



RAPPORTAGE SEISMICITEIT
GRONINGEN – MEI 2023



[Deze pagina is opzettelijk leeg gelaten]

Inhoudsopgave

1	Overzicht	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 met hoogste magnitude	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	13
3.2	Aardbevingsdichtheid	14
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	20
	Verloop van het aantal aardbevingen door de tijd	20
	Verband productie en seismiciteit per cluster en productielocatie	22
	Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd	24
	Verhouding tussen grote en kleine aardbevingen	25
	Anomale PGA/PGV bij een bepaalde aardbevings-magnitude	32
4.4	Vergelijking met het SDRA-model en HRA-model	34
4.4.1	SDRA-model	34
5	Referenties	35
	Appendix A – Overzicht periodieke rapportages en speciale rapportages seismiciteit Groningen	37
	Appendix B – Aardbevingscatalogus 1 mei 2022 tot 1 mei 2023 (door KNMI)	38

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 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 licht gedaald van 11 (1 mei 2022 tot en met 31 oktober 2022) naar 10 (1 november 2022 tot en met 30 april 2023). Voor een magnitude groter dan of gelijk aan $M_L \geq 1,5$ is het aantal geregistreerde aardbevingen in de afgelopen zes maanden gedaald van 7 naar 6. De seismiciteit in de afgelopen observatieperiode van zes maanden (van 1 november 2022 tot en met 30 april 2023) vertoont daarmee een licht dalende trend ten opzichte van de vorige observatieperiode. Dit wordt in meer detail omschreven in paragrafen 4.1 tot 4.3.

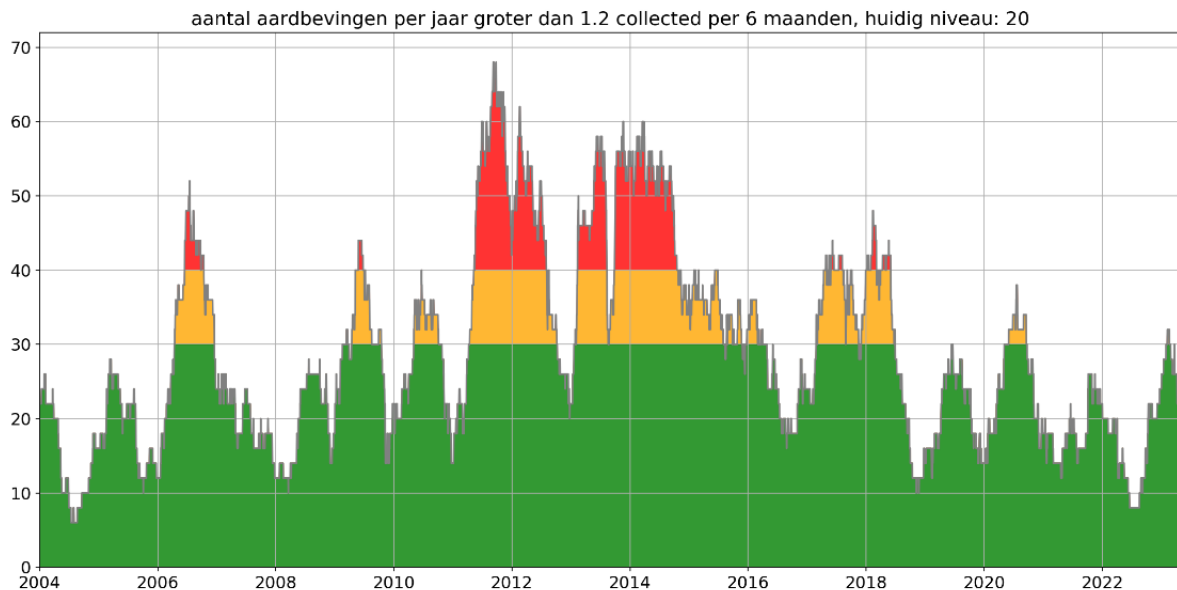
Tabel 1-1: Aardbevingen in Groningen met een kracht $M_L \geq 1,2$ geregistreerd door het KNMI seismisch monitoringsnetwerk in de 6-maanden observatieperiode van 1 november 2022 tot en met 30 april 2023. Locatie van het hypocentrum is gebaseerd op de KNMI-aardbevingscatalogus.

Plaats	Datum	Time hh:mm:ss UTC	Magnitude	Diepte km	Easting	Northing
Wirdum	6-dec-22	11:08:43	1,7	3	248980	591756
Froombosch	22-dec-22	23:04:47	1,9	3	246986	580919
Garsthuizen	3-jan-23	09:38:31	1,3	3	244774	599134
Garsthuizen	15-jan-23	09:49:09	1,8	3	244774	599134
Loppersum	31-jan-23	14:09:06	1,2	3	246238	595711
Sappemeer	8-feb-23	13:47:21	1,6	3	249070	573502
Uithuizen	21-mrt-23	21:48:28	1,4	3	241773	603086
Scharmer	23-mrt-23	20:54:42	1,2	3	243377	580963
Steendam	11-apr-23	09:08:47	1,6	3	250929	587676
Zijldijk	12-apr-23	16:47:27	2,1	3	246475	600725

Afgezien van november 2022 zijn er in de afgelopen zes maanden elke maand aardbevingen geregistreerd.

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.

In de vorige rapportage periode zijn vooral aardbevingen geregistreerd als zwermen in drie relatief kleine gebieden in het noordoosten van het gasveld rond het dorp Uithuizen, Wirdum/Garrelsweer en Zeerijp. In deze rapportage periode zijn de aardbevingen geregistreerd over een groter gebied.



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.

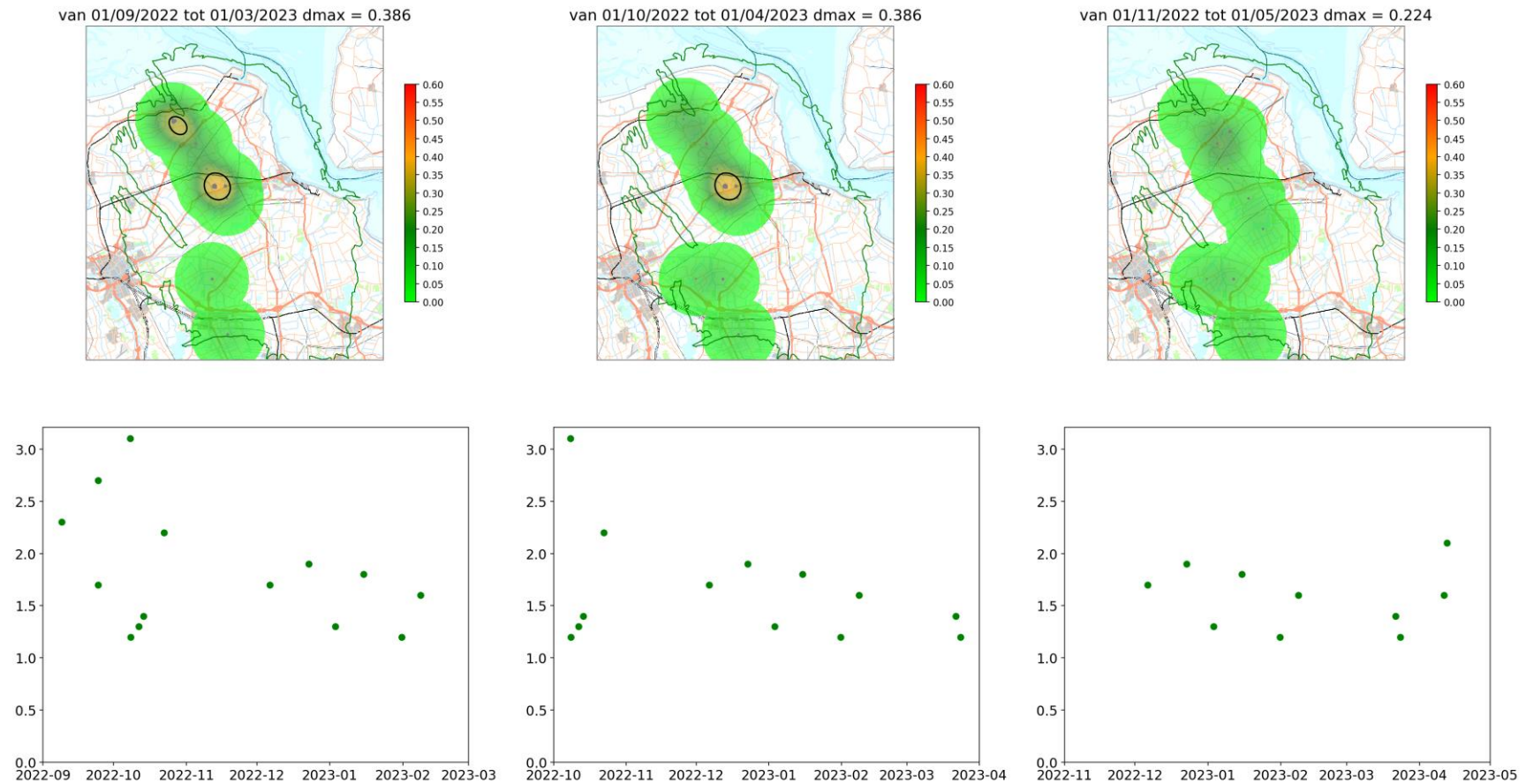
1.2 Aardbevingsdichtheid

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.

In de voorgaande periode (van 1 mei 2022 tot met 31 oktober 2022) zijn veel van de aardbevingen geregistreerd in een kleine gebieden rond Uithuizen en Wirdum/Garrelsweer. Dit veroorzaakte een hoge aardbevingsdichtheid in deze gebieden. Voor de afgelopen periode vallen de epicentra van de aardbevingen over een groter gedeelte van het Groningen-gasveld. Hierdoor is de maximale aardbevingsdichtheid in het gasveld in de afgelopen periode gedaald. Omdat veel van de aardbevingen in de zwermen tijdens de voorgaande periode in oktober 2022 plaats vonden is de aardbevingsdichtheid vooral in april sterk gedaald (van 0,386 naar 0,224 aardbevingen per km^2 jaar).

RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – MEI 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 maart 2023. De middelste figuren geven deze weer op 1 april 2023 en de rechter figuren op 1 mei 2023.

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 november 2022 tot en met 30 april 2023 zijn er 10 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 6 aardbevingen.

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 Zijldijk aardbeving met een magnitude van $M_L=2,1$ op 12 april 2023 was $16,77 \text{ cm/s}^2$ (0,017 g). De hoogste PGV die is geregistreerd tijdens deze aardbeving is $0,27 \text{ cm/s}$. Het monitoringstation waar deze maximale PGA en PGV zijn gemeten (G090) ligt op een afstand van 2,5 km van het epicentrum. De hoogst gemeten grondbeweging tijdens deze rapportage periode is aanzienlijk lager dan de hoogst gemeten grondbeweging tijdens de voorgaande registratieperiode.

1.5 Aardbevingen met hoogste magnitude

De aardbeving met de grootste magnitude tijdens de vorige 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. De aardbeving met de hoogste magnitude is de recente rapportage periode was de aardbeving bij Zijldijk op 12 april 2023. Deze had een magnitude van $M_L=2,1$.

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.

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 mei 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 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	Waarnemingsniveau	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 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.

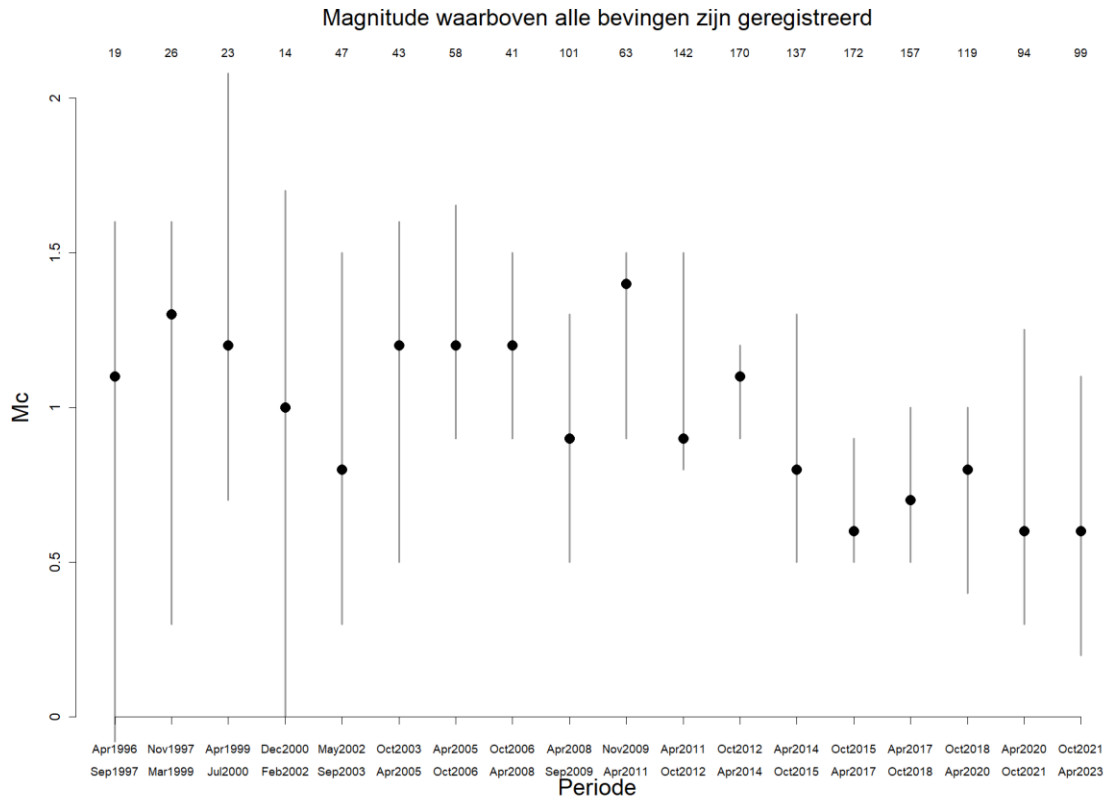
Het seismische meetnetwerk boven het Groningen-gasveld is in 2014 uitgebreid met 69 nieuwe seismische meetstations. Hierdoor is de gevoeligheid van het meetnetwerk toegenomen. In de periode van 2003 tot en met 2014 werden alle aardbevingen in het Groningen-gasveld met een magnitude groter dan $M_L \geq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

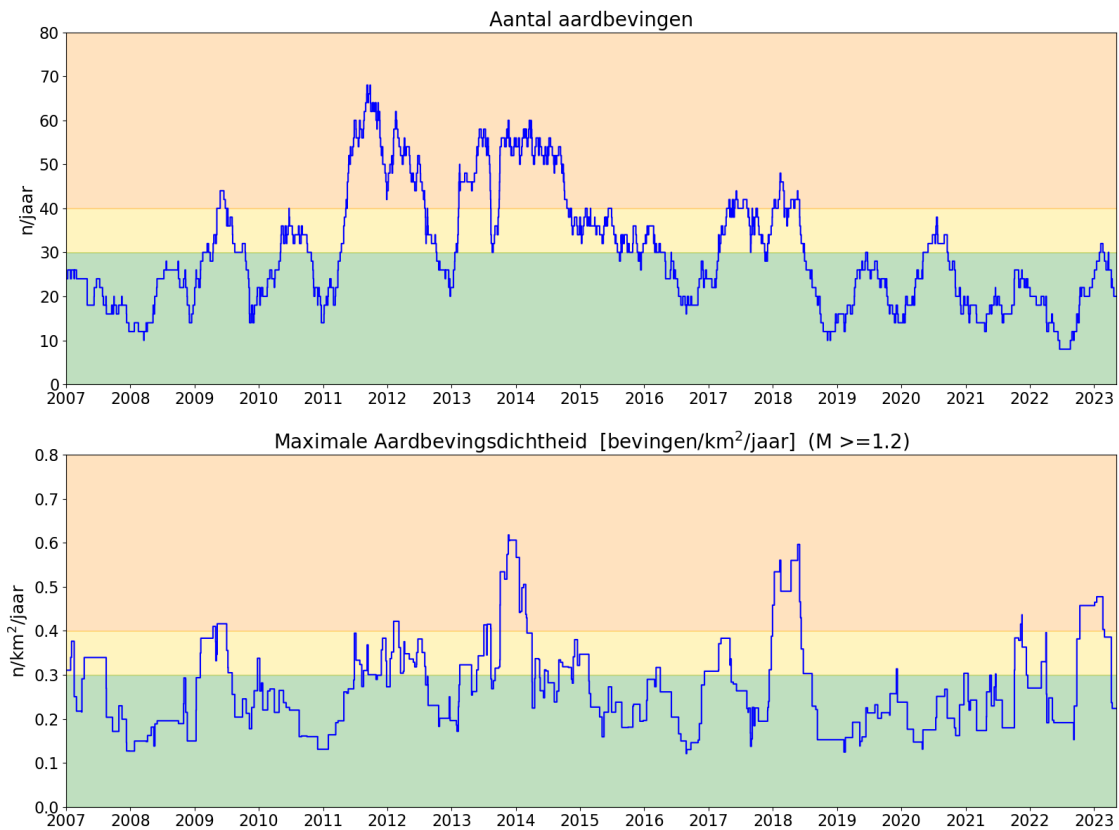
De MoC is afgeleid volgens de maximum curvature method (Ref. 3 en 4) en de resultaten met het 95% betrouwbaarheidsinterval zijn weergegeven in figuur 2-1. In het figuur is duidelijk zichtbaar dat vanaf 2014 de MoC afneemt (ook kleinere aardbevingen worden geregistreerd). Vanaf 2014 zijn aardbevingen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

