



NAM Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.

Het Ministerie van Economische Zaken en
Klimaat

De Minister, zijne Excellentie Ir. E.D. Wiebes
MBA

Bezuidenhoutseweg 73
2594 AC Den Haag

Brief ref.: EP201910205386

Datum: 31-10-2019

Betreft: Halfjaarlijkse rapportage seismiciteit

Excellentie,

NAM dient als houder van de winningsvergunning Groningenveld op grond van artikel 1.3a.5, derde lid, van de Mijnbouwregeling twee keer per kalenderjaar een rapportage op te stellen over de ontwikkelingen in de seismiciteit. De parameters waarover moet worden gerapporteerd zijn in ieder geval de volgende:

- a. grondversnellingen van de aardbevingen in ruimte en tijd;
- b. grondsnelheden van de aardbevingen in ruimte en tijd;
- c. het aantal aardbevingen met een magnitude van 1,5 en hoger op de schaal van Richter;
- d. de aardbevingsdichtheid in ruimte en tijd van aardbevingen met een magnitude van 1,0 en hoger op de schaal van Richter.

Deze rapportage vindt u bijgevoegd. Conform de vereisten van de Mijnbouwregeling is deze rapportage tevens toegezonden aan de inspecteur-generaal der mijnen.

Hoogachtend,

NAM
directeur

Bijlage: Halfjaarlijkse rapportage seismiciteit



RAPPORTAGE SEISMICITEIT
GRONINGEN – NOVEMBER 2019



[Deze pagina is opzettelijk leeg gelaten]

Inhoudsopgave

1	Samenvatting.....	1
2	Inleiding en leeswijzer	2
2.1	Inleiding	2
2.2	Leeswijzer	2
3	Meetnetwerk en meetnauwkeurigheid	3
4	Trendparameters.....	5
4.1	Aantal aardbevingen	5
4.2	12-Maandsgetal.....	6
4.3	Aardbevingsdichtheid.....	8
5	Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit.....	10
5.1	Statistisch onderzoek ontwikkeling aardbevingen.....	10
5.2	Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd.....	15
5.3	Verhouding tussen grote en kleine bevingen	16
6	Referenties	19

[Deze pagina is opzettelijk leeg gelaten]

1 Samenvatting

Deze rapportage is opgesteld om te voldoen aan artikel 1.3a.5, derde lid van de Mijnbouwregeling waarin staat dat de houder van de winningsvergunning Groningenveld twee keer per kalenderjaar een rapportage opstelt over ontwikkelingen in de seismiciteit.

De parameters waarover moet worden gerapporteerd zijn in ieder geval de volgende:

- a. grondversnellingen van de aardbevingen in ruimte en tijd;
- b. grondsnelheden van de aardbevingen in ruimte en tijd;
- c. het aantal aardbevingen met een magnitude van 1,5 en hoger op de schaal van Richter;
- d. de aardbevingsdichtheid in ruimte en tijd van aardbevingen met een magnitude van 1,0 en hoger op de schaal van Richter.

De aardbevingsdichtheid en het aantal bevingen ('activity rate') zijn trendparameters. Deze parameters worden gebruikt om vroegtijdig een (lokale) toename of afname van de seismiciteit te signaleren over de afgelopen 12 maanden. De grondversnellingen (PGA) en grondsnelheden (PGV) van de bevingen zijn incidentparameters. Een hoge waarde van een incidentparameter betekent niet per definitie een toename in de seismische activiteit maar kan wel een aanleiding zijn voor nader onderzoek.

Grondversnellingen en grondsnelheden (PGA en PGV)

In de afgelopen twaalf maanden hebben zich geen aardbevingen boven het Groningenveld voorgedaan die hebben geleid tot grondversnellingen en/of grondsnelheden boven de in de Mijnbouwregeling artikel 1.3a.8.1 vastgestelde grenswaarden (grenswaarde PGA is 0,08 g en grenswaarde PGV is 50 millimeter per seconde).

Aantal aardbevingen (Activity rate)

De activity rate is het aantal geregistreerde aardbevingen met een magnitude groter of gelijk aan $M_L = 1,5$ dat in de voorgaande twaalf maanden geregistreerd is. De activity rate is in het voorgaande jaar afgenomen van 19 naar 11.

Aardbevingsdichtheid

Aardbevingsdichtheid is gedefinieerd als het aantal geobserveerde aardbevingen per vierkante kilometer per jaar met een magnitude groter dan $M_L = 1,0$. De dichtheid wordt berekend volgens de Quartic Kernel Function zoals voorgeschreven door het SodM. De aardbevingsdichtheid is in een gebied in de buurt van Loppersum toegenomen tot 0,18 aardbevingen per vierkante kilometer per jaar, deze lokale verhoging is onderwerp geweest van een in september 2019 opgeleverde tussentijdse analyse (1).

Trend in seismiciteit

Het aantal aardbevingen (activity rate) en de aardbevingsdichtheid, laten vanaf 2015 een dalende trend zien. In de afgelopen twaalf maanden zijn 11 aardbevingen boven het Groningenveld met een magnitude van $M_L \geq 1,5$ geregistreerd, met een maximale magnitude van $M_L = 3,4$ (nabij Westerwijtwerd op 22 mei 2019). Het aantal geobserveerde aardbevingen valt binnen de onzekerheidsbandbreedte van de verwachtingswaarde van de HRA (2). Nadere statistische analyses wijzen op een gelijkblijvende of dalende seismiciteit. Wel is een lokale toename van aardbevingsdichtheid te zien. In hoeverre de observaties een gevolg zijn van de wijze van opereren, van de lagere geproduceerde volumes of van de natuurlijke variabiliteit in seismiciteit is niet met zekerheid vast te stellen.

2 Inleiding en leeswijzer

2.1 Inleiding

Dit rapport bevat de rapportage over de ontwikkeling van de seismiciteit in het Groningenveld zoals benoemd in artikel 1.3a.5, derde lid van de Mijnbouwregeling. Hierin staat dat de houder van de winningsvergunning Groningenveld twee keer per kalenderjaar een rapportage opstelt over ontwikkelingen in de seismiciteit.

Seismische gegevens en gasproductie zoals vermeld in dit rapport zijn bijgewerkt tot 1 oktober 2019. Het rapport kijkt in principe een jaar terug maar daar waar relevant wordt verder teruggekeken om seismische ontwikkelingen in hun historische context te plaatsen.

2.2 Leeswijzer

Hoofdstuk 4 behandelt de geobserveerde trendparameters en in hoofdstuk 5 wordt hierop nader in gegaan. Om de leesbaarheid te vergroten worden in dit rapport bepaalde kleuren consistent gebruikt in de verschillende figuren.

- Groen: Bevingen met een magnitude¹ groter of gelijk aan $M_L = 1,0$
- Paars: Bevingen met een magnitude groter of gelijk aan $M_L = 1,2$
- Blauw: Bevingen met een magnitude groter of gelijk aan $M_L = 1,5$
- Rood: Bevingen met een magnitude groter of gelijk aan $M_L = 2,0$

De reden dat verschillende magnitudes gebruikt worden voor analyse in dit rapport, heeft vooral te maken met de compleetheid van de dataset en de hoeveelheid data die beschikbaar is.

¹ De sterkte van de aardbevingen worden in deze rapport aangeduid in Local Magnitude Scale of M_L

