



RAPPORTAGE SEISMICITEIT  
GRONINGEN – MEI 2024



## Inhoudsopgave

1	Overzicht .....	2
1.1	Belangrijkste conclusies van dit rapport .....	2
1.2	Aantal aardbevingen (activity rate) .....	2
1.3	Aardbevingsdichtheid .....	3
1.4	Trend in seismiciteit .....	4
1.5	Aardbevingen met hoogste magnitude .....	4
1.6	Incidentparameters PGA en PGV .....	5
2	Inleiding en leeswijzer .....	6
2.1	Inleiding .....	6
2.2	Monitoring van het Groningen gasveld in de Mijnbouwregeling .....	6
2.3	Leeswijzer .....	7
2.4	Meetnetwerk en meetnauwkeurigheid .....	7
2.5	Magnitude van compleetheid .....	8
3	Trendparameters .....	10
3.1	Trendparameter aantal aardbevingen .....	11
3.2	Aardbevingsdichtheid .....	12
4	Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit .....	13
4.1	Aantal aardbevingen .....	13
4.2	Distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld .....	15
4.3	Statistische analyse naar de ontwikkeling aardbevingen .....	15
4.3.1	Verloop van het aantal aardbevingen door de tijd .....	15
4.3.2	Gas productie gedurende de rapportage periode .....	18
4.3.3	Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd .....	18
4.4	Vergelijking aantal geobserveerde en voorspelde aardbevingen .....	20
4.4.1	Kalibratie .....	20
4.4.2	Voorspelling .....	21
4.4.3	Toelichting figuren waarin opgetreden aantal aardbevingen wordt vergeleken met de voorspelling door het seismologisch model .....	22
5	Verdere studies naar de seismiciteit tijdens de periode van drukvereffening .....	25
6	Referenties .....	26
	Appendix A – Overzicht periodieke rapportages en speciale rapportages seismiciteit Groningen .....	27
	Appendix B – Aardbevingscatalogus 1 mei 2023 tot 30 april 2024 (door KNMI) .....	29

## 1 Overzicht

Deze rapportage is opgesteld om te voldoen aan 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 van de Mijnbouwregeling 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 (Ref. 1). De maximale aardbevingsdichtheid en het aantal aardbevingen per jaar ('activity rate') zijn de trendparameters. Deze parameters worden gebruikt om vroegtijdig een lokale of veld-brede toename of afname van de seismiciteit te signaleren over de afgelopen 6 maanden<sup>1</sup>. De trendparameters worden berekend over een periode van 6 maanden en gerapporteerd op jaarbasis. De piek grondversnellingen (PGA) en piek grondsnelheden (PGV) van de aardbevingen zijn de incidentparameters. Daarnaast is ook de aardbevingsmagnitude van belang in de Mijnbouwregeling.

### 1.1 Belangrijkste conclusies van dit rapport

- Het aantal aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  en  $M_L \geq 1,5$  in kalender jaar 2024 ligt dicht bij het verwachte aantal aardbevingen.
- In deze seismische monitoringsperiode is in een aan eengesloten periode van 124 dagen geen aardbeving met een magnitude  $M_L \geq 1,5$  opgetreden. De laatste langere periode zonder aardbeving met een magnitude  $M_L \geq 1,5$ , was na de Huizinge aardbeving van 16 augustus 2012.
- De aardbeving met de hoogste magnitude in de recente rapportage periode was de aardbeving bij Zeerijp op 11 april 2024. Deze had een magnitude van  $M_L = 2,1$ . De laatste aardbeving met een hogere magnitude was de aardbeving bij Wirdum op 22 november 2022, die een magnitude van  $M_L = 2,2$  had.

### 1.2 Aantal aardbevingen (activity rate)

Het aantal geregistreerde aardbevingen met een magnitude groter dan of gelijk aan  $M_L \geq 1,2$  is in de afgelopen zes maanden (1 november 2023 tot en met 30 april 2024) gestegen van 4 in de vorige rapportage periode (1 mei 2023 tot en met 31 oktober 2023) naar 7. Voor een magnitude groter dan of gelijk aan  $M_L \geq 1,5$  is het aantal geregistreerde aardbevingen in de afgelopen zes maanden gestegen van 3 naar 5. De seismiciteit in de afgelopen observatieperiode van zes maanden (van 1 november 2023 tot en met 30 april 2024) vertoont daarmee licht stijgende trend ten opzichte van de vorige observatieperiode. Ondanks deze stijging blijft het aantal aardbevingen binnen de onzekerheidsband van de voorspelling. De ontwikkeling van de seismiciteit in Groningen wordt in meer detail omschreven in paragrafen 4.1 tot 4.3. Opvallend is dat in het eerste kwartaal van 2024 er slechts één aardbeving met een magnitude van 1,2 of hoger werd geregistreerd in Groningen, en geen enkele aardbeving met een magnitude van 1,5 of hoger.

---

<sup>1</sup> De Mijnbouwregeling hanteert een observatieperiode van 6 maanden; dus bijvoorbeeld van 00:00 uur op 1 november tot 00:00 uur op 1 mei. Door het jaar varieert hierdoor de duur van de observatieperiode. Als februari bijvoorbeeld binnen de observatieperiode valt dan is deze korter. De duur van de observatieperiode varieert tussen de 181 en 184 dagen.

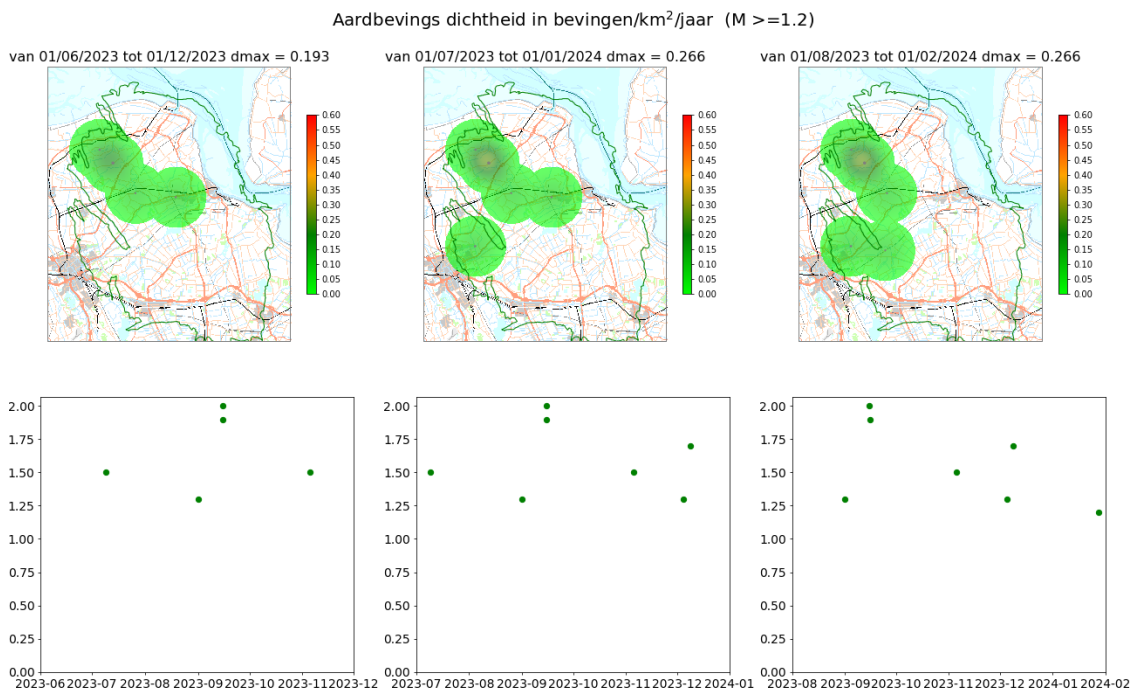
Tabel 1-1: Aardbevingen in Groningen met een kracht  $M_L \geq 1,2$  geregistreerd door het KNMI seismisch monitoringsnetwerk in de 6 maanden observatieperiode van 1 november 2023 tot en met 30 april 2024. Locatie van het hypocentrum is gebaseerd op de KNMI-aardbevingscatalogus.

Plaats	Datum	Time hh:mm:ss UTC	Magnitude	Diepte km	Easting	Northing
Rottum	05-Nov-23	15:41:38	1,5	3	238609	601471
Zandeweer	04-Dec-23	23:21:08	1,3	3	240844	599285
Thesinge	09-Dec-23	00:31:54	1,7	3	238551	585664
Luddeweer	28-Jan-24	01:47:05	1,2	3	244171	584985
Zeerijp	11-Apr-24	09:10:24	2,1	3	245078	597136
Lageland	14-Apr-24	14:08:51	1,6	3	242503	584955
Usquert	29-Apr-24	11:42:14	1,5	3	234322	603180

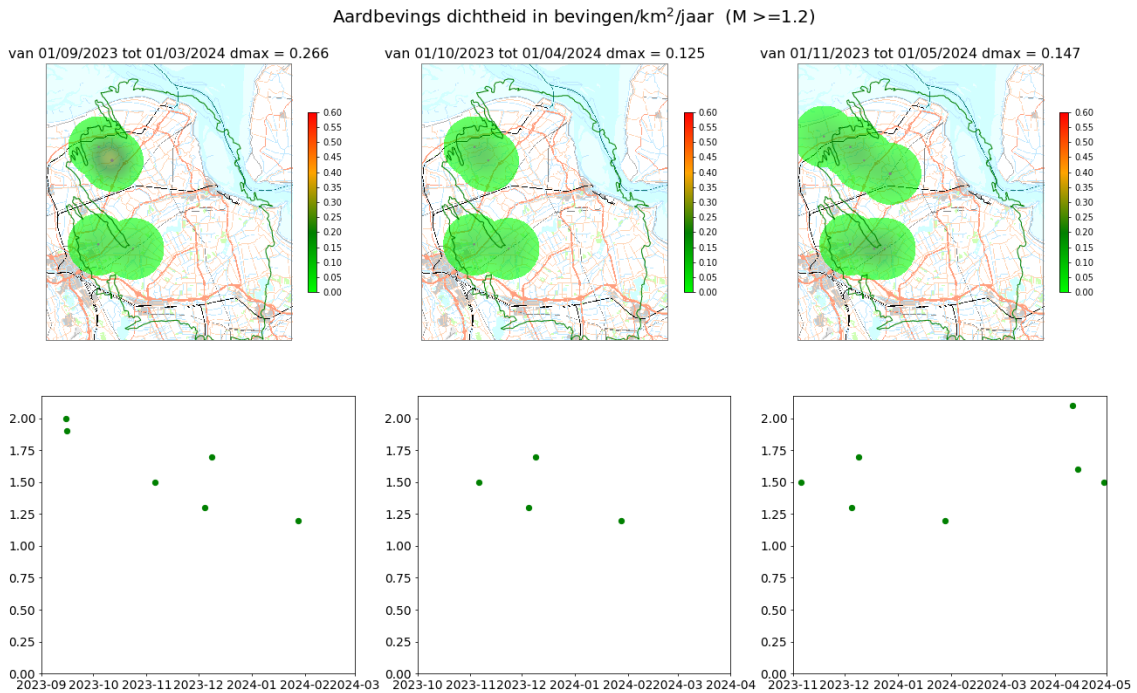
### 1.3 Aardbevingsdichtheid

Aardbevingsdichtheid is gedefinieerd als het aantal geobserveerde aardbevingen per vierkante kilometer per jaar en wordt berekend voor het hele Groningen-gasveld. Deze dichtheid is berekend op basis van de aardbevingen, geregistreerd gedurende de voorafgaande 6 maanden, met een magnitude  $M_L \geq 1,2$ .

In de huidige rapportage periode van 1 november 2023 tot 30 april 2024 liggen de epicentra van alle zes aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  in het westelijke gebied van Groningen. Twee hiervan zijn geregistreerd in het zuidwesten bij Ten Boer. De aardbevingsdichtheid is gedaald tot 0,147 aardbevingen per ( $\text{km}^2 / \text{jaar}$ ), zie figuur 1-1a en 1-1b.



Figuur 1-1a: Kaarten van aardbevingsdichtheid gebaseerd op aardbevingen met magnitude  $M_L \geq 1,2$  gedurende de afgelopen 6 maanden. De aardbevingsdichtheid is omgerekend naar jaarbasis. De grafieken onder de kaarten tonen de magnitude van de aardbevingen in tijd.



