



RAPPORTAGE SEISMICITEIT
GRONINGEN – MEI 2022



[Deze pagina is opzettelijk leeg gelaten]

Inhoudsopgave

1	Samenvatting	4
1.1	Aantal aardbevingen (activity rate)	4
1.2	Aardbevingsdichtheid	5
1.3	Trend in seismiciteit	5
1.4	Incidentparameters PGA en PGV	5
1.5	Aardbevingen rond Garrelswaer op 16 november 2021	5
2	Inleiding en leeswijzer	6
2.1	Inleiding	6
2.2	Leeswijzer	7
2.3	Meetnetwerk en meetnauwkeurigheid	7
3	Trendparameters	10
3.1	Trendparameter aantal aardbevingen	12
3.2	Aardbevingsdichtheid	13
4	Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit	14
4.1	Aantal aardbevingen	14
4.2	Distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld	16
4.3	Statistische analyse naar de ontwikkeling aardbevingen	18
	Verloop van het aantal aardbevingen door de tijd	18
	Verband productie en seismiciteit per cluster en productielocatie	20
	Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd	22
	Verhouding tussen grote en kleine aardbevingen	24
4.4	Vergelijking met het SDRA-model	28
5	Referenties	29
	Appendix A - Aardbevingscatalogus 1 november 2021 tot 1 mei 2022	30
	Appendix B – Overzicht periodieke rapportages en speciale rapportages seismiciteit Groningen	32
	Appendix C – Evaluatie van het hypocentrum en het bron mechanisme van de aardbeving op 1 april 2022 Bij Loppersum met een kracht van $ML = 2,7$	33

1 Samenvatting

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

In de Mijnbouwregeling zijn deze vier parameters onderverdeeld in twee zogenoemde trendparameters en in twee zogenoemde incidentparameters (Ref. 1). De aardbevingsdichtheid en het aantal aardbevingen per jaar ('activity rate') zijn de trendparameters. Deze parameters worden gebruikt om vroegtijdig een (lokale) 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 afgenomen van 11 (1 mei 2021 tot 1 november 2021) naar 7 (1 november 2021 tot 1 mei 2022). Voor een magnitude groter dan of gelijk aan $M_L \geq 1,5$ is het aantal geregistreerde aardbevingen in de afgelopen zes maanden afgenomen van 7 naar 5. De seismiciteit in de afgelopen observatieperiode van zes maanden (van november 2021 tot en met april 2022) vertoont daarmee een dalende trend ten opzichte van de vorige observatieperiode. Dit wordt in meer detail omschreven in paragraaf 4.3.

Tabel 1: Aardbevingen in Groningen met een kracht $M_L \geq 1,2$ geregistreerd door het KNMI seismisch monitoringsnetwerk in de 6-maanden observatie periode van 1 november 2021 tot 1 mei 2022.

Plaats	Datum	Time hh:mm:ss UTC	Magnitude	Diepte km	Easting	Northing
Westeremden	8/Nov/21	01:52:16	1,7	3	242724	594754
Garrelsweer	16/Nov/21	00:46:48	3,2	3	245903	592253
Groningen	9/Dec/21	12:18:28	1,2	3	235345	585720
Groningen	18/Dec/21	02:33:25	1,3	3	237149	585639
Zeerijp	6/Mar/22	13:18:30	2,1	3	244732	597797
Loppersum	1/Apr/22	17:11:08	2,7	3	245848	595146
Westeremden	17/Apr/22	13:27:46	1,6	3	243417	596882

Met name in het eerste kwartaal van 2022 was de seismiciteit in Groningen laag met één aardbeving groter dan $M_L \geq 1,2$. In de maand februari 2022 is er door KNMI geen enkele aardbeving gerapporteerd, ook niet met een kracht kleiner dan $M_L = 1,2$.

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

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 van 1,2 en hoger, geregistreerd gedurende de voorafgaande 6 maanden.

In het gehele Groningen gasveld is de aardbevingsdichtheid op het einde van de rapportageperiode (1 mei 2022) onder de laagste grenswaarde, “grenswaarde 1”, zoals gedefinieerd in Mijnbouwregeling Artikel 1.3a.6 en vastgesteld op 0,3 aardbevingen per vierkante kilometer per jaar.

Het gebied met de hoogste aardbevingsdichtheid ligt nabij Loppersum, waar de maximale aardbevingsdichtheid aan het einde van de observatieperiode (1 mei 2022) was gedaald tot 0,248 aardbevingen per vierkante kilometer per jaar. Over tijd is ook het gebied waar aardbevingen worden geregistreerd afgenomen.

1.3 Trend in seismiciteit

Het aantal aardbevingen en de aardbevingsdichtheid laten vanaf 2014 een dalende trend zien. In de afgelopen zes maanden zijn er 7 aardbevingen rond het Groningen-gasveld met een magnitude van $M_L \geq 1,2$ geregistreerd. De zwaarste aardbeving in de afgelopen zes maanden was de aardbeving bij Garrelsweer op 16 november 2021 met een magnitude van $M_L = 3,2$.

Opvallend is dat in het eerste kwartaal van 2022 er slechts één enkele aardbeving is geregistreerd met een kracht $M_L \geq 1,0$. Dit geeft aan dat de dalende trend in de seismiciteit zich ook in het afgelopen half jaar heeft voortgezet.

In hoeverre deze observaties op korte termijn een gevolg zijn van de wijze van opereren, van de lagere geproduceerde volumes of van de natuurlijke variabiliteit in seismiciteit is niet met zekerheid vast te stellen. Wel is duidelijk dat sinds 2013 seismiciteit in Groningen een duidelijk dalende trend vertoont.

1.4 Incidentparameters PGA en PGV

In de afgelopen twaalf 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 Garrelsweer aardbeving op 16 november 2021 was $0,03g^2$. De hoogste PGV die is geregistreerd tijdens deze aardbeving was 1,58 cm/s.

1.5 Aardbevingen rond Garrelsweer op 16 november 2021

De aardbeving met de grootste magnitude tijdens de rapportage periode was de Garrelsweer aardbeving met een magnitude van $M_L = 3,2$ op 16 november 2021. Over deze aardbeving is door NAM een uitgebreide speciale rapportage gepubliceerd (Ref. 2). Daarnaast is in de rapportageperiode een aardbeving met een kracht $M_L = 2,7$ geregistreerd. Dat was de aardbeving bij Loppersum op 1 april 2022. In Appendix C van deze rapportage wordt een verdere analyse gegeven van de aardbevingsopnames gemaakt voor deze aardbeving.

² Deze grondversnelling is een factor 10 kleiner dan de hoogste gemeten grondversnelling boven Roswinkel.

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 2022. Het rapport kijkt in principe een halfjaar terug, maar daar waar relevant wordt verder teruggekeken om seismische ontwikkelingen in hun bredere historische context te plaatsen. Een tabel met de aardbevingen die in Groningen zijn geregistreerd in de afgelopen zes maanden is in dit rapport opgenomen onder Appendix A.

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. 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 3.

Tabel 2: 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.

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 3: 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

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.

2.2 Leeswijzer

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

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

- Groen: Aardbevingen met een magnitude³ groter of gelijk aan $M_L = 1,0$
- Paars: Aardbevingen met een magnitude groter of gelijk aan $M_L = 1,2$
- Blauw: Aardbevingen met een magnitude groter of gelijk aan $M_L = 1,5$
- Rood: Aardbevingen met een magnitude groter of gelijk aan $M_L = 2,0$

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

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

2.3 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 grondbeweging en vier ondergronds geplaatste geofoons voor nauwkeurige plaatsbepaling en bepaling van de aardbevingssterkte. Daarnaast zijn er ook oude stations van vóór de uitbreiding en nieuw geplaatste stations (vooral ten westen van het gasveld) die alleen grondversnelling meten. Alle

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

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

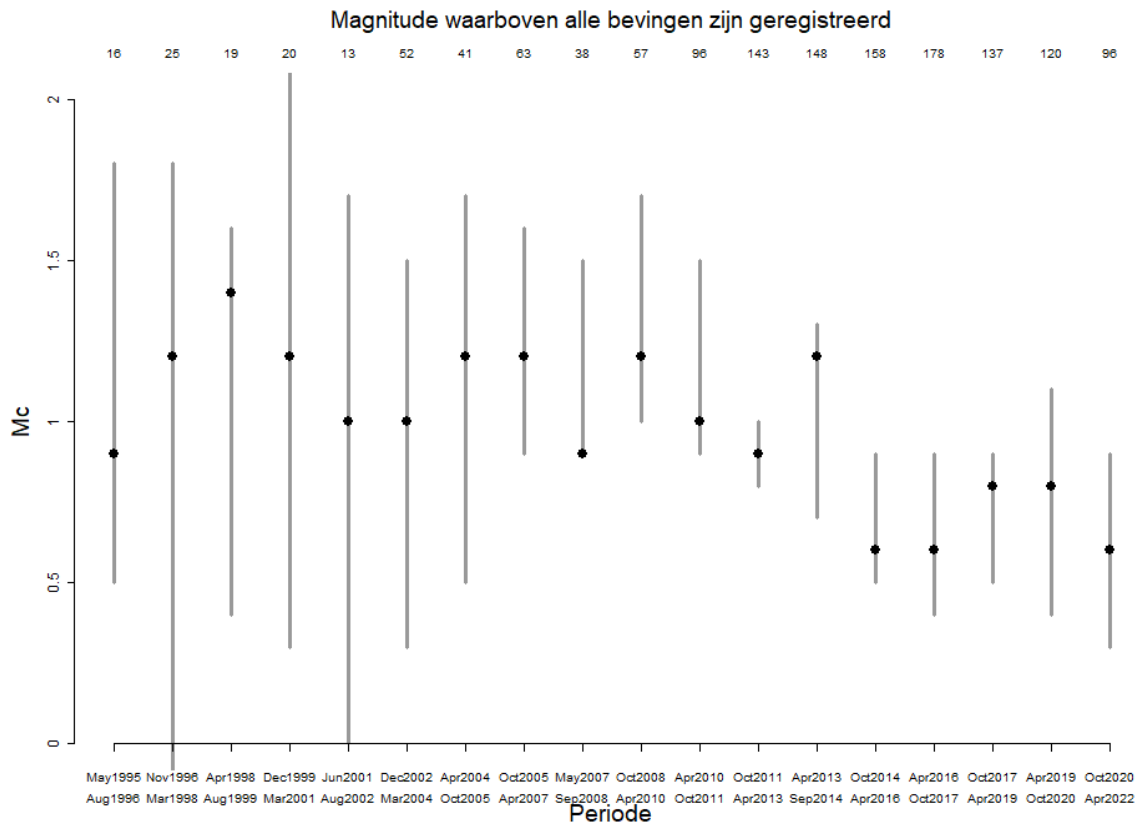
Het seismische meetnetwerk boven het Groningen-gasveld is in 2014 uitgebreid met 69 nieuwe seismische meetstations. Hierdoor is de gevoeligheid van het meetnetwerk toegenomen. In de periode van 2003 tot en met 2014 werden alle aardbevingen in het Groningen-gasveld met een magnitude groter dan $M_L \geq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

Magnitude van compleetheid

De magnitude van compleetheid (magnitude of completeness of ook wel MoC) is de laagste magnitude M_L waarvoor elke beving 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 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 is 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.

