Gaswinning Annerveen (binnen contour voorkomen)
2014-03-04	Wildervank	1,1	Gaswinning Annerveen (binnen contour voorkomen)
2014-03-12	Ekehaar	1,3	Gaswinning Eleveld (binnen contour voorkomen)
2014-11-11	Amen	2,0	Gaswinning Eleveld (binnen contour voorkomen)
2015-02-03	Wildervank	1,6	Gaswinning Annerveen (binnen contour voorkomen)

2015-03-01	Houwerzijl	1,4	Gaswinning Munnekezijl (binnen 3 km contour voorkomen). Meerdere andere voorkomens binnen 3 km, maar Munnekezijl dichtstbijzijnd voorkomen. De beving ligt boven het Houwerzijl voorkomen, maar deze is ten tijde van deze beving al bijna 5 jaar uitgeproduceerd.
2015-04-05	Emmen	1,9	Gaswinning Emmen (binnen contour voorkomen)
2015-09-30	Emmen	2,3	Gaswinning Emmen (binnen contour voorkomen)
2015-11-28	Emmen	1,2	Gaswinning Emmen (binnen contour voorkomen)
2015-12-14	Emmen	1,4	Gaswinning Emmen (binnen contour voorkomen)
2016-05-11	Bedum	0,4	Gaswinning Bedum (binnen contour voorkomen)
2016-10-30	Kollum	1,5	Gaswinning Kollum Noord (binnen 3 km contour voorkomen)
2016-12-23	Zuidlaren	2,4	Gaswinning Annerveen (binnen contour voorkomen)
2017-05-09	Emmen	1,6	Gaswinning Emmen (binnen contour voorkomen)
2017-05-15	Zuidwolde	1,2	Gaswinning Bedum (binnen contour voorkomen)
2017-10-11	Vries	0,7	Gaswinningen Vries-Centraal (binnen contour voorkomen)
2017-10-11	Emmen	1,6	Gaswinning Emmen (binnen 3 km contour voorkomen)
2017-11-25	Schoonebeek	1,2	Gaswinning Schoonebeek (binnen contour voorkomen)
2018-04-07	Lauwerzijl	1,7	Gaswinning Saaksum-West (binnen 3 km contour voorkomen)
2018-04-07	Kommerzijl	1,0	Gaswinning Kommerzijl (binnen contour voorkomen)
2018-06-04	Warder	2,5	Gaswinning Middellie (binnen 3 km contour voorkomen)
2018-07-17	Dalen	2,0	Gaswinning Dalen (binnen contour voorkomen)
2018-07-26	Eelde	0,7	Gaswinning Vries-Noord (binnen 3 km contour voorkomen)
2018-07-29	Veendam	0,8	Gaswinning Annerveen (binnen contour voorkomen)
2018-09-18	Bedum	1,0	Gaswinning Bedum (binnen contour voorkomen)
2018-11-16	Borgercompagnie	1,2	Gaswinning Annerveen (binnen 3 km contour voorkomen)
2018-12-19	Bedum	1,0	Gaswinning Bedum (binnen contour voorkomen)
2019-06-14	Bedum	0,9	Gaswinning Bedum (binnen contour voorkomen)
2019-08-04	Boerakker	0,7	Gaswinning Boerakker (binnen 3 km contour voorkomen)
2019-11-30	Zuidlaren	0,7	Gaswinning Annerveen (binnen contour voorkomen)
2020-01-23	Kommerzijl	0,4	Gaswinning Kommerzijl (binnen contour voorkomen)
2020-02-22	Opende	1,4	Gaswinning Marum (binnen contour voorkomen)
2020-07-27	Vries	1,0	Gaswinningen Vries-Centraal (binnen contour voorkomen)
2020-09-26	Winde	0,9	Gaswinning Vries-Noord (binnen 3 km contour voorkomen)
2020-09-27	Winde	1,8	Gaswinning Vries-Noord (binnen 3 km contour voorkomen)
2021-02-28	Munnekezijl	1,3	Gaswinning Munnekezijl (binnen contour voorkomen)

Tabel A-2 Geïnduceerde seismiciteit (KNMI.nl) binnen een 3 km contour van het Groningen gasveld welke gerelateerd zijn aan het Groningengasveld in de periode 10 mei 2010 – 1 maart 2021; datum, locatie, magnitude (M). Diepte alleen gegeven wanneer niet op 3 km geregistreerd.

Datum beving	Locatie	M	(Waarschijnlijke) oorzaak
2010-12-02	Usquert	1,2	Binnen 3 km contour Groningen
2010-12-30	Eems-Dollard (nabij Emden)	0,9	Binnen 3 km contour Groningen
2011-04-20	Veendam	0,8	Binnen 3 km contour Groningen
2011-06-05	Haren	1,5	Binnen 3 km contour Groningen
2012-04-14	Waddenzee (nabij Uithuizen)	0,9	Binnen 3 km contour Groningen
2012-08-09	Haren	1,5	Binnen 3 km contour Groningen
2013-02-16	Eems-Dollard (nabij Farmsum)	0,8	Binnen 3 km contour Groningen
2013-03-16	Waddenzee (nabij Eemshaven)	2,0	Binnen 3 km contour Groningen
2014-01-09	Onderdendam	1,1	Binnen 3 km contour Groningen
2014-03-28	Waddenzee (nabij Uithuizermeeden)	1,3	Binnen 3 km contour Groningen
2014-07-06	Haren	0,9	Binnen 3 km contour Groningen
2015-05-08	Onnen	1,1	Binnen 3 km contour Groningen
2015-08-28	Usquert	1,3	Binnen 3 km contour Groningen
2015-10-22	Zuidwolde	0,5	Binnen 3 km contour Groningen
2016-04-09	Westerbroek	0,5	Binnen 3 km contour Groningen
2016-07-09	Hoogezand	1,1	Binnen 3 km contour Groningen
2016-10-07	Eems-Dollard (nabij Bierum)	0,9	Binnen 3 km contour Groningen
2017-03-06	Onderdendam	1,6	Binnen 3 km contour Groningen
2017-04-07	Westerbroek	0,5	Binnen 3 km contour Groningen
2017-09-20	Haren	1,4	Binnen 3 km contour Groningen
2017-11-28	Uithuizermeeden	0,9	Binnen 3 km contour Groningen
2018-01-17	Groningen	1,0	Binnen 3 km contour Groningen
2018-01-20	Groningen	0,9	Binnen 3 km contour Groningen
2018-06-05	Onderdendam	0,5	Binnen 3 km contour Groningen
2019-01-07	Veendam	1,3	Binnen 3 km contour Groningen
2019-02-22	Rottum	0,8	Binnen 3 km contour Groningen
2019-07-21	Garmerwolde	0,3	Binnen 3 km contour Groningen
2020-05-01	Haren	0,6	Binnen 3 km contour Groningen
2020-06-24	Groningen	0,7	Binnen 3 km contour Groningen
2020-09-07	Groningen	0,9	Binnen 3 km contour Groningen
2020-09-13	Onderdendam	0,9	Binnen 3 km contour Groningen

A.1.3 Seismiciteit zonder relatie met (olie- of) gaswinning

Een klein deel van de bevingen die geregistreerd zijn door het KNMI-meetnetwerk zijn niet (direct) gerelateerd aan (olie- of) gaswinning. De bevingen bevinden zich op een te grote afstand van een producerend (kleine veld) voorkomen, zijn voor productie geregistreerd, gerelateerd aan andere mijnbouwactiviteit (bijv. zoutwinning) of de diepte van de beving is niet te relateren aan de winningsdiepte van olie of gas. Tabel A-3 geeft een overzicht van deze bevingen en geeft waar mogelijk een waarschijnlijke oorzaak.

Tabel A-3 Geïnduceerde seismiciteit (KNMI) welke niet direct gerelateerd is aan gaswinning in de periode 10 mei 2010 – 1 maart 2021; datum, locatie, magnitude (M) en waarschijnlijke oorzaak. Diepte alleen gegeven wanneer niet op 3 km geregistreerd

Datum beving	Locatie	M	Opmerking
2011-06-05	Usquert	1,4	Buiten 3 km producerend voorkomen, dichtstbijzijnde voorkomen het Groningen op ongeveer 11 km afstand.
2012-02-17	Nieuwendijk	1,0	Buiten 3 km producerend voorkomen, dichtstbijzijnde voorkomen Annerveen op ongeveer 4 km afstand.
2013-10-22	Noordzee (nabij Castricum)	2,5	Buiten 3 km van producerend voorkomen, het Castricum Zee was uitgeproduceerd in 2004. Oorzaak beving is onduidelijk, een combinatie van factoren mogelijk, zie bijv. TNO, 2016a.
2013-10-23	Noordzee (nabij Castricum)	2,0	Buiten 3 km van producerend voorkomen, het Castricum Zee was uitgeproduceerd in 2004. Oorzaak beving is onduidelijk, een combinatie van factoren mogelijk, zie bijv. TNO, 2016a.
2013-10-27	Noordzee (nabij Castricum)	1,8	Buiten 3 km van producerend voorkomen, het Castricum Zee was uitgeproduceerd in 2004. Oorzaak beving is onduidelijk, een combinatie van factoren mogelijk, zie bijv. TNO, 2016a.
2013-11-05	Noordzee (nabij Castricum)	1,7	Buiten 3 km van producerend voorkomen, het Castricum Zee was uitgeproduceerd in 2004. Oorzaak beving is onduidelijk, een combinatie van factoren mogelijk, zie bijv. TNO, 2016a.
2013-11-28	Noordzee (nabij Castricum)	1,7	Buiten 3 km van producerend voorkomen, het Castricum Zee was uitgeproduceerd in 2004. Oorzaak beving is onduidelijk, een combinatie van factoren mogelijk, zie bijv. TNO, 2016a.
2013-11-28	Noordzee (nabij Castricum)	1,4	Buiten 3 km van producerend voorkomen, het Castricum Zee was uitgeproduceerd in 2004. Oorzaak beving is onduidelijk, een combinatie van factoren mogelijk, zie bijv. TNO, 2016a.
2015-03-01	Kommerzijl	1,5	Ondergrondse gasopslag Grijskerk (binnen contour voorkomen). Zie Teatini et al., 2019.
2015-06-23	Anna Paulowna	1,5	Buiten 3 km van een producerend voorkomen. Oorzaak beving is onduidelijk, een combinatie van factoren mogelijk, zie bijv. TNO, 2016b.
2015-06-23	Anna Paulowna	2,3	Buiten 3 km van een producerend voorkomen. Oorzaak beving is onduidelijk, een combinatie van factoren mogelijk, zie bijv. TNO, 2016b.