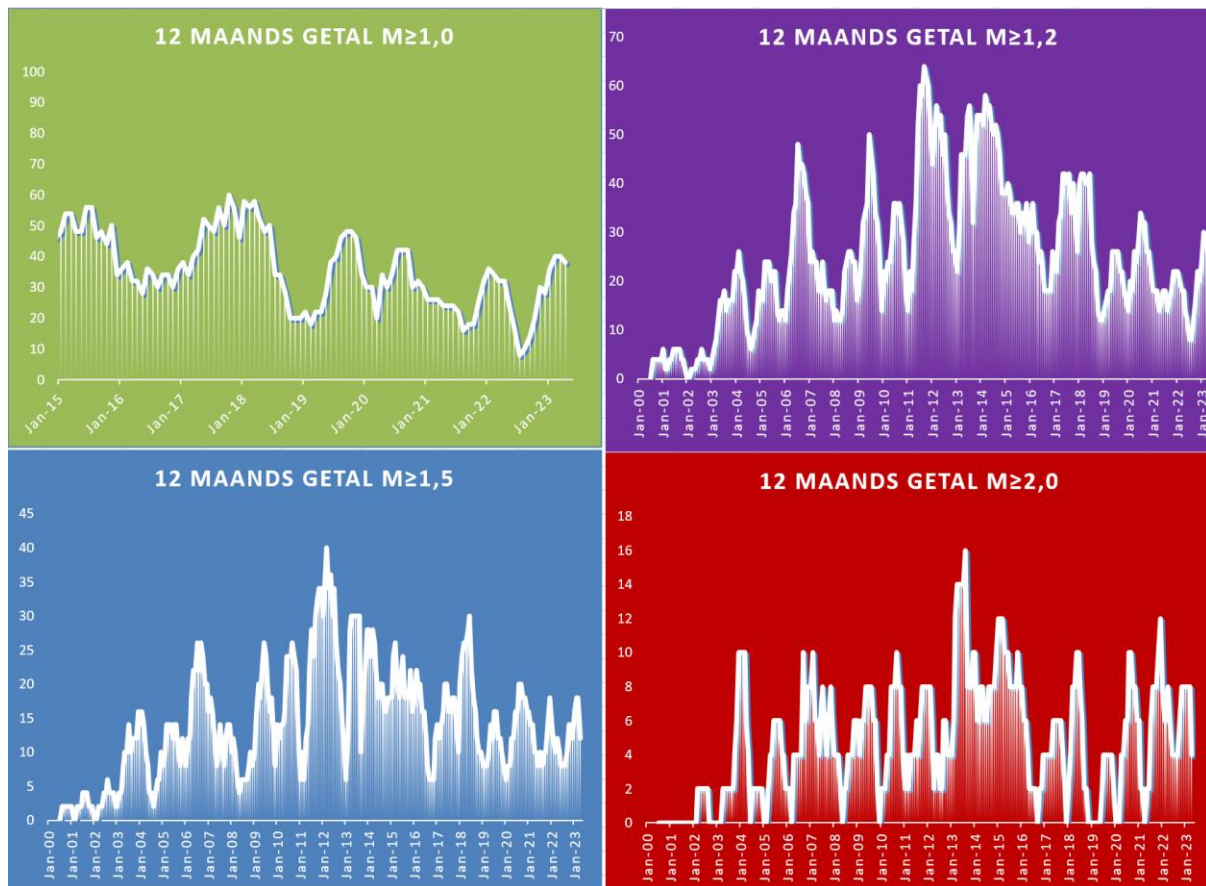
Tabel 3-1 Trendparameter overzicht 1 november 2022 tot en met 30 april 2023. Aantal aardbevingen per voorgaande jaar en aardbevingsdichtheid (aantal aardbevingen per jaar per vierkante kilometer) zijn aangegeven op het einde van de maand.

	nov	dec	jan	feb	Mrt	apr
Aantal aardbevingen ($M_L \geq 1,2$)	0	2	3	1	2	2
Aardbevingsdichtheid (einde maand)	0,457	0,457	0,478	0,386	0,386	0,224

3.1 Trendparameter aantal aardbevingen

De trendparameter “Aantal aardbevingen” toont het aantal waargenomen aardbevingen met een magnitude $M_L=1,2$ of groter in het voorgaande jaar. Dit wordt ook het rollende aantal of 12-maandsgetal genoemd. Dit wordt berekend over de voorgaande zes maanden. Het 12-maandsgetal van mei 2023 is dus de som van het aantal aardbevingen van een bepaalde magnitude in de voorafgaande periode van 1 november 2022 tot 30 april 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 de voorgaande 6 maanden. Deze zijn omgerekend naar jaarbasis.

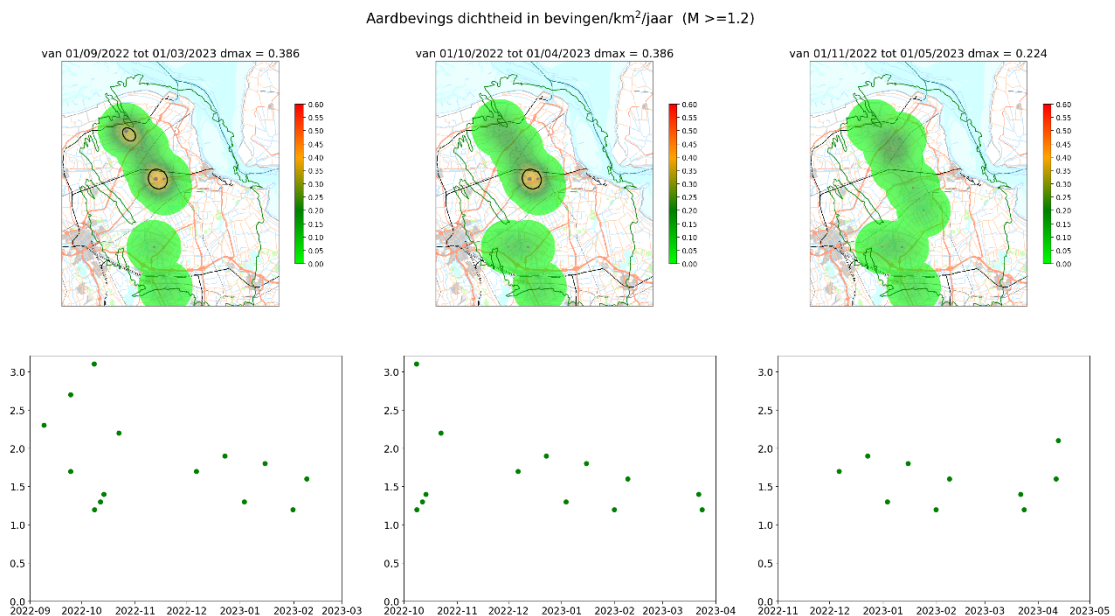
De dalende trend in het aantal aardbevingen (met magnitude groter dan of gelijk aan $M_L = 1,0$, $M_L = 1,2$ en $M_L = 1,5$) zou het gevolg kunnen zijn van de verlaagde productievolumes en de manier van opereren maar ook van de natuurlijke variabiliteit. Het lage aantal events maakt het lastig conclusies 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 november 2022 tot en met 30 april 2023 geregistreerde aardbevingen. Aardbevingsdichtheid wordt berekend met de Quartic Kernel functie. Alle geregistreerde aardbevingen met een magnitude van $M_L = 1,2$ en groter zijn hierin opgenomen. De berekende aardbevingsdichtheid wordt getoond door middel van een kleurenschaal. Als trendparameter wordt de maximale waarde van de berekende aardbevingsdichtheid over de voorgaande zes maanden gebruikt.

In de voorgaande periode (van 1 mei 2022 tot en met 31 oktober 2022) zijn veel van de aardbevingen geregistreerd in een kleine gebieden rond Uithuizen en Wirdum/Garrelsweer. 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 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.

Voor de afgelopen period vallen de epicentra van de aardbevingen over een groter gedeelte van het gasveld. Hierdoor is de maximale aardbevingsdichtheid in het gasveld gedaald in de afgelopen periode gedaald. Omdat veel van de aardbevingen in de zwermen tijdens de voorgaande period in oktober plaats vonden is de aardbevingsdichtheid vooral in april sterk gedaald.



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 maart 2023. De middelste figuren geven deze weer op 1 april 2023 en de rechter op 1 april 2023.

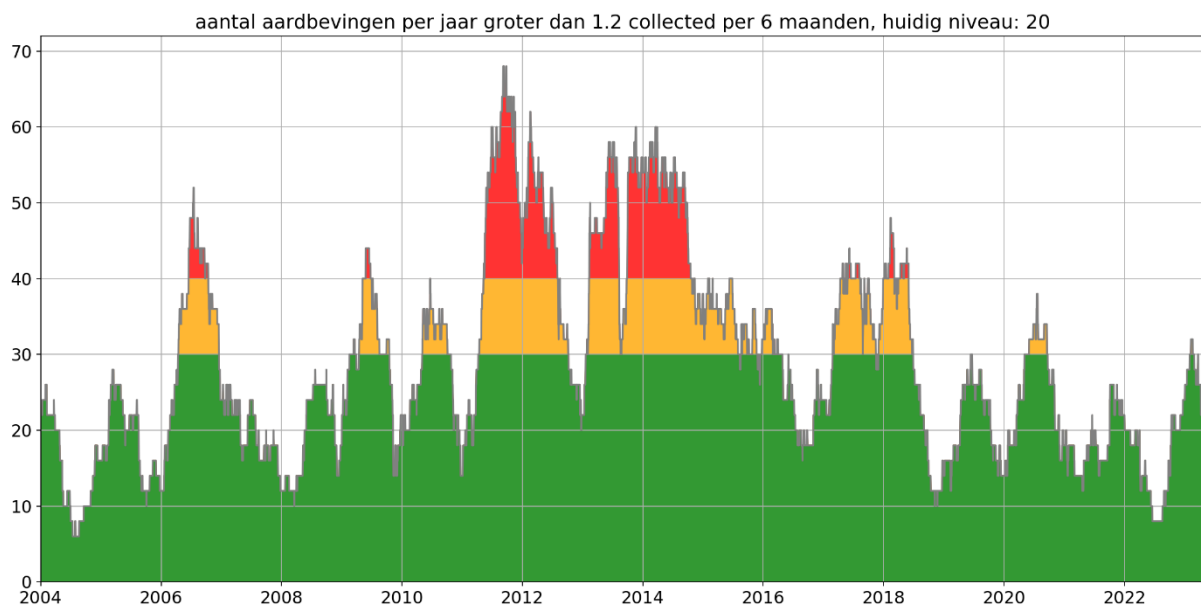
4 Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit

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 10 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 20 aardbevingen op jaarbasis. Na een stijging in het begin van de observatieperiode tot xx aardbevingen per jaar, zette in de eerste maanden van 2023 een daling in (Figuur 4-1).



