



RAPPORTAGE SEISMICITEIT
GRONINGEN – NOVEMBER 2022



[Deze pagina is opzettelijk leeg gelaten]

Inhoudsopgave

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Samenvatting | 4 |
| 1.1 | Aantal aardbevingen (activity rate) | 4 |
| 1.2 | Aardbevingsdichtheid | 5 |
| 1.3 | Trend in seismiciteit..... | 7 |
| 1.4 | Incidentparameters PGA en PGV | 7 |
| 1.5 | Aardbevingen rond Wirdum op 8 oktober 2022..... | 7 |
| 1.6 | Verdere studies naar de seismiciteit tijdens de periode van drukvereffening | 7 |
| 2 | Inleiding en leeswijzer..... | 8 |
| 2.1 | Inleiding..... | 8 |
| 2.2 | Monitoring van het Groningen gasveld in de Mijnbouwregeling | 8 |
| 2.3 | Leeswijzer..... | 9 |
| 2.4 | Meetnetwerk en meetnauwkeurigheid..... | 9 |
| 2.5 | <i>Magnitude van compleetheid</i> | 10 |
| 3 | Trendparameters | 12 |
| 3.1 | Trendparameter aantal aardbevingen..... | 12 |
| 3.2 | Aardbevingsdichtheid | 13 |
| 4 | Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit | 16 |
| 4.1 | Aantal aardbevingen | 16 |
| 4.2 | Distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld | 18 |
| 4.3 | Statistische analyse naar de ontwikkeling aardbevingen | 27 |
| | Verloop van het aantal aardbevingen door de tijd | 27 |
| | Verband productie en seismiciteit per cluster en productielocatie | 29 |
| | Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd | 32 |
| | Verhouding tussen grote en kleine aardbevingen..... | 34 |
| | Anomale PGA/PGV bij een bepaalde aardbevings-magnitude | 37 |
| 4.4 | Vergelijking met het SDRA-model..... | 37 |
| 5 | Referenties..... | 39 |
| | Appendix A – Overzicht periodieke rapportages en speciale rapportages seismiciteit Groningen | 40 |
| | Appendix B – Aardbevingscatalogus 1 november 2021 tot 1 november 2022 (door KNMI) | 41 |
| | Appendix C – Aardbevingscatalogus 1 november 2021 tot 1 november 2022 (Gebaseerd op FWI analyse door Shell)..... | 44 |

1 Samenvatting

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 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 veldbrede toename of afname van de seismiciteit te signaleren over de afgelopen 6 maanden¹. De trendparameters worden berekend over een periode van 6 maanden en gerapporteerd op jaarbasis. De grondversnellingen (PGA) en grondsnelheden (PGV) van de aardbevingen zijn de incidentparameters. Daarnaast is ook de aardbevingsmagnitude van belang in de Mijnbouwregeling.

1.1 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 opgelopen van 7 (1 november 2021 tot 1 mei 2022) naar 11 (1 mei 2022 tot 1 november 2022). Voor een magnitude groter dan of gelijk aan $M_L \geq 1,5$ is het aantal geregistreerde aardbevingen in de afgelopen zes maanden opgelopen van 5 naar 7. De seismiciteit in de afgelopen observatieperiode van zes maanden (van mei 2022 tot en met oktober 2022) vertoont daarmee een licht stijgende trend ten opzichte van de vorige observatieperiode. Dit wordt in meer detail omschreven in paragrafen 4.1 tot 4.3.

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 mei 2022 tot 1 november 2022. Locatie van het hypocentrum is gebaseerd op de KNMI-aardbevingscatalogus.

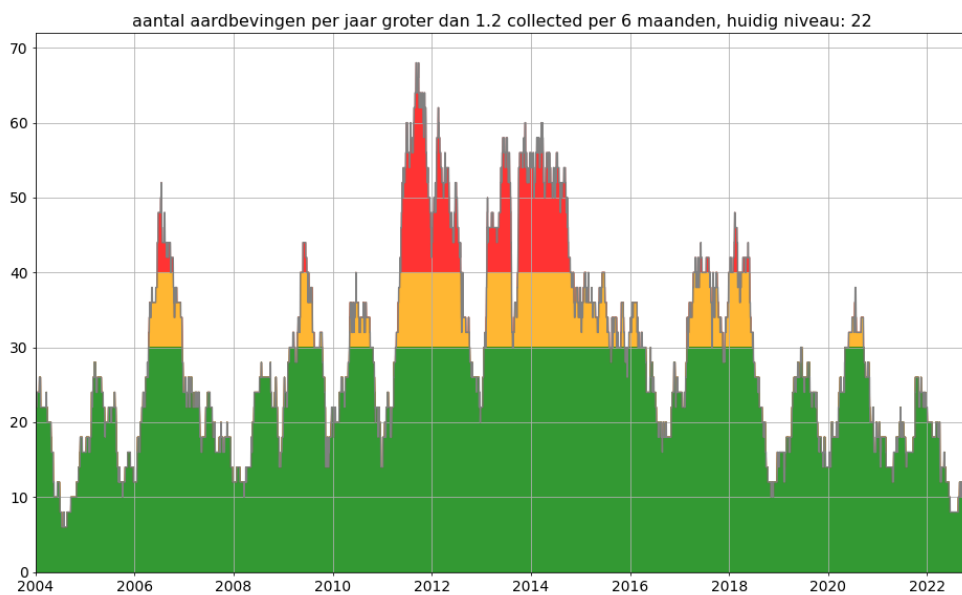
| Plaats | Datum | Time hh:mm:ss UTC | Magnitude | Diepte km | Easting | Northing |
|-------------|-----------|-------------------|-----------|-----------|---------|----------|
| Lageland | 05-May-22 | 09:05:00 | 1,8 | 3 | 244586 | 584213 |
| Uithuizen | 19-Aug-22 | 05:49:14 | 1,9 | 3 | 241922 | 602198 |
| Uithuizen | 28-Aug-22 | 03:18:59 | 1,3 | 3 | 241922 | 602198 |
| Uithuizen | 09-Sep-22 | 00:39:11 | 2,3 | 3 | 241988 | 602199 |
| Uithuizen | 24-Sep-22 | 10:20:38 | 2,7 | 3 | 241791 | 602084 |
| Uithuizen | 24-Sep-22 | 11:37:29 | 1,7 | 3 | 241722 | 602194 |
| Wirdum | 08-Oct-22 | 02:17:17 | 3,1 | 3 | 247281 | 593393 |
| Garrelsweer | 08-Oct-22 | 05:35:36 | 1,2 | 3 | 247214 | 593391 |
| Uithuizen | 11-Oct-22 | 15:36:39 | 1,3 | 3 | 241652 | 602416 |
| Wirdum | 13-Oct-22 | 16:08:48 | 1,4 | 3 | 247485 | 593174 |
| Wirdum | 22-Oct-22 | 10:14:04 | 2,2 | 3 | 248747 | 593421 |

Met name in de eerste helft van 2022 was de seismiciteit in Groningen laag, met één aardbeving groter dan $M_L \geq 1,2$ in het eerste kwartaal en drie aardbevingen in het tweede kwartaal van dat jaar. In de

¹ 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 varieert tussen de 181 en 184 dagen.

maanden juni en juli zijn er geen aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,2$ geregistreerd in Groningen en was de het aantal aardbevingen, tussen 1 februari en 31 juli gedaald tot 8 op jaarbasis². Echter in de drie-maanden periode van augustus, september tot oktober 2022 zijn er twee zwermen van in totaal 10 aardbevingen geregistreerd.

In een heel klein gebied bij het dorp Uithuizen zijn, van 19 augustus tot 24 september 2022, 5 aardbevingen met een kracht $M_L \geq 1,2$ geregistreerd. Op 11 oktober volgende nog een 6^{de} aardbeving in dit gebied. Deze zwerm werd in oktober gevolgd door 4 aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,2$ bij Wirdum/Garrelswaer. De zwaarste aardbeving in deze laatste zwerm had een magnitude van $M_L = 3,1$. Door deze twee zwermen is het aantal aardbevingen met magnitude $M_L \geq 1,2$ in oktober 2022 gestegen naar 22 op jaarbasis.



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

1.2 Aardbevingsdichtheid

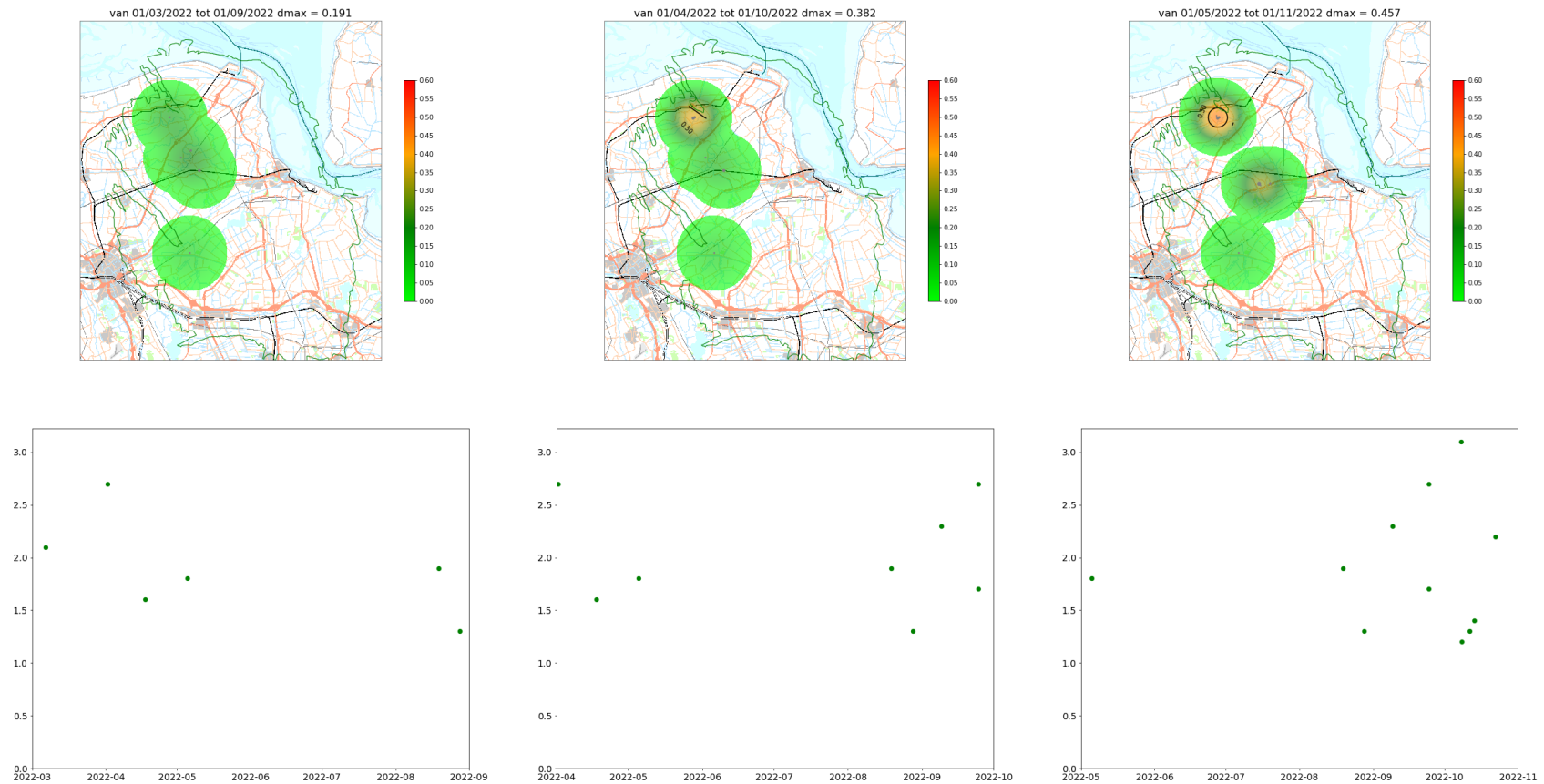
Aardbevingsdichtheid is gedefinieerd als het aantal geobserveerde aardbevingen per vierkante kilometer per jaar en wordt berekend voor het hele Groningen-gasveld. Deze dichtheid is berekend op basis van de aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,2$, geregistreerd gedurende de voorafgaande 6 maanden.

Afgezien van de aardbeving bij Lageland begin mei 2022, hebben de verdere tien aardbevingen in de afgelopen rapportage periode een epicentrum in twee kleine gebieden rond Uithuizen en Wirdum/Garrelswaer. Als een gevolg hiervan is de aardbevingsdichtheid in deze twee gebieden relatief hoog.

² In de zes maanden periode van 1 februari 2022 tot 31 juli 2022 zijn er 4 aardbevingen geregistreerd. Dit komt overeen met 8 aardbevingen op jaarbasis.

RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2022

Aardbevings dichtheid in bevingen/km²/jaar ($M \geq 1.2$)



Figuur 1-2: 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. De linker figuren geven de toestand weer op 1 september 2022. De middelste figuren geven deze weer op 1 oktober en de rechter figuren op 1 november 2022.

Vooral de aardbevingenzwerm met epicentra in een klein gebied nabij Uithuizen had een grote invloed op de grootste aardbevingsdichtheid. Op 24 september 2022 wordt het monitoringsniveau 'bovengemiddelde lokale seismiciteit' overschreden, op het moment dat de aardbevingsdichtheid 0,38 aardbevingen per (jaar*km²) was. Enkele weken later op 11 oktober 2022 is de aardbevingsdichtheid opgelopen tot 0,46 aardbevingen per (jaar*km²) en wordt het monitoringsniveau 'hoge lokale seismiciteit' overschreden.

Meer informatie over de aardbevingen zwerm bij Uithuizen is te vinden in de speciale rapportage 'Special Report on the Earthquakes near Uithuizen in August, September and October 2022'. Dit rapport is beschikbaar op de webpagina 'Onderzoeksrapporten' van de website www.nam.nl.

1.3 Trend in seismiciteit

Het aantal aardbevingen per jaar laat vanaf 2014 een dalende trend zien. In de vorige 6-maanden rapportage over de periode van 1 november 2021 tot 1 mei 2022 zijn er 7 aardbevingen boven en rond het Groningen-gasveld met een magnitude van $M_L \geq 1,2$ geregistreerd. Opvallend was dat in het eerste kwartaal van 2022 er slechts één aardbeving is geregistreerd met een kracht groter of gelijk aan $M_L \geq 1,2$.

Echter deze dalende trend heeft zich in de huidige rapportage periode van 1 mei 2022 tot 1 november 2022 niet doorgezet. Dit is het gevolg van twee zwermen aardbevingen die bij Uithuizen en Wirdum/Garrelswier hebben plaatsgevonden. Hierdoor is het aantal aardbevingen in de afgelopen zes maanden opgelopen tot 11.

1.4 Incidentparameters PGA en PGV

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. De hoogste PGA-component waarde geregistreerd tijdens de Wirdum aardbeving op 8 oktober 2022 was 0,06 g. De hoogste PGV die is geregistreerd tijdens deze aardbeving is 2,46 cm/s.

1.5 Aardbevingen rond Wirdum op 8 oktober 2022

De aardbeving met de grootste magnitude tijdens de rapportage periode was de Wirdum aardbeving met een magnitude van $M_L=3,1$ op 8 oktober 2022. Meer informatie over de gemeten grondbeweging tijdens de Wirdum aardbeving van 8 oktober 2022 kan worden gevonden in de speciale rapportage 'Special Report on the Wirdum Earthquake of 8th October 2022 with Magnitude $M_L = 3.1$ '. Dit rapport is beschikbaar op de webpagina 'Onderzoeksrapporten' van de website www.nam.nl.

1.6 Verdere studies naar de seismiciteit tijdens de periode van drukvereffening

Omdat de seismiciteit al enige tijd meer tegen de bovenkant van de onzekerheidsband van de voorspelling zit, 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. Na overleg met SodM zijn deze studies in augustus 2022 gestart. NAM heeft een finale versie van het studieplan ingeleverd bij SodM. Verdere commentaren van SodM op het studieplan zullen meegenomen worden in deze studies.

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).

Seismische gegevens en gasproductie in dit rapport zijn bijgewerkt tot 1 november 2022. 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 de afgelopen zes maanden, 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 trendparameter waarnemingsniveau volgens Mijnbouwregeling artikel 1.3a.6. Meldingen worden gedaan aan de Minister van Economische Zaken en Klimaat en de Inspecteur-generaal der Mijnen (SodM).

| Trendparamete | 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 subsets, die daardoor statistisch niet direct vergelijkbaar zijn.

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

- Groen: Aardbevingen met een magnitude³ 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 geofoon stations van vóór de uitbreiding en nieuw geplaatste stations (vooral ten westen van het gasveld) die alleen

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

grondversnelling meten. Alle in dit hoofdstuk gerapporteerde meetgegevens zijn ontleend aan het KNMI en terug te vinden op de website van het KNMI.

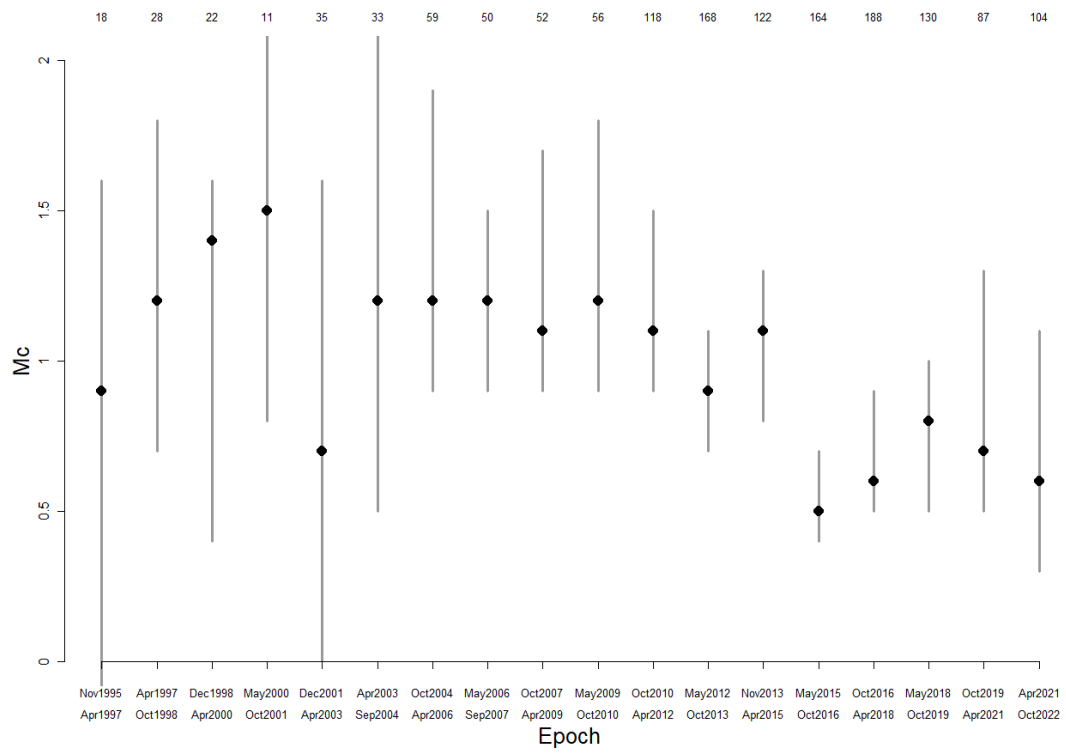
Het seismische meetnetwerk boven het Groningen-gasveld is in 2014 uitgebreid met 69 nieuwe seismische meetstations. Hierdoor is de gevoeligheid van het meetnetwerk toegenomen. In de periode van 2003 tot en met 2014 werden alle aardbevingen in het Groningen-gasveld met een magnitude groter dan $M_L \geq 1,5$ 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. Voor 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 $M_L=1$ 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 reservoir. 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 reservoir. De MoC wordt afgeleid uit de waarnemingen en is onderhevig aan een bepaalde mate van onzekerheid.