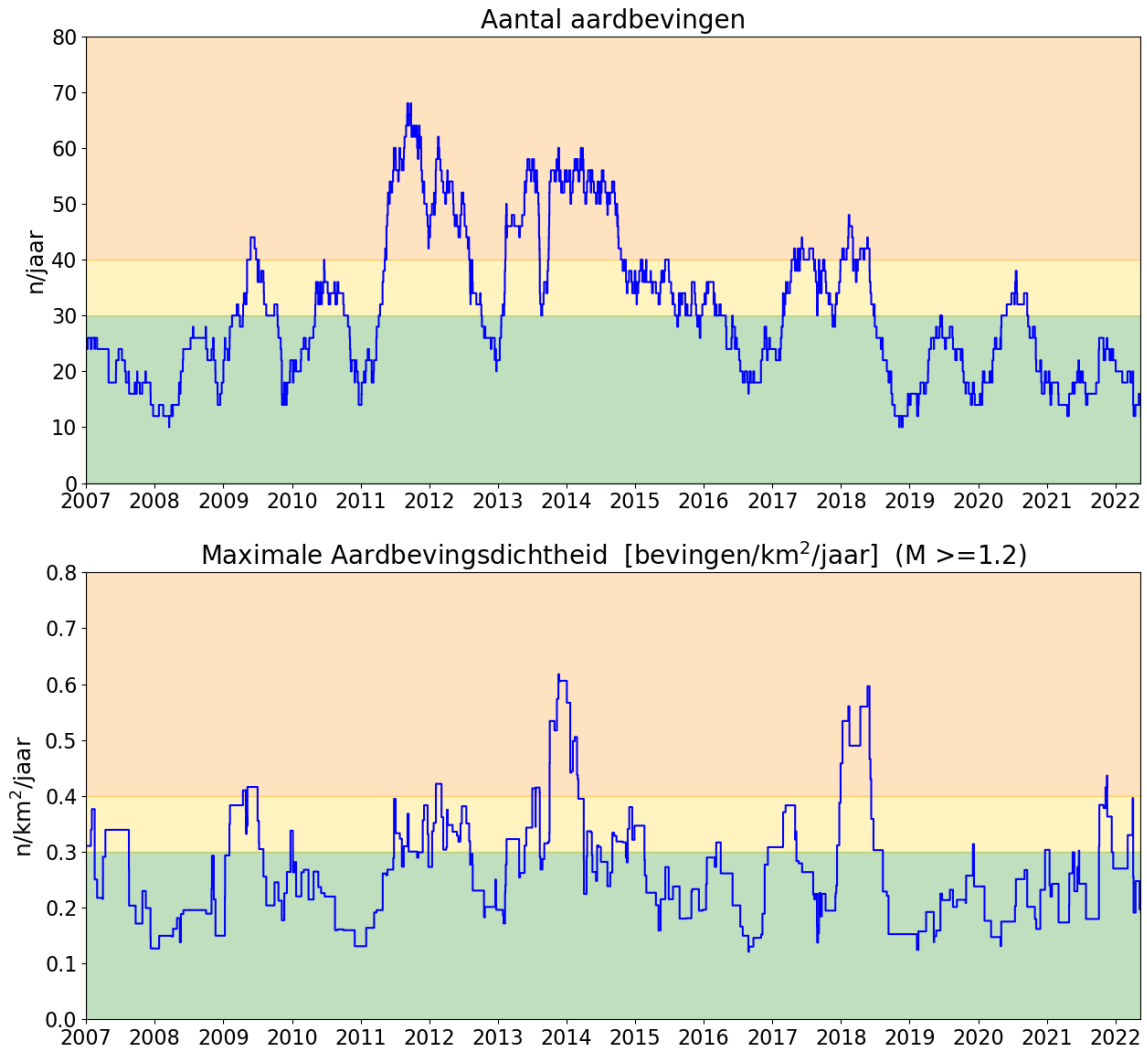
De MoC is afgeleid volgens de maximum curvature method (Ref. 3 en 4) en de resultaten met het 95% betrouwbaarheidsinterval zijn weergegeven in Figuur 1. In de figuur is duidelijk zichtbaar dat vanaf 2014 de MoC afneemt (ook kleinere aardbevingen worden geregistreerd). Vanaf 2014 zijn aardbevingen met 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 1: Magnitude of Completeness met onzekerheidsintervallen voor verschillende periodes, met de stip wordt de P50 waarde aangegeven.

3 Trendparameters

Het aantal aardbevingen en de aardbevingsdichtheid zijn de trendparameters. De trendparameters worden continu bijgehouden in de vorm van een trendlijngrafiek, zie Figuur 2.



Figuur 2: Trendparameters, in de bovenste grafiek wordt het aantal waargenomen aardbevingen met een magnitude 1,2 of groter per twaalf maanden getoond. In de onderste grafiek wordt de maximale aardbevingsdichtheid (voor aardbevingen met een magnitude van 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 (vermenigvuldiging met twee). De achtergrondkleur geeft het niveau van de seismiciteit weer, groen: lage activiteit, geel: bovengemiddelde activiteit en oranje: hoge activiteit

Tabel 4: Trendparameter overzicht november 2021 tot mei 2022. Aantal aardbevingen per voorgaande jaar en aardbevingsdichtheid (aantal aardbevingen per jaar per vierkante kilometer) zijn aangegeven op het einde van de maand.

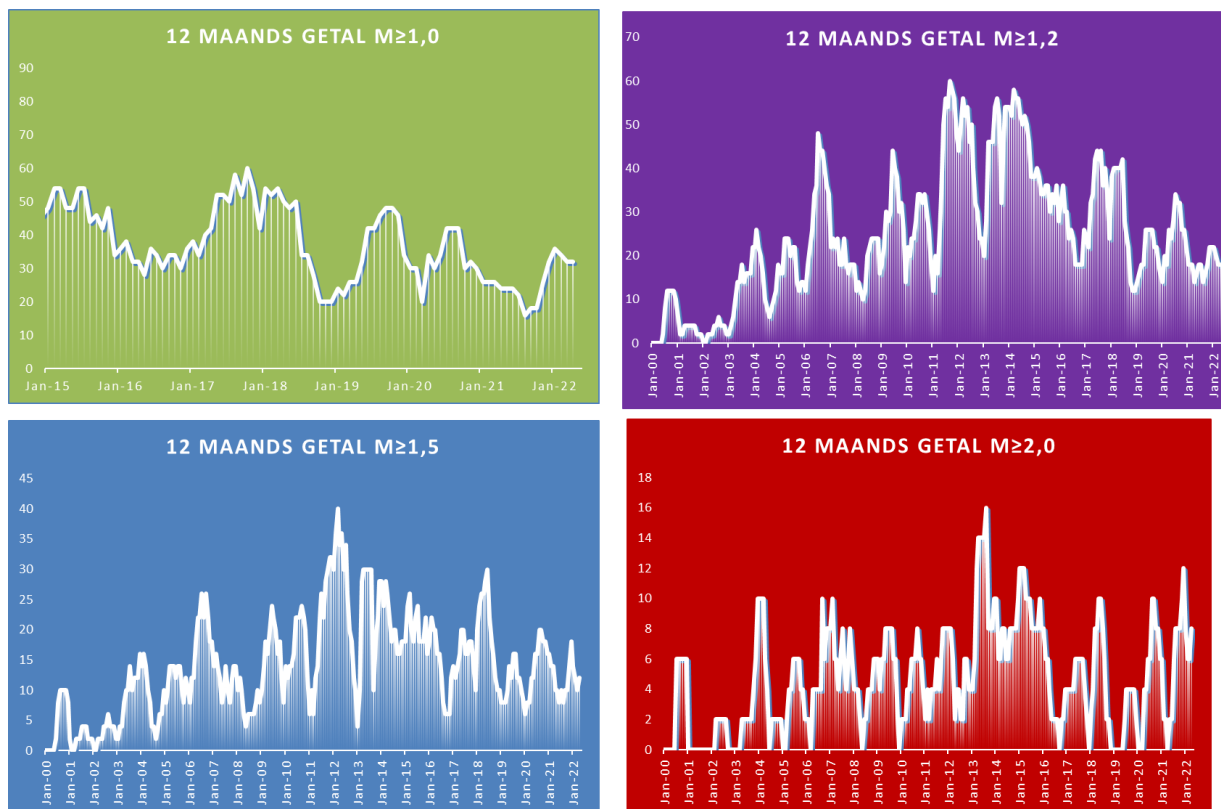
	nov	dec	jan	feb	maart	april
Aantal aardbevingen ($M_L \geq 1,2$)	22	22	20	18	20	14
Aardbevingsdichtheid (einde maand)	0,36	0,27	0,27	0,27	0,33	0,25

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 2022 is dus de som van het aantal aardbevingen van een bepaalde magnitude in de periode van 1 november 2021 tot 1 mei 2022 omgerekend naar één jaar.

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

De stabiel lage trend in het aantal aardbevingen (met magnitude groter dan 1,0 en 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).

