

RAPPORTAGE SEISMICITEIT
GRONINGEN – NOVEMBER 2023

[Deze pagina is opzettelijk leeg gelaten]

Inhoudsopgave

1	Overzicht	4
1.1	Aantal aardbevingen (activity rate)	4
1.2	Aardbevingsdichtheid	7
1.3	Trend in seismiciteit	7
1.4	Incidentparameters PGA en PGV	7
1.5	Aardbevingen met hoogste magnitude	7
1.6	Verdere studies naar de seismiciteit tijdens de periode van drukvereffening	8
2	Inleiding en leeswijzer	9
2.1	Inleiding	9
2.2	Monitoring van het Groningen gasveld in de Mijnbouwregeling	9
2.3	Leeswijzer	10
2.4	Meetnetwerk en meetnauwkeurigheid	10
2.5	Magnitude van compleetheid	11
3	Trendparameters	13
3.1	Trendparameter aantal aardbevingen	14
3.2	Aardbevingsdichtheid	15
4	Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit	17
4.1	Aantal aardbevingen	17
4.2	Distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld	19
4.3	Statistische analyse naar de ontwikkeling aardbevingen	21
4.3.1	Verloop van het aantal aardbevingen door de tijd	21
4.3.2	Verband productie en seismiciteit per cluster en productielocatie	23
4.3.3	Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd	25
4.3.4	Verhouding tussen grote en kleine aardbevingen	27
4.3.5	Anomale PGA/PGV bij een bepaalde aardbevings-magnitude	30
4.4	Vergelijking met het SDRA model, HRA model and Rate-and-State model	33
4.4.1	SDRA model	33
4.4.2	HRA model	33
5	Seismiciteit na het sluiten van een gasveld; ervaring met andere gasvelden	35
5.1	Groningen gasveld is ingesloten	35
5.2	Seismiciteit na het sluiten van een gasveld; voorbeeld Annerveen	38
6	Referenties	41
	Appendix A – Overzicht periodieke rapportages en speciale rapportages seismiciteit Groningen	43

Appendix B – Aardbevingscatalogus 1 november 2023 tot 31 oktober 2023 (door KNMI)	45
---	----

1 Overzicht

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

In de Mijnbouwregeling zijn deze vier parameters onderverdeeld in twee zogenoemde trendparameters en in twee zogenoemde incidentparameters (Ref. 1). De maximale aardbevingsdichtheid en het aantal aardbevingen per jaar ('activity rate') zijn de trendparameters. Deze parameters worden gebruikt om vroegtijdig een lokale of 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 piek grondversnellingen (PGA) en piek grondsnelheden (PGV) van de aardbevingen zijn de incidentparameters. Daarnaast is ook de aardbevingsmagnitude van belang in de Mijnbouwregeling.

1.1 Aantal aardbevingen (activity rate)

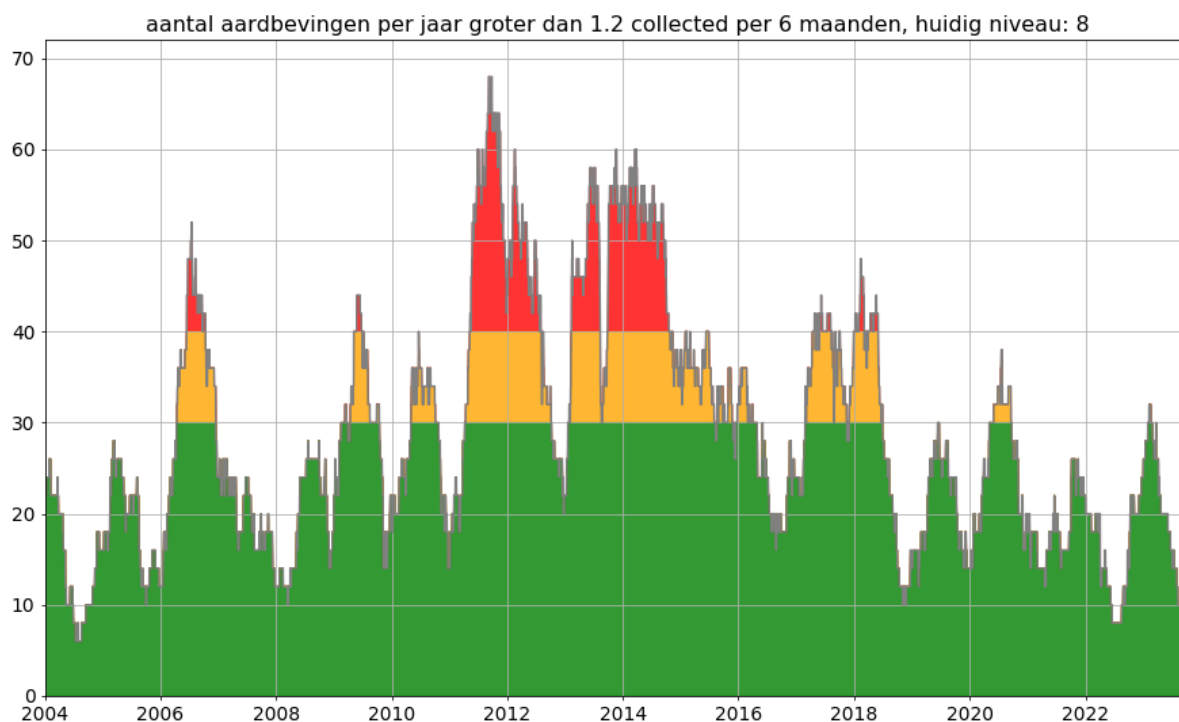
Het aantal geregistreerde aardbevingen met een magnitude groter dan of gelijk aan $M_L \geq 1,2$ is in de afgelopen zes maanden gedaald van 10 (1 november 2022 tot en met 30 april 2023) naar 4 (1 mei 2023 tot en met 31 oktober 2023). Voor een magnitude groter dan of gelijk aan $M_L \geq 1,5$ is het aantal geregistreerde aardbevingen in de afgelopen zes maanden gehalveerd van 6 naar 3. De seismiciteit in de afgelopen observatieperiode van zes maanden (van 1 mei 2023 tot en met 31 oktober 2023) vertoont daarmee een sterk dalende trend ten opzichte van de vorige observatieperiode. Dit wordt in meer detail omschreven in paragrafen 4.1 tot 4.3. Deze drie aardbevingen in de rapportage periode komen overeen met zes aardbevingen op jaarbasis. Dit is lager dan de in de TNO-SDRA 2023 (Ref. 20) voorspelde verwachting voor het aantal aardbevingen in gas-jaar 2022-2023.

Tabel 1-1: Aardbevingen in Groningen met een kracht $M_L \geq 0,8$ geregistreerd door het KNMI seismisch monitoringsnetwerk in de 6-maanden observatieperiode van 1 mei 2023 tot en met 31 oktober 2023. Locatie van het hypocentrum is gebaseerd op de KNMI-aardbevingscatalogus.

Plaats	Datum	Time hh:mm:ss UTC	Magnitude	Diepte km	Easting	Northing
Muntendam	20/06/2023	05:22:36	1,0	3	255661	575193
Appingedam	09/07/2023	01:08:59	1,5	3	251075	593690
Loppersum	31/08/2023	23:47:52	1,3	3	244464	594342
Zandweer	15/09/2023	08:19:02	2,0	3	240777	599283
Zandweer	15/09/2023	13:31:25	1,9	3	240777	599283
Zuidwolde	06/10/2023	05:34:15	1,1	3	238274	586215

Twee van de zes aardbevingen in de huidige rapportage periode met een magnitude van $M_L \geq 0,8$ waren bij Zandweer op 15 september 2023. Dit waren de enige twee aardbevingen in deze rapportage periode met een magnitude $M_L > 1,5$.

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 van de observatieperiode varieert tussen de 181 en 184 dagen.



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

In totaal zijn van de twee aardbevingen bij Zandweer elk 73 opnames gemaakt door het door KNMI geopereerde seismisch monitoringsnetwerk. Voor elke aardbeving waren 25 opnames geschikt voor verdere analyse (Ref. 25).

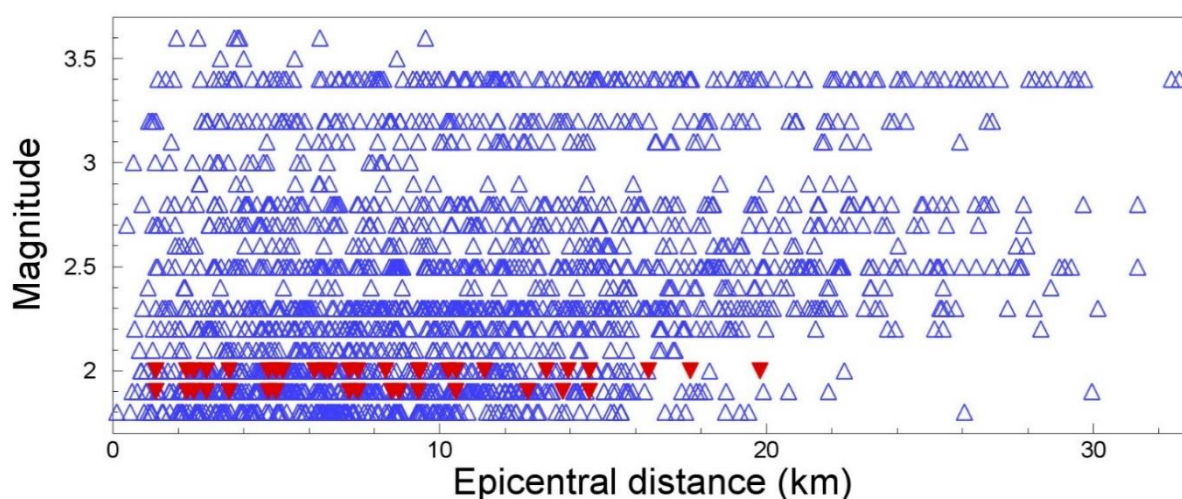
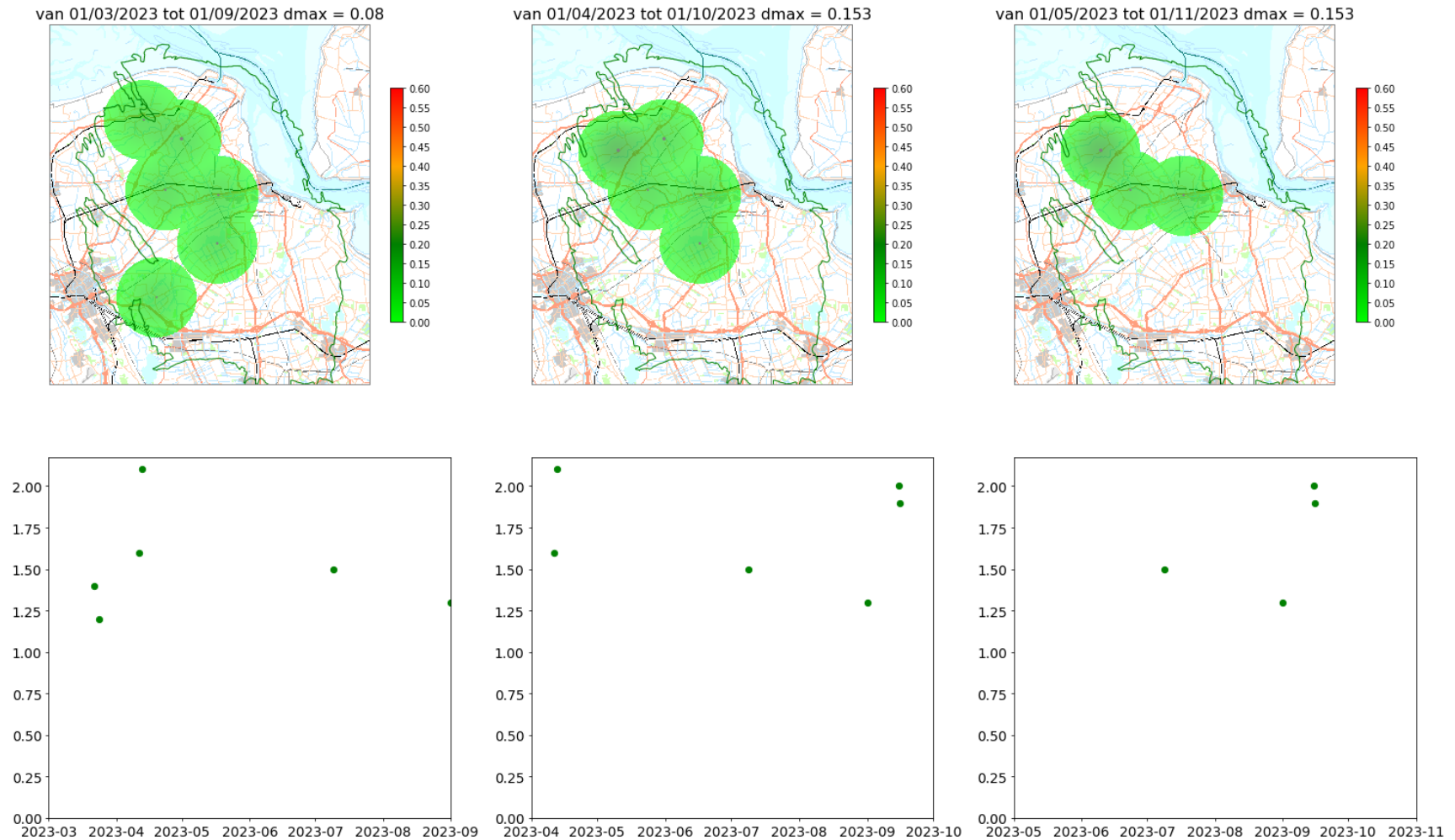


Figure 1-2. Magnitude-afstand tot epicentrum verdeling van de Groningen strong-motion database (blauw) met daarin opgenomen de opnames van de Zandweer aardbevingen in september 2023 (rood).

RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2023

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 2023. De middelste figuren geven deze weer op 1 oktober 2023 en de rechter figuren op 1 november 2023.

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, geregistreerd gedurende de voorafgaande 6 maanden, met een magnitude $M_L \geq 1,2$.

In de 6-maanden rapportage periode van 1 mei 2022 tot met 31 oktober 2022 zijn veel van de aardbevingen geregistreerd in drie relatief kleine gebieden rond Uithuizen, Wirdum/Garrelsweer en Zeerijp. Dit veroorzaakte een relatief hoge aardbevingsdichtheid in deze gebieden. Voor de daarop volgende rapportage periode (van 1 november 2022 tot en met 30 maart 2023) vallen de epicentra van de aardbevingen over een groter gedeelte van het Groningen-gasveld. Hierdoor was de maximale aardbevingsdichtheid in het gasveld gedurende die periode gedaald van 0,386 naar 0,224 aardbevingen per km^2 jaar. In de huidige rapportage periode liggen de epicentra van alle vier aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,2$, weer in het noordelijk gebied van Groningen. Door de lagere seismiciteit is de aardbevingsdichtheid ondanks de concentratie van de aardbevingen in het noorden van het gasveld is de aardbevingsdichtheid gedaald tot 0,153 aardbevingen per ($\text{km}^2 \cdot \text{jaar}$). De grootste twee aardbevingen hiervan hadden een nagenoeg identieke locatie bij Zandeweer.