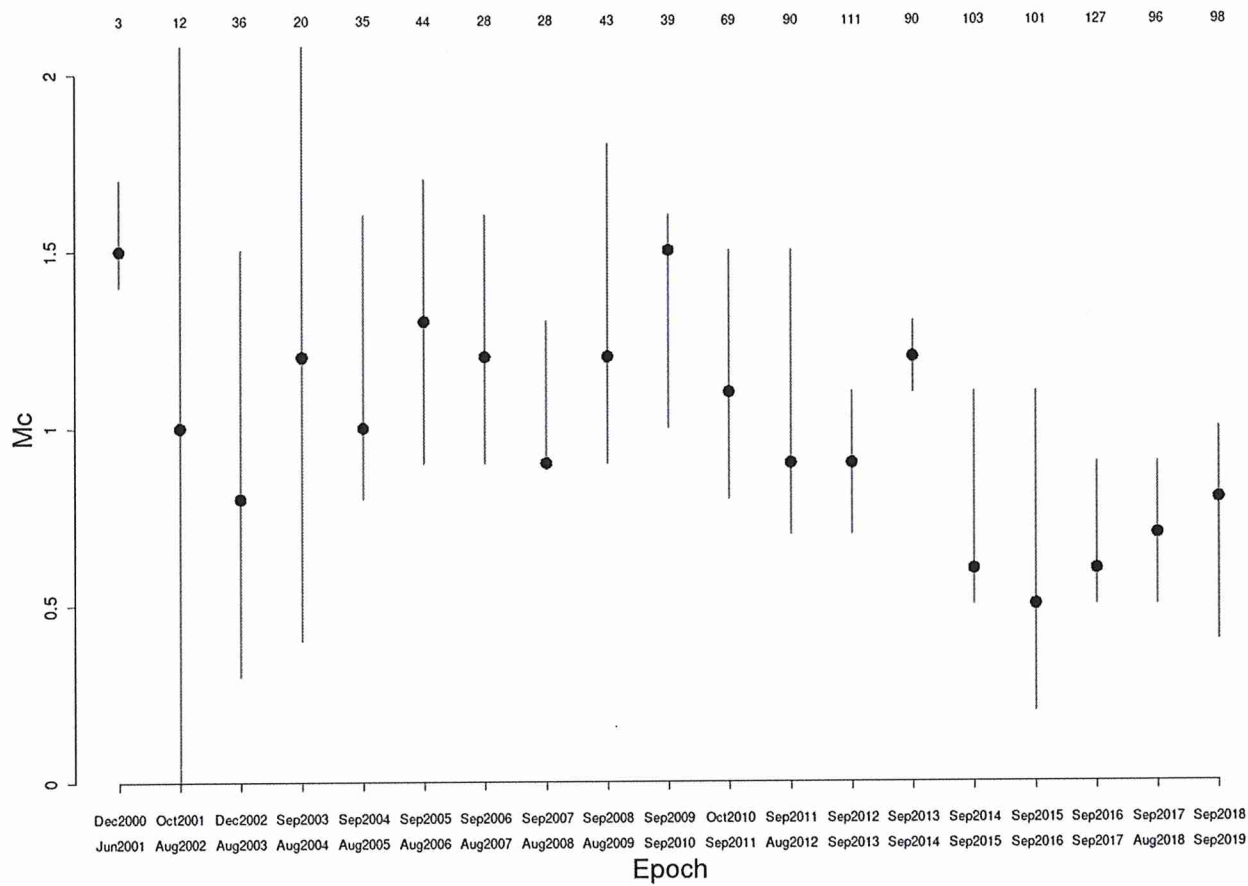
3 Meetnetwerk en meetnauwkeurigheid

De gevoeligheid van het seismische meetnetwerk boven het Groningenveld is door de uitbreiding met 70 nieuwe seismische meetstations toegenomen, waardoor vanaf 2014 alle aardbevingen met een magnitude groter dan $M_L = 1,0$ op de schaal van Richter boven het Groningenveld konden worden geregistreerd. Voorafgaand aan de plaatsing van deze additionele meetstations konden in ieder geval alle bevingen in het Groningenveld met een magnitude groter dan $M_L = 1,5$ op de schaal van Richter worden geregistreerd. Voor 2014 werden bevingen met een magnitude boven de $M_L = 1,2$ ook geregistreerd, maar door de lagere gevoeligheid in die periode is niet zeker dat dit alle bevingen betrof met een magnitude tussen de $M_L = 1,2$ en de $M_L = 1,5$. Voor deze bevingen kan het aantal onderschat zijn. Zie hiertoe ook de 'Magnitude of Completeness'-discussie hieronder.

Het seismische meetnetwerk is eigendom van en wordt geopereerd en onderhouden door KNMI. Elk seismisch meetstation bestaat uit een bovengronds geplaatste accelerometer voor het meten van groundbeweging en vier ondergronds geplaatste geofoons voor nauwkeurige plaatsbepaling en bepaling van aardbevingssterkte. Daarnaast zijn ook een tiental stations geplaatst die alleen grondversnelling meten. Alle in dit hoofdstuk gerapporteerde meetgegevens zijn ontleend aan het KNMI en terug te vinden op de website van het KNMI.

Magnitude of Completeness

De Magnitude of Completeness is de laagste magnitude M_L waarvoor de beving waargenomen kan worden, ongeacht positie in het reservoir. Bevingen met een magnitude $M_L < \text{Magnitude of completeness}$ kunnen waargenomen worden wanneer deze zich voordoen op een voor het meetnetwerk 'gunstige' locatie. Wanneer de beving zich voordoet op een andere locatie zou het kunnen dat deze niet wordt waargenomen. Voor bevingen met een magnitude $M_L \geq \text{Magnitude of completeness}$ geldt dat deze wordt waargenomen, ongeacht locatie in het reservoir. De Magnitude of completeness wordt afgeleid uit de waarnemingen en is onderhevig aan een bepaalde mate van onzekerheid. Voor statistisch onderzoek is het van belang een goede Magnitude of Completeness te veronderstellen. Is de veronderstelde Magnitude of Completeness te hoog dan is de dataset kleiner dan mogelijk en is het moeilijker statistisch relevante conclusies aan de data te verbinden. Is de Magnitude of completeness te laag aangenomen dan is de dataset incompleet en worden mogelijk foutieve conclusies uit de dataset afgeleid. De Magnitude of completeness is afgeleid volgens de maximum curvature method (3) en de resultaten met het 95% betrouwbaarheidsinterval zijn weergegeven in Figuur 1. In de figuur is duidelijk zichtbaar dat vanaf 2014 de Magnitude of completeness afneemt als gevolg van de eerder beschreven uitbreiding van het meetnetwerk. Vanaf dit tijdstip zijn bevingen met een magnitude $M_L \geq 1,0$ bruikbaar voor statistisch onderzoek. In de periode voorafgaand aan 2014 is de dataset waarschijnlijk compleet voor bevingen met een magnitude $M_L \geq 1,3$ en zeer waarschijnlijk compleet voor bevingen met een magnitude $M_L \geq 1,5$. In deze rapportage wordt een Magnitude of completeness van 1,0; 1,2; 1,3 of 1,5 verondersteld, onder meer afhankelijk van hoe ver terug gekeken wordt in de tijd.



Figuur 1: Magnitude of completeness met onzekerheidsintervallen voor verschillende periodes

4 Trendparameters

Het aantal aardbevingen (activity rate) en de aardbevingsdichtheid zijn de trendparameters, in Tabel 1 zijn de waarden van deze trendparameters over de afgelopen 6 maanden gepresenteerd.

Tabel 1 Trendparameter overzicht, waarbij de activity rate het in de voorgaande twaalf maanden geregistreerde aantal aardbevingen met een magnitude groter of gelijk aan $M_L = 1,5$ is. Aardbevingsdichtheid is het maximale aantal geobserveerde aardbevingen per vierkante kilometer per jaar met een magnitude groter dan $M_L = 1,0$.

	april	mei	Juni	Juli	aug	sept	okt
Activity rate	11	11	11	12	12	10	11
Aardbevingsdichtheid	0.11	0.10	0.12	0.15	0.15	0.16	0.18