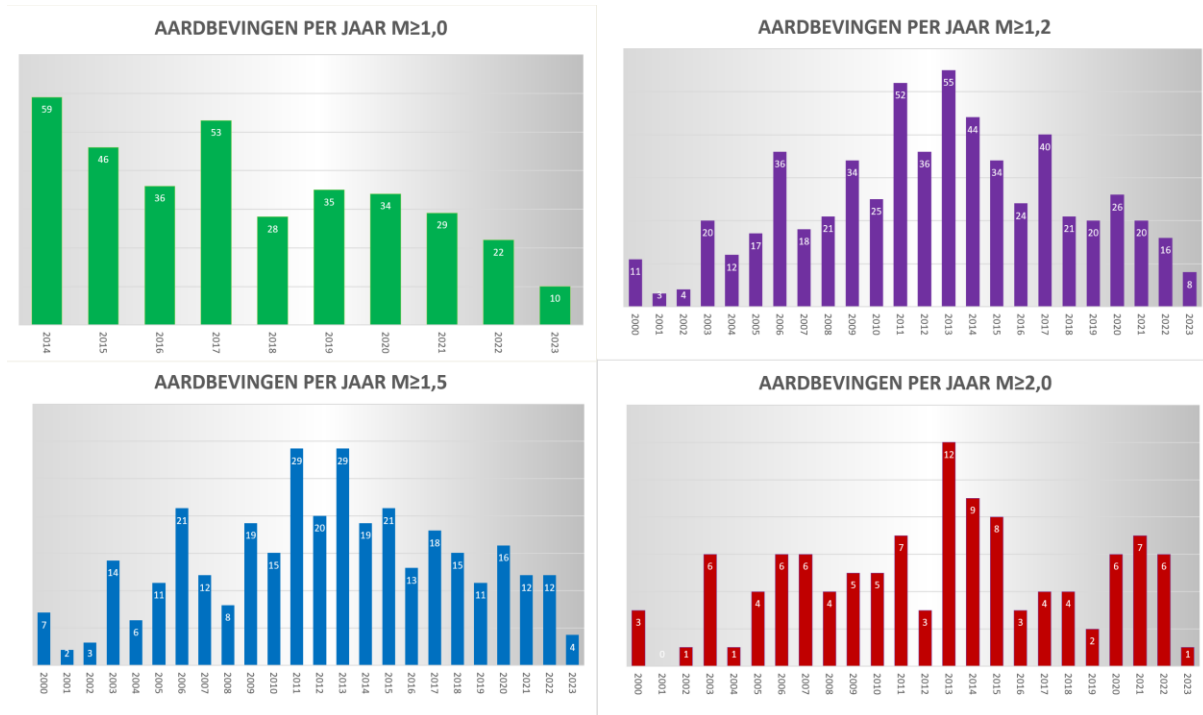
Figuur 4-1: Aantal aardbevingen berekend per jaar zoals aangegeven in Mijnbouwregeling artikel 1.3a.5. Dit betreft de aardbevingen met een kracht van $M_L \geq 1,2$ in de voorgaande 6 maanden omgerekend naar jaarbasis.

Het aantal aardbevingen per maand onderverdeeld in vijf magnitudeklassen is opgenomen in Tabel 4-1. In de voorgaande periode (1 mei 2022 tot en met 31 oktober 2022) zijn er 11 aardbevingen geregistreerd met een magnitude $M_L \geq 1,2$. In de huidige periode (1 november 2022 tot en met 30 april 2023) zijn er 10 aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,2$ geregistreerd. Het aantal aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,5$ is gedaald van 7 naar 6.

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
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
okt-22	2	3	0	1	1	7
nov-22	0	0	0	0	0	0
dec-22	2	0	2	0	0	4
jan-23	0	2	1	0	0	3
feb-23	1	0	1	0	0	2
mrt-23	1	2	0	0	0	3
apr-23	0	0	1	1	0	2
mei-okt	4	4	3	2	2	15
nov-apr	4	4	5	1	0	14
Tot	8	8	8	3	2	29

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 mei weergegeven is en dat er vanwege incompleetheid geen data van voor 2014 getoond zijn voor $M_L \leq 1,2$). Er zijn statistische aanwijzingen dat de dataset boven de $M_L = 1,2$ wel compleet zou kunnen zijn (ook voor de periode voor 2014), zie hiertoe ook de uiteenzetting in sectie 2.5. Dit is de reden dat deze geplot is vanaf het jaar 2000 (paneel rechtsboven, paarse kleuren). Het linker paneel beneden (blauwe kleuren) laat aardbevingen zien met een magnitude van $M_L \geq 1,5$. Deze dataset is vrijwel zeker compleet vanaf 2000 en kan dus goed gebruikt worden om een historisch overzicht te geven van de seismische ontwikkeling. Het paneel rechts beneden tenslotte (in de rode kleuren), toont het aantal aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 2,0$.



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

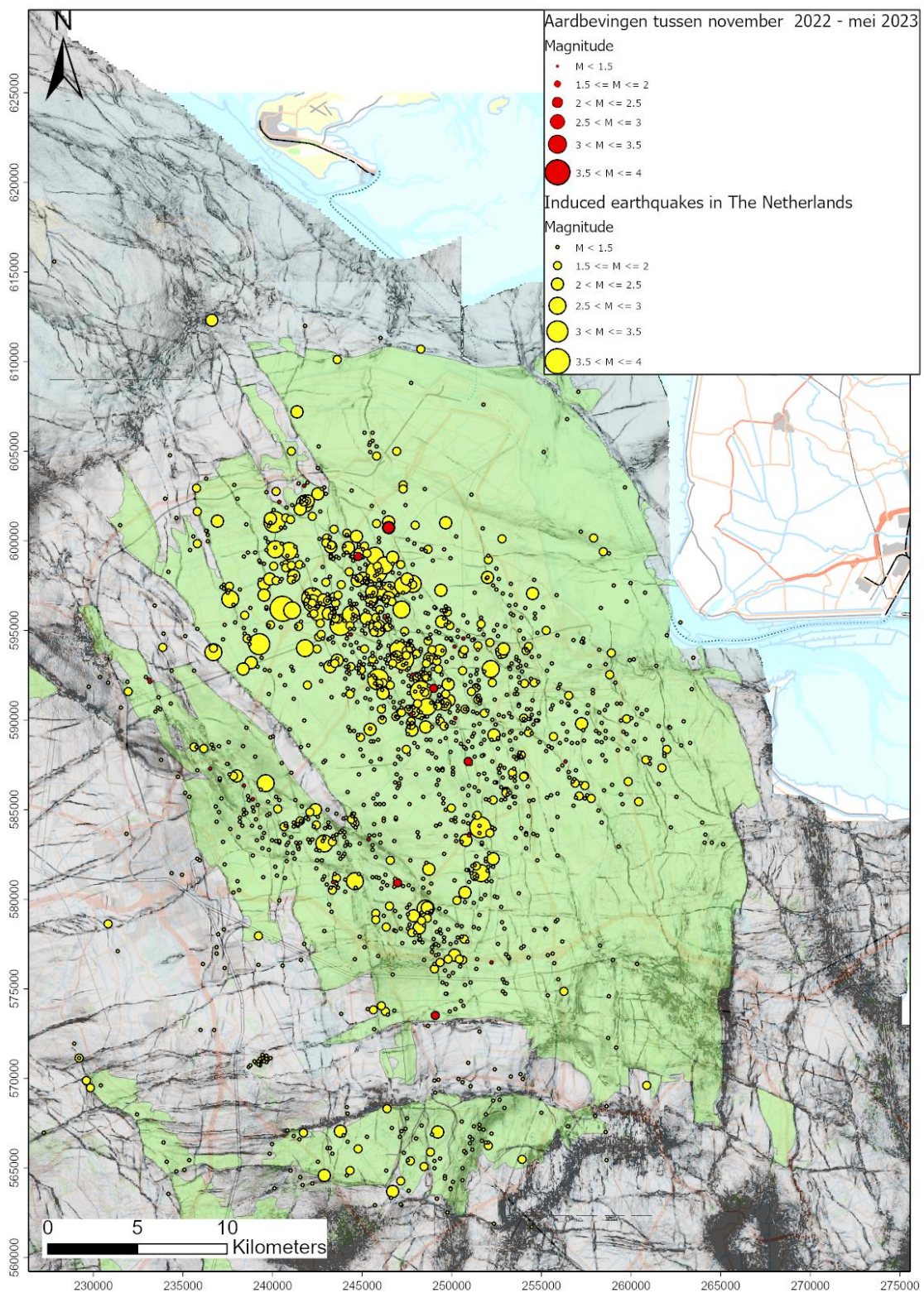
4.2 Distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld

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 november 2022 tot en met 30 april 2023 (6 maanden) geregistreerde aardbevingen zijn in rood weergegeven. In tegenstelling tot de vorige rapportage periode vallen de epicentra in deze rapportage periode over een groter deel van het gasveld.

Van de 10 aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,2$ hebben er 6 een epicentrum binnen het meest seismisch active gebied in het noordwesten van het gasveld. Twee aardbevingen hiervan, die ongeveer twee weken na elkaar zijn geregistreerd, hebben een vrijwel gelijk epicentrum by Garsthuizen. Ook de aardbevingen met de grootste magnitude, de aardbeving bij Zijldijk, valt binnen dit gebied.

Echter in deze periode zijn er ook vier aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,2$ geregistreerd in het zuiden van het gasveld. De meest zuidelijke hiervan was bij Sappemeer.

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 geautomiseerde full-waveform methode. Deze analyses zijn beschikbaar op www.nam.nl voor de huidige rapportage periode tot 30 april 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 november 2022 tot mei 2023 (6 maanden) geregistreeerde aardbevingen aangegeven. Alle andere aardbevingen (vóór 1 november 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

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 ongecorrleerd zijn. Deze aanname is echter niet geheel correct omdat naschokken plaatsvinden.

