



RAPPORTAGE SEISMICITEIT  
GRONINGEN GASVELD

-

KALENDER JAAR 2024





## Contents

|       |                                                                                                 |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Overzicht .....                                                                                 | 1  |
| 1.1   | Inleiding .....                                                                                 | 1  |
| 1.2   | Belangrijkste conclusies van dit rapport .....                                                  | 1  |
| 1.3   | Aantal aardbevingen (activity rate) .....                                                       | 1  |
| 1.4   | Aardbevingsdichtheid .....                                                                      | 2  |
| 1.5   | Trend in seismiciteit .....                                                                     | 3  |
| 1.6   | Aardbevingen met hoogste magnitude .....                                                        | 3  |
| 1.7   | Incidentparameters PGA en PGV .....                                                             | 3  |
| 2     | Inleiding en leeswijzer .....                                                                   | 4  |
| 2.1   | Inleiding .....                                                                                 | 4  |
| 2.2   | Monitoring van het Groningen gasveld in de Mijnbouwregeling .....                               | 4  |
| 2.3   | Leeswijzer .....                                                                                | 5  |
| 2.4   | Meetnetwerk en meetnauwkeurigheid .....                                                         | 6  |
| 2.5   | Magnitude van compleetheid .....                                                                | 6  |
| 3     | Trendparameters .....                                                                           | 8  |
| 3.1   | Waarnemingen en lange termijn trend .....                                                       | 8  |
| 3.2   | Trendparameter aantal aardbevingen .....                                                        | 9  |
| 3.3   | Aardbevingsdichtheid .....                                                                      | 10 |
| 4     | Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit .....                                          | 12 |
| 4.1   | Aantal aardbevingen .....                                                                       | 12 |
| 4.2   | Distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld .....                                   | 14 |
| 4.3   | Gas-productie gedurende 2024 .....                                                              | 14 |
| 4.4   | Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd .....                                        | 14 |
| 4.5   | Statistische analyse naar de ontwikkeling aardbevingen .....                                    | 18 |
| 4.6   | Vergelijking aantal geobserveerde en voorspelde aardbevingen .....                              | 20 |
| 4.6.1 | Kalibratie seismologisch model .....                                                            | 20 |
| 4.6.2 | Tellen van het aantal aardbevingen .....                                                        | 21 |
| 4.6.3 | Vergelijking aantal geobserveerde aardbevingen met modelvoorspelling .....                      | 23 |
|       | Referenties .....                                                                               | 25 |
|       | Appendix A – Overzicht periodieke rapportages en speciale rapportages seismiciteit Groningen 26 |    |
|       | Appendix B – Aardbevingscatalogus (door KNMI) voor kalenderjaar 2024 .....                      | 27 |



# 1 Overzicht

## 1.1 Inleiding

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 van de seismiciteit. In dit rapport met peildatum 1 januari 2025 zal de seismiciteit in het Groningen-gasveld voor het volledige kalenderjaar 2024 worden toegelicht.

In dit artikel van de Mijnbouwregeling staat ook dat de seismiciteit wordt gemonitord door middel van het continu bijhouden van vier parameters. Deze vier parameters zijn 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.

## 1.2 Belangrijkste conclusies van dit rapport

- De daling van de seismiciteit in het Groningen gasveld heeft zich ook in 2024 voortgezet.
- Er zijn in 2024 zes aardbevingen in het Groningen gasveld geregistreerd met een magnitude  $M_L \geq 1,5$ . Het aantal aardbevingen per kalenderjaar met magnitude  $M_L \geq 1,5$  is sinds 2004 niet zo laag geweest. Dit aantal ligt ook dicht bij de prognose gebaseerd op de Dreigings- en Risicoinschatting (HRA).
- Het aantal aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  ligt met zeven aardbevingen in 2024 lager dan de 10 verwachte aardbevingen, gebaseerd op de HRA.
- Deze aardbevingen hadden het epicentrum in het uiterste noordwesten van het Groningen gasveld. Ook dat komt overeen met de prognose van de HRA.
- De grootste van deze aardbevingen had een magnitude van  $M_L = 2,2$ .

## 1.3 Aantal aardbevingen (activity rate)

Het aantal aardbevingen in 2024 met een magnitude groter dan of gelijk aan  $M_L \geq 1,2$  was zeven en het aantal aardbevingen met een magnitude groter dan of gelijk aan  $M_L \geq 1,5$  was zes. De hoogste magnitude van een aardbeving in 2024 was  $M_L = 2,2$ .

Laagste activity rate in 2024 was 6 aardbevingen per jaar. Sinds 2004 is de activity rate niet zo laag geweest. Echter in de periode tussen 2004 en 2014 zijn er misschien aardbevingen met magnitude  $1,2 \leq M_L < 1,5$  opgetreden die door het destijds geïnstalleerde monitoringsnetwerk niet zijn opgemerkt.

De ontwikkeling van de seismiciteit in Groningen wordt in meer detail beschreven in paragrafen 4.1 tot 4.4.

---

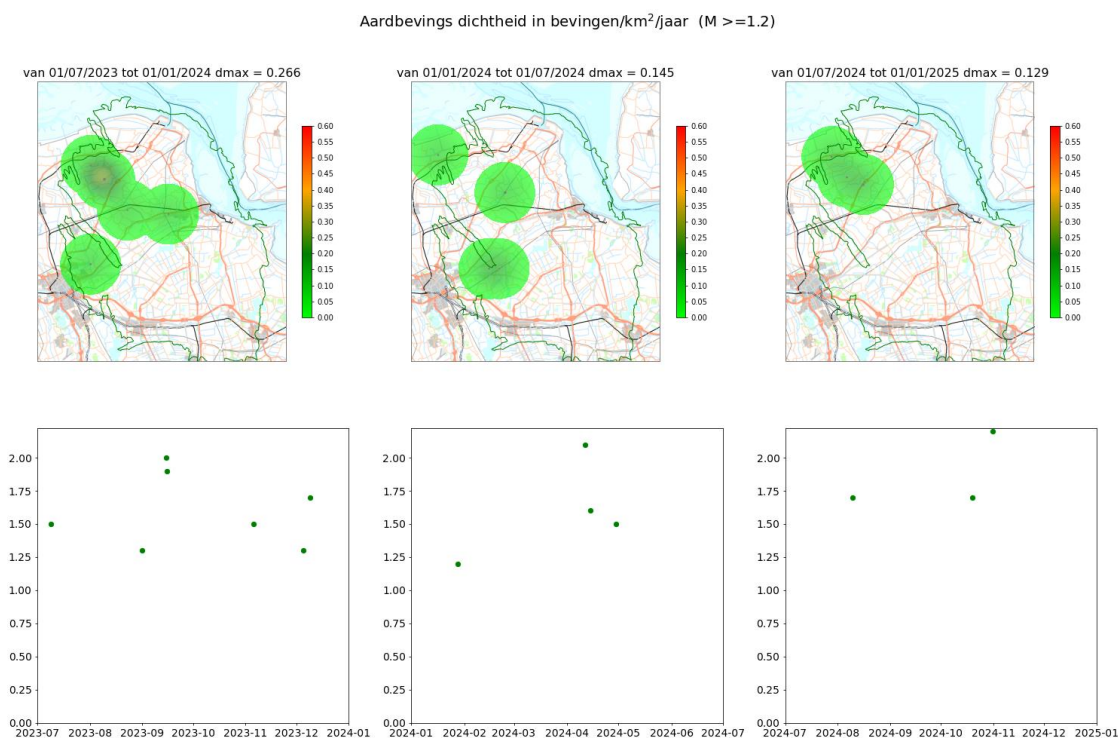
<sup>1</sup> De Mijnbouwregeling hanteert een observatieperiode van 6 maanden; dus bijvoorbeeld van 00:00 uur op 1 november tot 00:00 uur op 1 mei. Door het jaar varieert hierdoor de duur van de observatieperiode. Als februari bijvoorbeeld binnen de observatieperiode valt dan is deze korter. De duur 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 in 2024 door het KNMI seismisch monitoringsnetwerk. Locatie van het hypocentrum is gebaseerd op de KNMI-aardbevingscatalogus.

| Plaats                   | Datum     | Time hh:mm:ss UTC | Magnitude | Diepte km | Easting | Northing |
|--------------------------|-----------|-------------------|-----------|-----------|---------|----------|
| <b>Eerste helft 2024</b> |           |                   |           |           |         |          |
| 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   |
| <b>Tweede helft 2024</b> |           |                   |           |           |         |          |
| Kantens                  | 09-Aug-24 | 18:00:20          | 1,7       | 3         | 239906  | 599602   |
| Usquert                  | 19-Okt-24 | 09:12:35          | 1,7       | 3         | 237453  | 602899   |
| Garsthuizen              | 31-Okt-24 | 15:15:26          | 2,2       | 3         | 242511  | 598419   |

## 1.4 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  $M_L \geq 1,2$ .



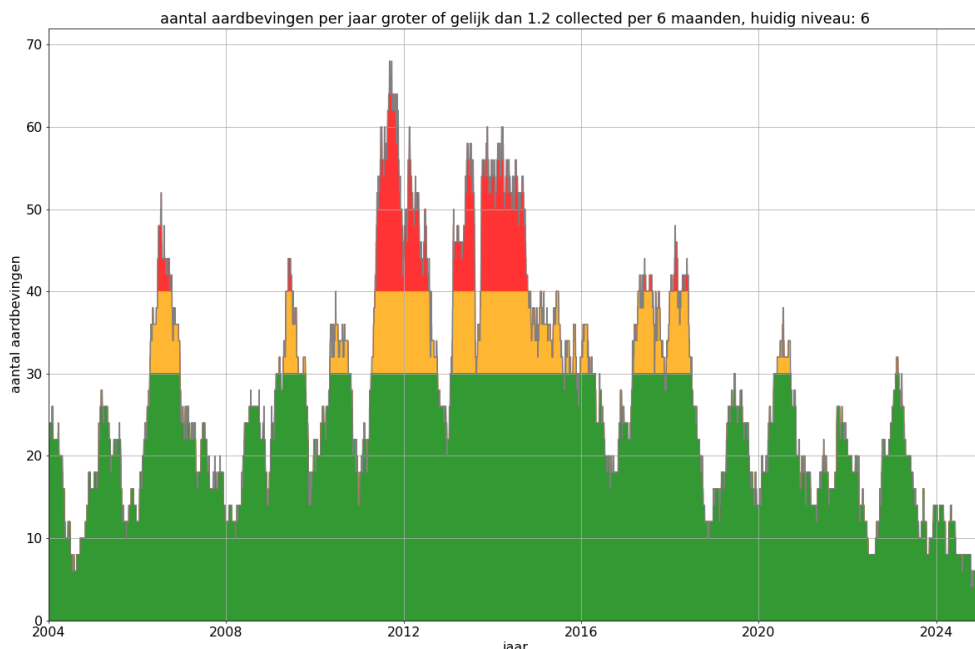
**Figuur 1-1** Kaarten van aardbevingsdichtheid gebaseerd op aardbevingen met magnitude  $M_L \geq 1,2$  gedurende 2024. De aardbevingsdichtheid is omgerekend naar jaarbasis. De grafieken onder de kaarten tonen de magnitude van de aardbevingen in tijd. De kaarten en grafieken zijn voor peildatum 1 Januari 2024, 1 Juli 2024 en 1 Januari 2025.