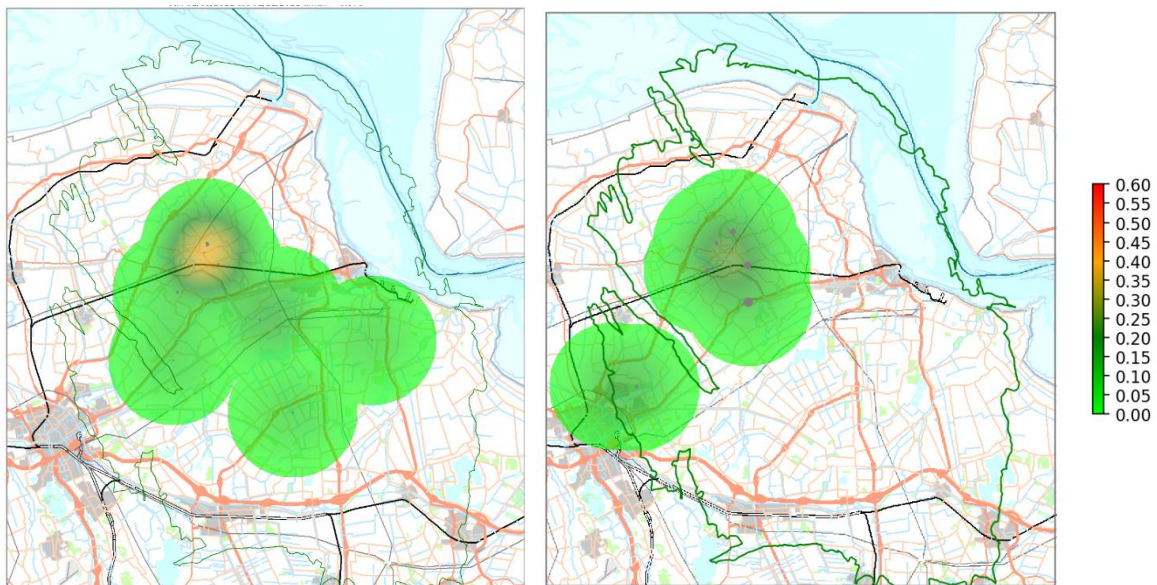


Figuur 3: 12-maandsgetallen voor vier magnitude-klassen; waarnemingen voor $M_L \geq 1,0$ weergegeven vanaf 2014, de overige waarnemingen sinds 2000. Deze trend is gebaseerd op aardbevingsobservaties tijdens de de voorgaande 6 maanden. Deze zijn omgerekend naar jaarbasis.

3.2 Aardbevingsdichtheid

Figuur 4 toont een kaart met de aardbevingsdichtheid en de epicentra van de in de periode 1 november 2021 tot 1 mei 2022 geregistreerde aardbevingen. Aardbevingsdichtheid wordt berekend met de Quartic Kernel functie. Alle geregistreerde aardbevingen met een magnitude van $M_L = 1,2$ en hoger zijn hierin opgenomen. De berekende aardbevingsdichtheid wordt getoond door middel van een kleurschaal. Als trendparameter wordt de maximale waarde van de berekende aardbevingsdichtheid over de voorgaande zes maanden gebruikt.

Op 4 oktober 2021 overschreed de aardbevingsdichtheid het niveau van 0,30 aardbevingen/km²/jaar (0,31 aardbevingen/km²/jaar). Na 4 oktober volgde een zwerm van kleinere aardbevingen die allen een epicentrum rond Zeerijp hadden waardoor de maximale aardbevingsdichtheid in het Groningen veld een waarde van 0,415 aardbevingen/km²/jaar bereikte op 9 november 2021. In een speciale tussentijdse rapportage wordt een analyse van de aardbevingenzwerm en de ontwikkeling van seismiciteit gegeven (Ref. 8 en 9). De aardbevingsdichtheid was hierdoor hoog aan het begin van de huidige observatie periode van zes maanden.



Figuur 4: Aardbevingsdichtheidskaarten voor aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 1,2$ weergegeven in de zes maanden voorafgaand aan 1 november 2021 (links) en 1 mei 2022 (rechts). De dichtheid is omgerekend naar een jaarlijkse dichtheid. De maximale waarde in deze kaart definieert de trendparameterwaarde.

De aardbevingsdichtheid daalt in de zes-maands observatieperiode van 0,415 aardbevingen/km²/jaar (de hoogste waarde op 9 november 2021) naar 0,248 aardbevingen/km²/jaar. Ook het gebied waarvoor de aardbevingsdichtheid berekend is (groen aangegeven in figuur 4) krimpt.

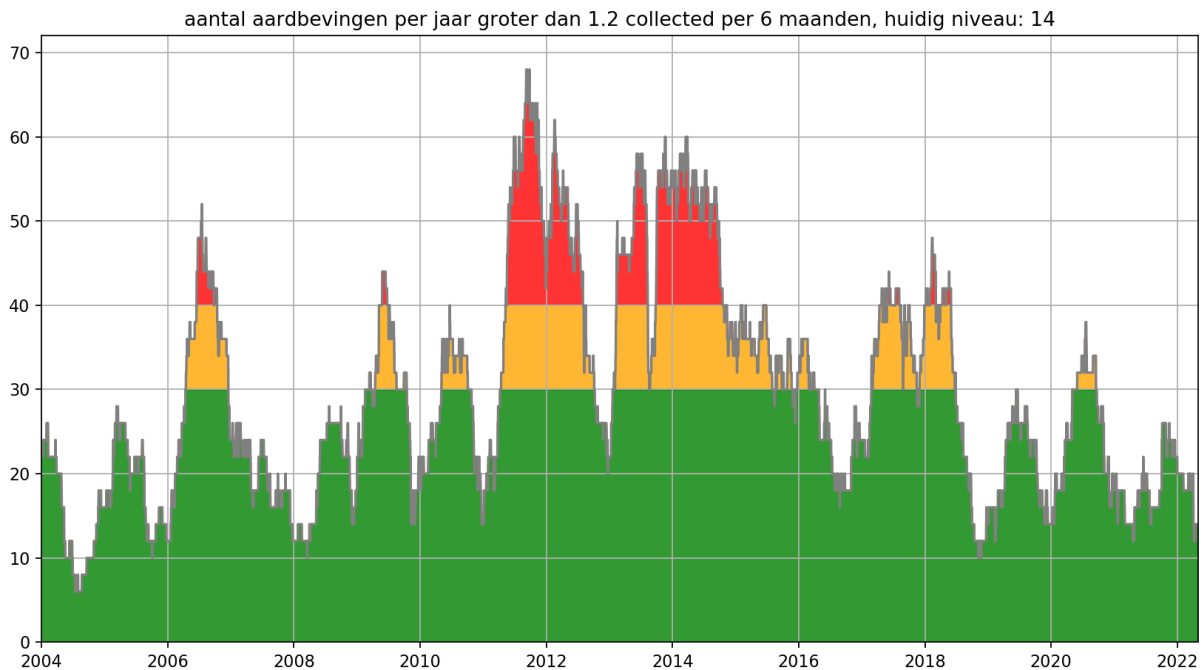
4 Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit

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

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

4.1 Aantal aardbevingen

In de afgelopen zes maanden zijn in totaal 7 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 14 aardbevingen op jaarbasis. In de tweede week van april was het aantal aardbevingen voor korte tijd gedaald tot 12 aardbevingen per jaar. In de 10-jaar periode van midden 2008 tot midden 2018 is het aantal aardbevingen steeds hoger geweest. Sinds 2018 is het aantal aardbevingen slechts één keer lager geweest (eind 2018).



Figuur 5: 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 5. In de voorgaande periode (1 mei 2021 tot 1 mei 2022) zijn er **25** aardbevingen geregistreerd.

Tabel 5: 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-21	0	2	0	0	0	2
Jun-21	0	0	0	2	0	2
Jul-21	0	0	0	1	0	1
Aug-21	0	0	1	0	0	1
Sep-21	0	1	0	0	0	1
Okt-21	2	1	1	1	1	6
Nov-21	3	0	1	0	1	5
Dec-21	2	2	0	0	0	4
Jan-22	0	0	0	0	0	0
Feb-22	0	0	0	0	0	0
Mar-22	0	0	0	1	0	1
Apr-22	0	0	1	0	1	2
Tot Mei-Okt	2	4	2	4	1	13
Tot Nov-Apr	5	2	2	1	2	12
Totaal	7	6	4	5	3	25

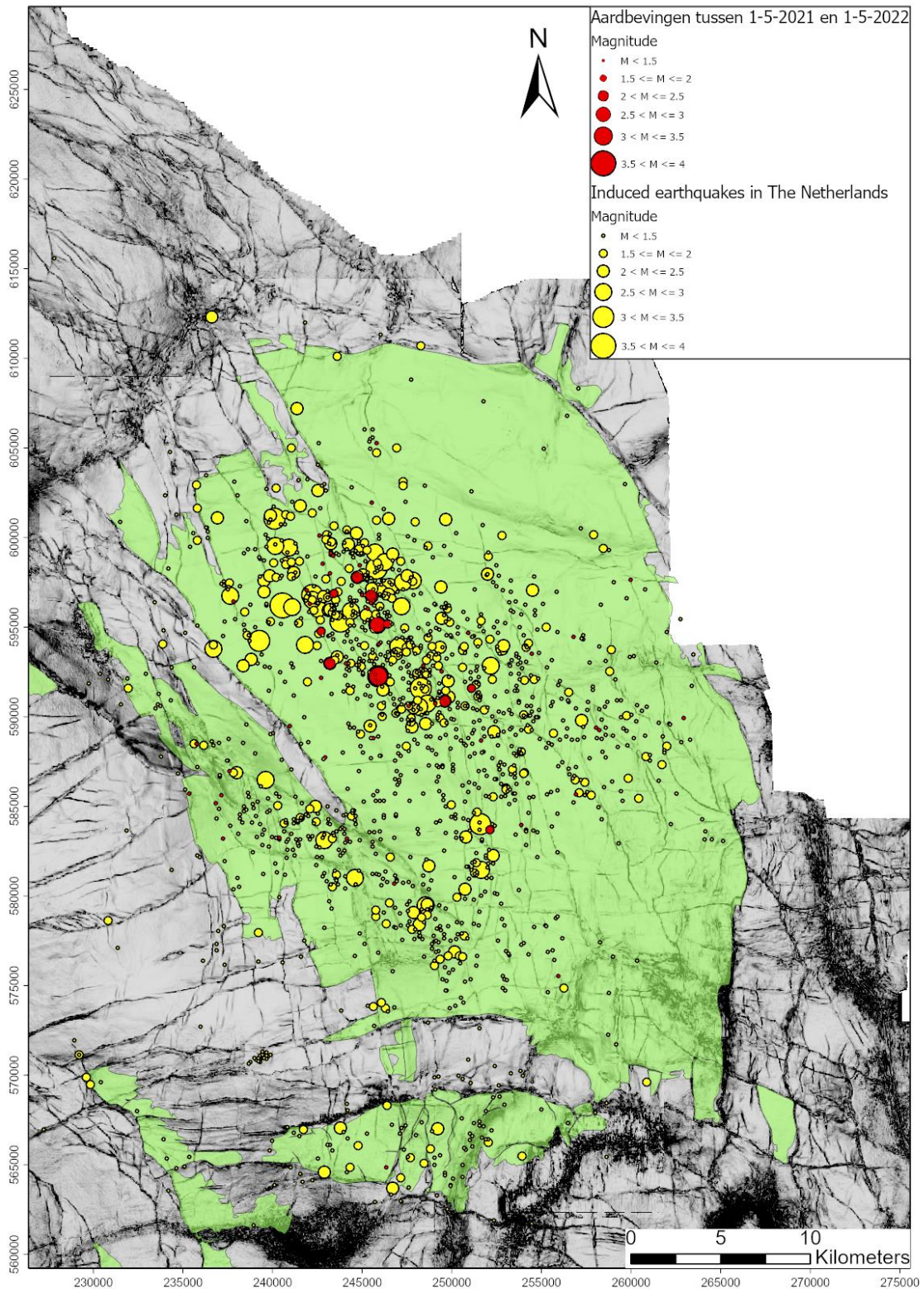
Figuur 6 laat de ontwikkeling van het aantal aardbevingen per jaar zien voor vier verschillende magnitude-klassen. Het panel linksboven (groene kleur) laat het jaarlijks aantal aardbevingen zien voor $M_L \geq 1,0$ (waarbij opgemerkt moet worden dat 2022 over de periode tot mei weergegeven is en dat 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 2.3. Dit is de reden dat deze geplotted is vanaf het jaar 2000 (paneel rechtsboven, paarse kleuren). Het linker paneel beneden (blauwe kleuren) laat aardbevingen zien met een magnitude van $M_L \geq 1,5$. Deze dataset is vrijwel zeker compleet vanaf 2000 en kan dus goed gebruikt worden om een historisch overzicht te geven van de seismische ontwikkeling. Het paneel rechts beneden tenslotte (in de rode kleuren), toont het aantal aardbevingen met een magnitude $M_L \geq 2,0$.