Voor statistisch onderzoek is het van belang een goede MoC te veronderstellen. Is de veronderstelde MoC te hoog dan 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 mogelijkterwijs foutieve conclusies uit de dataset afgeleid.

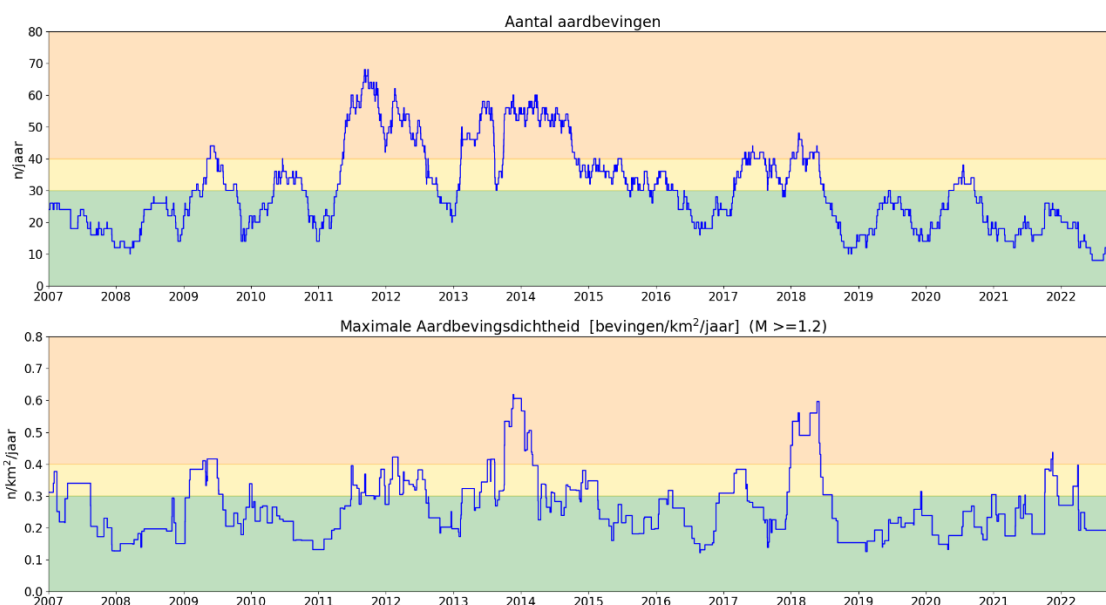
De MoC is afgeleid volgens de maximum curvature method (Ref. 3 en 4) en de resultaten met het 95% betrouwbaarheidsinterval zijn weergegeven in figuur 2-1. In het figuur is duidelijk zichtbaar dat vanaf 2014 de MoC afneemt (ook kleinere aardbevingen worden geregistreerd). Vanaf 2014 zijn aardbevingen 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.

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 getoond.

Tabel 3-1 Trendparameter overzicht mei 2022 tot november 2022. Aantal aardbevingen per voorgaande jaar en aardbevingsdichtheid (aantal aardbevingen per jaar per vierkante kilometer) zijn aangegeven op het einde van de maand.

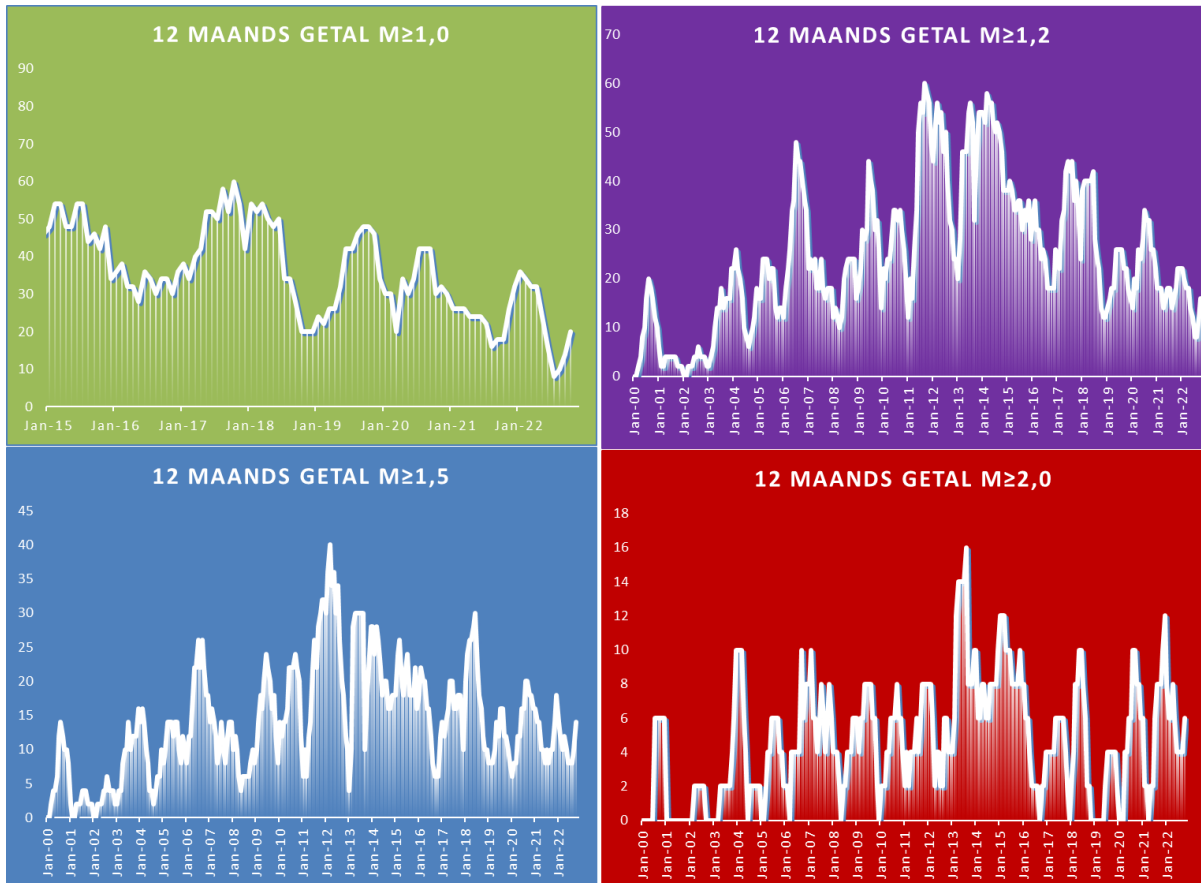
| | mei | juni | juli | aug | sept | okt |
|--|------|------|------|------|------|------|
| Aantal aardbevingen ($M_L \geq 1,2$) | 12 | 8 | 8 | 12 | 16 | 22 |
| Aardbevingsdichtheid (einde maand) | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,38 | 0,46 |

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 oktober 2022 is dus de som van het aantal aardbevingen van een bepaalde magnitude in de periode van 1 mei 2022 tot 31 oktober 2022 omgerekend naar één jaar.

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.



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 de voorgaande 6 maanden. Deze zijn omgerekend naar jaarbasis.

De stabiel lage trend in het aantal aardbevingen (met magnitude groter dan $M_L = 1,0$, $M_L = 1,2$ en $M_L = 1,5$) zou het gevolg kunnen zijn van de verlaagde productievolumes en de manier van opereren maar ook van de natuurlijke variabiliteit. Het lage aantal events maakt het lastig conclusies te trekken, in hoofdstuk 4 wordt hier verder op in gegaan. Informatie over het verband tussen de seismiciteit en de productievolumes en manier van opereren kan gevonden worden in de Hazard and Risk Analysis rapporten (Ref. 5, 6 en 7).

3.2 Aardbevingsdichtheid

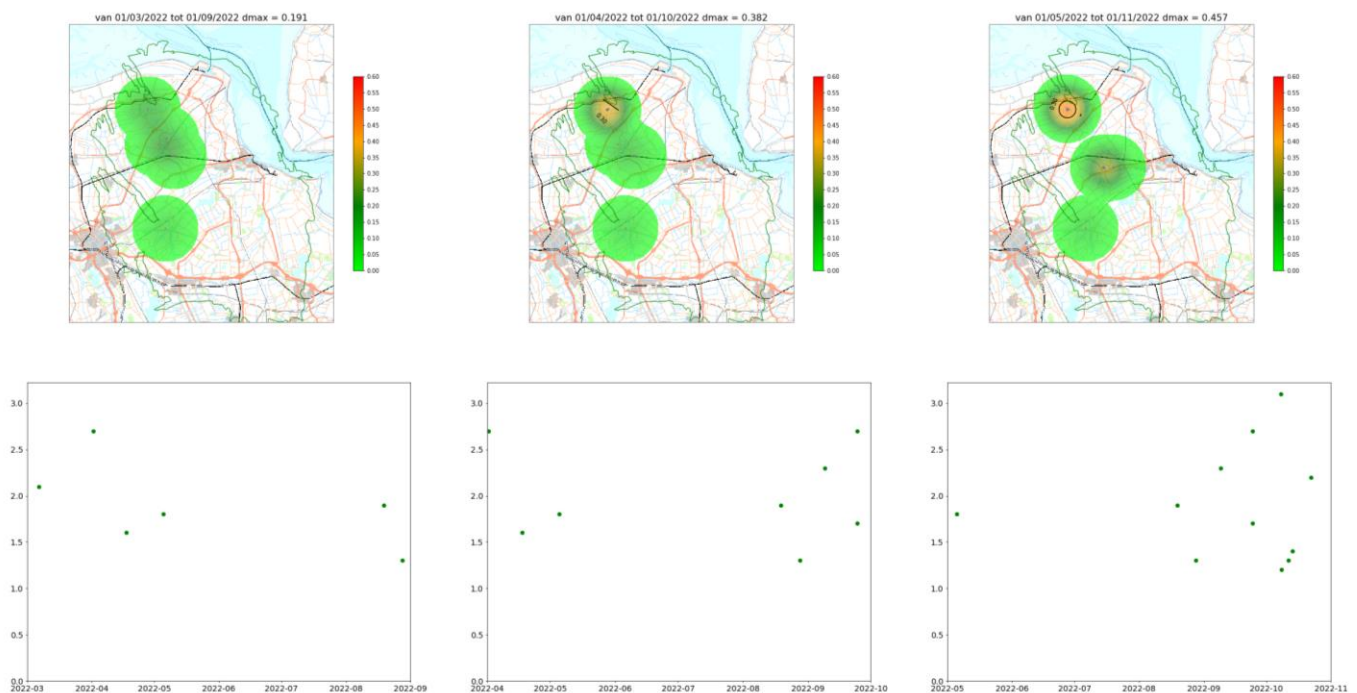
Figuur 3-3 toont een kaart met de aardbevingsdichtheid en de epicentra van de in de periode 1 mei 2022 tot 1 november 2022 geregistreeerde aardbevingen. Aardbevingsdichtheid wordt berekend met de Quartic Kernel functie. Alle geregistreeerde aardbevingen met een magnitude van $M_L = 1,2$ en hoger zijn hierin opgenomen. De berekende aardbevingsdichtheid wordt getoond door middel van een

kleurenschaal. Als trendparameter wordt de maximale waarde van de berekende aardbevingsdichtheid over de voorgaande zes maanden gebruikt.

Afgezien van de aardbeving bij Lageland begin mei 2022 (ten oosten van de stad Groningen), hebben de verdere tien aardbevingen in de afgelopen rapportage periode ($M_L \geq 1,2$) een epicentrum in twee kleine gebieden rond Uithuizen en Wirdum/Garrelsweer. Als een gevolg hiervan is de aardbevingsdichtheid in deze twee gebieden relatief hoog.

Vooraf de aardbevingen zwerm met epicentra in een klein gebied nabij Uithuizen had een grote invloed op de grootste aardbevingsdichtheid (Figuur 3-3). Op 24 september 2022 wordt het monitoringsniveau 'bovengemiddelde lokale seismiciteit' overschreden, wanneer de aardbevingsdichtheid 0,38 aardbevingen per (jaar * km²) is. Enkele weken later op 11 oktober 2022 is de aardbevingsdichtheid opgelopen tot 0,46 aardbevingen per (jaar * km²) en wordt het monitoringsniveau 'hoge lokale seismiciteit' overschreden.

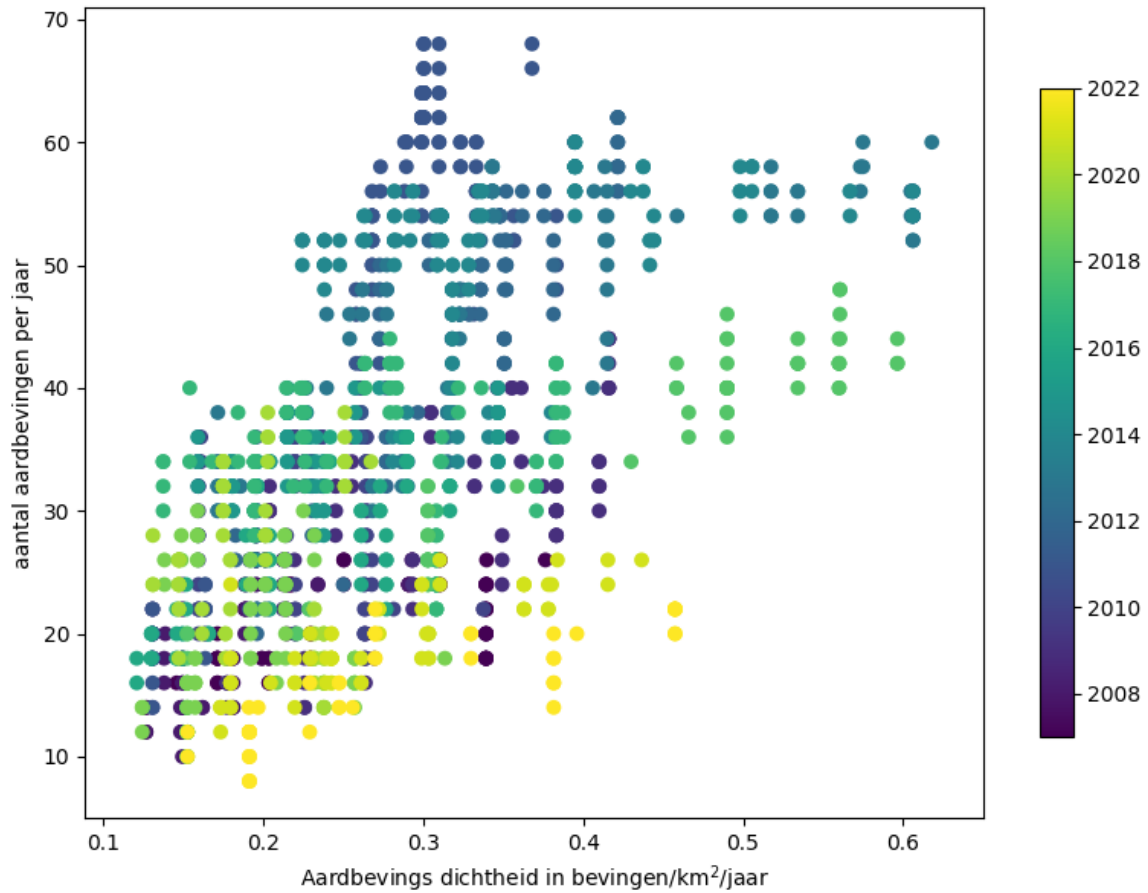
Meer informatie over de aardbevingen zwerm bij Uithuizen is te vinden in de speciale rapportage 'Special Report on the Earthquakes near uithuizen in August, September and October 2022'. Dit rapport is beschikbaar op de webpagina 'Onderzoeksrapporten' van de website www.nam.nl.



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. De linker figuren geven de toestand weer op 1 september 2022. De middelste figuur geven deze weer op 1 oktober 2022 en de rechter op 1 november 2022.

In Figuur 3-4 zijn de trendparameters, de maximale aardbevingsdichtheid en het aantal aardbevingen, met elkaar vergeleken in de tijd. Hieruit valt op dat, ondanks dat het aantal aardbevingen daalt, de aardbevingsdichtheid vrijwel gelijk blijft. Dit is een indicatie dat het aantal aardbevingen meer gelokaliseerd plaatsvinden in enkele kleinere gebieden. Bijvoorbeeld de lichtgroene punten (2016-2018) hebben een maximale aardbevingsdichtheid van 0,4 bevingen/(km²*jaar) waarbij er rond de 35

aardbevingen per jaar zijn geregistreerd. De gele punten (2021-2022) laten ook 0,4 bevingen/(km²*jaar) bij een lager (rond de 20) aantal bevingen per jaar. Dat er eenzelfde maximale aardbevingsdichtheid optreedt, terwijl er minder aardbevingen zijn geregistreerd is een indicatie dat de aardbevingen meer geconcentreerd in een kleiner gebied plaatsvinden.



Figuur 3-4: Aardbevingsdichtheid vs aantal aardbevingen per jaar, de kleurencode geeft het jaartal aan. Te zien is dat de huidige hoge aardbevingsdichtheid wordt gehaald met minder bevingen dan in voorgaande jaren.