De epicentra van de drie aardbevingen in deze rapportage periode met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  liggen in het noordwesten van het Groningen-gasveld. De aardbevingsdichtheid is in dit gebied daarom

relatief hoog vergeleken met de rest van het gasveld. De maximale aardbevingsdichtheid is gedaald tot 0,129 aardbevingen per ( $\text{km}^2 \cdot \text{jaar}$ ), zie figuur 1-1.

### 1.5 Trend in seismiciteit

Het aantal aardbevingen per jaar laat vanaf 2014 een dalende trend zien. In 2024 zijn er zeven aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  geregistreerd. Het aantal aardbevingen per kalenderjaar met magnitude  $M_L \geq 1,2$  is sinds 2002 niet zo laag geweest. Echter in de periode tussen 2003 en 2014 zijn er misschien aardbevingen met magnitude  $1,2 \leq M_L < 1,5$  opgetreden die door het, destijds geïnstalleerde, monitoringsnetwerk niet zijn opgemerkt. Dat zou betekenen dat het aantal aardbevingen in 2002 met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  mogelijk hoger is geweest dan was geobserveerd en we nog verder terug moeten gaan in de tijd voor het jaar dat het aantal aardbevingen met magnitude  $M_L \geq 1,2$  lager was dan in 2024.



**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 voorgaande 6-maanden periode geconverteerd naar jaarbasis.

### 1.6 Aardbevingen met hoogste magnitude

De aardbevingen met de grootste magnitude in 2024, nabij Garsthuizen. Deze had een magnitude van  $M_L = 2,2$ . Deze geregistreerde magnitude is lager dan de grenswaarden voor deze signaalparameter.

### 1.7 Incidentparameters PGA en PGV

Het Rapport 'Defining criteria for semi-annual earthquake reporting of PGV and PGA in Groningen' (Ref. 2) bevat een analyse van de piek grondsnelheid en piek grondversnelling die is geobserveerd voor aardbevingen met verschillende magnitudes. De waargenomen magnitude van de aardbevingen in 2024 geeft aan dat de piek 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.

In de afgelopen jaren heeft NAM twee keer per jaar een ‘Rapportage Seismiciteit Groningen’ uitgebracht, gebaseerd op alle aardbevingsgegevens tot respectievelijk 1 mei en 1 november. Nu het gasveld is gesloten op 1 oktober 2023 brengt NAM de rapportage periode in overeenstemming met het kalenderjaar. De door de Mijnbouwregeling voorgeschreven twee rapportages per jaar zullen dan gebaseerd zijn op alle aardbevingsgegevens tot respectievelijk 1 januari en 1 juli. De seismiciteit gedurende een vol kalenderjaar wordt daarmee beschreven in twee seismische monitoringsrapportages. Dit maakt de rapportage van de seismische monitoring in Groningen eenvoudiger en daarmee transparanter. In dit rapport met peildatum 1 januari 2025 zal de seismiciteit in het volledige kalenderjaar 2024 worden toegelicht.

Seismische gegevens in dit rapport zijn bijgewerkt tot en met 31 december 2024. De productie gegevens zijn bijgewerkt tot de sluiting van het Groningen-gasveld. Het rapport kijkt in principe een jaar 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 Klimaat en Groene Groei 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 Klimaat en Groene Groei en de Inspecteur-generaal der Mijnen (SodM).*

| Signaalparameter | Waarnemings-niveau | 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        | $\geq 3,0$         | 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  $M_L \geq 1,5$ .

<sup>2</sup> De sterkte van de aardbevingen worden in dit rapport aangeduid in Local Magnitude Scale of  $M_L$  (Ref. 3).

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

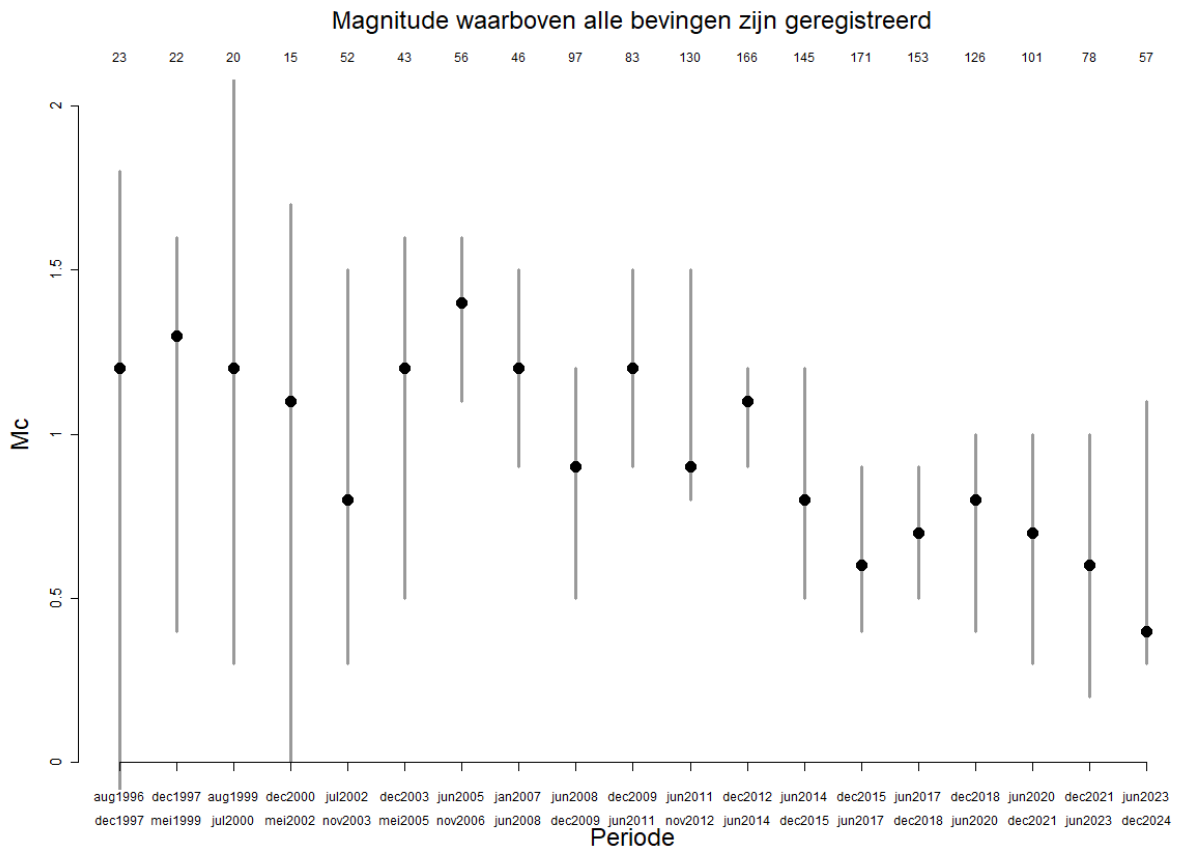
## 2.4 Meetnetwerk en meetnauwkeurigheid

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 geofoon 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.

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 Groningen-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 worden waargenomen. Voor aardbevingen met een magnitude groter dan de MoC geldt dat deze worden waargenomen, ongeacht de locatie in het gasveld. De MoC wordt afgeleid uit de waarnemingen en is onderhevig aan een bepaalde mate van onzekerheid.



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

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 mogelijkwerwijs foutieve conclusies uit de dataset afgeleid.

De MoC is afgeleid volgens de maximum curvature method (Ref. 3 en 4) 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). Dit is een direct gevolg van de uitbreiding van het seismisch monitoringsnetwerk. 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. Deze hogere MoC in de periode voor 2014 is de reden dat we voorzichtig moeten zijn wanneer we het aantal aardbevingen met  $M_L \geq 1,2$  in 2024 vergelijken met die in jaren voor 2014.

### 3 Trendparameters

#### 3.1 Waarnemingen en lange termijn trend

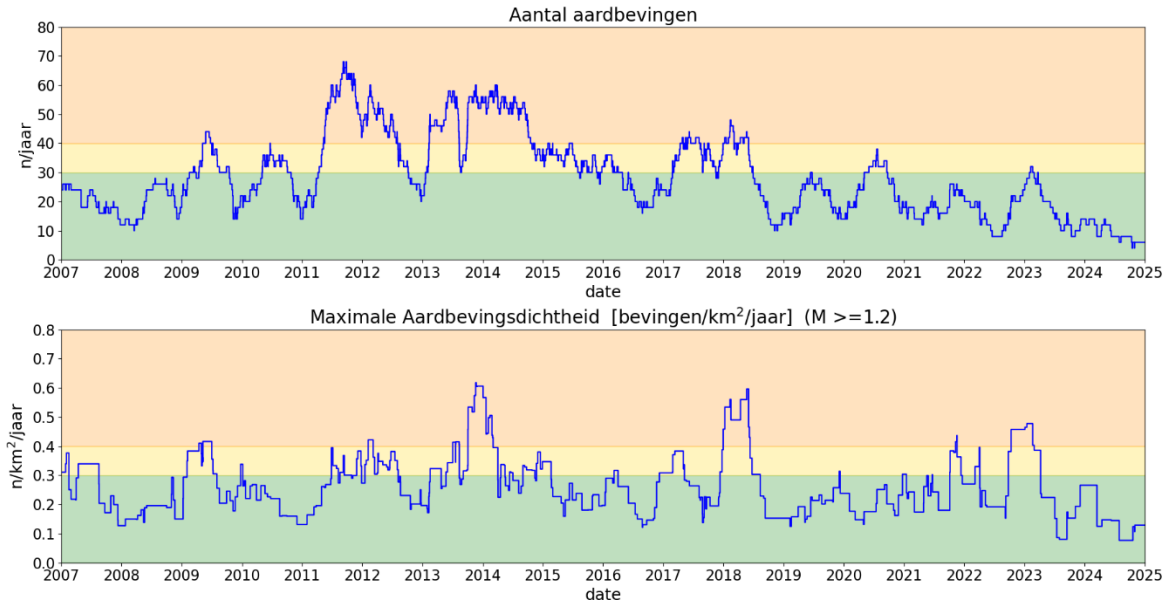
Het aantal aardbevingen en de maximale aardbevingsdichtheid zijn de trendparameters. Zowel het aantal aardbevingen als de maximale aardbevingsdichtheid zijn stabiel op een historisch laag niveau gedurende de huidige rapportage periode en vallen onder het laagste waarnemingsniveau. In Tabel 3-1 wordt voor het afgelopen jaar de activity rate, 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 voor 2024. Aantal aardbevingen ( $M_L \geq 1,2$ ) in de maand en aardbevingsdichtheid (aantal aardbevingen per jaar en vierkante kilometer) zijn berekend op het einde van de maand.*