Figuur 6: Aantal aardbevingen per jaar voor vier verschillende magnitude-klassen. Het aantal aardbevingen in 2022 is aangegeven voor de periode tot mei 2022.

4.2 Distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld

De distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld is getoond op de kaart in Figuur 7. De locaties van de in de periode van 1 mei 2021 tot 1 mei 2022 (12 maanden) geregistreeerde aardbevingen in rood vallen in een kleiner gebied rond Loppersum. Duidelijk is te zien dat het gebied waar de aardbevingen optreden krimpt. De meeste aardbevingen treden op in het gebied rond Loppersum.



Figuur 7: Kaart van de diepe ondergrond met daarop in groen het Groningen-gasveld en de omliggende gasvelden. Met rode stippen zijn de in de periode mei 2021 tot mei 2022 geregistreerde aardbevingen aangegeven. Alle andere aardbevingen (vóór 1 mei 2021) 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 8); één onder de aanname dat de events quasi-Poisson verdeeld zijn (Figuur 9). 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 plaats vinden.

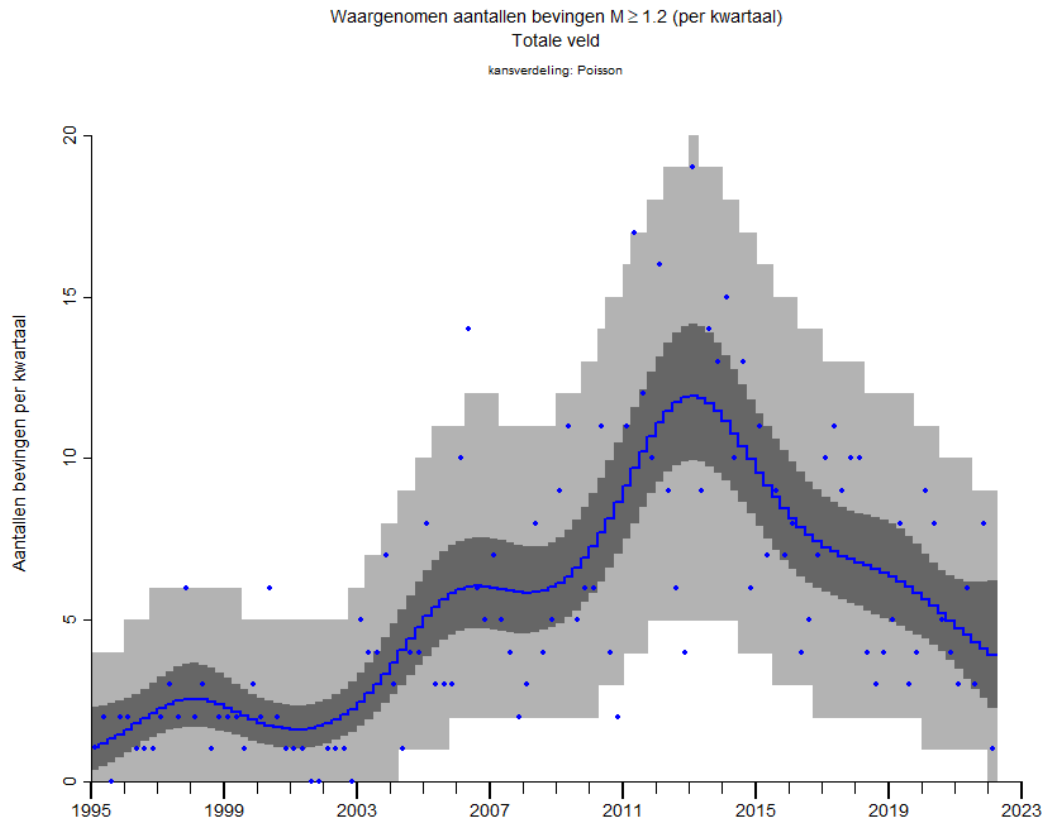
De quasi-Poisson verdeling kan gebruikt worden om een hogere mate (ten opzichte van de Poisson verdeling) van variabiliteit in aantallen aardbevingen tussen kwartalen te beschrijven. Deze hogere variabiliteit kan ontstaan door een bepaalde mate van correlatie tussen de events door naschokken.

De statistische analyse gebaseerd op de quasi-Poisson verdeling is meer robuust en resulteert in grotere onzekerheidsmarges. Beide plots bevatten de volgende informatie:

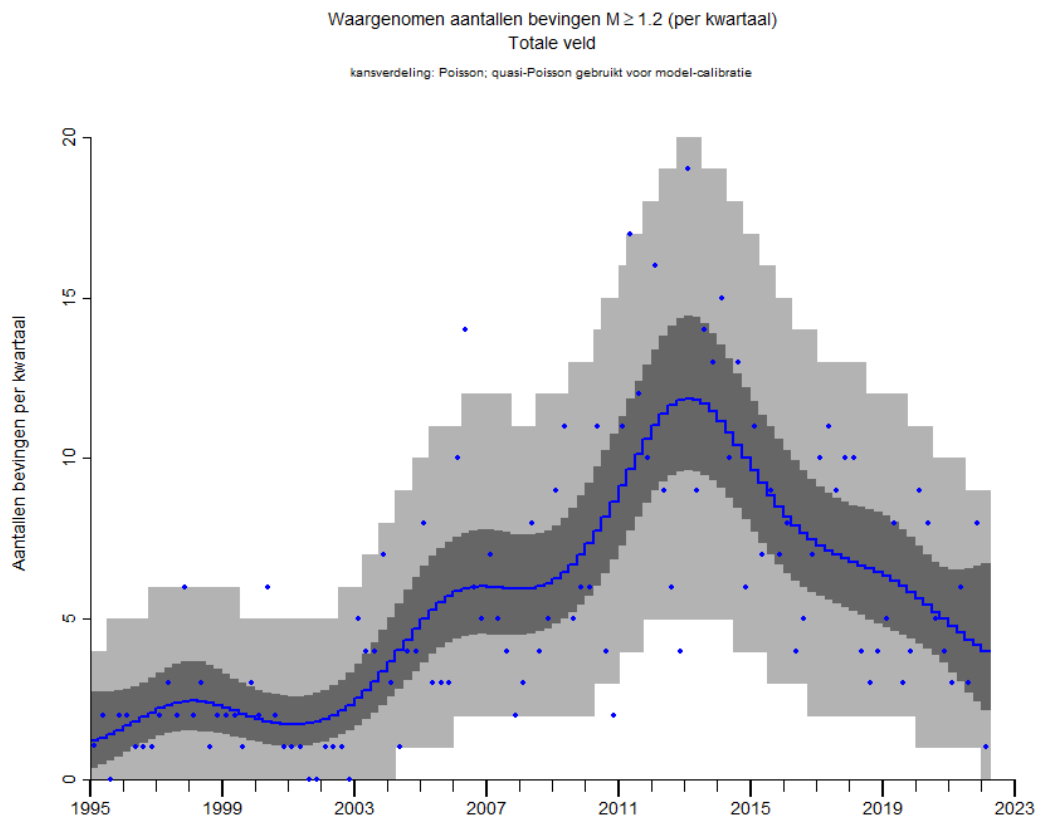
- Blauwe stippen voor het aantal seismische events per kwartaal
- Een blauwe lijn die de trendlijn van het aantal te verwachten seismische events weergeeft
- Een donkergrijze band; het 95% betrouwbaarheidsinterval van de trendlijn.
- Een lichtgrijze band; het 95% voorspellingsinterval van het aantal 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 er na 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 8: Trend en betrouwbaarheidsinterval van het aantal aardbevingen per kwartaal, bij Poisson verdeelde seismische events.



Figuur 9: Trend en betrouwbaarheidsinterval van het aantal aardbevingen per kwartaal, bij quasi-Poisson verdeelde seismische events.

