RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2020

[Deze pagina is opzettelijk leeg gelaten]

Inhoudsopgave

1 Samenvatting 1
2 Inleiding en leeswijzer 3
2.1 Inleiding 3
2.2 Leeswijzer 4
2.3 Meetnetwerk en meetnauwkeurigheid 4
3 Trendparameters 6
3.1 Trendparameter aantal aardbevingen 6
3.2 Aardbevingsdichtheid 7
4 Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit 9
4.1 Aantal aardbevingen 9
4.2 De Loppersum aardbeving 10
4.3 Distributie van aardbevingen over het Groningenveld 11
4.4 Statistische analyse naar de ontwikkeling aardbevingen 13
Verloop van het aantal bevingen door de tijd 13
Verband productie en seismiciteit per productie locatie cluster 15
Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd 17
Verhouding tussen grote en kleine bevingen 19
5 Referenties 24
Appendix A - Aardbevingscatalogus 1 oktober 2019 tot 1 oktober 2020 25

[Deze pagina is opzettelijk leeg gelaten]

1 Samenvatting

Deze rapportage is opgesteld om te voldoen aan Mijnbouwregeling artikel 1.3a.5 waarin staat dat de houder van de winningsvergunning Groningenveld twee keer per kalenderjaar een rapportage opstelt over ontwikkelingen in de seismiciteit. In dit artikel staat ook dat de seismiciteit wordt gemonitord door middel van het continu bijhouden van vier parameters.

In de Mijnbouwregeling zijn deze vier parameters onderverdeeld in twee zogenoemde trendparameters en in twee zogenoemde incidentparameters. De aardbevingsdichtheid en het aantal bevingen ('activity rate') zijn de 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 de incidentparameters.

Aantal aardbevingen (activity rate)

Het aantal geregistreerde aardbevingen met een magnitude groter dan of gelijk aan $M_L \geq 1{,}5$ is in de afgelopen twaalf maanden toegenomen van 11 naar 15.

Aardbevingsdichtheid

Aardbevingsdichtheid is gedefinieerd als het aantal geobserveerde aardbevingen per vierkante kilometer per jaar en wordt berekend voor het hele Groningenveld. In een deel van het veld rond Loppersum is de aardbevingsdichteid afgenomen tot 0.16 aardbevingen per vierkante kilometer per jaar. Boven de rest van het veld is de aardbevingsdichtheid niet verhoogd en bevindt deze zich onder de laagste grenswaarde zoals gedefinieerd in Mijnbouwregeling Artikel 1.3a.6.

Trend in seismiciteit

Het aantal aardbevingen en de aardbevingsdichtheid laten vanaf 2015 een dalende trend zien. In de afgelopen twaalf maanden zijn er 15 aardbevingen boven het Groningenveld met een magnitude van $M_L \geq 1.5$ geregistreerd. De zwaarste aardbeving was die bij Loppersum op 14 juli 2020 met een magnitude van $M_L = 2{,}7$. Het aantal aardbevingen met een kleinere magnitude tussen 1,0 (en gelijk aan) en 1,5 is in deze periode afgenomen tot 17 ten opzichte van 29 in de vorige rapportage periode. Het aantal geregistreerde aardbevingen en een statistische analyse hiervan wijzen op een gelijkblijvend niveau van seismiciteit, wel is een daling 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.

Incidentparameters 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 vastgestelde grenswaarden.

Aardbeving Loppersum

De aardbeving met de grootste magnitude tijdens de rapportage periode was de Loppersum aardbeving met een magnitude van $M_L = 2{,}7$ op 14 juli 2020. In de Speciale Rapportage voor de Loppersum aardbeving (Ref. 1) is een gedetailleerde analyse van de gemeten grondversnellingen voor deze aardbeving opgenomen. De belangrijkste conclusie van deze analyse is dat de bewegingen die

zijn geregistreerd voor de aardbeving in Loppersum in grote lijnen in overeenstemming zijn met eerdere registraties van aardbevingen in Groningen en daardoor dus ook goed overeenkomen met de resultaten van de empirische methode voor het voorspellen van grondbeweging (de empirische GMPE).

Aanpassingen seismisch monitoring

Op 14 oktober 2020 zijn de monitoringsparameters en de daarbij horende grenswaarden aangepast op advies van SodM (Ref. 2). Deze rapportage is gebaseerd op de in de rapportage periode geldende monitoringsparameters en grenswaarden. Een vergelijking tussen de verschillende monitoringsregimes is opgenomen in de speciale rapportage voor de Loppersum aardbeving (Ref. 1).

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 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 in dit rapport zijn bijgewerkt tot 1 oktober 2020. Het rapport kijkt in principe een jaar terug maar daar waar relevant wordt verder teruggekeken om seismische ontwikkelingen in hun historische context te plaatsen.

In Mijnbouwregeling artikel 1.3a.6.1a tot en met f is beschreven welke actie moet worden genomen bij welke waarnemingsniveau overschrijding, dit is samengevat in Tabel 1. In Mijnbouwregeling artikel 1.3a.8 is beschreven welke actie genomen moet worden bij overschrijding van een signaalparameter waarnemingsniveau, zie Tabel 2.

Tabel 1 Beschrijving van welke actie ondernomen wordt bij overschrijding van een trendparameter waarnemingsniveau volgens Mijnbouwregeling artikel 1.3a.6. Meldingen worden gedaan aan de Minister van Economische Zaken en Klimaat en de Inspecteur-generaal der Mijnen.

Trendparameter	Waarnemings Niveau	Melding	Analyse
Aantal aardbevingen $M_L \geq 1,5$	15	Waarneming melden binnen 48 uren.	Analyse van de ontwikkeling van seismiciteit binnen 14 dagen.
	20	Idem	Idem
	25	Idem	Idem
Aardbevingsdichtheid	0,17	Waarneming melden binnen 48 uren.	Analyse van de ontwikkeling van seismiciteit binnen 14 dagen.
	0,25	Idem	Idem
	0,40	Idem	Idem

Tabel 2 Beschrijving van welke actie ondernomen wordt bij overschrijding van een signaalparameter waarnemingsniveau volgens Mijnbouwregeling artikel 1.3a.8. Meldingen worden gedaan aan de Minister van Economische Zaken en Klimaat en de Inspecteur-generaal der Mijnen

Signaalparameter	Waarnemings niveau	Melding	Analyse
Grondversnelling	> 0,08	Terstond waarneming melden	Eerste analyse binnen 48 uren, nadere analyse binnen 14 dagen.
Grondsnelheid	50 mm/s	Idem	Idem

2.2 Leeswijzer

Voor de in dit rapport besproken analyses wordt de dataset van geregistreerde aardbevingen onderverdeeld in vier magnitude-klassen. Dit is gedaan vanwege de verschillen in compleetheid en omvang van de vier subsets, die daardoor statistisch niet direct vergelijkbaar zijn.

Om de leesbaarheid te vergroten wordt voor elke klasse de volgende vaste kleur gebruikt in de verschillende figuren.

- Groen: Bevingen met een magnitude[1] 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 $M_L = 2,0$

In dit rapport wordt een , (komma) gebruikt als scheidingsteken voor decimalen, en een . (punt) voor duizendtallen.

2.3 Meetnetwerk en meetnauwkeurigheid

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 grondbeweging en vier ondergronds geplaatste geofoons voor nauwkeurige plaatsbepaling en aardbevingssterkte. Daarnaast zijn ook 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.

Het seismische meetnetwerk boven het Groningenveld is in 2014 uitgebreid met 69 nieuwe seismische meetstations. Hierdoor is de gevoeligheid van het meetnetwerk toegenomen. In de periode van 2003 tot en met 2014 werden alle bevingen in het Groningenveld met een magnitude groter dan $M_L = 1,5$ op de schaal van Richter geregistreerd. Vanaf 2014 worden alle aardbevingen met een magnitude groter dan $M_L = 1,0$ op de schaal van Richter boven het Groningenveld geregistreerd. Voor 2014 werden ook enkele bevingen met een magnitude boven de $M_L = 1,2$ geregistreerd, maar door de lagere gevoeligheid van het meetnetwerk is het niet zeker of alle bevingen met een magnitude tussen de $M_L = 1,2$ en de $M_L = 1,5$ geregistreerd zijn. Daardoor kan het werkelijke aantal bevingen onderschat zijn.

Magnitude van compleetheid

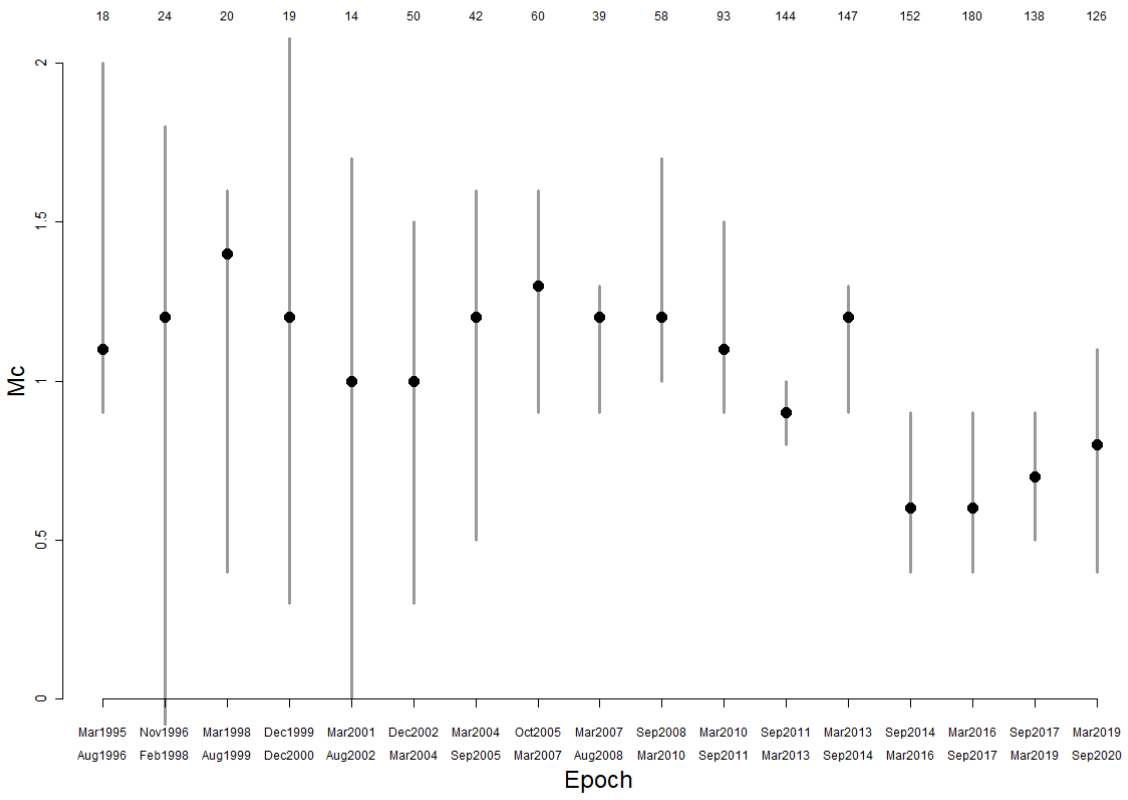
De magnitude van compleetheid (magnitude of completeness of MoC) is de laagste magnitude M_L waarvoor elke beving waargenomen kan worden, ongeacht positie in het reservoir. Bevingen met een magnitude kleiner dan de MoC kunnen waargenomen worden wanneer deze zich voordoen op een voor het meetnetwerk 'gunstige' locatie. Wanneer de beving zich voordoet op een andere locatie zou het kunnen dat deze niet wordt waargenomen. Voor bevingen met een magnitude groter dan de MoC geldt dat deze wordt waargenomen, ongeacht locatie in het reservoir. De MoC wordt afgeleid uit de waarnemingen en is onderhevig aan een bepaalde mate van onzekerheid.