|                                                                   | jan  | feb  | mrt  | apr  | mei  | juni | juli | aug  | sep  | okt  | nov  | dec  |
|-------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Aantal aardbevingen in de maand ( $M_L \geq 1,2$ )                | 1    | 0    | 0    | 3    | 0    | 0    | 0    | 1    | 0    | 2    | 0    | 0    |
| Aardbevingsdichtheid                                              | 0,27 | 0,27 | 0,13 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| Activity Rate:<br>Aantal aardbevingen per jaar ( $M_L \geq 1,2$ ) | 14   | 12   | 8    | 14   | 12   | 8    | 6    | 8    | 8    | 6    | 6    | 6    |

De trendparameters worden continu bijgehouden in de vorm van een trendlijngrafiek, zie figuur 3-1. In beide grafieken van de trendparameters 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.

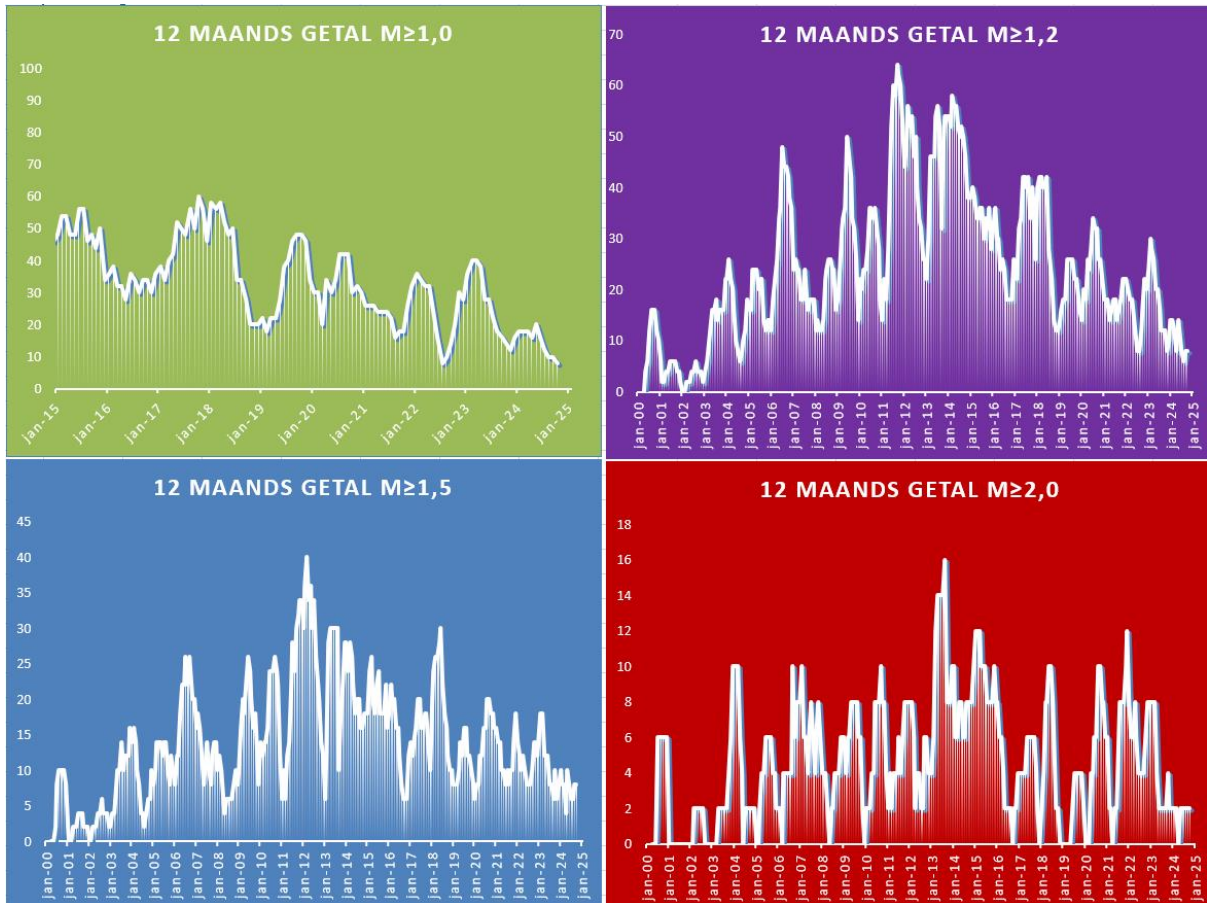
In de maanden juli tot september 2024 daalde de maximale aardbevingsdichtheid tot 0,08 aardbevingen per  $\text{km}^2 \cdot \text{jaar}$ . Ook in 2023 is de aardbevingsdichtheid zo laag geweest. De laatste keer dat de aardbevingsdichtheid daar voor ook zo laag is geweest was in 2003.



*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.*

### 3.2 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 1 januari 2025 is dus de som van het aantal aardbevingen van een bepaalde magnitude in de voorafgaande periode van 1 juli 2024 tot en met 31 december 2024 omgerekend naar één jaar.

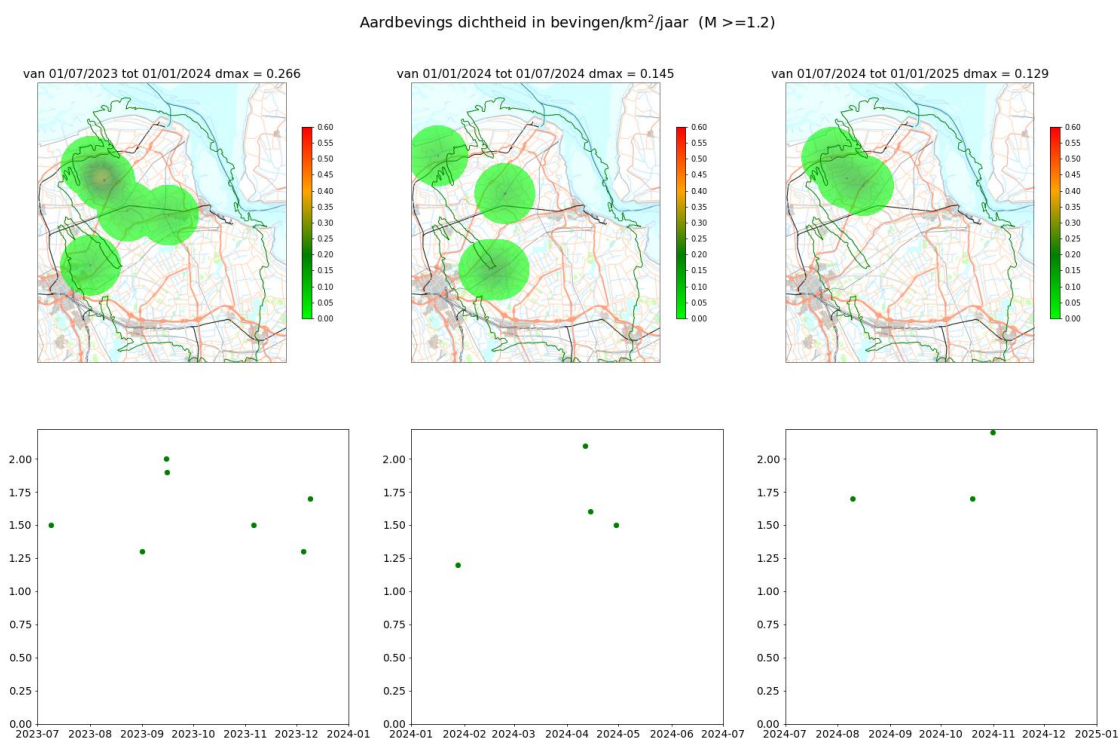


*Figuur 3-2 12-maandsgetallen voor vier magnitude-klassen; waarnemingen voor  $M_L \geq 1,0$  weergegeven vanaf 2014, de overige waarnemingen sinds 2000. Deze trend is gebaseerd op aardbevingsobservaties tijdens de voorgaande 6 maanden. Deze zijn omgerekend naar jaarbasis.*

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  $M_L \geq 1,0$  in de periode voor 2014 mogelijk incompleet is vanwege beperkingen in het meetsysteem in die periode, zie ook hoofdstuk 2.4. De dalende trend in het aantal aardbevingen (met magnitude groter dan of gelijk aan  $M_L = 1,0$ ,  $M_L = 1,2$  en  $M_L = 1,5$ ) is het gevolg van de afbouw van de gas-productie en daarna het insluiten van het gasveld.

### 3.3 Aardbevingsdichtheid

Figuur 3-3 toont een kaart met de aardbevingsdichtheid en de epicentra van de in deze rapportage periode 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 er aan voorafgaande 6 maanden. De aardbevingsdichtheid is omgerekend naar jaarbasis. Onder: Grafieken met de magnitude van de aardbevingen in tijd. De kaarten en grafieken zijn voor peildatum 1 Januari 2024, 1 July 2024 en 1 Januari 2025.

