



RAPPORTAGE SEISMICITEIT  
GRONINGEN – MEI 2021



[Deze pagina is opzettelijk leeg gelaten]

## Inhoudsopgave

1	Samenvatting .....	1
	Aantal aardbevingen (activity rate) .....	1
	Aardbevingsdichtheid .....	1
	Trend in seismiciteit.....	1
	Incidentparameters PGA en PGV .....	2
	Aardbevingen Zijldijk en Loppersum.....	2
	Aanpassingen seismisch monitoring.....	2
2	Inleiding en leeswijzer.....	3
2.1	Inleiding.....	3
2.2	Leeswijzer.....	4
2.3	Meetnetwerk en meetnauwkeurigheid.....	4
	Magnitude van compleetheid.....	5
3	Trendparameters .....	7
3.1	Trendparameter aantal aardbevingen (ontwikkeling lange termijn) .....	7
3.2	Aardbevingsdichtheid .....	8
4	Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit .....	10
4.1	Aantal aardbevingen .....	10
4.2	Verspreiding van aardbevingen over het Groningen-gasveld .....	11
4.3	Statistische analyse naar de ontwikkeling aardbevingen .....	13
	Verloop van het aantal bevingen door de tijd .....	13
	Verband productie en seismiciteit per cluster productielocatie .....	15
	Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd .....	17
	Verhouding tussen grote en kleine bevingen .....	19
4.4	Afwijkende PGA/PGV bij een bepaalde aardbevingsmagnitude .....	23
5	Referenties.....	24
	Appendix A - Aardbevingscatalogus 1 mei 2020 tot 1 mei 2021 .....	25

[Deze pagina is opzettelijk leeg gelaten]

## 1 Samenvatting

Deze rapportage is opgesteld om te voldoen aan de Mijnbouwregeling artikel 1.3a.5 waarin staat dat de houder van de winningsvergunning Groningen-gasveld 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 6 of 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 tot 1 mei 2021 afgenomen van 15 naar 14. Er zijn in de afgelopen 6 maanden 8 aardbevingen geregistreerd met een magnitude groter of gelijk aan  $M_L \geq 1,2$ .

### Aardbevingsdichtheid

Aardbevingsdichtheid is gedefinieerd als het aantal geobserveerde aardbevingen per vierkante kilometer per jaar en wordt berekend voor het hele Groningen-gasveld. In een deel van het veld rond Loppersum is de aardbevingsdichtheid 0,26 aardbevingen per vierkante kilometer per jaar. Omdat nu een andere methodiek voor de berekening van aardbevingsdichtheid wordt gebruikt, is deze waarde niet te vergelijken met de waarden uit het vorige rapport. In het hele veld is de dichtheid onder de grenswaarde van 0,30 gebleven, zoals gedefinieerd in Mijnbouwregeling Artikel 1.3a.6.

De gebruikte methode is na het advies van Staatstoezicht op de Mijnen aangepast (Ref. 1). De huidige methode berekent de dichtheid van de bevingen met een magnitude van 1,2 en hoger per  $\text{km}^2$  per jaar. Het tijdsinterval waarmee de bevingen worden verzameld is een  $\frac{1}{2}$  jaar (zes maanden), deze dichtheid wordt vermenigvuldigd om tot een jaar gemiddelde te komen. (n.b. de vorige methode verzamelde bevingen over een jaar met een magnitude van 1,5 en hoger).

### Trend in seismiciteit

Het aantal aardbevingen en de aardbevingsdichtheid laten vanaf 2015 een dalende trend zien. In de afgelopen twaalf maanden (tot 1 mei 2021) zijn er 14 aardbevingen boven het Groningen-gasveld met een magnitude van  $M_L \geq 1,5$  geregistreerd. De zwaarste aardbeving in het afgelopen jaar 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 14 ten opzichte van 17 in de vorige rapportageperiode. De zwaarste aardbeving in het afgelopen zes maanden (sinds 1 november 2020) was de aardbeving bij Huizinge op 28 april 2021 met een magnitude van  $M_L = 2,3$ .

Het aantal geregistreerde aardbevingen en een statistische analyse hiervan voor de afgelopen 12 maanden 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 Groningen-gasveld voorgedaan die hebben geleid tot grondversnellingen en/of grondsnelheden boven de in de Mijnbouwregeling vastgestelde grenswaarden (PGA: 0,08g, PGV: 50 mm/s).

## Aardbevingen Zijldijk en Loppersum

De aardbeving met de grootste magnitude tijdens de 12 maanden rapportageperiode was de Loppersum aardbeving met een magnitude van  $M_L = 2,7$  op 14 juli 2020. Er zijn twee aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 2,5$  geregistreerd in deze 12 maanden. Dat zijn de aardbeving bij Loppersum op 14 juli 2020 en de aardbeving bij Zijldijk op 2 mei 2020 (met een magnitude van  $M_L = 2,5$ ). Voor beide aardbevingen is een Speciale Rapportage gemaakt en gepubliceerd. In de Speciale Rapportage voor de aardbevingen bij Zijldijk en Loppersum (Ref. 2 and 3) is een gedetailleerde analyse van de gemeten grondversnellingen en grondsnelheden voor deze aardbeving opgenomen.

De belangrijkste conclusie van deze analyses is dat de bewegingen die zijn geregistreerd voor de aardbeving bij Zijldijk en 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).

In de afgelopen zes maanden was de grootste aardbeving de Huizinge beving op 28 april 2021 met een magnitude van  $M_L = 2,3$ . Dit was in deze periode en enige aardbeving met een magnitude  $M_L \geq 2,0$ .

## Aanpassingen seismisch monitoring

Op 14 oktober 2020 zijn de monitoringsparameters en de daarbij horende grenswaarden aangepast op advies van SodM (Ref. 1). Deze rapportage is gebaseerd op de in de rapportage periode geldende monitoringsparameters en grenswaarden volgens de wijziging van de mijnbouwregeling. Een historische vergelijking tussen de verschillende monitoringsregimes over de periode voor de introductie van de aangepaste grenswaarden is opgenomen in de speciale rapportage voor de aardbeving bij Loppersum (Ref. 3).

## 2 Inleiding en leeswijzer

### 2.1 Inleiding

Dit document bevat de rapportage over de ontwikkeling van de seismiciteit in het Groningen-gasveld zoals benoemd in Artikel 1.3a.5 van de Mijnbouwregeling. Hierin staat dat de houder van de winningsvergunning Groningen-gasveld twee keer per kalenderjaar een rapportage opstelt over ontwikkelingen in de seismiciteit.

Seismische gegevens en gasproductie in dit rapport zijn bijgewerkt tot 1 mei 2021. 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.*

<b>Trendparameter</b>	<b>Waarnemings Niveau #/jaar</b>	<b>Melding</b>	<b>Analyse</b>
Aantal aardbevingen $M_L \geq 1,2$	30	Waarneming melden binnen 48 uren.	-
	40	Idem	Analyse van de ontwikkeling van seismiciteit binnen 14 dagen.
Aardbevingsdichtheid	0,30	Waarneming melden binnen 48 uren.	-
	0,40	Idem	Analyse van de ontwikkeling van seismiciteit binnen 14 dagen.

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 #/jaar	Melding	Analyse
Grondversnelling	> 0,08 g	Terstond waarneming melden	Eerste analyse binnen 48 uren, nadere analyse binnen 14 dagen.
Grondsnelheid	50 mm/s	Idem	Idem
Magnitude	≥ 3	Terstond waarneming melden	Eerste analyse binnen 48 uren, nadere analyse binnen 14 dagen.

## 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<sup>1</sup> 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 groundbeweging en vier ondergronds geplaatste geofoons voor nauwkeurige plaatsbepaling en bepaling van de aardbevingssterkte. Daarnaast zijn ook stations geplaatst (vooral ten westen van het gasveld) 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. In appendix A is een tabel opgenomen van de door het KNMI gerapporteerde aardbevingen die in de afgelopen 12-maanden zijn geregistreerd in Groningen.

Het seismische meetnetwerk boven het Groningen-gasveld is in 2014 uitgebreid met 69 nieuwe seismische meetstations. Hierdoor is de gevoeligheid van het meetnetwerk sterk toegenomen. In de

<sup>1</sup> De sterkte van de aardbevingen worden in dit rapport aangeduid in Local Magnitude Scale of  $M_L$ . (Ref. 4).