Verband productie en seismiciteit per cluster en productielocatie

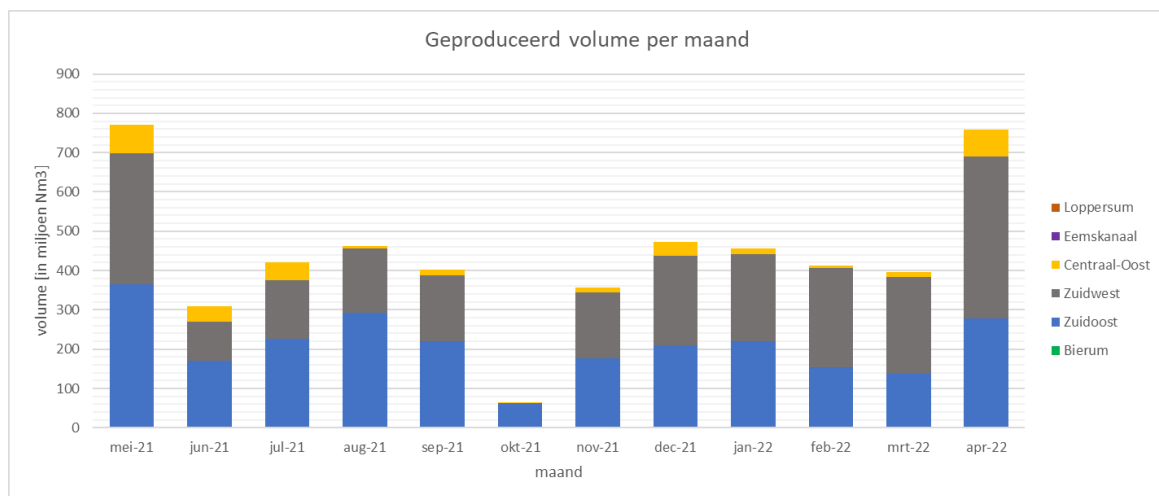
In welke mate de over een korte periode waargenomen variaties in de seismische monitoringsparameters een gevolg zijn van de wijze van opereren, van de lagere geproduceerde volumes, of van de natuurlijke variabiliteit in seismiciteit is niet direct vast te stellen. Er zijn modellen opgesteld waarmee seismische 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).

Het Groningen-gasveld is onderverdeeld in een aantal clusters zoals beschreven in de Mijnbouwregeling artikel 1.3a.1. In Tabel 6 is de verdeling van productielocaties per cluster opgenomen.

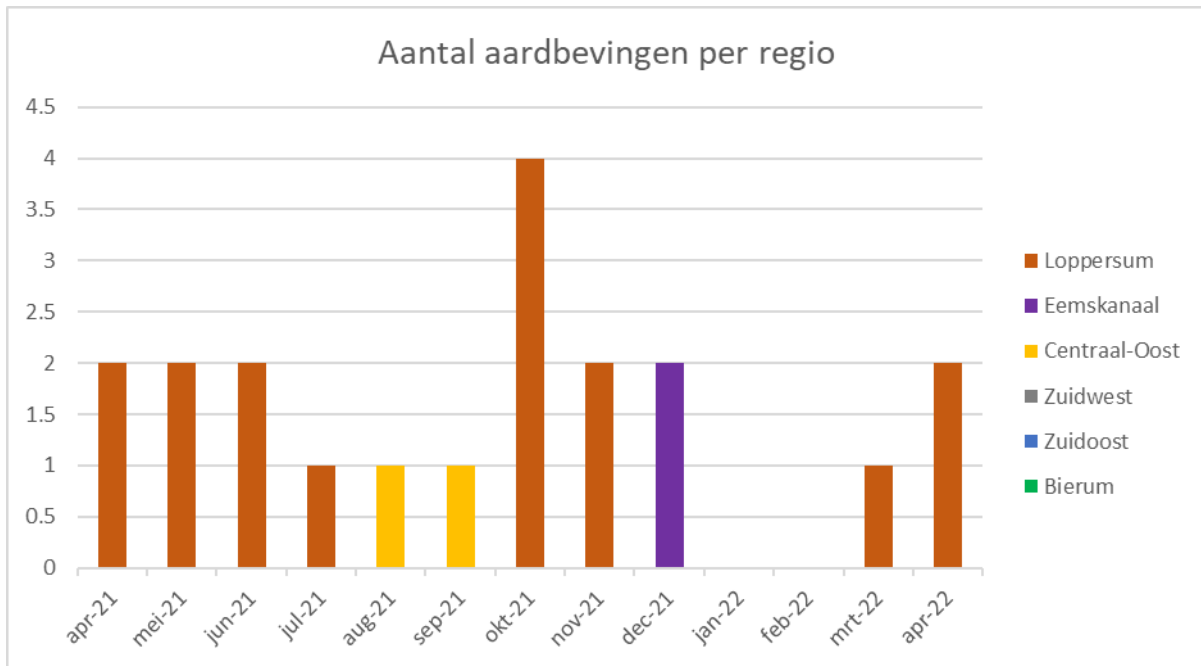
Tabel 6: Overzicht productielocaties per cluster volgens Mijnbouwregeling artikel 1.3a.1.

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

In Figuur 10 is de productie per cluster van productielocaties opgenomen over het voorgaande jaar (1 mei 2021 tot en met 30 april 2022). De productie uit het Loppersum cluster is per februari 2018 beëindigd. Sindsdien zijn ook locaties Bierum, Eemskanaal, Siddeburen en Tjuchem uit productie genomen. In Figuur 11 is het aantal aardbevingen van magnitude $M_L \geq 1,2$ geplot per cluster. Hoewel er geen gas wordt geproduceerd uit het Loppersum cluster is het aantal geregistreerde aardbevingen in dit cluster het hoogst.



Figuur 10: Geproduceerd volume per maand per cluster

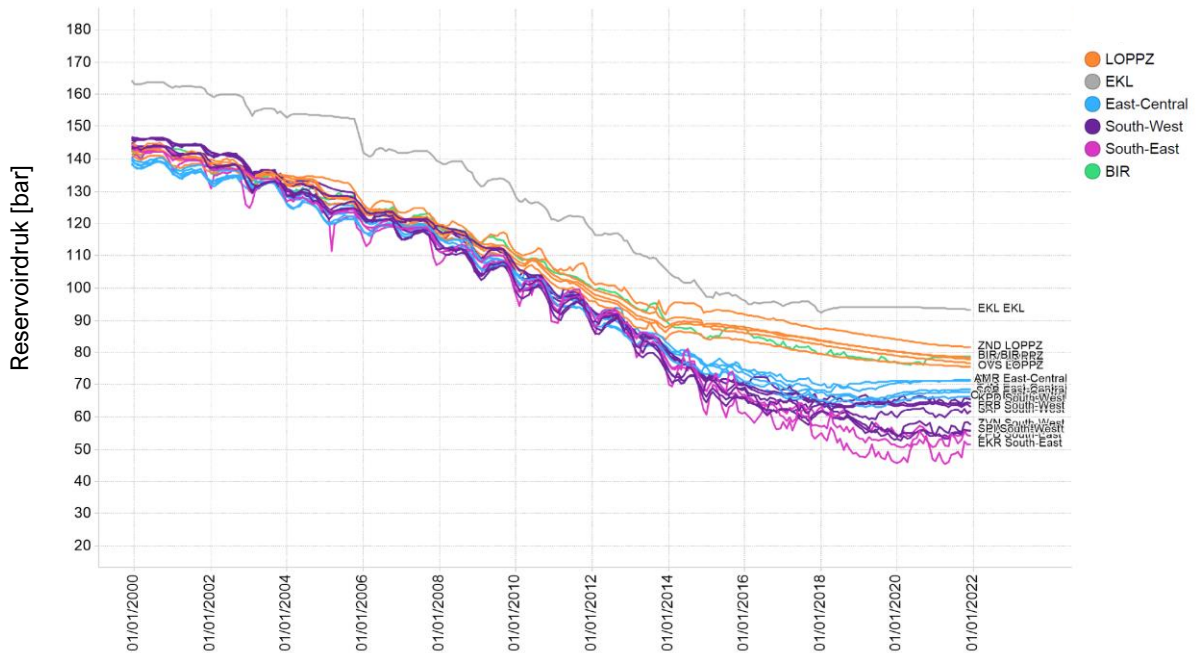


Figuur 11: Aantal aardbevingen per cluster.

In Figuur 12 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 aardbevingsdichtheid in het cluster Loppersum.

Figuur 12 toont dat de reservoirdruk in het cluster Centraal-Oost (blauwe lijnen, elke productielocatie wordt weergegeven door een aparte lijn) na 2018 stabiliseert en zelfs licht toeneemt ondanks de gasproductie uit dit cluster. Ook deze stijging is een gevolg van de herverdeling van de reservoirdruk. Of de reservoirdruk stijging in het cluster Centraal-Oost een effect heeft op de aardbevingsdichtheid, zie Figuur 13, is niet met zekerheid te concluderen.

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).