Voor statistisch onderzoek is het van belang een goede MoC te veronderstellen. Is de veronderstelde MoC te hoog dan is de dataset kleiner dan mogelijk en is het moeilijker statistisch relevante conclusies

[1] De sterkte van de aardbevingen worden in dit rapport aangeduid in Local Magnitude Scale of M_L (Ref. 3)

aan de data te verbinden. Is de MoC te laag aangenomen dan is de dataset incompleet en worden mogelijkerwijs foutieve conclusies uit de dataset afgeleid.

De MoC is afgeleid volgens de maximum curvature method (Ref. 4) en de resultaten met het 95% betrouwbaarheidsinterval zijn weergegeven in Figuur 1. In de figuur is duidelijk zichtbaar dat vanaf 2014 de MoC afneemt (ook kleinere aardbevingen worden geregistreerd). Vanaf 2014 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 $M_L \geq 1{,}2$ en zeer waarschijnlijk compleet voor bevingen met een magnitude $M_L \geq 1{,}5$. In deze rapportage wordt een MoC van 1,0, 1,2, 1,3 of 1,5 verondersteld, ondermeer afhankelijk van hoe ver teruggekeken wordt in de tijd.

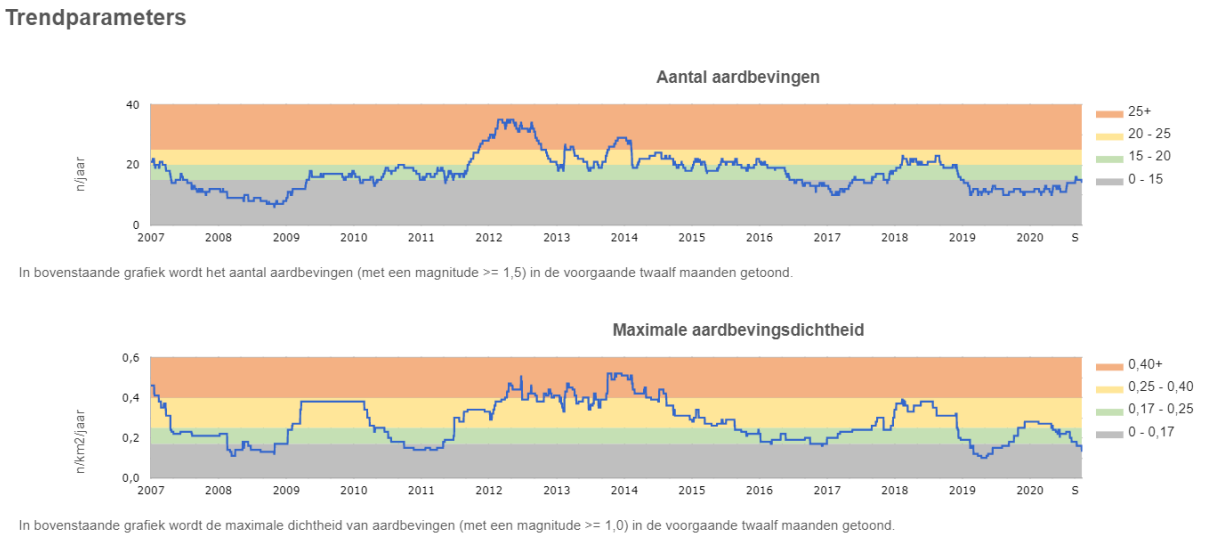


Figuur 1: Magnitude of Completeness met onzekerheidsintervallen voor verschillende periodes, met de stip wordt de P50 waarde aangegeven.

Tijdens de periode maart tot oktober 2020, is in veel gebieden de door menselijk handelen veroorzaakte omgevingsruis relatief laag geweest (Ref. 5).

3 Trendparameters

Het aantal aardbevingen en de aardbevingsdichtheid zijn de trendparameters. De trendparameters worden continu bijgehouden en in de vorm van een trendlijngrafiek getoond op de website van NAM, https://www.nam.nl/feiten-en-cijfers/aardbevingen.html , zie Figuur 2. In Tabel 3 zijn de waarden van deze trendparameters over de afgelopen 6 maanden gepresenteerd.



Figuur 2 Trendparameters, in de bovenste grafiek wordt het aantal waargenomen aardbevingen met een magnitude 1,5 of groter in de voorgaande twaalf maanden getoond. In de onderste grafiek wordt de maximale aardbevingsdichtheid (voor aardbevingen met een magnitude van 1,0 of groter) in de voorgaande twaalf maanden getoond.

Tabel 3 Trendparameter overzicht mei tot oktober 2020

	mei	jun	jul	aug	sep	okt
Aantal aardbevingen (M_L≥1,5)	11	12	11	14	14	14
Aardbevingsdichtheid	0,27	0,22	0,22	0,23	0,18	0,16

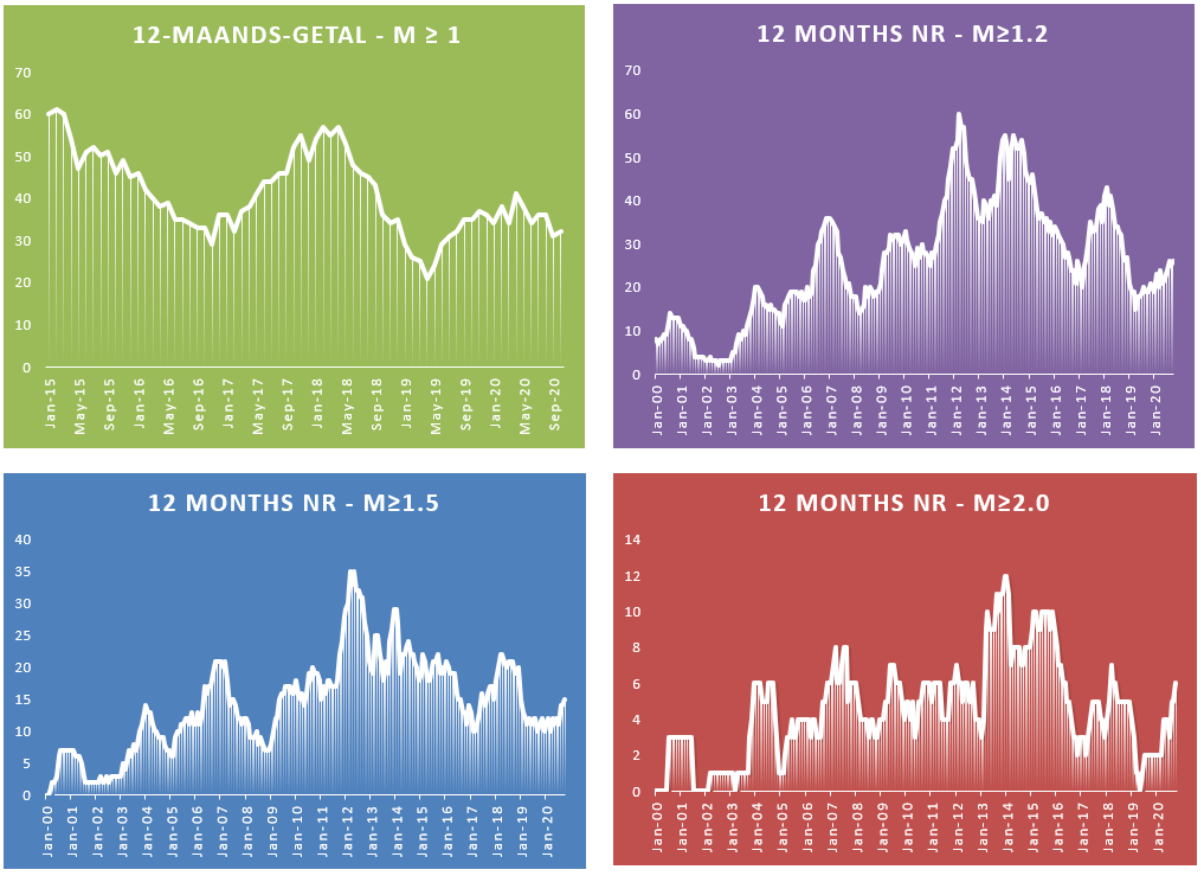
3.1 Trendparameter aantal aardbevingen

De trendparameter “Aantal aardbevingen” toont het aantal waargenomen aardbevingen met een magnitude M_L=1,5 of groter in de voorgaande twaalf maanden. Dit wordt ook het rollende aantal of 12-maandsgetal genoemd. Het 12-maandsgetal van oktober 2020 is dus de som van het aantal aardbevingen van een bepaalde magnitude in de periode van 1 oktober 2019 tot 1 oktober 2020.