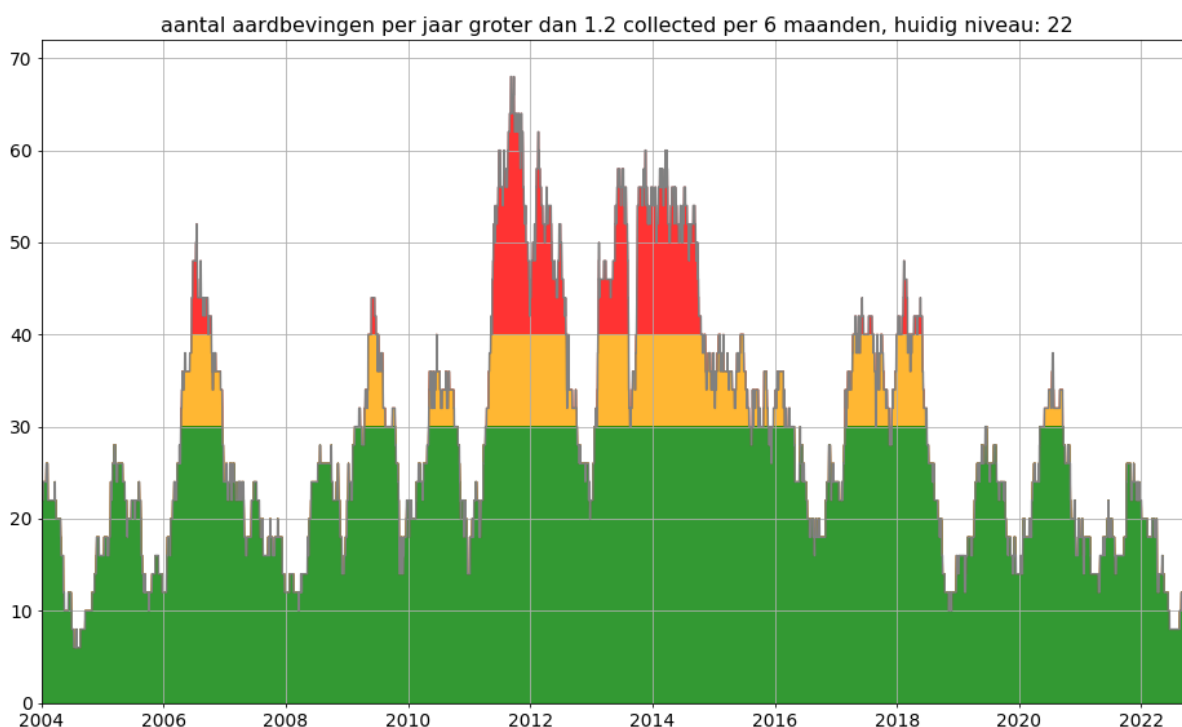
4 Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit

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

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

4.1 Aantal aardbevingen

In de afgelopen zes maanden zijn in totaal 11 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 22 aardbevingen op jaarbasis. Opvallend is dat slechts één van deze aardbeving was in de 3-maanden periode mei tot en met juli en er 10 aardbevingen waren in de 3-maanden periode augustus tot en met oktober. In de maanden juni en juli 2022 was het aantal aardbevingen voor korte tijd gedaald tot 8 aardbevingen per jaar. In de 18-jaar periode van midden 2004 tot midden 2022 is het aantal aardbevingen per jaar steeds hoger geweest (Figuur 4-1).



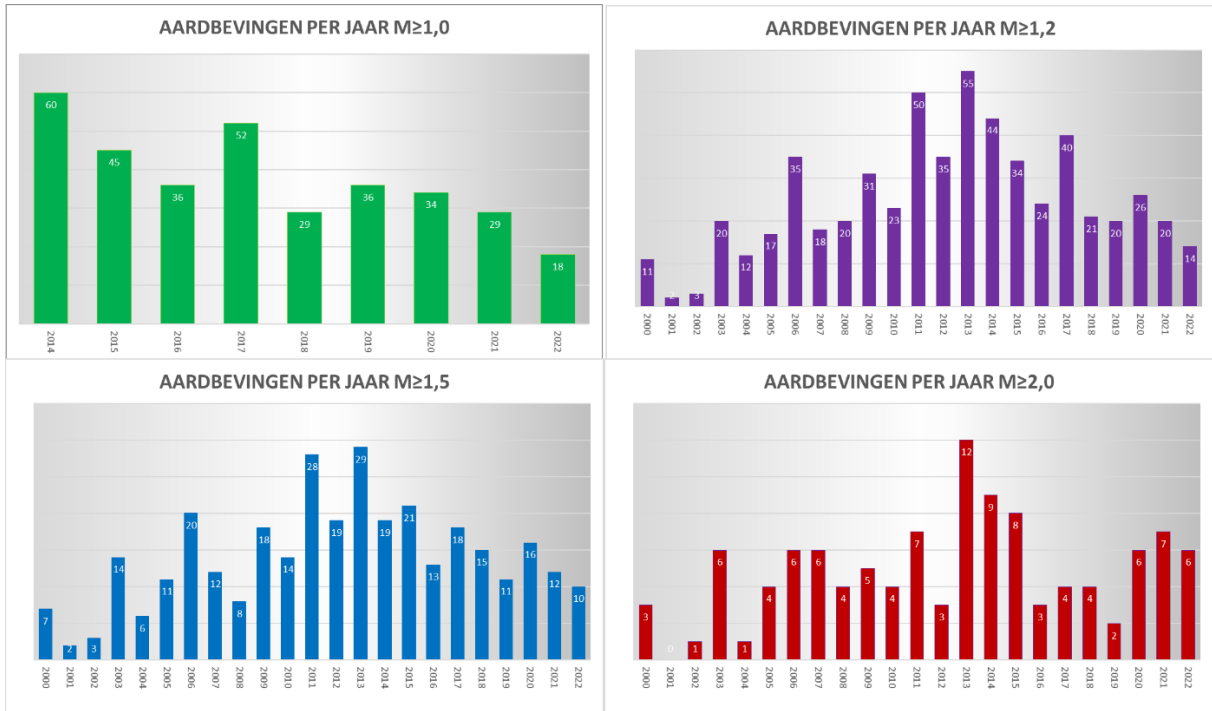
Figuur 4-1: Aantal aardbevingen berekend per jaar zoals aangegeven in Mijnbouwregeling artikel 1.3a.5. Dit betreft de aardbevingen met een kracht van $M_L \geq 1,2$ in de voorgaande 6 maanden omgerekend naar jaarbasis.

Het aantal aardbevingen per maand onderverdeeld in vijf magnitudeklassen is opgenomen in Tabel 4-1. In de voorgaande periode (1 november 2021 tot 1 mei 2022) zijn er 7 aardbevingen geregistreerd met een magnitude $M_L \geq 1,2$. In de huidige periode (1 mei 2022 tot november 2022) zijn er 11 aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,2$ geregistreerd.

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 |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|--------|
| Nov-21 | 3 | 0 | 1 | 0 | 1 | 5 |
| Dec-21 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| Jan-22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Feb-22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mar-22 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Apr-22 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| Mei-22 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Jun-22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Jul-22 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Aug-22 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| Sep-22 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 4 |
| Oct-22 | 2 | 3 | 0 | 1 | 1 | 7 |
| Tot nov-apr | 5 | 2 | 2 | 1 | 2 | 12 |
| Tot mei-nov | 4 | 4 | 3 | 2 | 2 | 15 |
| Totaal | 9 | 6 | 5 | 3 | 4 | 27 |

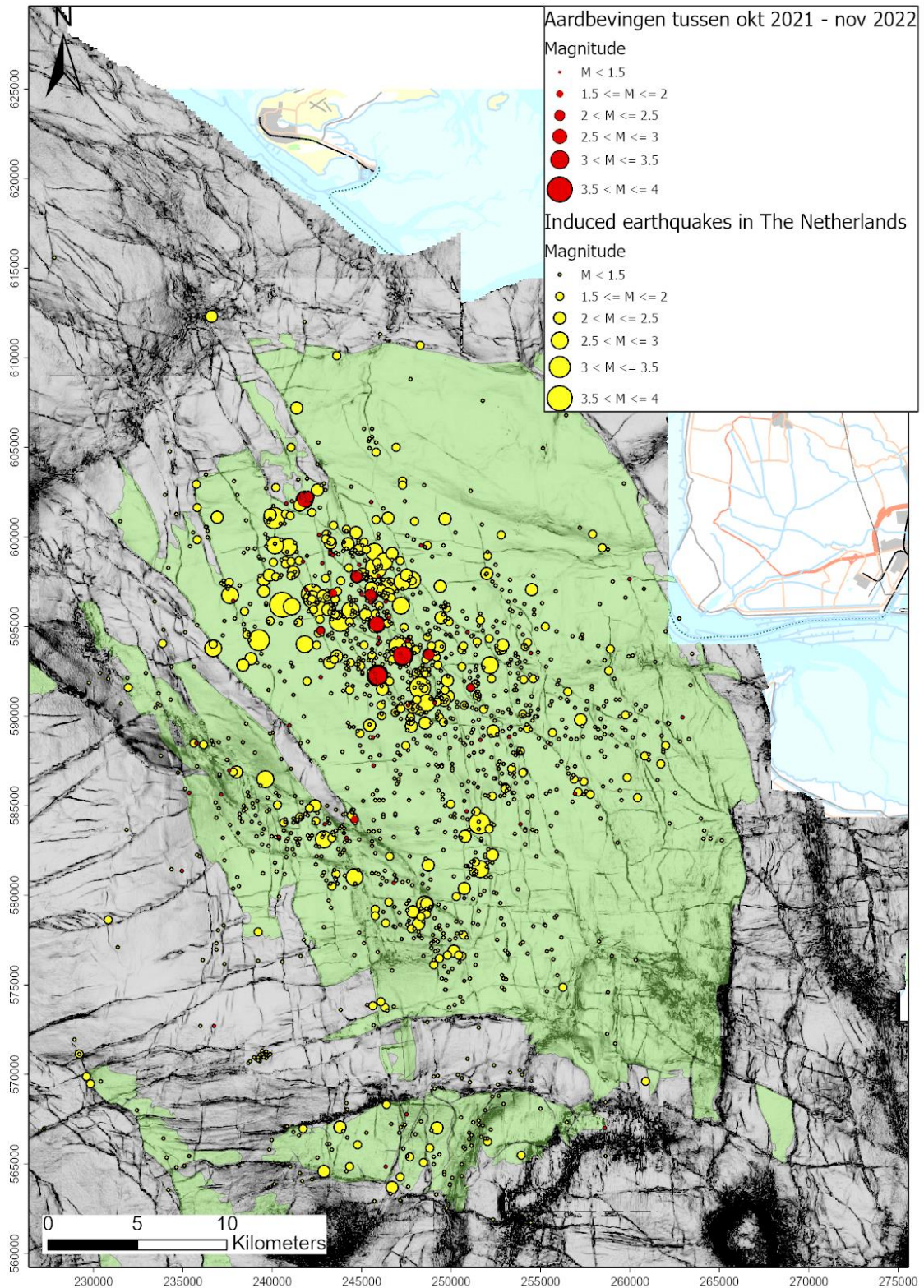
Figuur 4-2 laat de ontwikkeling van het aantal aardbevingen per jaar zien voor vier verschillende magnitude-klassen. Het panel linksboven (groene kleur) laat het jaarlijks aantal aardbevingen zien voor $M_L \geq 1,0$ (waarbij opgemerkt moet worden dat 2022 over de periode tot november weergegeven is 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 geplotted 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 $M_L \geq 2,0$.



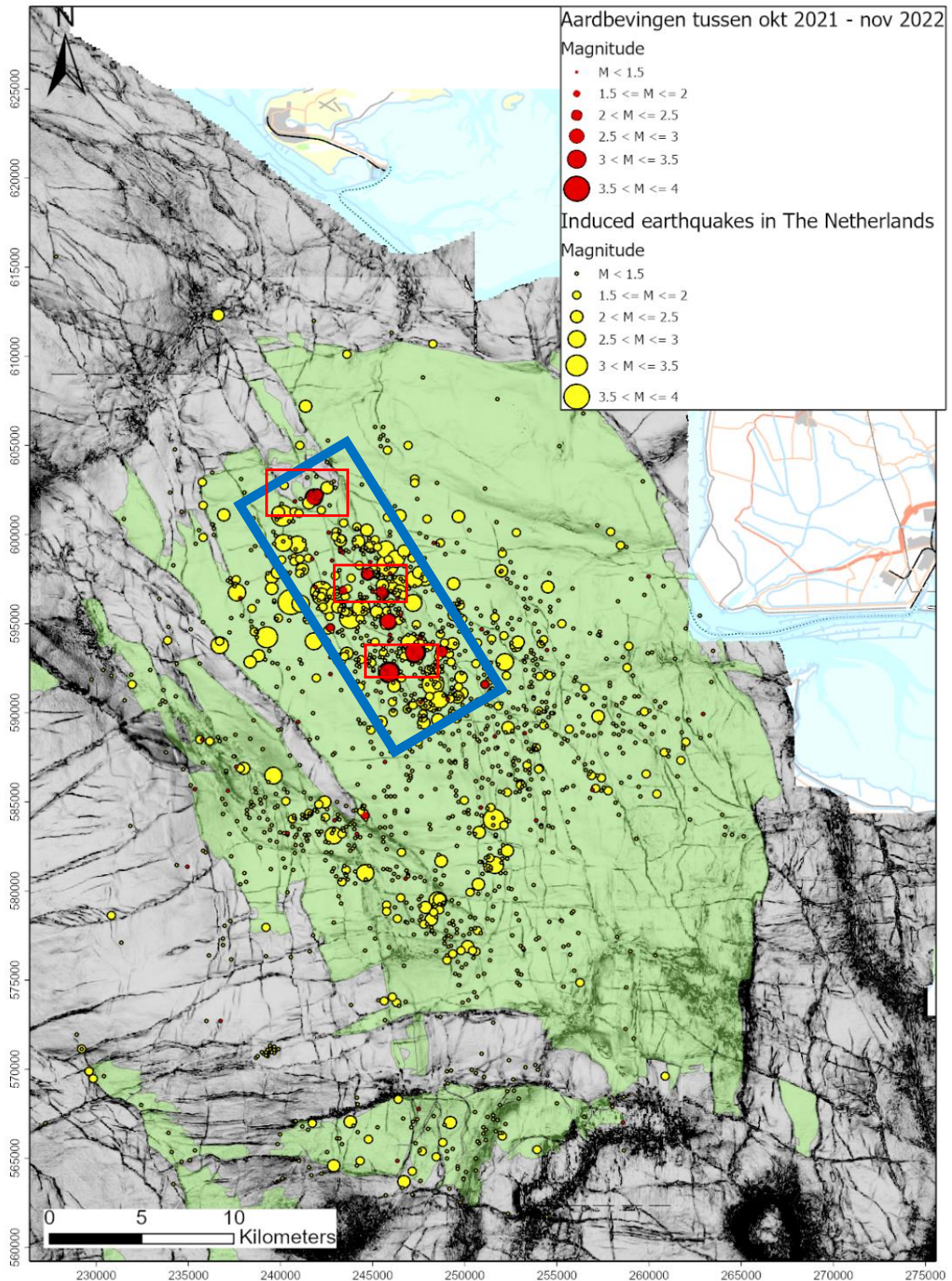
Figuur 4-2: Aantal aardbevingen per jaar voor vier verschillende magnitude-klassen. Het aantal aardbevingen in 2022 is aangegeven voor de periode tot mei 2022.

4.2 Distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld

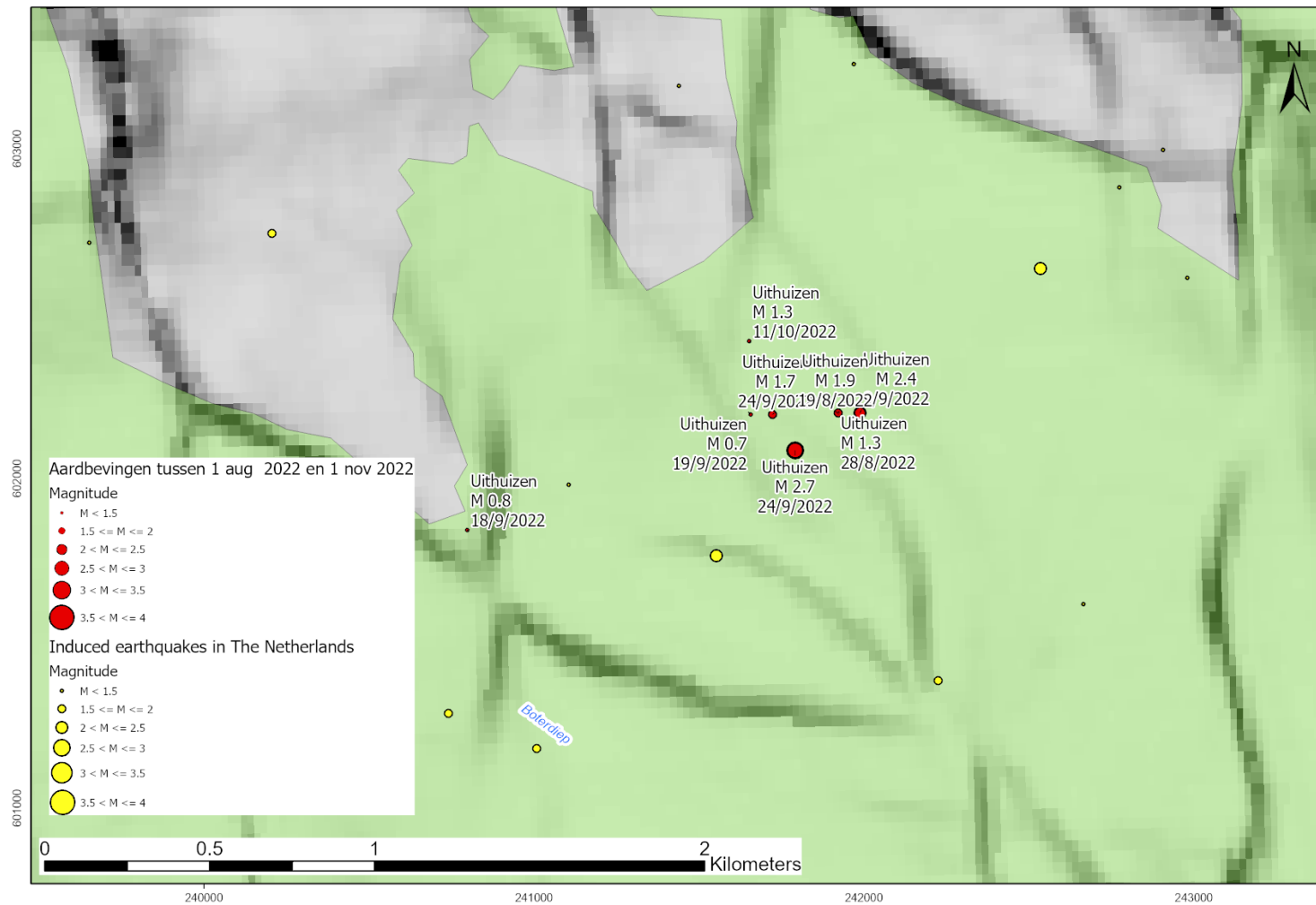
De distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld is getoond op de kaart in Figuur 4-3. De locaties van de in de periode van 1 oktober 2021 tot 1 november 2022 (13 maanden) geregistreerde aardbevingen in rood vallen in een kleiner gebied ten noordwesten van Wirdum. Deze aardbevingen zijn vooral in drie gebieden; de zwerm in oktober 2021 bij Zeerijp, de zwerm bij Uithuizen van augustus tot oktober 2022 and de zwerm bij Wirdum/Garrelswear in oktober 2022. De aardbevingen van 1993 tot 1 oktober 2021 zijn aangegeven in geel. Duidelijk is te zien dat het gebied waar de aardbevingen optreden krimpt. De meeste aardbevingen treden op in het gebied dat zich van Wirdum naar het Noordwesten uitstrekt. Het gebied is ongeveer 100 km² groot en is daarmee ongeveer 10% van het totale oppervlak van het Groningen gasveld.