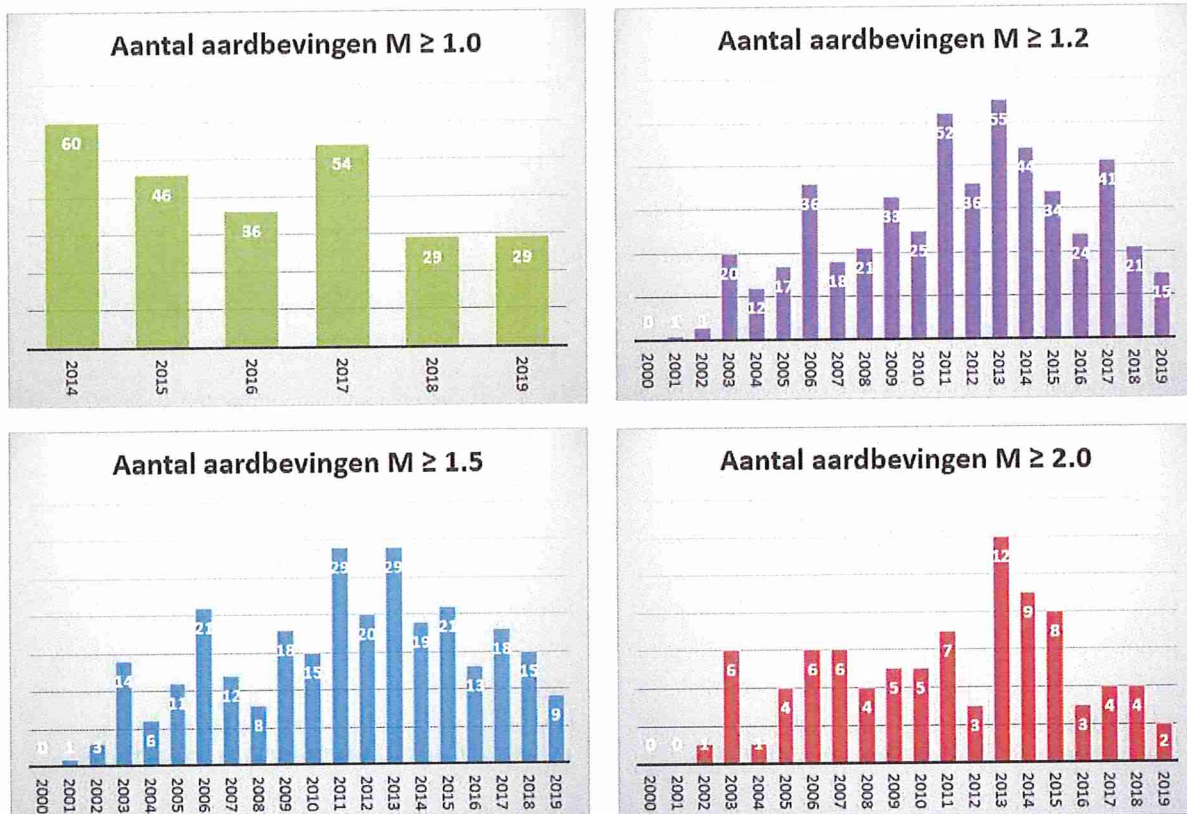
4.1 Aantal aardbevingen

In de periode van oktober 2018 tot oktober 2019 zijn in totaal 35 aardbevingen geregistreerd met een magnitude groter of gelijk aan $M_L \geq 1,0$. In het voorgaande jaar (oktober 2017 tot en met september 2018) waren dit 36 aardbevingen. Een overzicht van het aantal aardbevingen per maand is gepresenteerd in Tabel 2. In deze tabel is ook een opsplitsing gemaakt naar het aantal aardbevingen per maand per magnitude klasse.

Tabel 2: Het totale aantal waargenomen aardbevingen in het afgelopen jaar en opgedeeld per magnitude klasse.

Maand	$1,0 \leq M < 1,5$	$1,5 \leq M < 2,0$	$2,0 \leq M < 2,5$	$M \geq 2,5$	Totaal
Oct-18	1	0	0	0	1
Nov-18	0	2	0	0	2
Dec-18	3	0	0	0	3
Jan-19	0	0	0	0	0
Feb-19	2	2	0	0	4
Mar-19	0	1	0	0	1
Apr-19	2	2	0	0	4
May-19	6	0	0	1	7
Jun-19	1	1	0	1	3
Jul-19	4	0	0	0	4
Aug-19	5	0	0	0	5
Sep-19	0	1	0	0	1
Totaal	24	9	0	2	35

Figuur 2 laat de ontwikkeling van het aantal aardbevingen per jaar zien voor de verschillende magnitudeklassen. Het panel linksboven laat het jaarlijks aantal aardbevingen zien voor $M_L \geq 1,0$ (waarbij opgemerkt moet worden dat 2019 over de periode tot oktober weergegeven is en dat er vanwege incompleetheit van de data voor 2014, er geen data van voor 2014 getoond is voor $M_L \leq 1,2$).



Figuur 2: Aantal aardbevingen per jaar voor vier verschillende magnitude-klassen. Het aantal aardbevingen in 2019 is aangegeven voor de periode tot oktober 2019.

Er zijn statistische aanwijzingen dat de dataset boven de $M_L = 1,2$ wel compleet zou kunnen zijn (voor de periode voor 2014), zie hiertoe ook de discussie in sectie 3. Dit is de reden dat deze geplott is vanaf het jaar 2000 (panel rechtsboven).

Het linker panel beneden laat bevingen zien met een magnitude van $M_L \geq 1,5$. Deze dataset is vrijwel zeker compleet vanaf 2000 en geeft daarmee een goed beeld van de seismische ontwikkeling.

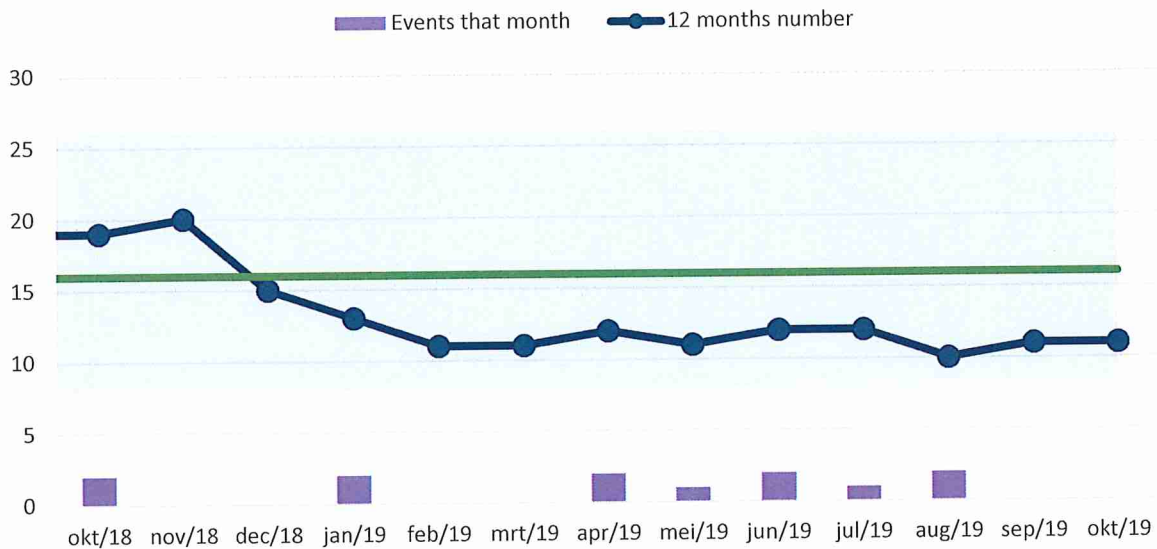
Het panel rechts beneden laat de hoeveelheid bevingen van $M_L \geq 2,0$ zien. Hier is duidelijk een verlaging te zien in het aantal aardbevingen ten opzichte van de periode 2013-2015. Het aantal bevingen met een magnitude $M_L \geq 1,5$ of $M_L \geq 2,0$ is lager dan het aantal aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,0$ wat het moeilijker maakt een statistisch significante trend te bepalen.

4.2 12-Maandsgetal

Het 12-maandsgetal is de voortschrijdende som van het aantal bevingen met een magnitude van groter dan of gelijk aan een vooraf bepaalde magnitude in het jaar voorafgaand aan het meetmoment. Het 12-maandsgetal van 1 oktober 2019 is dus de som van het aantal aardbevingen van een bepaalde magnitude in de periode van 1 oktober 2018 tot 1 oktober 2019.

In Figuur 3 zijn de 12-maandsgetallen van het afgelopen jaar weergegeven voor bevingen van een magnitude van $M_L = 1,5$ en groter. De lijn laat een relatief vlakke periode zien, na een sterke daling eind 2018. Met een groene lijn weergegeven in Figuur 3 is het 'Expected Number', deze waarde voor het jaar 2018 is de verwachtingswaarde, of eigenlijk de 50% overschrijdingswaarde, van het aantal seismische events met een magnitude $M_L \geq 1,5$ volgens het in de HRA gebruikte statistische model (4; 2). Het blauwe vlak in de figuur toont het 95% betrouwbaarheidsinterval.