Figuur 3 laat het 12-maandsgetal zien over een langere periode voor vier magnitude-klassen. Hierbij geldt dat de data van bevingen met een magnitude onder de M_L = 1,5 in de periode voor 2014 mogelijk incompleet is vanwege beperkingen in het meetsysteem in die periode, zie ook hoofdstuk 2.3.

De stabiel lage trend in het aantal aardbevingen (met magnitude groter dan 1,0 en 1,5) zou het gevolg kunnen zijn van de verlaagde productievolumes en de manier van opereren maar ook van de natuurlijke variabiliteit. Het lage aantal events maakt het lastig conclusies te trekken, in hoofdstuk 4 wordt hier verder op in gegaan. Informatie over het verband tussen de seismiciteit en de

productievolumes en manier van opereren kan gevonden worden in de Hazard and Risk Analyses (Ref 6, 7 en 8).

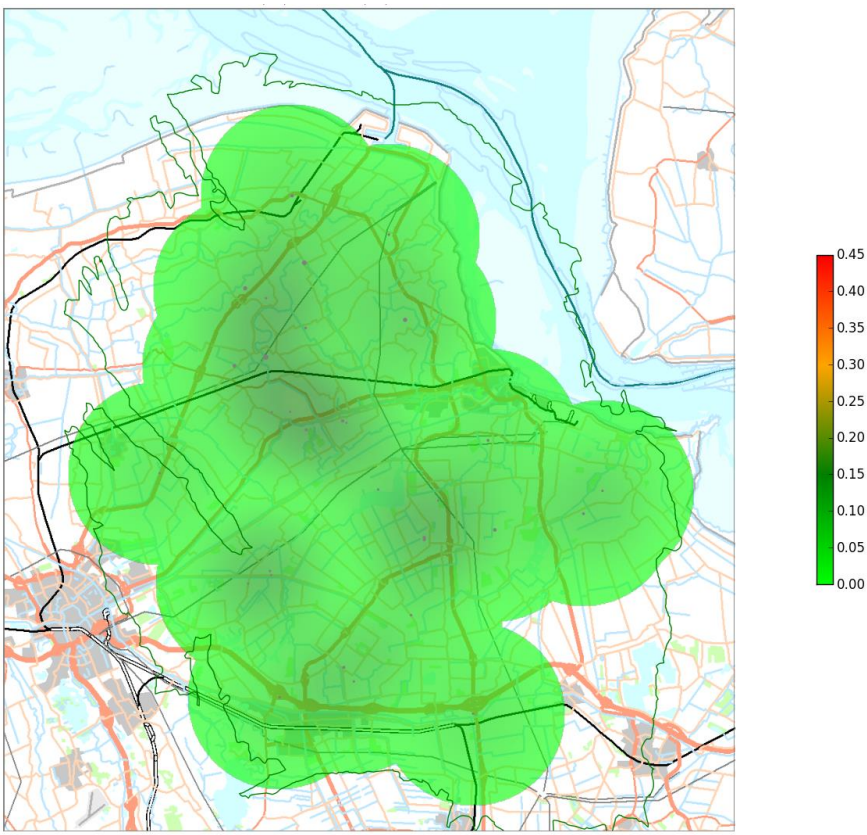


Figuur 3: 12-maandsgetallen voor vier magnitude-klassen; waarnemingen voor $M_L \geq 1{,}0$ weergegeven vanaf 2014, de overige waarnemingen sinds 2000

3.2 Aardbevingsdichtheid

Figuur 4 toont een kaart met daarop de aardbevingsdichtheid en de epicentra van de in de periode 30 september 2019 tot 1 oktober 2020 geregistreerde aardbevingen. Aardbevingsdichtheid wordt berekend met de Quartic Kernel functie. Alle geregistreerde aardbevingen met een magnitude van M_L = 1,0 en hoger zijn hierin opgenomen. De berekende aardbevingsdichtheid wordt getoond door middel van een kleurenschaal. Als trendparameter wordt de maximale waarde van de berekende aardbevingsdichtheid over de voorgaande twaalf maanden gebruikt.

Op 3 december 2019 bereikte de maximale aardbevingsdichtheid in het Groningen veld een waarde van 0,28 bevingen/km^2/jaar. Hiermee overschreed de aardbevingsdichtheid het niveau van 0,25 bevingen/km^2/jaar waarna een speciale tussentijdse rapportage is uitgebracht met daarin een analyse naar de ontwikkeling van seismiciteit (Ref. 9). Sindsdien laat de maximale aardbevingsdichtheid een dalende trend zien. Inmiddels is deze gedaald tot 0,16 bevingen/km/jaar.



Figuur 4: Aardbevingsdichtheidskaart voor bevingen met een magnitude $M_L \geq 1{,}0$ weergegeven in de twaalf maanden voorafgaand aan 1 oktober 2020. De maximale waarde in deze kaart komt overeen met de trendparameterwaarde.

4 Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van nadere analyse van de trends en patronen van de trendparameters opgenomen, te weten:

1. Regionale verschillen
2. Een statistische analyse van de hoeveelheid aardbevingen over tijd
3. Veranderingen in de verhouding tussen kleine en grote bevingen (b-factor Gutenberg-Richter)
4. Anomale PGA/PGV bij een bepaalde aardbevings-magnitude

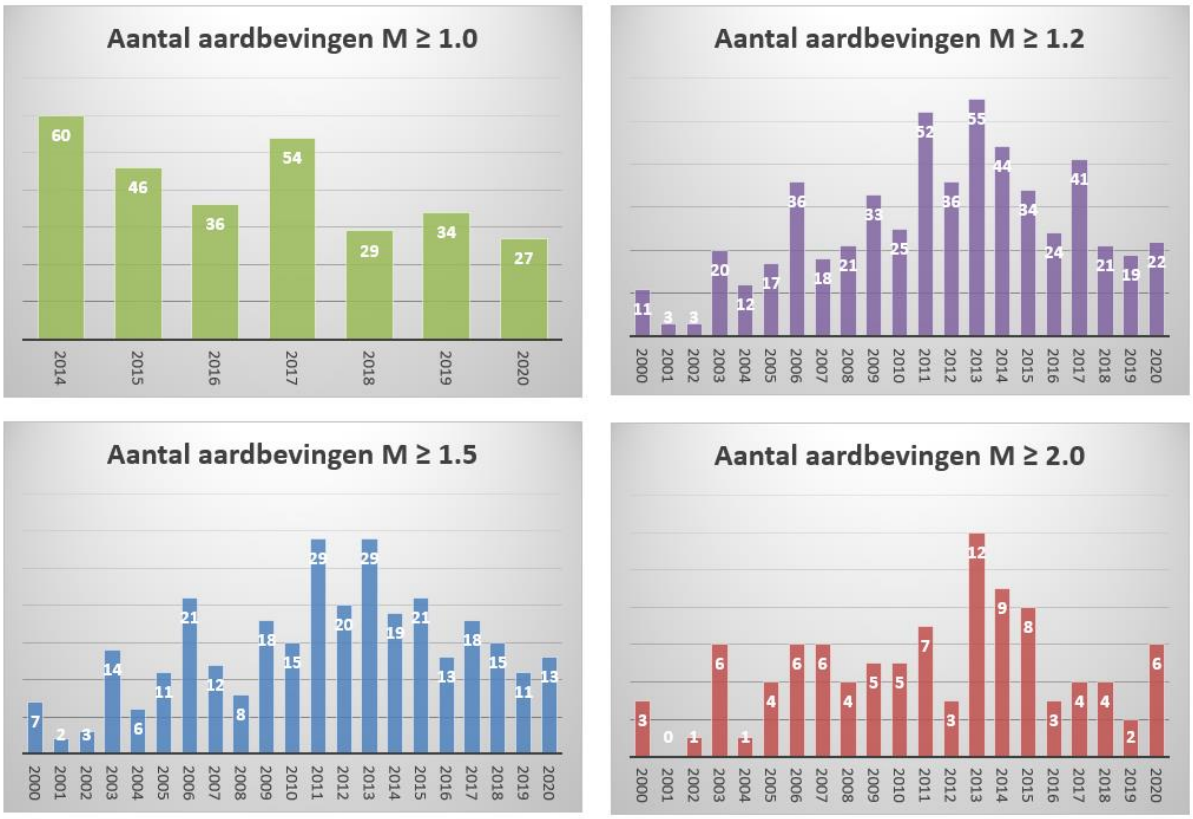
4.1 Aantal aardbevingen

In de afgelopen twaalf maanden zijn in totaal 32 aardbevingen geregistreerd met een magnitude groter of gelijk aan $M_L \geq 1{,}0$. Het aantal aardbevingen per maand onderverdeeld in vier magnitudeklassen is opgenomen in Tabel 4. In de voorgaande periode (september 2018 tot oktober 2019) zijn er 41 aardbevingen geregistreerd.

Figuur 5 laat de ontwikkeling van het aantal aardbevingen per jaar zien voor verschillende magnitude-klassen. Het panel linksboven (groene kleur) laat het jaarlijks aantal aardbevingen zien voor $M_L \geq 1{,}0$ (waarbij opgemerkt moet worden dat 2020 over de periode tot oktober weergegeven is en dat er vanwege incompleetheid van de data voor 2014, er geen data van voor 2014 getoond is voor $M_L \leq 1{,}2$). Er zijn statistische aanwijzingen dat de dataset boven de $M_L = 1{,}2$ wel compleet zou kunnen zijn (ook voor de periode voor 2014), zie hiertoe ook de uiteenzetting in sectie 2.3. Dit is de reden dat deze geplot is vanaf het jaar 2000 (paneel rechtsboven, paarse kleuren). Het linker paneel beneden (blauwe kleuren) laat bevingen zien met een magnitude van $M_L \geq 1{,}5$. Deze dataset is vrijwel zeker compleet vanaf 2000 en kan dus goed gebruikt worden om een historisch overzicht te geven van de seismische ontwikkeling. Het paneel rechts beneden tenslotte (in de rode kleuren), toont het aantal bevingen met een magnitude $M_L \geq 2{,}0$.

Tabel 4: Aantal waargenomen aardbevingen het afgelopen jaar.