1.3 Trend in seismiciteit

Het aantal aardbevingen per jaar laat vanaf 2014 een dalende trend zien. In de recente 6-maanden rapportage periode van 1 mei 2023 tot en met 31 oktober 2023 zijn er 4 aardbevingen boven en rond het Groningen-gasveld met een magnitude van $M_L \geq 1,2$ geregistreerd. Het aantal aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,5$ is in de zelfde periode gedaald tot 3 aardbevingen.

1.4 Incidentparameters PGA en PGV

De grootste aardbevingen tijdens de rapportage periode zijn de twee aardbevingen bij Zandeweer op 15 september 2023. De hoogste piek grondversnelling (piek ground acceleration, PGA) geregistreerd tijdens de eerste aardbeving met een kracht van $M_L = 2,0$ was $18,41 \text{ cm/s}^2$ (0,02 g) gemeten door het G610-station (H1 (NS)-component). De hoogste PGA van de tweede aardbeving met een kracht van $M_L = 1,9$ was $10,42 \text{ cm/s}^2$ (0,01 g) en werd door hetzelfde station gemeten op dezelfde component.

De grootste PGV-waarden werden ook door hetzelfde station en component geregistreerd: $0,28 \text{ cm/s}$ tijdens de eerste aardbeving met magnitude $M_L = 2,0$ en $0,17 \text{ cm/s}$ tijdens de tweede aardbeving met magnitude $M_L = 1,9$.

Deze waargenomen piek grondversnellingen en piek grondsnelheden zijn lager dan de grenswaarden voor deze signaalparameters. 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.

1.5 Aardbevingen met hoogste magnitude

De aardbeving met de hoogste magnitude is de recente rapportage periode was de aardbeving bij Zandeweer op 15 september 2023. Deze had een magnitude van $M_L=2,0$. Deze geregistreerde magnitude is lager dan de grenswaarden voor deze signaalparameter. Meer informatie over deze twee aardbevingen is beschikbaar in de Special Rapportage 'Special Report on the two Zandeweer Earthquakes on 15th September 2023 with Magnitude $M_L=2.0$ and $M_L=1.9$ respectively' (Ref. 25).

1.6 Verdere studies naar de seismiciteit tijdens de periode van drukvereffening

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

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

De wetenschappelijke rapporten 3, 4, 8 en 9 zijn publiek beschikbaar op de onderzoeksrapporten-webpagina van www.nam.nl. De wetenschappelijke publicaties 1, 2, 5, 6, en 7 zijn publiek beschikbaar via de website van het wetenschappelijke tijdschrift. Het onderzoeksprogramma zal ook in 2024 worden voortgezet.

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 het uitgeven van deze rapportages als onderdeel van de nazorg.

Seismische gegevens en gasproductie in dit rapport zijn bijgewerkt tot 31 oktober 2023. Het rapport kijkt in principe een halfjaar terug, maar daar waar relevant wordt verder teruggekeken om seismische ontwikkelingen in hun bredere historische context te plaatsen. Een tabel met de aardbevingen die in Groningen zijn geregistreerd in het afgelopen jaar, door het seismisch monitoringsnetwerk geopereerd door KNMI, is in dit rapport opgenomen onder Appendix B.

2.2 Monitoring van het Groningen gasveld in de Mijnbouwregeling

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

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

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

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

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

2.3 Leeswijzer

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

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

- Groen: Aardbevingen met een magnitude² 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 en zuiden van het gasveld) die alleen

² 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.

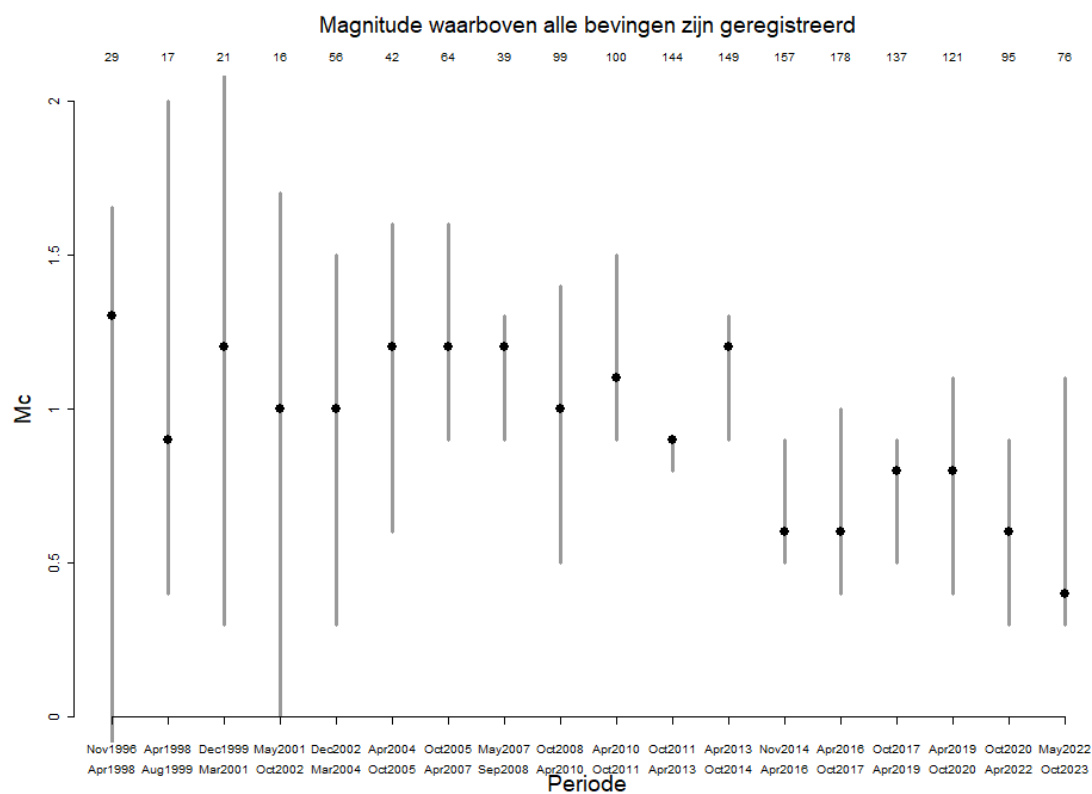
Het seismische meetnetwerk boven het Groningen-gasveld is in 2014 uitgebreid met 69 nieuwe seismische meetstations. Hierdoor is de gevoeligheid van het meetnetwerk toegenomen. In de periode van 2003 tot en met 2014 werden alle aardbevingen in het Groningen-gasveld met een magnitude groter dan $M_L \geq 1,5$ 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. 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 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 mogelijkwerwijs foutieve conclusies uit de dataset afgeleid.

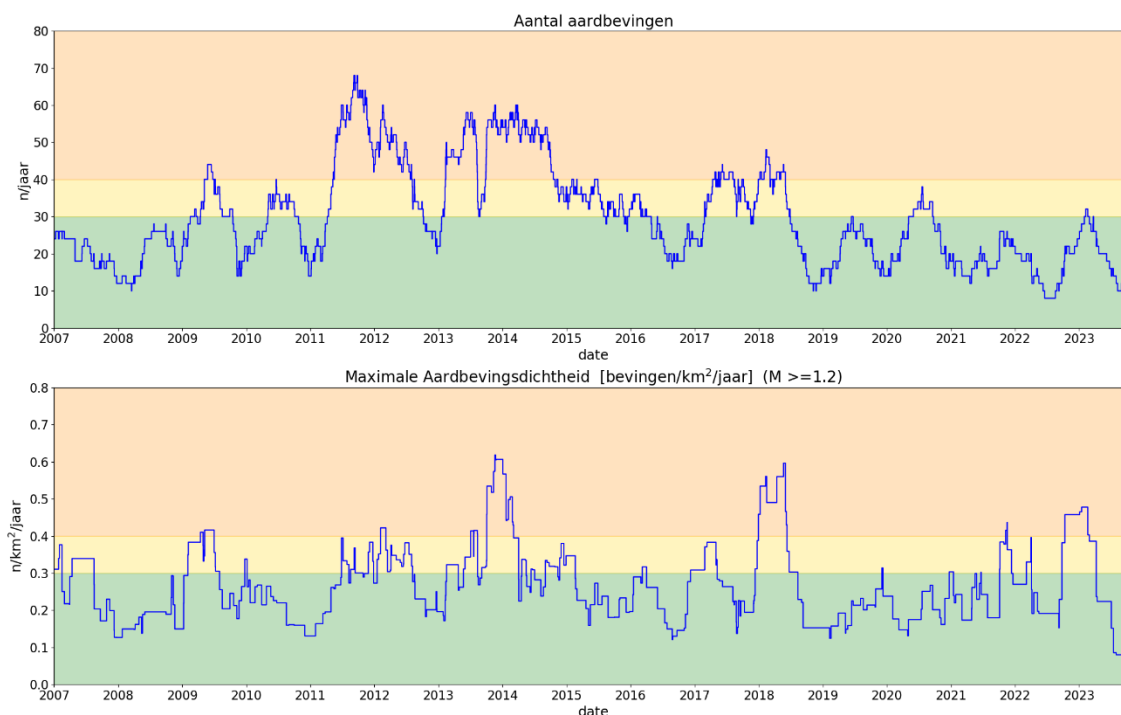
De MoC is afgeleid volgens de maximum curvature method (Ref. 3 en 4) en de resultaten met het 95% betrouwbaarheidsinterval zijn weergegeven in figuur 2-1. In het figuur is duidelijk zichtbaar dat vanaf 2014 de MoC afneemt (ook kleinere aardbevingen worden geregistreerd). Vanaf 2014 zijn aardbevingen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



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

3 Trendparameters

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



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

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

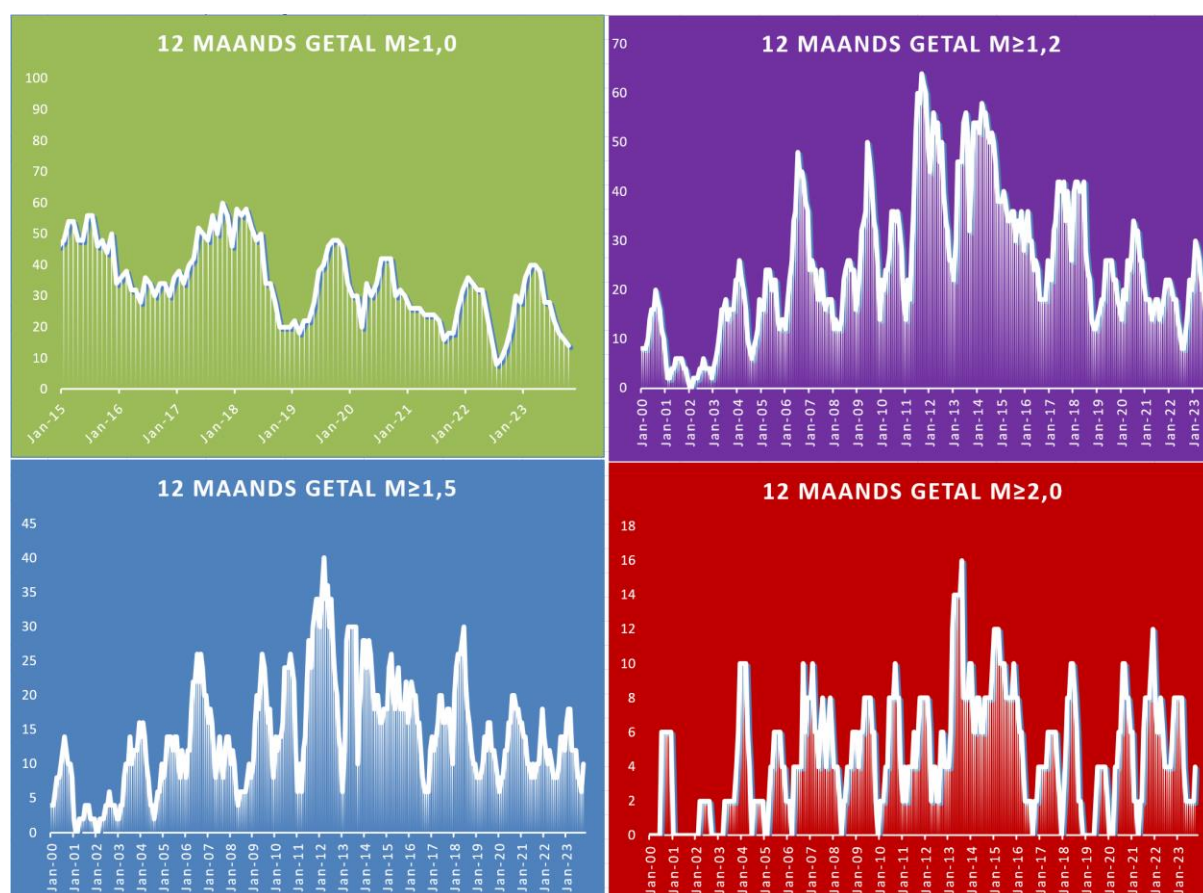
Tabel 3-1 Trendparameter overzicht 1 mei 2023 tot en met 31 oktober 2023. Aantal aardbevingen per voorgaande jaar en aardbevingsdichtheid (aantal aardbevingen per jaar per vierkante kilometer) zijn aangegeven op het einde van de maand.

	mei	jun	jul	aug	sept	okt
Aantal aardbevingen ($M_L \geq 1,2$)	0	0	1	1	2	0
Aardbevingsdichtheid (einde maand)	0,224	0,224	0,224	0,080	0,153	0,153

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 november 2023 is dus de som van het aantal aardbevingen van een bepaalde magnitude in de voorafgaande periode van 1 mei 2023 tot 31 oktober 2023 omgerekend naar één jaar.

Figuur 3-2 laat het 12-maandsgetal zien over een langere periode voor vier magnitude-classes. 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-classes; 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.