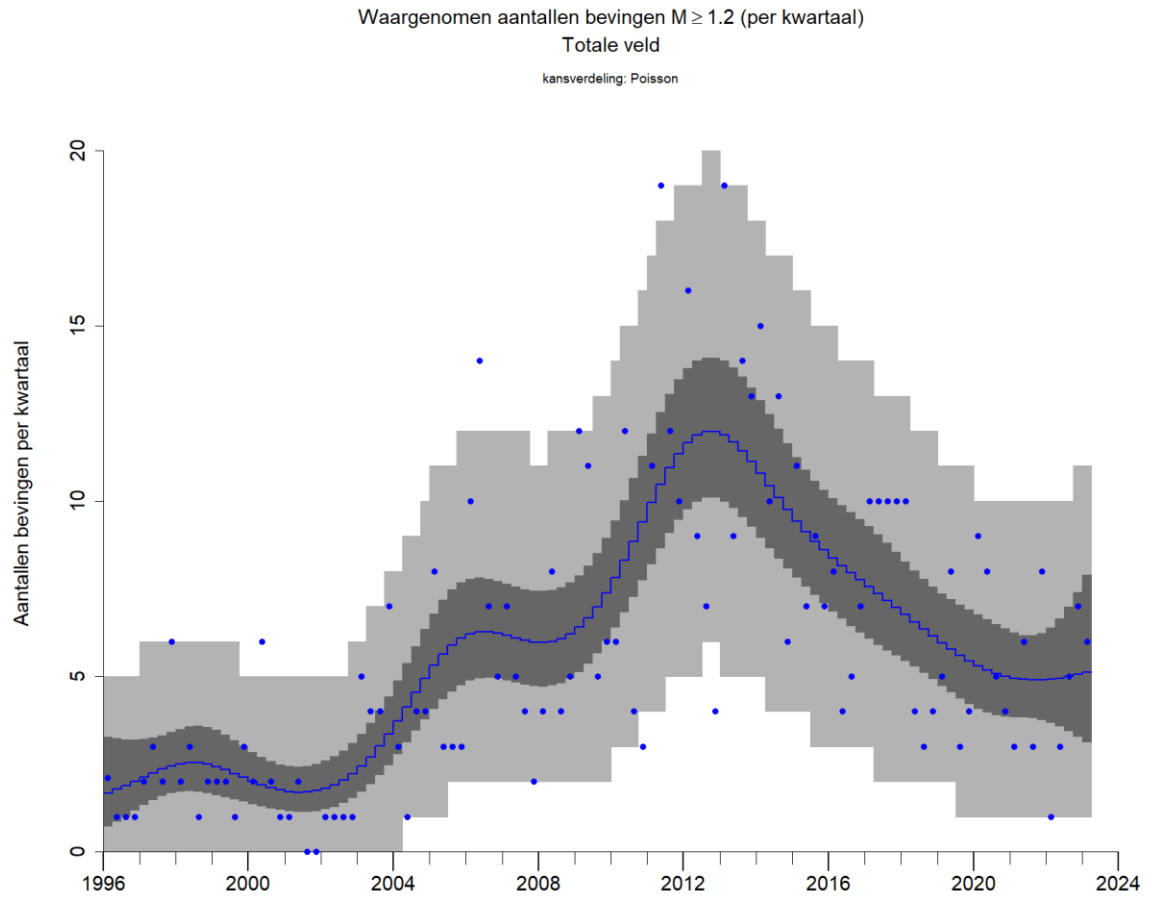
De quasi-Poisson verdeling kan gebruikt worden om een hogere mate (ten opzichte van de Poisson verdeling) van variabiliteit in aantallen aardbevingen tussen kwartalen te beschrijven. Deze hogere variabiliteit kan ontstaan door een bepaalde mate van correlatie tussen de aardbevingen door naschokken. De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

Beide plots bevatten de volgende informatie:

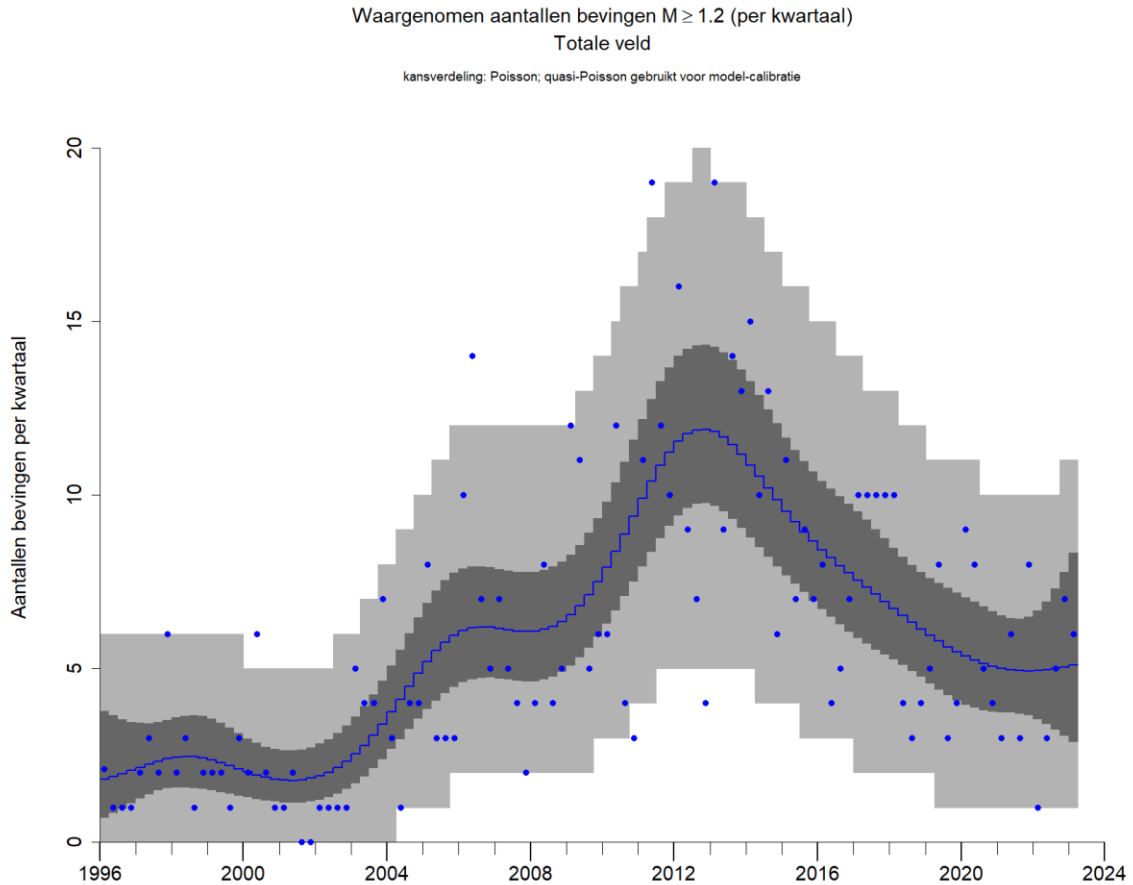
- Blauwe stippen voor het aantal seismische events per kwartaal
- Een blauwe lijn die de trendlijn van het aantal te verwachten seismische events weergeeft
- Een donkergrijze band; het 95% betrouwbaarheidsinterval van de trendlijn.
- Een lichtgrijze band; het 95% voorspellingsinterval van het aantal 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 4-4: 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.

Verband productie en seismiciteit per cluster en productielocatie

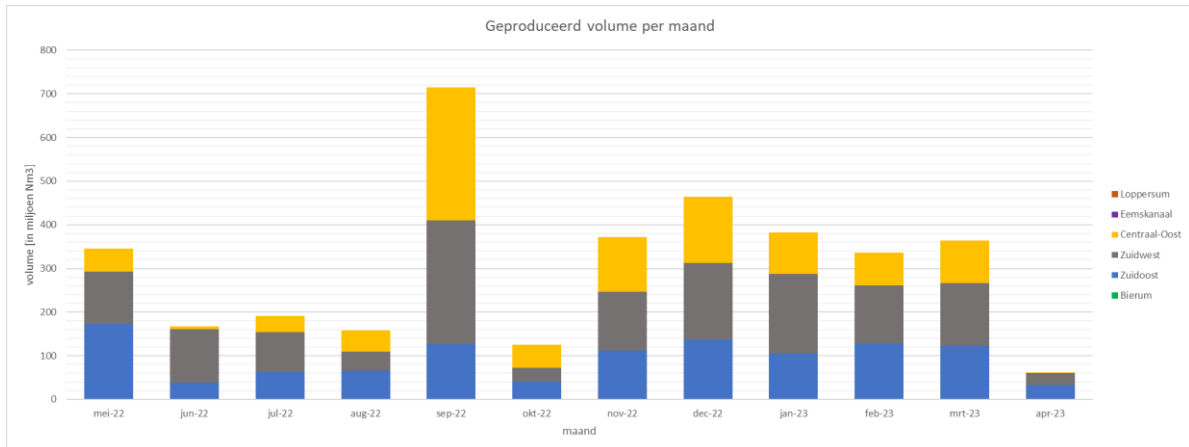
In welke mate de over een korte periode waargenomen variaties in de seismische monitoringsparameters een gevolg zijn van de wijze van opereren, van de lagere geproduceerde volumes, of van de natuurlijke variabiliteit in seismiciteit is niet direct vast te stellen. Er zijn modellen opgesteld waarmee seismische 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 4-2: Overzicht productielocaties per cluster volgens Mijnbouwregeling artikel 1.3a.1.