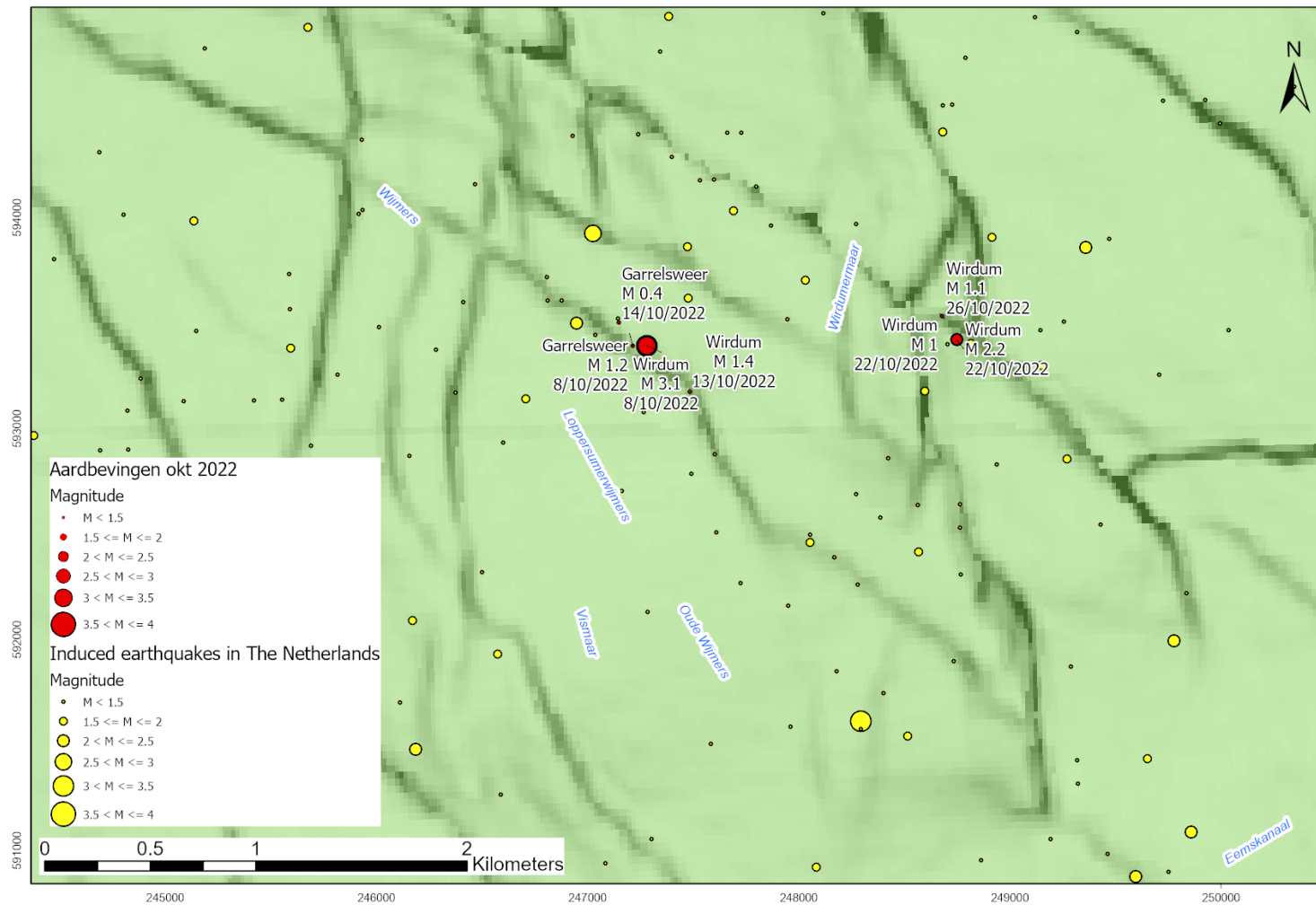
Figuur 4-3: Kaart van de diepe ondergrond met daarop in groen het Groningen-gasveld en de omliggende gasvelden. Met rode stippen zijn de in de periode oktober 2021 tot november 2022 geregistreerde aardbevingen aangegeven. Alle andere aardbevingen (vóór 1 oktober 2021) zijn aangegeven met gele cirkels. De grootte van een cirkel is maat voor de magnitude van de aardbeving.



Figuur 4-4: Als figuur 4.3. De blauw rechthoek geeft het gebied aan waar sinds oktober 2021, na de zwerm van aardbevingen bij Zeerijp, bijna alle aardbevingen zijn opgetreden. De rode rechthoeken geven de gebieden van de Uithuizen, Zeerijp en Wirdum/Garrelsweer aardbevingen zwerms aan. In de volgende drie kaarten (figuren 4.5, 4.6 en 4.7) zijn deze drie gebieden uitvergroot.

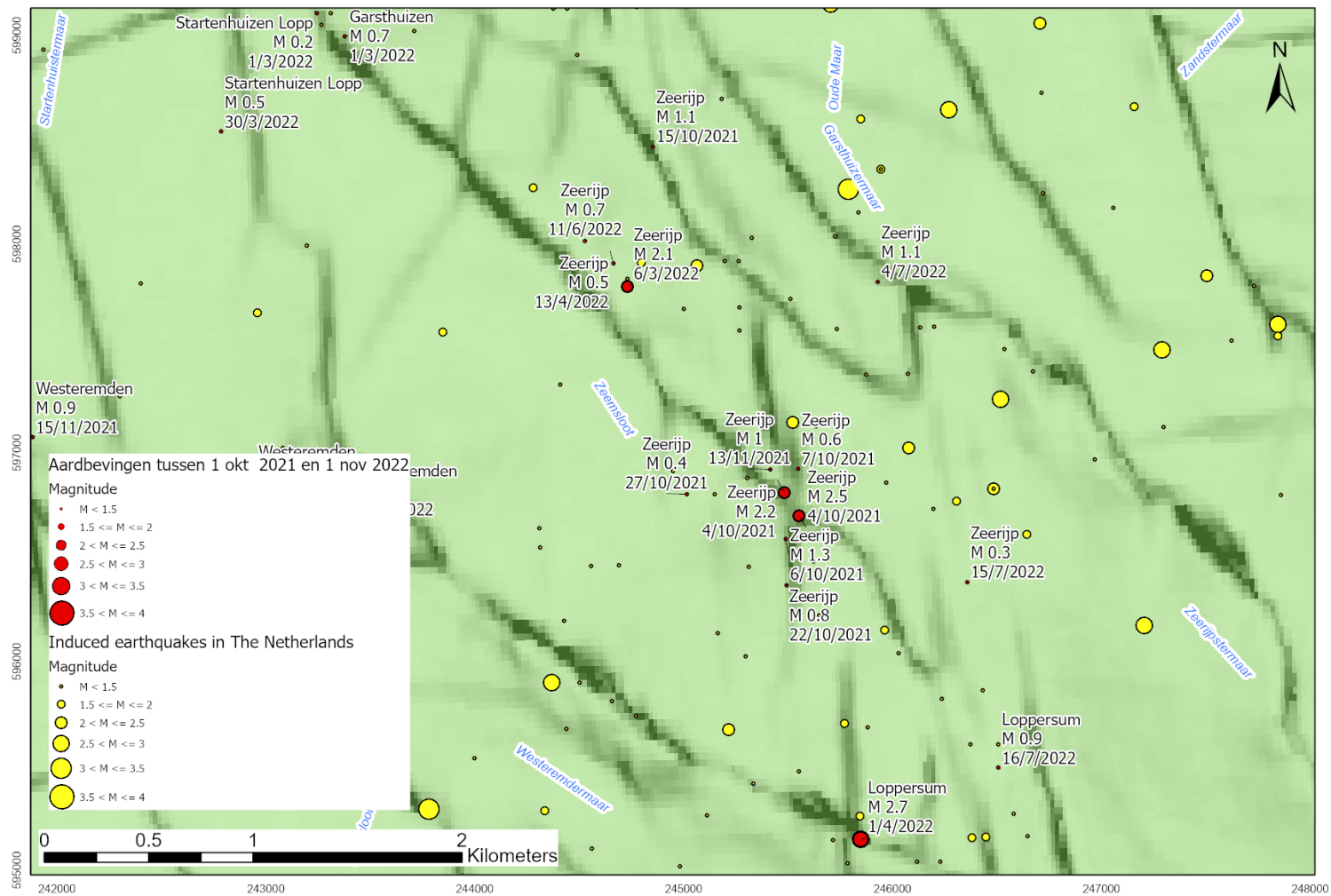


Figuur 4-5: Kaart van het in figuur 4.4 als rood kader aangegeven gebied bij Uithuizen waar van augustus tot oktober 2022 een zwerm aardbevingen is geregistreerd.

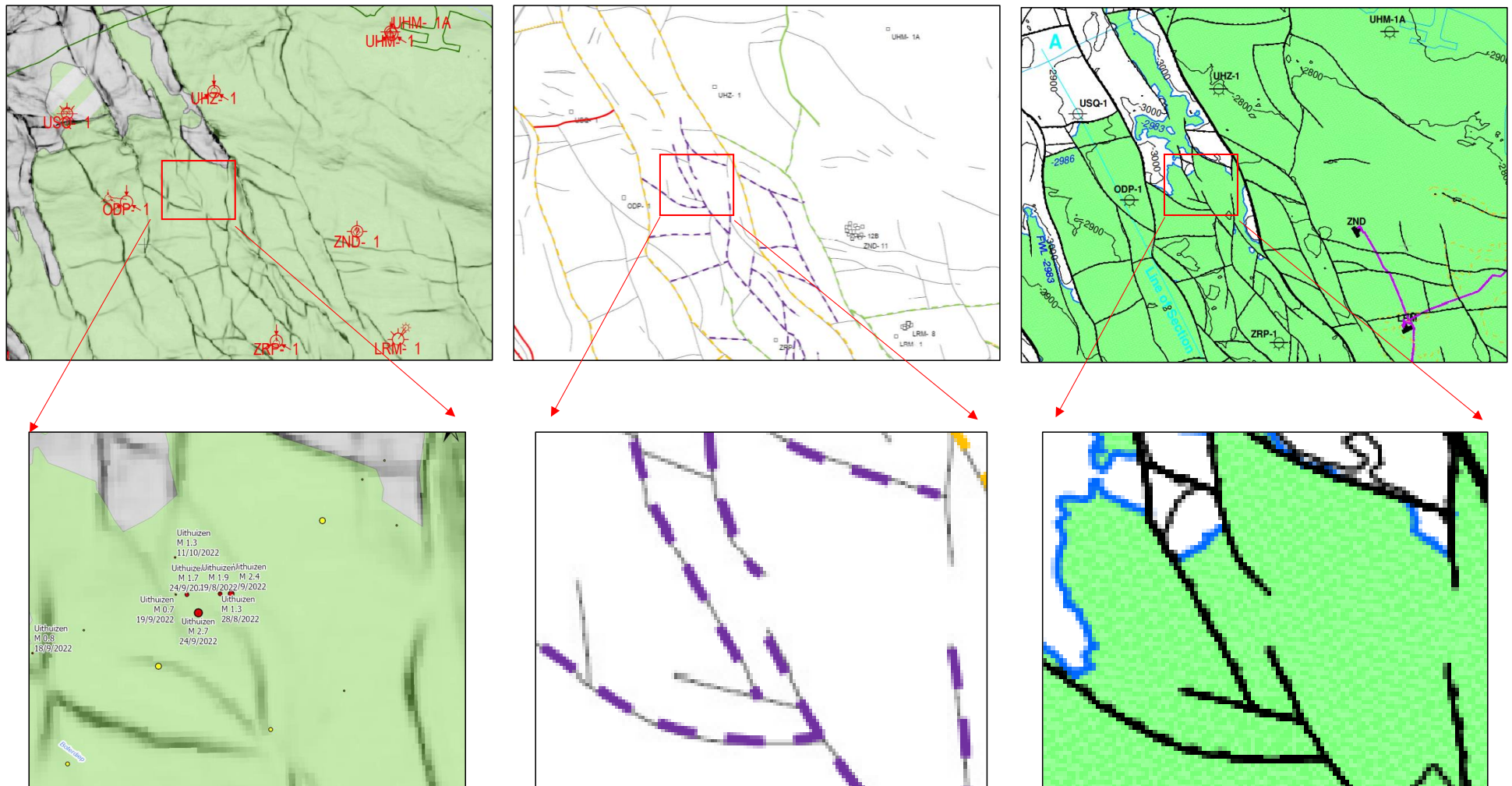


Figuur 4-6: Kaart van het in figuur 4.4 als rood kader aangegeven gebied bij Wirdum en Garrelsweer waar in oktober 2022 een zwerm aardbevingen is geregistreerd.

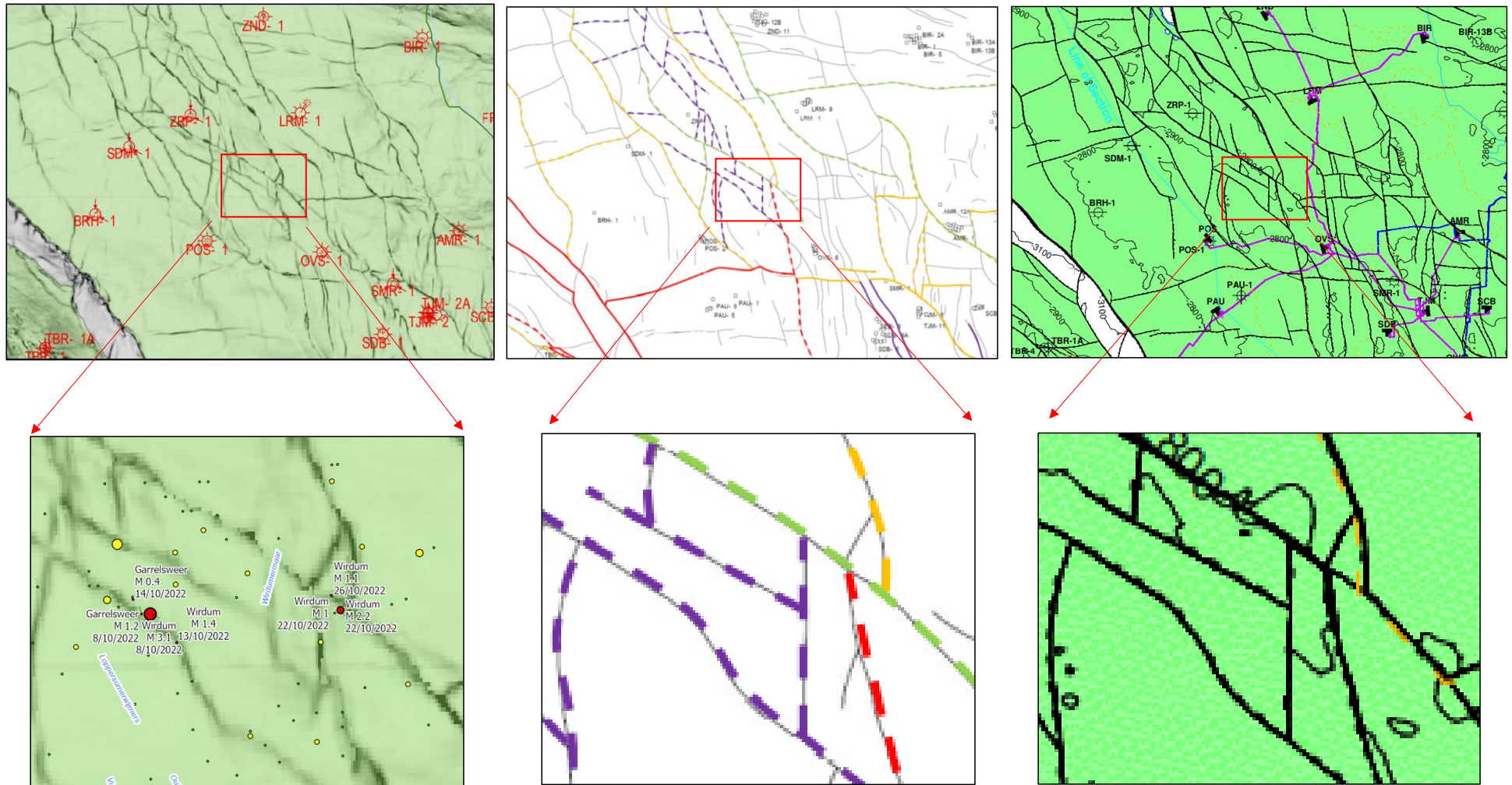
RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2022



Figuur 4-7: Kaart van het in figuur 4.4 als rood kader aangegeven gebied bij Zeerijp waar in oktober 2021 een zwerm aardbevingen is geregistreerd.



Figuur 4-8: Gedetailerde breuken-kaarten van het gebied rond Uithuizen. Links de semblance kaart (deze is ook gebruikt als achtergrond in figuren 4.3 tot 4.7), midden de kaart met de door de geoloog geïnterpreteerde breuken en rechts de breuken in het model van de ondergrond (Petrel).



Figuur 4-9: Gedetailerde breuken-kaarten van het gebied rond Wirdum / Garrelsweer. Links de semblance kaart (deze is ook gebruikt als achtergrond in figuren 4.3 tot 4.7), midden de kaart met de door de geoloog geïnterpreteerde breuken en rechts de breuken in het model van de ondergrond (Petrel).

In Figuur 4-8 en Figuur 4-9 zijn 3 verschillende breukenkaarten opgenomen. De semblance kaart (links) is gebaseerd op een enkele seismische reflector die overeenkomt met een geologische gesteentelaag. Wanneer de diepte van de reflector over een korte afstand sterk verandert wordt dit als een grijze schaduw aangegeven. Dit is het geval als een breuk in de gesteentelaag aanwezig is. De semblance kaart geeft dus een eerste indicatie van waar breuken aangetroffen kunnen worden. De geoloog karteert daarna de breuken in verticale doorsnedes van de 3D seismische data waarin ook de bewegingen langs de breuken te zien zijn. vervolgens wordt een kaart (midden) van gemaakt door deze breuken in achter elkaar liggende verticale doorsnedes te vervolgen. Soms wordt een vereenvoudigde versie van het breukenpatroon in het 3D model van de diepe ondergrond opgenomen. Dat kan nodig zijn om op efficiënte manier berekeningen te kunnen doen.