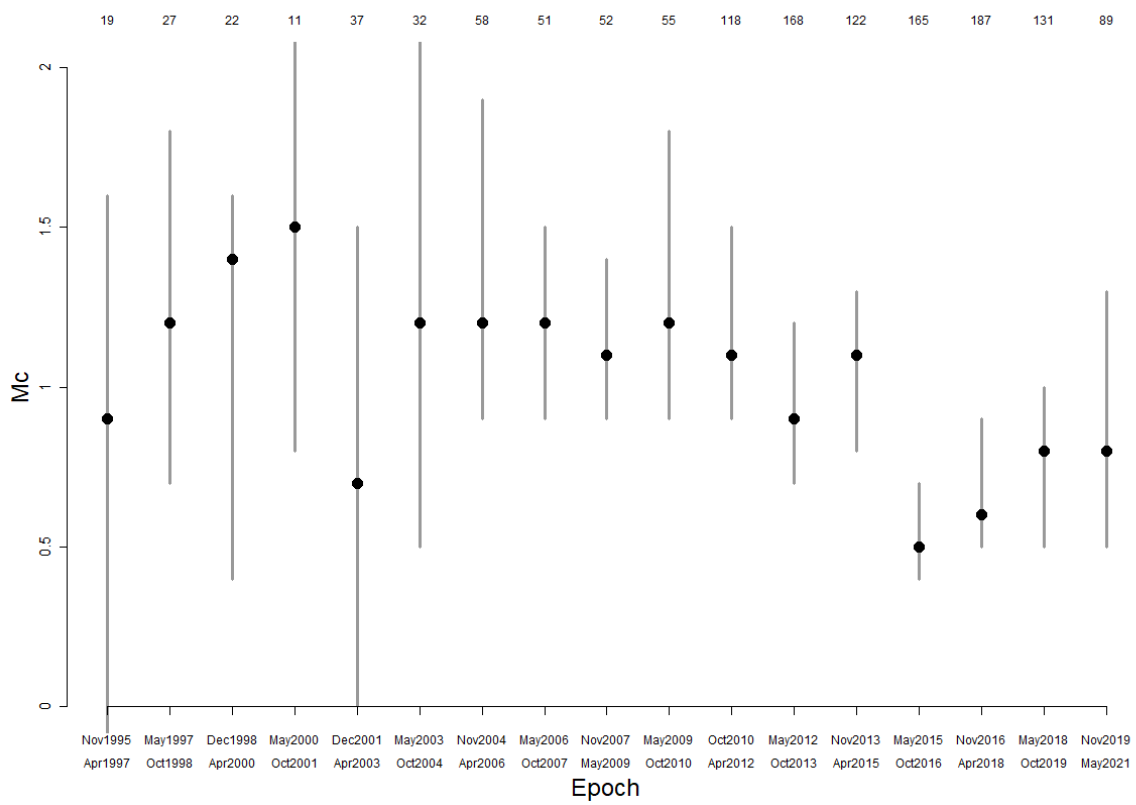
periode van 2003 tot en met 2014 werden alle bevingen in het Groningen-gasveld met een magnitude groter dan  $M_L = 1,5$  op de schaal van Richter geregistreerd. Vanaf 2014 worden alle aardbevingen met een magnitude groter dan  $M_L = 1,0$  op de schaal van Richter boven het Groningen-gasveld geregistreerd. Vóór 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 aan de data te verbinden. Is de gebruikte MoC te laag dan is de dataset incompleet en worden mogelijkwerwijs foutieve conclusies uit de dataset afgeleid.

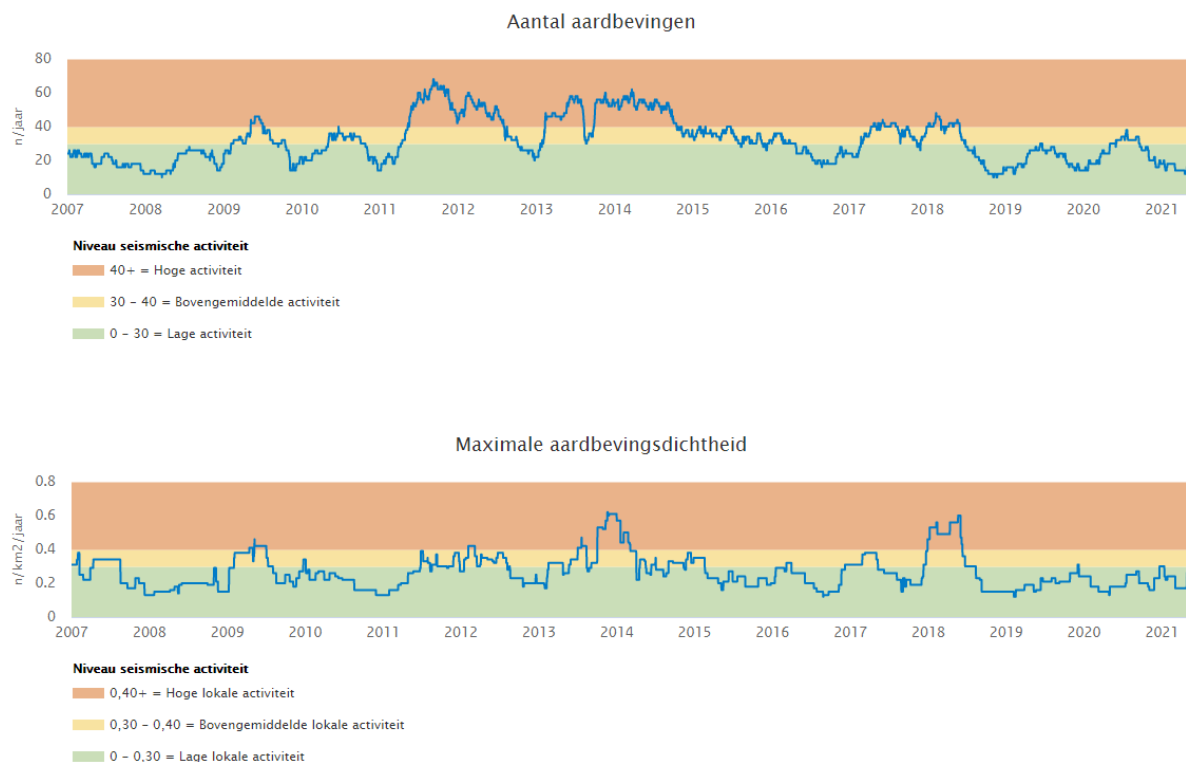
De MoC is afgeleid volgens de maximum curvature method (Ref. 5) en de resultaten met het 95% betrouwbaarheidsinterval zijn weergegeven in Figuur 1. In de figuur is duidelijk zichtbaar dat vanaf 2014 de MoC afneemt (ook kleinere aardbevingen worden geregistreerd). Vanaf 2014 zijn bevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,0$  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 gebruikt, 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. De verticale lijnen geven het 95% betrouwbaarheidsinterval.*

### 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 de Rijksoverheid ([Dashboard Groningen](#)), zie Figuur 2.



*Figuur 2 Trendparameters, in de bovenste grafiek wordt het aantal waargenomen aardbevingen met een magnitude 1,2 of groter per twaalf maanden getoond. In de onderste grafiek wordt de maximale aardbevingsdichtheid (voor aardbevingen met een magnitude van 1,2 of groter) per twaalf maanden getoond. In beide grafieken is de periode waarin de bevingen verzameld worden zes maanden, de getallen zijn omgerekend naar een jaarlijks aantal bevingen/dichtheid (vermenigvuldiging met twee). De achtergrondkleur geeft het niveau van de seismiciteit weer, groen: lage activiteit, geel: bovengemiddelde activiteit en oranje: hoge activiteit.*

In Tabel 3 zijn de waarden van deze trendparameters over de afgelopen 6 maanden gepresenteerd.