Activity Rate Rolling 12 months number $M \geq 1.5$

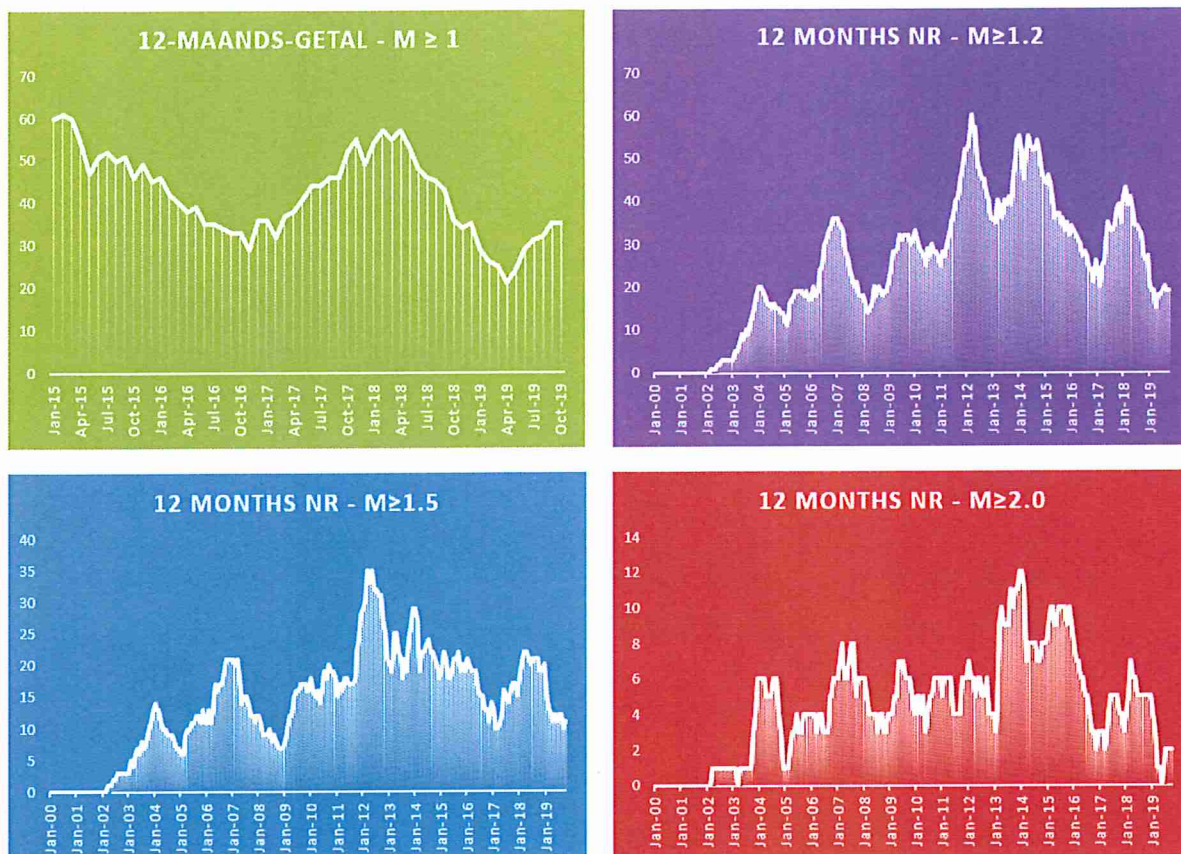


Figuur 3: 12-Maandsgetallen van het afgelopen jaar. Het 12-maandsgetal is weergegeven voor het einde van de maand. Het 12-maandsgetal van oktober 2019 heeft dus betrekking op de periode van 1 november 2018 tot en met 31 oktober 2019. Het blauwe vlak toont het 95% betrouwbaarheidsinterval.

Figuur 4 laat de 12 maands-getallen zien over een langere periode voor vier magnitude-klassen. Deze laat dezelfde trend zien als in Figuur 2 maar laat ook het verband zien met de ontwikkeling van seismiciteit in de jaren ervoor. In de periode vanaf januari 2017 tot april 2018 was een duidelijke stijging zichtbaar in het aantal aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,2$. Deze trend heeft zich niet doorgezet en het 12-maandsgetal van deze magnitudeklasse is voor een aantal maanden stabiel gebleven waarna sinds 2018 een daling zichtbaar is in het 12-maandsgetal van het aantal aardbevingen in magnitudeklasse $M_L \geq 1,5$.

Het lage aantal events maakt het lastig conclusies te trekken. De neergaande trend in het aantal aardbevingen zou het gevolg kunnen zijn van de manier van opereren en de verlaagde productievolumes maar kan ook gevolg zijn van de natuurlijke variabiliteit. De geobserveerde trend in het aantal aardbevingen past binnen de onzekerheidsbandbreedte van de modeluitkomsten.

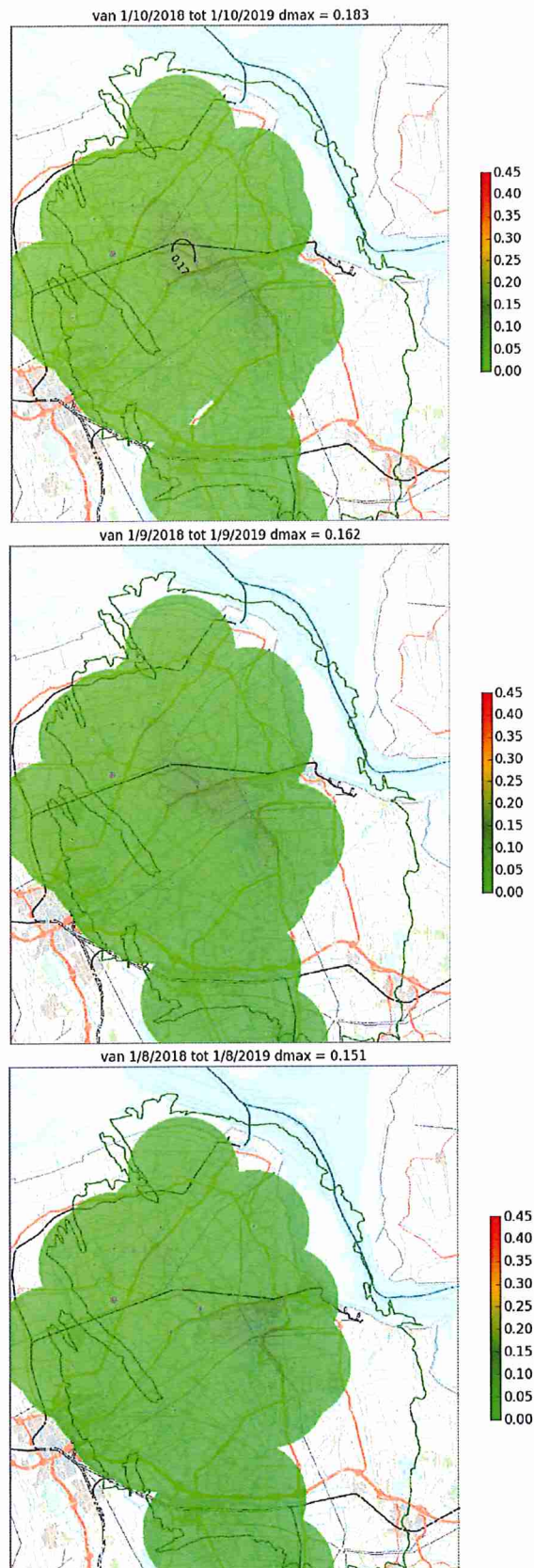
Meer informatie over het verband tussen de seismiciteit en de productievolumes en manier van opereren kan gevonden worden in de Hazard and Risk Analyses (4), (5) en (2).



Figuur 4: 12-maandsgetallen voor vier magnitude-klassen; waarnemingen voor $M_L \geq 1,0$ weergegeven vanaf 2015, de overige waarnemingen sinds 2000.

4.3 Aardbevingsdichtheid

In Figuur 5 zijn kaarten opgenomen van de aardbevingsdichtheid en de epicentra van de in de periode augustus 2018 tot oktober 2019 geregistreerde aardbevingen. Op de aardbevingsdichtheidskaart wordt het aantal bevingen per vierkante kilometer getoond. Voor het berekenen hiervan is de Quartic Kernel functie gebruikt. Alle geregistreerde aardbevingen met een magnitude van $M_L = 1,0$ en hoger over de periode augustus 2018 tot oktober 2019 zijn opgenomen en de berekende aardbevingsdichtheid wordt getoond door middel van een kleurschaal. Er is een lokale verhoging van de aardbevingsdichtheid in de omgeving van Loppersum. Op 9 september 2019 overschreed trendparameter aardbevingsdichtheid de grenswaarde 0,17 waarna een speciale tussentijdse rapportage is uitgebracht (1). De maximaal waargenomen aardbevingsdichtheid over de twaalf maanden voorafgaand aan 1 oktober ligt op 0,183 bevingen/km²/jaar.



Figuur 5: Aardbevingsdichtheid-kaarten voor bevingen met een magnitude $M_L \geq 1.0$. Weergegeven van boven naar beneden: aardbevingsdichtheid waargenomen in de twaalf maanden voorafgaand aan 1 oktober, 1 september en 1 augustus 2019 respectievelijk.