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

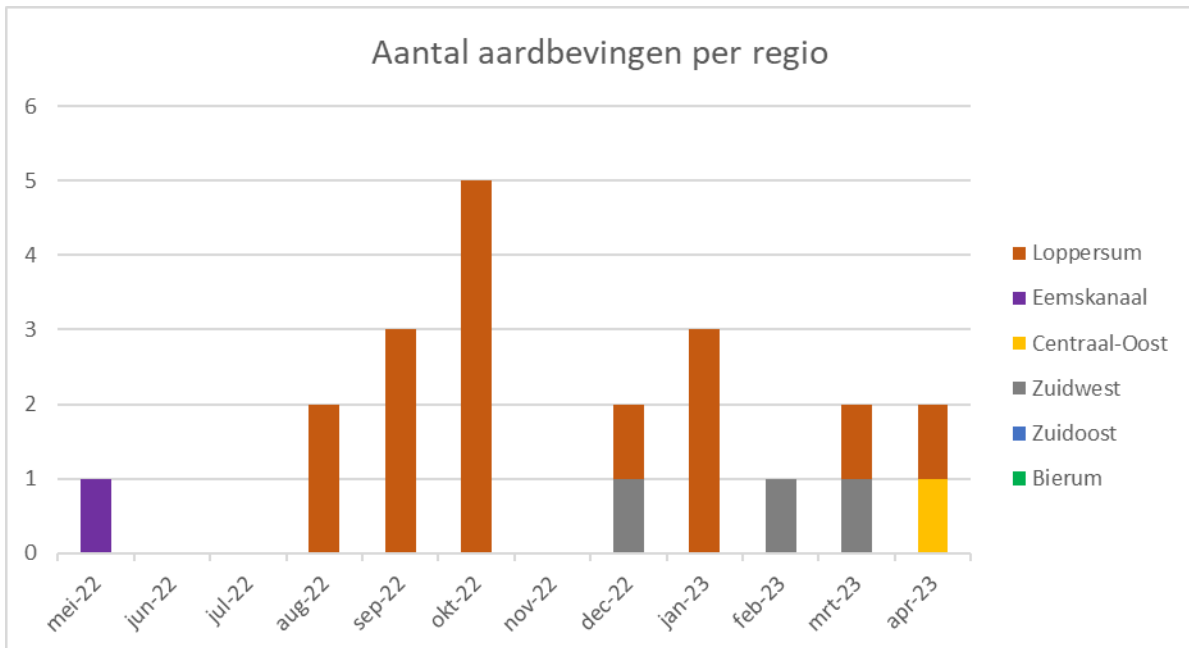
Het Groningen-gasveld is onderverdeeld in een aantal clusters zoals beschreven in de Mijnbouwregeling artikel 1.3a.1. In Tabel 4-2 is de verdeling van productielocaties per cluster opgenomen.

In Figuur 4-6-6 is de productie per cluster van productielocaties opgenomen over het voorgaande periode van 12 maanden (1 mei 2022 tot en met 30 april 2023). De productie uit het Loppersum cluster is per februari 2018 beëindigd. Sindsdien zijn ook locaties Bierum, Eemskanaal, Siddeburen en Tjuchem uit productie genomen.



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

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

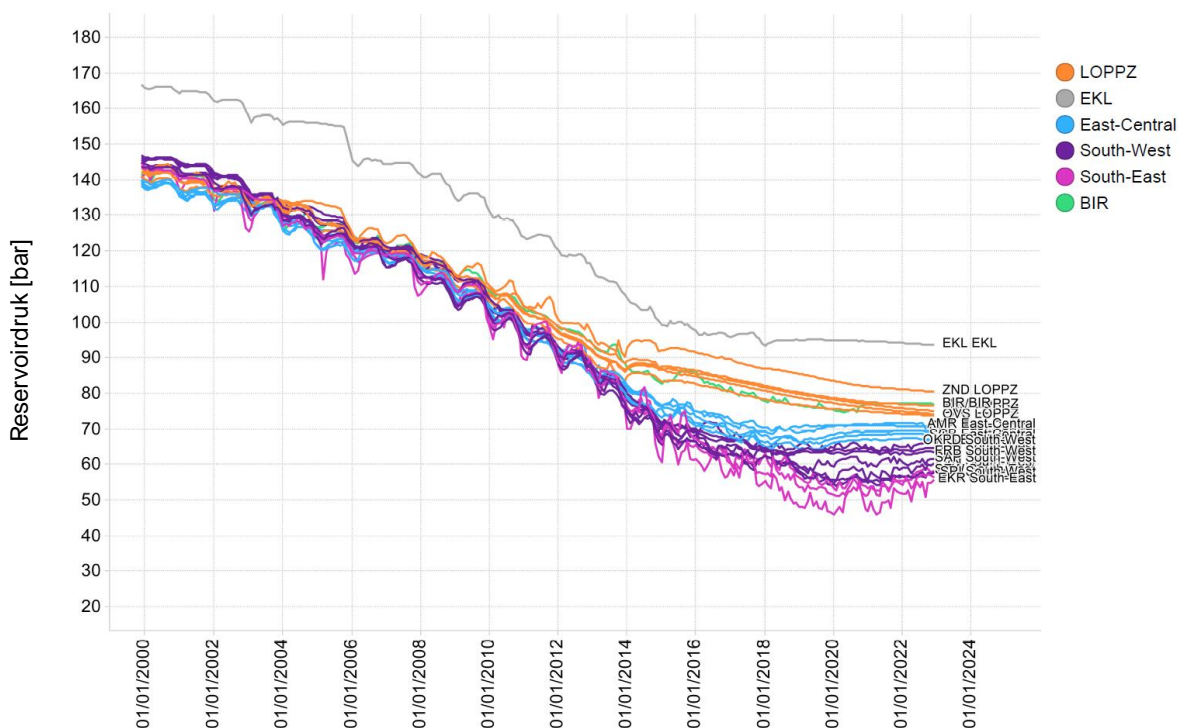


Figuur 4-7: Aantal aardbevingen met magnitude $\geq 1,2$ per cluster.

De relatief hoge seismiciteit 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 4-8 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 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 4-8 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 4-8: 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.

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 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, Zijldijk 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 4-9: 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 niveau van de seismiciteit weer, groen: lage activiteit, geel: bovengemiddelde activiteit en rood: hoge activiteit.

Verhouding tussen grote en kleine aardbevingen

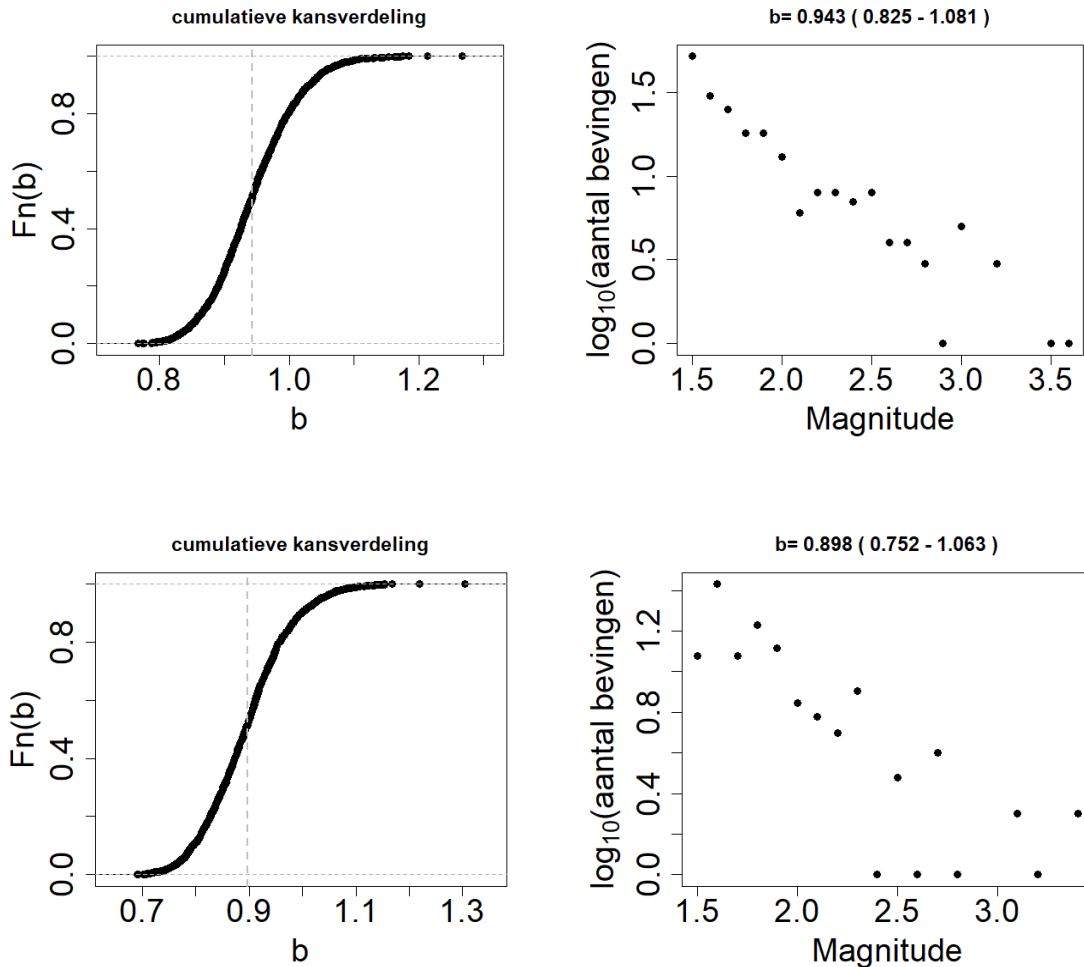
De verhouding tussen grote en kleine aardbevingen wordt beschreven met de methode Gutenberg-Richter (Ref. 3).

Figuur 4--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.