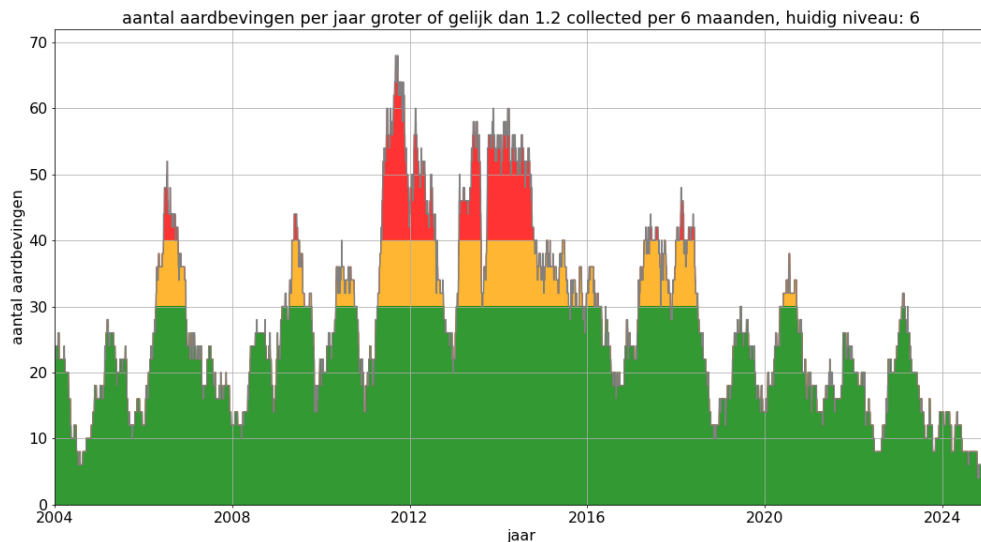
In de huidige rapportage periode vallen de drie aardbevingen met  $M_L \geq 1,2$  allen in het uiterste noordwesten van het Groningen gasveld. Het gebied waar aardbevingsdichtheid wordt geëvalueerd is duidelijk te zien in figuur 3-3.

## 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 het verloop van het aantal aardbevingen in de tijd en de regionale ontwikkeling van de seismiciteit.

### 4.1 Aantal aardbevingen

In 2024 zijn er in totaal zeven aardbevingen geregistreerd met een magnitude groter of gelijk aan  $M_L \geq 1,2$ . Figuur 4-1 toont duidelijk de dalende trend in het aantal aardbevingen sinds 2012. De laatste keer dat het aantal aardbevingen (activity rate) zo laag was is twintig jaar geleden in 2004.



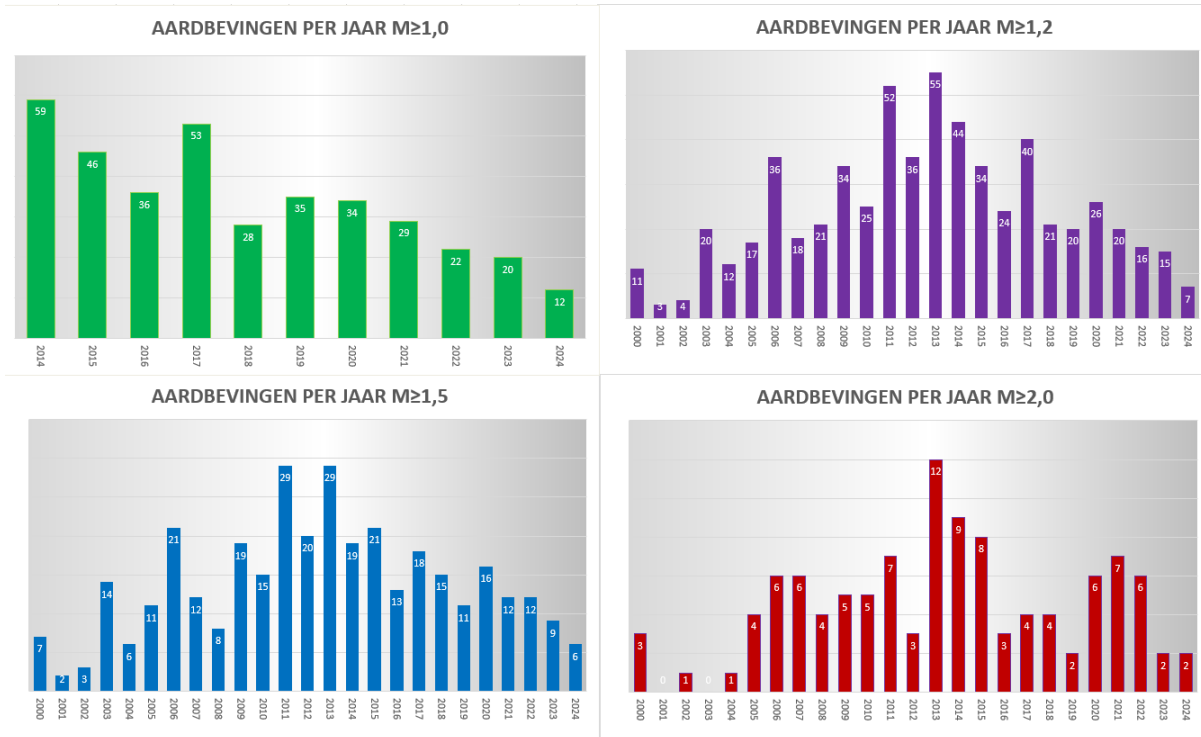
*Figuur 4-1 Aantal aardbevingen berekend per jaar zoals aangegeven in Mijnbouwregeling artikel 1.3a.5. Dit betreft de aardbevingen met een kracht van  $M_L \geq 1,2$  in de voorgaande 6 maanden omgerekend naar jaarbasis.*

Het aantal aardbevingen per maand onderverdeeld in vijf magnitudeklassen is opgenomen in tabel 4.1. In de eerste helft van 2024 zijn er 4 aardbevingen geregistreerd met een magnitude  $M_L \geq 1,2$ . In de huidige periode, de tweede helft van 2024, zijn er 3 aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  geregistreerd. Deze hadden alle drie een magnitude  $M_L \geq 1,5$ .

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<br>$M_L \geq 1,2$ |
|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|--------------------------|
| 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                        |
| mei-24                   | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0              | 0                        |
| jun-24                   | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0              | 0                        |
| jul-24                   | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0              | 0                        |
| aug-24                   | 0                    | 0                    | 1                    | 0                    | 0              | 1                        |
| sep-24                   | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0              | 0                        |
| okt-24                   | 1                    | 0                    | 1                    | 1                    | 0              | 2                        |
| nov-24                   | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0              | 0                        |
| Dec-24                   | 2                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0              | 0                        |
| <b>Eerste helft 2024</b> | 2                    | 1                    | 2                    | 1                    | 0              | 4                        |
| <b>Tweede helft 2024</b> | 3                    | 0                    | 2                    | 1                    | 0              | 3                        |
| <b>2024</b>              | 5                    | 1                    | 4                    | 2                    | 0              | 7                        |

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 er vanwege incompleetheid geen data van vóór 2014 getoond zijn voor  $M_L \leq 1,0$ ). 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 geplote is vanaf het jaar 2000 (paneel rechtsboven, paarse kleur). Het linker paneel beneden (blauwe kleur) 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 eerste tien maanden van het jaar.

## 4.2 Distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld

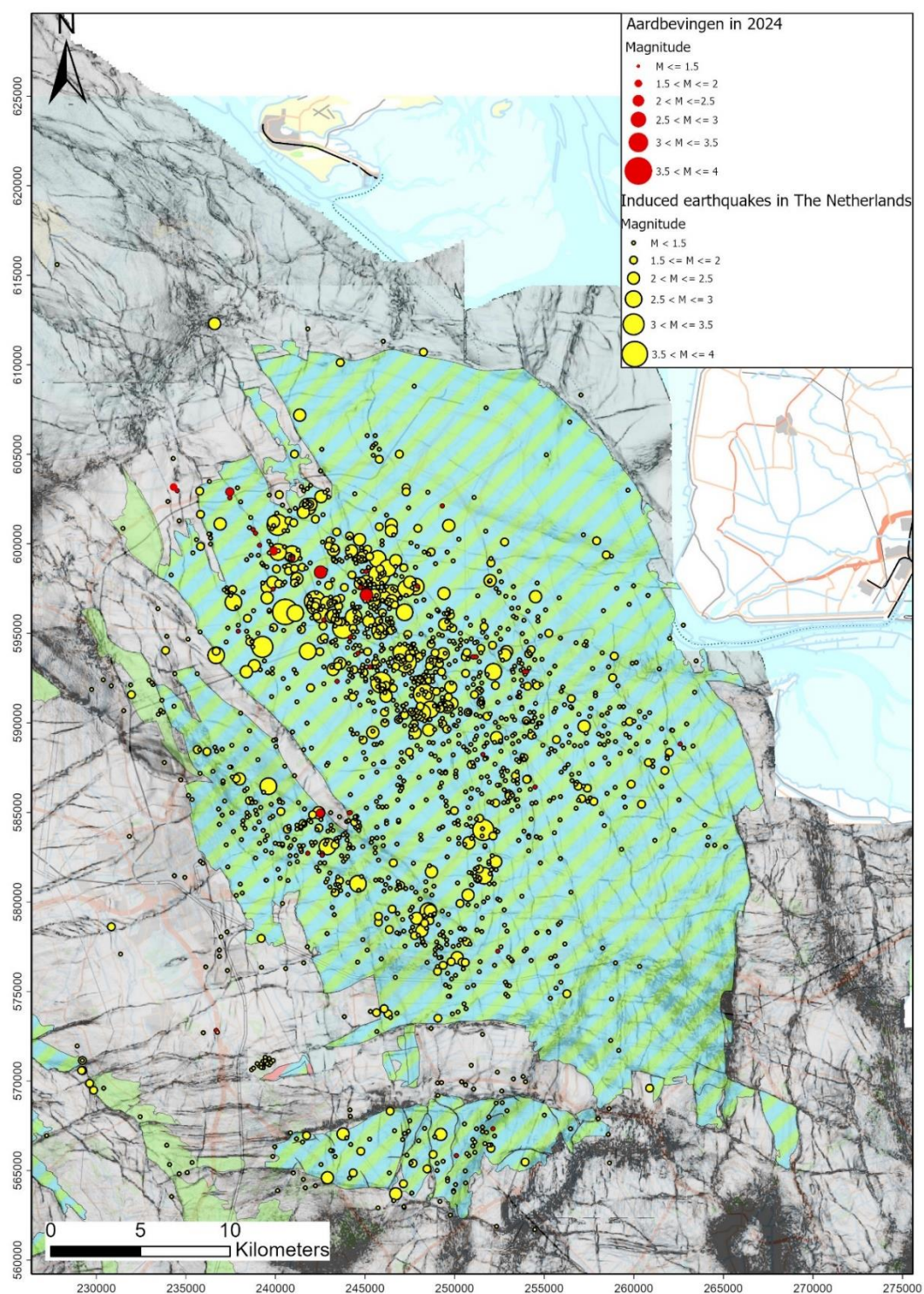
De distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld is getoond op de kaart in Figuur 4-3 en Figuur 4-4. In deze figuren wordt de kaart van het gasveld met de epicentra van alle (dus ook de aardbevingen met een magnitude kleiner dan de MoC waarde) aardbevingen. De locaties van de in 2024 geregistreerde aardbevingen zijn in rood weergegeven. De aardbevingen die plaats vonden voor 2024 zijn in geel weergegeven. Alle zeven aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  in 2024 hebben een epicentrum binnen het meest seismisch actieve gebied ten noordwesten van Loppersum. Dit komt overeen met de voorspelling; dat door de voortgaande drukvereffening in het Groningen-gasveld de reservoirdruk in dit gebied nog steeds daalt. De zwaarste aardbeving met een magnitude  $M_L = 2.2$  vond plaats bij Garsthuizen op 31 oktober 2024.