Maand	$1{,}0 \leq M_L < 1{,}5$	$1{,}5 \leq M_L < 2{,}0$	$2{,}0 \leq M_L < 2{,}5$	$M_L \geq 2{,}5$	Totaal
okt-19	2	1	0	0	3
nov-19	1	0	0	0	1
dec-19	0	1	0	0	1
jan19	3	1	0	0	4
feb-19	0	0	0	0	0
mar-19	5	1	2	0	8
apr-19	0	1	0	0	1
mei-19	1	1	0	1	3
jun-19	4	1	0	0	5
jul-20	1	1	1	1	4
aug-20	0	0	0	0	0
sep-20	0	1	1	0	2
Totaal	17	9	4	2	32



Figuur 5: Aantal aardbevingen per jaar voor vier verschillende magnitude-klassen. Het aantal aardbevingen in 2020 is aangegeven voor de periode tot oktober 2020.

4.2 De Loppersum aardbeving

De zwaarste aardbeving in deze rapportage periode was de aardbeving bij Loppersum op 14 juli 2020 met een magnitude van $M_L = 2,7$. NAM heeft hier een speciale rapportage over geschreven (Ref. 1) die is gepubliceerd op de webpagina onderzoeksrapporten van www.nam.nl. Deze aardbeving bij Loppersum heeft een groot aantal grondbewegingsopnames opgeleverd. De grootste component van PGA die is geregistreerd tijdens deze aardbeving is 0,05 g en de grootste waarde van PGV - die algemeen wordt beschouwd als een betere indicator van het schadepotentieel van de beweging - die is geregistreerd bij deze laatste gebeurtenis is 0,91 $^{cm}/_{s}$, wat aanzienlijk kleiner is dan de grootste waarde van de Groningse grondbewegingsdatabase, een 3,46 $^{cm}/_{s}$ gemeten bij de aardbeving in Huizinge.

Een belangrijke observatie is dat de bewegingen die zijn geregistreerd bij de aardbeving in Loppersum in grote lijnen overeenkomen met de voorspellingen van het grondbewegingsmodel dat momenteel wordt gebruikt in de seismische dreigings- en risicomodellering voor Groningen en de empirische PGV GMPE's die worden gebruikt in de beoordeling van schadeclaims.

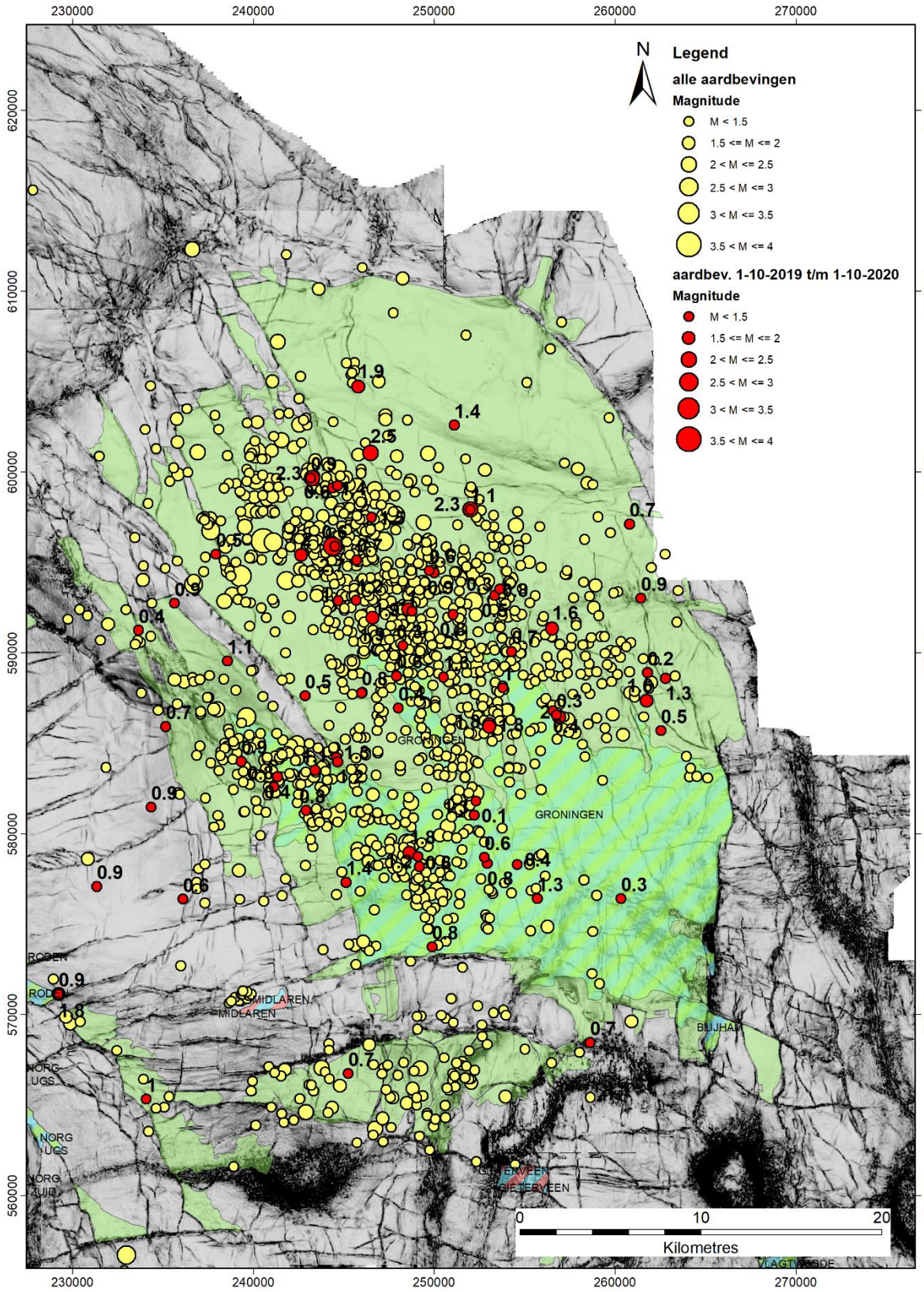
Een analyse gebaseerd op Full Waveform Inversion toonde aan dat de aardbeving nabij een op de kaart geïdentificeerde breuk plaats vond en het bronmechanisme oplijnt met de oriëntatie van deze breuk. De diepte van het hypocentrum komt overeen met de diepte van het Rotliegend gasreservoir.

Het gebied rond het epicentrum is landelijk met een relatief lagere dichtheid van bebouwing. Ongeveer 3,400 bewoonde gebouwen zijn blootgesteld aan een maximale grondsnelheid (P75 PGV) groter dan 2 $^{mm}/_{s}$, de grenswaarde voor schade bij herhaalde trillingen voor een kwetsbaar gebouw. Twee dagen na de Loppersum aardbeving (op 16 juli) schatte TCMG het aantal meldingen van schade als gevolg van deze aardbeving op rond de 600.

Op 20 km (en dus ook op 40 km) van het epicentrum van de Loppersum aardbeving waren de trillingsniveaus veroorzaakt door de aardbeving vergelijkbaar met die van het achtergrondniveau bij normaal gebruik. Vibraties van dit niveau kunnen geen structurele schade veroorzaken. Ook schade aan wegen en bruggen wordt niet verwacht.

4.3 Distributie van aardbevingen over het Groningenveld

De distributie van aardbevingen over het Groningenveld is getoond op de kaart in Figuur 6. De locaties van de in de periode september 2019 tot oktober 2020 (12 maanden) geregistreerde aardbevingen vallen goed samen me de eerder geregistreerde aardbevingen.



Figuur 6 Kaart van de diepe ondergrond met daarop in groen het Groningengasveld en de omliggende gasvelden. Met rode stippen zijn de in de periode oktober 2019 tot oktober 2020 geregistreerde aardbevingen aangegeven. Alle aardbevingen zijn aangegeven met gele cirkels. De grootte van een cirkel is maat voor de magnitude van de aardbeving.

4.4 Statistische analyse naar de ontwikkeling aardbevingen

Verloop van het aantal bevingen door de tijd

Deze analyse is uitgevoerd om de statistische significantie van de ontwikkeling van de trend van het aantal aardbevingen per kwartaal te duiden.

Om dit inzichtelijk te maken zijn twee grafieken gemaakt van het aantal aardbevingen per kwartaal met betrouwbaarheidsintervallen van de te verwachten hoeveelheid aardbevingen; één onder de aanname dat de seismische events Poisson verdeeld zijn (Figuur 7); één onder de aanname dat de events quasi-Poisson verdeeld zijn (Figuur 8). De betrouwbaarheidsintervallen helpen bij de interpretatie van de data. Een seismisch relatief rustige periode kan het gevolg zijn van veranderingen in geproduceerde volumes, maar kan ook op toeval berusten.

De Poisson verdeling geeft een redelijke beschrijving van de data onder de aanname dat de bevingen ongecorreleerd zijn. Deze aanname is echter niet geheel correct omdat naschokken plaats vinden.

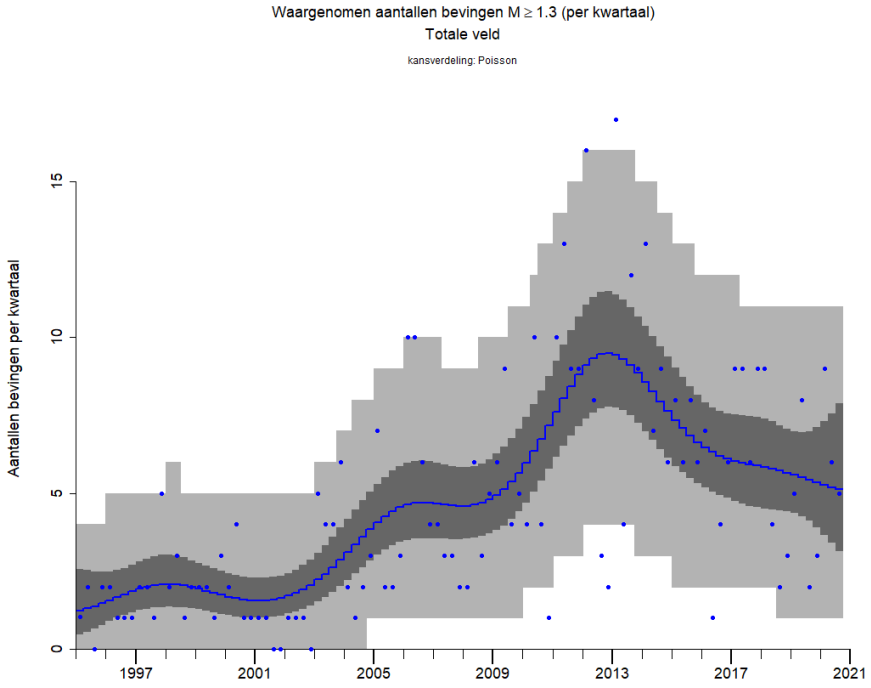
De quasi-Poisson kan gebruikt worden om een hogere mate (ten opzichte van de Poisson) aan variabiliteit in aantallen bevingen tussen kwartalen te beschrijven. Deze hogere mate van variabiliteit kan ontstaan door een bepaalde mate van correlatie tussen de events door naschokken.