*Tabel 3 Trendparameter overzicht november 2020 tot mei 2021*

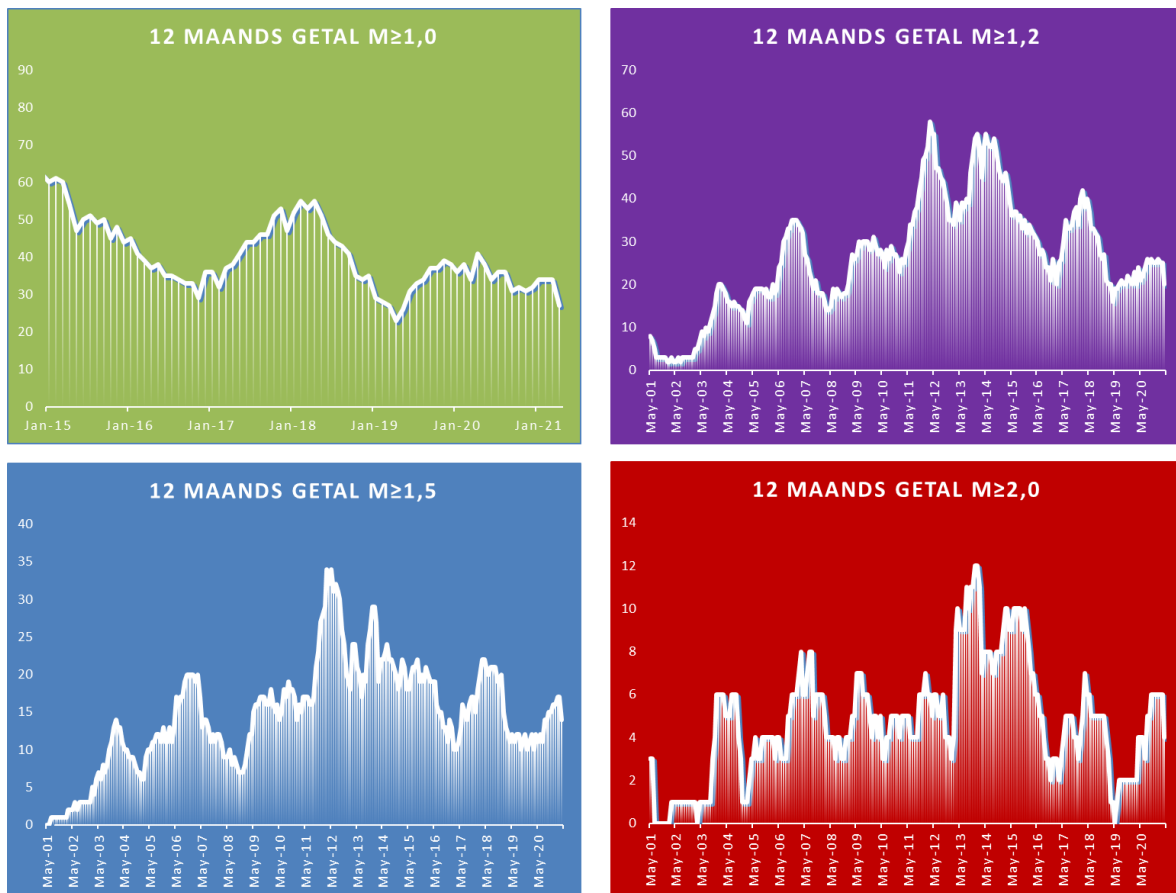
	nov	dec	jan	feb	mar	apr
Aantal aardbevingen ( $M_L \geq 1,2$ )	1	2	3	0	0	2
Aardbevingsdichtheid	0,18	0,23	0,30	0,24	0,24	0,26

#### 3.1 Trendparameter aantal aardbevingen (ontwikkeling lange termijn)

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 mei 2021 is dus de som van het aantal aardbevingen van een bepaalde magnitude in de periode van 1 november 2020 tot 1 mei 2021 (gecorrigeerd naar een jaar).

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).



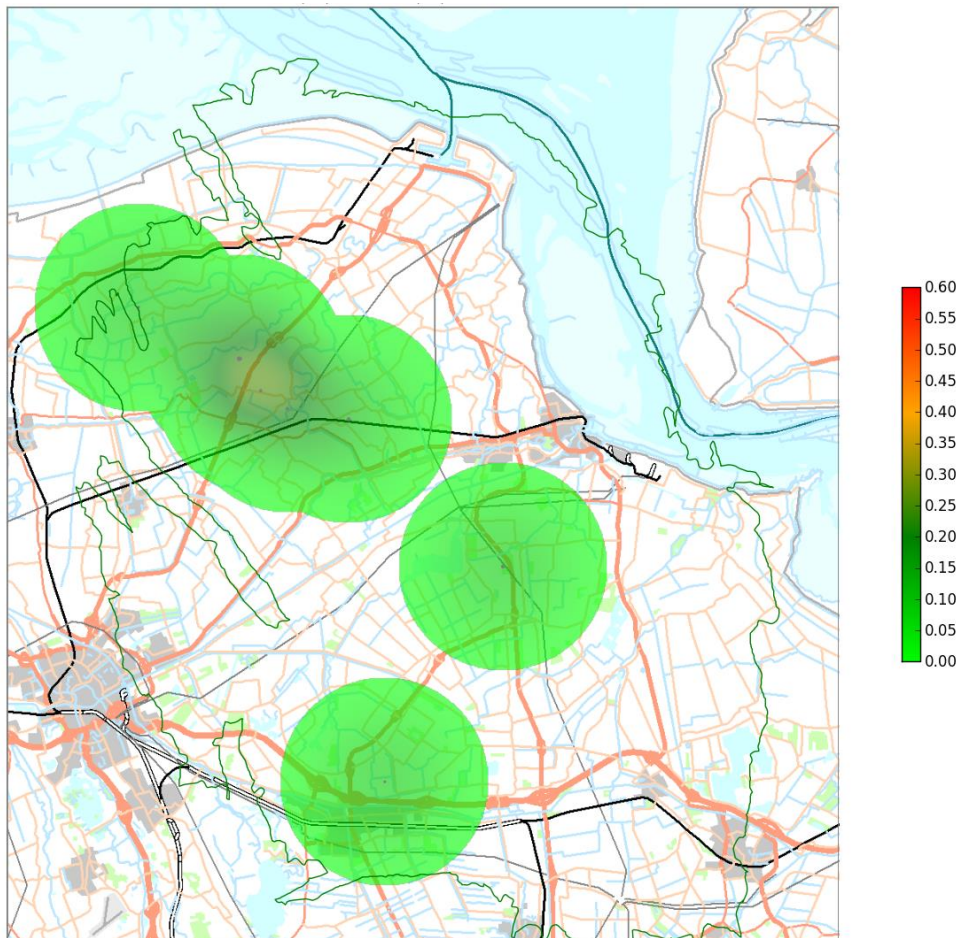
Figuur 3 12-maandsgetallen voor vier magnitude-klassen; waarnemingen voor  $M_L \geq 1,0$  weergegeven vanaf 2014, de overige waarnemingen sinds 2000

### 3.2 Aardbevingsdichtheid

Figuur 4 toont een kaart met daarop de aardbevingsdichtheid en de epicentra van de in de periode 1 november 2020 tot 1 mei 2021 geregistreeerde aardbevingen. Aardbevingsdichtheid wordt berekend met de Quartic Kernel functie. Alle geregistreeerde aardbevingen met een magnitude van  $M_L = 1,2$  en hoger zijn hierin opgenomen. De berekende aardbevingsdichtheid wordt getoond door middel van een kleurschaal. Als trendparameter wordt de maximale waarde van de berekende aardbevingsdichtheid over de voorgaande twaalf maanden gebruikt.

Op 21 december 2020 bereikte de maximale aardbevingsdichtheid in het Groningen-gasveld een waarde van 0,30 bevingen/km<sup>2</sup>/jaar. Hiermee overschreed de aardbevingsdichtheid het niveau van

0,30 bevingen/km<sup>2</sup>/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 in april 2021 gedaald tot 0,26 bevingen/km<sup>2</sup>/jaar.



*Figuur 4 Aardbevingsdichtheidskaart voor bevingen met een magnitude  $ML \geq 1,2$  weergegeven in de zes maanden voorafgaand aan 1 mei 2021. (de dichtheid is omgerekend naar een jaarlijkse dichtheid) 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. Afwijkende PGA/PGV bij een bepaalde aardbevingsmagnitude

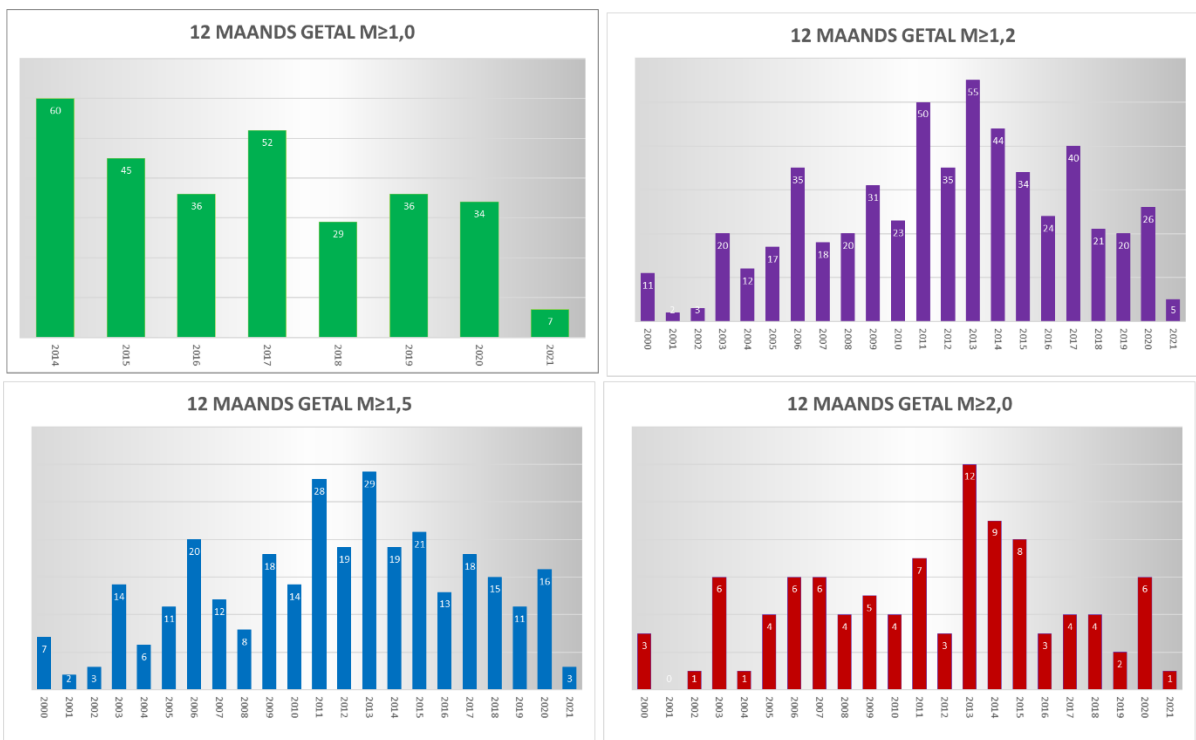
### 4.1 Aantal aardbevingen

In de afgelopen twaalf maanden tot 1 mei 2021 zijn in totaal 28 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.