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

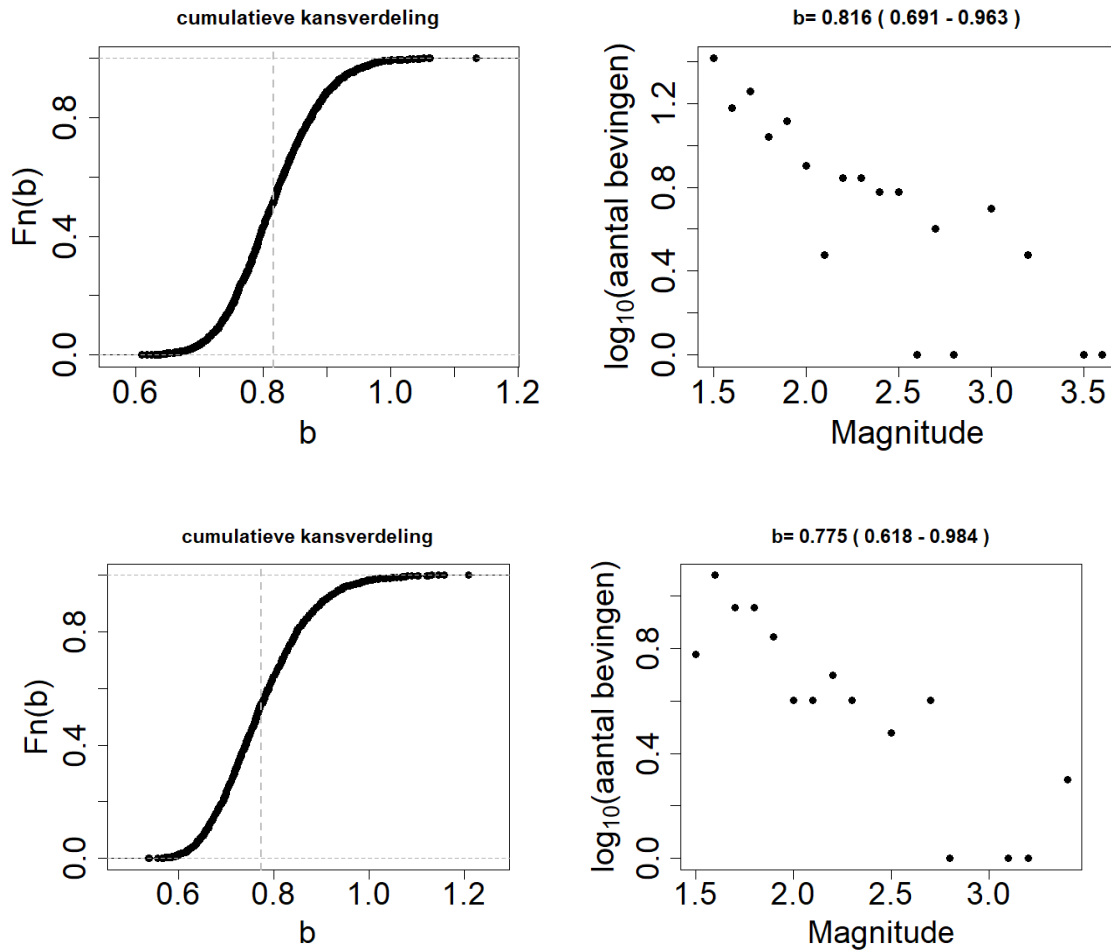
Totale gebied Groningen		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2023
P _{2.5%}	0,83	0,75
P _{50%}	0,94	0,90
P _{97.5%}	1,08	1,06



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 mei 2023

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-waardes lager in Loppersum dan in de rest van het Groningen-gasveld. In Loppersum is het aantal aardbevingen met grotere magnitude dus relatief groot ten opzichte van het aantal aardbevingen met lagere magnitude. De b-waarde lijkt 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 mei 2023.

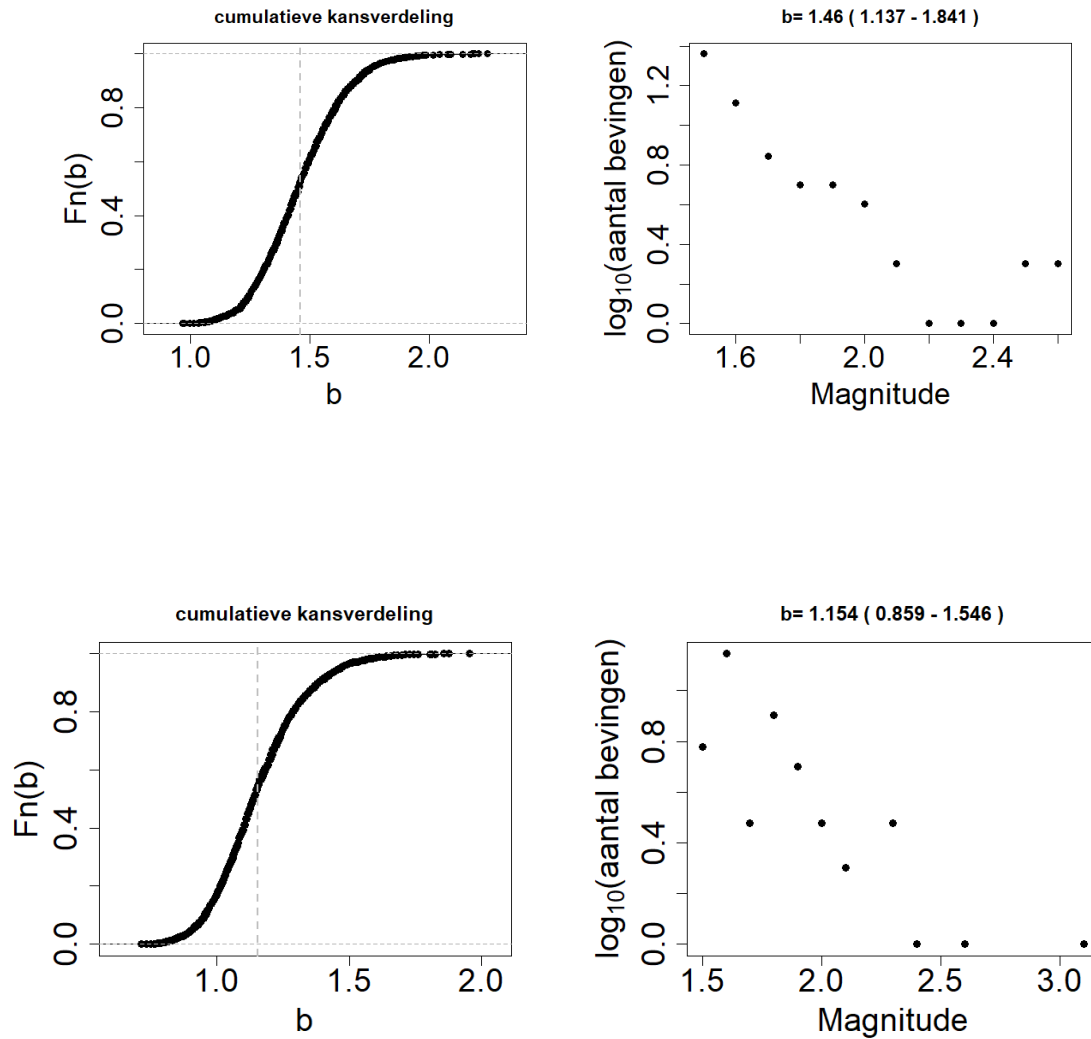
Tabel 4-4: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen in het gebied rond Loppersum.

Gebied Loppersum		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2023
$P_{2.5\%}$	0,69	0,62
$P_{50\%}$	0,82	0,78

P_{97.5%}

0,96

0,98



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 mei 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%}	1,14	0,86
P _{50%}	1,46	1,15
P _{97.5%}	1,84	1,55

In

Tabel 4-6 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 4-6: Overzicht van de b-waarde ($P_{50\%}$) voor het gehele veld, het gebied Loppersum en het gehele veld exclusief het gebied Loppersum.

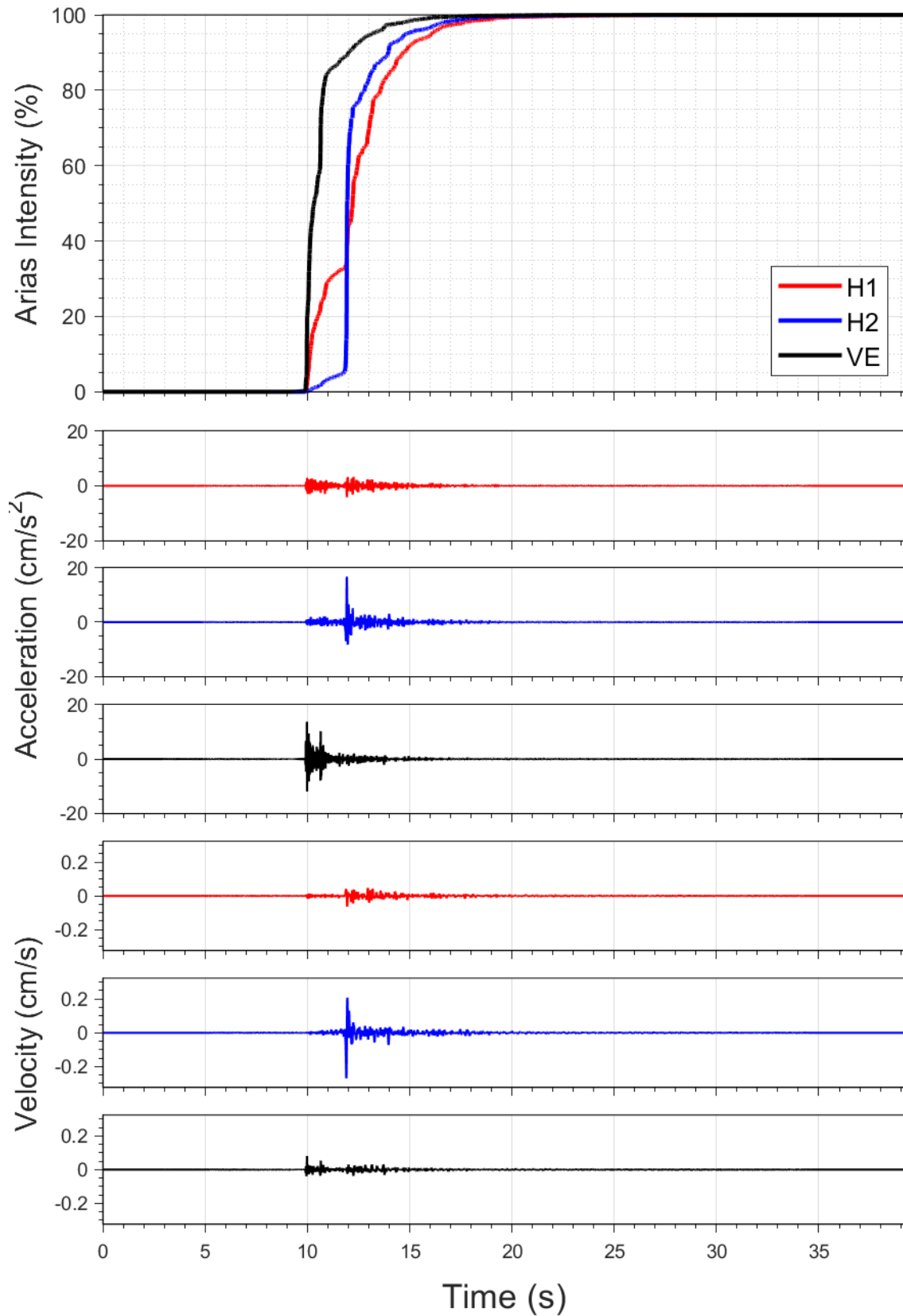
	b-waarde ($P_{50\%}$) 2000-2014	b-waarde ($P_{50\%}$) 2015-2023
Gehele Groningen-gasveld	0,94	0,90
Gebied Loppersum	0,82	0,78
Gehele veld exclusief Loppersum	1,46	1,15