De statistische analyse gebaseerd op de quasi-Poisson is meer robuust en resulteert in grotere onzekerheidsmarges. Beide plots bevatten de volgende informatie:

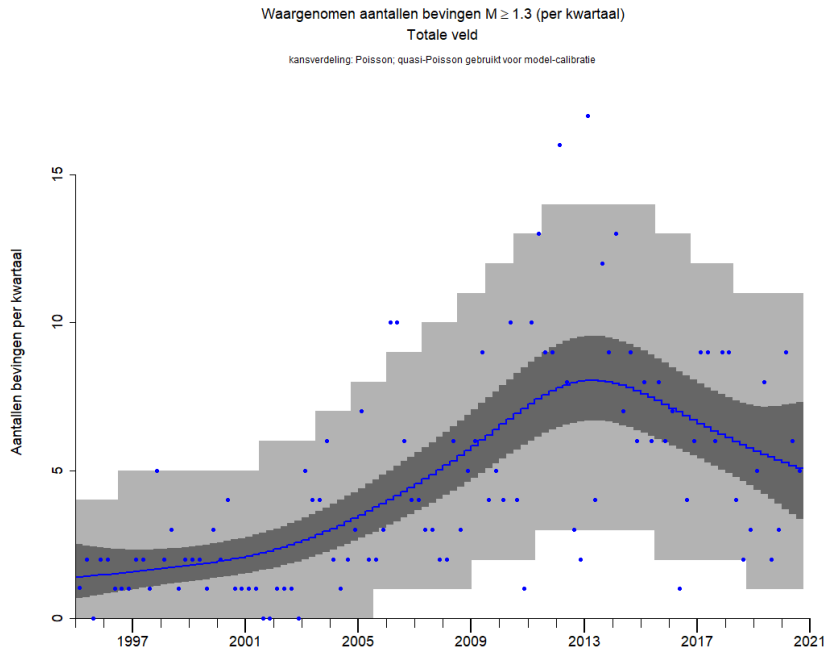
- Blauwe stippen voor het aantal seismische events dat kwartaal
- Een blauwe lijn die de trendlijn van het aantal te verwachten seismische events weergeeft
- Een donkergrijze band; het 95% betrouwbaarheidsinterval van de trendlijn.
- Een lichtgrijze band; het 95% voorspellingsinterval van het aantal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

Beide manieren van beschouwen van de data geven grofweg hetzelfde beeld. Het aantal aardbevingen nam toe in de periode van 2001 tot een maximum in 2012. Hierna laat het aantal bevingen een neergaande trend zien in de periode van 2013 tot 2020. 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 trend voor de laatste maanden is met minder zekerheid af te leiden dan de trend op een punt waar alle data twee jaar ervoor en er na bekend is.

Uit deze analyse is te concluderen dat er statistisch bewijs is dat de frequentie van het voorkomen van aardbevingen een neergaande trend laat zien.



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



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

Verband productie en seismiciteit per productie locatie cluster

In welke mate de over een korte periode waargenomen variaties in de seismische monitorings parameters een gevolg zijn van de wijze van opereren, van de lagere geproduceerde volumes of van de natuurlijke variabiliteit in seismiciteit is niet direct vast te stellen. Er zijn modellen opgesteld waarmee seismische dreiging en risico kunnen worden geanalyseerd. Meer informatie hierover kan gevonden worden in verschillende rapporten die van de NAM-site te downloaden zijn (Ref 10, 11, 12, 13 and 14).

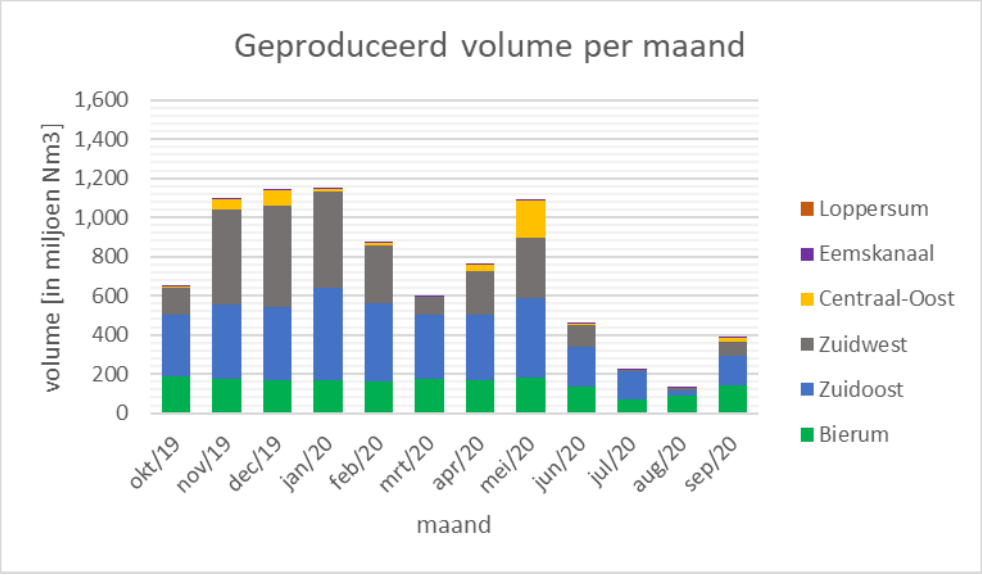
Het Groningenveld is onderverdeeld in een aantal clusters zoals beschreven in de Mijnbouwregeling artikel 1.3a.1. In Tabel 5 is de verdeling van productielocaties per cluster opgenomen.

Tabel 5: Overzicht productielocaties per cluster volgens Mijnbouwregeling artikel 1.3a.1.

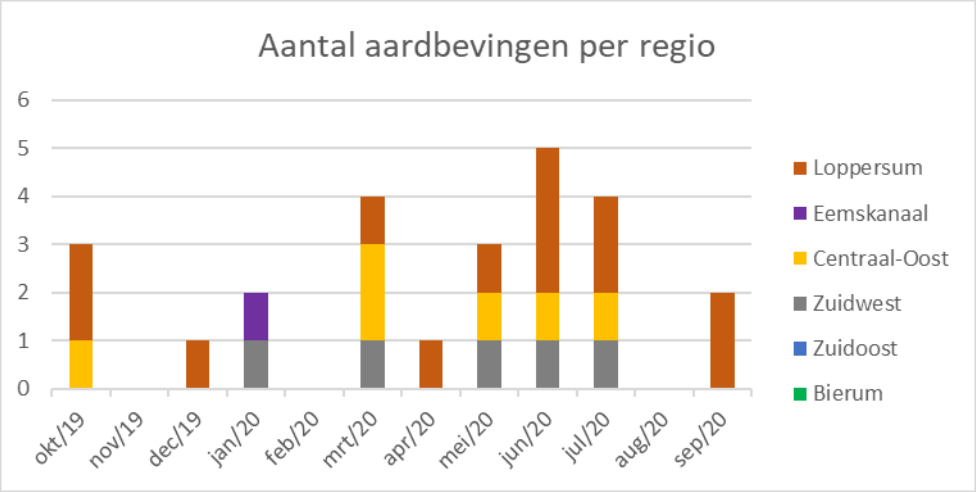
Cluster	Productielocatie
Eemskanaal	Eemskanaal
Bierum	Bierum
Loppersum	Leermens Overschild De Paauwen Ten Post 't Zandt
Zuidoost	Zuiderpolder De Eeker Scheemderzwaag

Cluster	Productielocatie
Zuidwest	Zuiderveen Spitsbergen Tusschenklappen/Sappemeer Kooipolder Slochteren/Froombosch
Centraal-Oost	Oudeweg Schaapbulten Amsweer Siddeburen Tjuchem

In Figuur 9 is de productie per cluster van productielocaties opgenomen over het voorgaande jaar. De productie uit het Loppersum cluster is per februari 2018 beëindigd. In Figuur 10 is het aantal aardbevingen van magnitude $M_L \geq 1{,}0$ geplot per cluster. Hoewel er geen gas wordt geproduceerd uit het Loppersum cluster is het aantal geregistreerde aardbevingen in deze cluster het hoogst.