Figuur 5 (hieronder) 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 2021 over de periode tot mei weergegeven is en dat er vanwege incompleetheit van de data voor 2014, er geen data van voor 2014 getoond is voor  $M_L \leq 1,2$ ). 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.

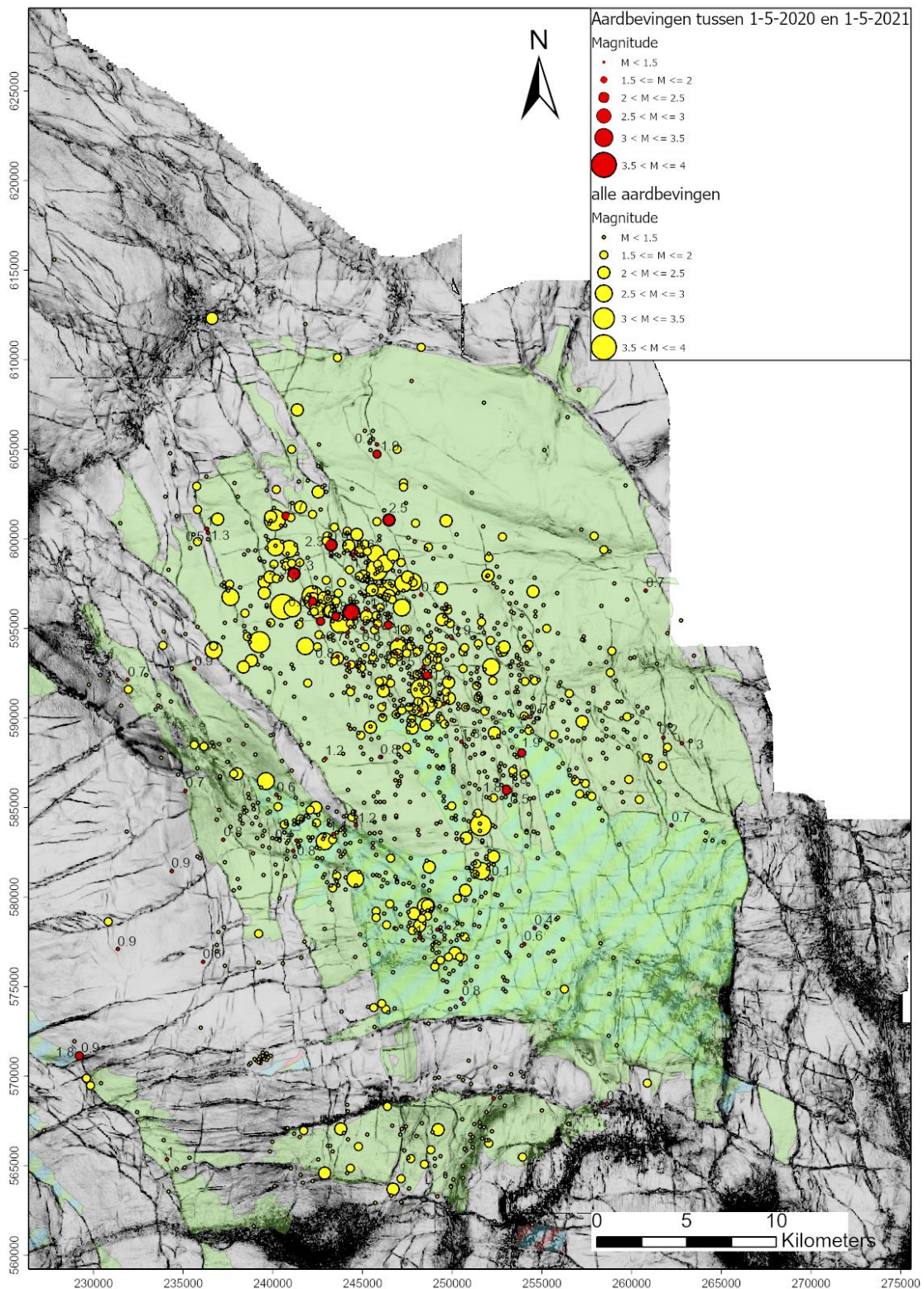
Maand	$1,0 \leq M_L < 1,5$	$1,5 \leq M_L < 2,0$	$2,0 \leq M_L < 2,5$	$M_L \geq 2,5$	Totaal
May-20	1	1	0	1	3
Jun-20	4	1	0	0	5
Jul-20	1	1	1	1	4
Aug-20	0	0	0	0	0
Sep-20	0	1	1	0	2
Oct-20	1	1	0	0	2
Nov-20	1	1	0	0	2
Dec-20	2	1	0	0	3
Jan-21	2	2	0	0	4
Feb-21	0	0	0	0	0
Mar-21	1	0	0	0	1
Apr-21	1	0	1	0	2
<b>Afgelopen 12-maanden Totaal</b>	14	9	3	2	28
<b>Afgelopen 6-maanden Totaal</b>	7	4	1	0	12



Figuur 5 Aantal aardbevingen per jaar, voor vier verschillende magnitude-klassen. Het aantal aardbevingen in 2021 is aangegeven voor de periode tot mei 2021.

#### 4.2 Verspreiding van aardbevingen over het Groningen-gasveld

De verspreiding van aardbevingen over het Groningen-gasveld is getoond op de kaart in Figuur 6. De locaties van de in de periode mei 2020 tot mei 2021 (12 maanden) geregistreeerde aardbevingen vallen goed samen met de eerder geregistreeerde aardbevingen.



Figuur 6 Kaart van de diepe ondergrond met daarop in groen het Groningen-gasveld en de omliggende gasvelden. Met rode stippen zijn de in de periode mei 2020 tot mei 2021 geregistreerde aardbevingen aangegeven. Alle aardbevingen zijn aangegeven met gele cirkels. De grootte van een cirkel is een maat voor de magnitude van de aardbeving.



### 4.3 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 in 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 niet gecorreleerd zijn. Deze aanname is echter niet geheel correct omdat naschokken plaats vinden.

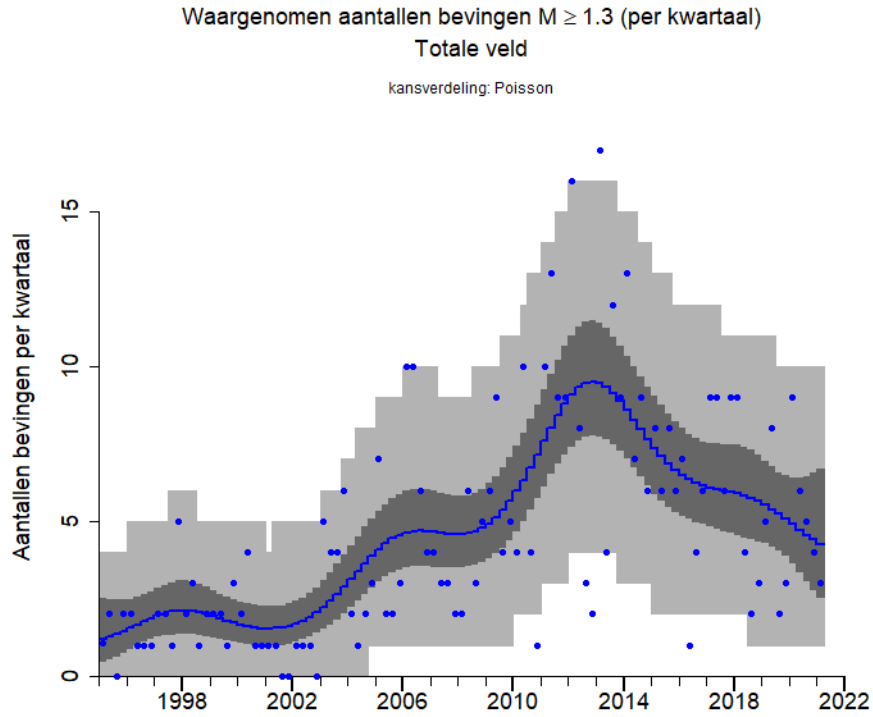
De quasi-Poisson verdeling kan gebruikt worden om een hogere mate (ten opzichte van de Poisson) aan variabiliteit in aantallen bevingen tussen kwartalen te beschrijven. Deze hogere mate van variabiliteit kan ontstaan door een bepaalde mate van correlatie tussen de events door naschokken.