Anomale PGA/PGV bij een bepaalde aardbevings-magnitude

De krachtigste aardbeving in de huidige monitoringsperiode van 1 november 2022 tot 1 mei 2023 had een magnitude van $M_L = 2,1$. Deze aardbeving vond plaats op 12 april 2023 bij Zijldijk.

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 Zijldijk aardbeving met een magnitude van $M_L=2,1$ op 12 april 2023 was 0,017 g (16,77 cm/s²). De hoogste PGV component, die over het algemeen wordt beschouwd als een betere indicator van het schadepotentieel van de beweging, is geregistreerd tijdens deze aardbeving is 0,27 cm/s. Het monitoringstation waar deze maximale PGA en PGV zijn gemeten (G090) ligt op een afstand van 2,5 km van het epicentrum. De hoogst gemeten grondbeweging tijdens deze rapportage periode is aanzienlijk lager dan de hoogst gemeten grondbeweging tijdens de voorgaande registratieperiode. Toen was de hoogste PGA 0,06 g en de hoogste PGV 2,46 cm/s.

De grootste grondbeweging is gemeten door de H2 (oost-west) component van station G090. De grondbeweging tijdens de Zijldijk aardbeving was sterk gepolariseerd. De grondbeweging was voornamelijk in de oost-west richting. Figuur 4-13 toont de gemeten bewegingen. De Arias intensiteit voor de oost-west (H2) component toont ook dat de duur van de grondbeweging erg kort was (slechts 0,465 s).

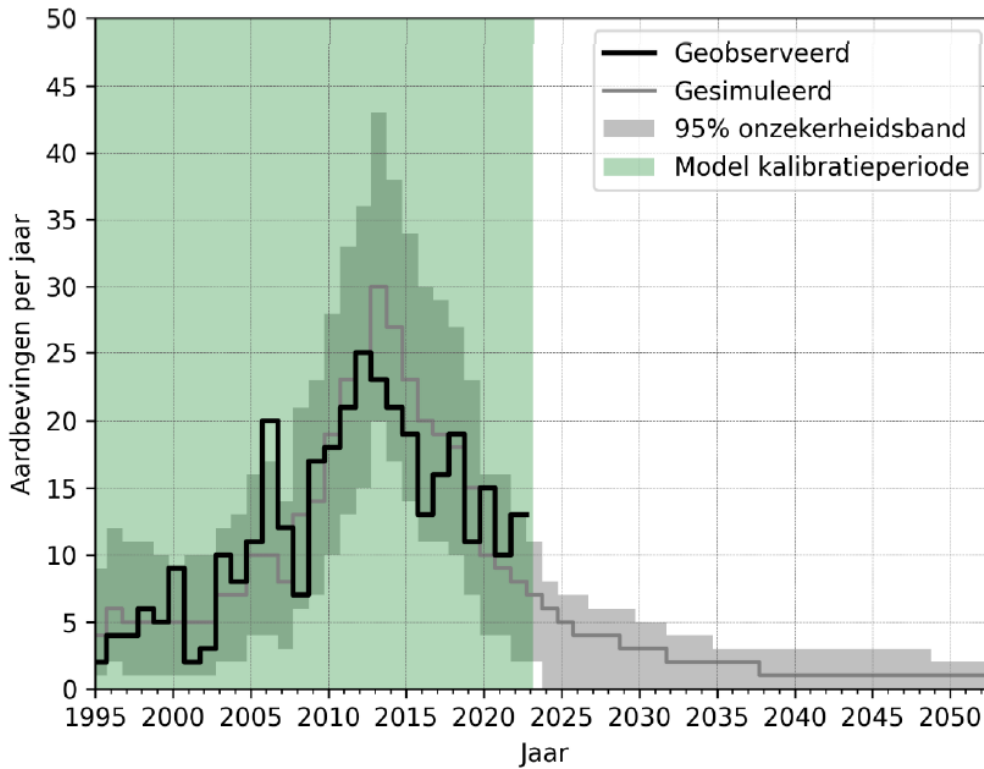


Figuur 4-13: Gemeten grondbeweging tijdens de aardbeving bij Zijldijk op 12 april 2023. Boven wordt de Arias intensiteit getoond. Daaronder worden de grondversnelling in drie richtingen (noord-zuid, oost-west en vertikaal) en de snelheid in drie richtingen getoond.

4.4 Vergelijking met het SDRA-model en HRA-model

4.4.1 SDRA-model

In maart 2022 heeft TNO een nieuwe seismische risico-inschatting gepubliceerd, de SDRA-2023 (Ref. 20). Deze inschatting is geïkt aan de aardbevingencatalogus van alle aardbevingen in Groningen met een magnitude van $M_L \geq 1,5$. Figuur 4-14 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 4-14: *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 4-14 laat zien dat voor gasjaar 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 gasjaar 2022-2023 dat loopt van tot 1 oktober 2022 tot en met 30 september 2023 zijn er tot nu toe zes aardbevingen opgetreden met een magnitude $M_L \geq 1,5$ opgetreden.

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.
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.

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 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	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
Rapportage Seismiciteit Groningen - November 2022	Dec 2022

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

Appendix B – Aardbevingscatalogus 1 mei 2022 tot 1 mei 2023 (door KNMI)

Plaats	Datum	Time hh:mm:ss	Magnitude	Diepte km	Easting	Northing	Veld
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
Eppenuizen	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
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
Garrelswaer	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
Garrelswaer	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

RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – MEI 2023

Plaats	Datum	Time hh:mm:ss	Magnitude	Diepte km	Easting	Northing	Veld
Wirdum	26-Oct-22	07:16:28	1,1	3	248678	593531	Groningen
Zuidwolde	3-nov-22	18:29:53	0,6	3	236520	587298	Groningen
Garmerwolde	4-dec-22	07:31:42	0,6	3	238886	585558	Groningen
Zuidbroek	4-dec-22	15:36:02	0,9	3	252223	576458	Groningen
Wirdum	6-dec-22	11:08:43	1,7	3	248980	591756	Groningen
Woudbloem	14-dec-22	20:08:37	1	3	245337	583337	Groningen
Garrelweer	20-dec-22	14:51:23	0,4	3	247831	592513	Groningen
Froombosch	22-dec-22	23:04:47	1,9	3	246986	580919	Groningen
Loppersum	26-dec-22	16:18:17	1	3	244389	594785	Groningen
Thesinge	28-dec-22	21:33:14	0,4	3	238405	586328	Groningen
Garsthuizen	3-jan-23	09:38:31	1,3	3	244774	599134	Groningen
Garsthuizen	15-jan-23	09:49:09	1,8	3	244774	599134	Groningen
Schildwolde	22-jan-23	02:13:36	0,3	3	250944	583557	Groningen
Loppersum	31-jan-23	14:09:06	1,2	3	246238	595711	Groningen
Sappemeer	8-feb-23	13:47:21	1,6	3	249070	573502	Groningen
Appingedam	19-feb-23	17:52:48	0,4	3	250134	594117	Groningen
Overschild	21-feb-23	20:39:35	0,6	3	250213	590111	Groningen
Overschild	23-feb-23	21:00:31	0,2	3	250213	590111	Groningen
Zandweer	28-feb-23	08:18:31	1,1	3	240393	602171	Groningen
Oosterwijtwerd	11-mrt-23	09:35:55	1	3	250658	594572	Groningen
Uithuizen	21-mrt-23	21:48:28	1,4	3	241773	603086	Groningen
Scharmer	23-mrt-23	20:54:42	1,2	3	243377	580963	Groningen
Tjuchem	09-Apr-23	11:36:37	0,4	3	256335	587676	Groningen
Steendam	11-Apr-23	09:08:47	1,6	3	250929	587676	Groningen
Zijldijk	12-Apr-23	16:47:27	2,1	3	246475	600725	Groningen
Steendam	15-Apr-23	20:23:23	0,7	3	251064	587567	Groningen
Garrelweer	19-Apr-23	21:02:51	0,8	3	247742	590285	Groningen

Tabel B.1 Aardbevingen geregistreerd door het seismisch monitoring netwerk tussen 1 november 2021 en 1 mei 2023 (huidige en twee vooraf gaande rapportage periodes).