*Figuur 1-1b: Kaarten van aardbevingsdichtheid gebaseerd op aardbevingen met magnitude  $M_L \geq 1,2$  gedurende de afgelopen 6 maanden. De aardbevingsdichtheid is omgerekend naar jaarbasis. De grafieken onder de kaarten tonen de magnitude van de aardbevingen in tijd.*

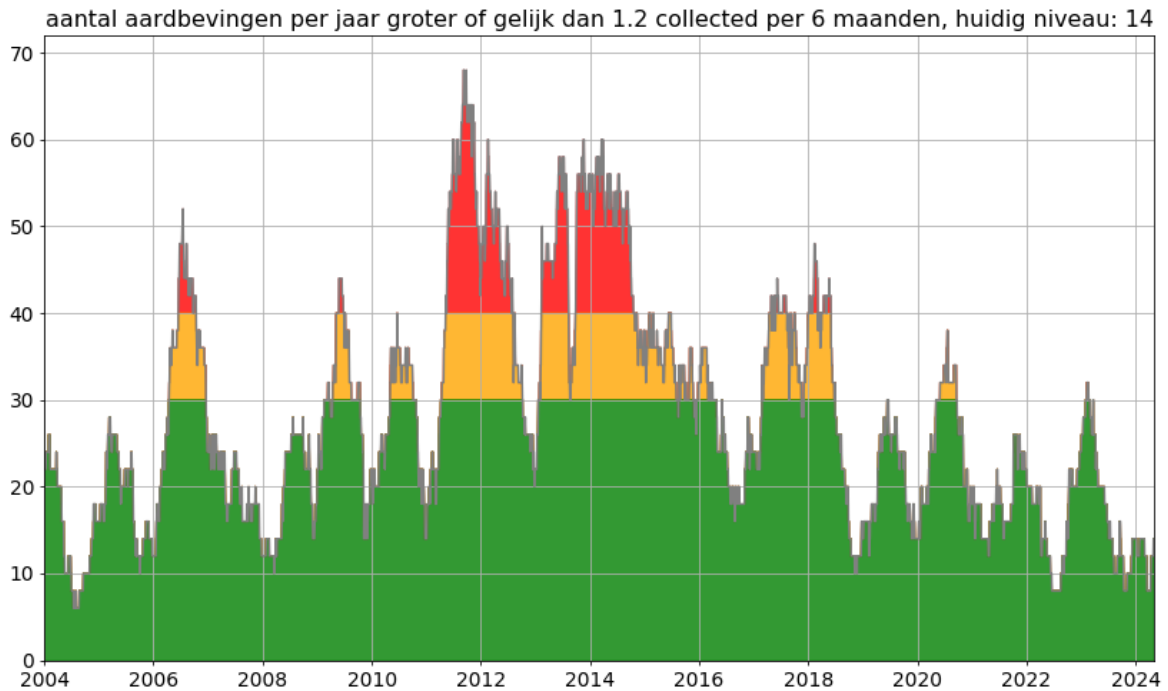
#### 1.4 Trend in seismiciteit

Het aantal aardbevingen per jaar laat vanaf 2014 een dalende trend zien. In het kalender jaar 2024 zijn er in de eerste vier maanden vier aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  geregistreerd. Naast het aantal aardbevingen dat plaats vindt in een periode is ook de periode die verstrijkt tussen twee aardbevingen een maat voor de trend in de seismiciteit.

De periode tussen de Thesinge aardbeving op 9 december 2023 en de Zeerijp aardbeving op 11 april 2024 is 124 dagen. De laatste keer dat een periode tussen twee aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,5$  langer duurde, was in 2013 toen na de Huizinge aardbeving op 16 augustus 2012 een periode zonder aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,5$  volgde van 148 dagen. De eerste aardbeving na de Huizinge aardbeving op 16 augustus 2012 met een magnitude  $M_L \geq 1,5$  was toen op 11 januari 2013. Dat was een aardbeving met een magnitude  $M_L = 1,8$  bij Usquert.

#### 1.5 Aardbevingen met hoogste magnitude

De aardbeving met de hoogste magnitude in de recente rapportage periode was de aardbeving bij Zeerijp op 11 april 2024. Deze had een magnitude van  $M_L = 2,1$ . Deze geregistreerde magnitude is lager dan de grenswaarden voor deze signaalparameter. Dit is sinds het insluiten van het Groningen gasveld de aardbeving met de hoogste magnitude. De laatste aardbeving met een hogere magnitude was de aardbeving bij Wirdum op 22 november 2022, die een magnitude van  $M_L = 2,2$  had.



Figuur 1-2: Aantal aardbevingen per jaar berekend als aangegeven in de mijnbouwregeling artikel 1.3a.5. Aangegeven in de figuur zijn aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  gedurende een 6-maanden periode geconverteerd naar jaarbasis.

## 1.6 Incidentparameters PGA en PGV

De piek grondsnelheid en de piek grondversnelling voor aardbevingen met de grootste magnitude gedurende deze monitoringsperiode, de aardbeving bij Zeerijp met een magnitude  $M_L = 2,1$ , zijn geanalyseerd in 'Special Report on the earthquake near Zeerijp on 11th April 2024 with a magnitude  $M_L 2.1$ '. Dit laat zien dat de grootste amplitudes van groundbewegingen werden geregistreerd door de H2 (EW) component van station G140, het dichtstbijzijnde station bij het epicentrum op een afstand van 2,27 km. De grootste waarde van PGA is  $7,44 \text{ cm/s}^2$ , terwijl de grootste PGV-waarde  $0,176 \text{ cm/s}$  is. In de afgelopen rapportage periode van 6 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 (zie sectie 2.2 van dit rapport).

Het Rapport 'Defining criteria for semi-annual earthquake reporting of PGV and PGA in Groningen' bevat ook een analyse van de piek grondsnelheid en piek grondversnelling die is geobserveerd voor aardbevingen met verschillende magnitudes. De waargenomen magnitude van de aardbeving geeft al aan dat piek de grondversnellingen en piek grondsnelheden lager zijn dan de grenswaarden voor deze signaalparameters.

## 2 Inleiding en leeswijzer

### 2.1 Inleiding

Dit halfjaarlijkse rapport beschrijft een analyse van 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 (Ref. 1). Ook na het insluiten van de gasproductie uit het Groningen-gasveld zal NAM doorgaan met uitgeven van deze rapportages als onderdeel van de nazorg.

Seismische gegevens en gasproductie in dit rapport zijn bijgewerkt tot 30 april 2024. Het rapport kijkt in principe een halfjaar terug, maar daar waar relevant wordt verder teruggekeken om seismische ontwikkelingen in hun bredere historische context te plaatsen. Een tabel met de aardbevingen die in Groningen zijn geregistreerd in het afgelopen jaar, door het seismisch monitoringsnetwerk geopereerd door KNMI, is in dit rapport opgenomen onder Appendix B.

### 2.2 Monitoring van het Groningen gasveld in de Mijnbouwregeling

In de Mijnbouwregeling (artikel 1.3a.6.1a tot en met f) staat beschreven welke actie moet worden genomen wanneer het waarnemingsniveau van een trendparameter wordt overschreden. Dit is samengevat in Tabel 2.1. In Mijnbouwregeling artikelen 1.3a.8 en 1.3a.9 is beschreven welke actie genomen moet worden bij overschrijding van het waarnemingsniveau van een signaalparameter, zie hiervoor tabel 2.2.

*Tabel 2-1: Beschrijving van welke actie ondernomen wordt bij overschrijding van een waarnemingsniveau voor een trendparameter volgens Mijnbouwregeling artikel 1.3a.6. Meldingen worden gedaan aan de Minister van Economische Zaken en Klimaat en de Inspecteur-generaal der Mijnen (SodM).*

Trendparameter	Waarnemings-Niveau	Melding	Analyse
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 2-2: Beschrijving van welke actie ondernomen wordt bij overschrijding van een signaalparameter waarnemingsniveau volgens Mijnbouwregeling artikel 1.3a.8 (Grondversnelling en Grondsnelheid) en artikel 1.3a.9 (Magnitude). Meldingen worden gedaan aan de Minister van Economische Zaken en Klimaat en de Inspecteur-generaal der Mijnen (SodM).

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
Magnitude	≥ 3,0	Terstond waarneming melden	Eerste analyse binnen 48 uren, nadere analyse binnen 14 dagen.

### 2.3 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 sub-sets, 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: Aardbevingen met een magnitude<sup>2</sup> groter of gelijk aan  $M_L = 1,0$
- Paars: Aardbevingen met een magnitude groter of gelijk aan  $M_L = 1,2$
- Blauw: Aardbevingen met een magnitude groter of gelijk aan  $M_L = 1,5$
- Rood: Aardbevingen met een magnitude groter of gelijk aan  $M_L = 2,0$

Voor het bepalen van de monitoringsparameters voor het aantal aardbevingen en aardbevingsdichtheid zijn aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  van belang. Het seismisch model dat gebruikt wordt voor het inschatten van dreiging en risico is gekalibreerd op basis van de aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,5$ .

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

### 2.4 Meetnetwerk en meetnauwkeurigheid

Het seismische meetnetwerk is eigendom van en wordt geopereerd en onderhouden door het KNMI. Elk seismisch meetstation bestaat uit een bovengronds geplaatste accelerometer voor het meten van grondversnellingen en vier ondergronds geplaatste geofoons voor een nauwkeurige bepaling van het epi- en hypocentrum en de bepaling van de aardbevingssterkte. Deze geofoons zijn in een put op 50, 100, 150 en 200 meter diepte geplaatst. Daarnaast zijn er ook oude gefoon stations van vóór de uitbreiding en nieuw geplaatste stations (vooral ten westen en zuiden 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.

<sup>2</sup> De sterkte van de aardbevingen worden in dit rapport aangeduid in Local Magnitude Scale of  $M_L$ . (Ref. 2).



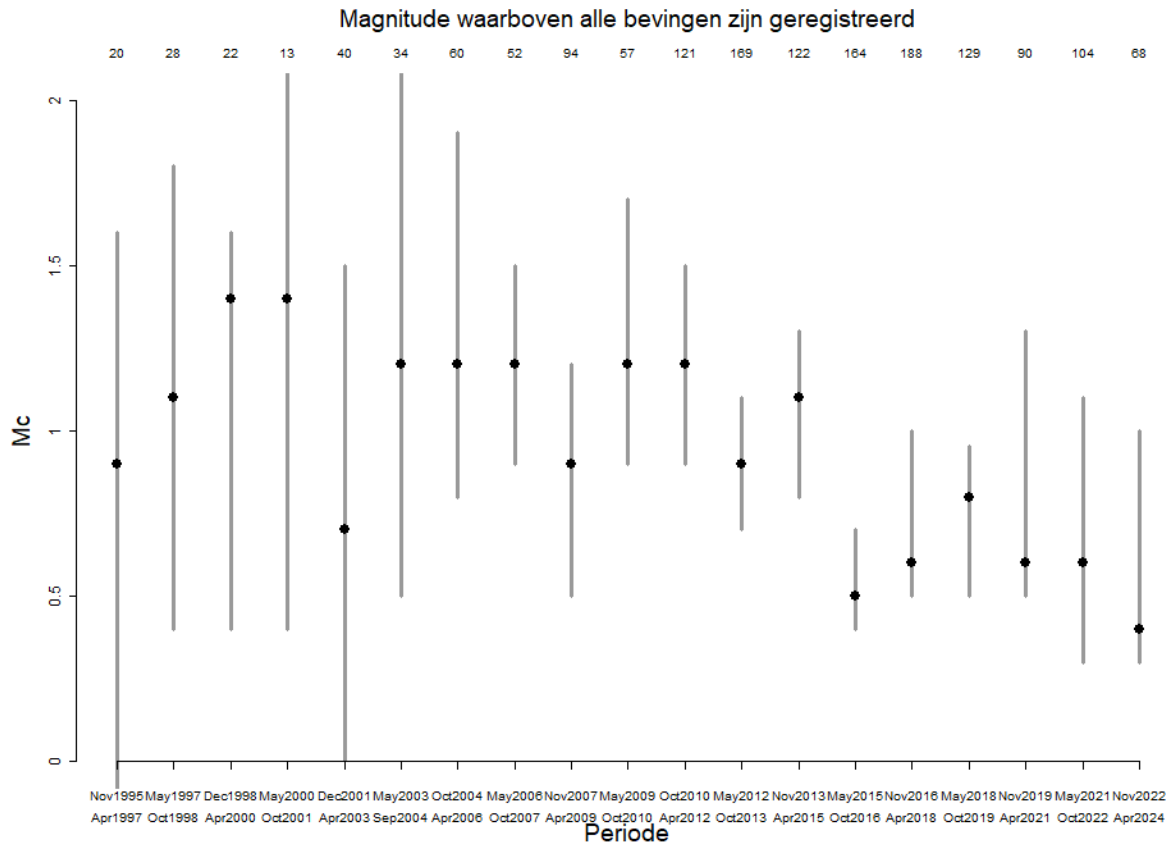
Het seismische meetnetwerk boven het Groningen-gasveld is in 2014 uitgebreid met 69 nieuwe seismische meetstations. Hierdoor is de gevoeligheid van het meetnetwerk toegenomen. In de periode van 2003 tot en met 2014 werden alle aardbevingen in het Groningen-gasveld met een magnitude groter dan  $M_L \geq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