## 4.3 Gas-productie gedurende 2024

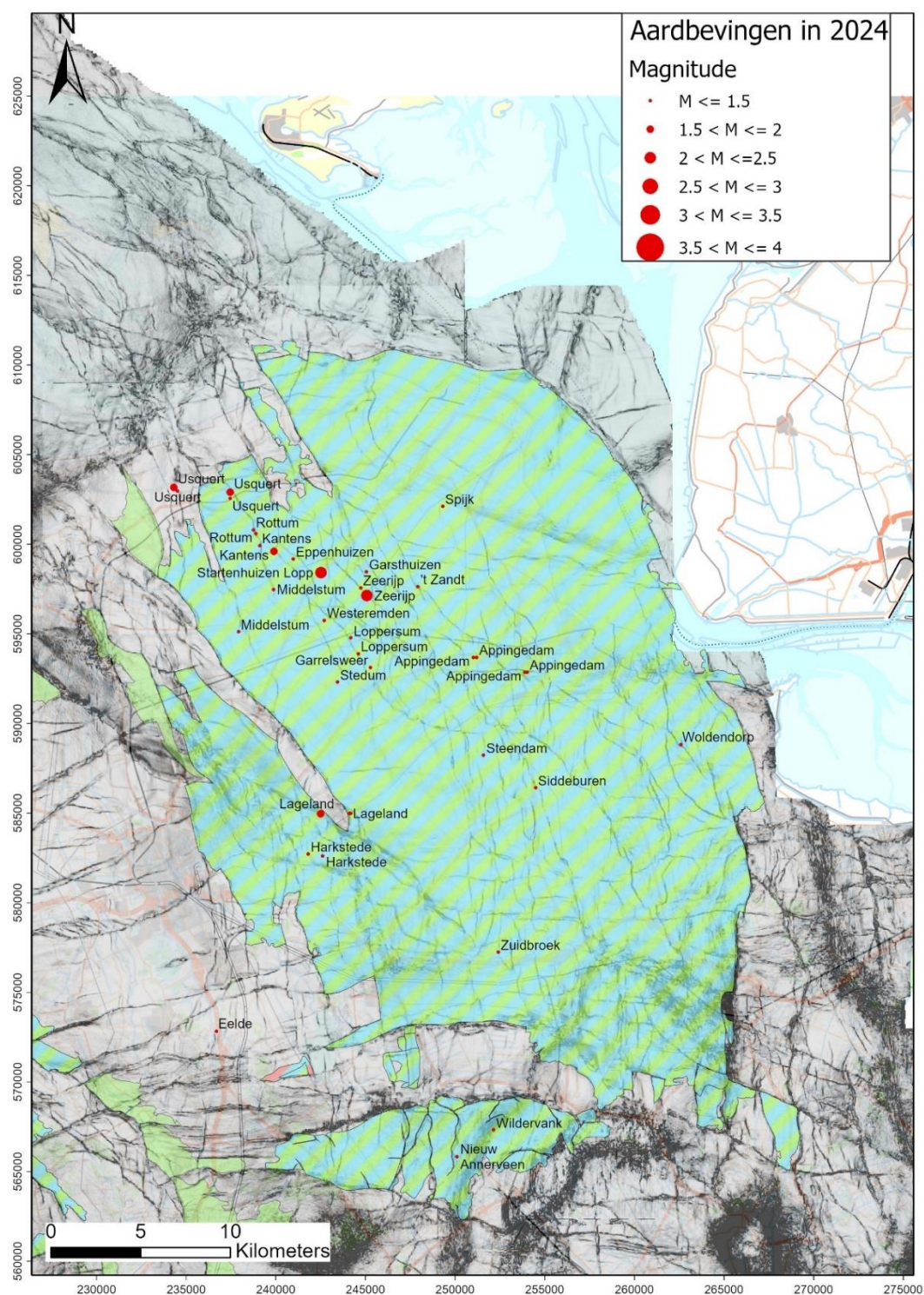
Om 6 uur in de ochtend op 1 oktober 2023 is het Groningen gasveld ingesloten. De laatste gas-productie was van 8 januari tot 10 januari 2024 toen, op verzoek van het ministerie van Klimaat en Groene Groei, vanuit twee locaties van het Groningen gasveld, Spitsbergen en Scheemderzwaag, voor korte tijd geproduceerd werd op het waakvlam niveau. In totaal is gedurende deze korte periode nog ca. 8 mln m<sup>3</sup> aardgas geproduceerd uit het Groningen gasveld (Ref. 5 tot 7n). In de daarop volgende maanden van 2024 is het gasveld niet geproduceerd.

## 4.4 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 4-5. 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.

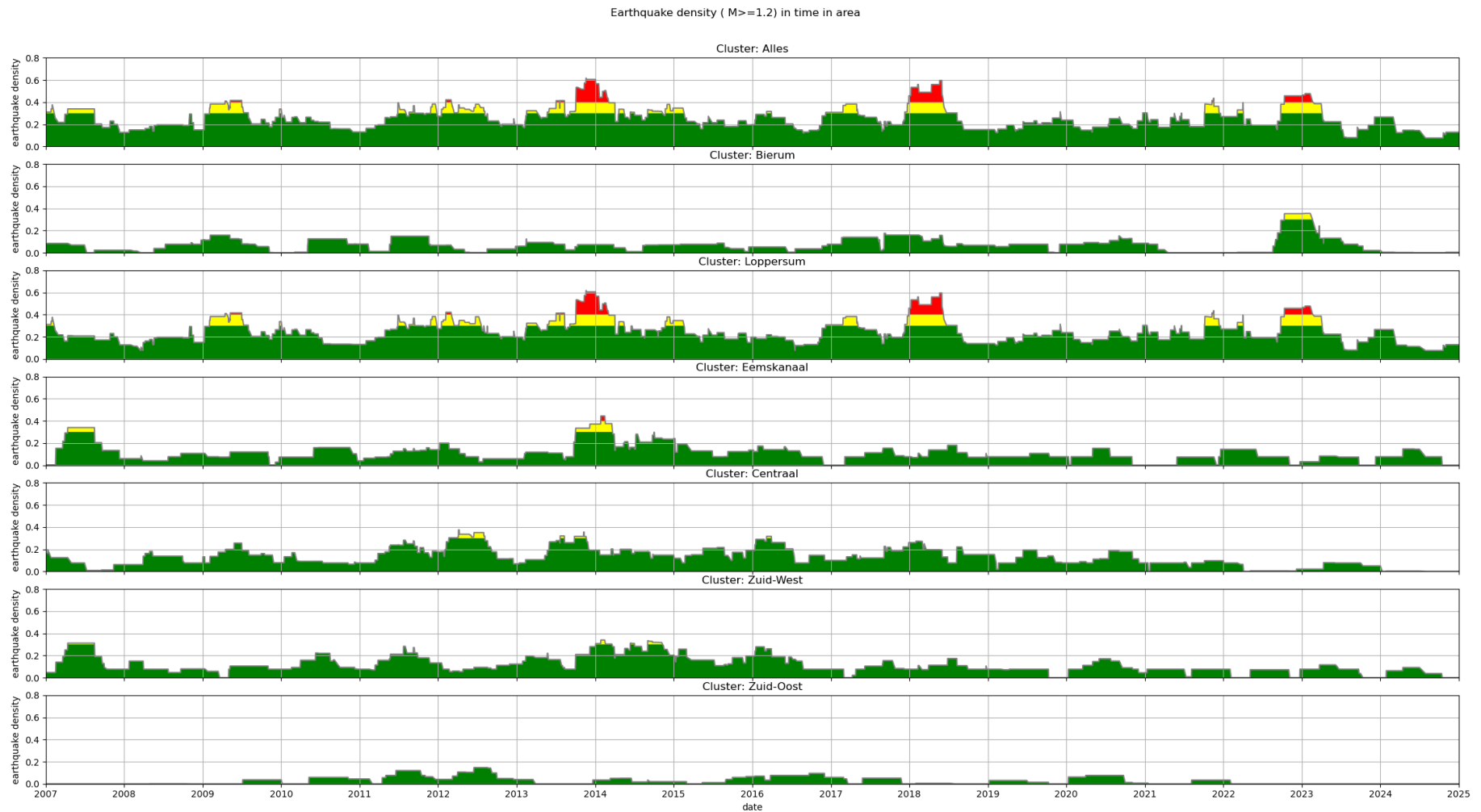


**Figuur 4-3** Kaart van de diepe ondergrond met daarop in groen het Groningen-gasveld en de omliggende gasvelden. Met rode stippen zijn alle aardbevingen geregistreerd in 2024 aangegeven. Alle aardbevingen vóór 2024 zijn aangegeven met gele cirkels. De grootte van de cirkel is een maat voor de magnitude van de aardbeving.