De meeste aardbevingen in de afgelopen tijd hadden een epicentrum in de in Figuur 4-4 aangegeven strook die van Wirdum en Garrelsweer zich naar het noordwesten uitstrekt en waren onderdeel van drie zwermen van aardbevingen die plaats vonden in drie kleine gebieden binnen deze strook. Deze strook van ongeveer 100 km² ligt binnen het gebied waar de reservoirdruk daalt als gevolg van de drukvereffening. Het gebied waarbinnen de aardbevingen optreden stemt daarmee overeen met de voorspelling van de reservoir- en seismische modellen. Deze drie zwermen waren bij Zeerijp (oktober 2021), Uithuizen (augustus tot oktober 2022) en Wirdum/Garrelsweer (oktober 2022).

Voor de aardbevingen bij Uithuizen (Figuur 4-5) vonden voornamelijk plaats in een klein gebied van ongeveer 500 meter oost-west bij 200 meter noord-zuid rond de grootste van deze aardbevingen die een kracht had van $M_L=2,7$ en plaatsvond op 24 september 2022. Van de acht aardbevingen bij Uithuizen waren er zes binnen dit kleine gebied. Opvallend is dat afgezien van de grootste aardbeving ($M_L=2,7$) de andere vijf aardbevingen van deze zes aardbevingen op eenzelfde oost-west lopende breuk hebben plaatsgevonden. Deze breuk ligt ongeveer 100 m ten noorden van het epicentrum van de grootste aardbeving met magnitude $M_L = 2,7$. De speciale rapportage over deze aardbevingen bevat meer informatie over de locaties en het bron mechanisme van deze aardbevingen.

Tabel 4-2: Aardbevingen zwerm bij Uithuizen. Een c in de laatste column geeft aan dat de aardbeving in het kleine gebied plaats vond. De 5 aardbevingen op dezelfde oost-west breuk zijn met een asterix aangegeven.

| Plaats | Datum | Time hh:mm:ss UTC | Magnitude | Diepte km | Easting | Northing | Zwerm |
|-----------|-----------|-------------------------|-----------|--------------|---------|----------|-------|
| Uithuizen | 19-Aug-22 | 05:49:14 | 1.9 | 3 | 241922 | 602198 | c* |
| Uithuizen | 28-Aug-22 | 03:18:59 | 1.3 | 3 | 241922 | 602198 | c* |
| Uithuizen | 09-Sep-22 | 00:39:11 | 2.3 | 3 | 241988 | 602199 | c* |
| Uithuizen | 18-Sep-22 | 04:10:00 | 0.8 | 3 | 240797 | 601844 | - |
| Uithuizen | 19-Sep-22 | 08:03:56 | 0.7 | 3 | 241656 | 602193 | c* |
| Uithuizen | 24-Sep-22 | 10:20:38 | 2.7 | 3 | 241791 | 602084 | c |
| Uithuizen | 24-Sep-22 | 11:37:29 | 1.7 | 3 | 241722 | 602194 | c* |
| Uithuizen | 11-Oct-22 | 15:36:39 | 1.3 | 3 | 241652 | 602416 | - |

De aardbevingen bij Wirdum / Garrelsweer (Figuur 4-6) bestaan uit twee grotere aardbevingen met magnitude $M_L=3,2$ op 8 oktober 2022 en $M_L=2,2$ op 22 oktober 2022. Deze grotere aardbevingen vonden plaats op twee parallelle breuken die van noordwest naar zuidoost lopen en ongeveer een kilometer van elkaar gescheiden zijn. Na elk van deze grotere aardbevingen zijn in de daaropvolgende

week respectievelijk 3 en 2 kleinere aardbevingen geregistreerd in de nabijheid van de grotere aardbeving op dezelfde breuk.

Tabel 4-3: Aardbevingen zwerm bij Wirdum / Garrelsweer. Een 1 of 2 in de laatste kolom geeft aan of de aardbeving tot de eerste of tweede sub-zwerm behoort.

| Plaats | Datum | Time hh:mm:ss UTC | Magnitude | Diepte Km | Easting | Northing | Zwerm |
|-------------|-----------|-------------------------|-----------|--------------|---------|----------|-------|
| Wirdum | 08-Oct-22 | 02:17:17 | 3.1 | 3 | 247281 | 593393 | 1 |
| Garrelsweer | 08-Oct-22 | 05:35:36 | 1.2 | 3 | 247214 | 593391 | 1 |
| Wirdum | 13-Oct-22 | 16:08:48 | 1.4 | 3 | 247485 | 593174 | 1 |
| Garrelsweer | 14-Oct-22 | 22:02:28 | 0.4 | 3 | 247146 | 593501 | 1 |
| Wirdum | 22-Oct-22 | 10:14:04 | 2.2 | 3 | 248747 | 593421 | 2 |
| Wirdum | 22-Oct-22 | 14:32:51 | 1 | 3 | 248678 | 593531 | 2 |
| Wirdum | 26-Oct-22 | 07:16:28 | 1.1 | 3 | 248678 | 593531 | 2 |

De trend dat aardbevingen meer in zwermen voorkomen geeft aan dat de herverdeling van mechanische spanningen na een aardbeving op de omliggend breuken belangrijk is in verhouding tot de toename in de mechanische spanning op deze breuken veroorzaakt door de daling van de reservoirdruk. Ook is het mogelijk dat door het lagere niveau van seismiciteit en de daardoor langere periode tussen aardbevingen het eenvoudiger is de zwermen op te merken. In de studie naar de ontwikkeling van de seismiciteit in de periode van drukvereffening zal hier meer aandacht aan worden gegeven.

4.3 Statistische analyse naar de ontwikkeling aardbevingen

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 4-10); één onder de aanname dat de events quasi-Poisson verdeeld zijn (Figuur 4-11). 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 ongecorrleerd zijn. Deze aanname is echter niet geheel correct omdat naschokken plaatsvinden.

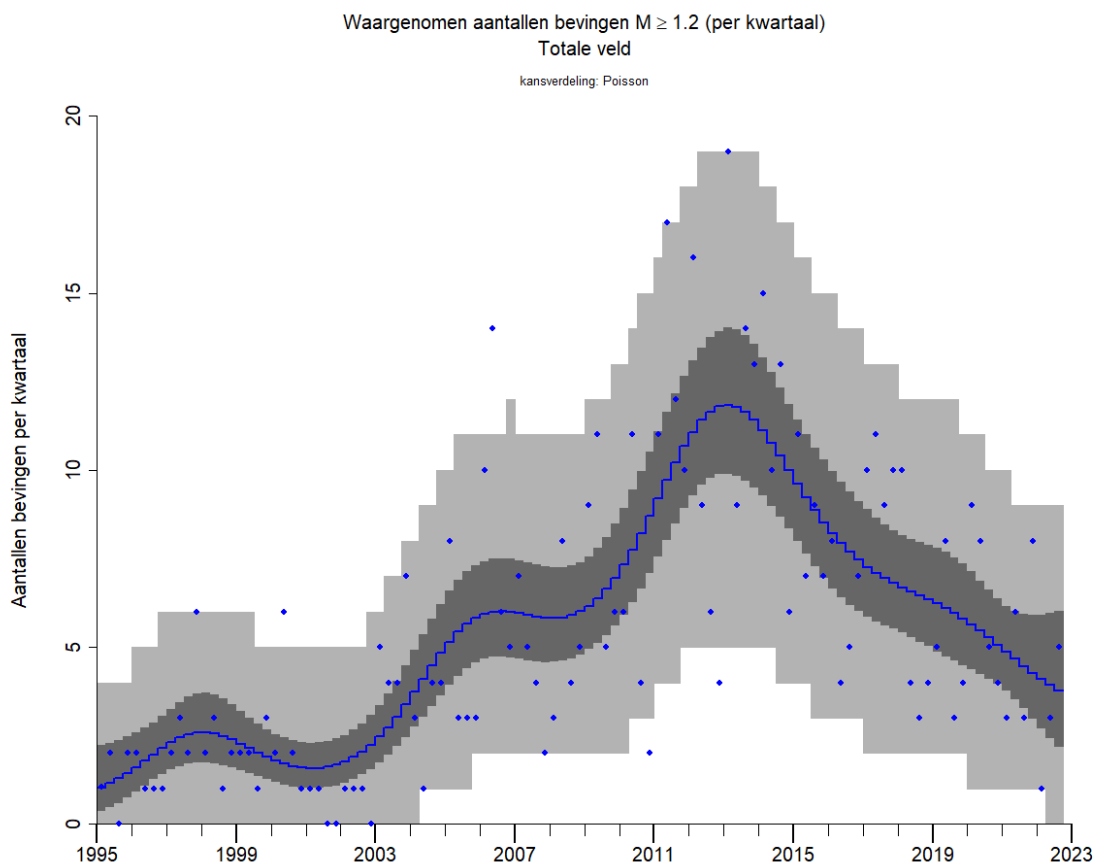
De quasi-Poisson verdeling kan gebruikt worden om een hogere mate (ten opzichte van de Poisson verdeling) van variabiliteit in aantallen aardbevingen tussen kwartalen te beschrijven. Deze hogere variabiliteit kan ontstaan door een bepaalde mate van correlatie tussen de aardbevingen door naschokken. De statistische analyse gebaseerd op de quasi-Poisson verdeling is meer robuust en resulteert in grotere onzekerheidsmarges.

Beide plots bevatten de volgende informatie:

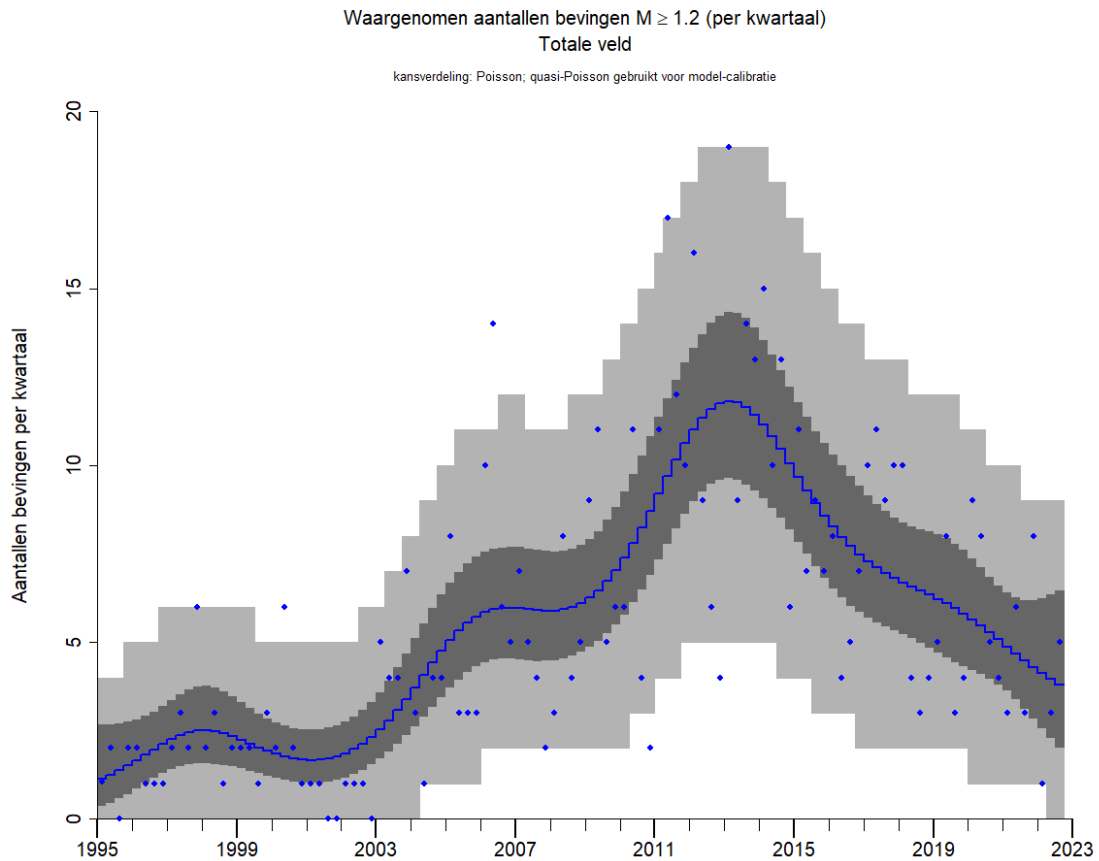
- Blauwe stippen voor het aantal seismische events per kwartaal
- Een blauwe lijn die de trendlijn van het aantal te verwachten seismische events weergeeft
- Een donkergrijze band; het 95% betrouwbaarheidsinterval van de trendlijn.
- Een lichtgrijze band; het 95% voorspellingsinterval van het aantal 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 2022. Merk op dat de onzekerheidsbanden in 2021 – 2022 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 4-10: Trend en betrouwbaarheidsinterval van het aantal aardbevingen per kwartaal, bij Poisson verdeelde seismische events.



Figuur 4-11: Trend en betrouwbaarheidsinterval van het aantal aardbevingen per kwartaal, bij quasi-Poisson verdeelde seismische events.

Verband productie en seismiciteit per cluster en productielocatie

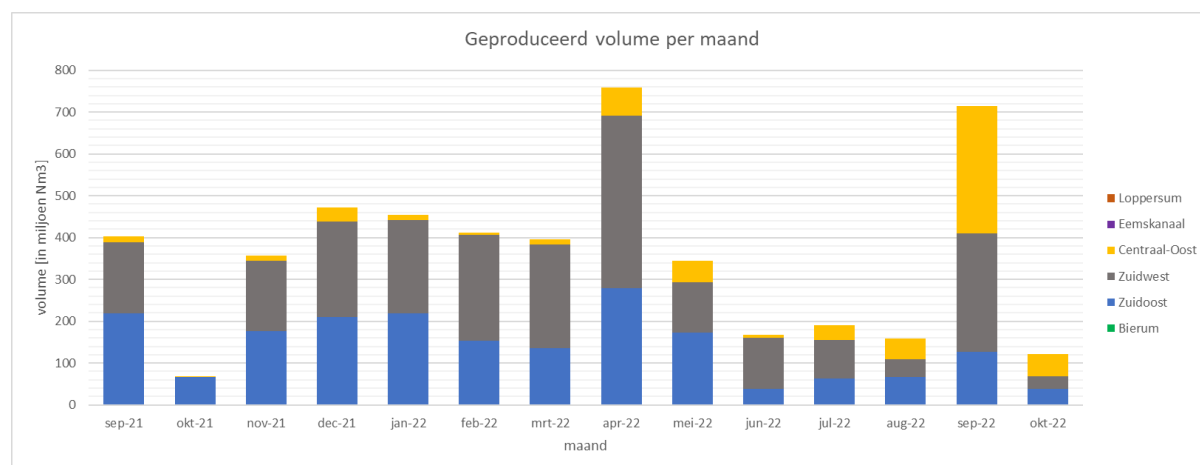
In welke mate de over een korte periode waargenomen variaties in de seismische monitoringsparameters een gevolg zijn van de wijze van opereren, van de lagere geproduceerde volumes, of van de natuurlijke variabiliteit in seismiciteit is niet direct vast te stellen. Er zijn modellen opgesteld waarmee seismische dreiging en risico kunnen worden geanalyseerd. Meer informatie hierover kan gevonden worden in verschillende papers en rapporten die van de NAM-site te downloaden zijn (Ref. 10 tot 17).

Tabel 4-4: Overzicht productielocaties per cluster volgens Mijnbouwregeling artikel 1.3a.1.

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

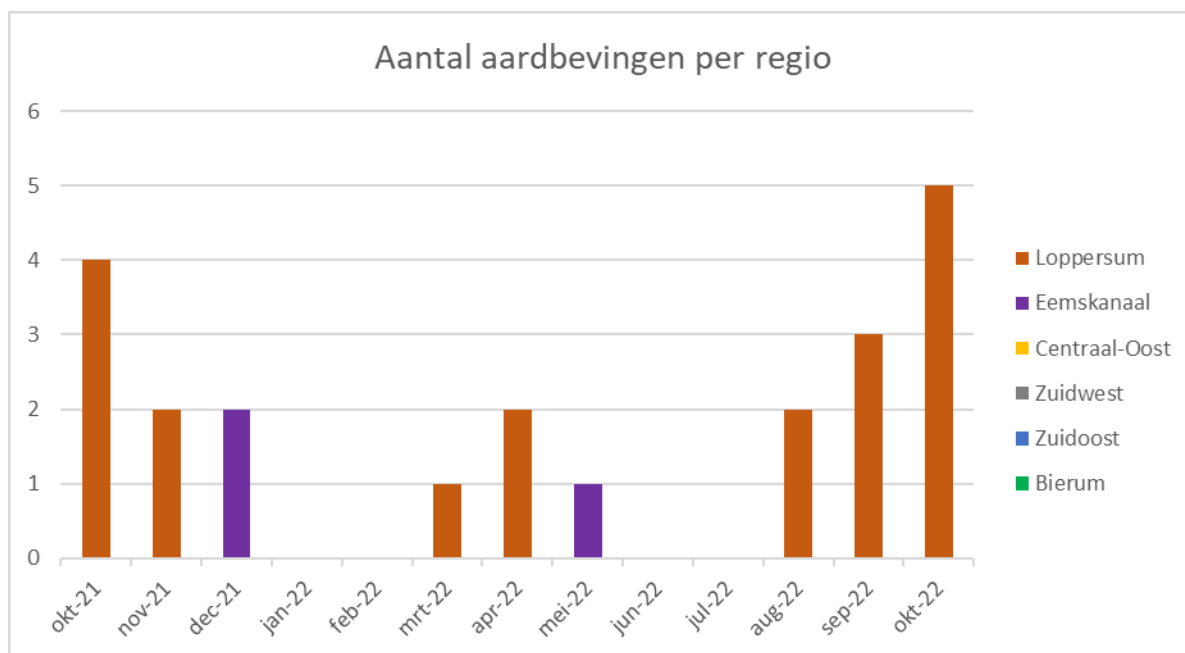
Het Groningen-gasveld is onderverdeeld in een aantal clusters zoals beschreven in de Mijnbouwregeling artikel 1.3a.1. In Tabel 4-4 is de verdeling van productielocaties per cluster opgenomen.

In Figuur 4-12 is de productie per cluster van productielocaties opgenomen over het voorgaande periode van 12 maanden (1 september 2021 tot en met 31 oktober 2022). De productie uit het Loppersum cluster is per februari 2018 beëindigd. Sindsdien zijn ook locaties Bierum, Eemskanaal, Siddeburen en Tjuchem uit productie genomen.



Figuur 4-12: Geproduceerd volume per maand per cluster.

In Figuur 4-13 is het aantal aardbevingen van magnitude $M_L \geq 1,2$ geplot per cluster. Hoewel er geen gas wordt geproduceerd uit het Loppersum cluster is het aantal geregistreerde aardbevingen in dit cluster het hoogst. Bijna alle aardbevingen tijdens de rapportage periode komen uit dit gebied.