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

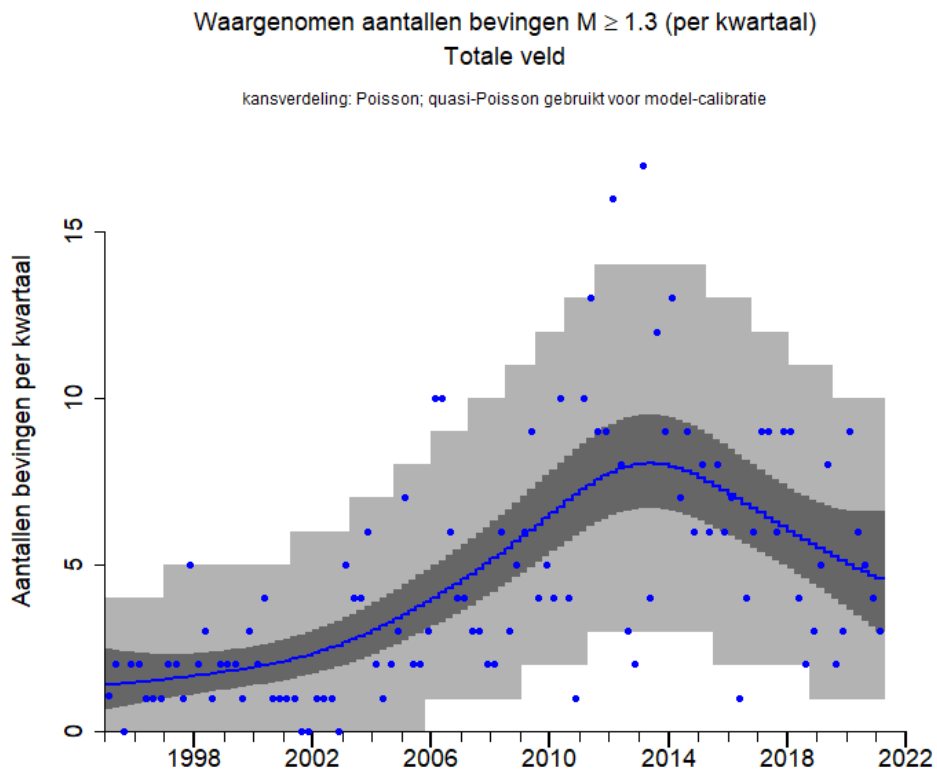
- Blauwe stippen voor het aantal seismische events dat kwartaal
- Een blauwe lijn die de trendlijn van het aantal te verwachten seismische events weergeeft
- Een donkergrijze band; het 95% betrouwbaarheidsinterval van de trendlijn.
- Een lichtgrijze band; het 95% voorspellingsinterval van het aantal 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 2021. Merk op dat de grotere onzekerheidsbanden in 2019 mogelijk toenemen door een grotere variatie van het aantal bevingen per kwartaal. Meer waarschijnlijk is dat de toename verklaard kan worden door het minder aantal datapunten 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 erna 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, betrouwbaarheidsinterval (donkergrijs) en voorspellingsinterval (lichtgrijs) van het aantal bevingen per kwartaal, bij Poisson verdeelde seismische events.*



*Figuur 8 Trend, betrouwbaarheidsinterval (donkergrijs) en voorspellingsinterval (lichtgrijs) van het aantal bevingen per kwartaal, bij quasi-Poisson verdeelde seismische events.*

## Verband productie en seismiciteit per cluster productielocatie

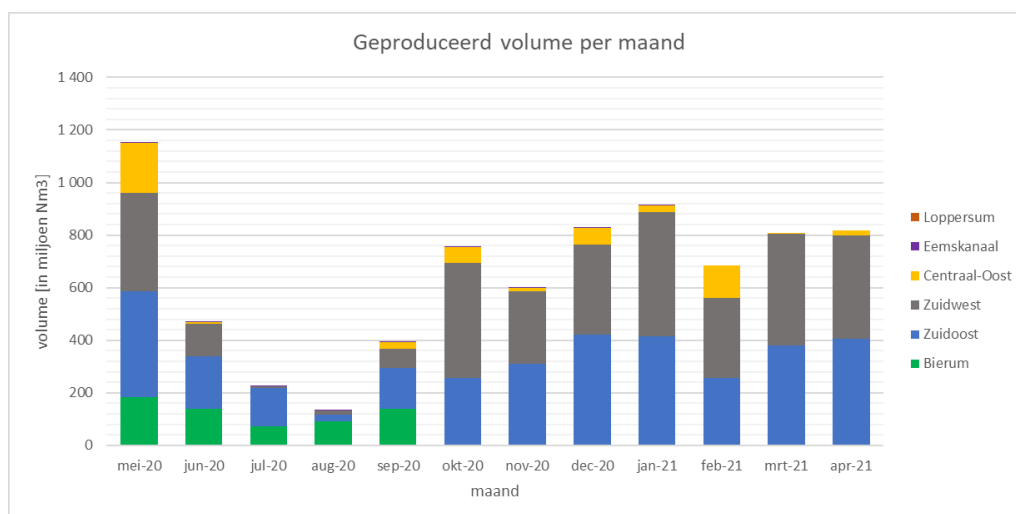
In welke mate de over een korte periode waargenomen variaties in de seismische monitoringsparameters een gevolg zijn van de wijze van opereren, van de lagere geproduceerde volumes of van de natuurlijke variabiliteit in seismiciteit is niet direct vast te stellen. Er zijn modellen opgesteld waarmee seismische dreiging en risico kunnen worden geanalyseerd. Meer informatie hierover kan gevonden worden in verschillende rapporten die van de NAM-site te downloaden zijn (Ref. 11, 12, 13, 14 and 15).

Het Groningen-gasveld 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.

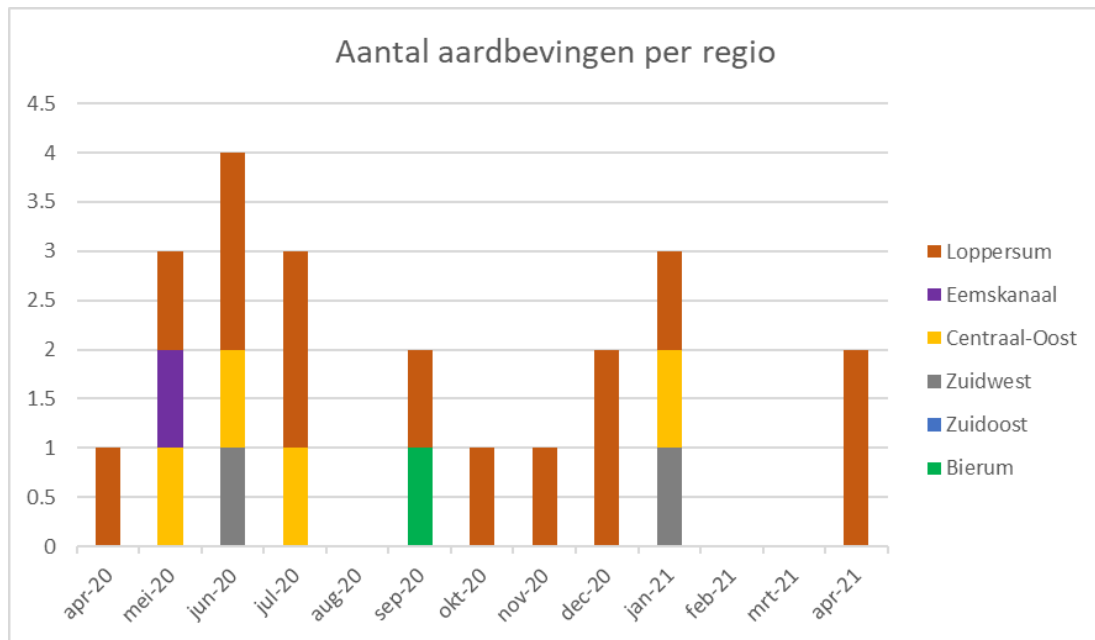
Tabel 5 Overzicht productielocaties per cluster volgens Mijnbouwregeling artikel 1.3a.1.

Cluster	Productielocatie	Cluster	Productielocatie
Eemskanaal	Eemskanaal	Zuidwest	Zuiderveen
Bierum	Bierum		Spitsbergen
Loppersum	Leermens		Tusschenklappen/Sappemeer
	Overschild		Kooipolder
	De Paauwen		Slochteren/Froombosch
	Ten Post		
Zuidoost	't Zandt	Centraal-Oost	Oudeweg
	Zuiderpolder		Schaapbulten
	De Eeker		Amsweer
	Scheemderzwaag		Siddeburen
			Tjuchem

In Figuur 9 is de productie per cluster van productielocaties opgenomen over 12 maanden van het voorgaande jaar. De productie uit het Loppersum cluster is per februari 2018 beëindigd. In Figuur 10 is het aantal aardbevingen van magnitude  $M_L \geq 1,2$  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.