## 2.5 Magnitude van compleetheid

De magnitude van compleetheid (magnitude of completeness of ook wel MoC) is de laagste magnitude  $M_L$  waarvoor elke aardbeving waargenomen kan worden, ongeacht locatie in het gasveld. Aardbevingen met een magnitude kleiner dan de MoC kunnen waargenomen worden wanneer deze zich voordoen op een voor het meetnetwerk ‘gunstige’ locatie. Wanneer de aardbeving zich voordoet op een andere locatie zou deze mogelijk niet wordt waargenomen. Voor aardbevingen met een magnitude groter dan de MoC geldt dat deze wordt waargenomen, ongeacht de locatie in het gasveld. 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 wordt de dataset kleiner dan mogelijk en is het moeilijker statistisch relevante conclusies 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.

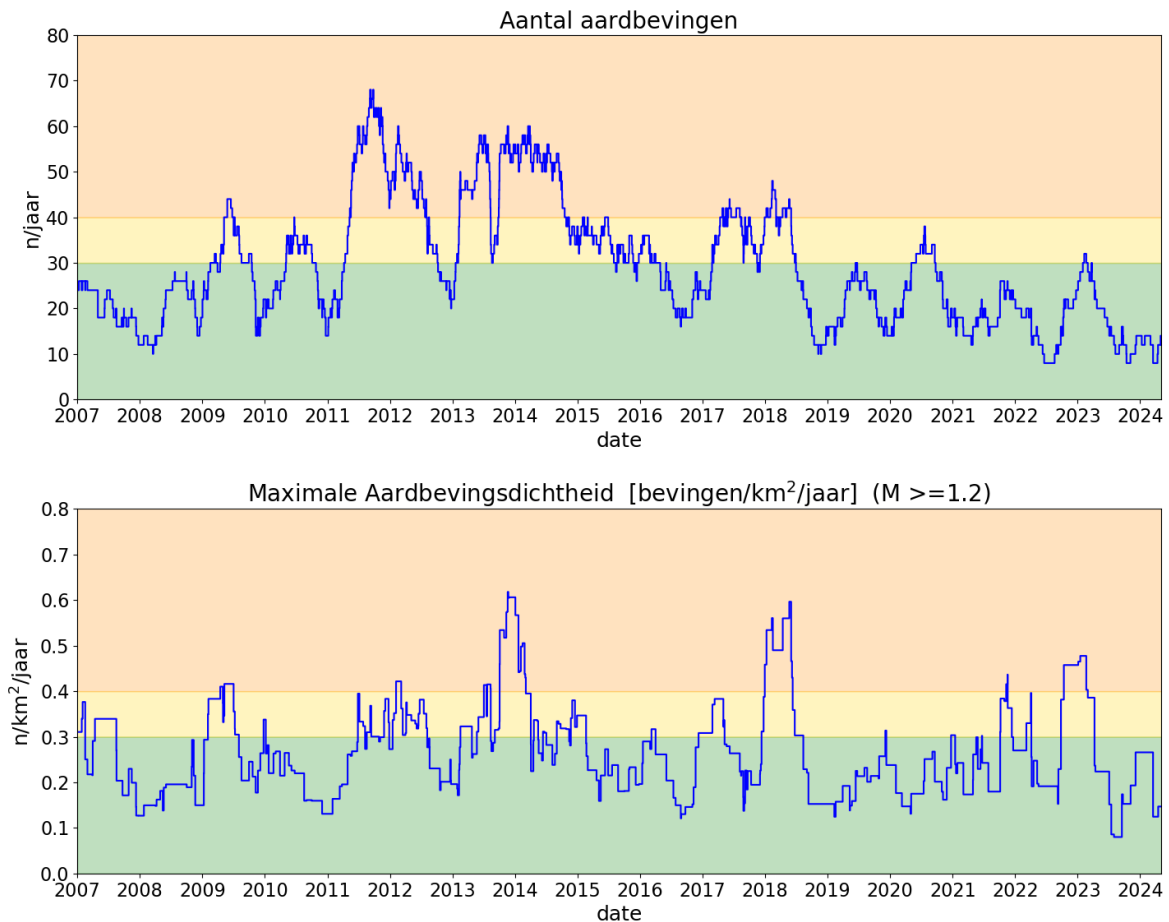
De MoC is afgeleid volgens de maximum curvature method (Ref. 2 en 3) en de resultaten met het 95% betrouwbaarheidsinterval zijn weergegeven in figuur 2-1. In het figuur is duidelijk zichtbaar dat vanaf 2014 de MoC afneemt (ook kleinere aardbevingen worden geregistreerd). Vanaf 2014 zijn aardbevingen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



*Figuur 2-1: Magnitude of Completeness met onzekerheidsintervallen voor verschillende periodes, met de stip wordt de P50 waarde aangegeven.*

### 3 Trendparameters

Het aantal aardbevingen en de maximale aardbevingsdichtheid zijn de trendparameters. De trendparameters worden continu bijgehouden in de vorm van een trendlijngrafiek, zie Figuur 3-1.



*Figuur 3-1: Trendparameters: In de bovenste grafiek wordt het aantal waargenomen aardbevingen met een magnitude  $M_L = 1,2$  of groter per twaalf maanden getoond. In de onderste grafiek wordt de maximale aardbevingsdichtheid (voor aardbevingen met een magnitude van  $M_L = 1,2$  of groter) per twaalf maanden getoond. In beide grafieken is de periode waarin de aardbevingen verzameld worden zes maanden. De getallen zijn omgerekend naar een jaarlijks aantal aardbevingen/dichtheid. De achtergrondkleur geeft het niveau van de seismiciteit weer, groen: lage activiteit, geel: bovengemiddelde activiteit en oranje: hoge activiteit.*

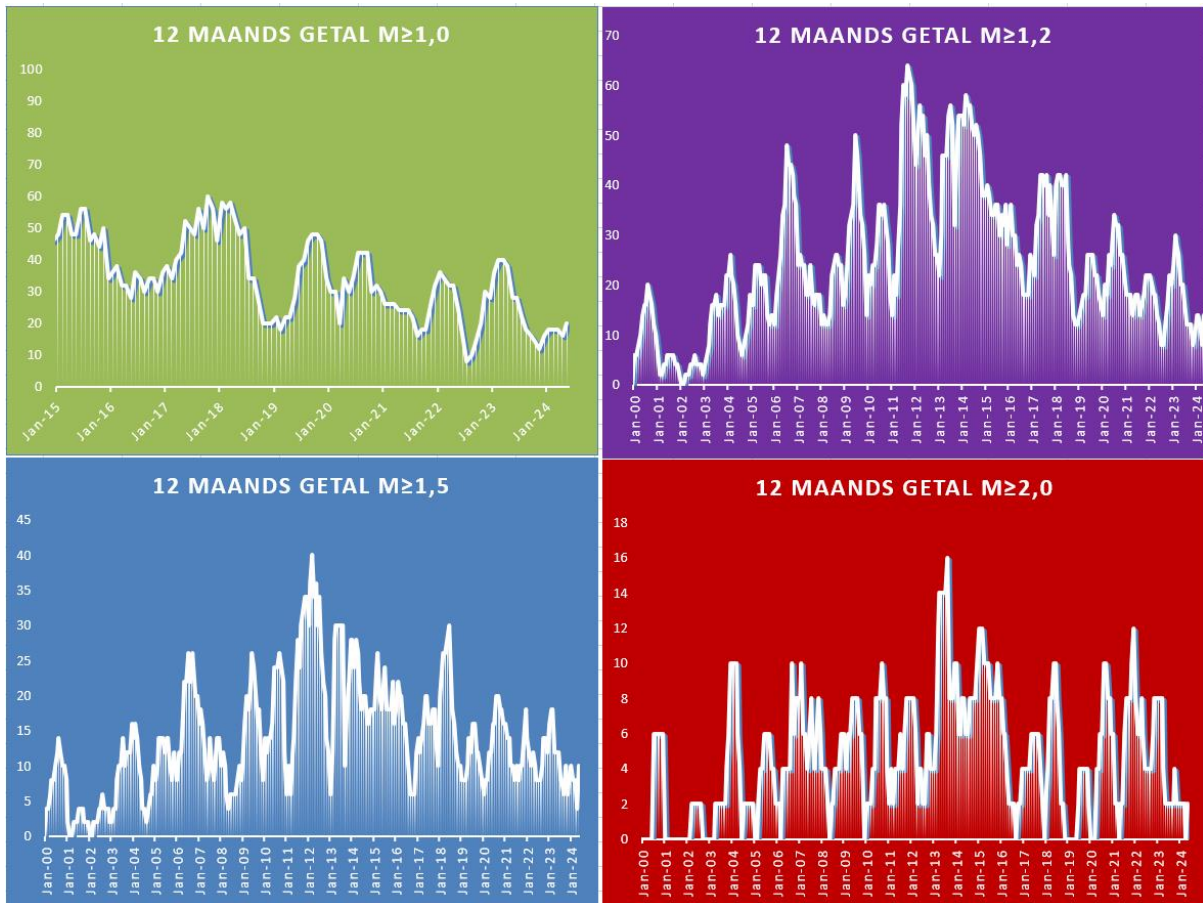
Zowel het aantal aardbevingen als de maximale aardbevingsdichtheid zijn stabiel op een historisch laag niveau gedurende de huidige rapportage periode en vallen onder het laagste waarnemingsniveau. In Tabel 3-1 wordt voor de afgelopen 6 maanden het aantal aardbevingen op jaarbasis met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  en de maximale aardbevingsdichtheid in het Groningen gasveld getoond.

Tabel 3-1 Trendparameter overzicht 1 november 2023 tot en met 30 april 2024. Aantal aardbevingen per voorgaande jaar en aardbevingsdichtheid (aantal aardbevingen per jaar en vierkante kilometer) zijn berekend op het einde van de maand.

	nov	dec	jan	feb	mar	apr
Aantal aardbevingen ( $M_L \geq 1,2$ )	1	2	1	0	0	3
Aardbevingsdichtheid (einde maand)	0,193	0,266	0,266	0,266	0,125	0,147

### 3.1 Trendparameter aantal aardbevingen

De trendparameter ‘aantal aardbevingen’ toont het aantal waargenomen aardbevingen met een magnitude  $M_L=1,2$  of groter in het voorgaande jaar. Dit wordt ook het rollende aantal of 12-maandsgetal genoemd. Dit wordt berekend over de voorgaande zes maanden. Het 12-maandsgetal van mei 2024 is dus de som van het aantal aardbevingen van een bepaalde magnitude in de voorafgaande periode van 1 november 2023 tot 30 april 2024 omgerekend naar één jaar.