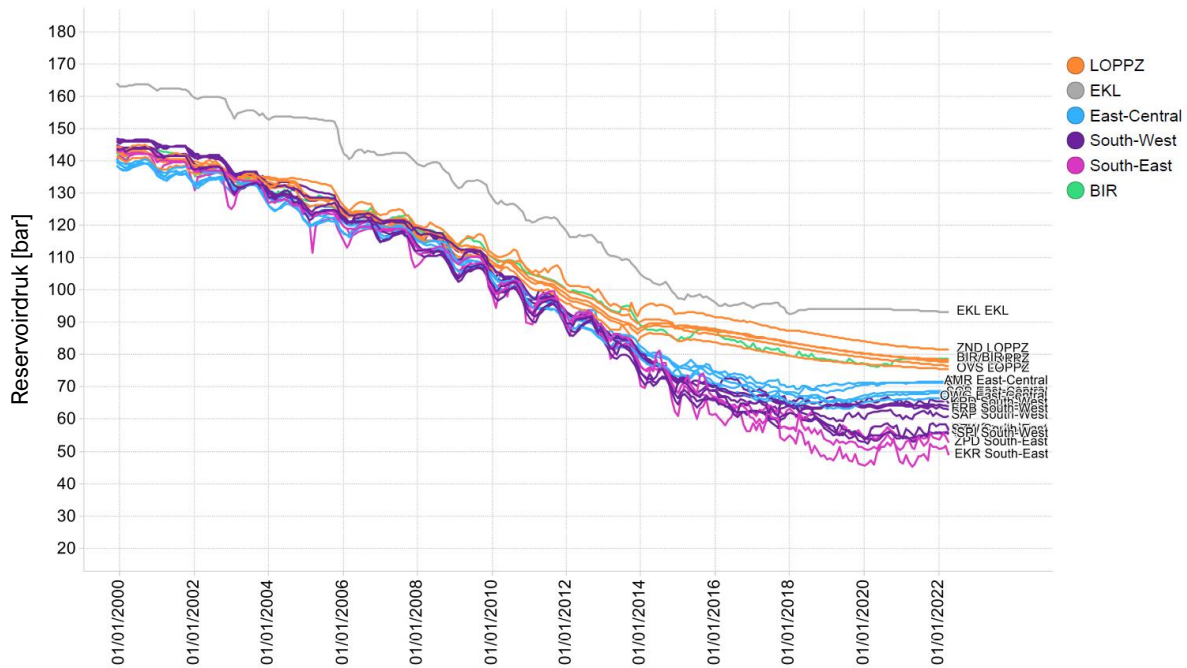


Figuur 4-13: Aantal aardbevingen per cluster.

De relatief hoge seismiciteit rond het Loppersumcluster in vergelijking tot de productie eruit is het direct gevolg van de hogere drukdaling in dit gebied als gevolg van de drukvereffening met de andere delen van het gas-reservoir vergeleken met de drukdaling door productie in de andere clusters.

In Figuur 4-14 is de reservoirdruk per cluster weergegeven. In dit figuur is duidelijk zichtbaar dat de druk in het cluster van productielocaties rond Loppersum blijft dalen (oranje lijn), ook nadat de productie vanuit deze cluster is gestaakt in februari 2018. Deze daling van reservoirdruk in het cluster Loppersum is een gevolg van herverdeling van de reservoirdruk als gevolg van productie uit andere delen van het veld en de drukgradiënt over het veld die daardoor is ontstaan sinds het verminderen van de Loppersum productie in 2014. Deze daling van de reservoirdruk is de verklaring voor de toenemende maximale aardbevingsdichtheid in het cluster Loppersum.

Figuur 4-14 toont dat de reservoirdruk in het cluster Centraal-Oost (blauwe lijnen, elke productielocatie wordt weergegeven door een aparte lijn) na 2018 stabiliseert en daarna zelfs licht toeneemt ondanks de gasproductie uit dit cluster. Ook deze stijging is een gevolg van de herverdeling van de reservoirdruk. Informatie over het verband tussen de seismiciteit, productievolumes en manier van opereren kan gevonden worden in de Hazard and Risk Analysis rapporten (Ref. 5, 6 en 7).



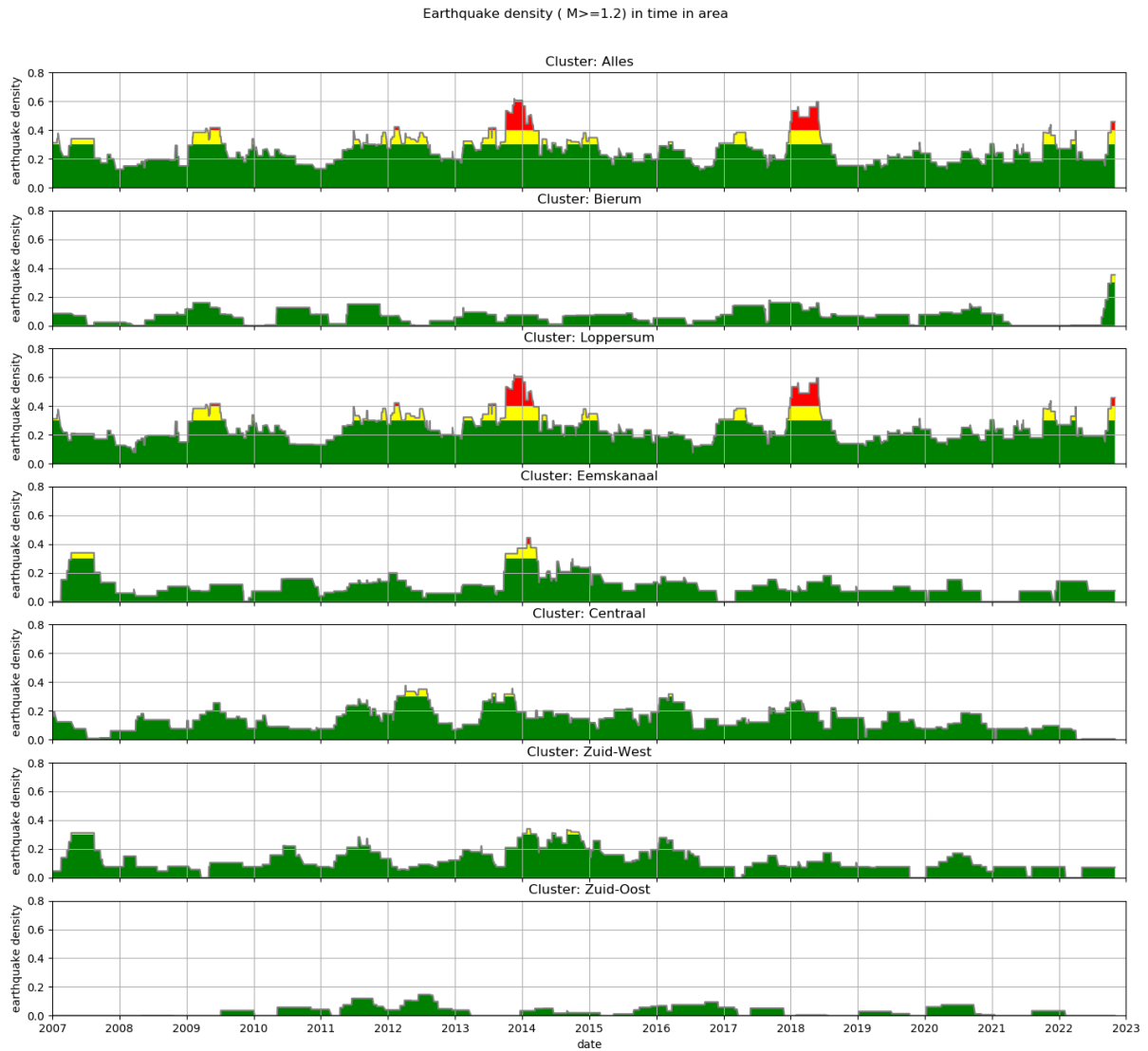
Figuur 4-14: Reservoir drukdaling in Groninger gasveld op basis van het gekalibreerde Groningen reservoirmodel. Merk op dat de druk in het cluster Loppersum (LOPPZ) ook bij verminderde en stilgelegde productie nog daalt.

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 4-15. 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 2012 tot 2014 en de periode 2018 over het veld en in het gebied Loppersum in het bijzonder. In alle gebieden, met uitzondering van het gebied rondom Loppersum, is de maximale aardbevingsdichtheid sindsdien gedaald. Omdat de aardbevingen bij Wirdum en Garrelsweer in het Loppersum-gebied, maar minder dan 5 km van de grens van het Bierum cluster plaats vonden is door de manier waarop de aardbevingsdichtheid wordt berekend ook in het Bierum cluster de aardbevingsdichtheid hoger. In het Loppersum gebied is de maximale aardbevingsdichtheid relatief hoog gebleven. 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 begin 2014 sterk verlagen 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.



Figuur 4-15: 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 km^2 per jaar. De achtergrondkleur geeft het niveau van de seismiciteit weer, groen: lage activiteit, geel: bovengemiddelde activiteit en rood: hoge activiteit.

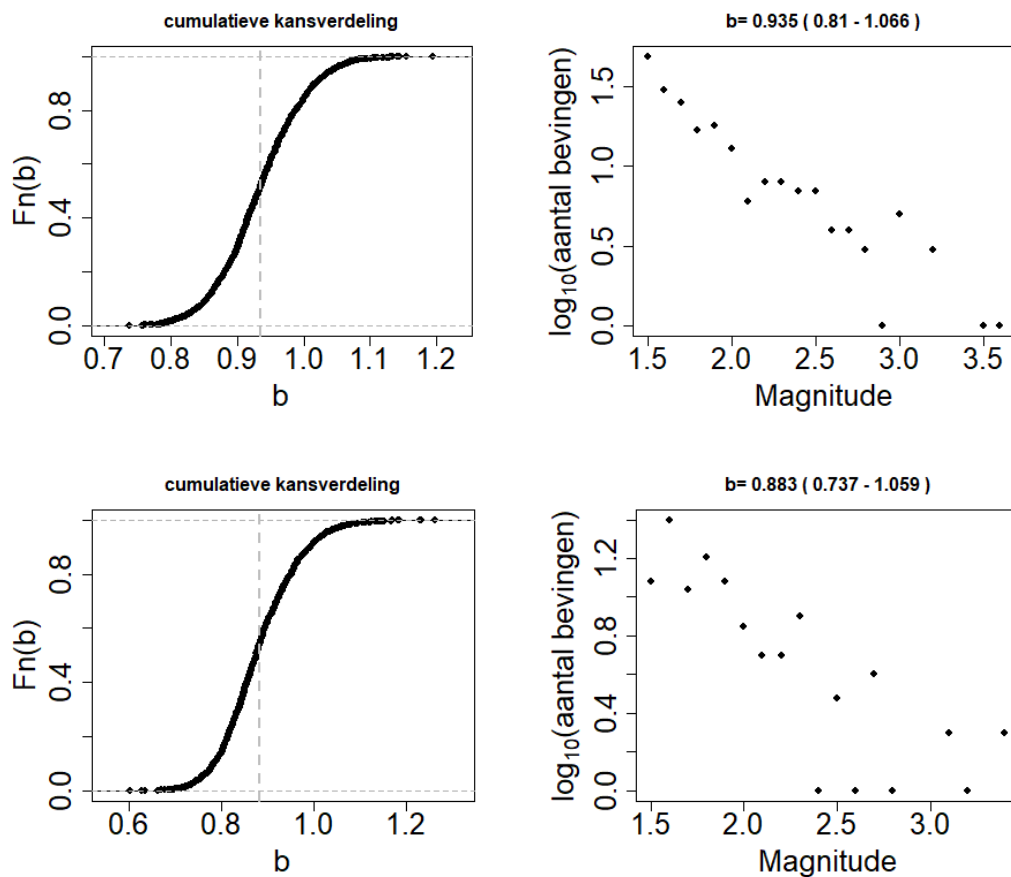
Verhouding tussen grote en kleine aardbevingen

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

Figuur 4-16 geeft twee zogenaamde Gutenberg-Richter plots voor het veld weer. De b-waarde is een maat voor de frequentierelatie tussen aardbevingen met verschillende magnitudes. De b-waarden zijn gegeven in Tabel 4-5. Zichtbaar is dat over het hele veld de b-waarde over de periode vanaf 2015 vrijwel gelijk is aan die in de periode ervoor. Door het relatief lage aantal aardbevingen is het betrouwbaarheidsinterval groot en daardoor is niet te zeggen of er een trend is of slechts een statistische variatie zonder onderliggende fysische grondslag.

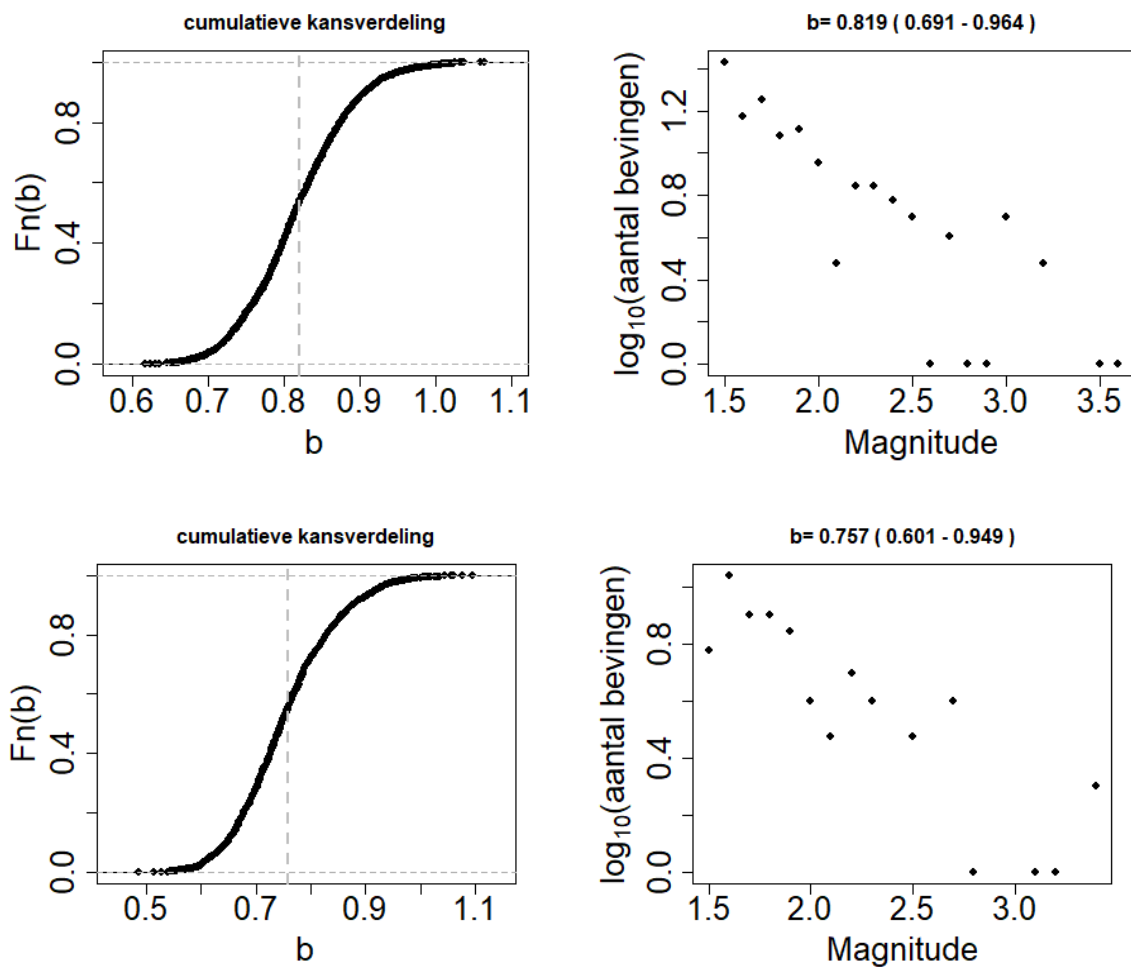
Tabel 4-5: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen over het hele Groninger veld.

| Totale gebied Groningen | | |
|---|-----------|-----------|
| Percentiel van betrouwbaarheidsinterval | 2000-2014 | 2015-2022 |
| P _{2.5%} | 0,81 | 0,74 |
| P _{50%} | 0,94 | 0,88 |
| P _{97.5%} | 1,07 | 1,06 |



Figuur 4-16: Gutenberg Richter plots voor het hele Groningen-gasveld. Bovenste panelen: Periode 2000 tot 2015. Onderste panelen: periode januari 2015 tot en met oktober 2022

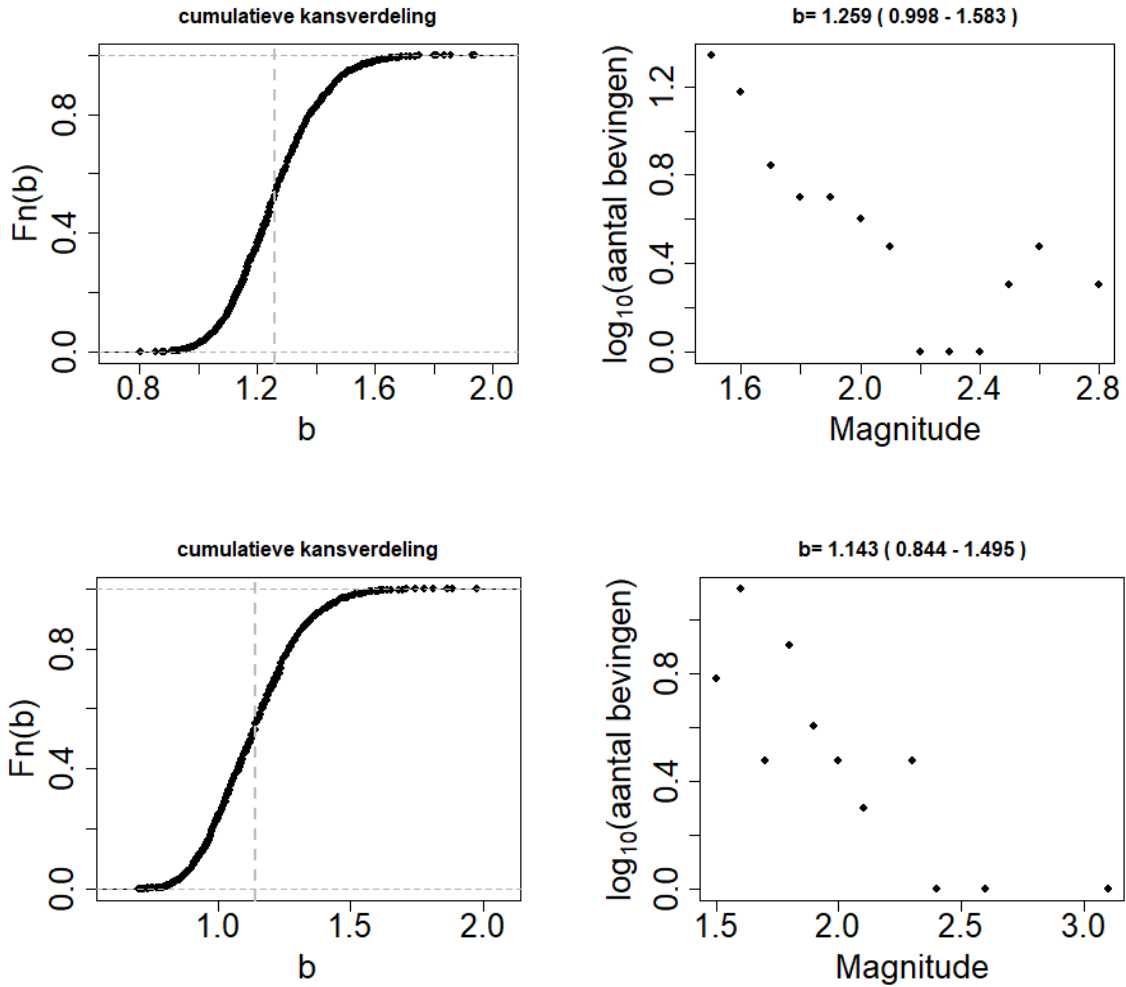
Figuur 4-17 en Figuur 4-18 geven twee Gutenberg-Richter plots voor respectievelijk de omgeving van Loppersum en het gehele veld exclusief de omgeving van Loppersum weer. In Table 4-6 en Table 4-7 zijn de b-waarden met hun betrouwbaarheidsintervallen weergegeven. Over beide beschouwde periodes zijn de b-waarden lager in Loppersum dan in de rest van het Groningen-gasveld. In Loppersum is het aantal aardbevingen met grotere magnitude dus relatief groot ten opzichte van het aantal aardbevingen met lagere magnitude. De b-waarde lijkt vrijwel gelijk te zijn gebleven in de recente periode; de $P_{50\%}$ b-waarde van de periode vanaf 2015 ligt binnen het $P_{2.5\%}$ en $P_{97.5\%}$ betrouwbaarheidsinterval van de periode ervoor. In de rapportage van november 2021 (Ref. 18) is een hypothesetest gedaan waaruit bleek dat de variatie in de geobserveerde waarde waarschijnlijk het resultaat is van natuurlijke variabiliteit.