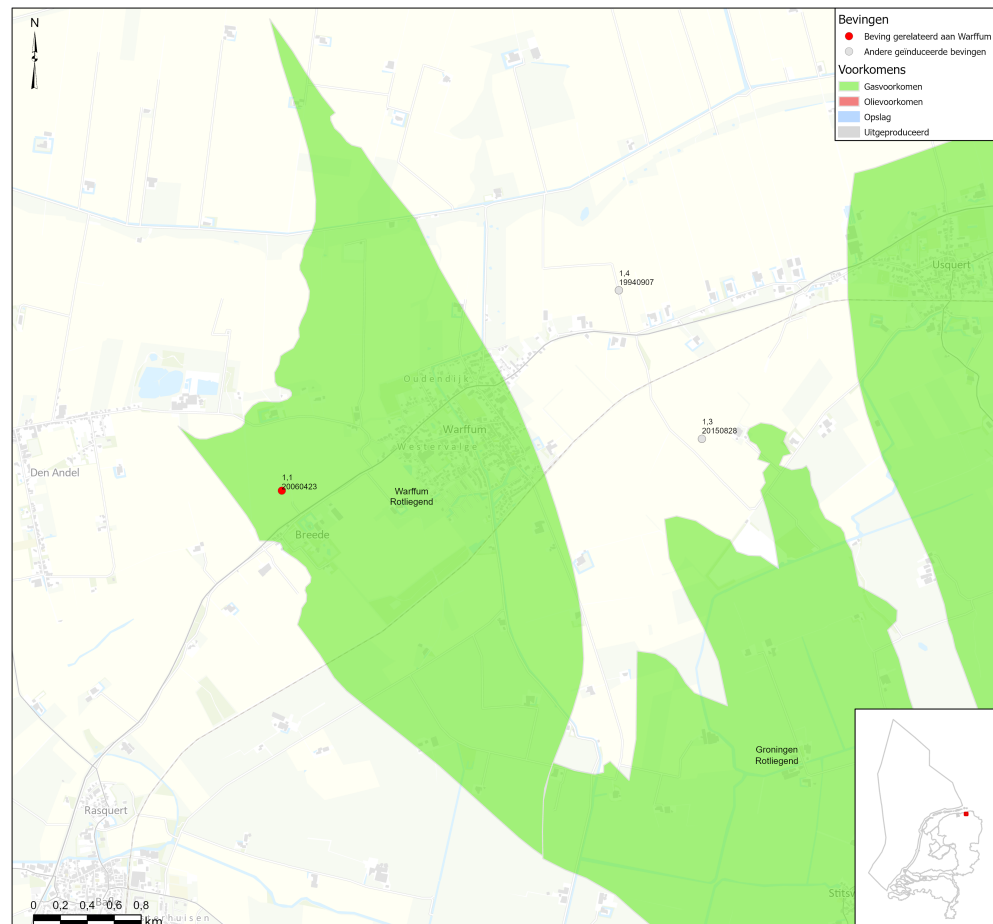
2017-10-29	Groningen	1,0	Buiten 3 km producerend voorkomen, dichtstbijzijnde voorkomen Groningen op ongeveer 3,5 km afstand.
2019-01-09	Veendam	1,0	Diepte beving op 1 km gelokaliseerd, waarschijnlijk zoutwinning Veendam.
2020-05-05	Peize	0,9	Buiten 3 km producerend voorkomen, dichtstbijzijnde voorkomen Groningen op ongeveer 6,5 km afstand.
2020-08-21	Veendam	0,7	Diepte beving op 0 km gelokaliseerd, waarschijnlijk zoutwinning Veendam.

A.2 Aanpassingen ten opzichte van DHAIS 2012 studie

Hieronder volgt een toelichting op het toekennen van enkele bevingen aan voorkomens voor bevingen die voor 10 mei 2010 hebben plaatsgevonden die verschilt met de voorgaande DHAIS 2012 studie.

A.2.1 Warffum

Er zijn boven en in de omgeving van Warffum 2 bevingen geregistreerd, in 1994 en 2006 (Figuur A-6).



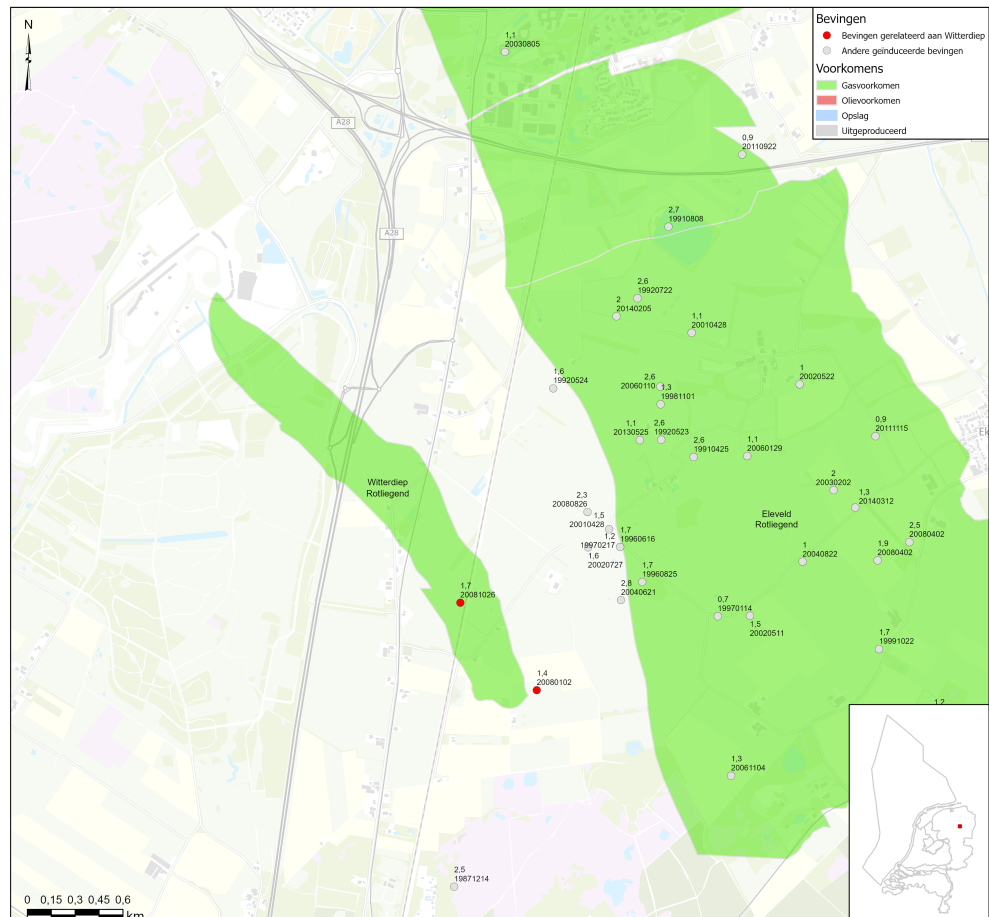
Figuur A-6 Bevingen in en rondom het Warffum vanaf begin productie tot en met 1 maart 2021. Bevingen in het Groningenveld worden niet getoond. De beving die aan Warffum is toegekend is in rood weergegeven, andere bevingen in grijs.

In de DHAIS 2012 studie is er gekozen om deze bevingen aan Groningenveld toe te wijzen, vanwege het feit dat deze bevingen ook dichtbij het Groningenveld zijn geregistreerd. Het kan daarom niet met zekerheid worden vastgesteld dat de bevingen in Warffum ten gevolge van de depletie van het Warffum veld zijn en niet ten gevolge van de depletie in het Groningenveld. Voor deze studie is er gekozen om één van deze bevingen aan het Warffum veld toe te wijzen. Het lijkt waarschijnlijk dat de beving uit 1996 door Groningen is veroorzaakt. De beving ligt buiten de veld contouren van Warffum, tussen Warffum en het Groningenveld in. Verder was in 1996 het Warffum veld nog zeer weinig in druk gedaald. De beving

van 2006 ligt echter binnen de veld contouren van het Warffum veld. Daarom is deze beving aan het Warffum veld toegekend. Door NAM⁶ wordt deze beving ook aan het Warffum veld toegekend.

A.2.2 Witterdiep

Er zijn boven het Witterdiep voorkomen twee bevingen geregistreerd in 2008 (Figuur A-7).



Figuur A-7 Bevingen met magnitude en datum in en rondom het Witterdiep veld vanaf begin productie tot en met 1 maart 2021. De bevingen die aan Witterdiep zijn toegekend zijn in rood weergegeven, andere bevingen in grijs.

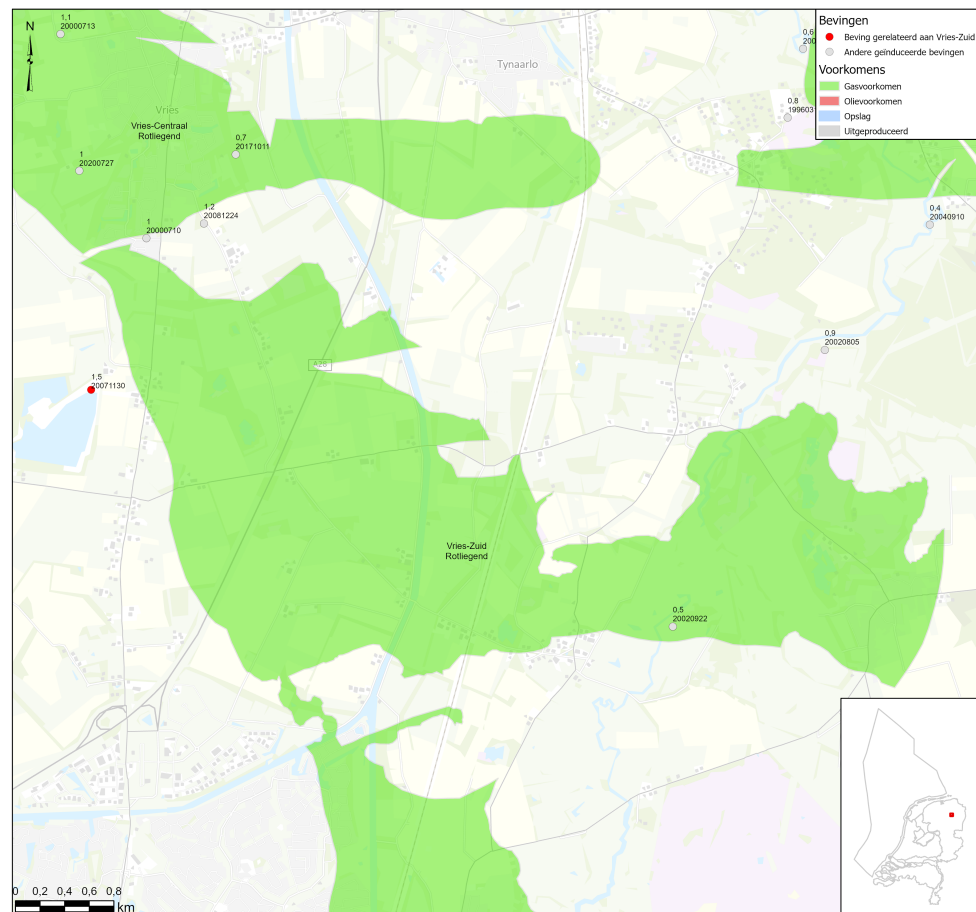
In de 2012 rapportage zijn deze bevingen niet aan Witterdiep toegekend en krijgt het veld een kans op beven van 42%. Het is een mogelijkheid dat deze bevingen door Eleveld zijn veroorzaakt gezien de geringe afstand (ongeveer 1 km) tot grens van het Eleveld veld. Echter één beving ligt boven het Witterdiep voorkomen en de andere beving ligt dicht bij Witterdiep dan bij Eleveld. Aangezien Witterdiep in productie was tijdens de bevingen is er gekozen om deze bevingen aan Witterdiep toe te kennen. Hiermee volgt deze studie TNO (2015) en NAM (2016) waar deze

⁶ <https://www.nam.nl/gas-en-oliewinning/aardgas-uit-kleine-velden/winnings-plannen-kleine-velden.html>
"Seismisch risico voor "kleine velden" (onshore gasvelden, exclusief het Groningen gasveld en ondergrondse gasopslag Norg)

bevingen ook aan het Witterdiep voorkomen zijn toegekend. De ondergrens van de relatieve drukval (DP/P_{ini}) waar een eerste beving heeft plaatsgevonden in de dataset wordt bepaald door het Witterdiep veld met een waarde van 0,23. (Tabel 5-1).