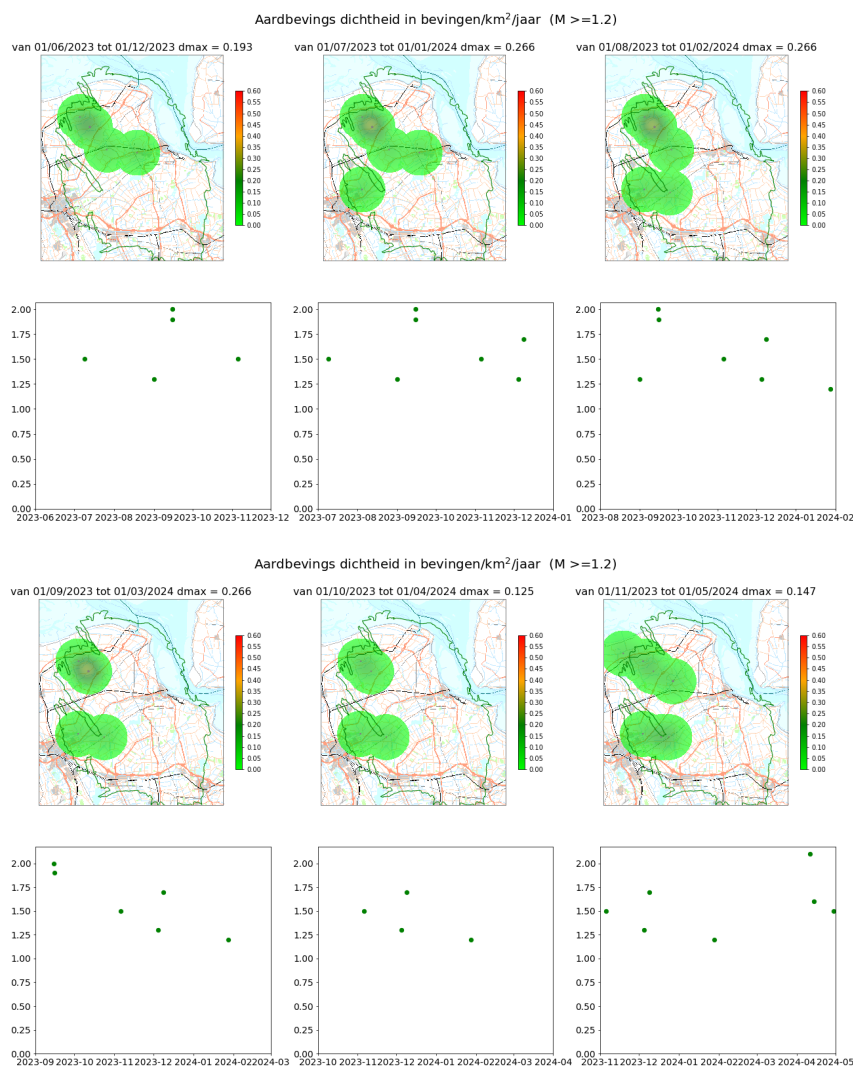
Figuur 3-2: 12-maandsgetallen voor vier magnitude-klassen; waarnemingen voor  $M_L \geq 1,0$  weergegeven vanaf 2014, de overige waarnemingen sinds 2000. Deze trend is gebaseerd op aardbevingsobservaties tijdens de voorgaande 6 maanden. Deze zijn omgerekend naar jaarbasis.

Figuur 3-2 laat het 12-maandsgetal zien over een langere periode voor vier magnitude-klassen. Hierbij geldt dat de dataset van aardbevingen met een magnitude onder de  $M_L \geq 1,5$  in de periode voor 2014 mogelijk incompleet is vanwege beperkingen in het meetsysteem in die periode, zie ook hoofdstuk 2.3.

De dalende trend in het aantal aardbevingen (met magnitude groter dan of gelijk aan  $M_L = 1,0$ ,  $M_L = 1,2$  en  $M_L = 1,5$ ) kan gevolg zijn van het insluiten van het veld, maar ook van de natuurlijke variabiliteit. Het lage aantal aardbevingen maakt het lastig om conclusies te trekken, in hoofdstuk 4 wordt hier verder op in gegaan.

### 3.2 Aardbevingsdichtheid

Figuur 3-3 toont een kaart met de aardbevingsdichtheid en de epicentra van de in de periode 1 november 2023 tot en met 30 april 2024 geregistreerde aardbevingen. Aardbevingsdichtheid wordt berekend met de Quartic Kernel functie. Alle geregistreerde aardbevingen met een magnitude van  $M_L = 1,2$  en groter 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 zes maanden gebruikt.



*Figuur 3-3: Boven: Kaarten van aardbevingsdichtheid gebaseerd op aardbevingen met magnitude  $M_L \geq 1,2$  gedurende de afgelopen 6 maanden. De aardbevingsdichtheid is omgerekend naar jaarbasis. Onder: Grafieken met de magnitude van de aardbevingen in tijd.*

In de huidige rapportage periode vallen alle zeven aardbevingen met  $M_L \geq 1,2$  in het westelijk gebied van het veld ten noordwesten van Loppersum en rond Ten Boer. Het gebied waar aardbevingsdichtheid wordt geëvalueerd is duidelijk te zien in figuur 3-3.

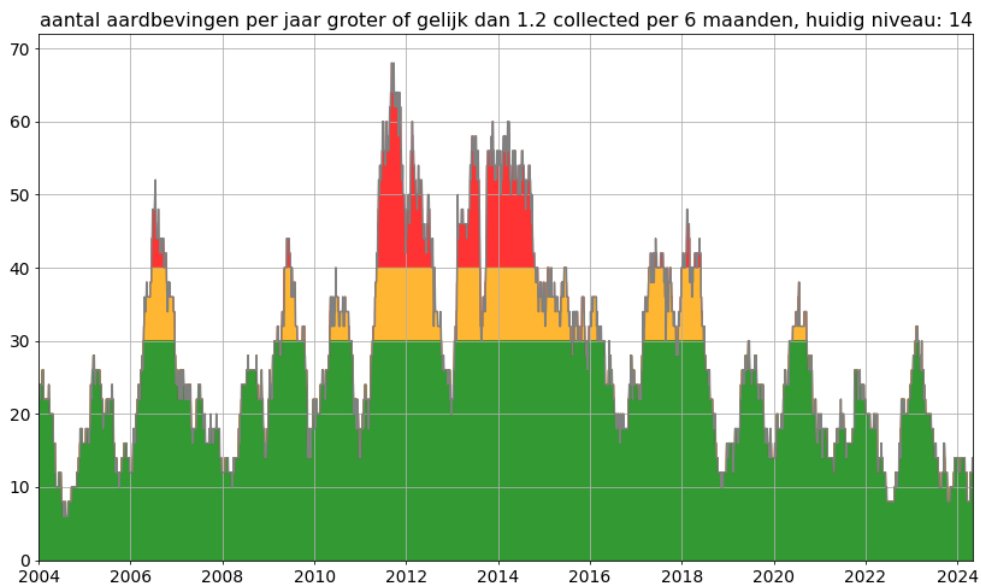
## 4 Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit

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

1. Verloop van het aantal aardbevingen.
2. Regionale ontwikkeling van de seismiciteit.
3. Een statistische analyse van de hoeveelheid aardbevingen over tijd.

### 4.1 Aantal aardbevingen

In de afgelopen zes maanden zijn in totaal zeven aardbevingen geregistreerd met een magnitude groter of gelijk aan  $M_L \geq 1,2$ . Omgerekend naar het aantal aardbevingen per jaar komt dit overeen met veertien aardbevingen op jaarbasis. Dit is te zien in figuur 4-1.



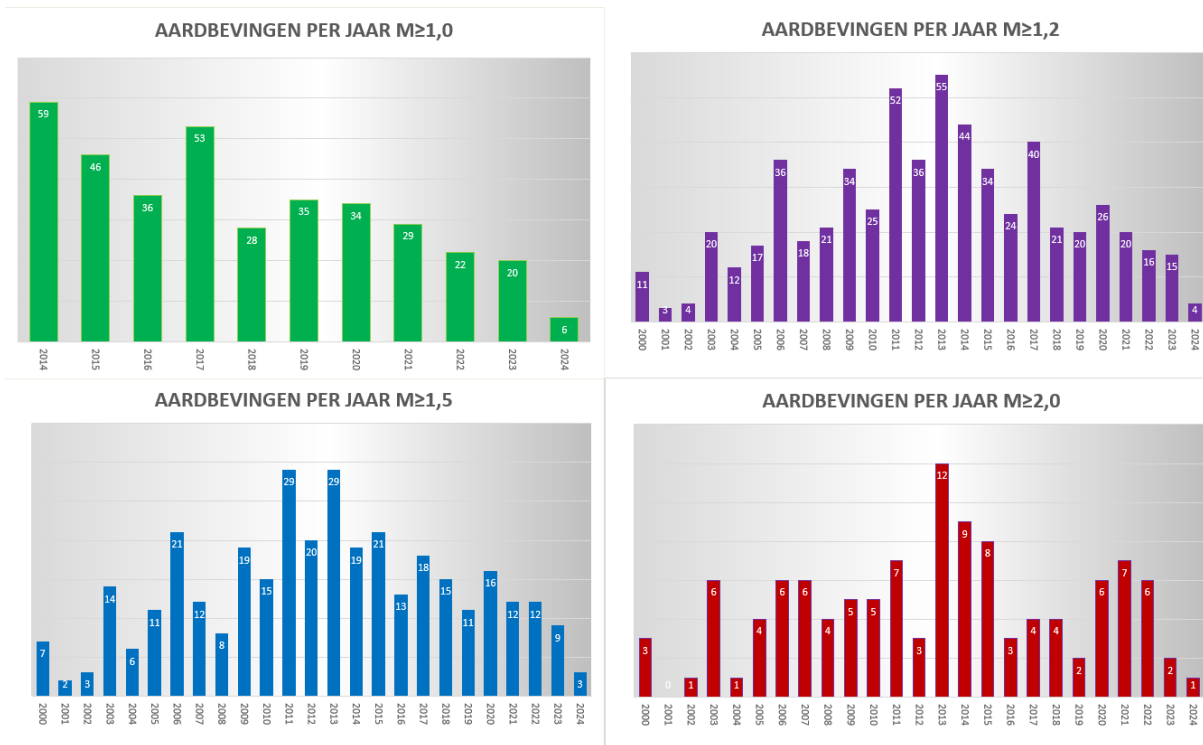
*Figuur 4-1: Aantal aardbevingen berekend per jaar zoals aangegeven in Mijnbouwregeling artikel 1.3a.5. Dit betreft de aardbevingen met een kracht van  $M_L \geq 1,2$  in de voorgaande 6 maanden omgerekend naar jaarbasis.*

Het aantal aardbevingen per maand onderverdeeld in vijf magnitudeklassen is opgenomen in Tabel 4-1. In de voorgaande periode (1 mei 2023 tot en met 31 oktober 2023) zijn er 4 aardbevingen geregistreerd met een magnitude  $M_L \geq 1,2$ . In de huidige periode (1 november 2023 tot en met 30 april 2024) zijn er 7 aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  geregistreerd. In de afgelopen 12 maanden (laatste twee seismische monitoringsperiodes) zijn er 11 aardbevingen met een magnitude groter of gelijk aan  $M_L \geq 1,2$  opgetreden. In deze monitoringsperiode (1 november 2023 tot en met 30 april 2024) zijn er 5 aardbevingen met een magnitude groter of gelijk aan  $M_L \geq 1,5$  opgetreden.

Tabel 4-1: Aantal waargenomen aardbevingen per maand het afgelopen jaar verdeeld over vijf magnitude klassen.

Maand	$1,0 \leq M_L < 1,2$	$1,2 \leq M_L < 1,5$	$1,5 \leq M_L < 2,0$	$2,0 \leq M_L < 2,5$	$M_L \geq 2,5$	Totaal $M_L \geq 1,2$
mei-23	0	0	0	0	0	0
jun-23	1	0	0	0	0	0
jul-23	0	0	1	0	0	1
aug-23	0	1	0	0	0	1
sep-23	0	0	1	1	0	2
okt-23	1	0	0	0	0	0
nov-23	1	0	1	0	0	1
dec-23	0	1	1	0	0	2
jan-24	0	1	0	0	0	1
feb-24	1	0	0	0	0	0
mrt-24	1	0	0	0	0	0
apr-24	0	0	2	1	0	3
<b>Rapportage periode mei2023-okt2023</b>	2	1	2	1	0	4
<b>Rapportage periode nov2023-apr2024</b>	3	2	4	1	0	7
<b>Totaal vol jaar mei2023 - apr2024</b>	5	3	6	2	0	11

Figuur 4-2 laat de ontwikkeling van het aantal aardbevingen per jaar zien voor vier 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 2024 over de periode tot en met april weergegeven is en dat er vanwege incompleetheid geen data van voor 2014 getoond zijn 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 2.5. Dit is de reden dat deze geplot is vanaf het jaar 2000 (paneel rechtsboven, paarse kleuren). Het linker paneel beneden (blauwe kleuren) laat aardbevingen 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 aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 2,0$ .