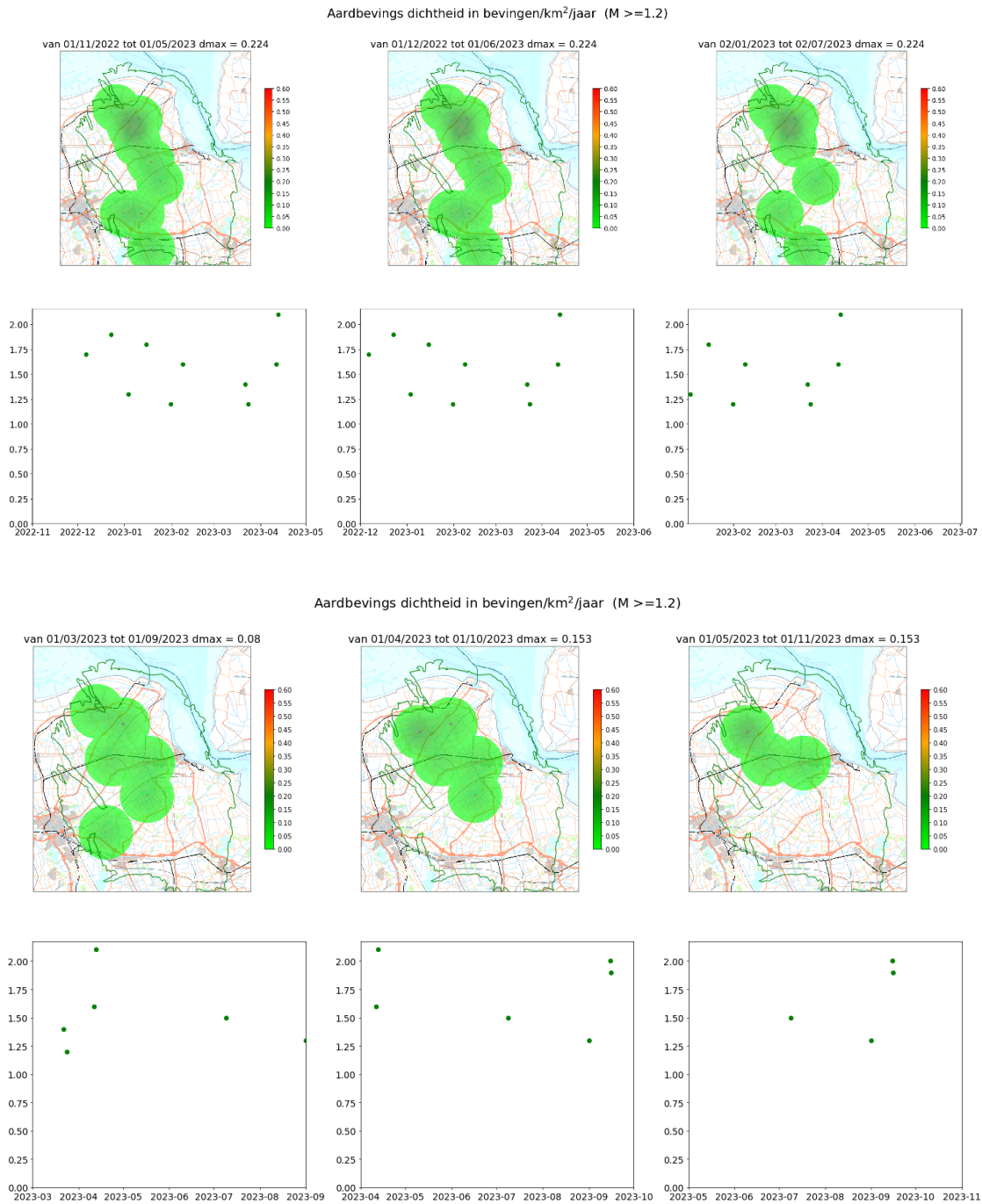
De dalende trend in het aantal aardbevingen (met magnitude groter dan of gelijk aan $M_L = 1,0$, $M_L = 1,2$ en $M_L = 1,5$) kan gevolg zijn van de verlaagde productievolumes en de manier van opereren maar ook van de natuurlijke variabiliteit. Het lage aantal events maakt het lastig conclusies te trekken, 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 2023 tot en met 31 oktober 2023 geregistreeerde aardbevingen. Aardbevingsdichtheid wordt berekend met de Quartic Kernel functie. Alle geregistreeerde 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.

In de rapportage periode van 1 mei 2022 tot en met 31 oktober 2022 zijn veel van de aardbevingen geregistreeerd in een kleine gebieden rond Uithuizen, Wirdum/Garrelswier en Zeerijp. Dit veroorzaakte een hoge aardbevingsdichtheid in deze gebieden. Vooral de aardbevingen zwerm met epicentra in een klein gebied nabij Uithuizen had een grote invloed op de grootste aardbevingsdichtheid. Op 24 september 2022 werd het monitoringsniveau 'bovengemiddelde lokale seismiciteit' overschreden, wanneer de aardbevingsdichtheid 0,38 aardbevingen per (jaar * km²) is. Enkele weken later op 11 oktober 2022 was de aardbevingsdichtheid opgelopen tot 0,46 aardbevingen per (jaar * km²) en werd het monitoringsniveau 'hoge lokale seismiciteit' overschreden.

Voor de vorige rapportage periode (van 1 november 2022 tot 30 april 2023) vielen de epicentra van de aardbevingen over een groter gedeelte van het gasveld. Hierdoor daalde de maximale aardbevingsdichtheid in het gasveld in de vorige rapportage periode. In de huidige rapportage periode vallen alle vier aardbevingen met $M_L \geq 1,2$ in het noordelijke gebied van het veld van Appingedam, Loppersum tot Zandweer. De reductie van het gebied waar aardbevingsdichtheid wordt geëvalueerd is duidelijk te zien in figuur 3-3.



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.

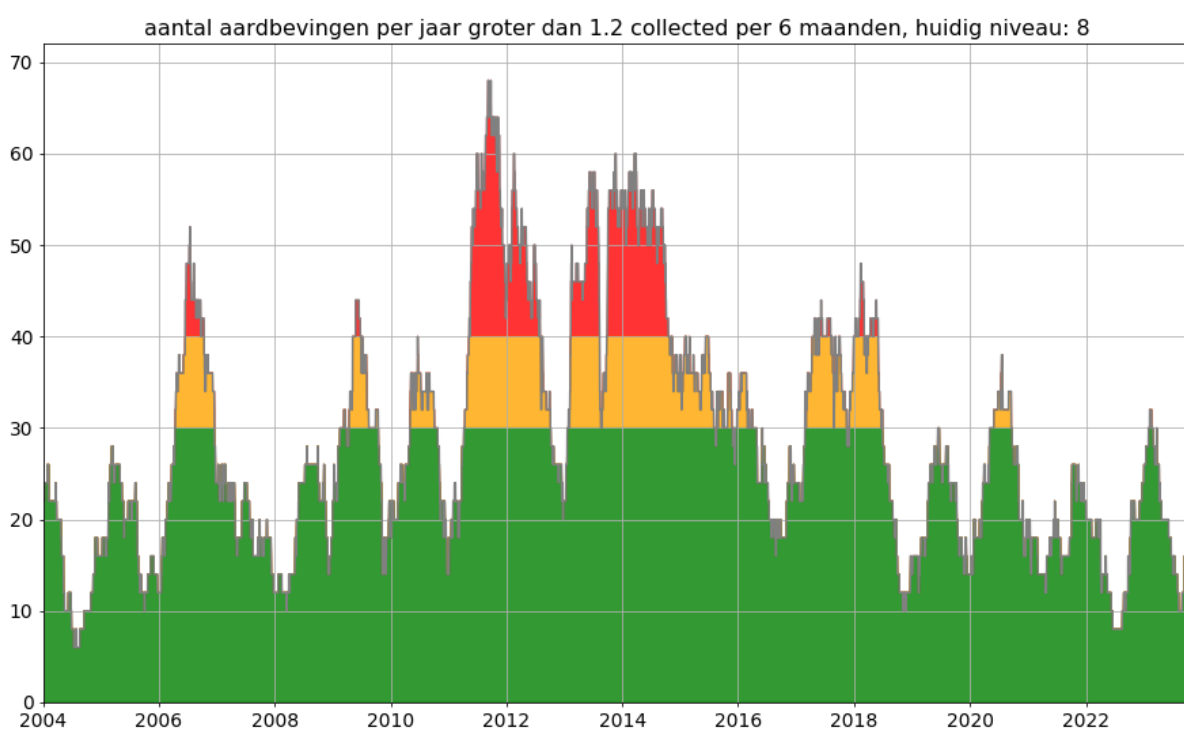
4 Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit

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

1. Verloop van het aantal aardbevingen.
2. Regionale ontwikkeling van de seismiciteit.
3. Een statistische analyse van de hoeveelheid aardbevingen over tijd.
4. 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 vier 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 8 aardbevingen op jaarbasis. Dit is te zien in figuur 4-1.



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

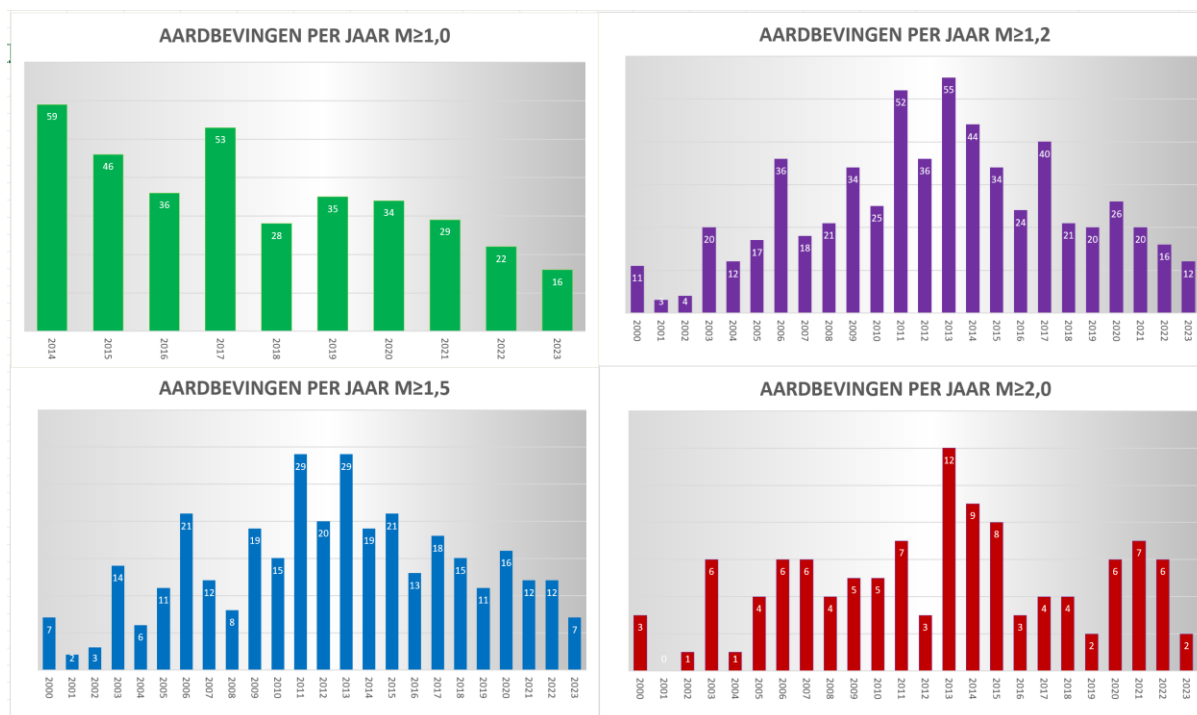
Het aantal aardbevingen per maand onderverdeeld in vijf magnitudeklassen is opgenomen in Tabel 4-1. In de voorgaande periode (1 november 2022 tot en met 30 april 2023) zijn er 10 aardbevingen geregistreerd met een magnitude $M_L \geq 1,2$. In de huidige periode (1 mei 2023 tot en met 31 oktober 2023) zijn er 4 aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,2$ geregistreerd. Het aantal aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,2$ is daardoor meer dan gehalveerd. Het aantal aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,5$ is gehalveerd van 6 naar 3.

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

Maand	$1,0 \leq M_L < 1,2$	$1,2 \leq M_L < 1,5$	$1,5 \leq M_L < 2,0$	$2,0 \leq M_L < 2,5$	$M_L \geq 2,5$	Totaal $M_L \geq 1,2$
mei-22	0	0	1	0	0	1
jun-22	0	0	0	0	0	0
jul-22	1	0	0	0	0	0
aug-22	0	1	1	0	0	2
sep-22	1	0	1	1	1	3
okt-22	2	3	0	1	1	5
nov-22	0	0	0	0	0	0
dec-22	2	0	2	0	0	2
jan-23	0	2	1	0	0	3
feb-23	1	0	1	0	0	1
mrt-23	1	2	0	0	0	2
apr-23	0	0	1	1	0	2
mei-23	0	0	0	0	0	0
jun-23	1	0	0	0	0	0
jul-23	0	0	1	0	0	1
aug-23	0	1	0	0	0	1
sep-23	0	0	1	1	0	2
okt-23	1	0	0	0	0	0
mei2022- okt2022	4	4	3	2	2	11
nov2022- apr2023	4	4	5	1	0	10
Rapportage periode mei2023- okt2023	2	1	2	1	0	4
Totaal vol jaar nov2022 - okt2023	6	5	7	2	0	14

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 2023 over de periode tot en met oktober 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 geplott 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 $M_L \geq 2,0$.

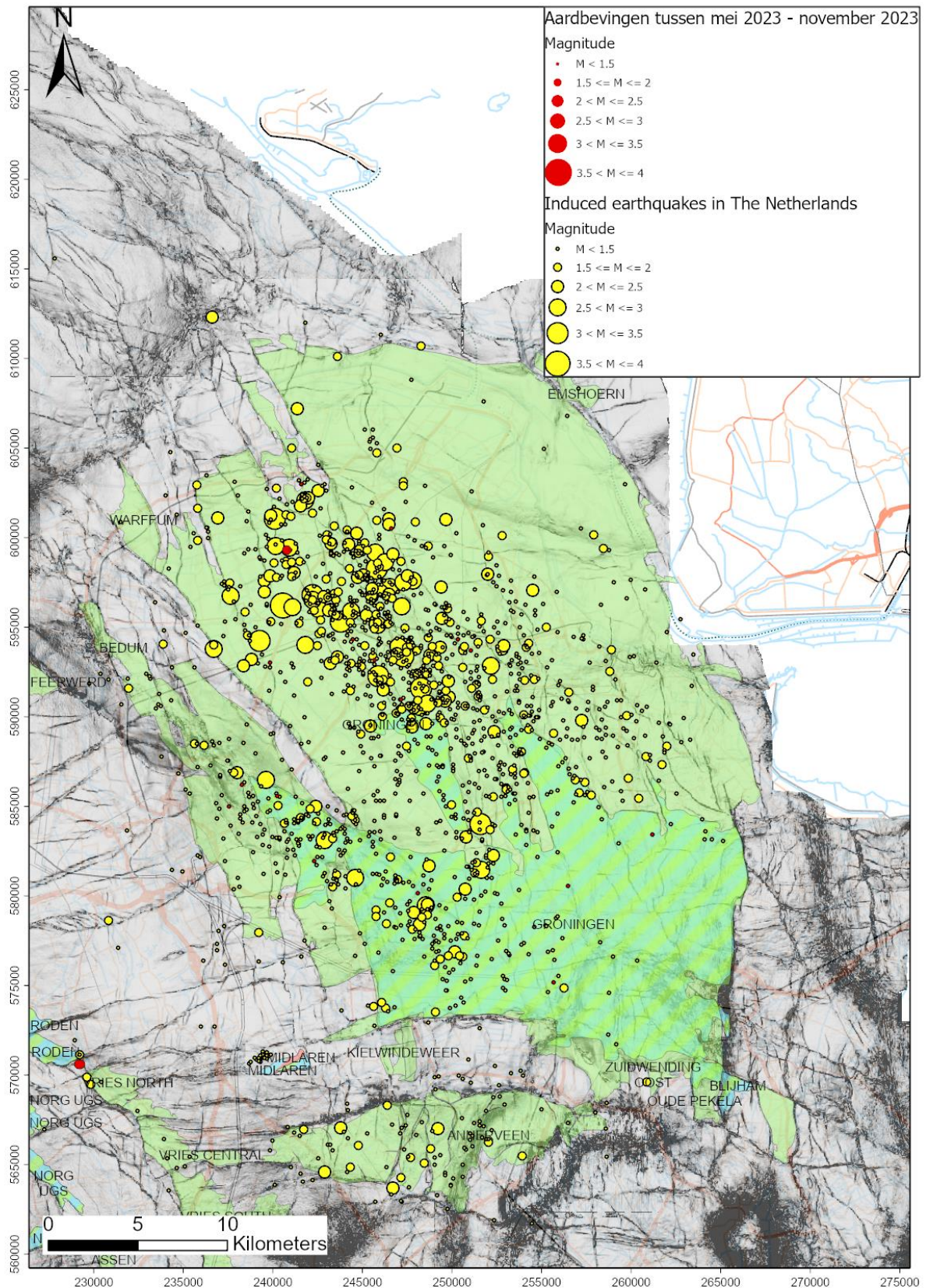


Figuur 4-2: Aantal aardbevingen per jaar voor vier verschillende magnitude-classes. Het aantal aardbevingen in 2023 is aangegeven voor de periode tot en met oktober 2023.