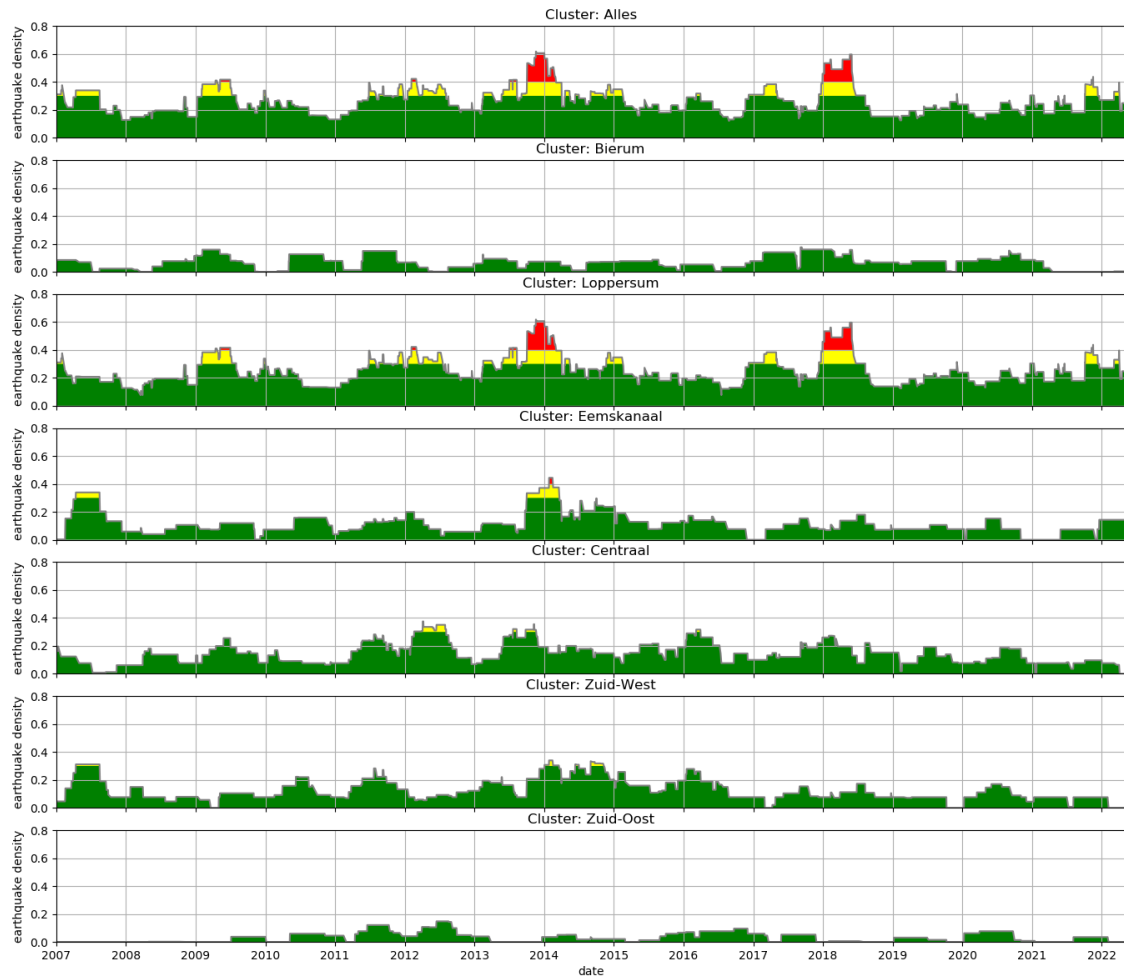
Figuur 12: Reservoir drukdaling in Groninger gasveld op basis van het gekalibreerde Groningen reservoirmodel. Merk op dat de druk in het cluster Loppersum (LOPPZ) ook bij verminderde en stilgelegde productie nog daalt.

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 13. 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 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. 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 13: De ontwikkeling van 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

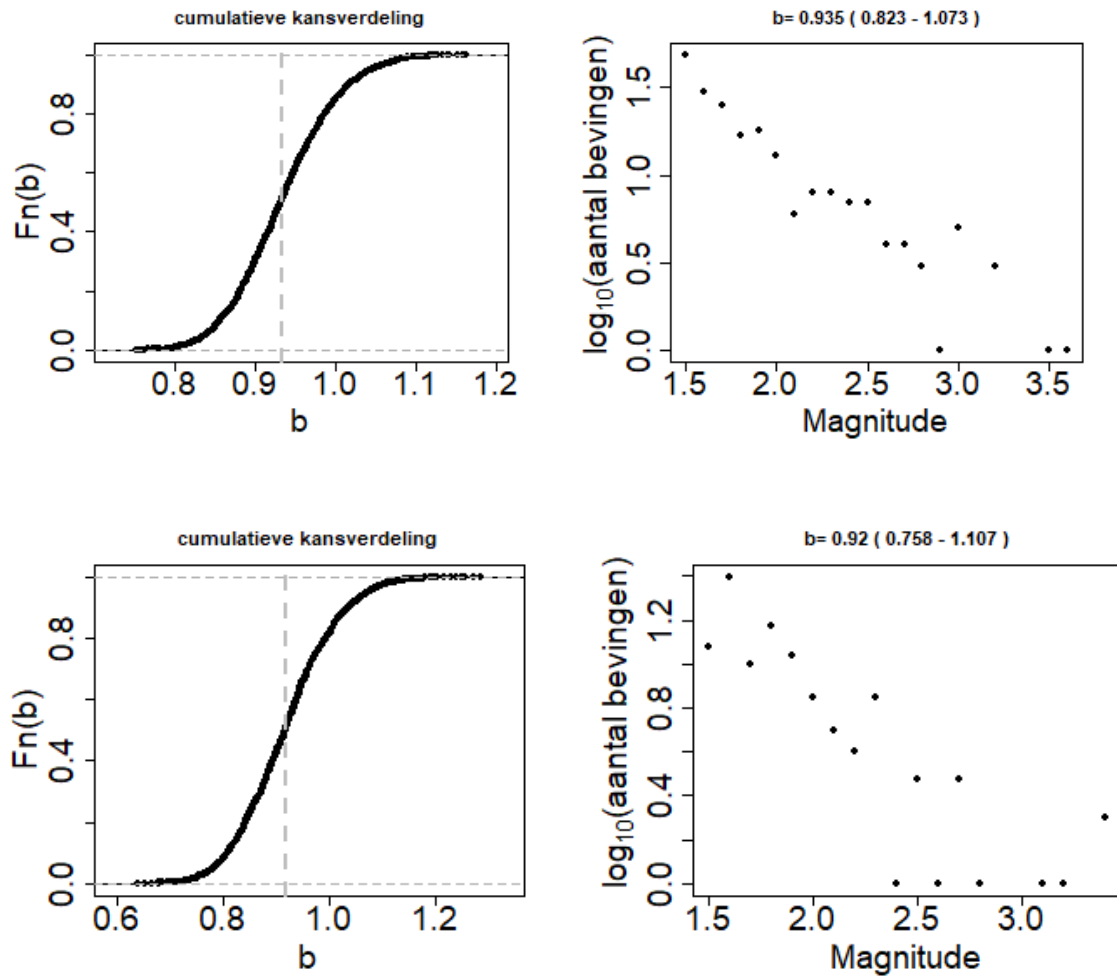
Verhouding tussen grote en kleine aardbevingen

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

Figuur 14 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 7. 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.

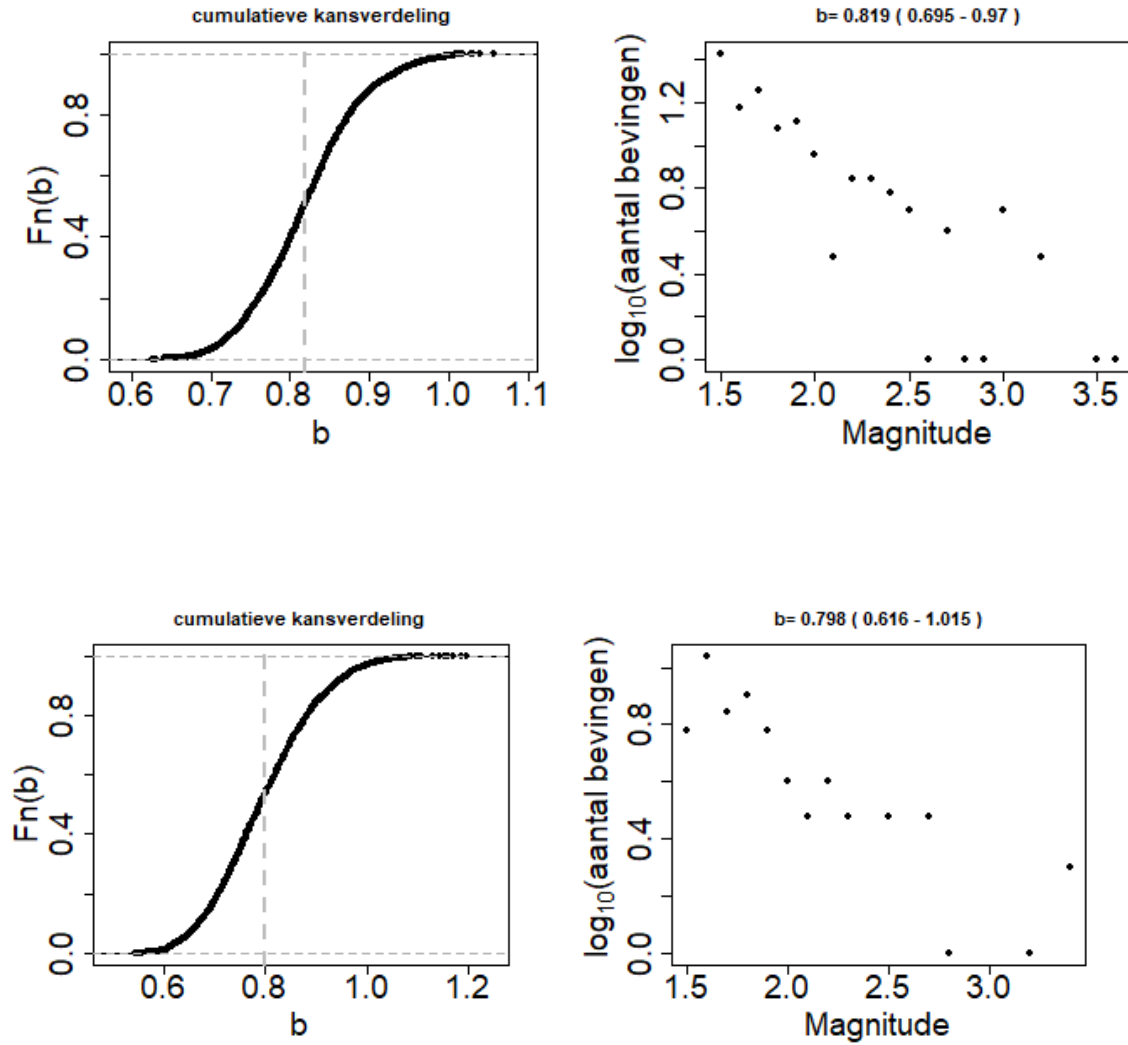
Tabel 7: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen over het hele Groninger veld.