Figuur 4-2: Aantal aardbevingen per jaar voor vier verschillende magnitude-klassen. Het aantal aardbevingen in 2024 is aangegeven voor de periode tot en met april 2024.

## 4.2 Distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld

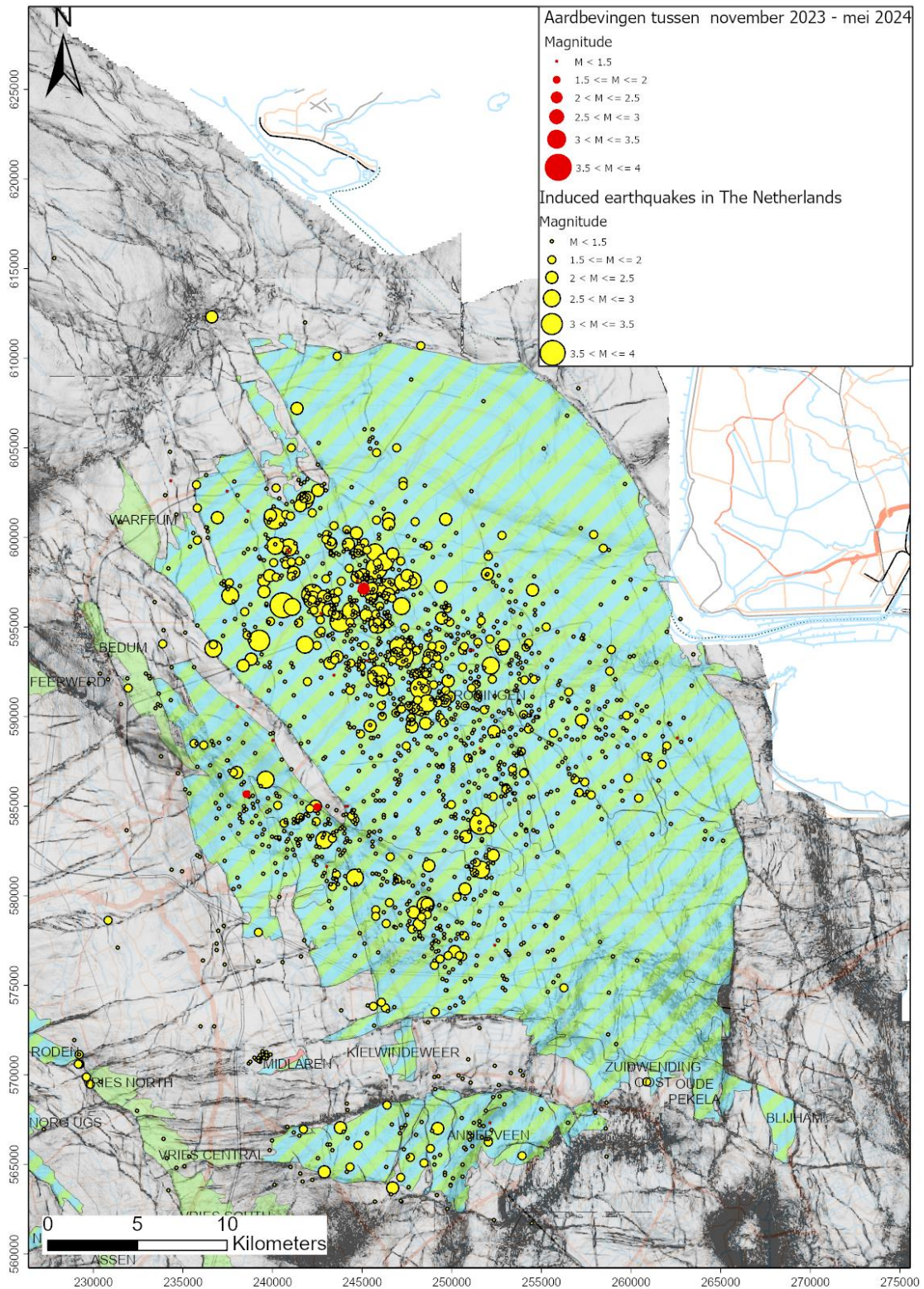
De distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld is getoond op de kaart in Figuur 4-3. De locaties van de in de periode van 1 november 2023 tot en met 30 april 2024 (6 maanden) geregistreerde aardbevingen zijn in rood weergegeven. Van de 7 aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  hebben een epicentrum binnen het meest seismisch actieve gebied in het noordwesten en zuidwesten van het gasveld. De zwaarste aardbeving met een magnitude  $M_L=2.1$  vond plaats bij Zeerijp op 11 april 2024.

## 4.3 Statistische analyse naar de ontwikkeling aardbevingen

### 4.3.1 Verloop van het aantal aardbevingen 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 4-4); één onder de aanname dat de events quasi-Poisson verdeeld zijn (Figuur 4-5). 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.





Figuur 4-3: Kaart van de diepe ondergrond met daarop in groen het Groningen-gasveld en de omliggende gasvelden. Met rode stippen zijn de in de periode 1 november 2023 tot 30 april 2024 (6 maanden) geregistreeerde aardbevingen aangegeven. Alle andere aardbevingen (vóór 1 november 2023) zijn aangegeven met gele cirkels. De grootte van de cirkel is een maat voor de magnitude van de aardbeving.

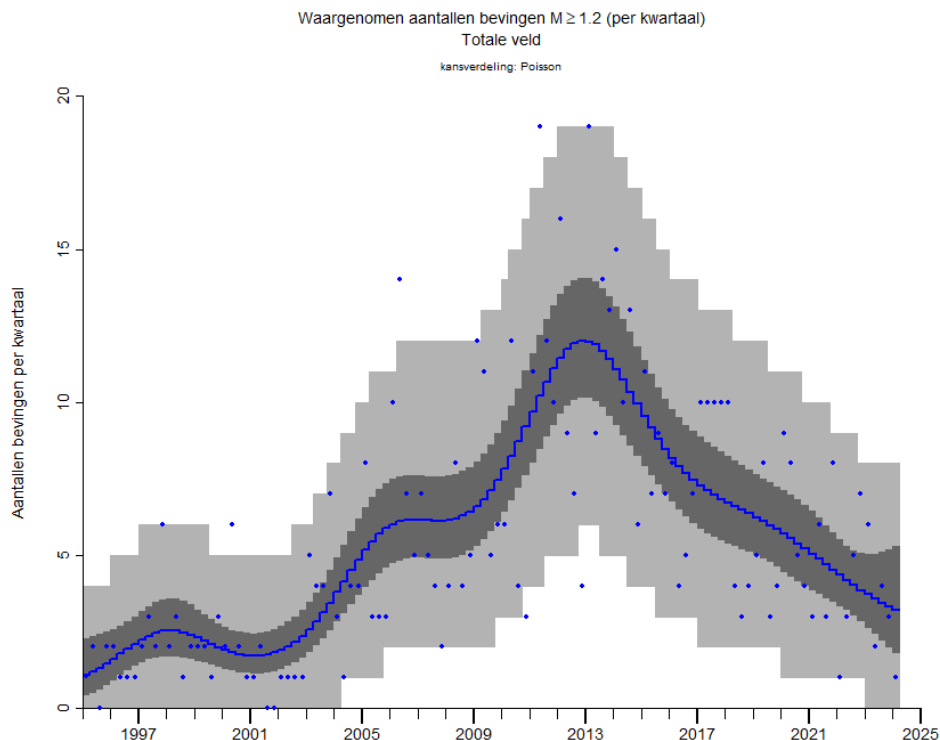
De Poisson verdeling geeft een redelijke beschrijving van de data onder de aanname dat de aardbevingen ongecorrleerd zijn. Deze aanname is echter niet geheel correct omdat naschokken plaatsvinden. De quasi-Poisson verdeling kan gebruikt worden om een hogere mate (ten opzichte van de Poisson verdeling) van variabiliteit in aantallen aardbevingen tussen kwartalen te beschrijven. Deze hogere variabiliteit kan ontstaan door een bepaalde mate van correlatie tussen de aardbevingen 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:

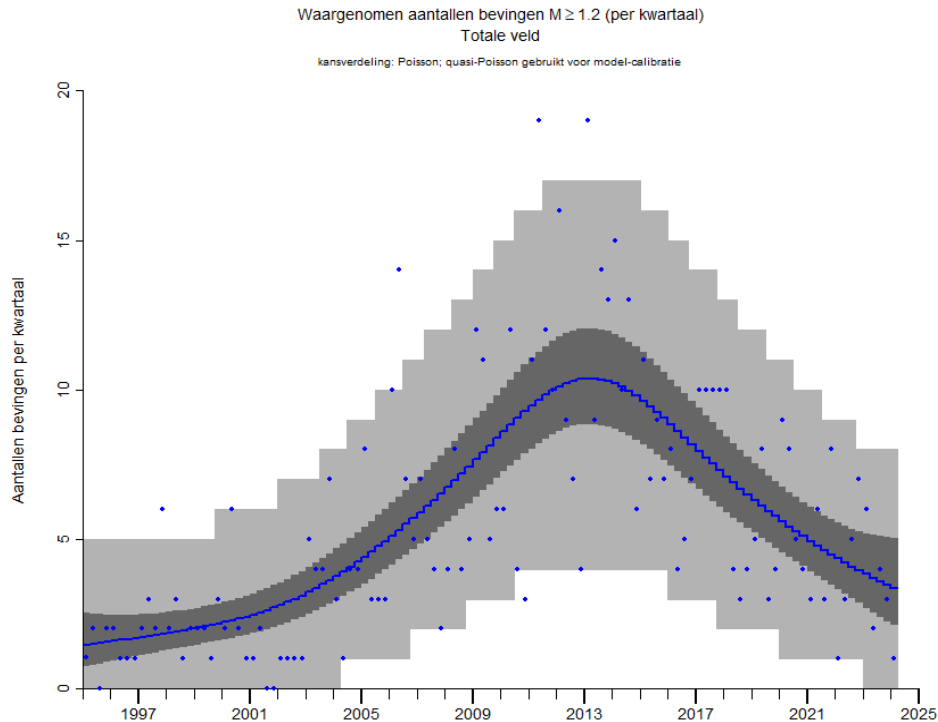
- Blauwe stippen voor het aantal seismische events per kwartaal.
- Een blauwe lijn die de trendlijn van het aantal te verwachten seismische events weergeeft.
- Een donkergrijze band; het 95% betrouwbaarheidsinterval van de trendlijn.
- Een lichtgrijze band; het 95% voorspellingsinterval van het aantal 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 aardbevingen een neergaande trend zien in de periode van 2013 tot 2024. Merk op dat de onzekerheidsbanden in 2022 – 2024 mogelijk toenemen door grotere variatie van het aantal aardbevingen 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 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 4-4: Trend en betrouwbaarheidsinterval van het aantal aardbevingen per kwartaal, bij Poisson verdeelde seismische events.