5 Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit

In dit hoofdstuk worden de resultaten van nadere analyse van de trends en patronen van de trendparameters gerapporteerd. Het betreft een analyse van:

1. De hoeveelheid aardbevingen over tijd;
2. Veranderingen in de verhouding tussen kleine en grote bevingen (b-factor Gutenberg-Richter)
3. Anomale PGA/PGV bij een bepaalde aardbevings-magnitude

5.1 Statistisch onderzoek ontwikkeling aardbevingen

Jaar op jaar vergelijking

Je kan vergelijken of het aantal seismische events een statistisch significante verhoging of verlaging laat zien. De resultaten van deze vergelijking zijn weergegeven in Tabel 3. De tabel geeft aan:

- Het jaartal
- De "Rate ratio", dit is de ratio tussen het aantal waargenomen seismische events in het beschouwde jaar en ten opzichte van gasjaar 2018-2019, een getal groter dan 1 betekent dat zich in gasjaar 2018-2019 meer seismische events voordeden. In deze rapportage is gekozen om de "rate ratio" vast te stellen voor aardbevingen met $M_L \geq 1,3$ in verband met de grootte van de dataset en het vertrouwen dat de magnitude of completeness goed is ingeschat voor deze periode.
- De $P_{2,5\%}$ en de $P_{97,5\%}$ van de rate ratio (dus de waarde behorend bij een overschrijdingskans van 2,5% en 97,5%)
- De P-waarde

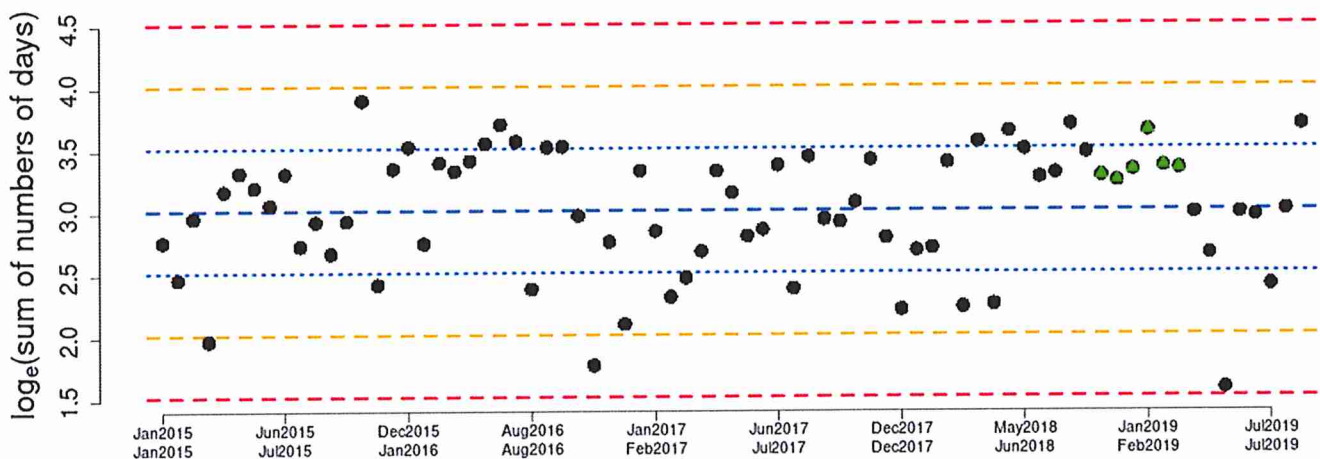
Bij een significant lagere of hogere rate ($P < 0.05$) in gasjaar 2018-2019 vergeleken met het beschouwde jaar is de Rate ratio aangegeven in groen of rood respectievelijk. Een groen vlak betekent dus dat in dat jaar de hoeveelheid bevingen significant hoger was dan in gasjaar 2018-2019. De betrouwbaarheidsintervallen zijn aangegeven onder de aanname van Poisson verdeelde seismische events. Dit leidt waarschijnlijk tot een onderschatting van de grootte van de betrouwbaarheidsintervallen omdat de onderliggende aanname is dat de bevingen ongecorrleerd zijn. In werkelijkheid gaat dit niet geheel op bij de aanwezigheid van naschokken. Op deze manier beschouwd was gasjaar 2018-2019 dus een jaar met een statistisch significant laag aantal bevingen vergeleken met gasjaar 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 en 2013-2014, maar nog steeds een jaar met een statistisch significant hoog aantal bevingen vergeleken met jaren 1995-1996, 1996-1997, 1998-1999, 2000-2001 en 2001-2002.

Tabel 3: Verhouding ('rate ratio') van het aantal bevingen in gasjaar 2018-2019 ten opzichte van voorgaande gasjaren voor $M_L \geq 1,3$. Een rate ratio tussen 0 en 1 voor een bepaald jaar geeft aan dat er minder bevingen waren in dat jaar ten opzichte van 2018-2019. Een rate ratio groter dan 1 geeft aan dat er méér bevingen waren ten opzichte van 2018-2019 en een rate ratio van exact 1 geeft aan dat er precies evenveel bevingen waren.

Gasjaar	Rate ratio	P _{2.5%}	P _{97.5%}	P-waarde
1995/1996	3.000	1.141	9.232	0.023
1996/1997	3.000	1.141	9.232	0.023
1997/1998	1.636	0.732	3.834	0.265
1998/1999	2.571	1.025	7.284	0.043
1999/2000	1.800	0.788	4.365	0.185
2000/2001	6.000	1.752	31.799	0.001
2001/2002	6.000	1.752	31.799	0.001
2002/2003	1.385	0.641	3.074	0.473
2003/2004	1.636	0.732	3.834	0.265
2004/2005	1.286	0.604	2.793	0.597
2005/2006	0.621	0.325	1.156	0.144
2006/2007	1.286	0.604	2.793	0.597
2007/2008	1.385	0.641	3.074	0.473
2008/2009	0.750	0.384	1.441	0.441
2009/2010	0.783	0.398	1.516	0.533
2010/2011	0.545	0.289	0.997	0.049
2011/2012	0.500	0.267	0.904	0.020
2012/2013	0.514	0.274	0.933	0.027
2013/2014	0.474	0.254	0.851	0.010
2014/2015	0.643	0.335	1.204	0.184
2015/2016	1.000	0.491	2.037	1.000
2016/2017	0.600	0.315	1.112	0.111
2017/2018	0.750	0.384	1.441	0.441

Periode tussen bevingen

De periode tussen opeenvolgende bevingen is een maatstaf voor de frequentie waarmee bevingen plaats vinden. De data is geanalyseerd middels een zogeheten 'Control chart' of 'Shewhart chart'. Hierin wordt de logaritme van de tijd die het duurt voor meerdere bevingen plaats vinden (de inter-event time) geplot over tijd. Veranderingen in het onderliggende proces kunnen zo waargenomen worden. Het wordt statistisch significant geacht wanneer 'inter-event times' worden aangetroffen die meer dan drie standaardafwijkingen van het gemiddelde liggen of wanneer zeven of meer opeenvolgende punten allemaal boven danwel onder het gemiddelde liggen. Dit is weergegeven in Figuur 6. De reeks van juni 2018 tot en met februari 2019 ligt geheel boven het gemiddelde sinds 2015. Het is zeer onwaarschijnlijk dat zo een reeks voorkomt puur op basis van kans, als er tenminste redelijkerwijs kan worden aangenomen dat de periodes van groepen van vijf opeenvolgende bevingen (bij benadering) onafhankelijk van elkaar plaatsvinden. Het is erg lastig om afhankelijkheid tussen bevingen door naschokken te onderscheiden van kortetermijn trends in bevings-frequentie door onderliggende fysische processen. Het is waarschijnlijk dat deze controle kaart wat te gevoelig is (dus te vaak een significante afwijking aangeeft) voor kortetermijn veranderingen door naschokken. Ook kan er een wat ander beeld ontstaan als de aantallen bevingen per groep wordt gevarieerd van bijvoorbeeld vijf tot tien bevingen per groep. Deze methode van statistisch beschouwen leidt tot de conclusie dat momenteel de seismiciteit in het veld niet significant gewijzigd is sinds januari 2015, terwijl de periode van juni 2018 tot en met februari 2019 de frequentie van bevingen significant laag was. In overeenstemming met voorgaande rapportages is gekozen om waargenomen bevingen met een magnitude $M_L \geq 0,6$ te gebruiken in deze beschouwing. Hoewel de veronderstelde magnitude of completeness laag is wordt de grootte van de dataset in deze beschouwing belangrijker geacht dan het mogelijk missen van een datapunt.