A.2.3 Vries Zuid

Er is boven het Vries-Zuid veld één beving geregistreerd in 2007, zie Figuur A-8 hieronder. In de 2012 rapportage is deze beving niet aan het Vries-Zuid voorkomen toegekend, maar aan het Vries-Centraal voorkomen. In deze actualisatie wordt deze beving toegekend aan het Vries-Zuid voorkomen, aangezien het voorkomen het dichtstbij de beving ligt en het veld in productie was ten tijde van deze productie. In TNO (2015) en NAM (2016) is deze beving ook aan het Vries-Zuid voorkomen toegekend.



Figuur A-8 Bevingen met magnitude en datum in en rondom het Vries Zuid en Vries Noord veld vanaf begin productie tot en met 1 maart 2021. De beving die aan Vries Zuid is toegekend is in rood weergegeven, andere bevingen in grijs.

B Indicatorparameters alle voorkomens

De B-waarde is in deze actualisatie opnieuw berekend (zie Hoofdstuk 3) en kan daarom afwijken van de B-waarde uit voorgaande studies en winningsplannen. Daarnaast kan de invoerwaarden die de B-waarde bepalen veranderen of verschillen met andere studies. Dit kan het gevolg zijn van herinterpretatie of interpretatie van respectievelijk bestaande of nieuwe data (seismiek, boringen).

De E-waarde van deze actualisatie kan afwijken van voorgaande studies en winningsplannen door gebruik van iets afwijkend E-waarde door toepassing van een grotere en vernieuwde dataset (zie Hoofdstuk 3).

Een voorkomen krijgt een kans op beven als alle drie de indicatorparameters groter of gelijk aan de grenswaarde zijn. Een hogere indicatorparameter waarde geeft geen grotere kans op beven. Tabel B-1 geeft daarom voor alle voorkomens niet de absolute waarde maar alléén of de indicatorparameters (DP/P_{ini} , E-waarde en B-waarde) boven of gelijk aan (+) de grenswaarde of onder (-) de grenswaarde zijn.

Tabel B-1 Per voorkomen wordt aangegeven of de indicatorparameters (DP/P_{ini} , E-waarde en B-waarde) boven of gelijk aan (+) of onder (-) de grenswaarde ligt en de bijbehorende kans op beven gegeven.

Voorkomens	DP/P_{ini}	E-waarde	B-waarde	Kans op beven
Ameland-Oost Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Ameland-Westgat Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Anjum Rotliegend	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Annerveen Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Appelscha Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Assen Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Barendrecht De Lier Sand-Shale	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Barendrecht-Ziedewij Noord Bunter	+	+	+	Kans op beven
Barendrecht-Ziedewij Zuid Bunter	+	+	+	Kans op beven
Bedum Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Bergen Bunter	+	+	+	Kans op beven
Bergen Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Bergermeer Rotliegend (voor opslagfase)	+	+	+	Bevend voorkomen
Berkel Zandsteen	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Berkel De Lier Sand-Shale	-	-	+	Verwaarloosbare kans
Blesdijke Zechstein Carbonaat	+	+	+	Kans op beven
Blesdijke-Oost Zechstein Carbonaat	+	+	-	Verwaarloosbare kans

Blija-Ferwerderadeel Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Blija-Zuid Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Blija-Zuidoost Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Blijham-Oost Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Blijham-West Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Boekel Bunter	+	+	+	Kans op beven
Boerakker Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Botlek Bunter	+	+	+	Kans op beven
Bozum Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Brakel Bunter	+	+	+	Kans op beven
Brakel-Zuid Bunter	+	+	+	Kans op beven
Burum-Oost Rotliegend	-	+	+	Verwaarloosbare kans
Castricum-Zee RBM	+	+	+	Kans op beven
Coevorden Limburg	+	+	+	Kans op beven
Coevorden Muschelkalk	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Coevorden Zechstein 2 Carbonaat	+	+	+	Bevend voorkomen
Collendoorn Limburg	+	+	+	Kans op beven
Collendoornerveen Zechstein 2 Carbonaat	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Dalen Limburg	+	+	+	Kans op beven
Dalen Zechstein 2 Carbonaat	+	+	+	Bevend voorkomen
De Blesse Zechstein 2 Carbonaat	+	-	-	Verwaarloosbare kans
De Blesse/Blesdijke Vlieland	+	-	+	Verwaarloosbare kans
De Hoeve Rotliegend	+	+	-	Verwaarloosbare kans
De Hoeve Zechstein Carbonaat	+	+	-	Verwaarloosbare kans
De Klem RNUB	+	+	-	Verwaarloosbare kans
De Lier Holland Greensand	+	-	-	Verwaarloosbare kans
De Lutte Zechstein 2 Carbonaat	+	+	+	Kans op beven
De Lutte Zechstein 3 Carbonaat	+	+	-	Verwaarloosbare kans
De Wijk Basal Dongen Tuffite/Chalk	-	-	-	Verwaarloosbare kans
De Wijk Lower Cretaceous/Triassic	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Den Velde Limburg	+	+	+	Kans op beven
Den Velde Zechstein 2 Carbonaat	+	+	+	Kans op beven
Diever Rotliegend	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Donkerbroek-Main Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Donkerbroek-West Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Een Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Eernewoude Rotliegend	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Eesveen Rotliegend	+	+	+	Kans op beven

Eleveld Noord-Noord Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Eleveld Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Emmen Zechstein 2 Carbonaat	+	+	+	Bevend voorkomen
Emmen-Nieuw Amsterdam Zechstein 2 Carbonaat	+	+	+	Bevend voorkomen
Engwierum Rotliegend	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Ezumazijl Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Faan Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Feerwerd Rotliegend	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Gaag Bunter	+	+	+	Kans op beven
Gasselternijveen Zechstein 2 Carbonaat	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Geesbrug Limburg	+	+	+	Kans op beven
Geesbrug Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Geestvaartpolder Bunter	+	+	+	Kans op beven
Grijpskerk Rotliegend (voor opslagfase)	+	+	+	Kans op beven
Groet Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Groet-Oost Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Grolloo De Lutte Formatie	+	+	+	Kans op beven
Groningen Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Grootegast Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Grouw Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Hardenberg Limburg	+	+	+	Kans op beven
Hardenberg-Oost Limburg	+	+	+	Kans op beven
Harkema Rotliegend	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Harlingen Ommelanden Chalk	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Harlingen Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Heinenoord Bunter	+	+	+	Kans op beven
Hekelingen Bunter	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Hemrik (Akkum-11) Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Hoogenweg Zechstein 2 Carbonaat	-	+	+	Verwaarloosbare kans
Houwerzijl Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Kiel-Windeweer Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Kollum Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Kollumerland Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Kollum-Noord Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Kommerzijl Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Langezwaag-1 Zechstein Carbonaat	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Langezwaag-1-2 Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans

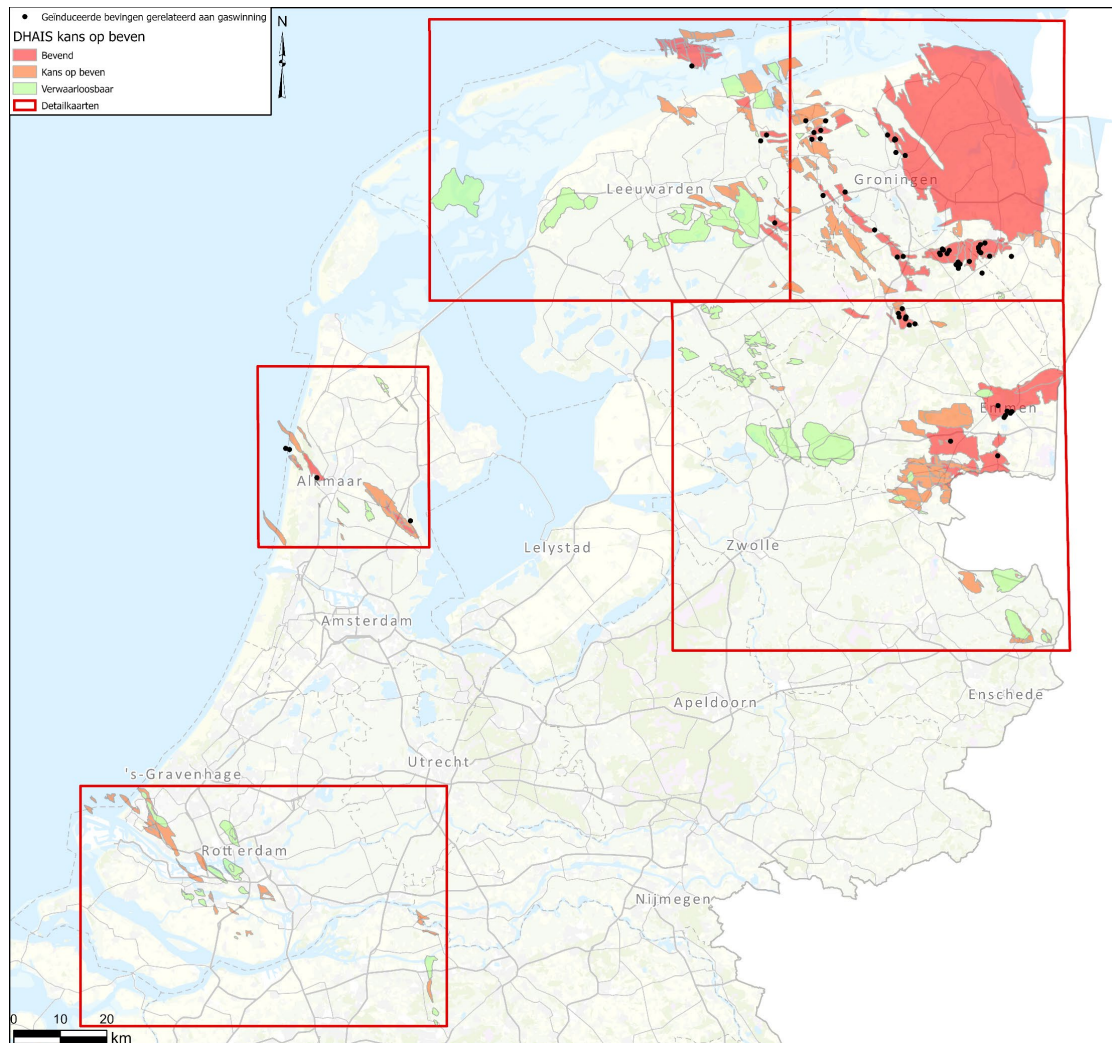
Langezwaag-2 (Zuid) Zechstein Carbonaat	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Langezwaag-3 (West) Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Langezwaag-3 (West) Zechstein Carbonaat	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Lauersoog-Centraal Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Lauersoog-Oost Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Lauersoog-West Rotliegend	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Leens Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Leeuwarden Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Leeuwarden-101 Rotliegend	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Loon op Zand Bunter	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Loon op Zand-Zuid Bunter	+	-	+	Verwaarloosbare kans
Maasdijk Bunter	+	+	+	Kans op beven
Marum Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Metslawier Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Metslawier-Zuid Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Middelburen Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Middelie Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Middelie Zechstein 3 Carbonaat	+	+	+	Kans op beven
Middenmeer Rotliegend	-	+	+	Verwaarloosbare kans
Moddergat Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Molenpolder Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Monster Bunter	+	+	+	Kans op beven
Munnekezijl-Oost Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Munnekezijl-West Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
N07-A Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Nes Rotliegend	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Nijega Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Nijensleek Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Noorderdam RBBM	+	+	+	Kans op beven
Noordwolde Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Norg Rotliegend (voor opslagfase)	+	+	+	Kans op beven
Norg-Zuid Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Oldelamer Zechstein 2 Carbonaat	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Oldenzaal Limburg	+	+	+	Kans op beven
Oosterhesselen Limburg	+	+	+	Kans op beven
Oosterhesselen Zechstein 2 Carbonaat	+	+	+	Kans op beven
Oostrum Rotliegend	+	+	+	Kans op beven