**Figuur 4-4** Kaart van de diepe ondergrond met daarop in groen het Groningen-gasveld en de omliggende gasvelden. Met rode stippen zijn alle in 2024 geregistreeerde aardbevingen aangegeven. De grootte van de cirkel is een maat voor de magnitude van de aardbeving.

## RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – PERIODE KALENDERJAAR 2024



Figuur 4-5 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.

Duidelijk zichtbaar in figuur 4-5 is de hogere maximale aardbevingsdichtheid in de periode van 2013 tot 2014 en de periodes 2018 en 2022 over het gasveld en in het gebied Loppersum in het bijzonder. Omdat de aardbevingen in het Loppersum-gebied vaak minder dan 5 km van de grens van het Bierum cluster plaatsvonden, 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.

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 in het noordwesten van het Groningen gasveld blijft dalen.

#### 4.5 Statistische analyse naar de ontwikkeling aardbevingen

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 4-6); één onder de aanname dat de events quasi-Poisson verdeeld zijn (Figuur 4-7). 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 aardbevingen ongecorreleerd 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 voor het aantal aardbevingen in een kwartaal.

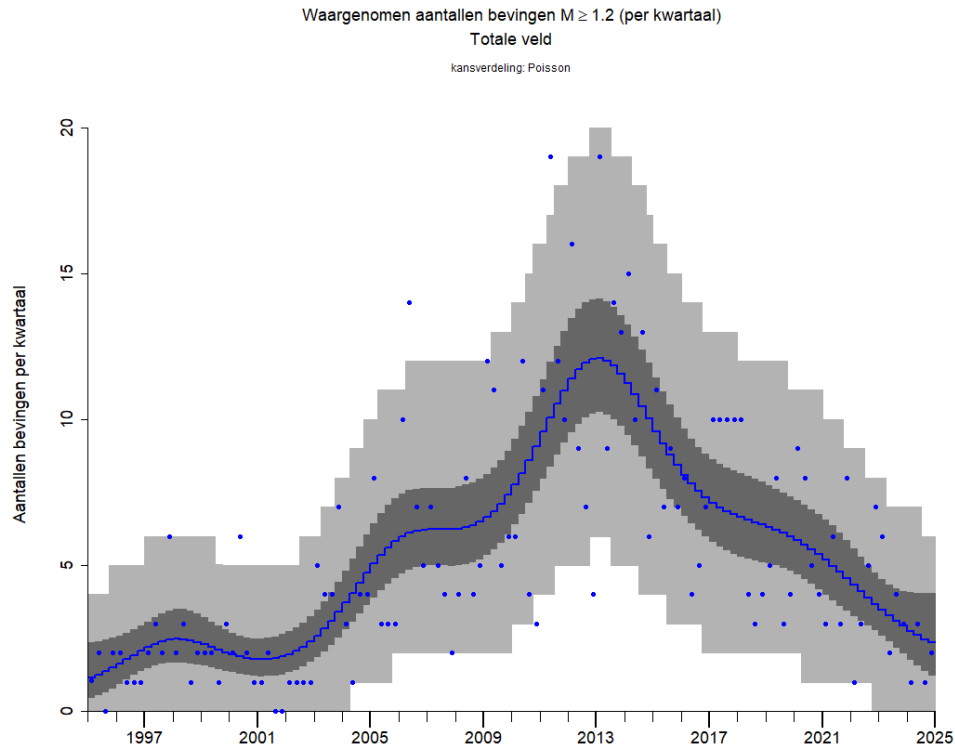
Beide plots bevatten de volgende informatie:

- 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.

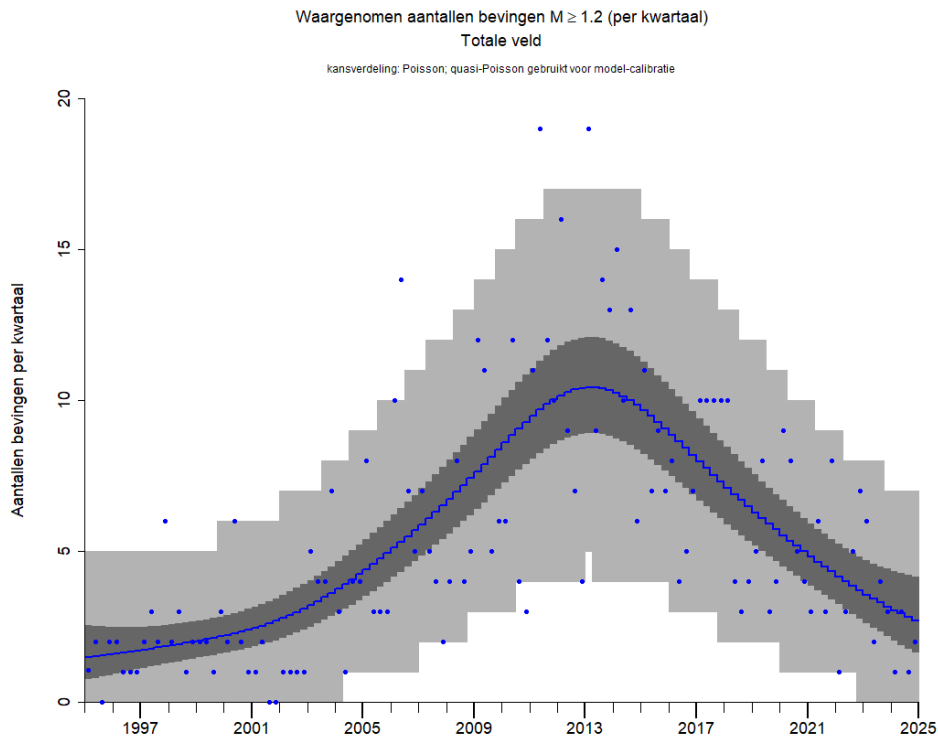
Beide manieren van beschouwen van de data geven grofweg hetzelfde beeld. Het aantal aardbevingen nam toe in de periode van 2001 tot een maximum in 2012. Hierna laat het aantal aardbevingen een neergaande trend zien in de periode van 2013 tot 2024. Merk op dat de onzekerheidsbanden in 2022 – 2024 mogelijk 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 4-6: Trend en betrouwbaarheidsinterval van het aantal aardbevingen per kwartaal, bij Poisson verdeelde seismische events.*

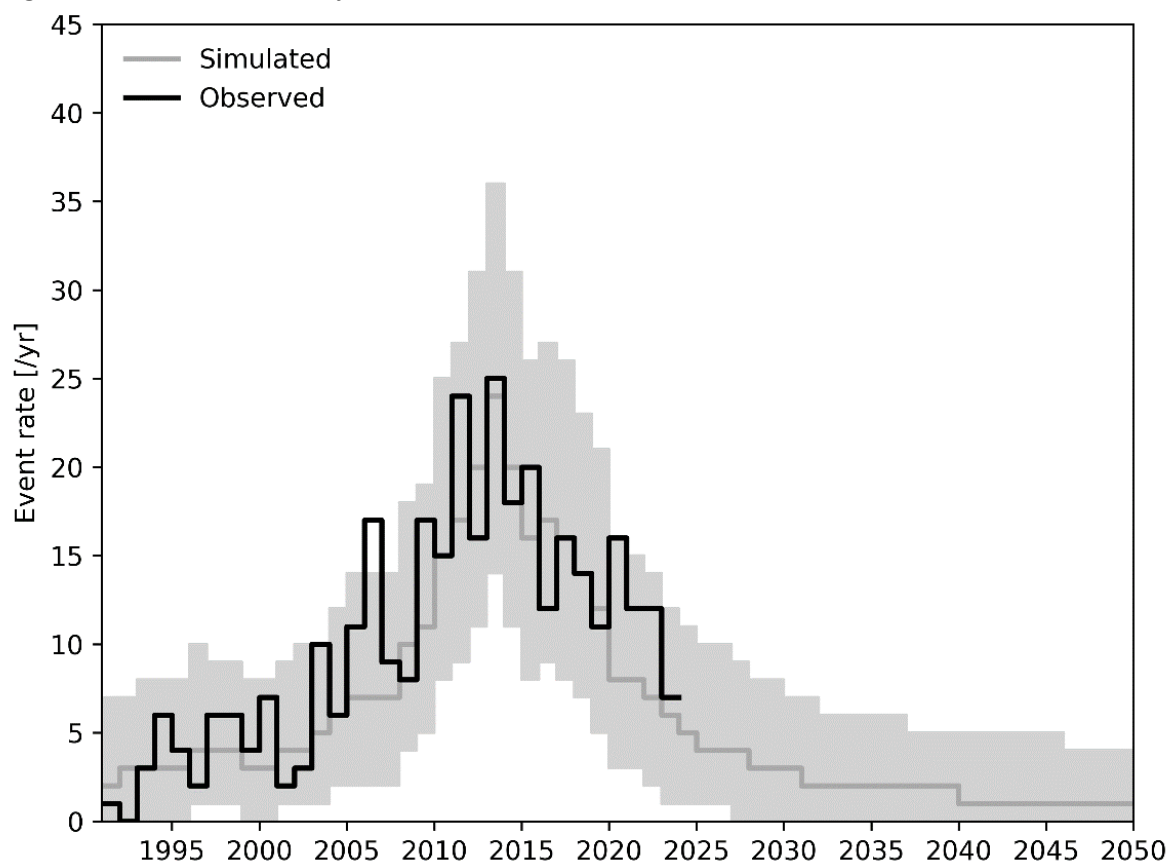


*Figuur 4-7: Trend en betrouwbaarheidsinterval van het aantal aardbevingen per kwartaal, bij quasi-Poisson verdeelde seismische events.*