Figuur 6: Aantal dagen tussen vijf opeenvolgende seismische events, $M_L \geq 0.6$. Uitgezet zijn gemiddelde en één (blauw), twee (oranje) en drie (rood) standaardafwijkingen. Statistisch significante events zijn aangegeven met een driehoek (zeven maal of meer opeenvolgend aan één kant van het gemiddelde) of een stip (meer dan drie standaardafwijkingen van het gemiddelde, geen onderdeel van deze dataset). Merk op dat groen duidt op een positieve statistisch significante gebeurtenis (want suggereert langere gemiddelde tijd tussen bevingen) terwijl rood duidt op een negatieve statistisch significante gebeurtenis (want suggereert kortere gemiddelde tijd tussen bevingen).

Verloop van het aantal bevingen door de tijd

De toe- en afname van het aantal bevingen over tijd is weergegeven in eerdere hoofdstukken. Om de statistische significantie van de ontwikkelingen te duiden is deze weergegeven in Figuur 7 en Figuur 8, met daarbij de betrouwbaarheidsintervallen van de te verwachten hoeveelheid aardbevingen. De betrouwbaarheidsintervallen helpen bij de interpretatie van de data. Een relatief seismisch rustige periode kan het gevolg zijn van veranderingen in geproduceerde volumes, maar kan ook op toeval berusten. Om dit inzichtelijk te maken zijn twee plots gemaakt van de hoeveelheid seismische events per kwartaal met betrouwbaarheidsintervallen; één onder de aanname dat de seismische events Poisson verdeeld zijn; één onder de aanname dat de events quasi-Poisson verdeeld zijn. De Poisson verdeling geeft een redelijke beschrijving van de data onder de aanname dat de bevingen ongecorrleerd zijn. Deze aanname is echter niet geheel correct omdat naschokken plaats vinden. De quasi-Poisson kan gebruikt worden om een hogere mate (ten opzichte van de Poisson) aan variabiliteit in aantallen bevingen tussen kwartalen te beschrijven. Deze hogere mate van variabiliteit kan ontstaan door een bepaalde mate van correlatie tussen de events door naschokken. De statistische analyse gebaseerd op de quasi-Poisson is meer robuust en resulteert in grotere onzekerheidsmarges. Beide plots bevatten de volgende informatie:

- Blauwe stippen voor het aantal seismische events dat kwartaal
- Een blauwe lijn die de trendlijn van het aantal te verwachten seismische events weergeeft
- Een donkergrijze band; het 95% betrouwbaarheidsinterval van de trendlijn.
- Een lichtgrijze band; het 95% voorspellingsinterval van de hoeveelheid te verwachten events in dat kwartaal

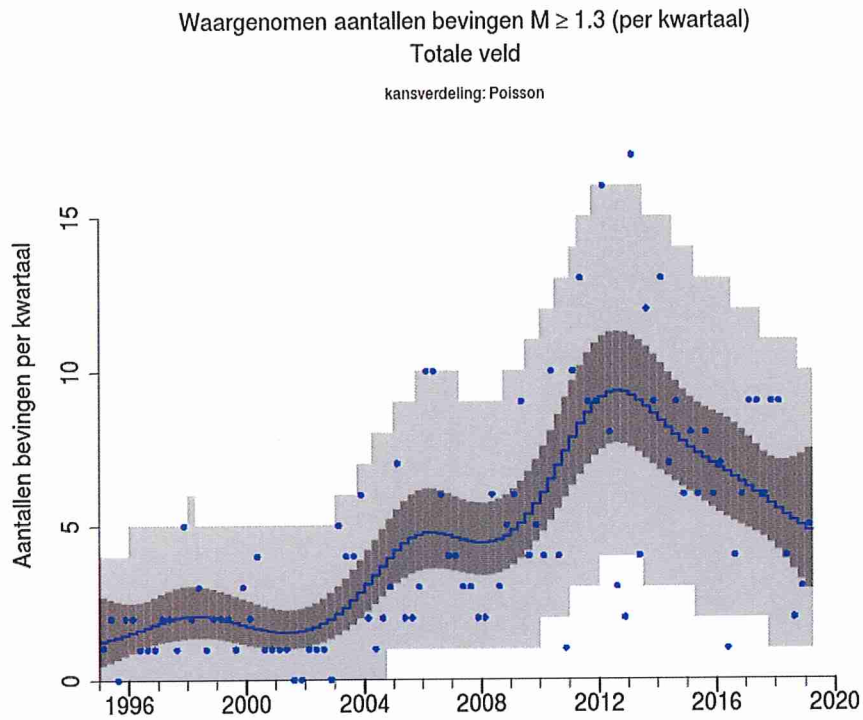
Beide manier van beschouwen van de data geven grofweg hetzelfde beeld. De hoeveelheid aardbevingen nam toe in de periode van 2001 tot een maximum in 2012. Hierna laat de hoeveelheid bevingen een neergaande trend zien in de periode van 2013 tot 2019. Merk op dat de onzekerheidsbanden in 2019 mogelijk toenemen door grotere variatie van het aantal bevingen per kwartaal, maar dat de onzekerheid rondom de trend sowieso toeneemt, omdat er simpelweg minder datapunten nabij zijn om de trend uit af te leiden. De datapunten van de periode na oktober 2019 zijn op het moment van schrijven nog onbekend en dus is de trend rond oktober 2019 met minder zekerheid af te leiden dan de trend op een punt waar alle data twee jaar ervoor en er na bekend is.

Conclusie statistische analyse

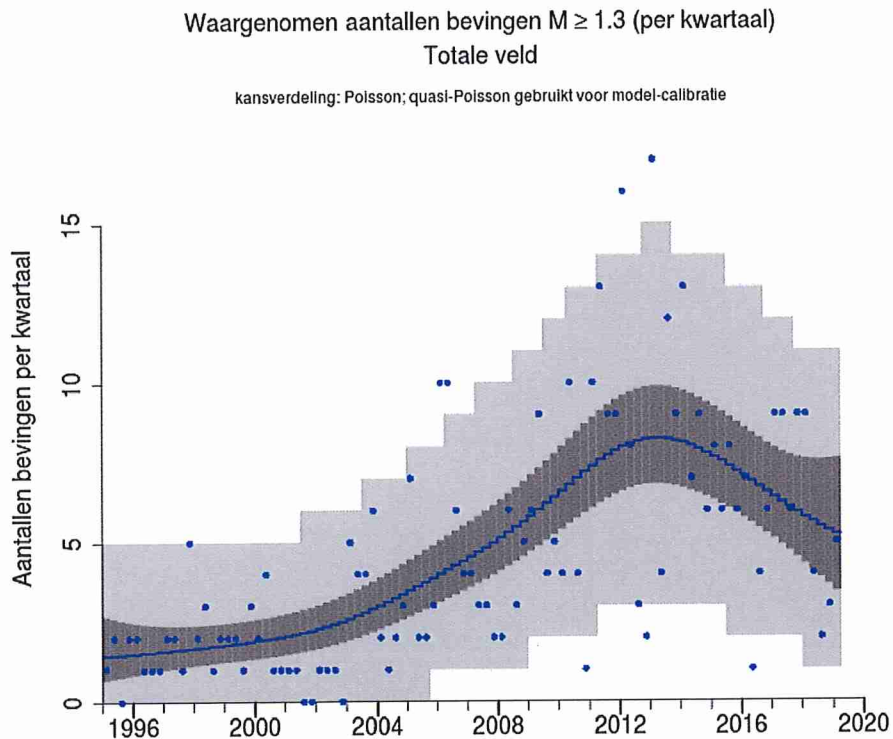
Het aantal aardbevingen is op basis van verschillende statistische analyse methoden en onder verschillende aannames geanalyseerd. Afhankelijk van de gebruikte methode waarop de data geanalyseerd is en de daarin gebruikte eis die gesteld is aan het statistische bewijs, kunnen verschillende conclusies getrokken worden.

- A. De frequentie van geregistreerde aardbevingen neemt niet statistisch significant toe of af, dit betekent dat variaties in het aantal aardbevingen als "ruis" beschouwd wordt;
- B. De frequentie van geregistreerde aardbevingen laat een neergaande trend zien, dit betekent dat ondanks de "ruis" een dalende trend zichtbaar is.

Er is geen statistisch bewijs gevonden dat de aantallen aardbevingen toe zouden nemen.