Opeinde Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Opeinde-Zuid Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Opende-Oost Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Oud-Beijerland Noord Bunter	+	+	+	Kans op beven
Oud-Beijerland Zuid RBBM	+	+	+	Kans op beven
Oud-Beijerland Zuid RNUB	+	+	+	Kans op beven
Oude Pekela Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Oudeland Bunter	+	+	+	Kans op beven
Oudendijk Bunter	+	+	+	Kans op beven
Pasop Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Pernis De Lier Sand-Shale	+	-	+	Verwaarloosbare kans
Pernis Holland Greensand	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Pernis-West Bunter	+	+	+	Kans op beven
Pieterzijl-Oost Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Q16-Maas Bunter	+	+	+	Kans op beven
Q16-Maasmond (Charlie-North) Bunter	+	+	+	Kans op beven
Rauwerd Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Reedijk Bunter	+	+	+	Kans op beven
Ried Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Roden Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Rossum-Weerselo Limburg	+	+	+	Kans op beven
Rossum-Weerselo Zechstein Carbonaat	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Roswinkel RBM	+	+	+	Bevend voorkomen
Rotterdam De Lier Sand-shale	+	-	+	Verwaarloosbare kans
Rotterdam Holland Greensand	+	-	+	Verwaarloosbare kans
Rotterdam IJsselmonde Sandstone	-	-	-	Verwaarloosbare kans
Rustenburg Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Saaksum-Oost Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Saaksum-West Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Schermer Platten	+	+	+	Kans op beven
Schermer Rotliegend	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Schoonebeek Gas Zechstein 2 Carbonaat	+	+	+	Bevend voorkomen
Sebaldeburen Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
's-Gravenzande Bunter	+	+	+	Kans op beven
Sleen RBM	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Slootdorp Zechstein Carbonaat	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Sonnega Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Spijkenisse-Oost Bunter	+	+	-	Verwaarloosbare kans

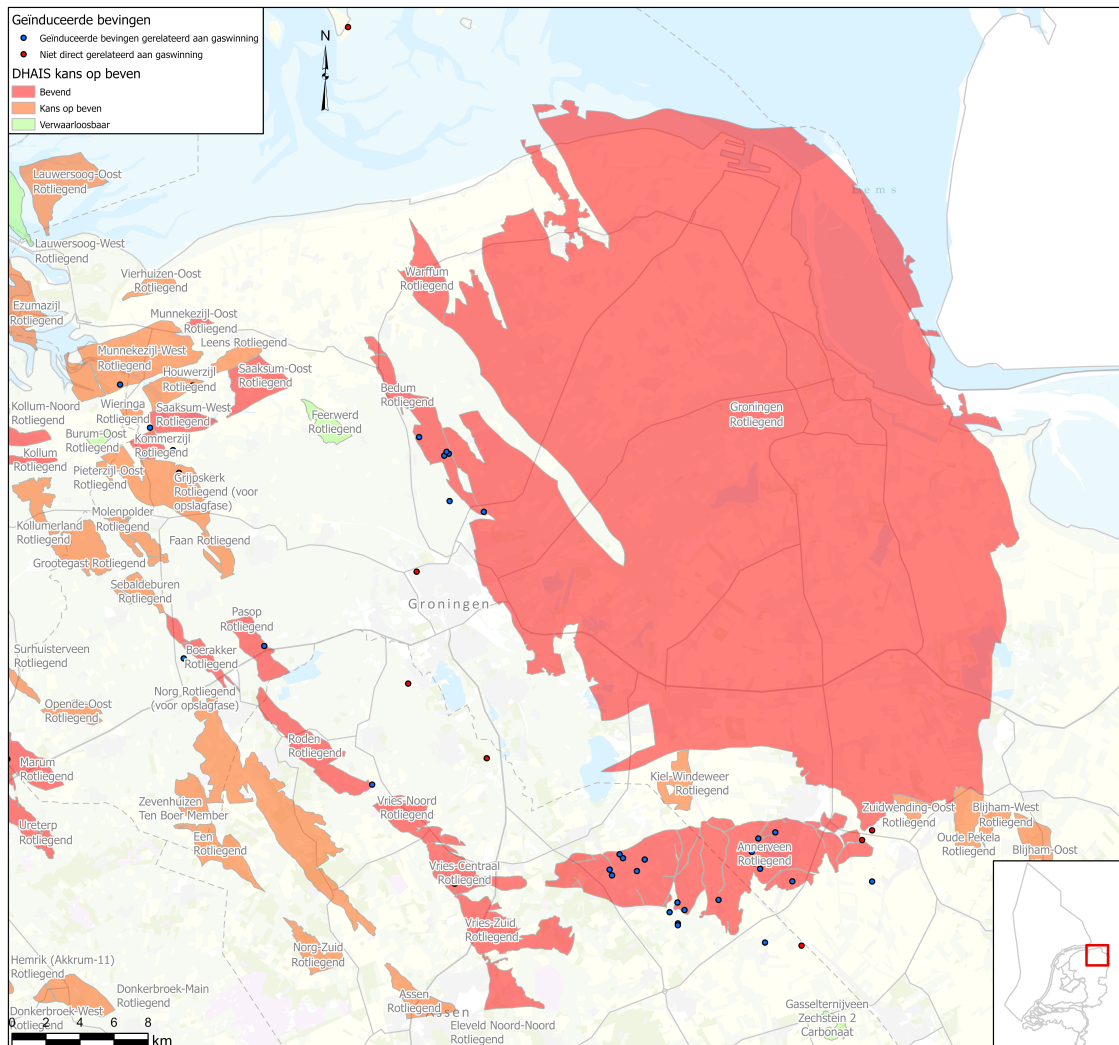
Spijkenisse-West Bunter	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Sprang Bunter	+	+	+	Kans op beven
Starnmeer Platten Dolomiet	+	+	+	Kans op beven
Suawoude-Noord Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Suawoude-Zuid Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Surhuisterveen Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Tietjerksteradeel Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Tubbergen Limburg	+	+	+	Kans op beven
Tubbergen Zechstein 2 Carbonaat	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Tubbergen-Mander Zechstein Carbonaat	+	+	+	Kans op beven
Ureterp Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Vierhuizen-Oost Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Vinkega Rotliegend	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Vinkega Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Vries-Centraal Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Vries-Noord Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Vries-Zuid Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Waalwijk-Noord Bunter	+	-	+	Verwaarloosbare kans
Wanneperveen Basal Dongen Tuffite	-	-	-	Verwaarloosbare kans
Wanneperveen Rogenstein/Main Claystone	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Wanneperveen-Oost Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Wanneperveen-West Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Warffum Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Warga Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Wartena Vlieland	+	-	-	Verwaarloosbare kans
Westbeemster Rotliegend	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Weststellingwerf Zechstein 2 Carbonaat	+	+	-	Verwaarloosbare kans
Wieringa Rotliegend	+	+	+	Kans op beven
Wijk en Aalburg Bunter	+	+	+	Kans op beven
Witterdiep Rotliegend	+	+	+	Bevend voorkomen
Zevenhuizen Ten Boer Member	+	+	+	Kans op beven
Zuid-Schermer Platten Dolomiet	+	+	+	Kans op beven
Zuidwal Vlieland	+	-	+	Verwaarloosbare kans
Zuidwending-Oost Rotliegend	+	+	+	Kans op beven

B.1 Overzichtsfiguren kans op beven

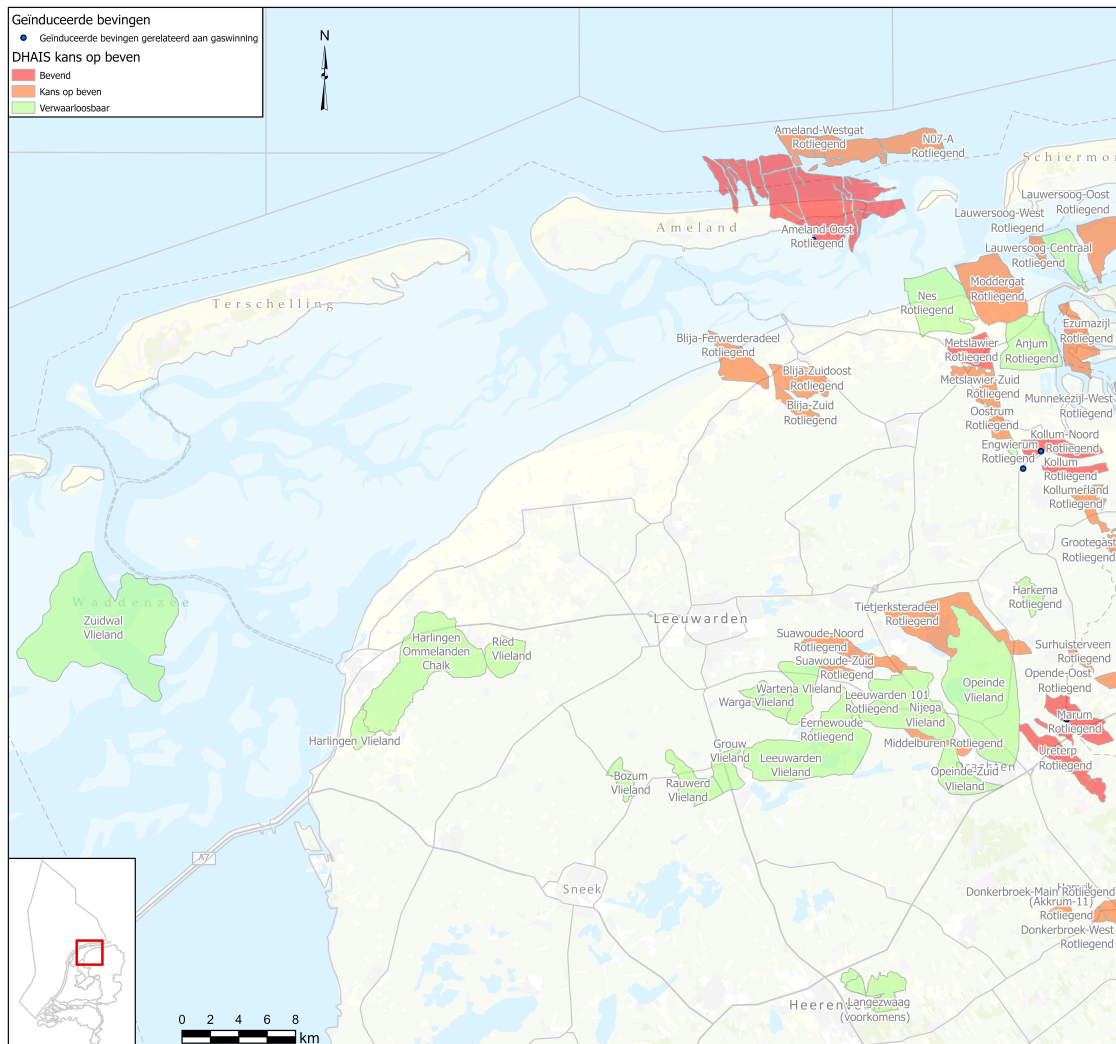
In deze paragraaf zijn detailkaarten per regio van alle voorkomens met hun bijbehorende kans op beven weergegeven.