Figuur 9 Geproduceerd volume per maand per cluster

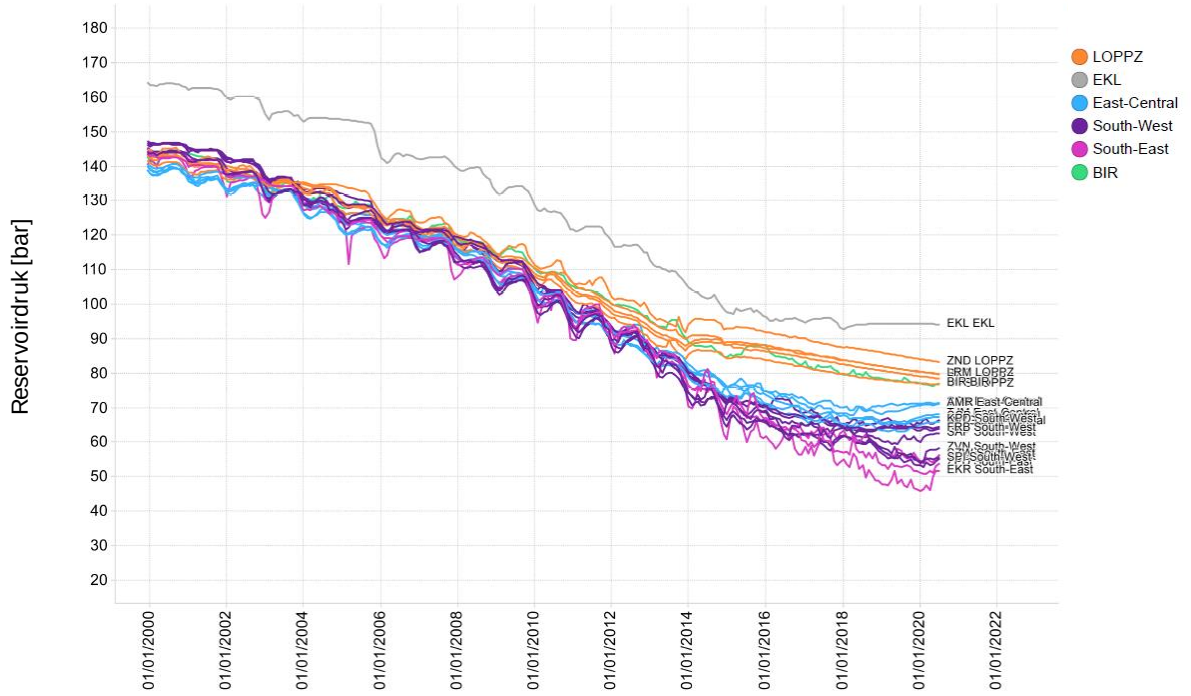


Figuur 10 Aantal aardbevingen per cluster

In Figuur 11 is de reservoirdruk per cluster weergegeven. In deze figuur is duidelijk zichtbaar dat de druk in de cluster van productie locaties rond Loppersum blijft dalen (oranje lijn), ook sinds de productie vanuit deze cluster is gestaakt in februari 2018. Deze daling van reservoirdruk in de cluster Loppersum is een gevolg van herverdeling van de reservoirdruk als gevolg van productie uit andere delen van het veld en de drukgradiënt over het veld die daardoor is ontstaan sinds het verminderen van de Loppersum productie in 2014. Deze reservoirdruk daling is de verklaring voor de toenemende aardbevingsdichtheid in de cluster Loppersum.

Figuur 11 toont dat de reservoirdruk in de cluster Centraal-Oost (blauwe lijnen, elke productie locatie wordt weergegeven door een aparte lijn) na 2018 stabiliseert en zelfs toeneemt ondanks de gasproductie uit dit cluster. De stijging is ook een gevolg van de herverdeling van de reservoirdruk. Of de aardbevingsdichtheid in de cluster Centraal-Oost is laag, of dat de reservoirdruk stijging een effect heeft op de aardbevingsdichtheid, zie Figuur 12, is niet met zekerheid te concluderen.

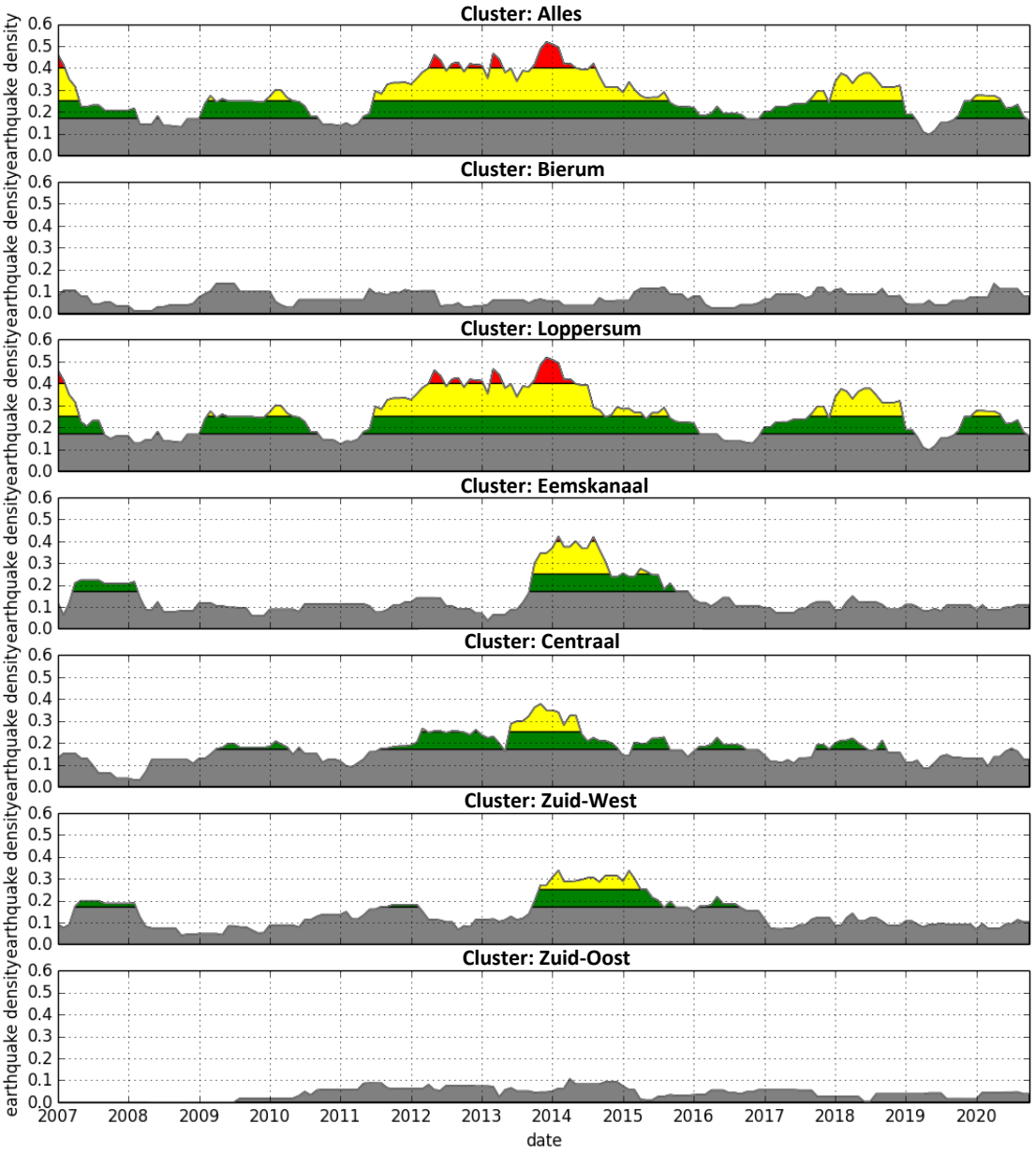
Informatie over het verband tussen de seismiciteit, productievolumes en manier van opereren kan gevonden worden in de Hazard and Risk Analyses (Ref 6, 7 en 8).



Figuur 11: Reservoir drukdaling in Groninger gasveld op basis van het gekalibreerde Groningen reservoirmodel. Merk op dat de druk in de cluster Loppersum (LOPPZ) ook bij verminderde en stilgelegde productie daalt.

Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd

De maximum waarde van de aardbevingsdichtheid als functie van de tijd over het gehele veld en per deelgebied is weergegeven in Figuur 12. Duidelijk zichtbaar is de hogere maximale aardbevingsdichtheid in de periode van 2012 tot 2014 over het veld en in het gebied Loppersum in het bijzonder. Sinds het eind van 2018 is de aardbevingsdichtheid over het gehele veld laag vergeleken met voorgaande jaren. Dit geldt ook voor de aardbevingsdichtheid in het gebied Loppersum. De gebieden tussen de verschillende grenswaarden voor rapportage en analyse op basis van aardbevingsdichtheid volgens de Mijnbouwwet zijn aangegeven in de kleuren groen, geel en rood.



Figuur 12: De ontwikkeling van aardbevingsdichtheid over de jaren in het gehele Groningenveld en kleinere gebieden binnen het Groningenveld, weergegeven in aantal bevingen met een M_L>1,0 per km² per jaar.

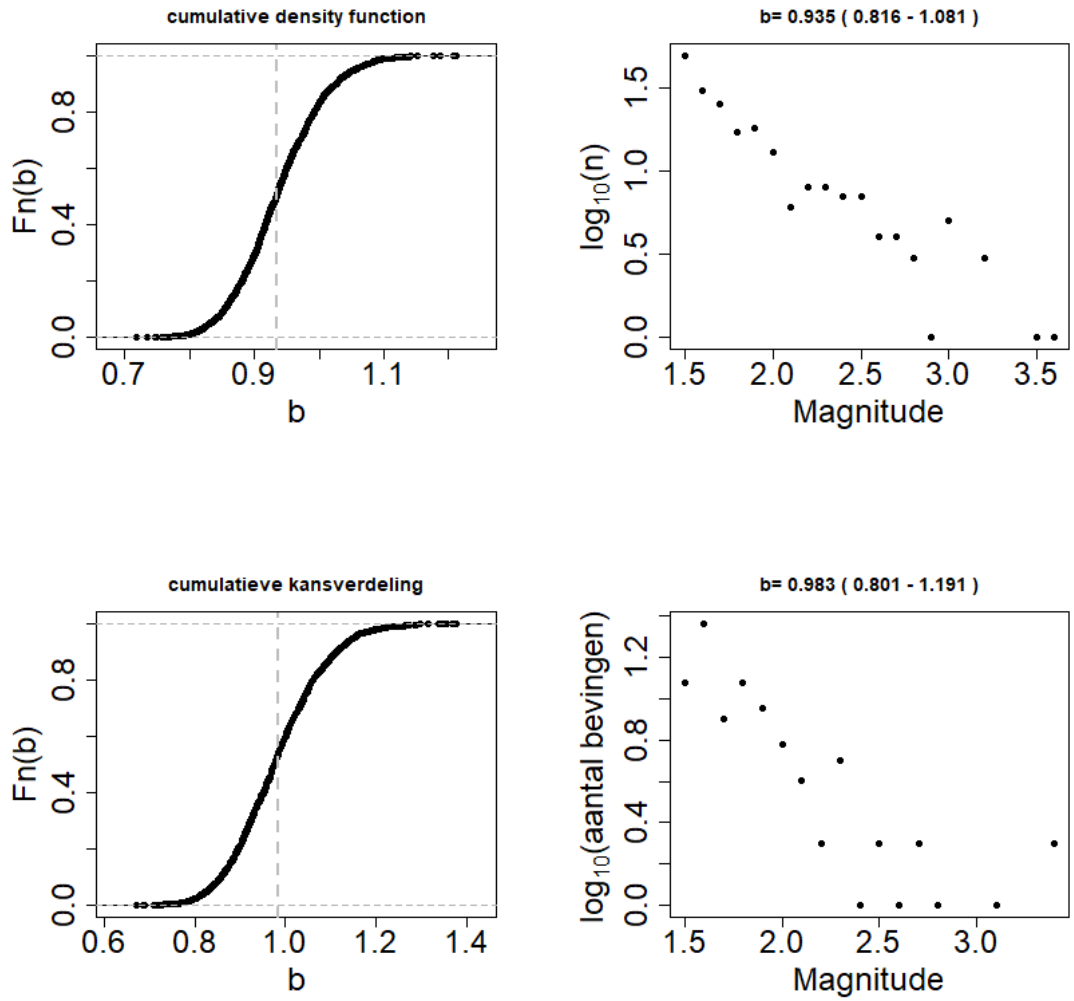
Verhouding tussen grote en kleine bevingen

De verhouding tussen grote en kleine bevingen wordt beschreven met de methode Gutenberg-Richter (Ref. 3).