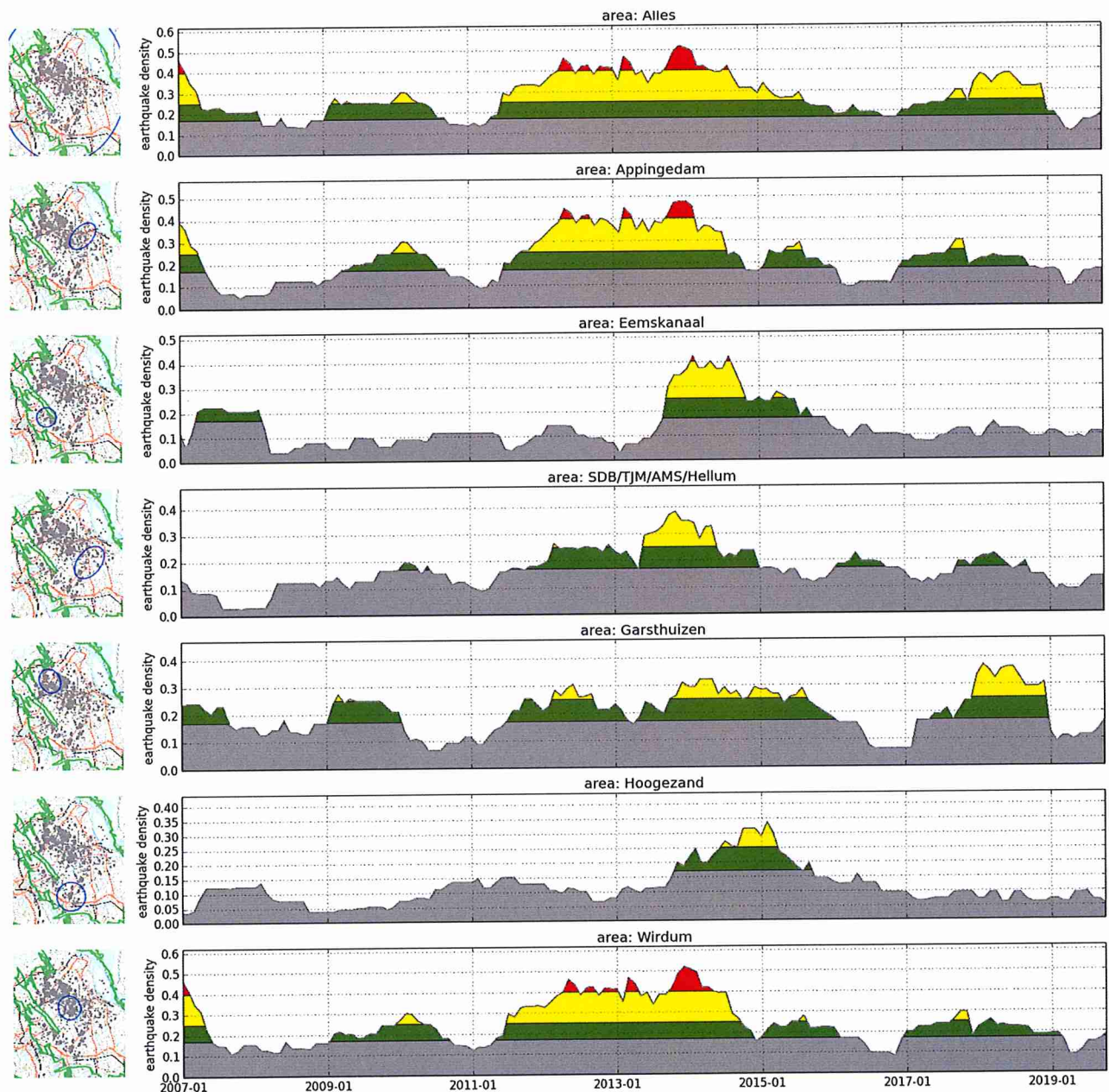
Figuur 7: Trend en betrouwbaarheidsinterval van hoeveelheid bevingen per kwartaal, bij Poisson verdeelde seismische events.



Figuur 8: Trend en betrouwbaarheidsinterval van hoeveelheid bevingen per kwartaal, bij quasi-Poisson verdeelde seismische events.

5.2 Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd

De maximum waarde van aardbevingsdichtheid als functie van de tijd over het gehele veld en per deelgebied is weergegeven in Figuur 9. Duidelijk zichtbaar is de hogere maximale aardbevingsdichtheid in de periode van 2012 tot 2014 over het veld en in de gebieden Appingedam en Wirdum in het bijzonder. Sinds het eind van 2018 is de aardbevingsdichtheid over het gehele veld laag vergeleken met voorgaande jaren. De gebieden tussen de verschillende grenswaarden voor rapportage en analyse op basis van aardbevingsdichtheid volgens de Mijnbouwregeling zijn aangegeven in de kleuren groen, geel en rood.



Figuur 9: De ontwikkeling van aardbevingsdichtheid over de jaren 2007-2019 in het gehele Groningenveld en kleinere gebieden binnen het Groningenveld.

5.3 Verhouding tussen grote en kleine bevingen

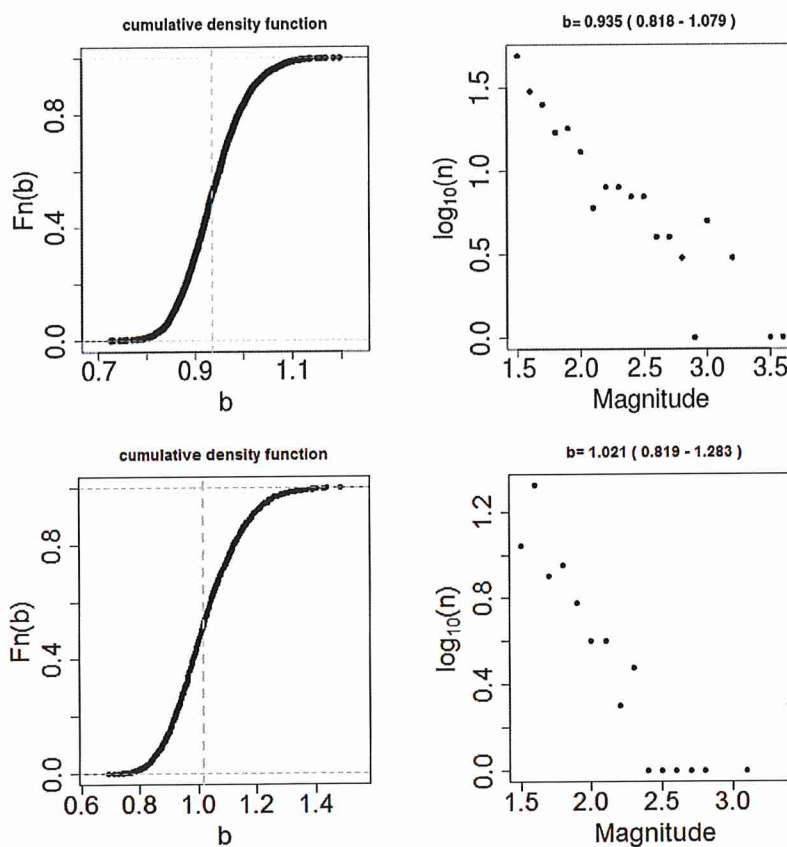
De verhouding tussen grote en kleine bevingen wordt beschreven met de methode Gutenberg-Richter (6). De parameter b (of b -waarde) heeft in seismisch actieve gebieden gebruikelijk een waarde van rond de 1,0. Een b -waarde van 1 betekent dat er 10 keer zoveel bevingen met magnitude 1,0 te verwachten zijn dan bevingen met magnitude 2,0 of groter. Een hogere b -waarde geeft aan dat er minder grotere bevingen worden verwacht ten opzichte van het aantal kleine bevingen.

Figuur 10 geeft twee zogenaamde Gutenberg-Richter plots voor het veld weer. De b -waarden zijn gegeven in Tabel 4. Zichtbaar is dat over het hele veld de b -waarde over de periode vanaf 2015 licht lijkt te zijn toegenomen ten opzichte van de periode ervoor. Door het lage aantal aardbevingen is het betrouwbaarheidsinterval groot en daardoor is niet te zeggen of dit daadwerkelijk een trend is of dat dit slechts een statistische variatie zonder onderliggende fysische grondslag is.