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 mei 2023 tot en met 31 oktober 2023 (6 maanden) geregistreerde aardbevingen zijn in rood weergegeven. Van de 4 aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,2$ hebben allen een epicentrum binnen het meest seismisch actieve gebied in het noorden van het gasveld. De twee zwaarste aardbevingen hiervan (met magnitude $M_L = 2,0$ en $M_L = 1,9$ respectievelijk), die op dezelfde dag plaats vonden (15 september 2023) hebben een vrijwel gelijk epicentrum bij Zandweer.

Voor deze figuur zijn de bepaling van de locatie van het epicentrum door het KNMI gebruikt. Daarnaast wordt deze locatie voor een aantal van de aardbevingen ook bepaald met behulp van een geautomatiseerde full-waveform methode. Deze analyses zijn beschikbaar op www.nam.nl voor de huidige rapportage periode tot en met 31 oktober 2023.



Figuur 4-3: Kaart van de diepe ondergrond met daarop in groen het Groningen-gasveld en de omliggende gasvelden. Met rode stippen zijn de in de periode 1 mei 2023 tot 31 oktober 2023 (6 maanden) geregistreeerde aardbevingen aangegeven. Alle andere aardbevingen (vóór 1 mei 2023) zijn aangegeven met gele cirkels. De grootte van een cirkel is maat voor de magnitude van de aardbeving.

4.3 Statistische analyse naar de ontwikkeling aardbevingen

4.3.1 Verloop van het aantal aardbevingen door de tijd

Deze analyse is uitgevoerd om de statistische significantie van de ontwikkeling van de trend van het aantal aardbevingen per kwartaal te duiden. Om dit inzichtelijk te maken zijn twee grafieken gemaakt van het aantal aardbevingen per kwartaal met betrouwbaarheidsintervallen van de te verwachten hoeveelheid aardbevingen; één onder de aanname dat de seismische events Poisson verdeeld zijn (Figuur 4-4); één onder de aanname dat de events quasi-Poisson verdeeld zijn (Figuur 4-5). De betrouwbaarheidsintervallen helpen bij de interpretatie van de data. Een seismisch relatief rustige periode kan het gevolg zijn van veranderingen in geproduceerde volumes, maar kan ook op toeval berusten.

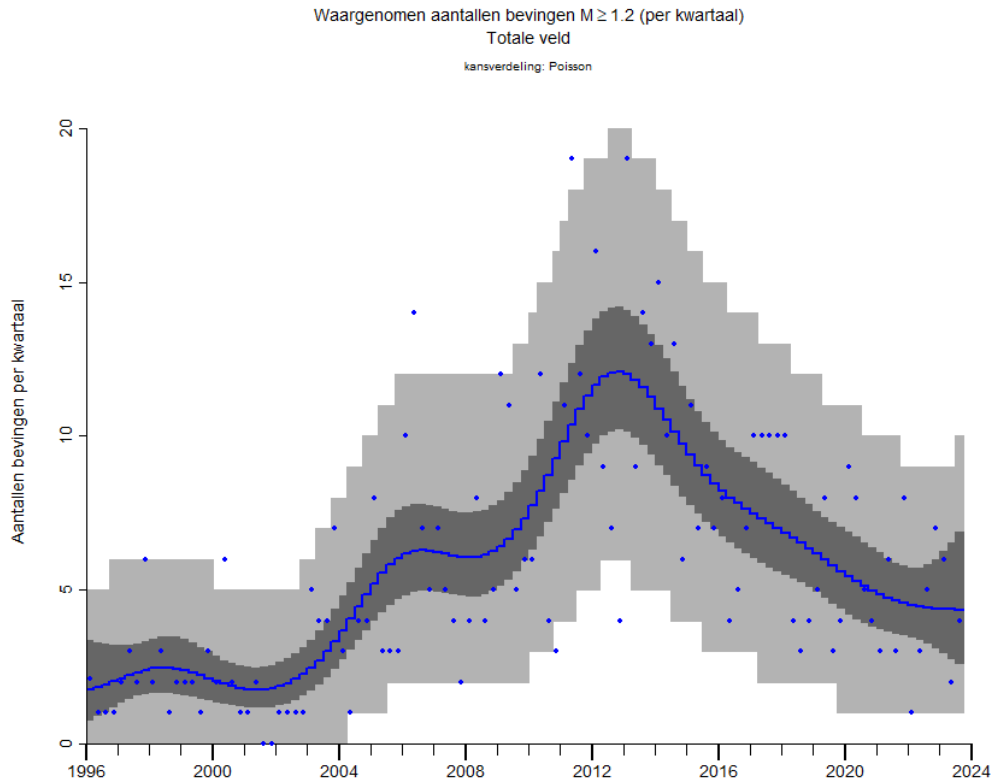
De Poisson verdeling geeft een redelijke beschrijving van de data onder de aanname dat de aardbevingen ongecorreleerd zijn. Deze aanname is echter niet geheel correct omdat naschokken plaatsvinden. De quasi-Poisson verdeling kan gebruikt worden om een hogere mate (ten opzichte van de Poisson verdeling) 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.

Beide plots bevatten de volgende informatie:

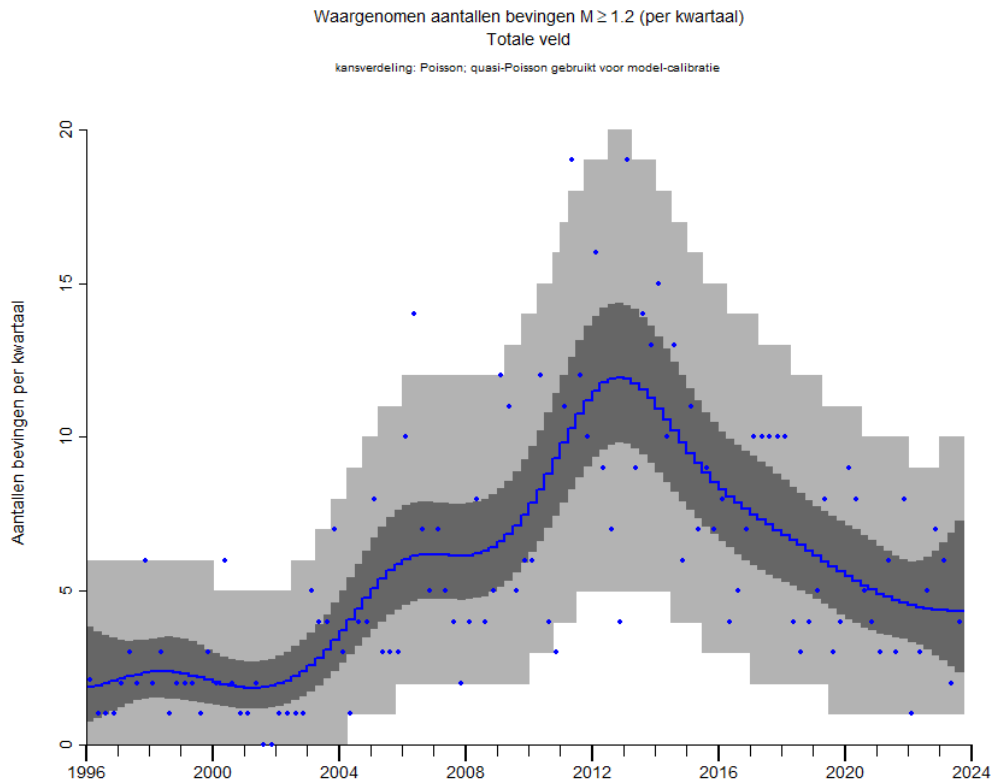
- Blauwe stippen voor het aantal seismische events per kwartaal.
- Een blauwe lijn die de trendlijn van het aantal te verwachten seismische events weergeeft.
- Een donkergrijze band; het 95% betrouwbaarheidsinterval van de trendlijn.
- Een lichtgrijze band; het 95% voorspellingsinterval van het aantal 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 2023. Merk op dat de onzekerheidsbanden in 2022 – 2023 mogelijk toenemen door grotere variatie van het aantal aardbevingen per kwartaal, maar dat de onzekerheid rondom de trend sowieso toeneemt, omdat er simpelweg minder datapunten nabij zijn om de trend uit af te leiden. De trend voor de laatste maanden is met minder zekerheid af te leiden dan de trend op een punt waar alle data twee jaar ervoor en erna bekend is.

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



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



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

4.3.2 Verband productie en seismiciteit per cluster en productielocatie

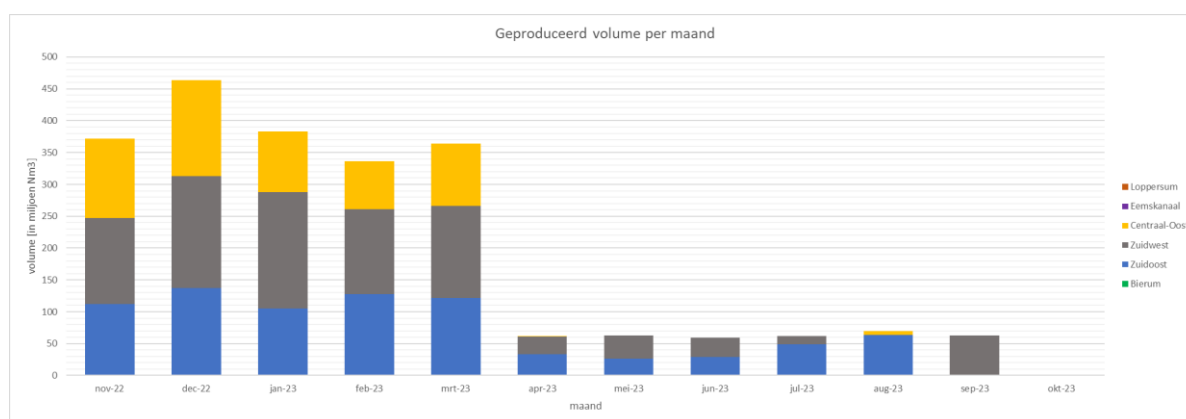
In welke mate de over een korte periode waargenomen variaties in de seismische monitoringsparameters een gevolg zijn van de wijze van opereren, van de lagere geproduceerde volumes, of van de natuurlijke variabiliteit in seismiciteit is niet direct vast te stellen. Er zijn modellen opgesteld waarmee seismische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

Tabel 4-2: 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		

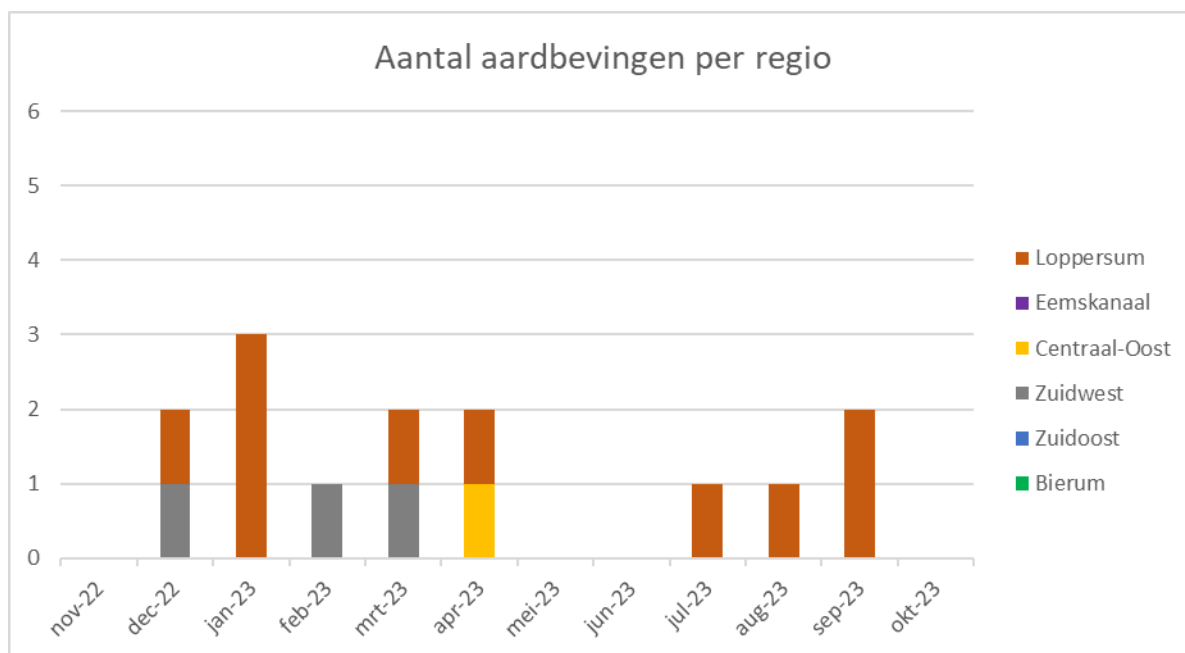
Het Groningen-gasveld is onderverdeeld in een aantal clusters van productielocaties zoals beschreven in de Mijnbouwregeling artikel 1.3a.1. In Tabel 4-2 is de verdeling van productielocaties per cluster opgenomen.

In Figuur 4-6 is de productie per cluster van productielocaties opgenomen over de voorgaande periode van 12 maanden (1 november 2022 tot en met 31 oktober 2023). De productie uit het Loppersum cluster is per februari 2018 beëindigd. Sinds 1 oktober 2023 zijn alle productie locaties gesloten. Als laatste productielocatie is op 1 oktober 2023 de Schlochteren productielocatie ingesloten. Deze is onderdeel van het Zuidwest cluster.



Figuur 4-6: Geproduceerd volume per maand per cluster.

In Figuur 4-7 is het aantal aardbevingen van magnitude $M_L \geq 1,2$ geplot per cluster.