Fuguur 15 heeft twee zogenaamde Gutenberg-Richter plots voor het veld weer. De b-waarde is maat voor de frequentie relatie tussen aardbevingen met verschillende magnitudes. De b-waarden zijn gegeven in Tabel 6. 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 slechts een statistische variatie zonder onderliggende fysische grondslag.

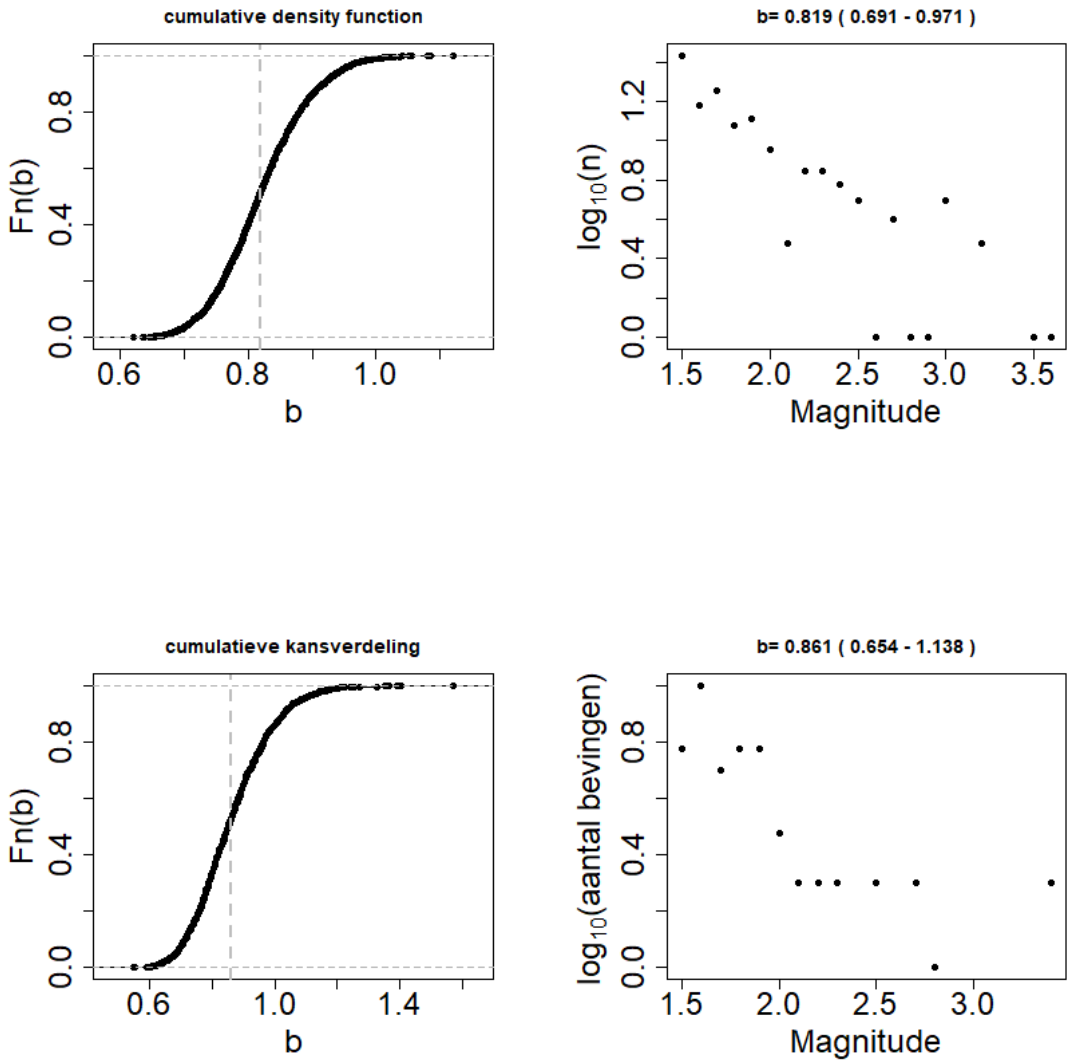
Tabel 6: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen over het hele Groninger veld

Totale gebied Groningen		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2020
$P_{2.5\%}$	0,82	0,80
$P_{50\%}$	0,94	0,98
$P_{97.5\%}$	1,08	1,19



Figuur 15: Gutenberg Richter plots voor het hele Groningen veld. Bovenste panelen: Periode 2000 tot 2015. Onderste panelen: periode 2015 tot en met 2019

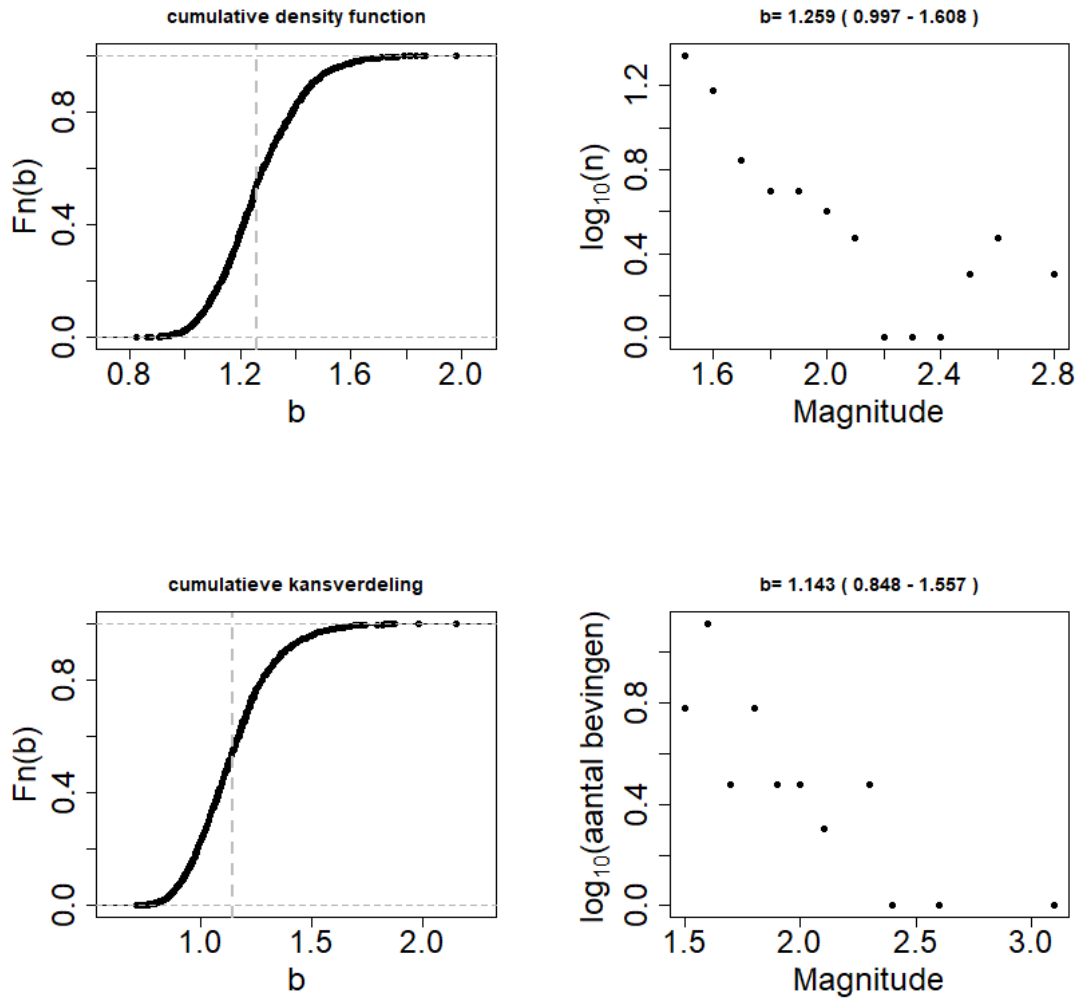
Figuur 13 en Figuur 14 geven twee Gutenberg-Richter plots voor respectievelijk de omgeving van Loppersum en het gehele veld exclusief de omgeving van Loppersum weer. In Tabel 7 en Tabel 8 zijn de b-waarden met hun betrouwbaarheidsintervallen weergegeven. Over beide beschouwde periodes zijn de b-waardes lager in Loppersum dan in de rest van het Groningen veld. In Loppersum is het aantal aardbevingen met grotere magnitude dus relatief groot 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 (Ref. 11) is een hypothesetest gedaan naar deze theorie en daaruit bleek dat de geobserveerde waarde waarschijnlijk het resultaat is van natuurlijke variabiliteit.



Figuur 13: Gutenberg Richter plots voor de cluster Noordwest (het gebied rond Loppersum). Bovenste panelen: Periode januari 2000 tot en met december 2014. Onderste panelen: periode januari 2015 tot oktober 2019

Tabel 7: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen in het gebied rond Loppersum

Gebied Loppersum		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2020
$P_{2.5\%}$	0,69	0,65
$P_{50\%}$	0,82	0,86
$P_{97.5\%}$	0,97	1,14



Figuur 14: Gutenberg Richter plots voor het gehele veld exclusief de cluster Noordwest (het gebied rond Loppersum). Bovenste panelen: Periode 2000 - 2014. Onderste panelen: 2015 - 2020

Tabel 8: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen over het gehele veld exclusief de cluster Loppersum

Gehele veld exclusief Loppersum		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2020
$P_{2.5\%}$	1,00	0,85
$P_{50\%}$	1,26	1,14
$P_{97.5\%}$	1,61	1,56

In Tabel 9 zijn voor de eerder genoemde gebieden de b-waarden opgenomen. De b-waarde voor het hele veld lijkt voor de periode vanaf 2015 licht te zijn toegenomen ten opzichte van de periode ervoor. Dus het aantal bevingen met lagere magnitudes is relatief gezien groter dan aardbevingen met hogere magnitudes.