*Figuur 4-5: Trend en betrouwbaarheidsinterval van het aantal aardbevingen per kwartaal, bij quasi-Poisson verdeelde seismische events.*

#### 4.3.2 Gas productie gedurende de rapportage periode

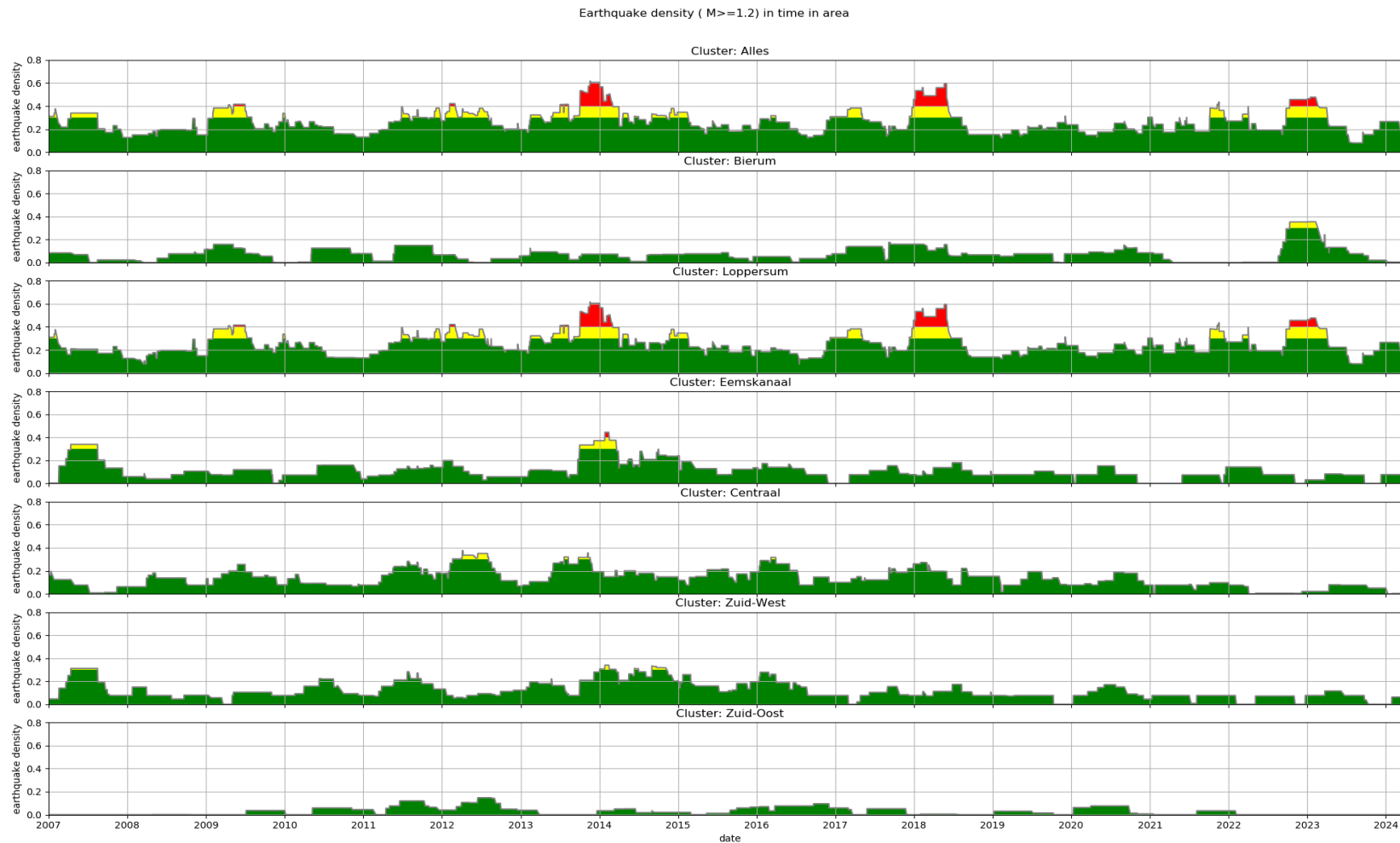
Om 6 uur in de ochtend op 1 oktober 2023 is het Groningen gasveld ingesloten. Gedurende de seismische monitoringsperiode is het gas veld kort geproduceerd. Van 8 januari tot 10 januari 2024 heeft NAM, op verzoek van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat, twee locaties van het Groningen gasveld, Spitsbergen en Scheemderzwaag, geproduceerd op het waakvlam niveau. In totaal is gedurende deze periode ca. 8 mln m<sup>3</sup> aardgas geproduceerd uit het Groningen gasveld (Ref. 15 tot 17).

#### 4.3.3 Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd

De maximumwaarde van de aardbevingsdichtheid als functie van de tijd over het gehele veld en per deelgebied is weergegeven in Figuur 4-6. 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.

Duidelijk zichtbaar is de hogere maximale aardbevingsdichtheid in de periode van 2013 tot 2014 en de periodes 2018 en 2022 over het veld en in het gebied Loppersum in het bijzonder. Omdat de aardbevingen bij Wirdum, Zijldijk en Garrelsweer in het Loppersum-gebied, maar minder dan 5 km van de grens van het Bierum cluster plaats vonden was door de manier waarop de aardbevingsdichtheid wordt berekend in het verleden ook in het Bierum cluster de aardbevingsdichtheid hoger. Ook eind -2022 tot begin 2023 was de maximale aardbevingsdichtheid in het Loppersum Cluster hoog. Dat kwam door de zwermen aardbevingen in heel kleine gebieden ten noordwesten van Loppersum.

## RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – MEI 2024



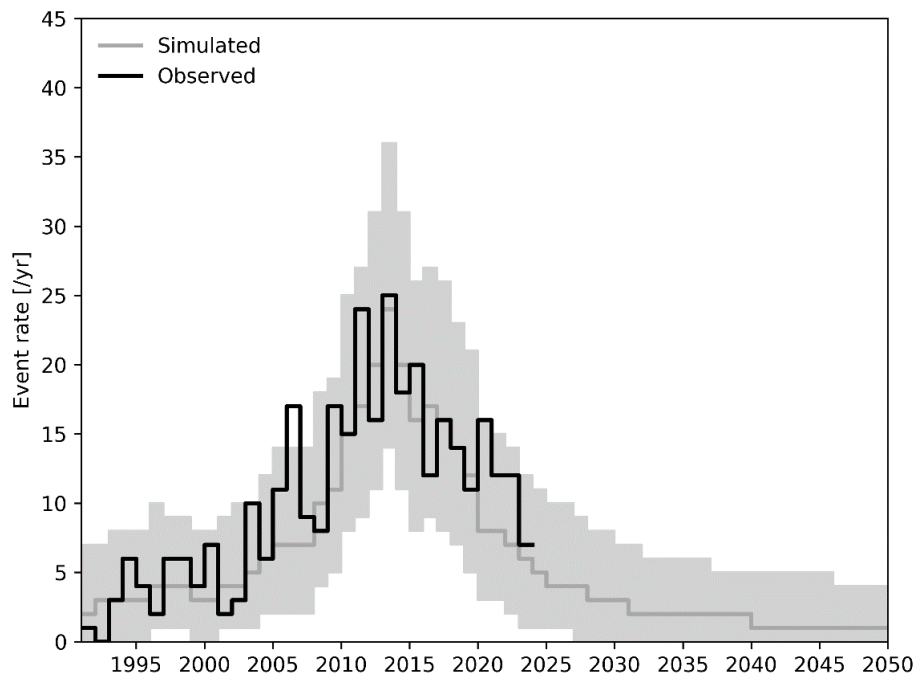
*Figuur 4-6: De ontwikkeling van de maximale aardbevingsdichtheid over de jaren in het gehele Groningen-gasveld en kleinere gebieden binnen het Groningen-gasveld, weergegeven in aantal aardbevingen met een  $M_L > 1,2$  per  $\text{km}^2$  per jaar. De achtergrondkleur geeft het relatieve niveau van de seismiciteit weer, groen: lage activiteit, geel: bovengemiddelde activiteit en rood: hoge activiteit.*

In alle gebieden is de maximale aardbevingsdichtheid sindsdien gedaald. In het laatste jaar daalt ook in het Loppersum gebied de aardbevingsdichtheid aanzienlijk. De maximale aardbevingsdichtheid voor het totale Groningen gasveld wordt nu bijna uitsluitend bepaald door de aardbevingsdichtheid in het Loppersum gebied. Dit komt goed overeen met de modellering van de seismiciteit. Door het vanaf begin 2014 sterk verlagen van productie en later insluiten van de vijf productieclusters rond Loppersum is de reservoir druk hier hoog gebleven ten opzichte van de reservoirdruk in de rest van het gasveld. Hierdoor vindt nu drukvereffening plaats waardoor de reservoirdruk rond Loppersum blijft dalen. Door het lage productieniveau in de rest van het gasveld daalt daar de reservoirdruk nauwelijks.

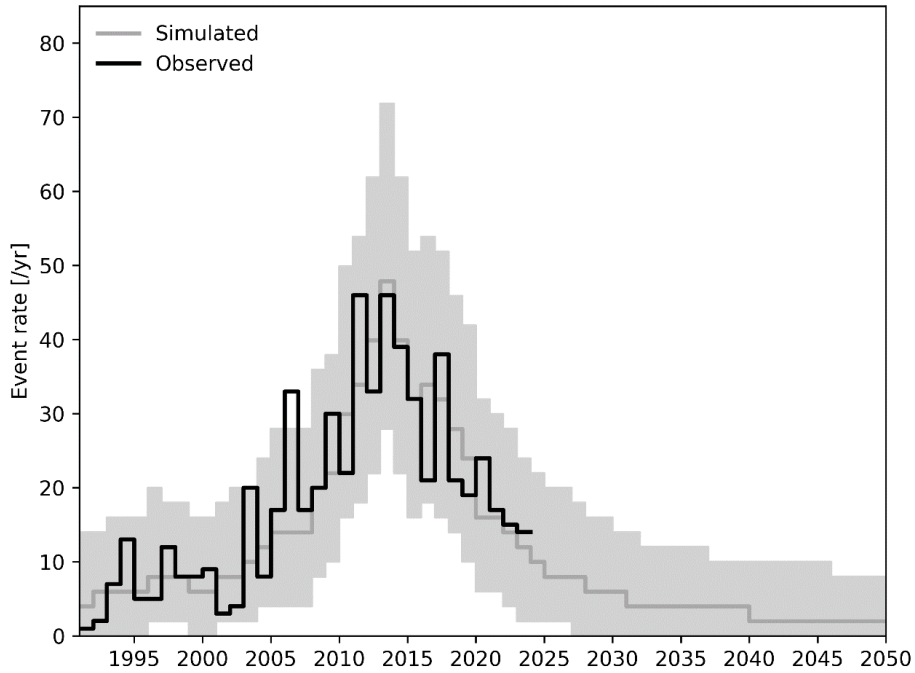
## 4.4 Vergelijking aantal geobserveerde en voorspelde aardbevingen

### 4.4.1 Kalibratie

In april 2024 heeft TNO geen nieuwe seismische risicoinschatting gepubliceerd. De vergelijking van het geobserveerde aantal aardbevingen is daarom gebaseerd op de HRA. Deze inschatting is geijkt aan de aardbevingencatalogus van alle aardbevingen in Groningen met een magnitude van  $M_L \geq 1,5$  tot 1 januari 2024.



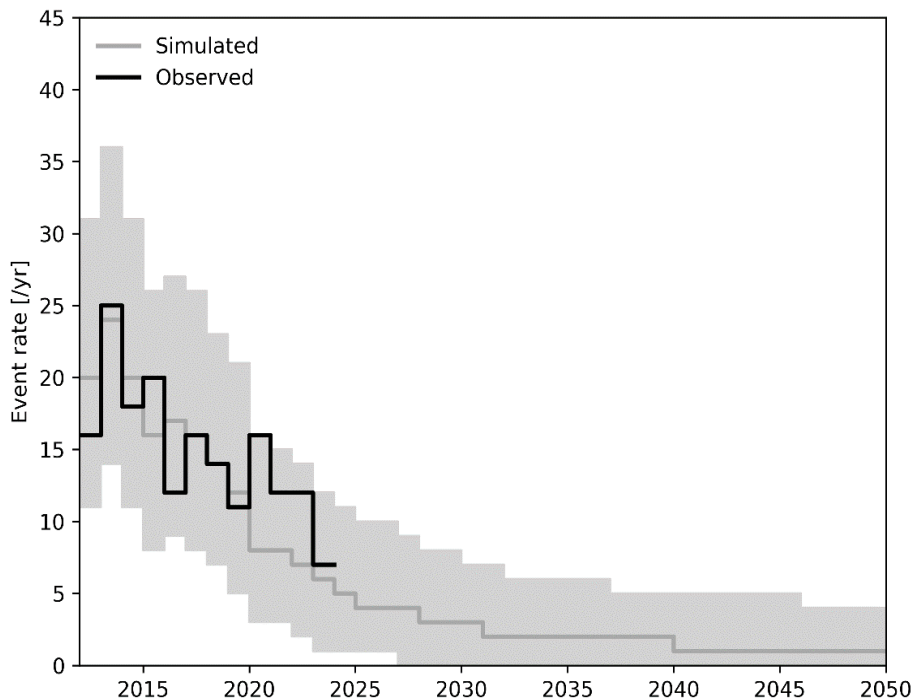
Figuur 4-7: Kalibratie van het seismologisch model gebaseerd op de aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,5$  tot 1 januari 2024.