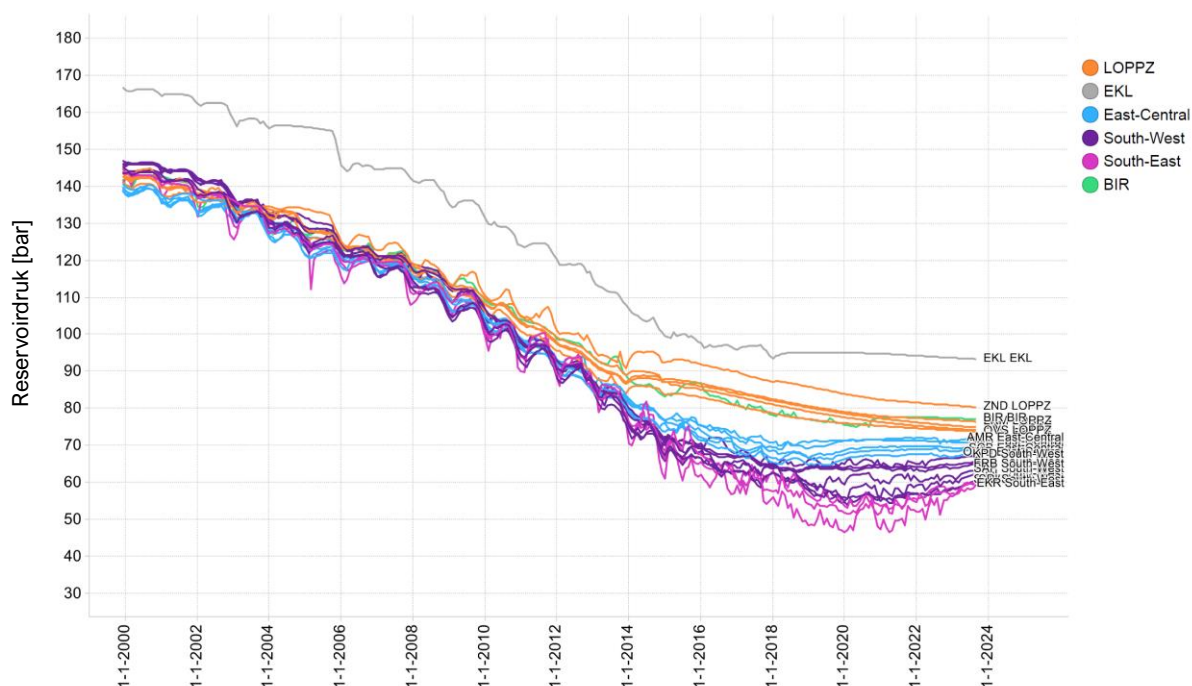


Figuur 4-7: Aantal aardbevingen met magnitude $\geq 1,2$ per cluster.

De relatief hoge seismiciteit in het noorden van het Groningen-gasveld 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 4-8 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 en rode lijnen, elke productielocatie wordt weergegeven door een aparte 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 ligging van de maximale aardbevingsdichtheid rond het cluster Loppersum.

Figuur 4-8 toont ook 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 4-8: 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.

4.3.3 Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd

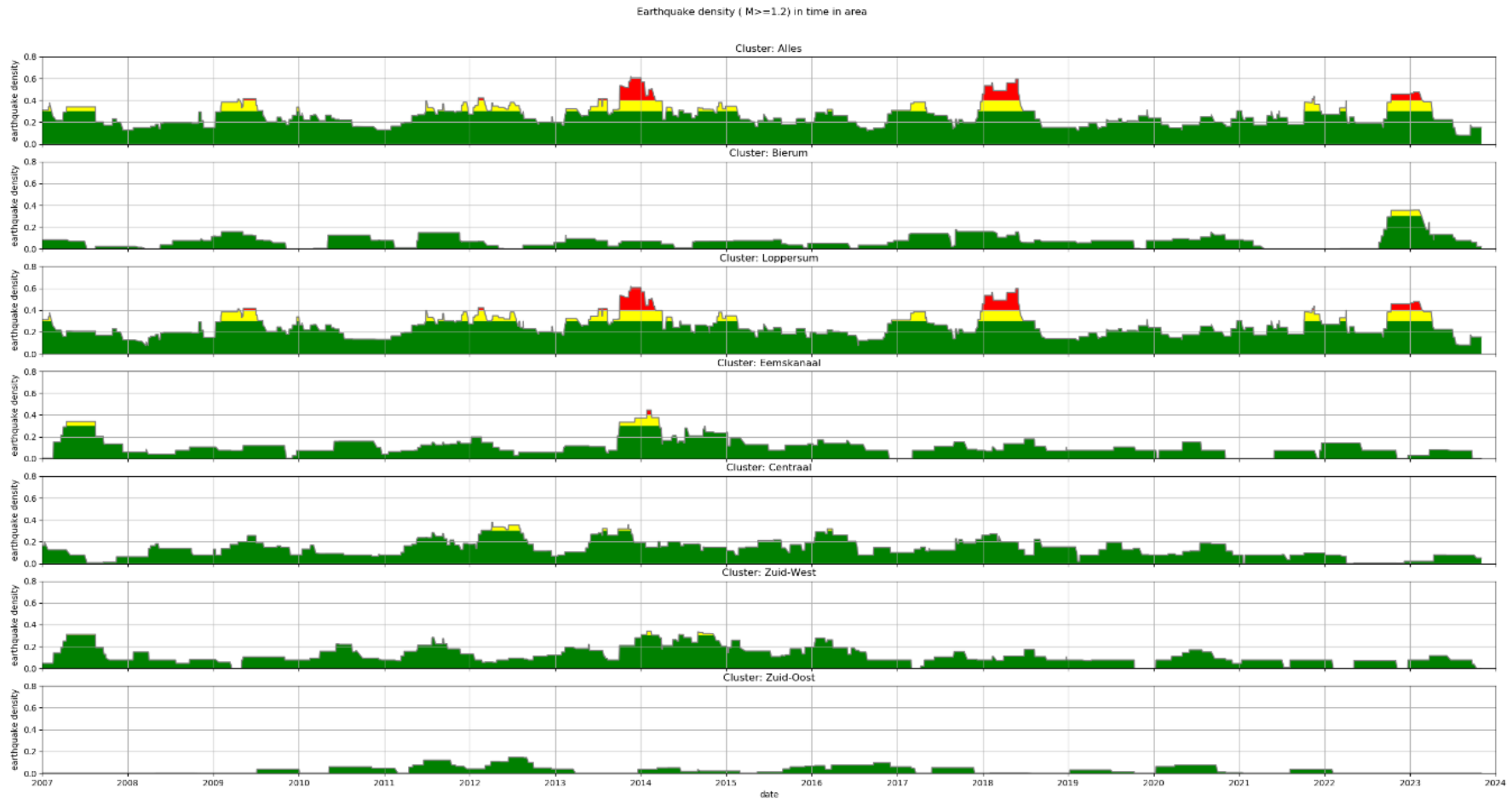
De maximumwaarde van de aardbevingsdichtheid als functie van de tijd over het gehele veld en per deelgebied is weergegeven in Figuur 4-9. De gebieden tussen de verschillende grenswaarden voor rapportage en analyse op basis van aardbevingsdichtheid volgens de Mijnbouwwet zijn aangegeven in de kleuren groen, geel en rood.

Duidelijk zichtbaar is de hogere maximale aardbevingsdichtheid in de periode van 2013 tot 2014 en de periodes 2018 en 2022 over het veld en in het gebied Loppersum in het bijzonder. Omdat de aardbevingen bij Wirdum, Zijldijk en Garrelswier in het Loppersum-gebied, maar minder dan 5 km van de grens van het Bierum cluster plaats vonden was door de manier waarop de aardbevingsdichtheid wordt berekend in het verleden ook in het Bierum cluster de aardbevingsdichtheid hoger.

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 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.

RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2023



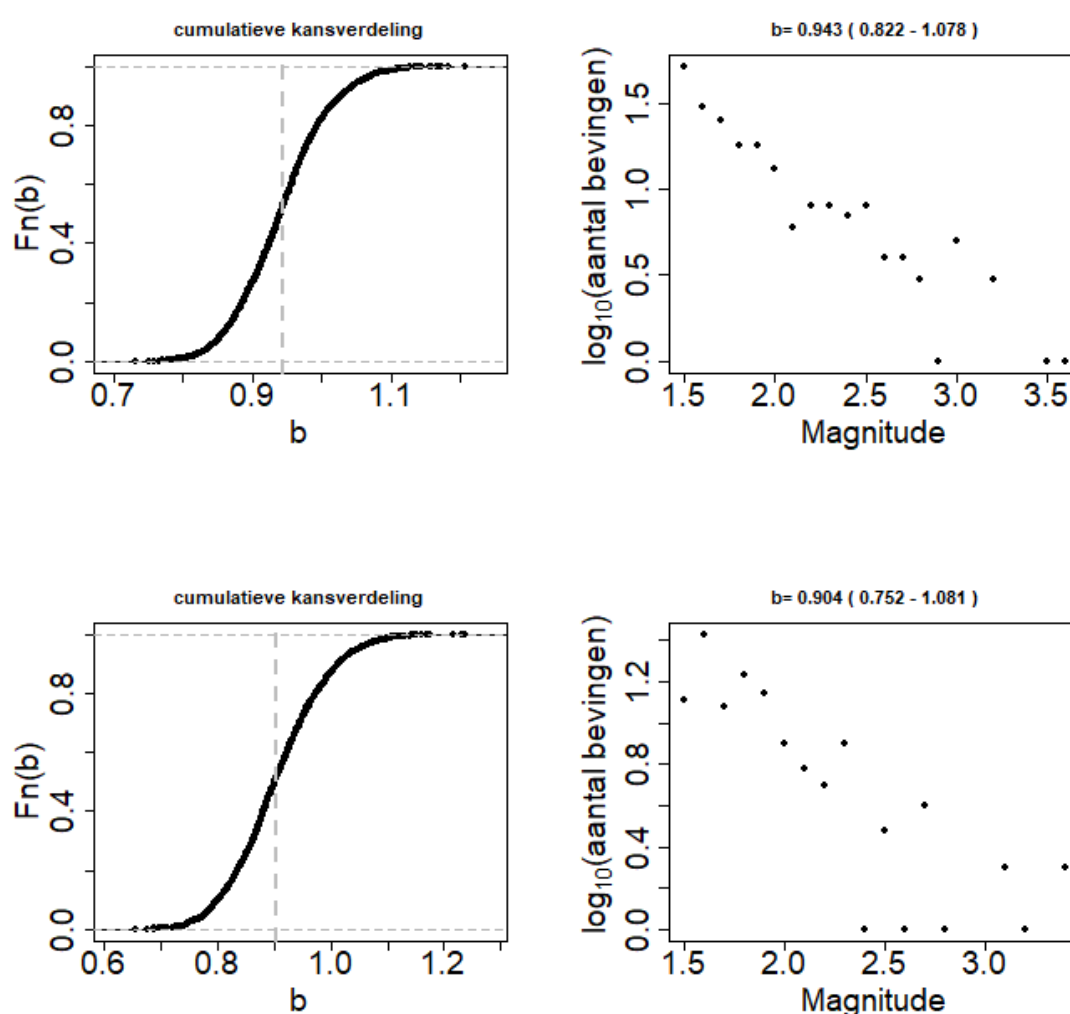
Figuur 4-9: De ontwikkeling van de maximale aardbevingsdichtheid over de jaren in het gehele Groningen-gasveld en kleinere gebieden binnen het Groningen-gasveld, weergegeven in aantal aardbevingen met een $M_L > 1,2$ per km^2 per jaar. De achtergrondkleur geeft het relatieve niveau van de seismiciteit weer, groen: lage activiteit, geel: bovengemiddelde activiteit en rood: hoge activiteit.

4.3.4 Verhouding tussen grote en kleine aardbevingen

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

Tabel 4-3: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen over het hele Groninger veld.

Totale gebied Groningen		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2023
P _{2.5%}	0,82	0,75
P _{50%}	0,94	0,90
P _{97.5%}	1,08	1,08

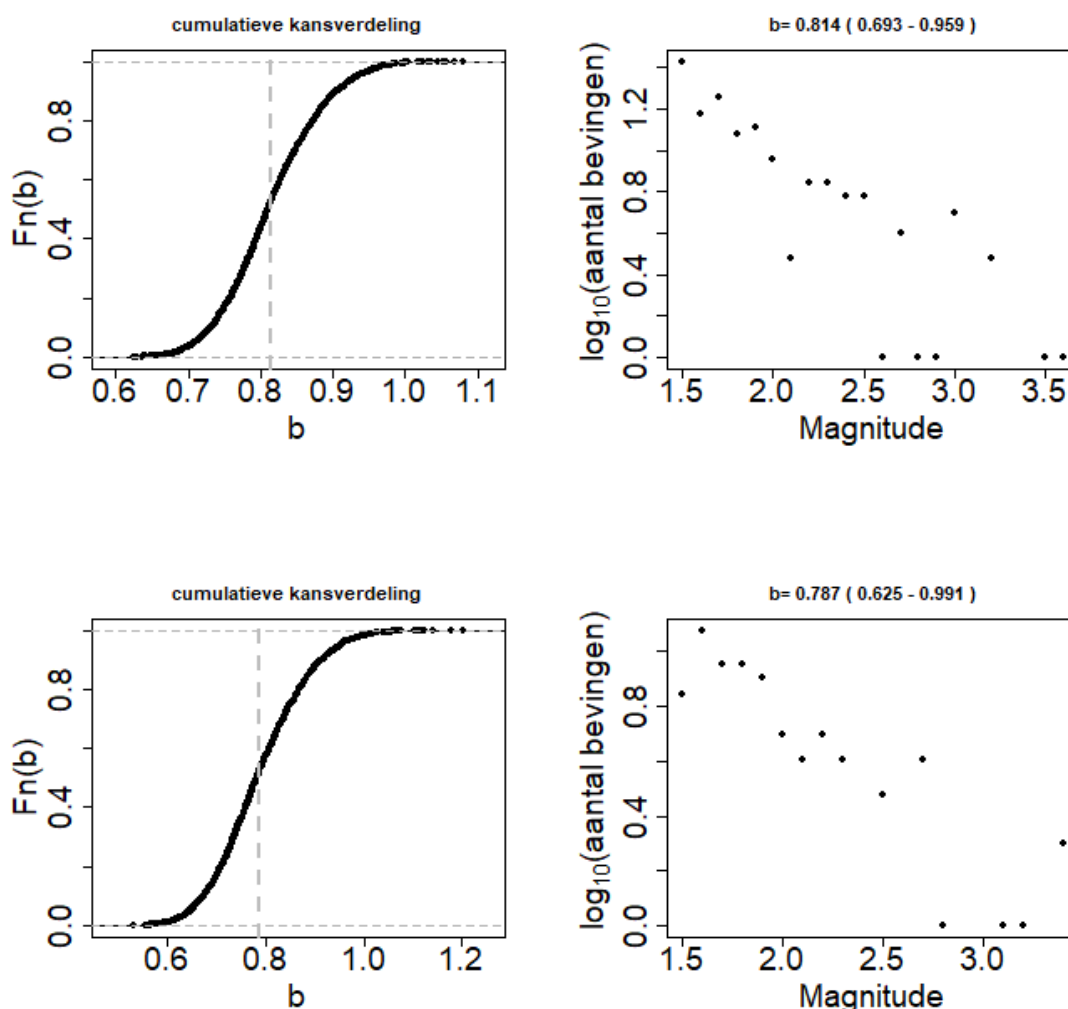


Figuur 4-10: Gutenberg Richter plots voor het hele Groningen-gasveld. Bovenste panelen: Periode 2000 tot 2015. Onderste panelen: periode januari 2015 tot en met oktober 2023

Figuur 4-10 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 4-3. 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.