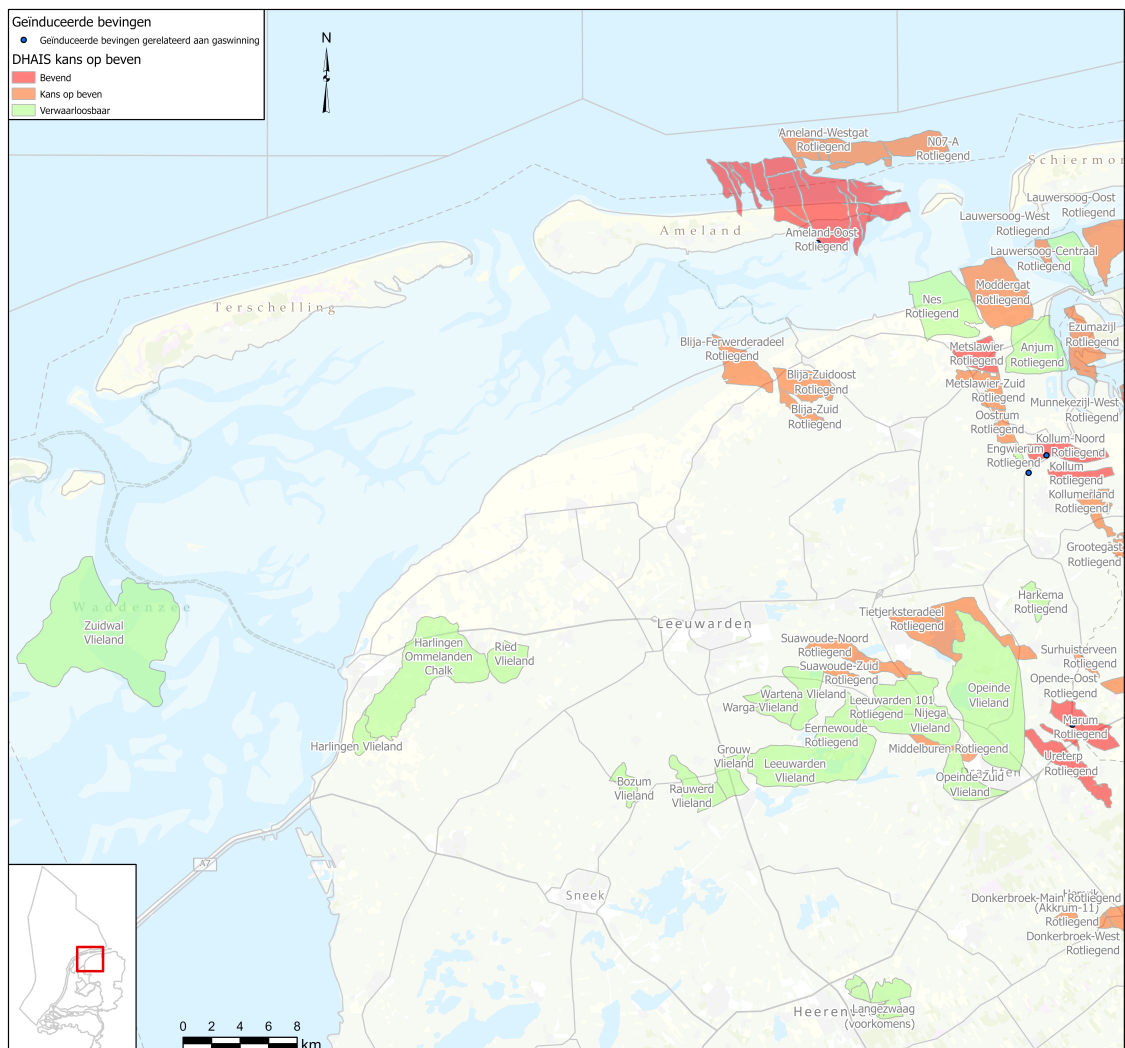
Figuur B-1 Overzichtsfiguur met voorkomens meegenomen in deze actualisatie met bijbehorende kans op beven (zie Tabel B-1 voor overzicht alle voorkomens). Bevende voorkomens zijn weergegeven in rood, voorkomens met een kans op beven in oranje en voorkomens met een verwaarloosbare kans op beven in groen. Geïnduceerde aardbevingen uit de catalogus van KNMI gerelateerd aan gaswinning (behalve Groningen gasveld), periode 10 mei 2010 tot en met 1 maart 2021, zijn weergegeven in zwart. Rode omlijnde gebieden zijn uitvergrotingen en worden hieronder weergegeven.



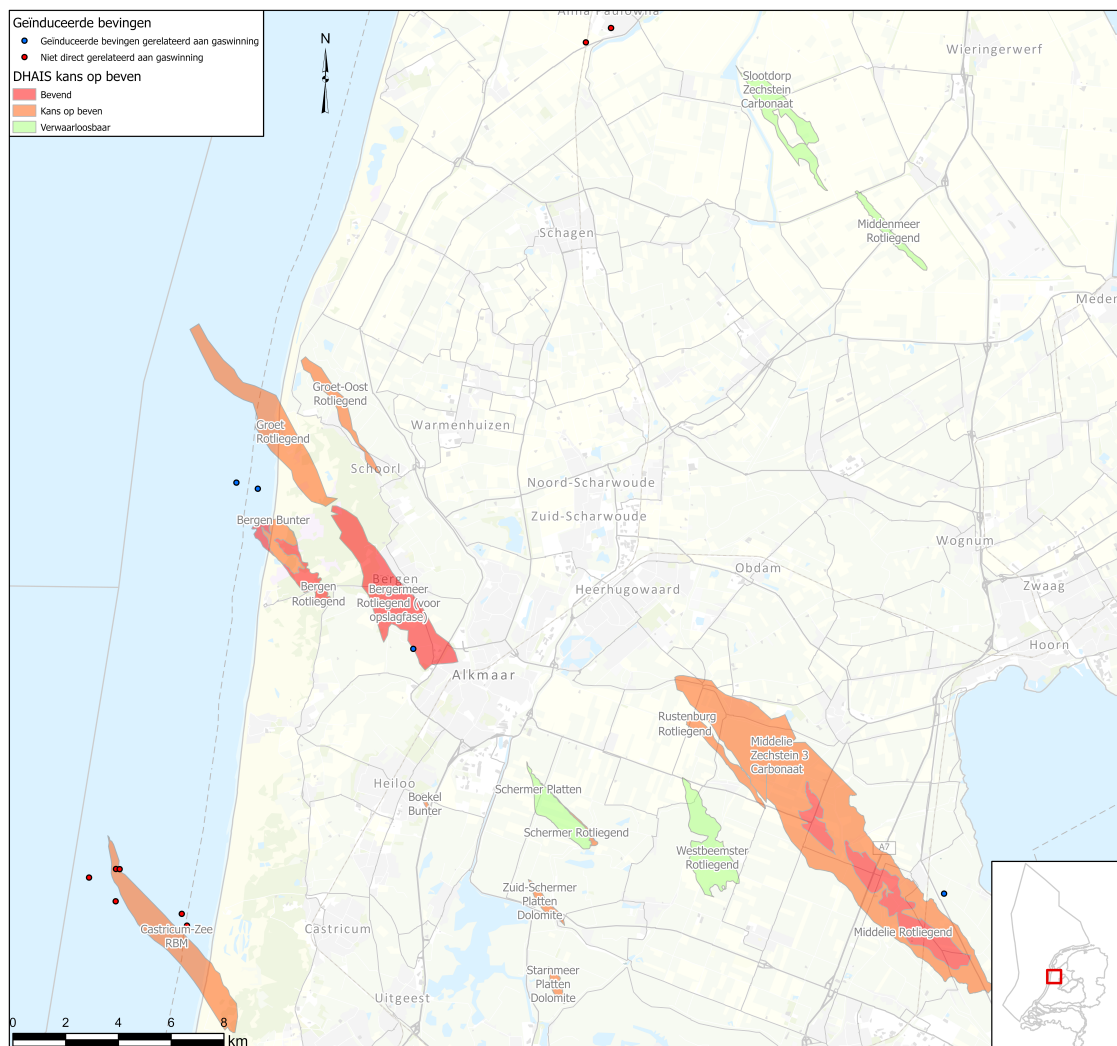
Figuur B-2 Uitvergroting van Figuur B-1. Bevende voorkomens zijn weergegeven in rood, voorkomens met een kans op beven in oranje en voorkomens met een verwaarloosbare kans op beven in groen. Geïnduceerde aardbevingen uit de catalogus van KNMI gerelateerd aan gaswinning (behalve Groningen gasveld), periode 10 mei 2010 tot en met 1 maart 2021, zijn weergegeven in blauw. Bevingen niet direct gerelateerd aan gaswinning in rood.