*Figuur 4-8: Aantal geregistreerde aardbevingen vergeleken met het seismologisch model gebaseerd op de aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  tot 1 januari 2024.*

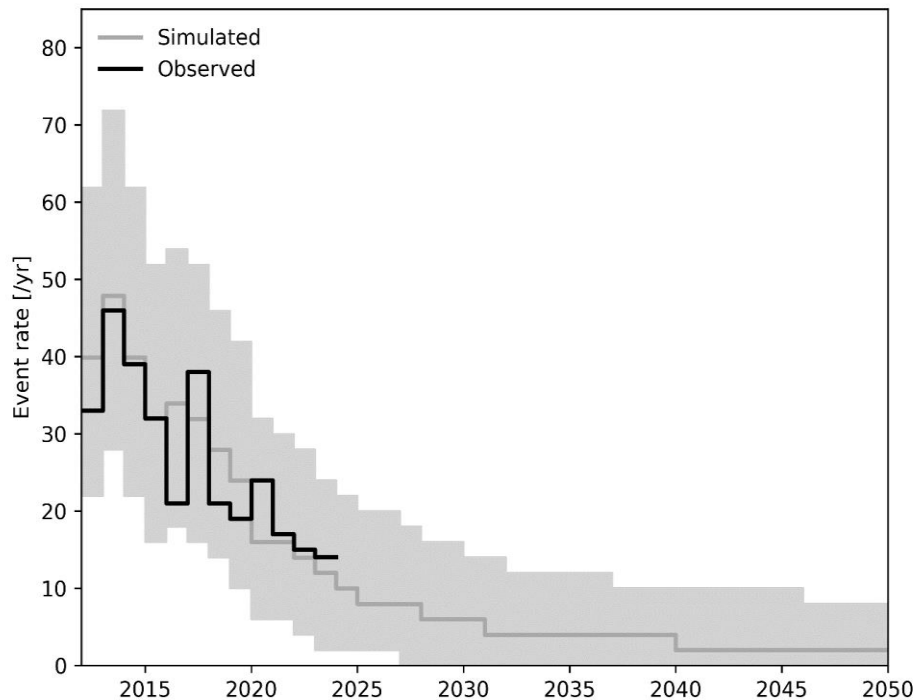
#### 4.4.2 Voorspelling

Figuur 4-9 laat zien dat in kalender jaar 2023 er zeven aardbevingen zijn geobserveerd met een magnitude  $M_L \geq 1,5$ . Dit lag dicht tegen het voor dat jaar verwachte aantal aardbevingen. In de eerste vier maanden (tot 1 mei) van 2024 zijn er drie aardbevingen geweest met een magnitude  $M_L \geq 1,5$ . Deze waren alle drie in april. Dit komt overeen met 9 aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,5$  op jaarbasis. Dit valt binnen de onzekerheidsband.



*Figuur 4-9: Voorspelde aantal aardbevingen in het Groningen gasveld met een magnitude  $M_L \geq 1,5$ .*

Figuur 4-10 laat zien dat in kalender jaar 2023 er veertien aardbevingen zijn geobserveerd met een magnitude  $M_L \geq 1,2$ . Dit ligt dicht tegen het verwachte aantal aardbevingen voor 2023 aan. In de eerste vier maanden (tot 1 mei) van 2024 zijn er vier aardbevingen geweest met een magnitude  $M_L \geq 1,2$ . Dit komt overeen met 12 aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  op jaarbasis. Dit ligt dicht tegen het verwachte aantal aardbevingen in 2024.



Figuur 4-10: Voorspelde aantal aardbevingen in het Groningen gasveld met een magnitude  $M_L \geq 1,2$ .

#### 4.4.3 Toelichting figuren waarin opgetreden aantal aardbevingen wordt vergeleken met de voorspelling door het seismologisch model

Bij bestudering van de figuren 4.7 - 4.10 in dit rapport en vergelijkbare figuren gepubliceerd in de SDRA rapportages van TNO, valt het op dat de figuren onderling van elkaar verschillen in het aantal opgetreden aardbevingen. Deze verschillen zijn vooral opvallend in de periode 2010 tot 2014 maar minder groot in de daarop volgende jaren. Deze verschillen zullen in deze sectie nader worden geduïd.

Zowel de figuren in de SDRA rapportage als in deze rapportage zijn gebaseerd op gegevens van het KNMI. Het KNMI rapporteert twee versies van de waargenomen Groningse aardbevingsmagnitudes, de eerste is tot 5 cijfers achter de komma en dus zonder afronding. De tweede versie (beschikbaar als een tabel in pdf format) geeft de magnitude van aardbevingen, na afronding tot 1 cijfer achter de komma. In de eerdere delen van deze periodieke rapportage maakt NAM gebruik van de tweede versie van de KNMI aardbevingscatalogus met afronding.

Echter NAM maakt voor de vergelijking tussen het opgetreden aantal aardbevingen met de voorspelling van het seismologisch model, gebruik van een aardbevingencatalogus waarin de waarden van de magnitude niet zijn afgerond (de eerste versie). Daardoor zal een aardbeving met een magnitude van 1,5 wel worden meegeteld als een aardbeving met  $M \geq 1,5$  maar bijvoorbeeld een aardbeving met een magnitude van 1,49 niet.

De in de SDRA rapportage door TNO getoonde figuren lijken te zijn gebaseerd op de aardbevingencatalogus mét afgeronde aardbevingsmagnitude (de tweede versie). In deze tabel is dus

een aardbeving met een magnitude 1,45 aangeduid als een aardbeving met een magnitude 1,5. Deze afronding vertekent het aantal aardbevingen boven een overschrijdingswaarde (zoals bijvoorbeeld een overschrijdingswaarde van  $M \geq 1,5$ ). Door deze afronding worden aardbevingen met een magnitude tussen 1,45 en 1,5 ( $1,45 \leq M < 1,5$ ) ook meegeteld bij de aardbevingen met een magnitude  $M \geq 1,5$ . Sommige aardbevingen met een magnitude kleiner van 1,5 worden door de afronding dus toch meegeteld met  $M \geq 1,5$ .

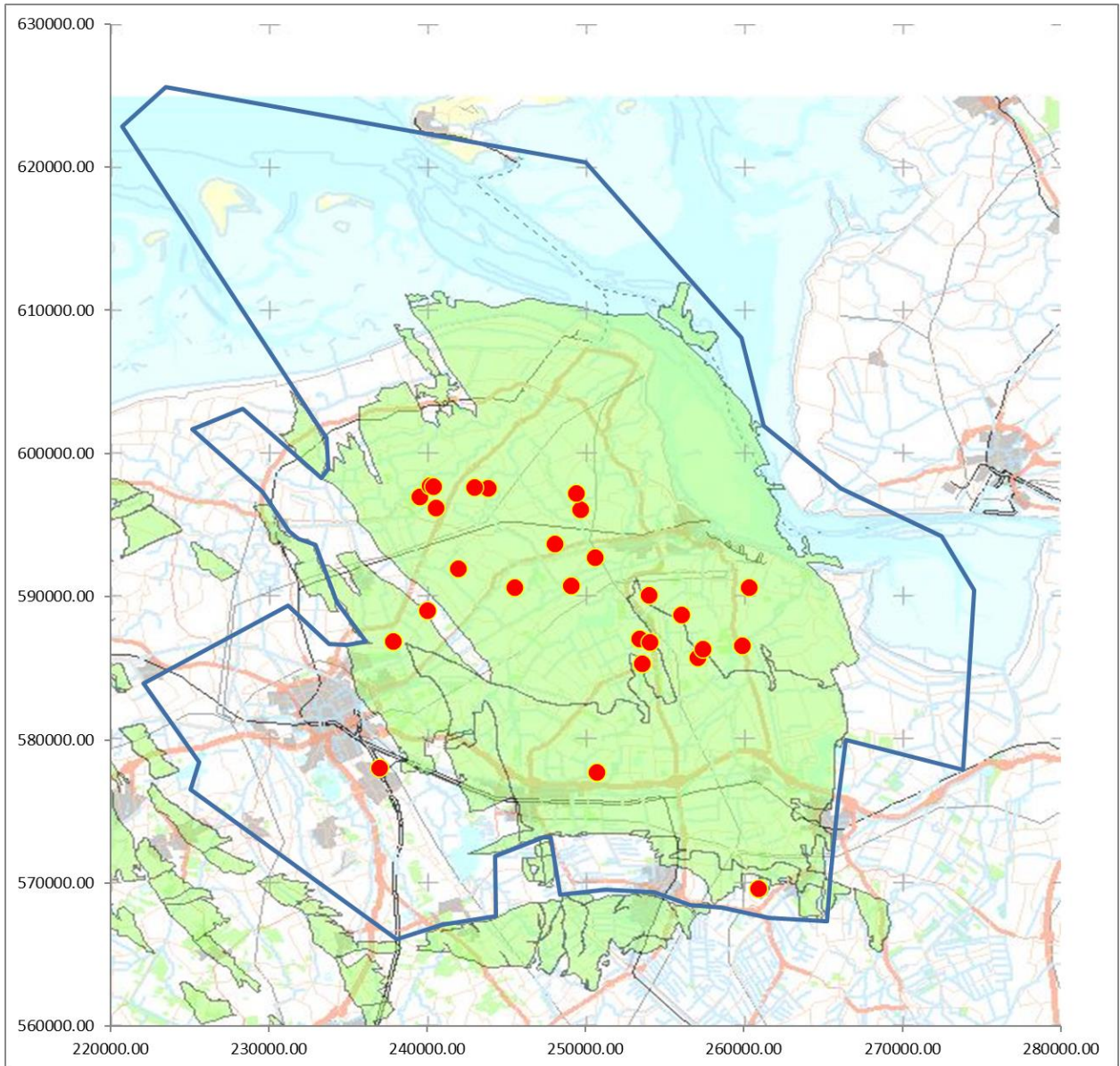
NAM gebruikt de niet-afgeronde versie van de aardbevingencatalogus voor haar analyse van de opgetreden aardbevingen in relatie tot de voorspelling met het seismologisch model om drie bekende significante bronnen van bias, die verband houden met het gebruik van magnitudes die zijn afgerond op 1 decimaal, te vermijden. Naast de hierboven beschreven bias in het tellen van het aantal waargenomen aardbevingen dat een bepaalde magnitudedrempel overschrijdt zijn er nog twee andere biases die door de afronding worden geïntroduceerd. Deze zijn beide belangrijk bij het kalibreren van het seismologisch model.

Het gebruik van niet afgeronde magnitudewaarden vermijdt een bias in de kalibratie van het Activity Rate-gedeelte van het seismologisch model, door het model te kalibreren op aardbevingen die de gekozen magnitudedrempel overschrijden, in plaats van een lagere drempel die afhankelijk is van de afronding zoals reeds beschreven.

Ook vermijdt dit een bias in de kalibratie van het magnitude-gedeelte van het seismologisch model, door het model te trainen op aardbevingen die de gekozen magnitudedrempel overschrijden zonder dat een extra correctie hoeft te worden aangebracht om rekening te houden met de bias van de afgeronde magnitudes.

Een andere mogelijke verklaring voor de kleine verschillen in de gebruikte aardbevingscatalogus voor het Groningen gasveld tussen de figuren van TNO en NAM kan zijn gelegen in de toewijzing van aardbevingen aan het Groningen gasveld of een van de er omheen liggende gasvelden. Een aardbeving kan bijvoorbeeld zijn oorsprong hebben in het Annerveen gasveld dat ten zuiden van het Groningen gasveld ligt. Hiervoor wordt door NAM de polygoon (in blauw) in onderstaande figuur gebruikt. Aardbevingen met het epicentrum binnen deze polygoon worden toegewezen aan het Groningen gasveld.