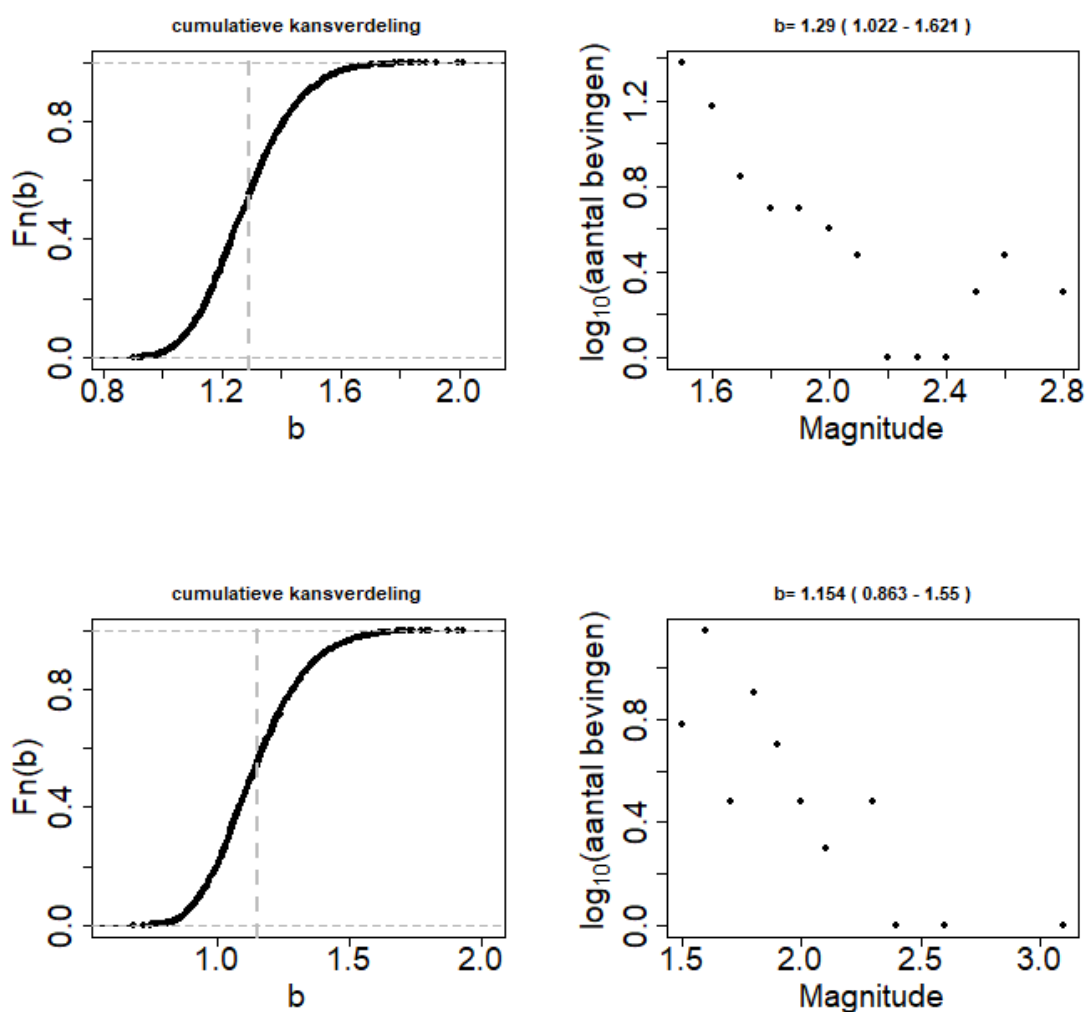
Figuur 4-11 en Figuur 4-12 geven twee Gutenberg-Richter plots voor respectievelijk de omgeving van Loppersum en het gehele veld exclusief de omgeving van Loppersum weer. In Table 4-4 en Table 4-5 zijn de b-waarden met hun betrouwbaarheidsintervallen weergegeven. Over beide beschouwde periodes zijn de b-waarden lager in Loppersum dan in de rest van het Groningen-gasveld. In Loppersum is het aantal aardbevingen met grotere magnitude dus relatief hoger 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 4-11: 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 2023.

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

Gebied Loppersum		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2023
P _{2.5%}	0,69	0,63
P _{50%}	0,81	0,79
P _{97.5%}	0,96	0,99



Figuur 4-12: 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 2023.

Tabel 4-5: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b -waarden waargenomen over het gehele veld exclusief de cluster Loppersum.

Gehele veld exclusief Loppersum		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2023
P _{2.5%}	1,02	0,86
P _{50%}	1,29	1,15
P _{97.5%}	1,62	1,55

In Table 4-6 zijn voor de eerdergenoemde gebieden de b-waarden opgenomen. De b-waarde voor het hele veld lijkt voor de periode vanaf 2015 onveranderd ten opzichte van de periode ervoor.

Tabel 4-6: 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 ($P_{50\%}$) 2015-2023
Gehele Groningen-gasveld	0,94	0,90
Gebied Loppersum	0,81	0,79
Gehele veld exclusief Loppersum	1,29	1,15

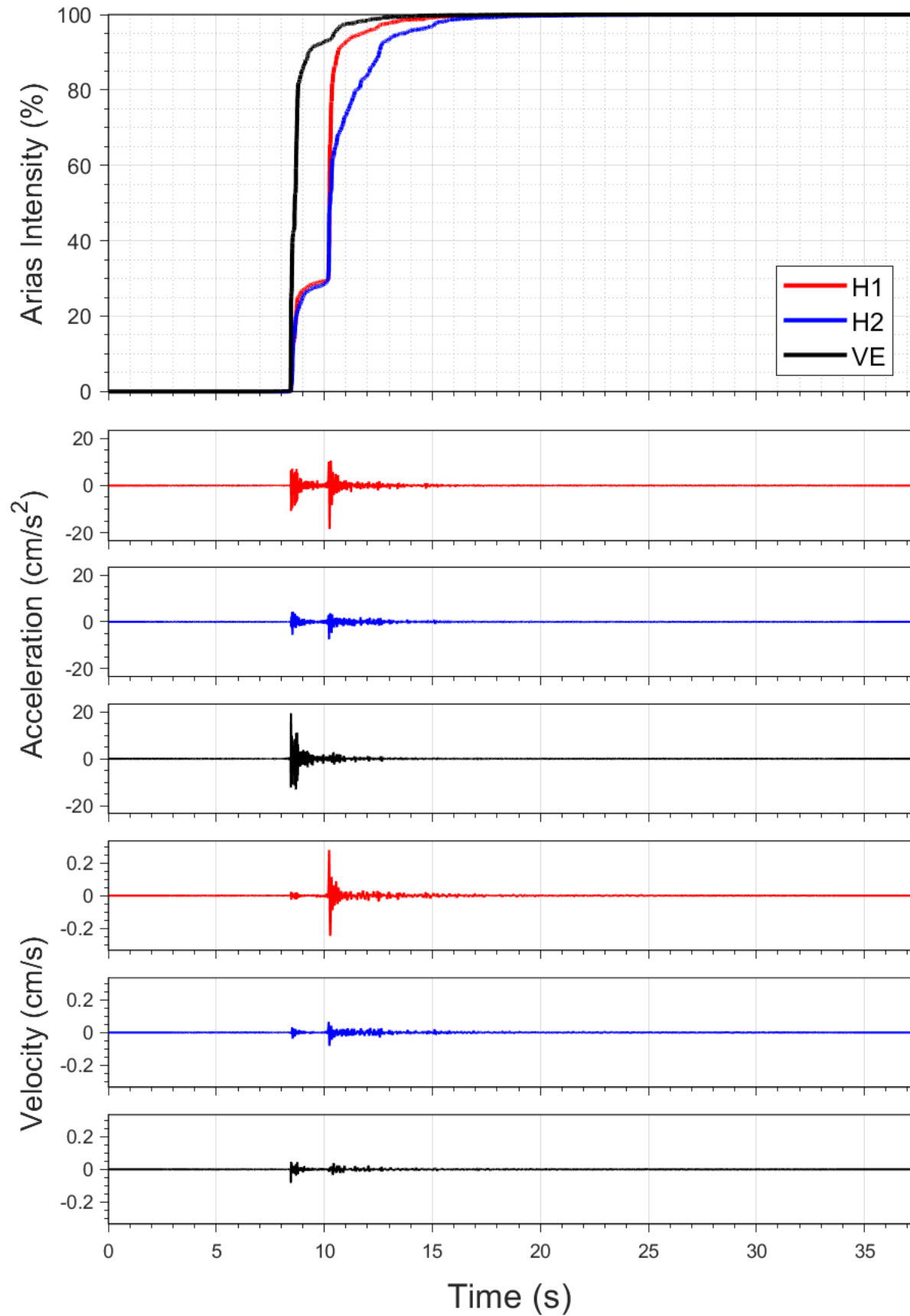
4.3.5 Anomale PGA/PGV bij een bepaalde aardbevings-magnitude

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.

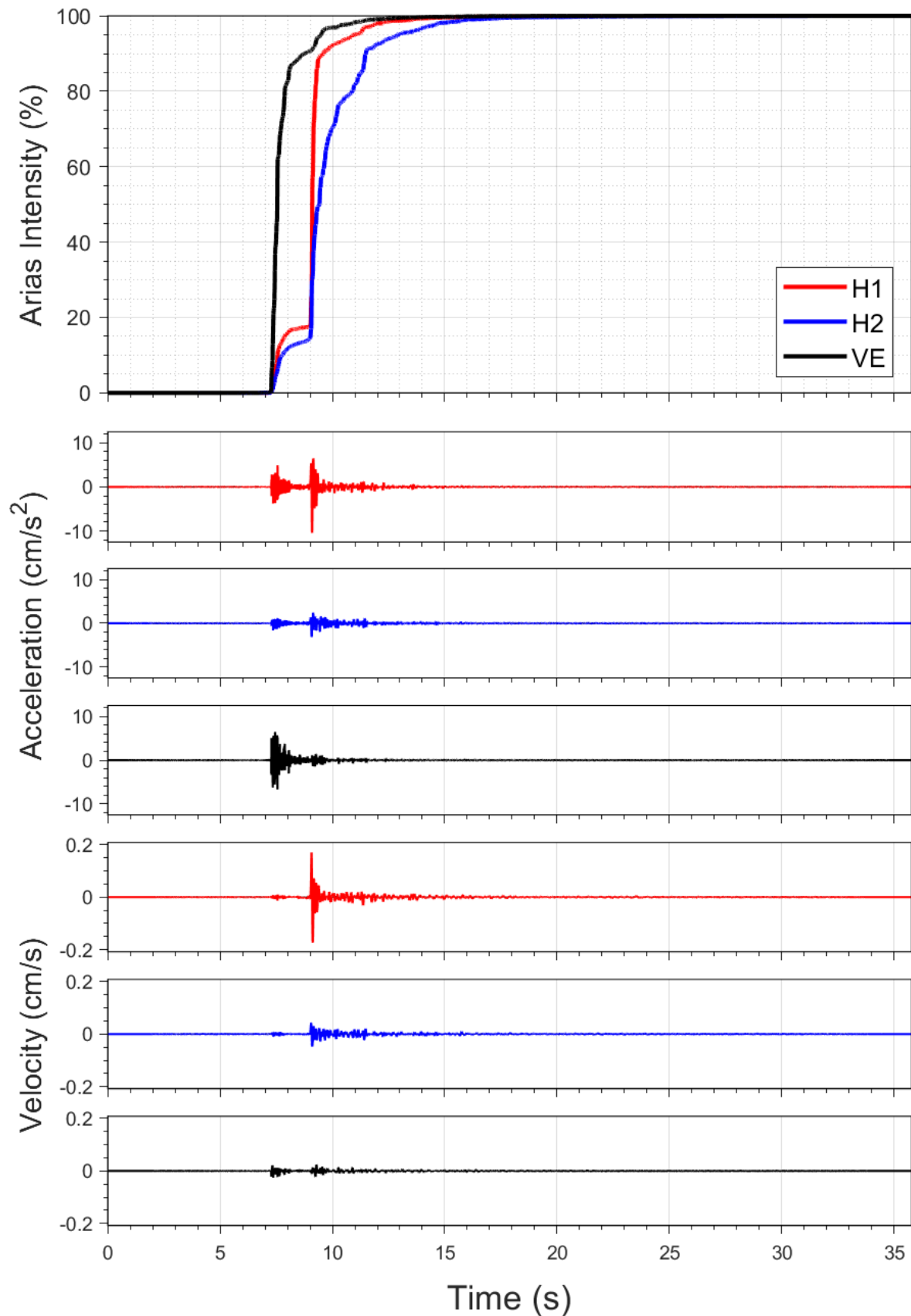
De grootste aardbevingen tijdens de rapportage periode zijn de twee aardbevingen bij Zandweer op 15 september 2023. De hoogste piek grondversnelling (piek ground acceleration, PGA) geregistreerd tijdens de eerste aardbeving met een kracht van $M_L = 2,0$ was $18,41 \text{ cm/s}^2$ (0,02 g) gemeten door het G610-station (H1 (NS)-component). De hoogste PGA van de tweede aardbeving met een kracht van $M_L = 1,9$ was $10,42 \text{ cm/s}^2$ (0,01 g) en werd door hetzelfde station gemeten op dezelfde component.

De grootste PGV-waarden werden ook door hetzelfde station en component geregistreerd: $0,28 \text{ cm/s}$ tijdens de eerste aardbeving met magnitude $M_L = 2,0$ en $0,17 \text{ cm/s}$ en $M_L = 1,9 \text{ cm/s}$ tijdens de tweede aardbeving met magnitude $M_L = 1,9$. Figuren 4-13 en 4-14 tonen de gemeten grond bewegingen voor beide aardbevingen.

Meer informatie over deze twee aardbevingen is beschikbaar in het 'Special Report on the Zandweer Earthquakes on 15th September 2023 with Magnitude $M_L=2.0$ and $M_L=1.9$ respectively' beschikbaar op de NAM web-pagina <https://www.nam.nl/over-nam/onderzoekrapporten.html>.



Figuur 4-13: Gemeten groundbeweging tijdens de eerste aardbeving bij Zandweer op 15 september 2023 ($M_L = 2,0$). Boven wordt de Arias intensiteit getoond. Daaronder worden de grondversnelling in drie richtingen (noord-zuid, oost-west en verticaal) en de snelheid in drie richtingen getoond.