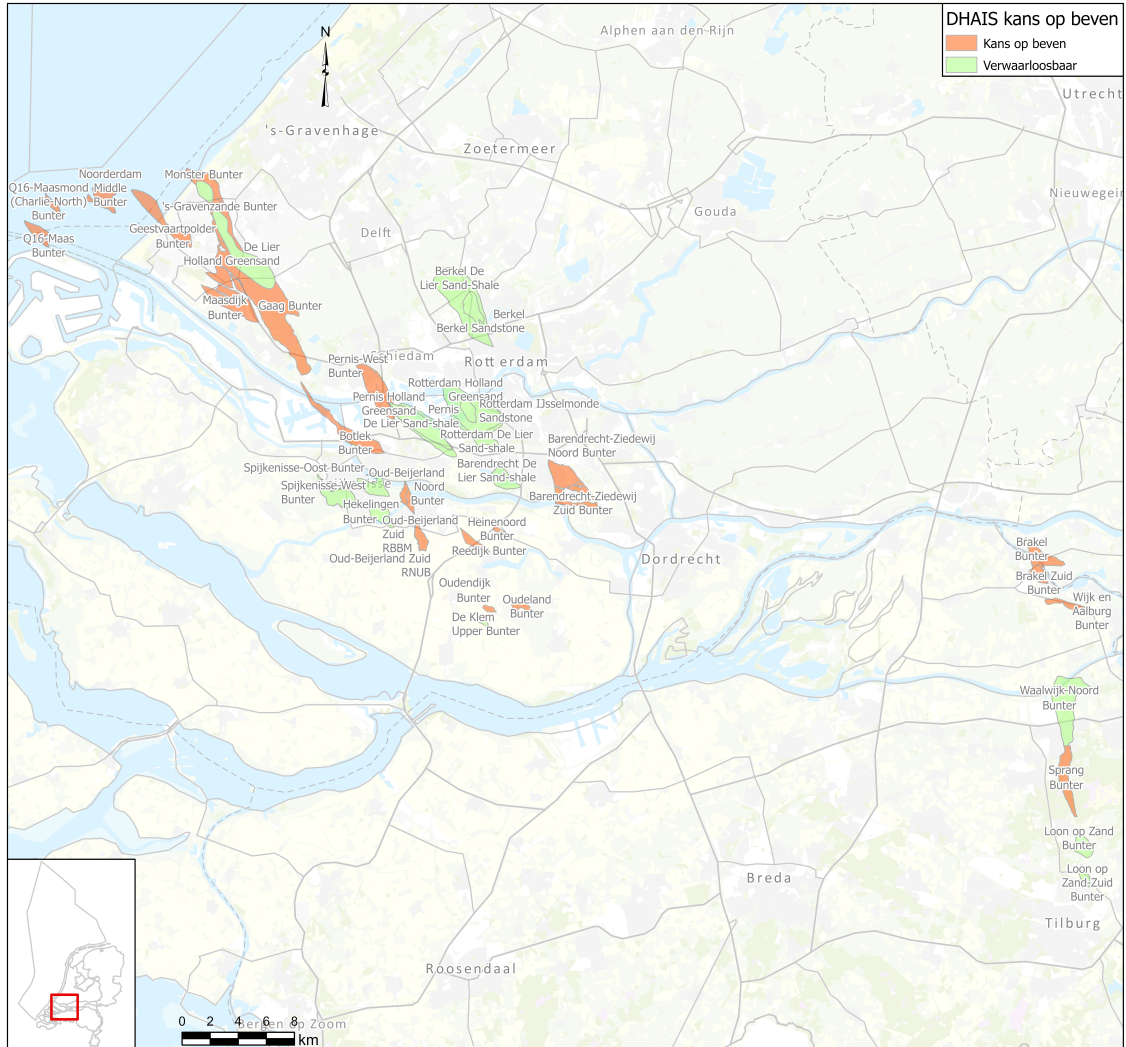
Figuur B-3 Uitvergroting van Figuur B-1. Bevende voorkomens zijn weergegeven in rood, voorkomens met een kans op beven in oranje en voorkomens met een verwaarloosbare kans op beven in groen. Geïnduceerde aardbevingen uit de catalogus van KNMI gerelateerd aan gaswinning, periode 10 mei 2010 tot en met 1 maart 2021, zijn weergegeven in blauw.



Figuur B-4 Uitvergroting van Figuur B-1. Bevende voorkomens zijn weergegeven in rood, voorkomens met een kans op beven in oranje en voorkomens met een verwaarloosbare kans op beven in groen. Geïnduceerde aardbevingen uit de catalogus van KNMI gerelateerd aan gaswinning, periode 10 mei 2010 tot en met 1 maart 2021, zijn weergegeven in blauw.



Figuur B-5 Uitvergroting van Figuur B-1. Bevende voorkomens zijn weergegeven in rood, voorkomens met een kans op beven in oranje en voorkomens met een verwaarloosbare kans op beven in groen. Geïnduceerde aardbevingen uit de catalogus van KNMI gerelateerd aan gaswinning, periode 10 mei 2010 tot en met 1 maart 2021, zijn weergegeven in blauw. Bevingen niet direct gerelateerd aan gaswinning in rood.



Figuur B-6 Uitvergroting van Figuur B-1. Bevende voorkomens zijn weergegeven in rood, voorkomens met een kans op beven in oranje en voorkomens met een verwaarloosbare kans op beven in groen.

C Beschrijving statistiek methode DHAIS

Deze bijlage geeft een uitgebreide beschrijving van de achterliggende statistische analyse die gebruikt is in de DHAIS-methodiek om zowel de grenswaarden als de kans op beven te berekenen. De methodiek is niet veranderd ten opzichte van voorgaande studies (TNO, 2004 & 2012; Van Eijs, 2006). Echter in deze voorgaande studies is de uitleg van de methodiek minder uitgebreid beschreven. De publieke belangstelling voor de DHAIS methodiek is toegenomen nadat SodM in 2016 de DHAIS methodiek heeft opgenomen in de SRA leidraad. Er is daarom gekozen om in deze actualisatie de DHAIS statistiek uitgebreider te beschrijven.

Bepaling indicatorparameters

De DHAIS-methodologie gebruikt de beschikbare data van olie- en gasvoorkomens om op basis van bepaalde indicatorparameters een kans op beven te geven. Een eerste vereiste is dat deze indicatorparameters op de één of andere manier gecorreleerd moeten zijn met de seismiciteit. Met andere woorden, er moet een verband zijn waarbij na het overschrijden van een bepaalde grenswaarde voorkomens seismiciteit vertonen en daaronder niet. Dit is visueel te zien in de grafieken uit hoofdstuk 5 (bijv. Figuur 5-1, Figuur 5-2, en Figuur 5-3) en Figuur C-1. De parameter op de horizontale as laat een grenswaarde zien waarboven seismiciteit zichtbaar is en waaronder er geen voorkomens met seismiciteit te zien zijn. Een uitgebreidere uitleg over de keuzes waarop de indicatorparameters zijn geselecteerd is te vinden in Hoofdstuk 2 en voorgaande DHAIS-studies.

Methodiek statistische analyse

De eerste stap in de DHAIS-methodiek is het bepalen van de grenswaarde voor elk van de gekozen indicatorparameters, gegeven de beschikbare voorkomen gegevens en bevingen. Dit kan worden gedaan door aan te nemen dat er een seismische spreidingsbreedte bestaat, waarbij de ondergrens een waarde is die de bevende en niet-bevende voorkomens scheidt. Dit is een geschikte toepassing van de stelling van Bayes, welke een manier biedt om de waarschijnlijkheid van deze ondergrenswaarde te berekenen, gegeven voorafgaande informatie over alle voorkomens. Verwante problemen over het schatten van onbekende spreidingsbreedtes zijn benaderd door Feller (1957, *Sectie IX.3, Voorbeeld (e)*) en Jaynes (2003, *Secties 6.20-22*) die een meer volledige Bayesiaanse oplossing beschrijft waarop de DHAIS-methodiek is gebaseerd.

Nadat deze grenswaarden voor elk van de indicatorparameters zijn berekend, is de volgende vraag hoe de kans kan worden ingeschat dat een beving zal optreden in een voorheen niet-bevend voorkomen met parameters die boven de grenswaarden vallen. Daartoe wordt de regel van Laplace toegepast op de data, die relevant is in situaties waarin het resultaat binair is (b.v. waar of niet waar, bevend of niet-bevend; Jaynes, 2003). De onderstaande secties gaan meer in detail in op deze berekeningen.

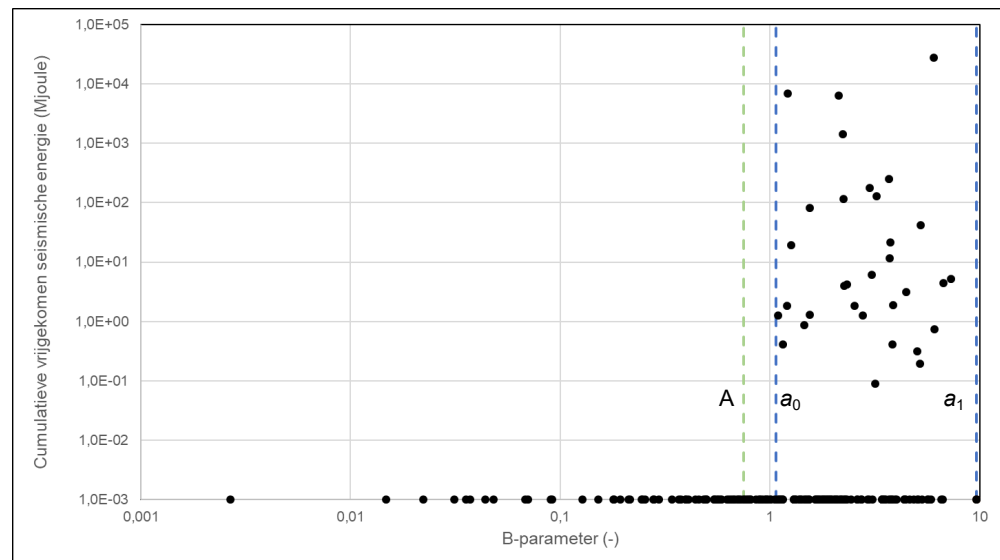
In het kort zijn de stappen in de statistische analyse als volgt:

1. Bereken het gemiddelde en de standaardafwijking van de grenswaarde voor alle indicatorparameters met behulp van de stelling van Bayes.

2. Gebruik de regel van Laplace om de kansen en standaardafwijkingen te berekenen van de (nog) niet bevende voorkomens waarvan de parameters boven de grenswaarden vallen. De belangrijkste stap voor deze berekening is het optellen van het aantal bevende en niet-bevende voorkomens boven de grenswaarden.

C.1 Berekening van de grenswaarden

Het bepalen van de grenswaarden kan het best worden uitgelegd aan de hand van een figuur met parameterdata uitgezet tegen de cumulatieve vrijgekomen seismische energie (zie Figuur C-1). De variabele a_1 wordt gebruikt om de maximale parameterwaarde aan te geven die in de data is waargenomen, terwijl de variabele a_0 wordt gebruikt om de minimale parameterwaarde in de data aan te geven die hebben gebeefd (zie de blauwe stippellijnen in Figuur C-1). Tussen deze twee waarden hebben sommige voorkomens gebeefd, terwijl bij waarden onder a_0 geen voorkomens hebben gebeefd. Daarom wordt aangenomen dat er een grenswaarde bestaat A (in de grafiek weergegeven als een groene lijn) waaronder geen beving zou optreden.



Figuur C-1 Plot met de B-waarden van de voorkomens afgezet tegen de cumulatieve vrijgekomen seismische energie. De twee blauwe gestippelde lijnen geven de spreidingsbreedte a_0 - a_1 aan. De groene lijn geeft de grenswaarde A aan waaronder geen beving zal optreden.