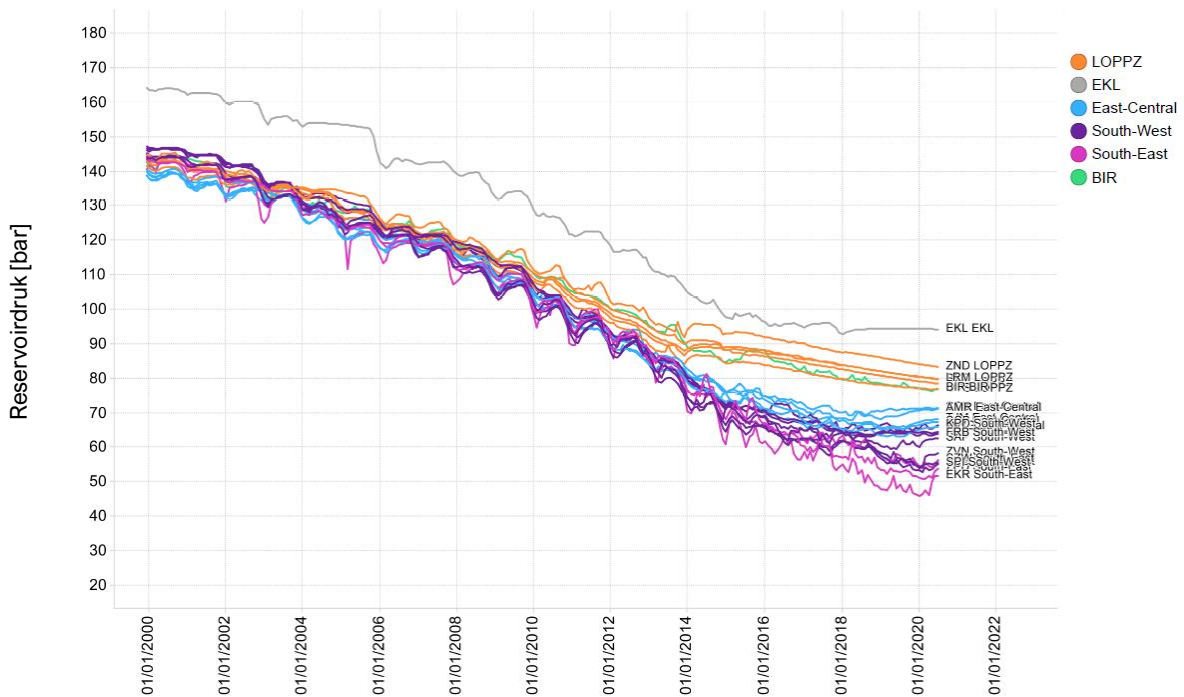


Figuur 10 Aantal aardbevingen per cluster ( $M \geq 1,2$ ).

In Figuur 11 is de reservoirdruk per cluster weergegeven. In deze figuur is duidelijk zichtbaar dat de druk in de cluster van productielocaties rond Loppersum blijft dalen (oranje lijnen, elke productielocatie wordt weergegeven door een aparte 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 ook dat de reservoirdruk in de cluster Centraal-Oost (blauwe lijnen, elke productielocatie 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 laag is, of dat de reservoirdruk stijging een effect heeft op de aardbevingsdichtheid, zie Figuur 12, is niet met zekerheid vast te stellen.

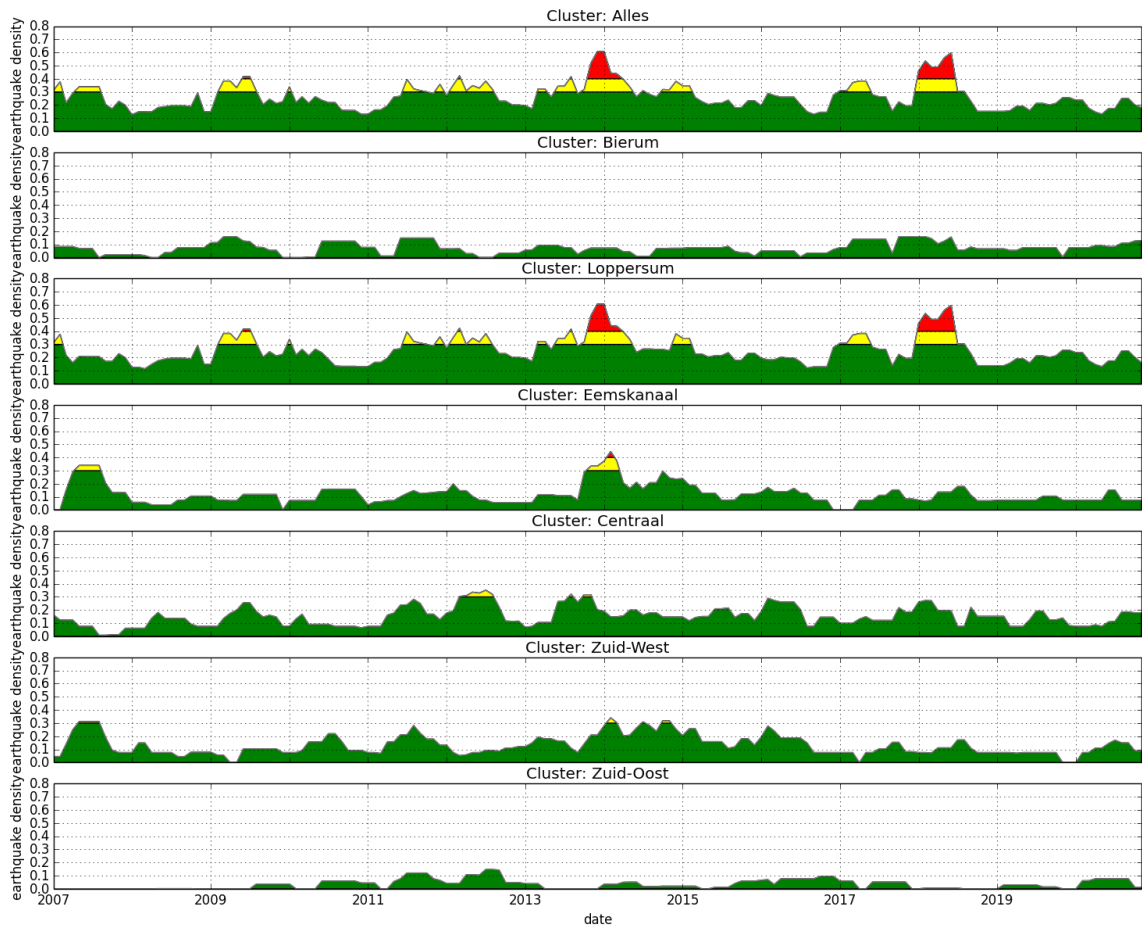
Informatie over het verband tussen de seismiciteit, productievolumes en manier van opereren kan gevonden worden in de Hazard and Risk Analyses (Ref. 6, 7 en 8).



*Figuur 11 Reservoirdruk daling in Groningen-gasveld op basis van het gekalibreerde Groningen-reservoirmodel. Merk op dat de druk in de Loppersum-cluster (LOPPZ) ook bij verminderde en stilgelegde productie daalt.*

### Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd

De maximale 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 Groningen-gasveld (“alles”) en kleinere gebieden binnen het Groningen gasveld, weergegeven in aantal bevingen met een  $ML \geq 1,2$  per  $km^2$  per jaar. De achtergrondkleur geeft het niveau van de seismiciteit weer, groen: lage activiteit, geel: bovengemiddelde activiteit en rood: hoge activiteit.