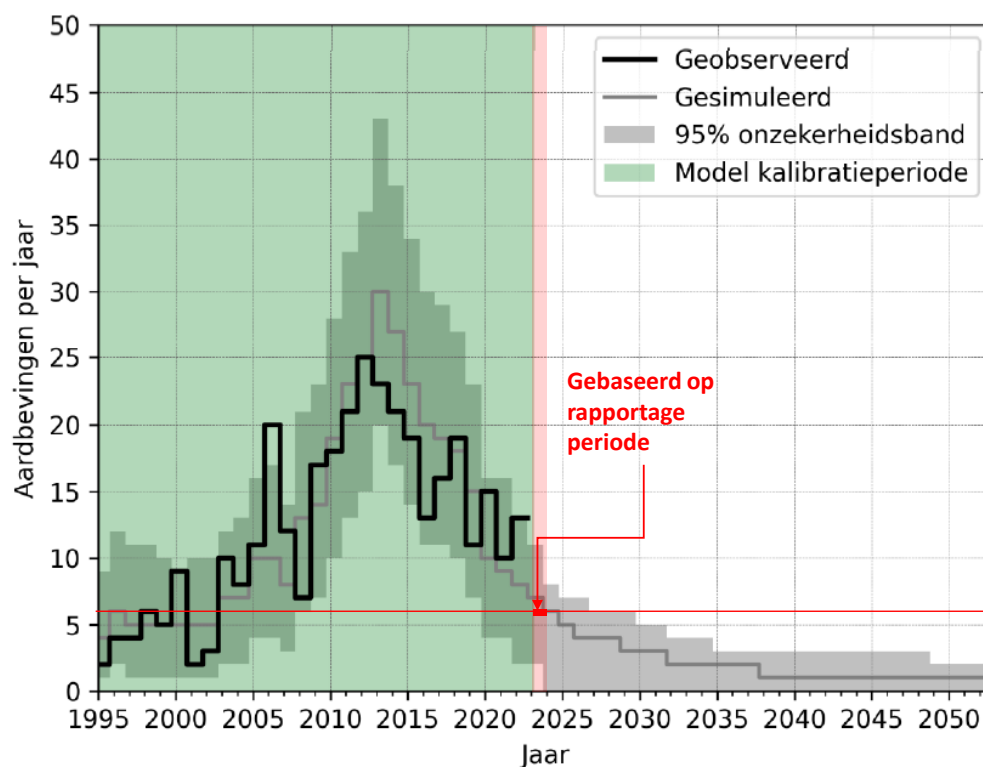


Figuur 4-14: Gemeten grondbeweging tijdens de tweede aardbeving bij Zandweer op 15 september 2023 ($M_L = 1,9$). Boven wordt de Arias intensiteit getoond. Daaronder worden de grondversnelling in drie richtingen (noord-zuid, oost-west en verticaal) en de snelheid in drie richtingen getoond.

4.4 Vergelijking met het SDRA model, HRA model and Rate-and-State model

4.4.1 SDRA model

In April 2023 heeft TNO een nieuwe seismische risico-inschatting gepubliceerd, de TNO-SDRA 2023 (Ref. 20). Deze inschatting is gebaseerd op de aardbevingencatalogus van alle aardbevingen in Groningen met een magnitude van $M_L \geq 1,5$. Figuur 3.1 uit dit rapport toont de opgetreden en voorspelde aardbevingen.



Figuur 3.1: Verwachte seismische activiteit en variatie per gasjaar voor scenario 1. Op de horizontale as staat het kalenderjaar (bereik 1 januari 1995 tot 1 oktober 2052). 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 per gasjaar in het verleden weer tot 1 oktober 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 28 februari 2023.

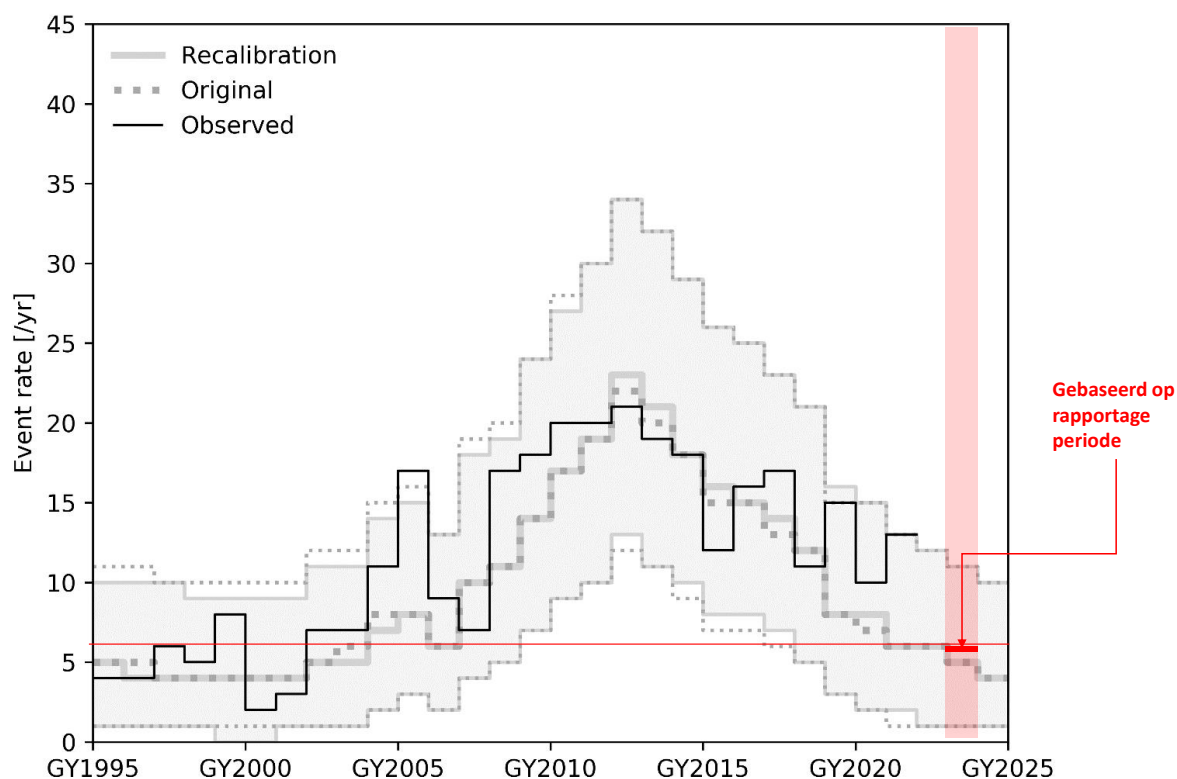
Figuur 4-15: Figuur 3.1 overgenomen uit de SDRA-2023 door TNO (Publieke Seismische Dreigings- en Risicoanalyse Groningen gasveld 2023, TNO Publiek TNO 2023 R10682, 7 april 2023).

Deze figuur 4-15 laat zien dat voor gas-jaar 2022-2023 zeven aardbevingen verwacht worden. Dit voorspelde aantal aardbevingen is onzeker. Het voorspelde aantal zal liggen binnen een band rond het verwachte aantal aardbevingen tussen 2 en 11. In gas-jaar 2022-2023 dat loopt van tot 1 oktober 2022 tot en met 30 september 2023 zijn er negen aardbevingen opgetreden met een magnitude $M_L \geq 1,5$ opgetreden. Dit valt binnen de onzekerheidsband. Echter gebaseerd op de huidige seismische rapportage periode zijn er op jaarbasis 6 aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,5$. Dit ligt onder maar dicht bij het verwachte aantal aardbevingen voor het afgelopen gas-jaar.

4.4.2 HRA model

Als onderdeel van de studie naar de ontwikkeling van de seismiciteit tijdens de drukvereffeningsfase is door NAM het seismologisch model dat onderdeel is van de HRA herijkt met de laatste

aardbevingendata. Deze studie wordt door NAM uitgevoerd op verzoek van SodM (ref. 21). Deze kalibratie is gebaseerd op de aardbevingen die plaats vonden vóór 1 januari 2023 en is gerapporteerd aan SodM op 1 februari 2023 (ref. 22 en 23). Figuur 4-16 toont het aantal aardbevingen in gas-jaren berekend met de HRA.



Figuur 4-16: Figuur A36 overgenomen uit het rapport over de kalibratie ‘Recalibration of the Seismicity Model, 3 February 2023’.

In tabel 4-7 wordt het aantal aardbevingen in een gas-jaar voor de SDRA en de HRA vergeleken.

Tabel 4-7: Vergelijking van het aantal aardbevingen voor gas-jaren tussen SDRA en HRA.

Gas-jaar	SDRA		HRA	
	Range	Mean	Range	Mean
2019-2020	4 – 16	10	3 – 16	8
2020-2021	4 - 16	9	2 – 15	8
2021-2022	2 – 13	8	2 – 13	6
2022-2023	2 – 11	7	1 – 12	6
2023-2024	0 – 8	6	1 – 11	5
2024-2025	0 – 7	5	1 - 10	4

5 Seismiciteit na het sluiten van een gasveld; ervaring met andere gasvelden

5.1 Groningen gasveld is ingesloten

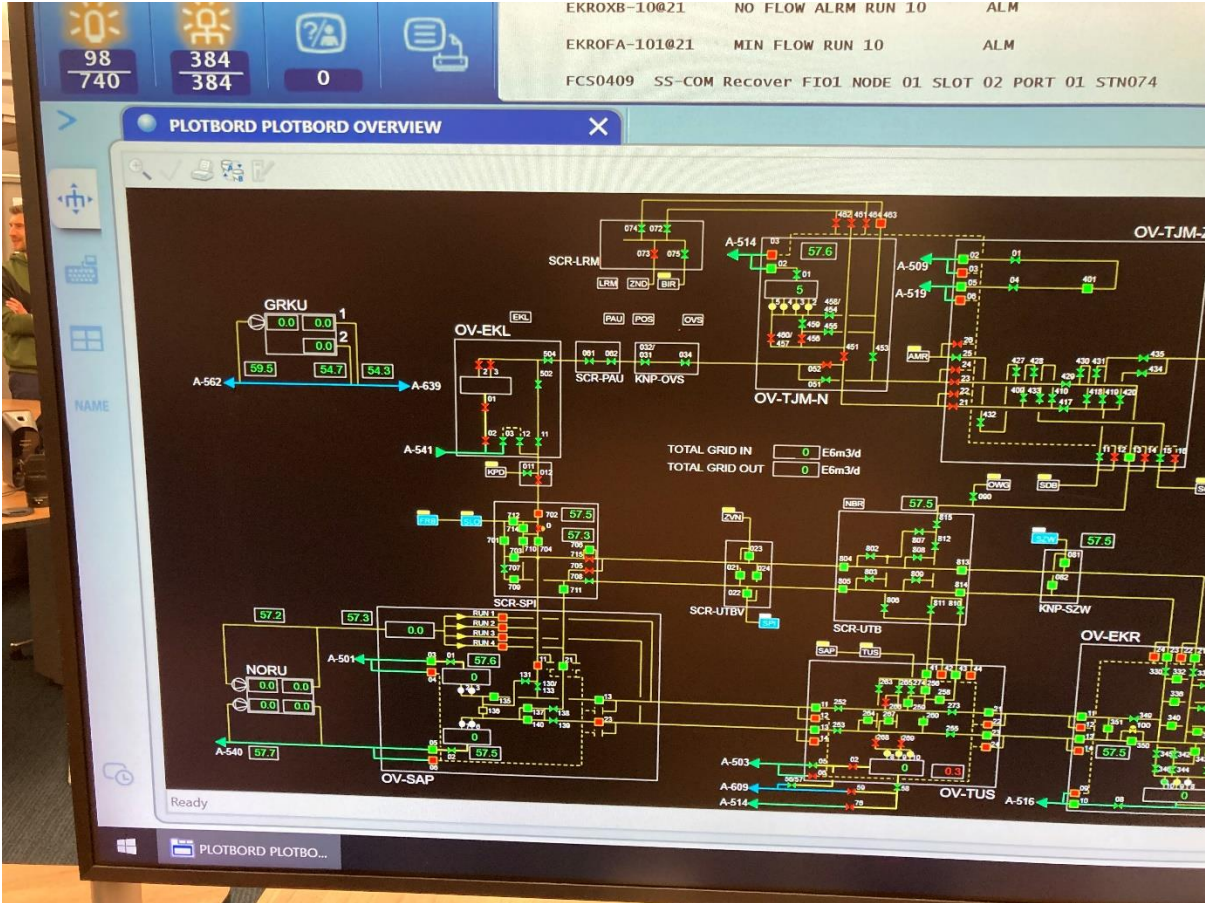
Het kabinet neemt op 22 september 2023 het besluit om de gaswinning uit het Groningen gasveld per 1 oktober 2023 te stoppen. In het besluit houdt het kabinet voor de komende winter de mogelijkheid open om in uitzonderlijke omstandigheden de gaswinning weer op te starten. Staatssecretaris Vrijlbrief bevestigt ook dat hij het veld per 1 oktober 2024 definitief sluit.

Om 6 uur in de ochtend van 1 oktober 2023 (het begin van de eerste gas-dag van het nieuwe gas-jaar), is het Groningen gasveld ingesloten. Dit is de eerste keer sinds 1965 dat uit het Groningen-gasveld geen gas meer wordt produceerd.





RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2023





Figuur 5-1: De productie uit het Groningen gasveld wordt vanuit de controlekamer in Assen gestopt.

Foto 1: De operator legt uit hoe met één druk op de knop het veld zal worden ingesloten. Om vier minuten voor 6 uur drukt hij op de knop.

Foto 2: Langzaam komt de compressor van het Schlochteren productiecluster tot stilstand.

Foto 3: Op het scherm is te zien hoe de kleppen in het productiesysteem sluiten en uiteindelijk na drie minuten de kleppen aan de putmonden ook sluiten.

Foto 4: Het productiesysteem geeft aan dat er geen gas meer door de overslagen naar het Gasunie grid stroomt. 'TOTAL GRID OUT' is nul.

Foto 5: De fotograaf van het ANP legt dit moment vast.

Foto 6: NAM-medewerkers kijken toe hoe het laatste gas wordt geproduceerd.

5.2 Seismiciteit na het sluiten van een gasveld; voorbeeld Annerveen

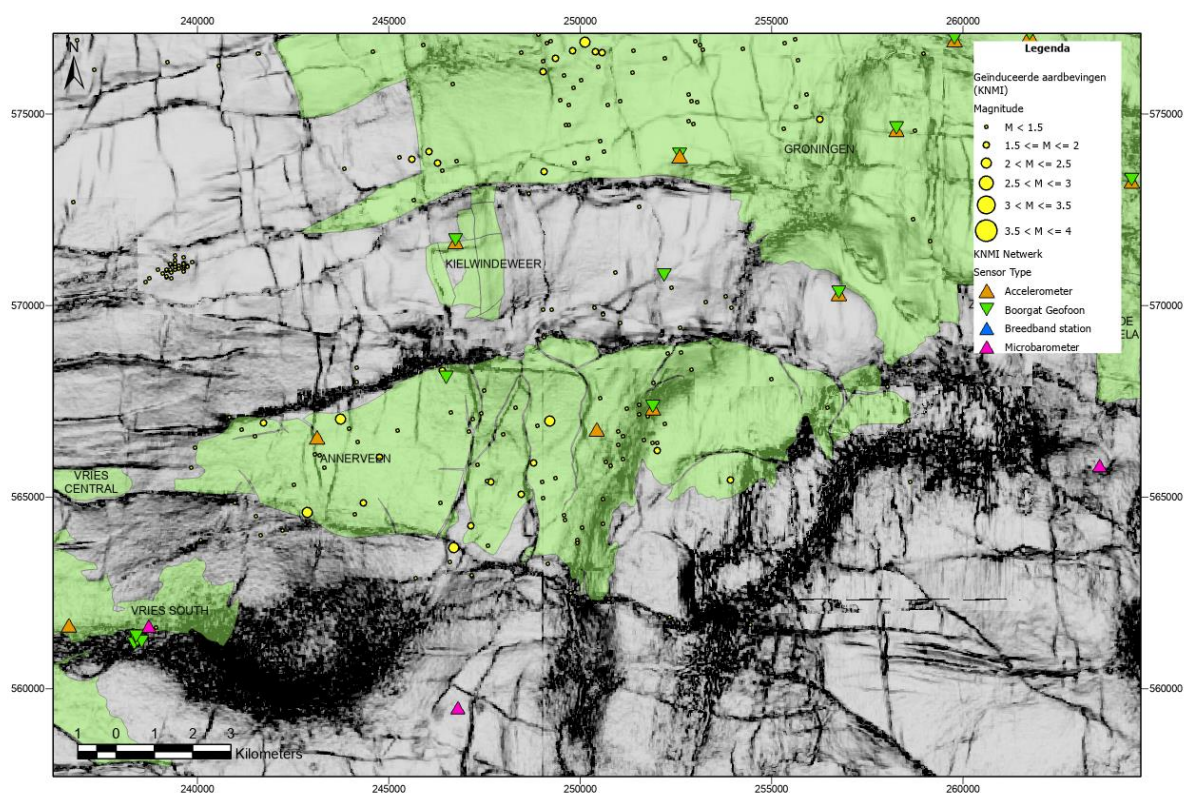
Het Annerveen-gasveld is een relatief groot gasveld en ligt net ten zuiden van het Groningen-gasveld (Figuur 5-2). Het is veel kleiner dan het Groningen-gasveld, maar toch het tweede gasveld wat grootte betreft in Nederland. Ook het Annerveen-gasveld kent een verleden van aardbevingen en heeft gas geproduceerd uit hetzelfde reservoirinterval. Daarmee is het Annerveen-gasveld een analoog voor het Groningen-gasveld. Het Annerveen-gasveld is eerder ingesloten dan het Groningen-gasveld en daarom, op langere termijn, wellicht interessant om iets te zeggen over de kans op aardbevingen na het insluiting van een gasveld.