Tabel 4: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b -waarden waargenomen over het hele Groninger veld

Totale gebied Groningen		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2019*
P _{2.5%}	0.82	0.82
P _{50%}	0.94	1.02
P _{97.5%}	1.08	1.28

*2019 tot oktober



Figuur 10: Gutenberg-Richter plots voor het hele Groningen veld. Bovenste panelen: Periode januari 2000 tot en met december 2014. Onderste panelen: periode januari 2015 tot oktober 2019

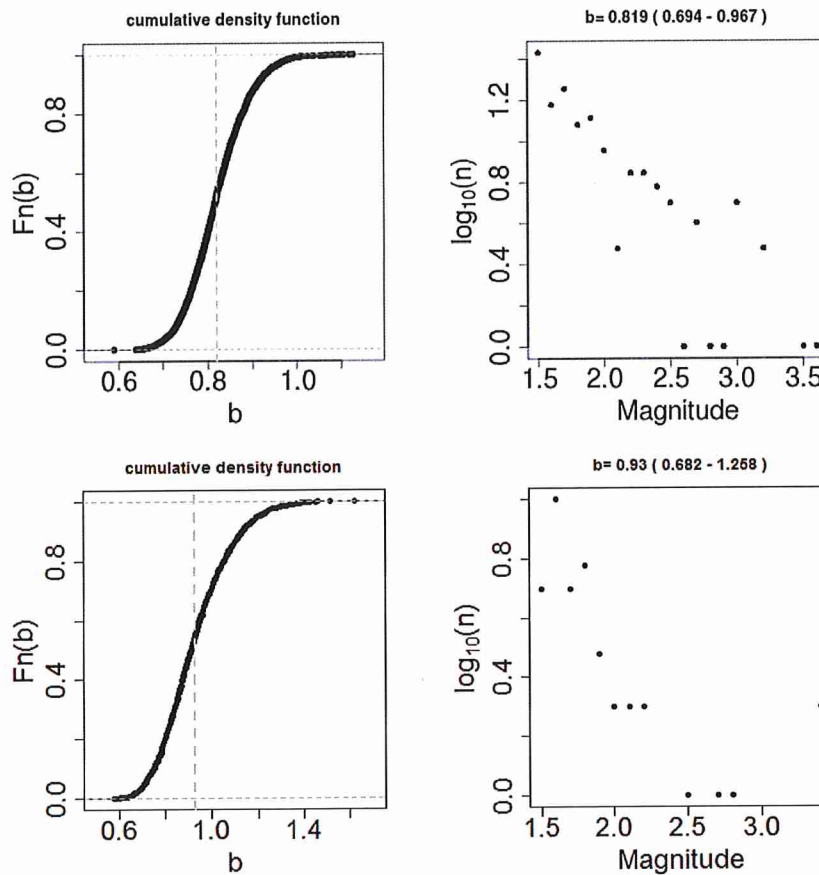
Figuur 11 en Figuur 12 geven twee Gutenberg-Richter plots voor respectievelijk de omgeving van Loppersum en het gehele veld exclusief de regio Loppersum weer. In Tabel 5 en Tabel 6 zijn de b-waarden met hun betrouwbaarheidsintervallen weergegeven.

Over de beschouwde periodes zijn de b-waarden lager in Loppersum dan in de rest van het Groningen veld. In Loppersum is het aantal aardbevingen met grotere magnitude dus relatief groter ten opzichte van het aantal aardbevingen met lagere magnitude. De b-waarde lijkt toegenomen te zijn in de recente periode; de $P_{50\%}$ b-waarde van de periode vanaf 2015 ligt buiten het $P_{2.5\%}$ en $P_{97.5\%}$ betrouwbaarheidsinterval van de periode er voor. De betrouwbaarheidsintervallen zijn echter dusdanig groot dat niet met zekerheid te zeggen is of de b-waarde daadwerkelijk toegenomen is. In de rapportage van mei 2019 (1) is een hypothesetest gedaan naar deze theorie en daaruit bleek dat het waarschijnlijk is dat de geobserveerde waarde resultaat is van natuurlijke stochastiek.

Tabel 5: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen in de regio rond Loppersum

Gebied Loppersum		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2019*
$P_{2.5\%}$	0.69	0.69
$P_{50\%}$	0.82	0.93
$P_{97.5\%}$	0.97	1.23

*2019 tot oktober

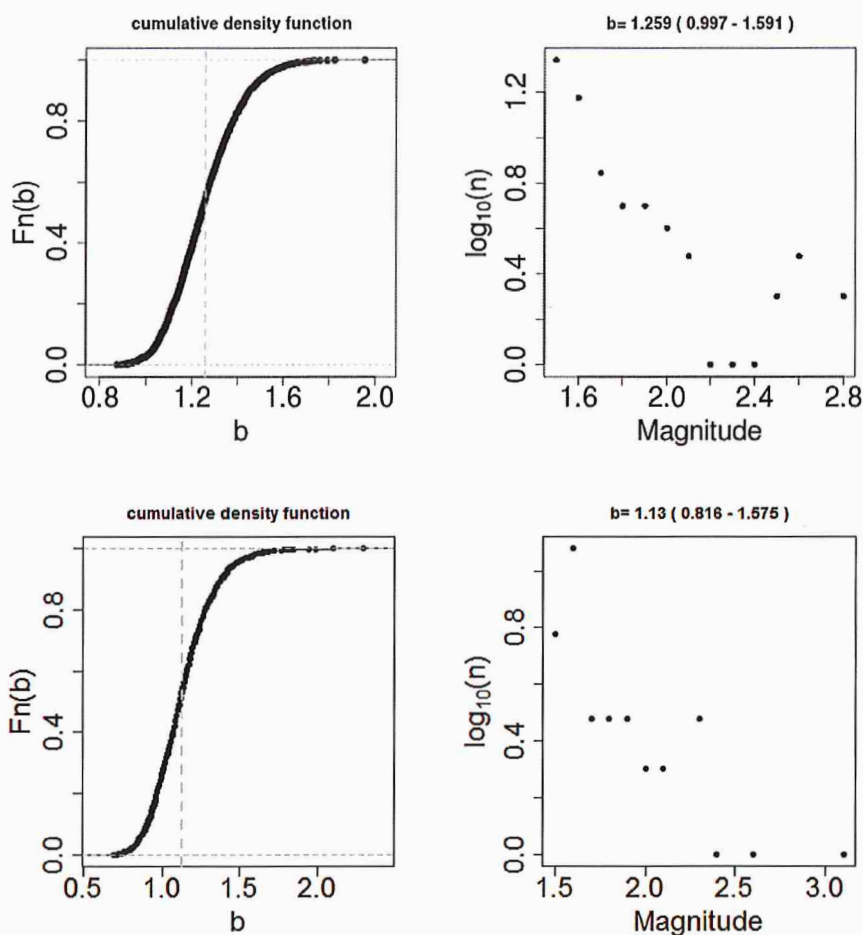


Figuur 11: Gutenberg Richter plots voor de regio Noordwest (regio Loppersum). Bovenste panelen: Periode januari 2000 tot en met december 2014. Onderste panelen: periode januari 2015 tot oktober 2019

Tabel 6: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen over het gehele veld exclusief de regio Loppersum

Gehele veld exclusief Loppersum		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2019*
P _{2.5%}	1.00	0.82
P _{50%}	1.26	1.13
P _{97.5%}	1.59	1.58

*2019 tot oktober



Figuur 12: Gutenberg Richter plots voor het gehele veld exclusief de regio Noordwest (regio Loppersum). Bovenste panelen: Periode januari 2000-december 2014. Onderste panelen: periode januari 2015 tot oktober 2019

6 Referenties

1. **NAM.** *Analyse overschrijding MRP-grenswaarde Aardbevingsdichtheid 9 september 2019.* 2019.
2. **Van Elk, Jan, et al.** *Seismic Hazard and Risk Assessment Groningen Field update for Production Profile GTS - raming 2019.* Assen : sn, 2019.
3. *Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan.* **Wiemer, Stefan en Wyss, Max.** 4, 2000, Bulletin of the Seismological Society of America, pp. 859-869.
4. **Jan van Elk, Assaf Mar-Or, Leendert Geurtsen, Per Valvatne, Eddy Kuperus, Dirk Doornhof.** *Seismic Risk Assessment for a selection of Gas Production Scenarios for the Groningen field.* 2018.
5. **Jan van Elk, Dirk Doornhof.** *Induced Seismicity in Groningen - Assessment of Hazard, Building Damage and Risk.* 2017.
6. **B. Gutenberg, C.F. Richter.** Magnitude and Energy of Earthquakes. *Annali di Geofisica.* 9: 1-15, 1956.