*Figuur 4-11 De polygoon rond het Groningen gasveld. Aardbevingen met het epicentrum binnen deze polygoon worden toegewezen aan het Groningen gasveld. Ten zuiden van de polygoon is het Annerveen gasveld te zien.*

## 5 Verdere studies naar de seismiciteit tijdens de periode van drukvereffening

Omdat de seismiciteit in 2020 en 2022 meer tegen de bovenkant van de onzekerheidsband van de voorspelling zat, heeft SodM aan NAM gevraagd een studieplan op te stellen naar de verwachte ontwikkeling van de seismiciteit tijdens de periode van drukvereffening in het gas reservoir. NAM heeft een finale versie van het studieplan ingeleverd bij SodM, die dit heeft goedgekeurd. Na overleg met SodM zijn deze studies in augustus 2022 gestart. Verschillende studies zijn inmiddels afgerond en gedocumenteerd in rapporten en wetenschappelijke artikelen die zijn verschenen in peer-reviewed wetenschappelijke tijdschriften. De belangrijkste hiervan zijn:

1. Earthquake nucleation characteristics revealed by seismicity response to seasonal stress variations induced by gas production at Groningen, M. Acosta, J.P. Avouac, J.D. Smith, K. Sirorattanakul, H. Kaveh and S.J. Bourne (2023), *Geophysical Research Letters* 50 (19), e2023GL105455.
2. An integrated framework for surface deformation modelling and induced seismicity forecasting due to reservoir operations, H. Meyer, J.D. Smith, S.J. Bourne and J.P. Avouac (2023), *Geological Society, London, Special Publications* 528 (1), SP528-2022-169.
3. Compaction in Slochteren sandstone of the Groningen Gas Field, Utrecht University, Suzanne Hangx (Aug. 2023).
4. Groningen Dynamic Model Update 2023, NAM, Anke Jannie Landman (July 2023).
5. Induced Seismicity forecasting with Uncertainty Quantification: Application to Groningen Gas Field, H. Kaveh, P. Batlle, M. Acosta, P. Kulkarni, S.J. Bourne and J.P. Avouac (2022), *AGU Fall Meeting Abstracts 2022*, S35E-0310.
6. Stress-based forecasting of induced seismicity with instantaneous earthquake failure functions: Applications to the Groningen gas reservoir, J.D. Smith, E.R. Heimisson, S.J. Bourne and J.P. Avouac (2022), *Earth and Planetary Science Letters* 594, 117697.
7. Coulomb threshold rate-and-state model for fault reactivation: application to induced seismicity at Groningen, E.R. Heimisson, J.D. Smith, J.P. Avouac and S.J. Bourne (2022), *Geophysical Journal International* 228 (3), 2061-2072.
8. Seismicity Recalibration 2023, NAM, Valesca Peereboom and Marc Broersma (Feb 2022).
9. Recalibration of the Seismicity Model, NAM, Valesca Peereboom and Marc Broersma (Feb 2022).
10. Burst of fast propagating swarms of induced earthquakes at the Groningen gas field, K. Sirorattanakul, J.D. Wildig, M. Acosta, Y. Li, Z.E. Ross, S.J. Bourne and J.-P. Avouac, 2024, manuscript submitted to *Seismological Research Letters*.
11. Magnitude-Frequency Distribution of Induced Seismicity, L. Ly, K. Im and J.-P. Avouac, poster for conference.

De wetenschappelijke rapporten 3, 4, 8 en 9 zijn publiek beschikbaar op de onderzoeksrapporten-webpagina van [www.nam.nl](http://www.nam.nl). De wetenschappelijke publicaties 1, 2, 5, 6, en 7 zijn publiek beschikbaar via de website van het wetenschappelijke tijdschrift.

## 6 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. Magnitude and Energy of Earthquakes. B. Gutenberg, C.F. Richter. *Annali di Geofisica*. 9: 1-15, 1956.
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. 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.
5. Hazard and Risk Assessment Groningen GTS - Raming 2020. Van Elk, Jan, et al. 2020.
6. 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.
7. Updated empirical GMPEs for PGV from Groningen earthquakes. Bommer, J. J., P. J. Stafford, and M. Ntinalexis (2019). 10 March 2019
8. 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.
9. 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.
10. Study and Data Acquisition Plan induced seismicity Groningen - Executive Summary, Jan van Elk en Jeroen Uilenreef, September 2020.
11. Study and Data Acquisition Plan induced seismicity Groningen – Part 1 Introduction and Credibility Process, Jan van Elk en Jeroen Uilenreef, September 2020.
12. Study and Data Acquisition Plan induced seismicity Groningen – Part 2 Subsurface Discovery Process, Jan van Elk en Jeroen Uilenreef, September 2020.
13. Study and Data Acquisition Plan induced seismicity Groningen – Part 3 Impact at Surface Discovery Process, Jan van Elk en Jeroen Uilenreef, September 2020.
14. Study Plan seismicity Groningen during pressure equilibration period, NAM, November 2022.
15. Opstarten Productie Groningen gasveld, 8 januari 2024, Persbericht NAM.
16. Productie Groningen gasveld gestopt, 10 januari 2024, Persbericht NAM.
17. Kamerbrief: Twee productielocaties Groningenveld op waakvlam, , 8 januari 2024, J.A. Vijlbrief  
Staatssecretaris van Economische Zaken en Klimaat.

## Appendix A – Overzicht periodieke rapportages en speciale rapportages seismiciteit Groningen

Title	Date
Rapportage recente aardbevingen Wirdum en Garsthuizen 2016/2017	mei 2017
Ground Motions from the $M_L$ 2.6 Slochteren Earthquake of 27 <sup>th</sup> May 2017	juni 2017
Special Report on the earthquake density and activity rate following the earthquakes in Appingedam ( $M_L=1.8$ ) and Scharmer ( $M_L=1.5$ ) in August 2017	sept 2017
Special Report on the Loppersum earthquakes – December 2017	dec 2017
Special Report on the Zeerijp Earthquake	jan 2018
Short special report Exceedance Activity Rate - February 2018	feb 2018
Special Report - Westerwijtwerd Earthquake - 22 <sup>nd</sup> May 2019	mei 2019
Analyse overschrijding MRP-grenswaarde Aardbevingsdichtheid 9 september 2019	sept 2019
Analyse overschrijding aardbevingsdichtheid - 3 december 2019	dec 2019
Special Report on the Zijldijk $M_L = 2.5$ Earthquake of 2 <sup>nd</sup> May 2020	mei 2020
Special Report on the Loppersum $M_L=2.7$ earthquake of 14 <sup>th</sup> June 2020	aug 2020
Special Report on the Zeerijp Earthquake Swarm starting 4 <sup>th</sup> October 2021	okt 2021
Supplement to special Report on the Zeerijp Earthquake Swarm starting 4 <sup>th</sup> October 2021	nov 2021
Special Report on the Garrelsweer Earthquake 16th November 2021 with Magnitude $M_L = 3.2$	nov 2021
Special Report on the Earthquakes near Uithuizen in August, September and October 2022	okt 2022
Special Report on the Wirdum Earthquake 8 <sup>th</sup> October 2022 with Magnitude $M_L=3.1$	okt 2022
Special Report on the two Zandeweer Earthquakes on 15 <sup>th</sup> September 2023 with Magnitude $M_L = 2.0$ and $M_L = 1.9$ respectively	okt 2023
Special Report on the earthquake near Zeerijp on 11 <sup>th</sup> April 2024 with a magnitude $M_L$ 2.1	Mei 2024

Tabel A.1 *Rapportages van opmerkelijke seismische gebeurtenissen zoals aardbevingen met een grotere kracht of aardbevingszwermen.*

<b>Title</b>	<b>Date</b>
Analyse seismiciteit	nov 2016
Rapportage Seismiciteit Groningen - November 2017	nov 2017
Rapportage Seismiciteit Groningen - Juni 2018	juli 2018
Rapportage Seismiciteit Groningen - November 2018	nov 2018
Rapportage Seismiciteit Groningen - Mei 2019	mei 2019
Rapportage Seismiciteit Groningen - November 2019	nov 2019
Rapportage Seismiciteit Groningen - Mei 2020	apr 2020
Rapportage Seismiciteit Groningen - November 2020	nov 2021
Rapportage Seismiciteit Groningen - Mei 2021	juni 2021
Rapportage Seismiciteit Groningen - November 2021	nov 2021
Rapportage Seismiciteit Groningen - Mei 2022	juni 2022
Rapportage Seismiciteit Groningen - November 2022	dec 2022
Rapportage Seismiciteit Groningen - Mei 2023	juni 2023
Rapportage Seismiciteit Groningen - November 2023	dec 2023
Rapportage Seismiciteit Groningen - Mei 2024	juni 2024

*Tabel A.2    Halfjaarlijkse monitoringsrapportages voor de seismiciteit in het Groningen gasveld.*

## Appendix B – Aardbevingscatalogus 1 mei 2023 tot 30 april 2024 (door KNMI)

Plaats	Datum	Time hh:mm:ss	Magnitude	Diepte km	Easting	Northing
Garrelsweer	3-mei-2023	07:40:21	0,6	3	245687	593140
Harkstede	7-mei-2023	13:46:06	0,2	3	242290	581945
Westerwijtwerd	7-mei-2023	17:57:17	0,3	3	239823	593033
Zijldijk	8-mei-2023	07:17:46	0,5	3	246612	600505
Froombosch	9-juni-2023	00:26:45	0,7	3	248071	580161
Oosterwijtwerd	17-juni-2023	15:42:57	0,5	3	250329	594343
Muntendam	20-juni-2023	05:22:36	1,0	3	255661	575193
Appingedam	9-juli-2023	01:08:59	1,5	3	251075	593690
Uithuizen	21-juli-2023	03:57:19	0,4	3	241576	602971
Garrelsweer	1-aug-2023	14:53:35	0,5	3	247129	590941
Noordbroek	4-aug-2023	05:31:15	0,5	3	256485	580554
Garmerwolde	18-aug-2023	01:44:18	0,3	3	240221	585582
Groningen	25-aug-2023	01:42:01	0,0	3	237561	584979
Loppersum	31-aug-2023	23:47:52	1,3	3	244464	594342
Zandeweer	15-sept-2023	08:19:02	2,0	3	240777	599283
Zandeweer	15-sept-2023	13:31:25	1,9	3	240777	599283
Eppenuizen	2-okt-2023	19:37:21	0,5	3	240977	599287
Zuidwolde	6-okt-2023	05:34:15	1,1	3	238274	586215
Nieuwolda	22-okt-2023	11:51:22	0,4	3	261167	583438
Eppenuizen	02-nov-23	20:32:30	1,0	3	240912	599175
Rottum	05-nov-23	15:41:38	1,5	3	238609	601471
Bedum	12-nov-23	02:27:03	0,6	3	238066	590553
Thesinge	25-nov-23	13:17:27	0,4	3	240033	588695
Harkstede	26-nov-23	16:04:06	0,3	3	243031	581625
Zandeweer	04-dec-23	23:21:08	1,3	3	240844	599285
Thesinge	09-dec-23	00:31:54	1,7	3	238551	585664
Zuidbroek	04-jan-24	22:43:33	0,5	3	252408	577242
Luddeweer	28-Jan-24	01:47:05	1,2	3	244171	584985
Eppenuizen	11-Feb-24	07:17:13	0,4	3	240979	599176
Appingedam	12-Feb-24	13:41:37	1,1	3	251209	593693
Appingedam	12-Feb-24	14:06:46	0,3	3	251009	593689
Woldendorp	05-Mar-24	13:23:37	0,5	3	262583	588813
Stedum	06-Mar-24	00:29:52	0,4	3	243435	592319
Usquert	08-Mar-24	12:42:18	1,0	3	237459	602565
Westeremden	13-Mar-24	13:10:52	0,5	3	242706	595756
Steendam	19-Mar-24	13:21:09	0,8	3	251585	588246
Garrelsweer	01-Apr-24	06:46:39	0,2	3	245287	593132
Lageland	04-Apr-24	14:32:45	0,6	3	244105	584984
Zeerijp	08-Apr-24	00:54:43	0,3	3	244737	597575
Zeerijp	11-Apr-24	09:10:24	2,1	3	245078	597136
Lageland	14-Apr-24	14:08:51	1,6	3	242503	584955
Usquert	29-Apr-24	11:42:14	1,5	3	234322	603180

Tabel B Aardbevingen geregistreerd door het seismisch monitoring netwerk tussen 1 mei 2023 en 30 april 2024 (huidige en de vooraf gaande rapportage periodes).