Het Annerveen-gasveld ligt ten zuiden van het Groningen-gasveld en ligt net als het Groningen-gasveld op het structurele element "Groningen hoog". De semblance map toont het breukenpatroon voor het zuiden van het Groningen-gasveld en het Annerveen-gasveld. Dit patroon is vergelijkbaar voor de twee gebieden. Op basis van structurele setting en vergelijkbaar breukpatroon is het mogelijk dat het Annerveen-gasveld een goede analoog vormt voor het Groningen-gasveld voor de inschatting van seismisch gedrag en met het seismisch gedrag na insluiting. In Figuur 5-4 valt waar te nemen dat het merendeel van de seismiciteit is waargenomen na 1995. Hierbij speelt een rol dat in 1995 een seismisch monitoringnetwerk boven het Annerveen-gasveld is aangelegd. Rond 2015 valt een piek waar te nemen in de seismische energie per jaar die wordt veroorzaakt door 2 relatief grotere

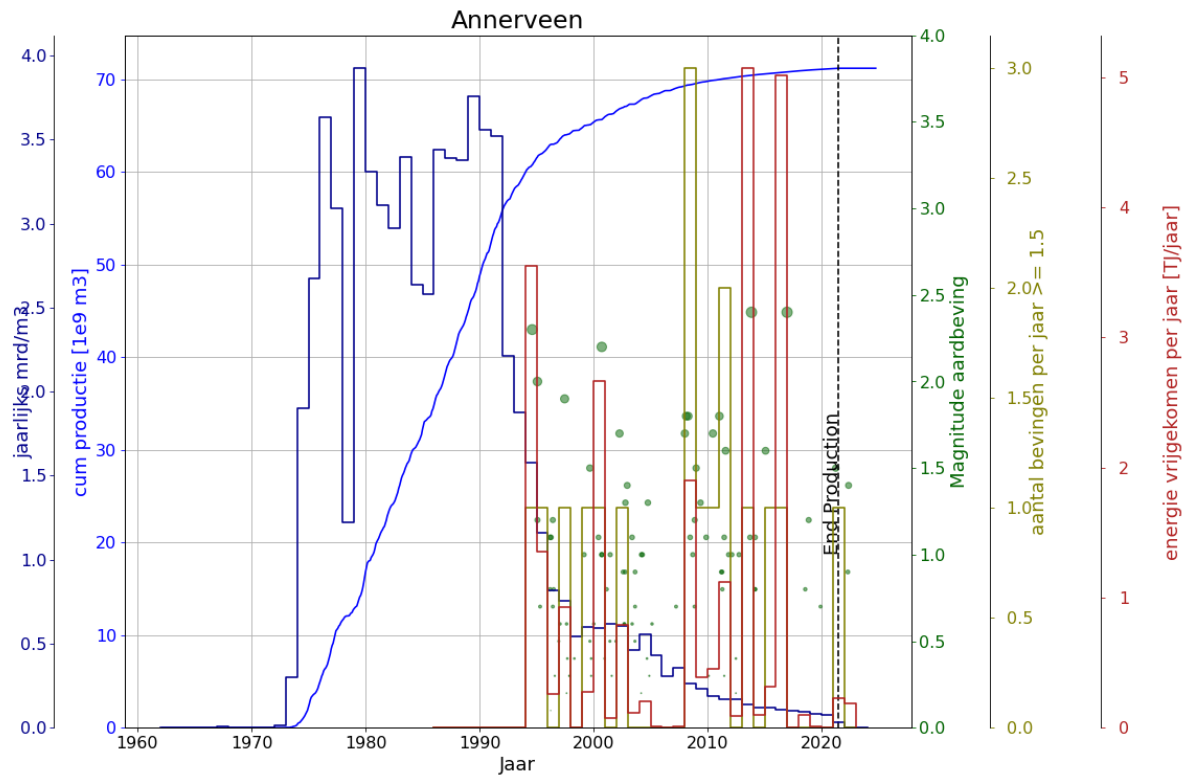
aardbevingen. Na deze periode neemt de seismische energie per jaar sterk af. Het Annerveen-gasveld is in juni 2021 ingesloten (Figuur 5-4). De laatste, van de 100 geregistreerde bevingen in Annerveen zijn een jaar later waargenomen.

Door het relatief geringe aantal aardbevingen kunnen op dit moment nog weinig conclusies worden. Zo valt waar te nemen dat een rustige seismische periode ook voorkwam tussen 2011 en 2018. Annerveen zal door NAM verder gevolgd worden om het geomechanisch gedrag na insluiting verder te onderzoeken en te begrijpen wat dit voor het Groningen-gasveld kan betekenen.

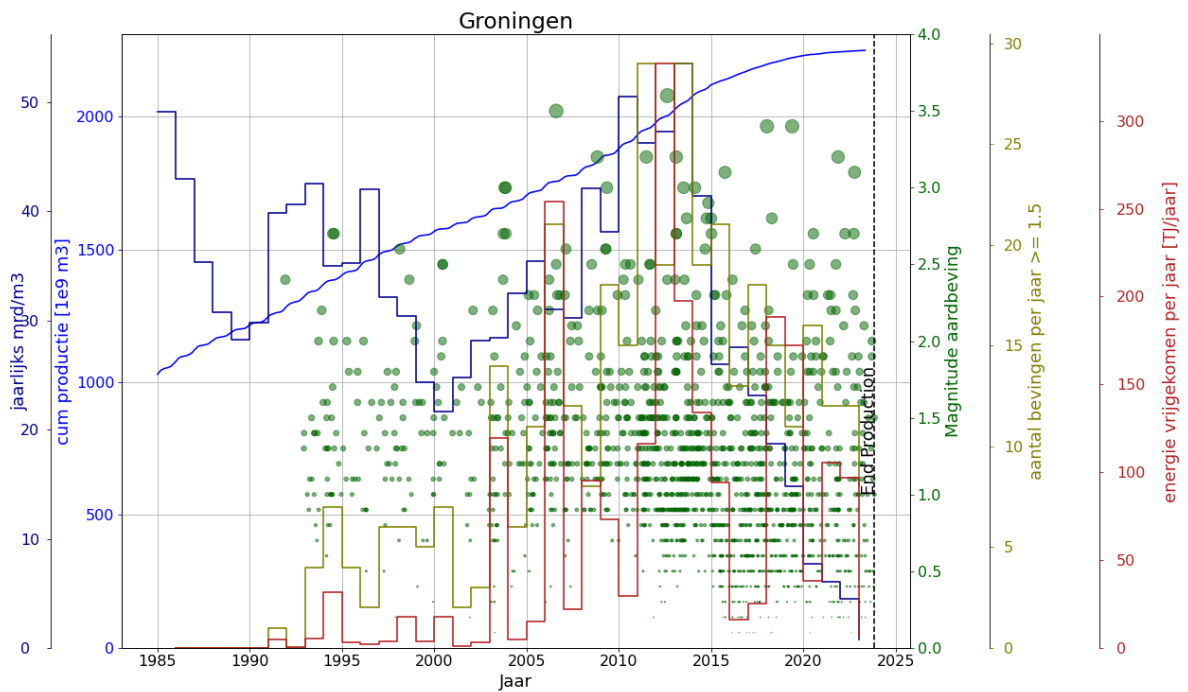
Hetzelfde figuur (Figuur 5-4) is ook voor het Groningen-veld gemaakt. De seismische energie per jaar laat een sterke afname zien na 2013. Deze trend is vergelijkbaar met de trends die waar te nemen zijn in Figuur 4-4 en Figuur 4-5.



Figuur 5-2: Annerveen gasveld, geprojecteerd op een semblance kaart voor de top Boven-Rotliegend Groep. De donkere lijnen geven de breuklijnen aan.



Figuur 5-3: De gasproductie en aardbevingen voor Annerveen gasveld.



Figuur 5-4: De gasproductie en aardbevingen voor het Groningen gasveld.

6 Referenties

1. Advies over de actualisatie van de trendparameters en de bijbehorende grenswaarden in artikel 1.3a van de Mijnbouwregeling, SodM, 16 juni 2020.
2. 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.
20. Publieke Seismische Dreigings- en Risicoanalyse Groningen gasveld 2023, TNO Publiek TNO 2023 R10682, 7 april 2023.
21. Study Plan seismicity groningen during pressure equilibration period, NAM, November 2022.

22. Recalibration of the Seismicity Model, NAM, Februari 2023.
23. Seismicity Recalibration 2023, NAM, Februari 2023.
24. Special Report on the Wirdum Earthquake 8th October 2022 with Magnitude ML=3.1 Oct 2022
25. Special Report on the two Zandweer Earthquakes on 15th September 2023 with Magnitude ML=2.0 and ML=1.9 respectively, Michail Ntinalexis, Oct 2023.

Appendix A – Overzicht periodieke rapportages en speciale rapportages seismiciteit Groningen

Title	Date
Rapportage recente aardbevingen Wirdum en Garsthuizen 2016/2017	mei 2017
Ground Motions from the M_L 2.6 Slochteren Earthquake of 27 th 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 nd 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 nd May 2020	mei 2020
Special Report on the Loppersum $M_L=2.7$ earthquake of 14 th June 2020	aug 2020
Special Report on the Zeerijp Earthquake Swarm starting 4 th October 2021	okt 2021
Supplement to special Report on the Zeerijp Earthquake Swarm starting 4 th October 2021	nov 2021
Special Report on the Garrelswaer 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 th October 2022 with Magnitude $M_L=3.1$	okt 2022
Special Report on the two Zandweer Earthquakes on 15 th September 2023 with Magnitude $M_L = 2.0$ and $M_L = 1.9$ respectively	okt 2023

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

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

Appendix B – Aardbevingscatalogus 1 november 2023 tot 31 oktober 2023 (door KNMI)

Plaats	Datum	Time hh:mm:ss	Magnitude	Diepte km	Easting	Northing
Zuidwolde	3-nov-22	18:29:53	0,6	3	236520	587298
Garmerwolde	4-dec-22	07:31:42	0,6	3	238886	585558
Zuidbroek	4-dec-22	15:36:02	0,9	3	252223	576458
Wirdum	6-dec-22	11:08:43	1,7	3	248980	591756
Woudbloem	14-dec-22	20:08:37	1	3	245337	583337
Garrelsw eer	20-dec-22	14:51:23	0,4	3	247831	592513
Froombosch	22-dec-22	23:04:47	1,9	3	246986	580919
Loppersum	26-dec-22	16:18:17	1	3	244389	594785
Thesinge	28-dec-22	21:33:14	0,4	3	238405	586328
Garsthuizen	3-jan-23	09:38:31	1,3	3	244774	599134
Garsthuizen	15-jan-23	09:49:09	1,8	3	244774	599134
Schildwolde	22-jan-23	02:13:36	0,3	3	250944	583557
Loppersum	31-jan-23	14:09:06	1,2	3	246238	595711
Sappemeer	8-feb-23	13:47:21	1,6	3	249070	573502
Appingedam	19-feb-23	17:52:48	0,4	3	250134	594117
Overschild	21-feb-23	20:39:35	0,6	3	250213	590111
Overschild	23-feb-23	21:00:31	0,2	3	250213	590111
Zandeweer	28-feb-23	08:18:31	1,1	3	240393	602171
Oosterw ijtwerd	11-mrt-23	09:35:55	1,0	3	250658	594572
Uithuizen	21-mrt-23	21:48:28	1,4	3	241773	603086
Scharmer	23-mrt-23	20:54:42	1,2	3	243377	580963
Tjuchem	09-Apr-23	11:36:37	0,4	3	256335	587676
Steendam	11-Apr-23	09:08:47	1,6	3	250929	587676
Zijldijk	12-Apr-23	16:47:27	2,1	3	246475	600725
Steendam	15-Apr-23	20:23:23	0,7	3	251064	587567
Garrelsw eer	19-Apr-23	21:02:51	0,8	3	247742	590285
Garrelsw eer	3-mei-2023	07:40:21	0,6	3	245687	593140
Harkstede	7-mei-2023	13:46:06	0,2	3	242290	581945
Westerw ijtwerd	7-mei-2023	17:57:17	0,3	3	239823	593033
Zijldijk	8-mei-2023	07:17:46	0,5	3	246612	600505
Froombosch	9-juni-2023	00:26:45	0,7	3	248071	580161
Oosterw ijtwerd	17-juni-2023	15:42:57	0,5	3	250329	594343
Muntendam	20-juni-2023	05:22:36	1,0	3	255661	575193
Appingedam	9-juli-2023	01:08:59	1,5	3	251075	593690
Uithuizen	21-juli-2023	03:57:19	0,4	3	241576	602971
Garrelsw eer	1-aug-2023	14:53:35	0,5	3	247129	590941
Noordbroek	4-aug-2023	05:31:15	0,5	3	256485	580554
Garmerwolde	18-aug-2023	01:44:18	0,3	3	240221	585582
Groningen	25 -aug-2023	01:42:01	0,0	3	237561	584979
Loppersum	31-aug-2023	23:47:52	1,3	3	244464	594342
Zandeweer	15-sept-2023	08:19:02	2,0	3	240777	599283
Zandeweer	15-sept-2023	13:31:25	1,9	3	240777	599283
Eppenh uizen	2-okt-2023	19:37:21	0,5	3	240977	599287
Zuidwolde	6-okt-2023	05:34:15	1,1	3	238274	586215
Nieuwolda	22-okt-2023	11:51:22	0,4	3	261167	583438

Tabel B Aardbevingen geregistreerd door het seismisch monitoring netwerk tussen 1 november 2022 en 31 oktober 2023 (huidige en de vooraf gaande rapportage periodes).