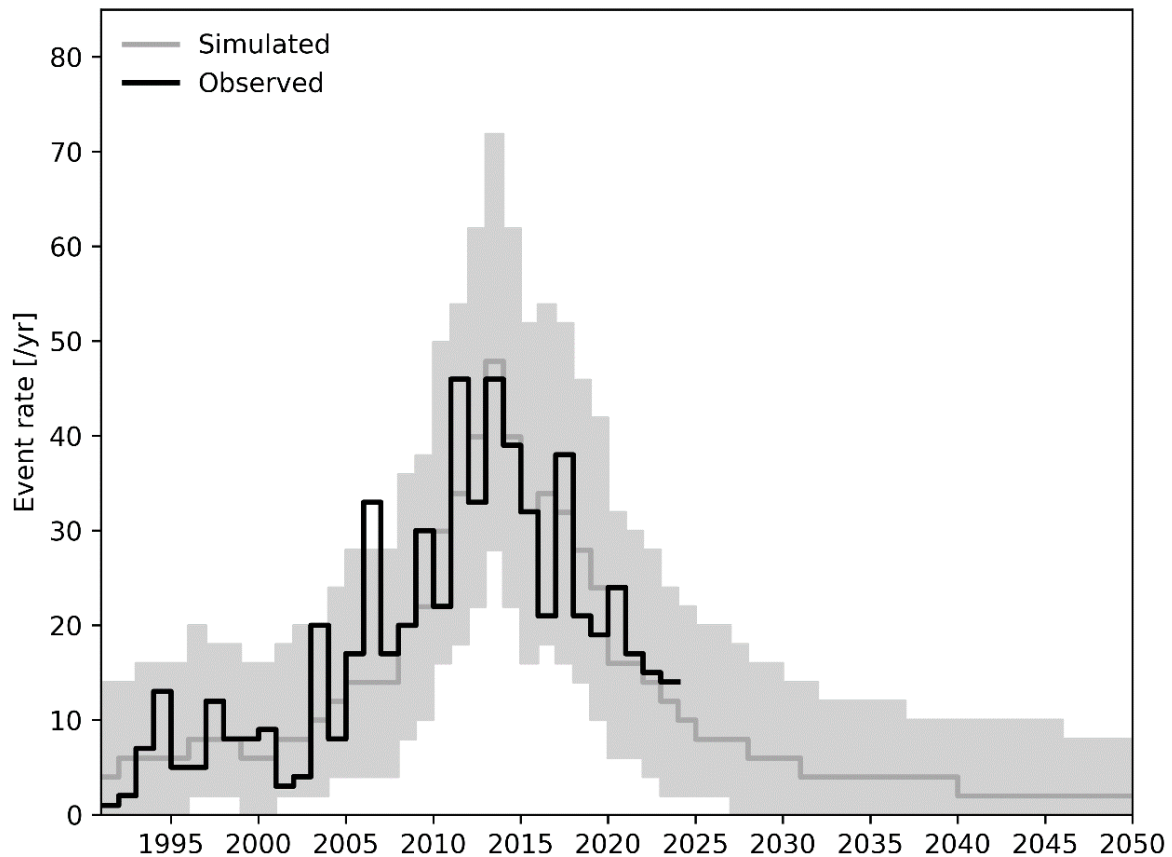
## 4.6 Vergelijking aantal geobserveerde en voorspelde aardbevingen

### 4.6.1 Kalibratie seismologisch model

In 2024 heeft TNO geen seismische risicoinschatting gepubliceerd. De vergelijking van het geobserveerde aantal aardbevingen is daarom gebaseerd op de Hazard and Risk Assessment (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 4-8 Kalibratie van het seismologisch model gebaseerd op de aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,5$  tot 1 januari 2024.



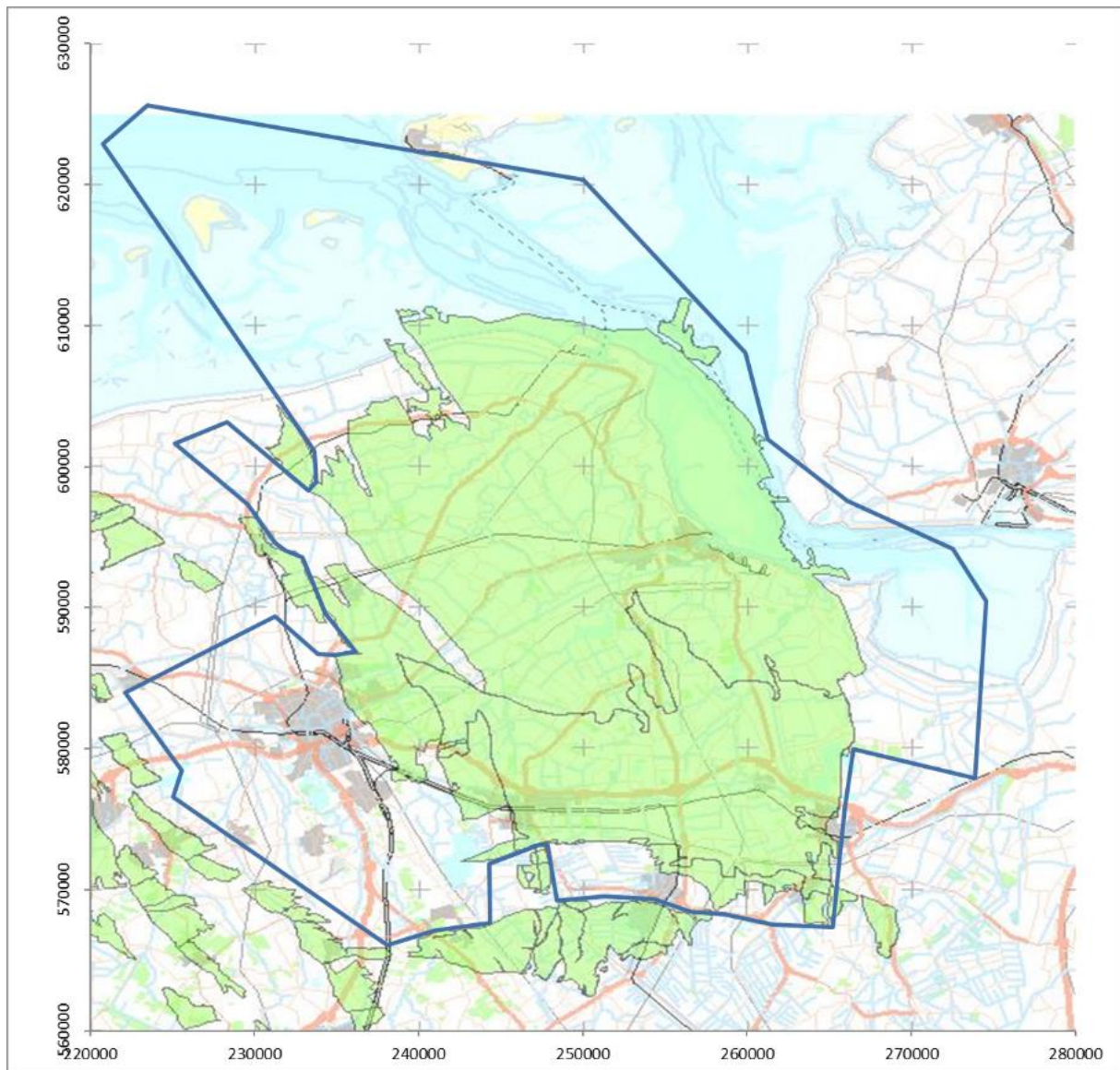
*Figuur 4-9 Aantal geregistreerde aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,2$  vergeleken met het seismologisch model gebaseerd op de aardbevingen tot 1 januari 2024.*

#### 4.6.2 Tellen van het aantal aardbevingen

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 hoofdstukken (1 tot en met 4.5) van deze periodieke rapportage maakt NAM gebruik van de tweede versie van de KNMI aardbevingscatalogus met afronding.

Echter voor de vergelijking tussen het opgetreden aantal aardbevingen met de voorspeling van het seismologisch model moet gebruik worden gemaakt van een aardbevingencatalogus waarin de waarden van de magnitude niet zijn afgerond (de eerste versie). Daardoor zal een aardbeving met een magnitude van 1,50 wel worden meegeteld als een aardbeving met  $M \geq 1,5$  maar bijvoorbeeld een aardbeving met een magnitude van 1,49 niet.

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  $M \geq 1,5$ . Voor een exacte vergelijking tussen aantallen geobserveerde aardbevingen en het aantal voorspelde aardbevingen wordt daarom de niet-afgeronde versie van de aardbevingencatalogus gebruikt.



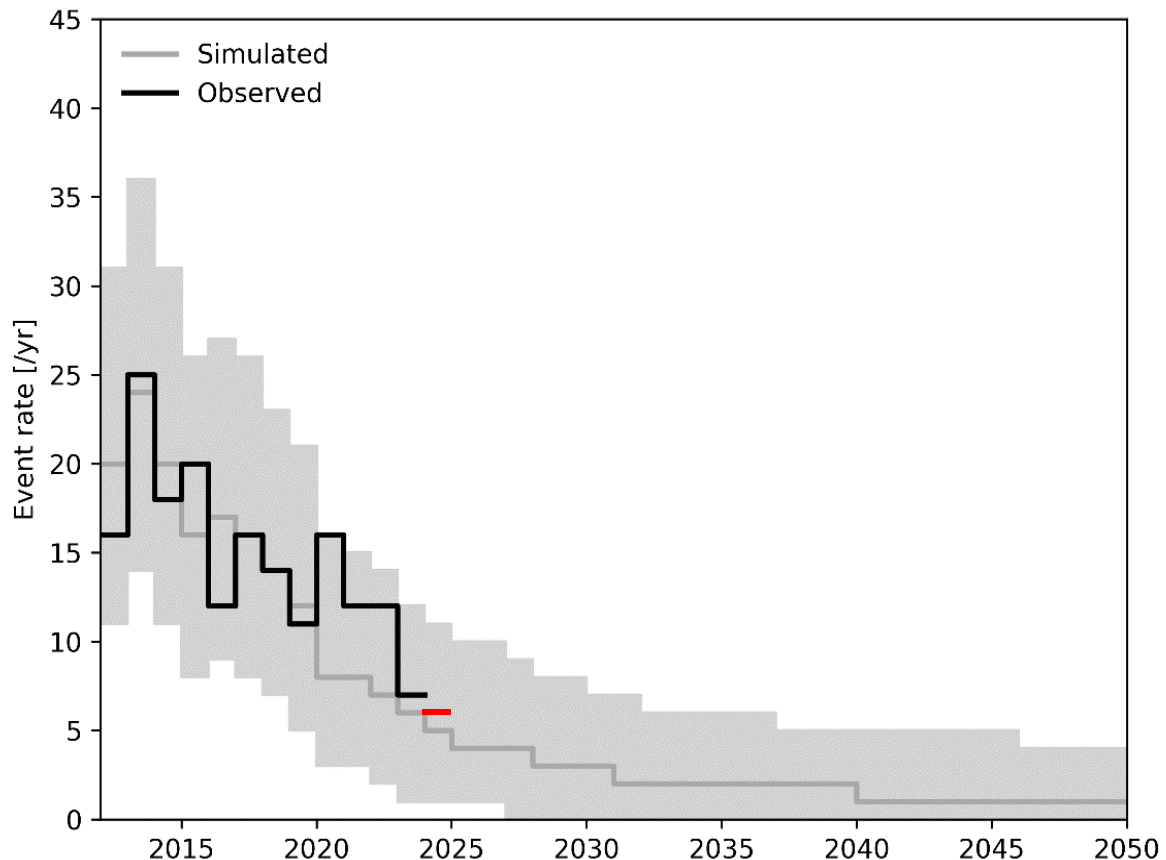
*Figuur 4-10 De polygoon rond het Groningen gasveld. Aardbevingen met het epicentrum binnen deze polygoon worden toegewezen aan het Groningen gasveld. Ten zuiden van de polygoon is het Annerveen gasveld te zien.*

Voor het tellen van het aantal aardbevingen voor seismische rapportage van het Groningen gasveld is ook de toewijzing van aardbevingen aan het Groningen gasveld of een van de er omheen liggende gasvelden belangrijk. 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.