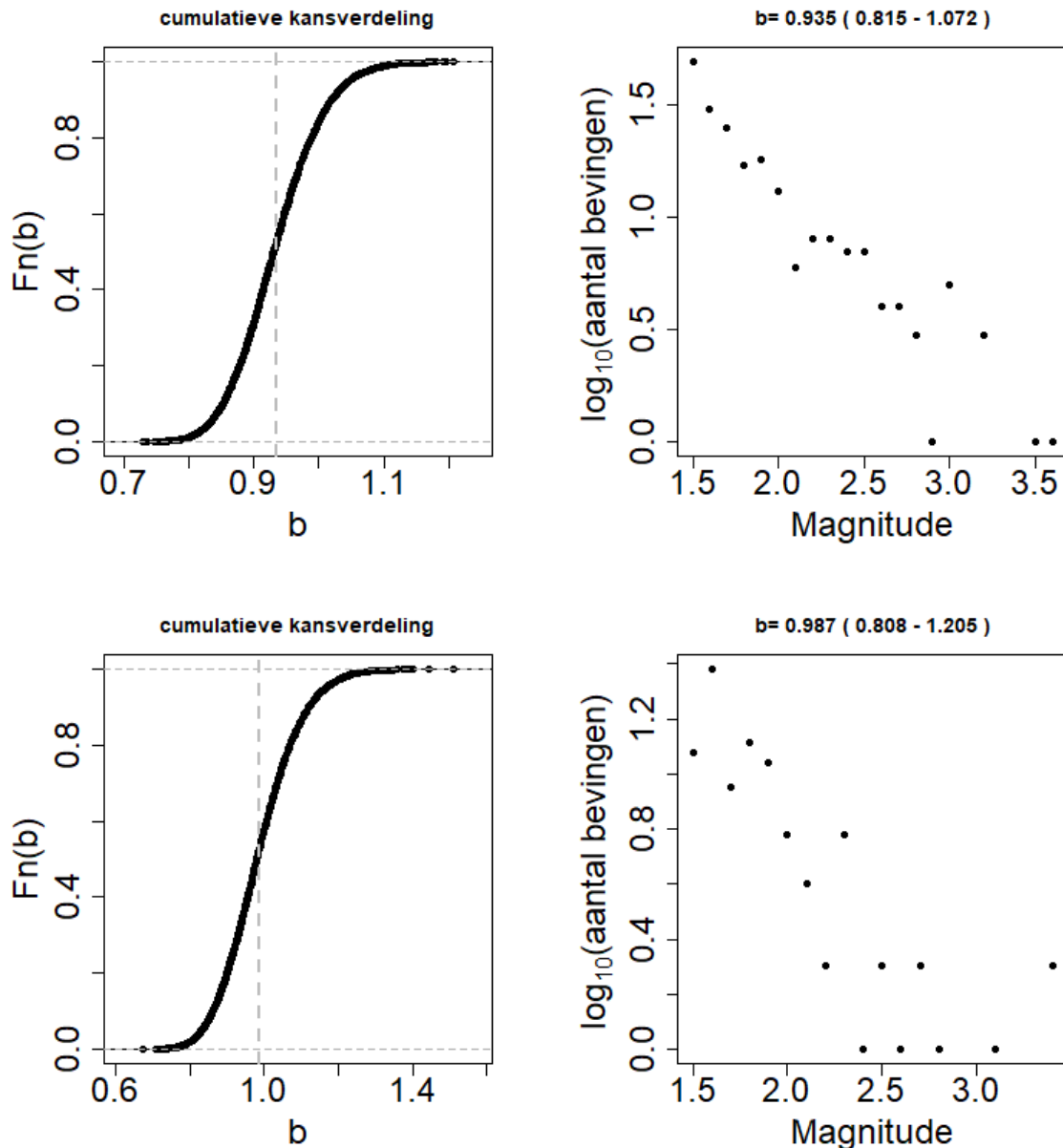
## Verhouding tussen grote en kleine bevingen

De verhouding tussen grote en kleine bevingen wordt beschreven met de methode Gutenberg-Richter (Ref. 4).

Figuur 13 geeft twee zogenaamde Gutenberg-Richter plots voor het veld weer. De b-waarde is de maat voor de frequentierelatie tussen aardbevingen van 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.*

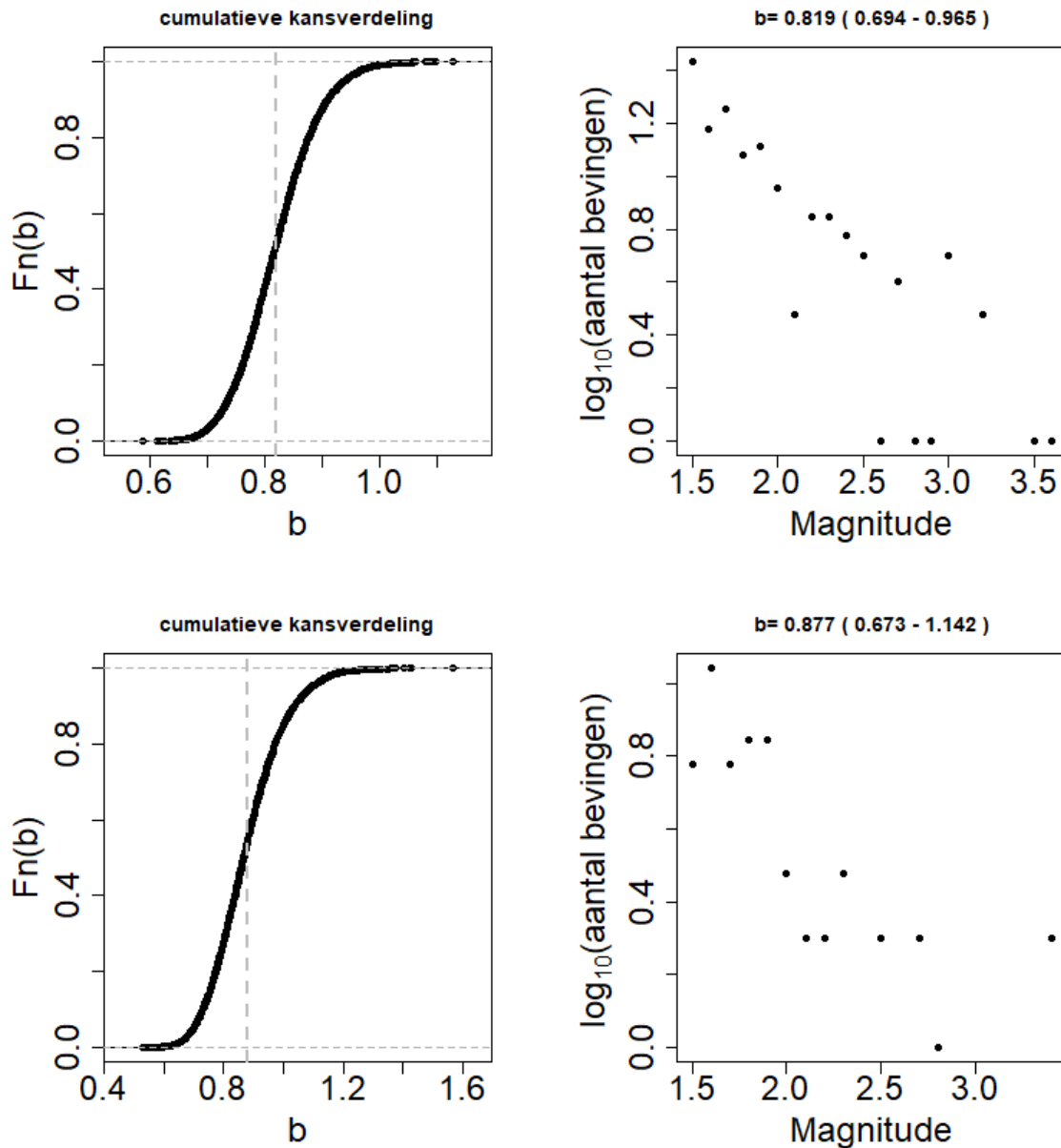
<b>Totale gebied Groningen</b>		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2020
P <sub>2.5%</sub>	0,82	0,81
P <sub>50%</sub>	0,94	0,99
P <sub>97.5%</sub>	1,07	1,21



Figuur 13 Gutenberg-Richter plots voor het hele Groningen-gasveld. Bovenste panelen: Periode januari 2000 tot en met december 2014. Onderste panelen: periode januari 2015 tot en met april 2021.

Figuur 14 en Figuur 15 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-gasveld. 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. 9) is een hypothesetest gedaan naar deze theorie en daaruit bleek dat de geobserveerde waarde waarschijnlijk het resultaat is van natuurlijke variabiliteit.