Figuur 4-17: Gutenberg Richter plots voor het cluster Noordwest (het gebied rond Loppersum). Bovenste panelen: Periode januari 2000 tot en met december 2014. Onderste panelen: periode januari 2015 tot en met oktober 2022.

Tabel 4-6: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen in het gebied rond Loppersum.

| Gebied Loppersum | | |
|---|-----------|-----------|
| Percentiel van betrouwbaarheidsinterval | 2000-2014 | 2015-2021 |
| P _{2.5%} | 0,70 | 0,60 |
| P _{50%} | 0,82 | 0,76 |
| P _{97.5%} | 0,96 | 0,95 |



Figuur 4-18: Gutenberg Richter plots voor het gehele veld exclusief de cluster Noordwest (het gebied rond Loppersum). Bovenste panelen: Periode januari 2000 tot en met december 2014. Onderste panelen: periode januari 2015 tot en met oktober 2022.

Tabel 4-7: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen over het gehele veld exclusief de cluster Loppersum.

| Gehele veld exclusief Loppersum | | |
|---|-----------|-----------|
| Percentiel van betrouwbaarheidsinterval | 2000-2014 | 2015-2021 |
| P _{2.5%} | 1,00 | 0,84 |
| P _{50%} | 1,26 | 1,14 |
| P _{97.5%} | 1,59 | 1,50 |

In Tabel 4-8 zijn voor de eerdergenoemde gebieden de b-waarden opgenomen. De b-waarde voor het hele veld lijkt voor de periode vanaf 2015 licht te zijn toegenomen ten opzichte van de periode ervoor. Dus het aantal aardbevingen met lagere magnitudes is relatief gezien groter dan aardbevingen met hogere magnitudes.

Tabel 4-8: Overzicht van de b-waarde (P_{50%}) voor het gehele veld, het gebied Loppersum en het gehele veld exclusief het gebied Loppersum.

| | b-waarde (P_{50%}) 2000-2014 | b-waarde (P_{50%}) 2015-2021 |
|---------------------------------|---|---|
| Gehele Groningen-gasveld | 0,94 | 0,88 |
| Gebied Loppersum | 0,82 | 0,76 |
| Gehele veld exclusief Loppersum | 1,26 | 1,14 |

Anomale PGA/PGV bij een bepaalde aardbevings-magnitude

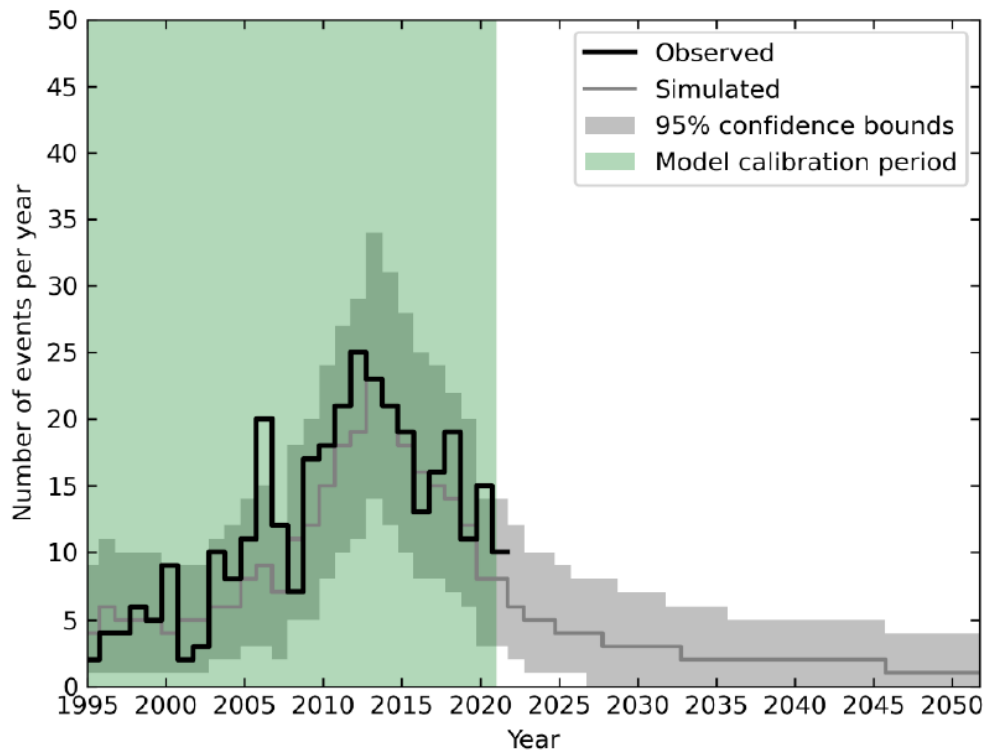
De krachtigste aardbeving in de huidige monitoringsperiode van 1 mei 2022 tot 1 november 2022 had een magnitude van $M_L = 3,1$.

De grootste component van PGA die is gemeten voor deze aardbeving is 0,06 g en de grootste waarde van een PGV component, die over het algemeen wordt beschouwd als een betere indicator van het schadepotentieel van de beweging, die is gemeten is 2,46 cm/s. Dit is lager dan de grootste waarde van de Groningse grondbewegingsdatabase (de 3,46 cm/s geregistreerd bij de grotere $M_L = 3,6$ Huizinge-aardbeving in 2012), maar nu de vijfde grootste waarde die in Groningen is geregistreerd.

Een belangrijke observatie is dat, hoewel de bewegingsamplitudes die zijn geregistreerd in de $M_L = 3,1$ Wirdum-aardbeving binnen het voorspellingsbereik van de empirische PGV GMPE's en de SA_{AVG} -voorspellingen van de V6 en V7 GMM liggen, ze gemiddeld 10 - 15% groter dan de mediane voorspellingen van de "ground motion" modellen en lijken ook groter te zijn dan de gemiddelde amplitudes die zijn geregistreerd tijdens eerdere gebeurtenissen van vergelijkbare magnitude.

4.4 Vergelijking met het SDRA-model

In maart 2022 heeft TNO een nieuwe seismische risico-inschatting gepubliceerd, de SDRA-2022 (Ref. 19). Deze inschatting is geïkht aan de aardbevingencatalogus van alle aardbevingen in Groningen met een magnitude van $M_L \geq 1,5$. Figuur 4-19 uit dit rapport toont de opgetreden en voorspelde aardbevingen.



Figuur 3.1 Verwachte seismische activiteit en variatie per gasjaar. Op de horizontale as staat het kalenderjaar (bereik 1 januari 1995 tot 1 oktober 2051). Op de verticale as staat het aantal bevingen met een magnitude gelijk aan of hoger dan 1,5 opgeteld per gasjaar. De zwarte lijn geeft het aantal observaties in het verleden weer tot 1 januari 2022. De donkergrijze lijn geeft het verwachte aantal bevingen in de toekomst weer. De lichtgrijze band om de grijze lijn is de onzekerheidsband. Het groene vlak geeft aan dat het model gekalibreerd is op de periode tot 1 januari 2021.

Figuur 4-19: Figuur 3.1 overgenomen uit de SDRA-2022 door TNO.

Deze figuur 4-19 laat zien dat voor gasjaar 2021-2022 zes aardbevingen verwacht werden. Dit voorspelde aantal aardbevingen is onzeker. Het voorspelde aantal zal liggen binnen een band rond het verwachte aantal aardbevingen tussen 2 en 12. In gasjaar 2021-2022 dat loopt van tot 1 oktober 2021 tot en met 30 september 2022 zijn er 13 aardbevingen opgetreden met een magnitude $ML \geq 1,5$ opgetreden. Dit is een aardbeving boven de onzekerheidsband.

5 Referenties

1. Advies over de actualisatie van de trendparameters en de bijbehorende grenswaarden in artikel 1.3a van de Mijnbouwregeling, SodM, 16 juni 2020.
2. Special Report on the Garrelsweer Earthquake of 16th November 2021 with Magnitude ML = 3.2, Jan van Elk and Jeroen Uilenreef, November 2021.
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. 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.
6. Induced Seismicity in Groningen - Assessment of Hazard, Building Damage and Risk. Jan van Elk, Dirk Doornhof. 2017.
7. Hazard and Risk Assessment Groningen GTS - Raming 2020. Van Elk, Jan, et al. 2020.
8. Special Report on the Zeerijp Earthquake Swarm starting 4th October 2021, Jan van Elk and Jeroen Uilenreef, November 2021.
9. Supplement to special Report on the Zeerijp Earthquake Swarm starting 4th October 2021, Jan van Elk and Jeroen Uilenreef, November 2021. Advies over de actualisatie van de trendparameters en de bijbehorende grenswaarden in artikel 1.3a van de Mijnbouwregeling, SodM, 16 juni 2020.
10. 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.
11. Updated empirical GMPEs for PGV from Groningen earthquakes. Bommer, J. J., P. J. Stafford, and M. Ntinalexis (2019). 10 March 2019
12. 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.
13. 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.
14. Study and Data Acquisition Plan induced seismicity Groningen - Executive Summary, Jan van Elk en Jeroen Uilenreef, September 2020.
15. Study and Data Acquisition Plan induced seismicity Groningen – Part 1 Introduction and Credibility Process, Jan van Elk en Jeroen Uilenreef, September 2020.
16. Study and Data Acquisition Plan induced seismicity Groningen – Part 2 Subsurface Discovery Process, Jan van Elk en Jeroen Uilenreef, September 2020.
17. Study and Data Acquisition Plan induced seismicity Groningen – Part 3 Impact at Surface Discovery Process, Jan van Elk en Jeroen Uilenreef, September 2020.
18. Periodieke rapportages seismiciteit Groningen, November 2021, Jan van Elk en Jeroen Uilenreef. November 2021.
19. Publieke Seismische Dreigings- en Risicoanalyse Groningen gasveld 2022 TNO2022 R10517, TNO, 25 maart 2022.

Appendix A – Overzicht periodieke rapportages en speciale rapportages seismiciteit Groningen

| Title | Date |
|--|-------------|
| Rapportage recente aardbevingen Wirdum en Garsthuizen 2016/2017 | Mar 2017 |
| Ground Motions from the M_L 2.6 Slochteren Earthquake of 27 th May 2017 | June 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 nd May 2019 | May 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 nd May 2020 | May 2020 |
| Special Report on the Loppersum $M_L=2.7$ earthquake of 14 th June 2020 | August 2020 |
| Special Report on the Zeerijp Earthquake Swarm starting 4 th October 2021 | Oct 2021 |
| Supplement to special Report on the Zeerijp Earthquake Swarm starting 4 th 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 | Oct 2022 |
| Special Report on the Wirdum Earthquake 8 th October 2022 with Magnitude $M_L=3.1$ | Oct 2022 |

Tabel B.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 | July 2018 |
| Rapportage Seismiciteit Groningen - November 2018 | Nov 2018 |
| Rapportage Seismiciteit Groningen - Mei 2019 | May 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 | June 2021 |
| Rapportage Seismiciteit Groningen - November 2021 | Nov 2021 |
| Rapportage Seismiciteit Groningen - Mei 2022 | June 2022 |

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

Appendix B – Aardbevingscatalogus 1 november 2021 tot 1 november 2022 (door KNMI)

| Plaats | Datum | Time hh:mm:ss | Magnitude | Diepte km | Easting | Northing | Veld |
|----------------|-----------|---------------|-----------|-----------|---------|----------|-----------|
| Froombosch | 04-Nov-21 | 04:43:44 | 0,3 | 3 | 246790 | 580693 | Groningen |
| Scharmer | 05-Nov-21 | 22:38:26 | 1,1 | 3 | 244137 | 583203 | Groningen |
| Westeremden | 08-Nov-21 | 01:52:16 | 1,7 | 3 | 242724 | 594754 | Groningen |
| Oldenzijl | 10-Nov-21 | 04:24:27 | 0,9 | 3 | 245520 | 601931 | Groningen |
| Zeerijp | 13-Nov-21 | 09:09:44 | 1,0 | 3 | 245415 | 596919 | Groningen |
| Ten Post | 13-Nov-21 | 16:12:23 | 0,9 | 3 | 245635 | 588797 | Groningen |
| Westeremden | 15-Nov-21 | 01:22:05 | 0,9 | 3 | 241882 | 597076 | Groningen |
| Garrelsweer | 15-Nov-21 | 12:41:52 | 0,6 | 3 | 247601 | 590616 | Groningen |
| Garrelsweer | 16-Nov-21 | 00:46:48 | 3,2 | 3 | 245903 | 592253 | Groningen |
| Winneweer | 16-Nov-21 | 01:34:16 | 0,6 | 3 | 245768 | 592362 | Groningen |
| Garrelsweer | 16-Nov-21 | 02:57:44 | 0,3 | 3 | 245774 | 592028 | Groningen |
| Garrelsweer | 16-Nov-21 | 04:38:04 | 0,2 | 3 | 245707 | 592027 | Groningen |
| Winneweer | 17-Nov-21 | 18:25:28 | 0,9 | 3 | 245632 | 592471 | Groningen |
| Garrelsweer | 24-Nov-21 | 15:11:12 | 0,5 | 3 | 249066 | 590755 | Groningen |
| Garrelsweer | 28-Nov-21 | 10:05:20 | 0,6 | 3 | 245976 | 591920 | Groningen |
| Groningen | 30-Nov-21 | 03:22:51 | 0,3 | 3 | 240396 | 583247 | Groningen |
| Appingedam | 30-Nov-21 | 08:42:09 | 1,1 | 3 | 254477 | 593536 | Groningen |
| Toornwerd | 01-Dec-21 | 00:24:20 | 0,7 | 3 | 237830 | 596448 | Groningen |
| Noordwolde | 01-Dec-21 | 19:16:34 | 1,1 | 3 | 235765 | 588510 | Groningen |
| Steendam | 01-Dec-21 | 20:26:08 | 0,9 | 3 | 251642 | 588692 | Groningen |
| Borgsweer | 05-Dec-21 | 02:38:05 | 0,2 | 3 | 262958 | 589935 | Groningen |
| Groningen | 09-Dec-21 | 12:18:28 | 1,2 | 3 | 235345 | 585720 | Groningen |
| Groningen | 18-Dec-21 | 02:33:25 | 1,3 | 3 | 237149 | 585639 | Groningen |
| Oosterwijtwerd | 25-Dec-21 | 22:31:12 | 0,6 | 3 | 250921 | 594688 | Groningen |

RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2022

| Plaats | Datum | Time hh:mm:ss | Magnitude | Diepte km | Easting | Northing | Veld |
|------------------------------|-----------|---------------|-----------|-----------|---------|----------|-----------|
| Eems-Dollard (nabij Farmsum) | 27-Dec-21 | 07:55:47 | 1,0 | 3 | 259987 | 597662 | Groningen |
| Stedum | 28-Dec-21 | 19:19:04 | 0,2 | 3 | 242704 | 592193 | Groningen |
| Wagenborgen | 01-Jan-22 | 23:17:27 | 0,5 | 3 | 256911 | 585683 | Groningen |
| Loppersum | 24-Jan-22 | 00:27:26 | 0,6 | 3 | 245936 | 594035 | Groningen |
| Siddeburen | 26-Jan-22 | 03:51:37 | 0,3 | 3 | 253875 | 583950 | Groningen |
| Startenhuizen Lopp | 01-Mar-22 | 17:32:08 | 0,2 | 3 | 243243 | 599105 | Groningen |
| Garsthuizen | 01-Mar-22 | 19:40:23 | 0,7 | 3 | 243378 | 598996 | Groningen |
| Zeerijp | 06-Mar-22 | 13:18:30 | 2,1 | 3 | 244732 | 597797 | Groningen |
| Startenhuizen Lopp | 30-Mar-22 | 19:18:41 | 0,5 | 3 | 242787 | 598540 | Groningen |
| Loppersum | 01-Apr-22 | 17:11:08 | 2,7 | 3 | 245848 | 595146 | Groningen |
| Zeerijp | 13-Apr-22 | 07:19:27 | 0,5 | 3 | 244664 | 597907 | Groningen |
| Zuidwolde | 17-Apr-22 | 06:33:42 | 0,6 | 3 | 237593 | 586982 | Groningen |
| Westeremden | 17-Apr-22 | 13:27:46 | 1,6 | 3 | 243417 | 596882 | Groningen |
| Westeremden | 17-Apr-22 | 13:44:19 | 0,7 | 3 | 243286 | 596768 | Groningen |
| Lageland | 05-May-22 | 09:05:00 | 1,8 | 3 | 244586 | 584213 | Groningen |
| Wirdum | 09-May-22 | 03:38:52 | 0,4 | 3 | 247599 | 594178 | Groningen |
| Loppersum | 10-May-22 | 04:15:08 | 0,6 | 3 | 245929 | 594369 | Groningen |
| Groningen | 29-May-22 | 04:41:43 | 0,6 | 3 | 234950 | 581372 | Groningen |
| Wirdum | 08-Jun-22 | 21:04:24 | 0,2 | 3 | 247533 | 594177 | Groningen |
| Eppenhuisen | 10-Jun-22 | 01:42:37 | 0,5 | 3 | 241720 | 598632 | Groningen |
| Zeerijp | 11-Jun-22 | 11:09:54 | 0,7 | 3 | 244528 | 598016 | Groningen |
| Harkstede | 16-Jun-22 | 20:17:31 | 0,9 | 3 | 242921 | 583960 | Groningen |
| Zeerijp | 04-Jul-22 | 18:19:30 | 1,1 | 3 | 245931 | 597820 | Groningen |
| Luddeweer | 13-Jul-22 | 16:52:27 | 0,4 | 3 | 245664 | 587239 | Groningen |
| Zeerijp | 15-Jul-22 | 18:31:22 | 0,3 | 3 | 246358 | 596380 | Groningen |
| Loppersum | 16-Jul-22 | 09:14:40 | 0,9 | 3 | 246508 | 595493 | Groningen |

RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2022

| Plaats | Datum | Time hh:mm:ss | Magnitude | Diepte km | Easting | Northing | Veld |
|--------------|-----------|---------------|-----------|-----------|---------|----------|-----------|
| Eelde | 25-Jul-22 | 02:33:25 | 0,5 | 3 | 236767 | 572721 | Groningen |
| Schildwolde | 09-Aug-22 | 03:50:08 | 0,1 | 3 | 250855 | 584668 | Groningen |
| Uithuizen | 19-Aug-22 | 05:49:14 | 1,9 | 3 | 241922 | 602198 | Groningen |
| Uithuizen | 28-Aug-22 | 03:18:59 | 1,3 | 3 | 241922 | 602198 | Groningen |
| Uithuizen | 09-Sep-22 | 00:39:11 | 2,3 | 3 | 241988 | 602199 | Groningen |
| Uithuizen | 18-Sep-22 | 04:10:00 | 0,8 | 3 | 240797 | 601844 | Groningen |
| Uithuizen | 19-Sep-22 | 08:03:56 | 0,7 | 3 | 241656 | 602193 | Groningen |
| 't Zandt | 19-Sep-22 | 19:38:40 | 0,8 | 3 | 248295 | 599535 | Groningen |
| Tjuchem | 22-Sep-22 | 04:07:39 | 1,1 | 3 | 253240 | 588835 | Groningen |
| Uithuizen | 24-Sep-22 | 10:20:38 | 2,7 | 3 | 241791 | 602084 | Groningen |
| Uithuizen | 24-Sep-22 | 11:37:29 | 1,7 | 3 | 241722 | 602194 | Groningen |
| Wirdum | 08-Oct-22 | 02:17:17 | 3,1 | 3 | 247281 | 593393 | Groningen |
| Garrelsw eer | 08-Oct-22 | 05:35:36 | 1,2 | 3 | 247214 | 593391 | Groningen |
| Uithuizen | 11-Oct-22 | 15:36:39 | 1,3 | 3 | 241652 | 602416 | Groningen |
| Wirdum | 13-Oct-22 | 16:08:48 | 1,4 | 3 | 247485 | 593174 | Groningen |
| Garrelsw eer | 14-Oct-22 | 22:02:28 | 0,4 | 3 | 247146 | 593501 | Groningen |
| Wirdum | 22-Oct-22 | 10:14:04 | 2,2 | 3 | 248747 | 593421 | Groningen |
| Wirdum | 22-Oct-22 | 14:32:51 | 1 | 3 | 248678 | 593531 | Groningen |
| Wirdum | 26-Oct-22 | 07:16:28 | 1,1 | 3 | 248678 | 593531 | Groningen |

Tabel A.1 Aardbevingen geregistreerd door het seismisch monitoring netwerk tussen 1 november 2021 en 1 november 2022.

Appendix C – Aardbevingscatalogus 1 november 2021 tot 1 november 2022 (Gebaseerd op FWI analyse door Shell)

| Event number | Date | Time | Name | Northing | Easting | Depth | Strike_1 | Dip_1 | Rake_1 | Strike_2 | Dip_2 | Rake_2 | KNMI magnitude |
|--------------|------------|----------------|-------------|----------|---------|-------|----------|-------|---------|----------|-------|---------|----------------|
| 39 | 4-10-2021 | 02:59:08.52500 | Zeerijp | 596750 | 245550 | 3000 | 137.91 | 24.93 | -79.07 | 306.16 | 68.43 | -94.93 | 2.50 |
| 40 | 4-10-2021 | 13:33:45.49500 | Appingedam | 591500 | 251150 | 2850 | 162.11 | 37.27 | -93.09 | 346.25 | 48.00 | -87.48 | 1.80 |
| 41 | 4-10-2021 | 20:47:42.91000 | Zeerijp | 596700 | 245550 | 3050 | 148.97 | 26.92 | -56.03 | 295.00 | 78.77 | -104.95 | 2.20 |
| 42 | 6-10-2021 | 18:57:56.72500 | Zeerijp | 596600 | 245450 | 2850 | 185.36 | 28.32 | -97.65 | 14.02 | 62.12 | -85.91 | 1.30 |
| 43 | 7-10-2021 | 11:53:20.26500 | Zeerijp | 596650 | 245550 | 3000 | 153.51 | 36.41 | -55.27 | 292.43 | 60.11 | -112.96 | .60 |
| 45 | 18-10-2021 | 16:56:55.14500 | Sint Annen | 589600 | 241100 | 2850 | 178.85 | 53.71 | -99.02 | 21.49 | 23.22 | -71.31 | 1.10 |
| 46 | 22-10-2021 | 21:11:20.64000 | Zeerijp | 596400 | 245550 | 2850 | 160.37 | 47.04 | -118.52 | 13.80 | 58.69 | -65.86 | .80 |
| 47 | 27-10-2021 | 00:27:59.91500 | Eppenhuizen | 600600 | 241950 | 3000 | 125.93 | 69.87 | -104.01 | 326.69 | 40.49 | -69.52 | .50 |
| 48 | 27-10-2021 | 09:13:39.36500 | Zeerijp | 596800 | 244900 | 2850 | 10.37 | 52.23 | -76.72 | 170.64 | 42.77 | -105.51 | .40 |
| 49 | 31-10-2021 | 21:36:42.75500 | Garrelsweer | 591900 | 245900 | 3050 | 178.04 | 47.59 | -103.94 | 12.15 | 66.03 | -78.78 | .70 |
| 51 | 5-11-2021 | 22:38:27.00000 | Scharmer | 583700 | 244250 | 2700 | 202.54 | 48.05 | -93.98 | 26.64 | 63.96 | -86.71 | 1.10 |
| 52 | 8-11-2021 | 01:52:16.37000 | Westeremden | 594850 | 242850 | 2850 | 130.45 | 26.85 | -125.69 | 351.10 | 63.02 | -72.80 | 1.70 |
| 54 | 13-11-2021 | 09:09:44.53500 | Zeerijp | 596750 | 245500 | 2950 | 128.25 | 39.91 | -90.39 | 308.95 | 32.40 | -89.53 | 1.00 |
| 55 | 13-11-2021 | 16:12:23.59500 | Ten Post | 588700 | 245250 | 2800 | 176.22 | 66.46 | -96.31 | 8.30 | 31.38 | -78.85 | .90 |
| 57 | 15-11-2021 | 12:41:52.26000 | Garrelsweer | 590450 | 247450 | 2950 | 317.30 | 44.13 | -104.89 | 163.25 | 34.83 | -71.75 | .60 |
| 58 | 16-11-2021 | 00:46:48.64000 | Garrelsweer | 592300 | 245700 | 3050 | 171.01 | 55.99 | -97.69 | 359.17 | 59.05 | -82.57 | 3.20 |
| 59 | 16-11-2021 | 01:34:16.30500 | Winneweer | 592250 | 245650 | 3000 | 335.89 | 51.77 | -109.53 | 184.42 | 44.37 | -67.94 | .60 |
| 60 | 16-11-2021 | 02:57:44.32500 | Garrelsweer | 592000 | 245750 | 2900 | 161.70 | 67.09 | -83.59 | 324.25 | 21.85 | -106.05 | .30 |
| 61 | 16-11-2021 | 04:38:04.80000 | Garrelsweer | 592050 | 245700 | 2900 | 179.56 | 64.94 | -74.06 | 335.08 | 40.38 | -112.58 | .20 |
| 62 | 17-11-2021 | 18:25:28.33500 | Winneweer | 592600 | 245600 | 2850 | 180.65 | 51.85 | -96.66 | 14.93 | 27.44 | -78.59 | .90 |
| 63 | 24-11-2021 | 15:11:12.10000 | Garrelsweer | 590750 | 249700 | 2850 | 145.34 | 67.86 | -91.39 | 327.46 | 38.95 | -87.95 | .50 |
| 64 | 28-11-2021 | 10:05:20.83500 | Garrelsweer | 592600 | 245950 | 2850 | 330.30 | 39.97 | -84.91 | 144.13 | 55.26 | -93.98 | .60 |
| 65 | 30-11-2021 | 03:22:51.61000 | Groningen | 583550 | 240800 | 2900 | 137.27 | 64.17 | -134.65 | 55.55 | 40.22 | -11.57 | .30 |
| 66 | 30-11-2021 | 08:42:09.53500 | Appingedam | 593600 | 254400 | 3000 | 116.54 | 15.89 | -114.42 | 323.75 | 61.05 | -82.57 | 1.10 |

RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2022

| Event number | Date | Time | Name | Northing | Easting | Depth | Strike_1 | Dip_1 | Rake_1 | Strike_2 | Dip_2 | Rake_2 | KNMI magnitude |
|--------------|------------|----------------|----------------|----------|---------|-------|----------|-------|---------|----------|-------|---------|----------------|
| 69 | 1-12-2021 | 20:26:08.52000 | Steendam | 588850 | 251600 | 2950 | 173.72 | 62.73 | -96.75 | 9.15 | 26.21 | -76.32 | .90 |
| 71 | 9-12-2021 | 12:18:28.50000 | Groningen | 585600 | 235200 | 3300 | 6.20 | 81.63 | 2.40 | 306.29 | 83.70 | 173.98 | 1.20 |
| 72 | 18-12-2021 | 02:33:25.35000 | Groningen | 585700 | 237100 | 3200 | 127.93 | 35.16 | -128.14 | 359.38 | 49.82 | -62.25 | 1.30 |
| 73 | 25-12-2021 | 22:31:12.11500 | Oosterwijtwerd | 594750 | 250750 | 2950 | 159.37 | 80.05 | -88.08 | 334.75 | 23.77 | -94.69 | .60 |
| 75 | 28-12-2021 | 19:19:04.88000 | Stedum | 592150 | 242750 | 2950 | 176.04 | 55.52 | -84.84 | 344.43 | 26.23 | -99.66 | .20 |
| 1 | 1-1-2022 | 23:17:26.99500 | Wagenborgen | 585700 | 257100 | 2750 | 207.60 | 32.55 | -60.23 | 350.64 | 54.95 | -109.05 | .50 |
| 2 | 24-1-2022 | 00:27:26.72000 | Loppersum | 594000 | 245950 | 2950 | 174.29 | 32.60 | -90.32 | 354.76 | 41.09 | -89.74 | .60 |
| 3 | 26-1-2022 | 03:51:37.19500 | Siddeburen | 583800 | 253950 | 2900 | 206.54 | 38.78 | -89.36 | 25.70 | 50.25 | -90.53 | .30 |
| 6 | 6-3-2022 | 13:18:30.96000 | Zeerijp | 597750 | 244650 | 2950 | 336.82 | 59.05 | -111.69 | 184.89 | 49.62 | -65.41 | 2.10 |
| 7 | 30-3-2022 | 19:18:41.93500 | Startenhuisen | 598500 | 243050 | 2900 | 206.75 | 20.85 | -172.37 | 117.54 | 67.59 | -67.57 | .50 |
| 8 | 1-4-2022 | 17:11:08.53500 | Loppersum | 595250 | 246250 | 2850 | 333.39 | 41.96 | -114.86 | 183.22 | 57.34 | -70.50 | 2.70 |
| 9 | 13-4-2022 | 07:19:27.37500 | Zeerijp | 597600 | 244800 | 2900 | 297.64 | 55.26 | -51.96 | 63.92 | 49.86 | -131.48 | .50 |
| 10 | 17-4-2022 | 06:33:42.65000 | Zuidwolde | 587200 | 237650 | 3050 | 336.68 | 34.19 | -52.58 | 113.29 | 62.16 | -112.72 | .60 |
| 11 | 17-4-2022 | 13:27:46.85500 | Westeremden | 596800 | 243500 | 2900 | 102.15 | 43.44 | -88.46 | 273.76 | 8.29 | -97.35 | 1.60 |
| 12 | 17-4-2022 | 13:44:19.68000 | Westeremden | 596850 | 243550 | 3100 | 190.21 | 75.63 | -101.20 | 74.50 | 12.30 | -27.96 | .70 |
| 14 | 5-5-2022 | 09:05:00.73500 | Lageland | 584400 | 244550 | 3050 | 17.84 | 33.77 | -30.73 | 132.84 | 71.37 | -120.28 | 1.80 |
| 15 | 9-5-2022 | 03:38:52.55500 | Wirdum | 594200 | 247600 | 2900 | 341.37 | 29.82 | -67.80 | 129.79 | 42.43 | -106.17 | .40 |
| 16 | 10-5-2022 | 04:15:08.28500 | Loppersum | 594300 | 245850 | 2950 | 324.87 | 56.07 | -97.13 | 155.70 | 41.00 | -80.97 | .60 |
| 18 | 29-5-2022 | 04:41:43.95500 | Groningen | 581350 | 235100 | 3350 | 36.42 | 70.02 | -26.68 | 140.29 | 66.64 | -156.17 | .60 |
| 19 | 8-6-2022 | 21:04:24.89839 | Wirdum | 594250 | 247600 | 3050 | 122.50 | 76.08 | -102.21 | 342.53 | 19.20 | -51.36 | .20 |
| 22 | 16-6-2022 | 20:17:31.76318 | Harkstede | 584200 | 242900 | 2900 | 358.77 | 63.37 | -56.15 | 120.97 | 41.15 | -139.17 | .90 |
| 24 | 4-7-2022 | 18:19:30.27316 | Zeerijp | 597900 | 245850 | 3150 | 349.85 | 25.34 | -35.20 | 106.02 | 61.27 | -113.51 | 1.10 |
| 26 | 13-7-2022 | 16:52:27.28717 | Luddeweer | 587250 | 245650 | 2850 | 96.98 | 48.56 | -103.07 | 295.90 | 44.20 | -75.93 | .40 |
| 27 | 15-7-2022 | 18:31:22.75925 | Zeerijp | 596300 | 246350 | 3100 | 174.16 | 59.57 | -75.24 | 334.24 | 46.54 | -107.61 | .30 |
| 28 | 16-7-2022 | 09:14:40.69964 | Loppersum | 596100 | 246450 | 3000 | 174.48 | 36.10 | -87.44 | 351.11 | 49.24 | -91.99 | .90 |
| 30 | 9-8-2022 | 03:50:08.14815 | Schildwolde | 584800 | 250750 | 3050 | 151.71 | 48.67 | -105.59 | 350.02 | 56.38 | -75.98 | .10 |

RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2022

| Event number | Date | Time | Name | Northing | Easting | Depth | Strike_1 | Dip_1 | Rake_1 | Strike_2 | Dip_2 | Rake_2 | KNMI magnitude |
|--------------|------------|-----------------|-------------|----------|---------|-------|----------|-------|---------|----------|-------|---------|----------------|
| 31 | 19-8-2022 | 05:49:14.26648 | Uithuizen | 602400 | 241700 | 3200 | 130.87 | 46.25 | -95.89 | 317.38 | 60.21 | -85.10 | 1.90 |
| 32 | 28-8-2022 | 03:18:59.09690 | Uithuizen | 602350 | 241700 | 3250 | 127.65 | 42.01 | -103.37 | 324.16 | 54.16 | -79.00 | 1.30 |
| 33 | 9-9-2022 | 00:39:11.62282 | Uithuizen | 602300 | 241600 | 3050 | 317.67 | 48.81 | -110.22 | 169.41 | 40.92 | -66.60 | 2.40 |
| 34 | 18-9-2022 | 04:10:00.70012 | Uithuizen | 602150 | 240750 | 3000 | 319.65 | 50.16 | -122.02 | 201.65 | 34.64 | -44.26 | .80 |
| 36 | 19-9-2022 | 19:38:40.67907 | 't Zandt | 599450 | 248250 | 2900 | 59.04 | 14.02 | -146.86 | 302.73 | 57.34 | -76.05 | .80 |
| 37 | 22-9-2022 | 04:07:39.212770 | Tjuchem | 588900 | 253100 | 2750 | 139,25 | 78,53 | -114,12 | 15,48 | 29,3 | -35,09 | 1,10 |
| 38 | 24-9-2022 | 10:20:39.055255 | Uithuizen | 602100 | 241650 | 2950 | 298,1 | 40,89 | -117,84 | 160,6 | 39,71 | -61,42 | 2,70 |
| 39 | 24-9-2022 | 11:37:29.588478 | Uithuizen | 602500 | 241600 | 3250 | 150,27 | 41 | -92,95 | 334,41 | 45,18 | -87,28 | 1,70 |
| 40 | 8-10-2022 | 02:17:17.068413 | Wirdum | 593550 | 247250 | 2900 | 153,39 | 29,19 | -69,04 | 307,89 | 55,47 | -102,23 | 3,10 |
| 41 | 8-10-2022 | 05:35:36.882520 | Garrelsweer | 593550 | 247250 | 2900 | 312,24 | 69,15 | -115,1 | 161,51 | 51,88 | -59,75 | 1,20 |
| 42 | 11-10-2022 | 15:36:39.576970 | Uithuizen | 602600 | 241550 | 3050 | 133,22 | 45,91 | -110,01 | 334,01 | 65,73 | -74,36 | 1,30 |
| 43 | 13-10-2022 | 16:08:48.625202 | Wirdum | 593350 | 247550 | 3000 | 129,12 | 64,65 | -104,59 | 342,42 | 27,3 | -60,23 | 1,40 |
| 44 | 14-10-2022 | 22:02:28.560916 | Garrelsweer | 593700 | 247100 | 3100 | 167,11 | 32,07 | -80,22 | 336,01 | 61,8 | -95,88 | 0,40 |
| 45 | 22-10-2022 | 10:14:04.595284 | Wirdum | 593400 | 248750 | 3000 | 180,48 | 64,51 | -84,63 | 351,22 | 35,05 | -98,47 | 2,20 |
| 46 | 22-10-2022 | 14:32:51.756767 | Wirdum | 593500 | 248750 | 2950 | 201,33 | 49,71 | -75,04 | 356,36 | 37,51 | -108,87 | 1,00 |
| 47 | 26-10-2022 | 07:16:28.047671 | Wirdum | 593650 | 248750 | 2950 | 355,53 | 41,26 | -98,13 | 184,07 | 65,74 | -84,13 | 1,10 |