Anders gezegd, de hypothese kan als volgt worden geformuleerd: gegeven de data over de bestaande bevende voorkomens, wat is de verwachte waarde van deze grenswaarde A en wat is de onzekerheid daaromheen? Dit kan worden berekend met behulp van de stelling van Bayes, in de volgende (standaardformule) vergelijking is weergegeven (Jaynes, 2003, *Sectie 4.1*):

$$p(A|data) = \frac{p(data|A) \cdot p(A)}{p(data)} \quad [1]$$

Het linkerdeel van de vergelijking wordt de *a posteriori* kans genoemd, omdat het de bijgewerkte waarschijnlijkheid is van onze eerste schatting, $p(A)$, die de *a priori*

kans wordt genoemd. Aangezien geen informatie bekend is over de a priori waarschijnlijkheid, behalve dat deze tussen 0 en a_0 valt, wordt aangenomen dat deze de uniforme waarschijnlijkheidsverdeling aanneemt. Omdat dit een continue verdeling vertegenwoordigt, wordt de notatie $\pi(A)$ gebruikt in plaats van $p(A)$:

$$p(A) \rightarrow \pi(A)$$

De noemer, die de waarschijnlijkheid van de totale dataset beschrijft en als normaliseringsconstante dient, kan met behulp van de *wet van de totale kans* in relatie tot de grenswaarde A als volgt worden herschreven:

$$p(\text{data}) = \int_0^{a_0} p(\text{data}|A) \cdot \pi(A) dA \quad [2]$$

Het bereik van de integraal wordt bepaald door de beginrandvoorwaarde dat $0 \leq A \leq a_0$. Substitueer deze in [1] en je krijgt de bijgewerkte Bayesiaanse vergelijking:

$$p(A|\text{data}) = \frac{p(\text{data}|A) \cdot \pi(A)}{\int_0^{a_0} p(\text{data}|A) \cdot \pi(A) dA} \quad [3]$$

De belangrijkste componenten van deze bijgewerkte vergelijking ([3]) zijn de waarschijnlijkheid (de zogenaamde "*likelihood*" in het Engels), $p(\text{data}|A)$, en de a priori kansverdeling, $\pi(A)$. De enige informatie over de a priori kans is dat deze tussen $0 \leq A \leq a_0$ ligt, zodat een uniforme verdeling wordt genomen, waarvan de kansdichtheidsfunctie hier wordt gegeven door:

$$\pi(A) = \begin{cases} \frac{1}{c-b} & \text{voor } b \leq A \leq c \\ 0 & \text{elders} \end{cases} = \frac{1}{a_0 - 0} = \frac{1}{a_0}$$

$$\pi(A) = a_0^{-1} \quad [4]$$

Voor de eerste schatting van de waarschijnlijkheid, $p(\text{data}|A)$, wordt op dezelfde manier de kansdichtheidsfunctie van de uniforme verdeling gebruikt. De waarschijnlijkheid is evenredig met de kans dat m bevende voorkomens binnen de seismische spreidingsbreedte ($a_1 - A$) vallen, zodat het product wordt genomen van de individuele waarschijnlijkheden voor de m bevende voorkomens:

$$p(\text{datapunt}|A) \approx \begin{cases} \frac{1}{c-b} & \text{voor } b \leq \text{datapunt} \leq c \\ 0 & \text{elders} \end{cases} = \frac{1}{a_1 - A}$$

$$p(\text{data}|A) \approx \frac{1}{a_1 - A} \cdot \frac{1}{a_1 - A} \cdot \dots (m \text{ keer}) = \frac{1}{(a_1 - A)^m} = (a_1 - A)^{-m}$$

$$p(\text{data}|A) \approx (a_1 - A)^{-m} \quad [5]$$

Door de a priori kans ([4]) en de waarschijnlijkheid ([5]) in de Bayesiaanse vergelijking ([3]) te substitueren, de integratie in de noemer uit te voeren, en

vervolgens de vergelijking te vereenvoudigen volgt de posterior kansverdeling $p(A|data)$:

$$\begin{aligned}
 p(A|data) &= \frac{(a_1 - A)^{-m} \cdot a_0^{-1}}{\int_0^{a_0} ((a_1 - A)^{-m} \cdot a_0^{-1}) dA} \\
 \int_0^{a_0} [(a_1 - A)^{-m} \cdot a_0^{-1}] dA &= \frac{(a_1 - A)^{1-m}}{a_0 \cdot (m-1)} \Big|_0^{a_0} = \frac{(a_1 - a_0)^{1-m} - a_1^{1-m}}{a_0 \cdot (m-1)} \\
 p(A|data) &= \frac{(a_1 - A)^{-m} \cdot a_0^{-1}}{\left(\frac{(a_1 - a_0)^{1-m} - a_1^{1-m}}{a_0 \cdot (m-1)} \right)} \\
 p(A|data) &= \frac{(m-1) \cdot (a_1 - A)^{-m}}{(a_1 - a_0)^{1-m} - a_1^{1-m}} \quad [6]
 \end{aligned}$$

Formule [6] geeft de posterior kansverdeling voor de seismische spreidingsbreedte $(a_1 - A)$. De volgende stap is de berekening van het gemiddelde en de standaardafwijking, die kunnen worden gevonden door gebruik te maken van het eerste en tweede moment van deze spreidingsbreedte. Per definitie is bij een kansverdeling het eerste moment gelijk aan het gemiddelde, of de verwachte waarde, terwijl het tweede centrale moment kan worden gebruikt om de variantie, of het kwadraat van de standaardafwijking, te berekenen. De volgende vergelijkingen geven het standaardformaat voor de berekening van het n^e moment (b.v. eerste moment, tweede moment, enz.), alsmede de vervangende vergelijking voor de DHAIS-methodiek.

$$\langle x^n \rangle = \int p(x) \cdot x^n dx \quad [7]$$

$$\begin{aligned}
 G(n) = \langle (a_1 - A)^n \rangle &= \int_0^{a_0} p(A|data) \cdot (a_1 - A)^n dA \\
 &= \int_0^{a_0} \frac{(m-1) \cdot (a_1 - A)^{-m}}{(a_1 - a_0)^{1-m} - a_1^{1-m}} \cdot (a_1 - A)^n dA \\
 &= \int_0^{a_0} \frac{(m-1) \cdot (a_1 - A)^{-m+n}}{(a_1 - a_0)^{1-m} - a_1^{1-m}} dA \\
 &= \frac{(m-1) \cdot (a_1 - A)^{-m+n+1}}{(m-n-1) [(a_1 - a_0)^{1-m} - a_1^{1-m}]} \Big|_0^{a_0} \\
 G(n) = \langle (a_1 - A)^n \rangle &= \frac{(m-1) \cdot [(a_1 - a_0)^{-m+n+1} - a_1^{-m+n+1}]}{(m-n-1) \cdot [(a_1 - a_0)^{1-m} - a_1^{1-m}]} \quad [8]
 \end{aligned}$$

Het is belangrijk op te merken dat [8] niet gedefinieerd is voor $m = n + 1$, hoewel dit voor dit geval irrelevant is aangezien $m \gg n$. De standaardafwijking σ van een gegevensverzameling x met het gemiddelde μ van $\langle x \rangle$ wordt gedefinieerd door de relatie (Jaynes, 2003, Sectie 6.9):

$$\sigma^2 = Var(x) = \langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2 \quad [9]$$

Het gemiddelde en de standaardafwijking van de seismische spreidingsbreedte kunnen dus worden berekend met [8] en [9]:

$$\mu = G(1) = (a_1 - A) \quad [10]$$

$$\sigma = \sqrt{G(2) - G(1)^2} \quad [11]$$

De grenswaarde kan worden gevonden door [10] op te lossen voor de parameter A ([12] en [13]).

$$A = a_1 - G(1)$$

$$A = a_1 - \frac{(m-1) \cdot [(a_1 - a_0)^{-m+2} - a_1^{-m+2}]}{(m-2) \cdot [(a_1 - a_0)^{1-m} - a_1^{1-m}]} \quad [12]$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(m-1) \cdot [(a_1 - a_0)^{-m+3} - a_1^{-m+3}]}{(m-3) \cdot [(a_1 - a_0)^{1-m} - a_1^{1-m}]} - \left(\frac{(m-1) \cdot [(a_1 - a_0)^{-m+2} - a_1^{-m+2}]}{(m-2) \cdot [(a_1 - a_0)^{1-m} - a_1^{1-m}]} \right)^2} \quad [13]$$

C.2 Regel van Laplace

Nadat de grenswaarden voor de indicatorparameters zijn berekend, is de vraag “Wat is de kans dat een voorkomen beeft als zij boven die grenswaarden valt?” Dit kan worden benaderd door elk voorkomen in het verleden te beschouwen als een afzonderlijk experiment, waarbij het aantal voorkomens dat boven en onder die grenswaarden valt, kan worden geteld. Deze voorkomens kunnen worden beschouwd als een reeks Booleaanse experimenten, hetgeen betekent dat elk experiment een van de twee mogelijke uitkomsten kan hebben (in het algemeen *waar/onwaar* of *ja/nee*). In deze specifieke situatie is het experiment of voorkomens die boven de grenswaarden voor alle indicatorparameters vallen gebeefd hebben (*waar*) of niet gebeefd hebben (*onwaar*). In een dergelijke situatie kan de regel van Laplace, of “rule of succession”, worden gebruikt om de waarschijnlijkheid te bepalen dat een voorkomen gaat beven.

Meer formeel gaat deze regel uit van de situatie dat er in totaal N Booleaanse experimenten zijn. Hiervan zijn R experimenten waar, wat betekent dat $N-R$ experimenten onwaar zijn, en verder is er geen informatie over de experimenten bekend. In deze eenvoudige opzet is de kans en standaardafwijking dat het volgende experiment waar is, het volgende:

$$p(\text{waar}) = \frac{(R+1)}{(N+2)} \quad [14]$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{p(\text{waar}) \cdot (1 - p(\text{waar}))}{N+3}} \quad [15]$$

De afleidingen en verdere uitleg van deze vergelijkingen zijn te vinden in Jaynes (2003, *Sectie 6.9*).

D Beschrijving bepaling E-parameter

Tabel D-1 geeft de nieuw bepaalde E-parameter waarde voor de verschillende seal-reservoirs combinaties. Het vervolg van deze bijlage beschrijft hoe de E-parameter in deze actualisatie is bepaald aan de hand van nieuwe put data.

Tabel D-1 Reservoir en seal combinatie met bijbehorende E-waarde uit 2012 en deze actualisatie. Het totale aantal voorkomens met reservoir-seal combinatie en aantal voorkomens wat daarvan heeft gebeefd wordt gegeven in de laatste twee kolommen.

Reservoir	Seal	E-waarde 2021	Totaal aantal voorkomens	Bevende voorkomens
Formatie van Ommelanden (Chalk)	Landen Kleisteen Laagpakket	0,044 ¹	1	0
Vlieland zandsteen Laagpakket	Vlieland Kleisteen Laagpakket	0,11	23	0
Zechstein Carbonaat (ZE3C) Laagpakket	Vlieland Kleisteen Laagpakket	0,26	1	0
Muschelkalk Formatie	Keuper Formatie	0,53	1	0
De Lier Zandsteen Laagpakket	Midden Holland Kleisteen Laagpakket	0,75	4	0
Holland Groenzand Laagpakket	Midden Holland Kleisteen Laagpakket	0,75	3	0
Röt Randzandsteen Laagpakket	Boven-Keuper Kleisteen Laagpakket	0,83	3	0
Basale Dongen Tuffiet Laagpakket	Ieper Kleisteen Laagpakket	1,0 ¹	2	0
Bunter Zandsteen Formatie	Solling Kleisteen Laagpakket	1,13	9	1
Zechstein Carbonaten	Zechstein Evaporieten	1,21	29	4
Rotliegend Slochteren Zandsteen Laagpakket	Ten Boer Kleisteen Laagpakket	1,23	57	14
Bunter Zandsteen Formatie	Röt Kleisteen Laagpakket	1,25	14	0
Bunter Zandsteen Formatie	Muschelkalk evaporiet	1,26	11	0
Limburg Zandsteen Formatie	Limburg Kleisteen	1,33 ²	1	0
Limburg Zandsteen Formatie	Zechstein Carbonaten	2,82 ²	9	0
Ten Boer Zandsteen	Zechstein evaporiet/carbonaten	2,64	2	0
Slochteren Zandsteen	Zechstein evaporiet/carbonaten	2,82	31	11

¹ Geen V_s en V_p beschikbaar in zowel 2004 als in deze actualisatie. Schatting uit 2004 overgenomen.