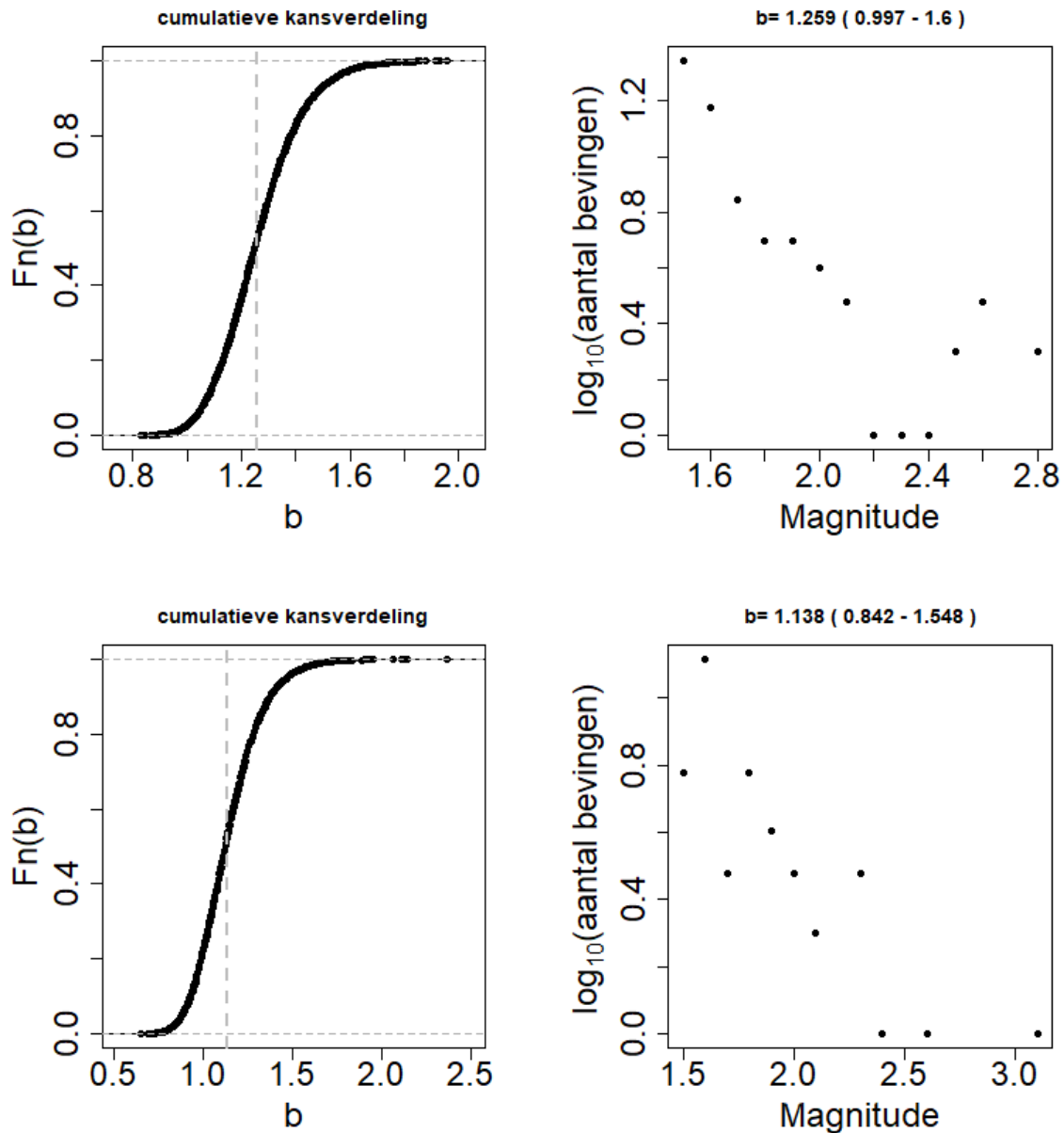




Figuur 14 Gutenberg-Richter plots voor de cluster Noordwest (het gebied rond Loppersum). Bovenste panelen: Periode januari 2000 tot en met december 2014. Onderste panelen: periode januari 2015 tot en met april 2021.

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

Gebied Loppersum		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2020
P <sub>2.5%</sub>	0,69	0,67
P <sub>50%</sub>	0,82	0,88
P <sub>97.5%</sub>	0,97	1,14



Figuur 15 Gutenberg-Richter plots voor het gehele veld exclusief de cluster Noordwest (het gebied rond Loppersum). Bovenste panelen: Periode januari 2000 tot en met december 2014. Onderste panelen: periode januari 2015 tot en met april 2021.

Tabel 8 Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen over het gehele veld exclusief de productieclusters rond Loppersum.

Gehele veld exclusief Loppersum		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2020
P <sub>2.5%</sub>	1,00	0,84
P <sub>50%</sub>	1,26	1,14
P <sub>97.5%</sub>	1,61	1,55

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 (P50%) voor het gehele veld, het gebied Loppersum en het gehele veld exclusief het gebied Loppersum.

	b-waarde (P <sub>50%</sub> ) 2000-2014	b-waarde (P <sub>50%</sub> ) 2015-2020
Gehele Groningen-gasveld	0,94	0,99
Gebied Loppersum	0,82	0,88
Gehele veld exclusief Loppersum	1,26	1,14

#### 4.4 Afwijkende PGA/PGV bij een bepaalde aardbevingsmagnitude

De aardbeving met de grootste magnitude tijdens de 12 maanden rapportageperiode was de Loppersum aardbeving met een magnitude van  $M_L = 2,7$  op 14 juli 2020. Er zijn twee aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 2,5$  geregistreerd in deze 12 maanden. Dat zijn de aardbeving bij Loppersum op 14 juli 2020 en de aardbeving bij Zijldijk op 2 mei 2020 (met een magnitude van  $M_L = 2,5$ ). Voor beide aardbevingen is een Speciale Rapportage gemaakt en gepubliceerd. In de Speciale Rapportage voor de aardbevingen bij Zijldijk en Loppersum (Ref. 2 and 3) is een gedetailleerde analyse van de gemeten grondversnellingen en grondsnelheden voor deze aardbeving opgenomen.

De belangrijkste conclusie van deze analyses is dat de bewegingen die zijn geregistreerd voor de aardbeving bij Zijldijk en 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). Deze analyse van de gemeten grondversnellingen en grondsnelheden geeft daarom aan dat er geen afwijkende waarden zijn gemeten voor deze aardbevingen.

In de afgelopen zes maanden was de grootste aardbeving de Huizinge beving op 28 april 2021 met een magnitude van  $M_L = 2,3$ . Dit was in deze periode en enige aardbeving met een magnitude  $M_L \geq 2,0$ . Ook tijdens deze aardbeving zijn geen afwijkende grondversnellingen en grondsnelheden geregistreerd.

## 5 Referenties

1. Advies over de actualisatie van de trendparameters en de bijbehorende grenswaarden in artikel 1.3a van de Mijnbouwregeling, SodM, 16 juni 2020.
2. Special Report on the Zijldijk ML 2.5 Earthquake of 2<sup>nd</sup> May 2020, NAM, Jan van Elk en Jeroen Uilenreef, May 2020.
3. Special Report on the Loppersum ML 2.7 Earthquake of 14<sup>th</sup> July 2020, NAM, Jan van Elk en Jeroen Uilenreef, August 2020.
4. Magnitude and Energy of Earthquakes. B. Gutenberg, C.F. Richter. *Annali di Geofisica*. 9: 1-15, 1956.
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 November 2020. 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.

## Appendix A - Aardbevingscatalogus 1 mei 2020 tot 1 mei 2021

Plaats	Datum	Time hh:mm:ss	Magnitude	Diepte_km	Easting	Northing	Veld
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	1,0	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	2,0	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
Siddeburen	7-okt-20	02:07:16	0,5	3	253233	585941	Groningen
Loppersum	16-okt-20	21:52:21	1,0	3	246929	594388	Groningen
Zandweer	18-okt-20	12:23:09	1,7	3	240741	601286	Groningen
Garmerwolde	24-okt-20	23:52:02	0,6	3	240219	585693	Groningen
Garrelsweer	5-nov-20	22:27:58	0,5	3	246878	593608	Groningen
Garsthuizen	16-nov-20	04:53:59	1,1	3	244442	599128	Groningen
Westeremden	26-nov-20	13:23:52	1,6	3	242225	596527	Groningen
Loppersum	28-nov-20	19:44:42	0,7	3	244190	594782	Groningen
Sappemeer	13-dec-20	15:24:13	0,8	3	250526	574310	Groningen
Rottum	15-dec-20	02:57:19	1,0	3	236295	600541	Groningen
Rottum	16-dec-20	01:03:49	0,5	3	236366	600320	Groningen
Rottum	19-dec-20	06:24:10	1,3	3	236362	600542	Groningen
Westeremden	21-dec-20	09:29:31	1,8	3	243507	595660	Groningen
Zuidbroek	28-dec-20	02:09:54	0,6	3	254010	577386	Groningen
Sappemeer	10-jan-21	22:39:08	1,3	3	248185	577715	Groningen
Tjuchem	24-jan-21	09:35:05	1,9	3	253857	588069	Groningen
Loppersum	27-jan-21	13:26:49	1,9	3	246448	595158	Groningen
Leermens	28-jan-21	02:40:50	0,2	3	248281	596863	Groningen
Stedum	31-jan-21	18:47:51	1,0	3	244223	593001	Groningen
Nieuwolda	21-feb-21	08:50:07	0,7	3	262223	584018	Groningen
Loppersum	13-mrt-21	06:00:50	0,6	3	244985	595019	Groningen
Wirdum	31-mrt-21	01:24:59	1,0	3	249533	590765	Groningen

Loppersum	2-apr-21	01:41:12	0,8	3	243614	593435	Groningen
Huizinge	28-apr-21	19:46:26	2,3	3	241198	598066	Groningen
Huizinge	29-apr-21	12:44:56	1,3	3	241265	598067	Groningen