Voor de aardbevingen in 2024 is de afronding van belang voor de aardbevingen op 28 januari 2024 bij Luddeweer. De afgeronde magnitude gerapporteerd door KNMI is  $M_L = 1,2$ . Echter de magnitude is naar boven afgerond. De magnitude van deze aardbeving was dus  $M_L < 1,2$  en telt in deze vergelijking daarom niet mee.

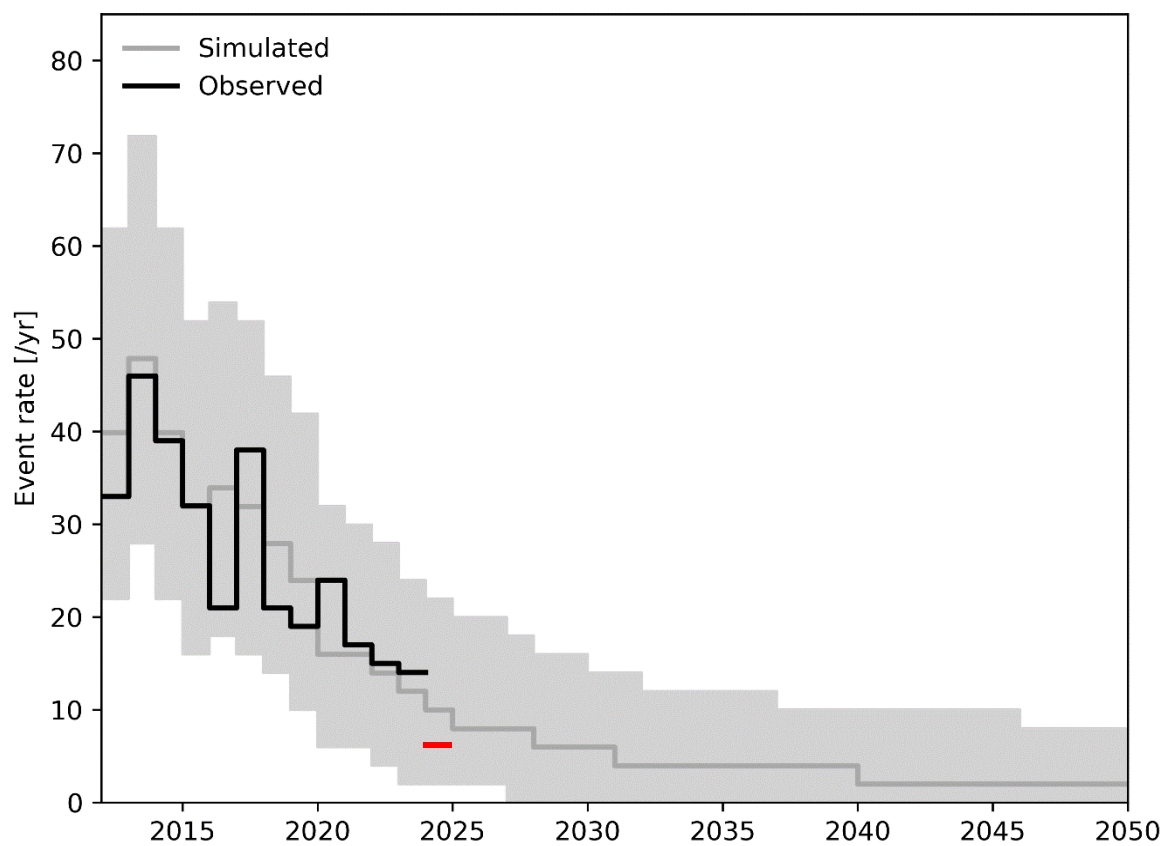
#### 4.6.3 Vergelijking aantal geobserveerde aardbevingen met modelvoorspelling

Het HRA-model wordt geijkt aan de aardbevingen met een magnitude  $M_L \geq 1,5$ . Daarom tonen we de vergelijking tussen met model en de werkelijk opgetreden aantal aardbevingen voor aardbevingen met magnitude  $M_L \geq 1,5$ . Figuur 4-11 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 2024 zijn er zes aardbevingen geweest met een magnitude  $M_L \geq 1,5$ . Drie hiervan waren in april. Dit valt binnen de onzekerheidsband, en ligt heel dicht bij de verwachtingswaarde.



*Figuur 4-11 Voorspelde aantal aardbevingen in het Groningen gasveld met een magnitude  $M_L \geq 1,5$ . Het aantal geobserveerde aardbevingen in 2024 is aangegeven in rood.*

De Mijnbouwregeling schrijft voor dat de aardbevingenrapportage wordt gebaseerd op aardbevingen met magnitude  $M_L \geq 1,2$ . Omdat het verwachte aantal aardbevingen met  $M_L \geq 1,2$  groter is, is ook de vergelijking hiervoor tussen voorspelde en geobserveerde aantal aardbevingen betrouwbaarder. Figuur 4-12 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 2024 zijn er zes aardbevingen geweest met een magnitude  $M_L \geq 1,2$ . Dit ligt onder het verwachte aantal aardbevingen in 2024 (de voorspelling is 10 aardbevingen in 2024).



*Figuur 4-12 Voorspelde aantal aardbevingen in het Groningen gasveld met een magnitude  $M_L \geq 1,2$ . Het aantal geobserveerde aardbevingen in 2024 is aangegeven in rood.*

## 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. Defining criteria for semi-annual earthquake reporting of PGV and PGA in Groningen, Michail Ntinalexis, April 2024.
3. Magnitude and Energy of Earthquakes. B. Gutenberg, C.F. Richter. Annali di Geofisica. 9: 1-15, 1956.
4. 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.
5. Opstarten Productie Groningen gasveld, 8 januari 2024, Persbericht NAM.
6. Productie Groningen gasveld gestopt, 10 januari 2024, Persbericht NAM.
7. 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

| Titel                                                                                                                                                      | Datum     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 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 Zandweer 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.*

| Title                                                 | Date      |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| 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 |
| Rapportage Seismiciteit Groningen – Eerste helft 2024 | juli 2024 |
| Rapportage Seismiciteit Groningen - November 2024     | Nov 2024  |
| Rapportage Seismiciteit Groningen - Kalenderjaar 2024 | Jan 2025  |

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

## Appendix B – Aardbevingscatalogus (door KNMI) voor kalenderjaar 2024

| Plaats       | Datum     | Time<br>hh:mm:ss | Magnitude | Diepte<br>km | Easting | Northing |
|--------------|-----------|------------------|-----------|--------------|---------|----------|
| Zuidbroek    | 04-jan-24 | 22:43:33         | 0,5       | 3            | 252408  | 577242   |
| Luddeweer    | 28-Jan-24 | 01:47:05         | 1,2       | 3            | 244171  | 584985   |
| Eppenhuisen  | 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   |
| Garrelsw eer | 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   |
| 't Zandt     | 05-Mei-24 | 19:14:45         | 0,3       | 3            | 247933  | 597636   |
| Siddeburen   | 12-Mei-24 | 11:38:16         | 0,8       | 3            | 254492  | 586412   |
| Harkstede    | 13-Mei-24 | 23:11:10         | 0,4       | 3            | 242612  | 582619   |
| Garsthuizen  | 18-Mei-24 | 01:52:34         | 0,8       | 3            | 245053  | 598471   |
| Loppersum    | 06-Jul-24 | 7:39:58          | 0,4       | 3            | 244606  | 593899   |
| Middelstum   | 06-Jul-24 | 16:57:40         | 0,5       | 3            | 237920  | 595114   |
| Kantens      | 19-Jul-24 | 20:19:49         | 0,6       | 3            | 239102  | 599922   |
| Kantens      | 09-Aug-24 | 18:00:20         | 1,7       | 3            | 239906  | 599602   |
| Appingedam   | 24-Sep-24 | 23:50:53         | 0,8       | 3            | 253892  | 592857   |
| Usquert      | 09-Oct-24 | 22:14:33         | 0,7       | 3            | 234525  | 602960   |
| Rottum       | 11-Oct-24 | 11:26:22         | 0,9       | 3            | 238753  | 600806   |
| Usquert      | 19-Oct-24 | 09:12:35         | 1,7       | 3            | 237453  | 602899   |
| Eelde        | 21-Oct-24 | 05:17:09         | 0,9       | 3            | 236699  | 572831   |
| Loppersum    | 22-Oct-24 | 00:24:36         | 0,3       | 3            | 244190  | 594782   |
| Rottum       | 30-Oct-24 | 10:22:29         | 1,1       | 3            | 238890  | 600586   |
| Garsthuizen  | 31-Oct-24 | 15:15:26         | 2,2       | 3            | 242511  | 598419   |
| Appingedam   | 09-Nov-24 | 00:40:57         | 0,4       | 3            | 254025  | 592860   |
| Spijk        | 23-Nov-24 | 22:03:14         | 0,9       | 3            | 249309  | 602116   |
| Middelstum   | 13-Dec-24 | 06:32:07         | 1,1       | 3            | 239877  | 597486   |
| Harkstede    | 15-Dec-24 | 11:46:10         | 1,1       | 3            | 241809  | 582716   |

**Tabel B** Aardbevingen geregistreerd door het seismisch monitoring netwerk tussen 1 januari 2024 en 1 januari 2025 (huidige en de vooraf gaande rapportage periodes).