² Geen V_s en V_p beschikbaar voor Limburg Zandsteen. Gelijk aan 2004 gekozen om Slochteren Zandsteen als analoog te gebruiken.

D.1 Achtergrond E-parameter

De E-parameter beschrijft het contrast in stijfheid, de mate waarin een gesteente zich tegen elastische vervorming verzet, tussen de afsluitende laag (seal) en het reservoir. De stijfheid van gesteentes wordt gegeven door de Young's modulus, waar een hoge waarde voor Young's modulus betekent dat een gesteente stijver is. Gesteente hebben over het algemeen wanneer de (elastische) vervorming kort plaatsvindt een andere stijfheid dan wanneer een gesteente vervormt over een relatief langere tijdschaal. Dit wordt omschrijven met zogeheten dynamische Young's modulus (E_D) en de statische Young's modulus (E_S). Voor het bepalen van de E-parameter is de statische Young's modulus nodig.

De E_S is voor een (groot) deel van de reservoirs en seal gesteentes, ook wel (lithostratigrafische) laagpakketten genoemd, in de Nederlandse ondergrond niet bepaald. In 2004 is er daarom gekozen om dynamische eigenschappen te bepalen uit logs voor verschillende laagpakketten in de Nederlandse ondergrond en deze later te converteren naar statische eigenschappen. Deze methodiek is in deze actualisatie overgenomen. Eerst zijn voor verschillende putten de dynamische waarden van de Young's modulus bepaald per laagpakket, waarna deze aan de hand van een empirische relatie is omgezet naar statische waarde. Deze statische waarde per laagpakket is gebruikt voor het bepalen van de E-parameter per seal-reservoir combinatie.

D.2 V_p en V_s data

Recent zijn door TNO-AGE voor 25 putten de sonic-logs geanalyseerd waar zowel seismische drukgolf (V_p) en seismische schuifgolf (V_s) snelheid gemeten is. Figuur D-1 geeft een overzicht van de putten in deze studie (TNO, *in druk*).

Per put is er per lithostratigrafisch laagpakket waar afdoende (> 90%) V_s , V_p en dichtheidsdata beschikbaar is de gemiddelde V_s , V_p en ρ (bulk dichtheid) bepaald. Op basis van de relatie tussen de seismische snelheden en dynamische materiaal eigenschappen (bijv. Fjær et al., 1992; Zoback, 2007) is het mogelijk om de (gemiddelde) V_s , V_p en ρ waarden om te rekenen naar een (gemiddelde) dynamische Young's modulus (E_d).

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad [1]$$

Met behulp van formule [1] is de dynamische Young's modulus bepaald per lithostratigrafisch laagpakket, vergelijkbaar aan de DHAIS 2004 studie.



Figuur D-1 Overzicht van locatie van putten meegenomen in de analyse (TNO, *in druk*).

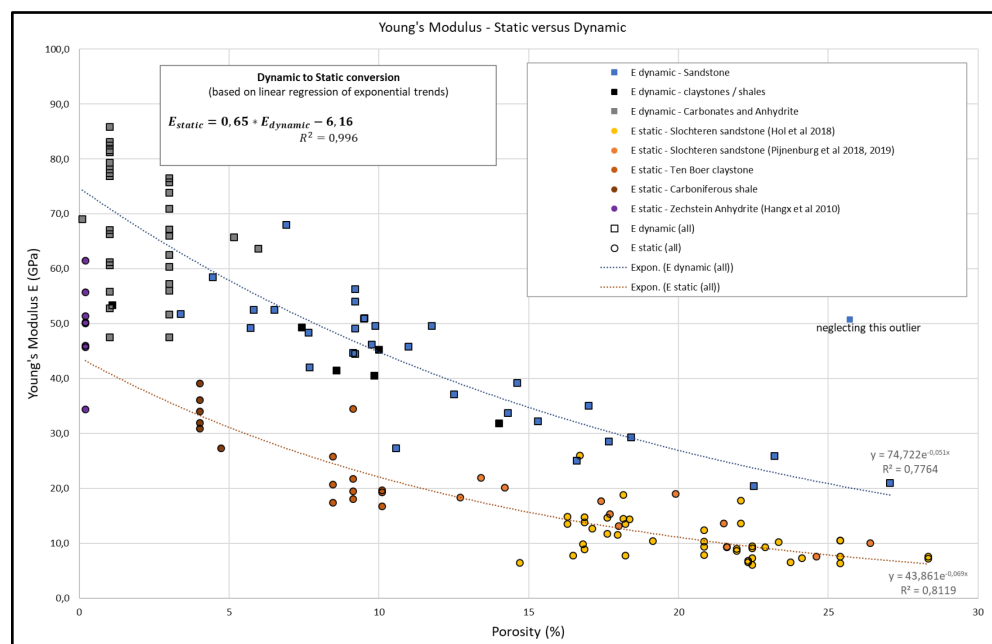
D.3 Omzetting E_d naar E_s

Zoals al eerder benoemd zijn voor het bepalen van de E-parameter de statische materiaaleigenschappen van de gesteentes vereist omdat deformatie binnen het reservoir relatief langzaam plaatsvindt t.o.v. de deformatie ten gevolge van geluidsgolven. Het verschil in snelheid en grootte van deformatie geeft een verschil in de grootte tussen de statische Young's modulus E_s en dynamische Young's modulus E_d (bijv. Eissa & Kazi, 1988; Yale en Swami, 2017; Zoback, 2017). Uit de literatuur zijn verschillende empirische relaties bekend waarmee het mogelijk is om van de dynamische Young's modulus de statische Young's modulus te bepalen (bijv. Eissa & Kazi, 1988; Yale en Swami, 2017). In deze datasets wordt over het algemeen de statische Young's modulus die in het laboratorium bepaald is voor een bepaalde lithologie (en porositeit) vergeleken met de dynamische waarde bepaald voor dezelfde lithologie (en porositeit). In DHAS 2004 studie is er gekozen om de relatie gevonden door Eissa & Kazi, 1988 te gebruiken. Eissa & Kazi, 1988 geven

een empirische relatie tussen de E_d en E_s gebaseerd op een dataset die voornamelijk bestaat uit gesteentes uit Noord-Amerika. Sinds 2004 is er (veel) meer data beschikbaar uit laboratorium experimenten op (reservoir en seal) gesteente van de Nederlandse gasvelden (bijv. Hangx et al., 2010; Hol et al., 2018; Pijenburg et al., 2018), zie Figuur D-2. In deze studie is er daarom gekozen om op basis van deze data over Nederlandse gesteentes en de data uit de putten te gebruiken voor een empirische relatie tussen E_d en E_s (zie Figuur D-2). Deze vergelijking is als volgt:

$$E_s = 0,65 * E_d - 6,16 \quad [2]$$

Er zit zowel onzekerheid in de bepaling van de porositeit waarden in de laboratorium experimenten en put data als in de bepaling van de statisch en dynamische Young's moduli. Met deze onzekerheid is geen rekening gehouden in het bepalen van bovenstaande empirische relatie. Aangezien voor het bepalen van de E-parameter de verhouding van de Young's modulus tussen seal en reservoirgesteente van belang is en niet de precieze waarde heeft dit weinig invloed. Een eventuele over- of onderschatting van de Young's modulus van het reservoir zal namelijk ook voor over- of onderschatting voor de seal betekenen.



Figuur D-2 Dynamische Young's modulus E_d uit put analyse (vierkanten) uit TNO, in druk en statische waarden E_s voor de Young's modulus (rondjes) uit literatuur (Hol et al., 2018.; Pijenburg et al., 2018; 2019 en Hangx et al., 2010) uitgezet tegen porositeit. Empirische relatie tussen E_d en E_s komt uit de lineaire regressie van de trendlijnen van porositeit versus E_d en E_s (blauwe en oranje lijn respectievelijk). In verschillende kleuren staat het type lithologie aangegeven.

D.4 E-waarde per seal-reservoir combinatie

In de 2004 studie is een gemiddelde waarde bepaald voor elk reservoir of seal gesteente. De E-parameter per voorkomen wordt dan gegeven door de gemiddelde E_s van de seal te delen door de gemiddelde E_s van het reservoir. Een soortgelijke methode is gekozen in deze actualisatie.

Er is in de dataset een sterke diepte en porositeit afhankelijkheid van de Young's modulus (Figuur D-2). Dit maakt het bepalen van een gemiddelde waarde voor een laagpakket niet triviaal, omdat logischerwijs niet alle laagpakketten in elke put aanwezig zijn. Een gemiddelde nemen over alle verschillende putten waar een bepaald laagpakket aanwezig is levert dan mogelijk niet een juiste inschatting van de verhouding van de E_s tussen de reservoir en seal. Het Rotliegend Slochteren pakket komt bijvoorbeeld zowel in putten voor met een Ten Boer afsluitende laag als een Zechstein evaporiet afsluitende laag. In een aantal van de putten waar het Rotliegend Slochteren aanwezig is met een Zechstein evaporiet afsluitende laag ligt het Rotliegend Slochteren een stuk dieper dan in de putten met een Ten Boer afsluitende laag. De gemiddelde Young's modulus voor het Rotliegend Slochteren genomen over de hele dataset is daarmee hoger dan het gemiddelde van het Ten Boer laagpakket. Daarentegen in elke put waar zowel Rotliegend Slochteren en Ten Boer aanwezig is, heeft de Ten Boer consequent een hogere stijfheid.

Voor het bepalen van de E-parameters is daarom gekozen om per put de verhouding tussen de E_s van de seal en de E_s van het reservoir gesteente uit te rekenen. Wanneer er in meerdere putten zowel het reservoir en seal combinatie aanwezig is, wordt het gemiddelde genomen van deze verhoudingen die per put zijn bepaald. Tabel D-1 geeft de E-waarden per seal-reservoir combinaties die in deze actualisatie zijn bepaald en of het bevende voorkomens betreft. Uit deze tabel kan worden geconcludeerd dat sommige seal-reservoir combinaties een grotere kans op beven hebben dan anderen.

Voor enkele unieke seal-reservoir combinaties is geen V_s - V_p data aanwezig in de dataset. Het gaat hier om de reservoir-seal combinaties voor de formatie van Ommelanden (Chalk)- Landen Kleisteen Laagpakket en Basale Dongen Tuffiet Laagpakket - Ieper Kleisteen Laagpakket. In totaal gaat het om drie voorkomens in de dataset. Voor deze type reservoir-seal combinaties is in DHAIS 2004 studie een inschatting gemaakt van de Young's modulus op basis van de compactiecoëfficiënt. De inschatting uit 2004 is overgenomen in deze actualisatie. Daarnaast is er geen V_s - V_p data beschikbaar voor voorkomens met een Carboon reservoir. Voor deze voorkomens is net als in de DHAIS 2004 studie gekozen om voor de E-waarde een analoog te kiezen. Bijvoorbeeld, voor de Carboon reservoirs met een Zechstein evaporiet afsluitende laag is E-waarde voor de Slochteren zandsteen-Zechstein evaporiet combinatie gekozen.