Tabel 9 Overzicht van de b-waarde ($P_{50\%}$)voor het gehele veld, het gebied Loppersum en het gehele veld exclusief het gebied Loppersum.

	b-waarde ($P_{50\%}$) 2000-2014	b-waarde ($P_{50\%}$) 2015-2020
Gehele Groningenveld	0,94	0,98
Gebied Loppersum	0,82	0,86
Gehele veld exclusief Loppersum	1,26	1,14

5 Referenties

1. Special Report on the Loppersum ML 2.7 Earthquake of 14th June 2020, NAM, Jan van Elk en Jeroen Uilenreef, August 2020.
2. Advies over de actualisatie van de trendparameters en de bijbehorende grenswaarden in artikel 1.3a van de Mijnbouwregeling, SodM, 16 juni 2020.
3. Magnitude and Energy of Earthquakes. B. Gutenberg, C.F. Richter. Annali di Geofisica. 9: 1-15, 1956.
4. Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures, Lecocq, Thomas, Science 11 Sep 2020: Vol. 369, Issue 6509, pp. 1338-1343, DOI: 10.1126/science.abd2438
5. 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.
6. Seismic Risk Assessment for a selection of Gas Production Scenarios for the Groningen field. Jan van Elk, Assaf Mar-Or, Leendert Geurtsen, Per Valvatne, Eddy Kuperus, Dirk Doornhof.2018.
7. Induced Seismicity in Groningen - Assessment of Hazard, Building Damage and Risk. Jan van Elk, Dirk Doornhof. 2017.
8. Hazard and Risk Assessment Groningen GTS - Raming 2020. Van Elk, Jan, et al. 2020.
9. Analyse overschrijding trendparameter Aardbevingsdichtheid. NAM. 3 december 2019.
10. Online NAM Feiten en cijfers. https://www.nam.nl/feiten-en-cijfers/aardbevingen.
11. Rapportage Seismiciteit Groningen Mei 2019. NAM. mei 2019.
12. Development of probabilistic seismic hazard assessment for the Groningen gas field. Dost, B., E. Ruigrok & J. Spetzler (2017). Netherlands Journal of Geoscience 96, s235–s245.
13. Updated empirical GMPEs for PGV from Groningen earthquakes. Bommer, J. J., P. J. Stafford, and M. Ntinalexis (2019). 10 March 2019
14. Developing an application-specific ground-motion model for induced seismicity. Bommer, J.J., B. Dost, B. Edwards, P.J. Stafford, J. van Elk, D. Doornhof & M. Ntinalexis (2016). Bulletin of the Seismological Society of America 106(1), 158-173.
15. Framework for a ground-motion model for induced seismic hazard and risk analysis in the Groningen gas field. Bommer, J.J., P.J. Stafford, B. Edwards, B. Dost, E. van Dedem, A. Rodriguez-Marek, P. Kruiver, J. van Elk, D. Doornhof & M. Ntinalexis (2017a). The Netherlands. Earthquake Spectra 33(2), 481-498.
16. Special Report on the Zijldijk ML 2.5 Earthquake of 2nd May 2020, NAM, Jan van Elk and Jeroen Uilenreef, May 2020.

Appendix A - Aardbevingscatalogus 1 oktober 2019 tot 1 oktober 2020

Plaats	Datum	Time hh:mm:ss	Magnitude	Diepte_km	Easting	Northing	Veld
Loppersum	6-okt-19	01:33:26	1	3	244691	592899	Groningen
Meedhuizen	6-okt-19	20:17:00	1,6	3	256524	591353	Groningen
Overschild	8-okt-19	18:19:32	0,4	3	248006	586950	Groningen
Appingedam	18-okt-19	00:35:55	0,5	3	253352	593180	Groningen
Harkstede	20-okt-19	03:36:42	0,9	3	239314	584007	Groningen
Appingedam	22-okt-19	00:42:06	0,8	3	253352	593180	Groningen
Garrelsweer	28-okt-19	17:38:33	1,2	3	245691	592917	Groningen
Nieuwolda	9-nov-19	23:47:22	0,5	3	262520	585695	Groningen
Sappemeer	10-nov-19	21:10:06	0,8	3	249868	573740	Groningen
Ten Boer	28-nov-19	23:50:00	0,5	3	242854	587633	Groningen
Siddeburen	29-nov-19	19:20:57	0,4	3	256554	586790	Groningen
Spijk	30-nov-19	18:55:39	1,4	3	251096	602596	Groningen
Garrelsweer	3-dec-19	19:23:56	1,9	3	246576	591932	Groningen
Middelstum	7-dec-19	00:36:27	0,5	3	237914	595448	Groningen
Overschild	12-dec-19	16:27:43	0,6	3	247905	588730	Groningen
Farmsum	31-dec-19	18:15:38	0,9	3	261422	593018	Groningen
Zuidbroek	3-jan-20	10:36:29	0,6	3	252780	578696	Groningen
Harkstede	7-jan-20	09:15:31	0,8	3	242903	581289	Groningen
Schildwolde	10-jan-20	23:10:21	1,3	3	252316	581804	Groningen
Lageland	23-jan-20	10:12:13	1,3	3	244586	584214	Groningen
Nieuwolda	24-jan-20	21:35:02	1,6	3	261748	587347	Groningen
Kolham	26-jan-20	08:03:16	1,4	3	245116	577322	Groningen
Scheemda	29-feb-20	02:46:06	0,3	3	260319	576406	Groningen
Wagenborgen	2-mrt-20	13:41:19	2	3	256894	586463	Groningen
Wagenborgen	5-mrt-20	20:08:52	0,3	3	256759	586571	Groningen

Appingedam	17-mrt-20	07:18:34	0,8	3	251040	592131	Groningen
Garsthuizen	17-mrt-20	08:54:55	1,4	3	244375	599127	Groningen
Froombosch	17-mrt-20	12:44:07	1,8	3	248629	578948	Groningen
Krewerd	22-mrt-20	19:33:12	2,3	3	251989	597939	Groningen
Thesinge	23-mrt-20	00:15:13	1,1	3	238550	589560	Groningen
Krewerd	23-mrt-20	01:06:01	1,1	3	251989	597939	Groningen
Tjuchem	30-mrt-20	04:49:40	1	3	253791	588068	Groningen
Zuidbroek	30-mrt-20	23:53:23	1,3	3	255702	576419	Groningen
Oosterwijtwerd	4-apr-20	04:37:24	0,6	3	249725	594554	Groningen
Appingedam	23-apr-20	19:54:31	0,3	3	253612	593519	Groningen
Zuidbroek	26-apr-20	00:14:06	0,8	3	252920	578365	Groningen
Froombosch	27-apr-20	14:14:58	0,6	3	249101	578734	Groningen
Bedum	28-apr-20	01:51:19	0,4	3	233652	591258	Groningen
Zeerijp	28-apr-20	10:20:15	1,5	3	246537	597498	Groningen
Haren	1-mei-20	16:13:57	0,6	3	236103	576383	Groningen
Zijldijk	2-mei-20	03:13:16	2,5	3	246469	601059	Groningen
Scharmer	2-mei-20	21:04:22	1,2	3	244657	583993	Groningen
Oosterwijtwerd	3-mei-20	22:28:53	0,9	3	249994	594448	Groningen
Siddeburen	4-mei-20	11:11:12	1,8	3	253031	586048	Groningen
Peize	5-mei-20	21:59:56	0,9	3	231343	577084	Groningen
Eems-Dollard (nabij Emden)	8-mei-20	05:54:28	0,7	3	260798	597123	Groningen
Noordbroek	10-mei-20	04:15:57	0,1	3	252198	581022	Groningen
Garrelsweer	11-mei-20	19:07:29	0,3	3	248273	590406	Groningen
Garsthuizen	31-mei-20	11:33:57	0,6	3	244639	599243	Groningen
Sappemeer	1-jun-20	08:27:25	1,2	3	249179	578179	Groningen
Wirdum	1-jun-20	17:55:04	1,9	3	248567	592416	Groningen
Overschild	4-jun-20	23:04:16	1,3	3	250509	588669	Groningen
Wirdum	10-jun-20	07:19:13	1	3	248769	592309	Groningen
Harkstede	13-jun-20	20:28:45	0,8	3	241143	582593	Groningen
Farmsum	21-jun-20	21:30:46	0,2	3	261781	588907	Groningen

Overschild	21-jun-20	23:26:19	0,8	3	245988	587802	Groningen
Groningen	24-jun-20	18:54:16	0,7	3	235141	585939	Groningen
Woldendorp	26-jun-20	14:56:21	1,3	3	262788	588595	Groningen
Tjuchem	29-jun-20	20:10:50	0,7	3	254283	590082	Groningen
Loppersum	3-jul-20	06:49:22	0,7	3	245715	595144	Groningen
Loppersum	14-jul-20	15:18:47	2,7	3	244369	595898	Groningen
Loppersum	15-jul-20	06:15:39	0,6	3	244502	595901	Groningen
Hellum	16-jul-20	00:45:21	1,8	3	253033	585937	Groningen
Startenhuizen	19-jul-20	02:07:53	2,3	3	243233	599662	Groningen
Startenhuizen	19-jul-20	02:11:33	0,9	3	243167	599661	Groningen
Scharmer	21-jul-20	06:07:03	1,1	3	243397	583524	Groningen
Uithuizermeeden	1-sep-20	04:31:16	1,9	3	245800	604719	Groningen
Westeremden	3-sep-20	05:29:01	2	3	242645	595421	Groningen
Groningen	7-sep-20	16:52:27	0,9	3	234347	581474	Groningen
Harkstede	8-sep-20	23:34:24	0,4	3	241333	583153	Groningen
Zuidbroek	12-sep-20	13:41:28	0,4	3	254593	578288	Groningen
Onderdendam	13-sep-20	10:16:45	0,9	3	235628	592738	Groningen