Totale gebied Groningen		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2021
P _{2.5%}	0,82	0,76
P _{50%}	0,94	0,92
P _{97.5%}	1,07	1,11



Figuur 14: Gutenberg Richter plots voor het hele Groningen-gasveld. Bovenste panelen: Periode 2000 tot 2015. Onderste panelen: periode januari 2015 tot en met april 2022

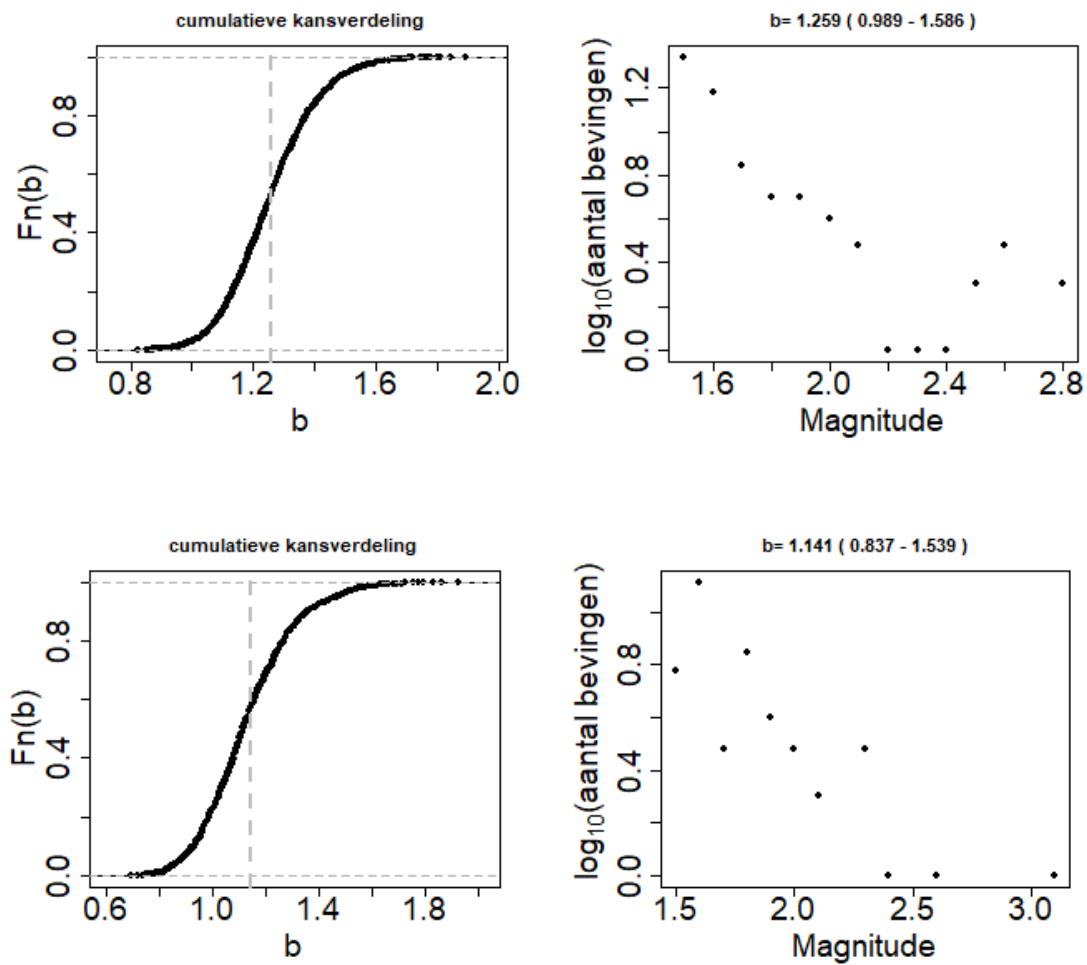
Figuur 14 en Figuur 15 geven twee Gutenberg-Richter plots voor respectievelijk de omgeving van Loppersum en het gehele veld exclusief de omgeving van Loppersum weer. In Tabel 8 en Tabel 9 zijn de b -waarden met hun betrouwbaarheidsintervallen weergegeven. Over beide beschouwde periodes zijn de b -waardes 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 15: 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 mei 2022.

Tabel 8: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b -waarden waargenomen in het gebied rond Loppersum.

Gebied Loppersum		
Perctiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2021
P _{2.5%}	0,70	0,62
P _{50%}	0,82	0,80
P _{97.5%}	0,97	1,02



Figuur 16: Gutenberg Richter plots voor het gehele veld exclusief de cluster Noordwest (het gebied rond Loppersum). Bovenste panelen: Periode 2000 - 2014. Onderste panelen: 2015 – 2022.

Tabel 9: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen over het gehele veld exclusief de cluster Loppersum.

Gehele veld exclusief Loppersum		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2021
P _{2.5%}	0,99	0,84
P _{50%}	1,26	1,14
P _{97.5%}	1,59	1,54

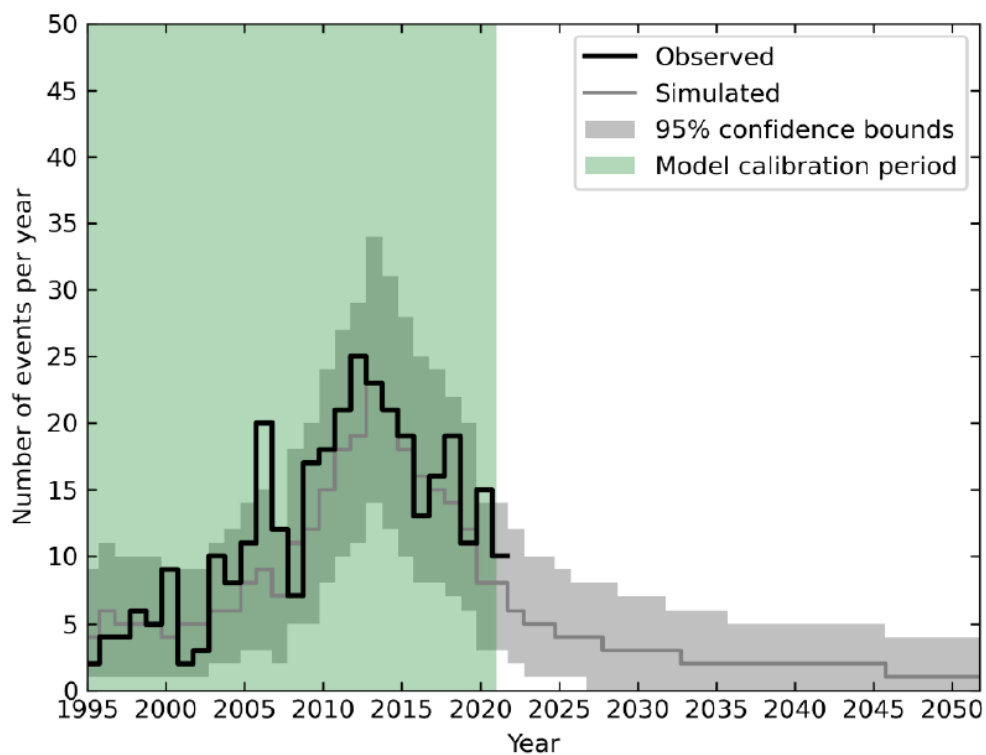
In tabel 10 zijn voor de eerder genoemde gebieden de b-waarden opgenomen. De b-waarde voor het hele veld lijkt voor de periode vanaf 2015 licht te zijn toegenomen ten opzichte van de periode ervoor. Dus het aantal aardbevingen met lagere magnitudes is relatief gezien groter dan aardbevingen met hogere magnitudes.

Tabel 10 Overzicht van de b-waarde ($P_{50\%}$) voor het gehele veld, het gebied Loppersum en het gehele veld exclusief het gebied Loppersum.

	b-waarde ($P_{50\%}$) 2000-2014	b-waarde ($P_{50\%}$) 2015-2021
Gehele Groningen-gasveld	0,94	0,92
Gebied Loppersum	0,82	0,80
Gehele veld exclusief Loppersum	1,26	1,14

4.4 Vergelijking met het SDRA-model

In maart 2022 heeft TNO een nieuwe seismische risicoinschatting gepubliceerd, de SDRA-2022 (Ref. 19). Deze inschatting is geïkt aan de aardbevingencatalogus van alle aardbevingen in Groningen met een magnitude van $M_L \geq 1,5$. Figuur 17 uit dit rapport toont de opgetreden en voorspelde aardbevingen.



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

Figuur 17 *Figuur 3.1 overgenomen uit de SDRA-2022 door TNO.*

Figuur 17 laat zien dat in 2022 zes 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 12. In de eerste vier maanden (tot 1 mei) van 2022 zijn er drie aardbevingen met een kracht $M_L \geq 1,5$ 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.

Appendix A - Aardbevingscatalogus 1 november 2021 tot 1 mei 2022

Tabel 11 Aardbevingen geregistreerd door het seismisch monitoring netwerk tussen 1 november 2021 en 1 mei 2022.

Plaats	Datum	Time hh:mm:ss	Magnitude	Diepte km	Easting	Northing	Veld
Garrelsweer	31/Oct/21	21:36:42	0.7	3	245911	591808	Groningen
Froombosch	4/Nov/21	04:43:44	0.3	3	246790	580693	Groningen
Scharmer	5/Nov/21	22:38:26	1.1	3	244137	583203	Groningen
Westeremden	8/Nov/21	01:52:16	1.7	3	242724	594754	Groningen
Oldenzijl	10/Nov/21	04:24:27	0.9	3	245520	601931	Groningen
Zeerijp	13/Nov/21	09:09:44	1	3	245415	596919	Groningen
Ten Post	13/Nov/21	16:12:23	0.9	3	245635	588797	Groningen
Westeremden	15/Nov/21	01:22:05	0.9	3	241882	597076	Groningen
Garrelsweer	15/Nov/21	12:41:52	0.6	3	247601	590616	Groningen
Garrelsweer	16/Nov/21	00:46:48	3.2	3	245903	592253	Groningen
Winneweer	16/Nov/21	01:34:16	0.6	3	245768	592362	Groningen
Garrelsweer	16/Nov/21	02:57:44	0.3	3	245774	592028	Groningen
Garrelsweer	16/Nov/21	04:38:04	0.2	3	245707	592027	Groningen
Winneweer	17/Nov/21	18:25:28	0.9	3	245632	592471	Groningen
Garrelsweer	24/Nov/21	15:11:12	0.5	3	249066	590755	Groningen
Garrelsweer	28/Nov/21	10:05:20	0.6	3	245976	591920	Groningen
Groningen	30/Nov/21	03:22:51	0.3	3	240396	583247	Groningen
Appingedam	30/Nov/21	08:42:09	1.1	3	254477	593536	Groningen
Toornwerd	1/Dec/21	00:24:20	0.7	3	237830	596448	Groningen
Noordwolde	1/Dec/21	19:16:34	1.1	3	235765	588510	Groningen
Steendam	1/Dec/21	20:26:08	0.9	3	251642	588692	Groningen
Borgsweer	5/Dec/21	02:38:05	0.2	3	262958	589935	Groningen
Groningen	9/Dec/21	12:18:28	1.2	3	235345	585720	Groningen

RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – MEI 2022

Plaats	Datum	Time hh:mm:ss	Magnitude	Diepte km	Easting	Northing	Veld
Groningen	18/Dec/21	02:33:25	1.3	3	237149	585639	Groningen
Oosterwijtwerd	25/Dec/21	22:31:12	0.6	3	250921	594688	Groningen
Eems-Dollard (nabij Farmsum)	27/Dec/21	07:55:47	1	3	259987	597662	Groningen
Stedum	28/Dec/21	19:19:04	0.2	3	242704	592193	Groningen
Wagenborgen	1/Jan/22	23:17:27	0.5	3	256911	585683	Groningen
Loppersum	24/Jan/22	00:27:26	0.6	3	245936	594035	Groningen
Siddeburen	26/Jan/22	03:51:37	0.3	3	253875	583950	Groningen
Startenhuizen Lopp	1/Mar/22	17:32:08	0.2	3	243243	599105	Groningen
Garsthuizen	1/Mar/22	19:40:23	0.7	3	243378	598996	Groningen
Zeerijp	6/Mar/22	13:18:30	2.1	3	244732	597797	Groningen
Startenhuizen Lopp	30/Mar/22	19:18:41	0.5	3	242787	598540	Groningen
Loppersum	1/Apr/22	17:11:08	2.7	3	245848	595146	Groningen
Zeerijp	13/Apr/22	07:19:27	0.5	3	244664	597907	Groningen
Zuidwolde	17/Apr/22	06:33:42	0.6	3	237593	586982	Groningen
Westeremden	17/Apr/22	13:27:46	1.6	3	243417	596882	Groningen
Westeremden	17/Apr/22	13:44:19	0.7	3	243286	596768	Groningen

Appendix B – Overzicht periodieke rapportages en speciale rapportages seismiciteit Groningen

Tabel 12 Rapportages van opmerkelijke seismische gebeurtenissen zoals aardbevingen met een grotere kracht of aardbevingszwermen.

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

Tabel 13 Halfjaarlijkse monitoringsrapportages voor de seismiciteit in het Groningen gasveld.

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

Appendix C – Evaluatie van het hypocentrum en het bron mechanisme van de aardbeving op 1 april 2022 Bij Loppersum met een kracht van $M_L = 2,7$

Deze appendix bevat een analyse van de aardbevingsregistraties door het seismisch monitoringsnetwerk dat door KNMI wordt geopereerd van de aardbeving op 1 april 2022 bij Loppersum met een kracht $M_L = 2,7$. Deze analyse is gedaan door medewerkers van het Shell laboratorium in Amsterdam met de daar ontwikkelde geautomatiseerde Full-Wave-Form inversion. Deze aardbeving is nummer 8 toegewezen.



Event 8 - Loppersum

01 April 2022 17:11:08

4 April 2022

Induced Seismicity Taskforce

Disclaimer

- The results presented in this report have been automatically generated using an unconstrained full waveform, event location and moment tensor inversion workflow, developed by the Induced Seismicity Taskforce at Shell.
- These results have not been previously reviewed.
- For questions related to the results then you should contact:
 - Chris Willacy (Christopher.Willacy@Shell.com) or
 - Jan-Willem Blokland (Jan-Willem.Blokland@Shell.com)

Event summary

The event happened at:

Date	01 April 2022
Time	17:11:08.535000

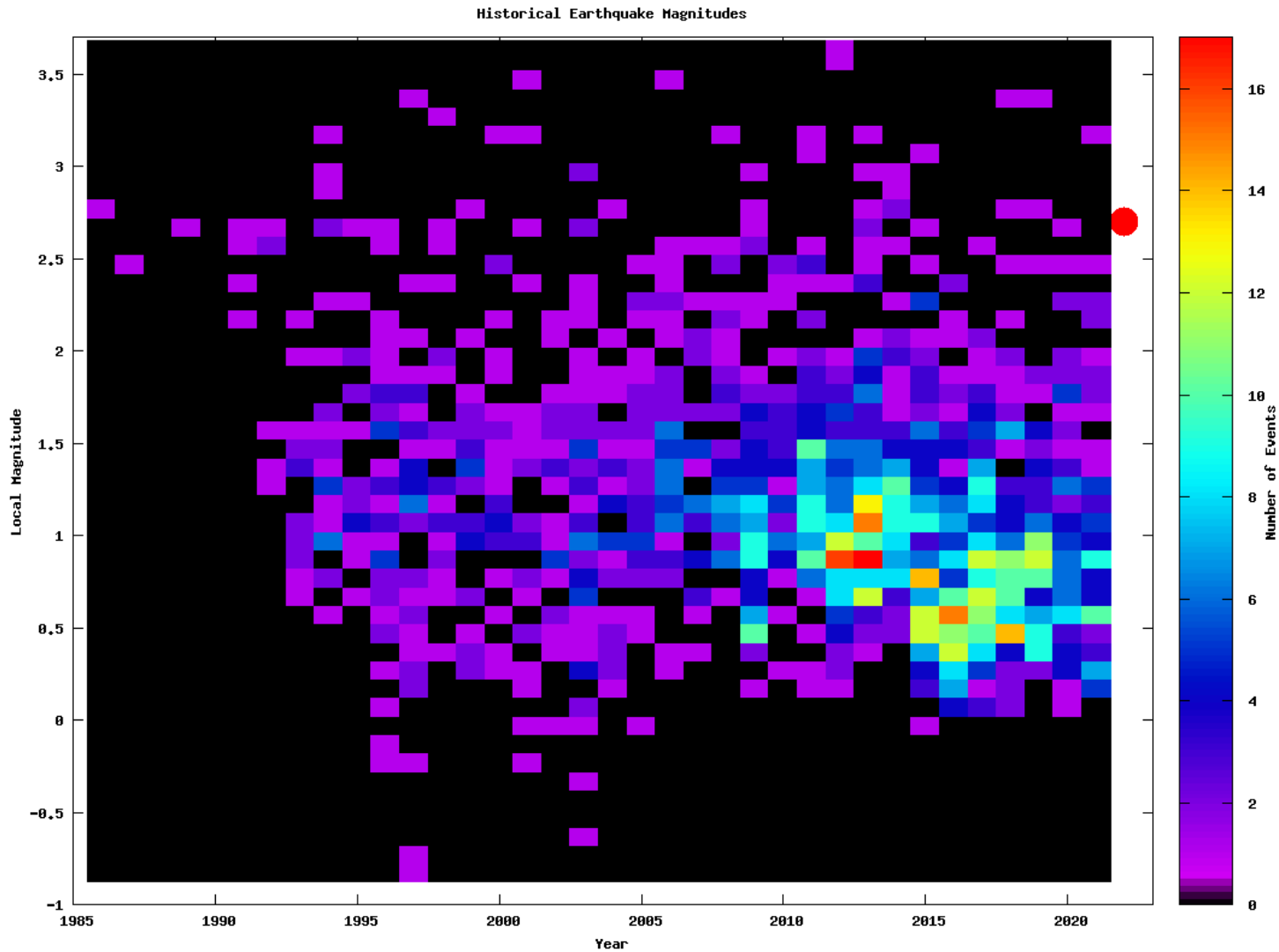
The event is located at:

Location	Loppersum
Northing (m)	595250
Easting (m)	246250
Depth (m)	2850

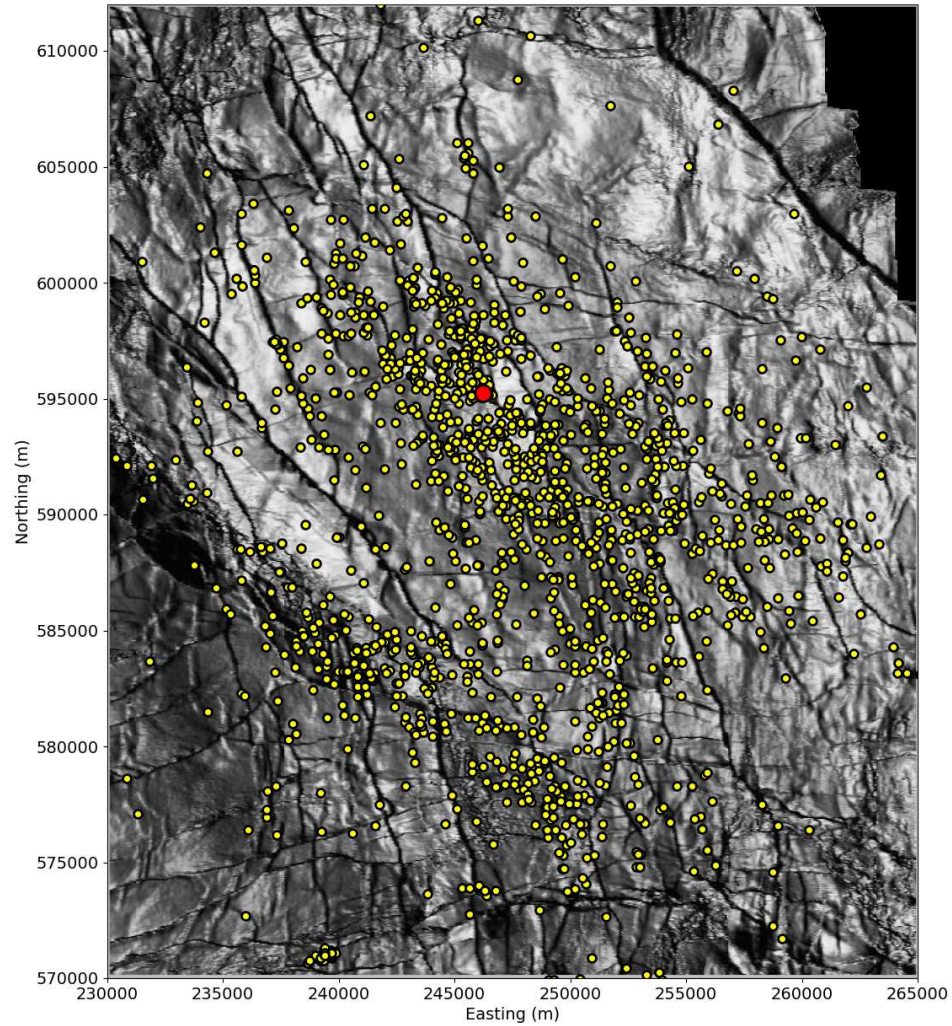
The source characteristics are:

	Solution 1	Solution 2
Strike angle (degree)	333.39	183.22
Dip angle (degree)	41.96	57.34
Rake angle (degree)	-114.86	-70.50
Isotropic (percentage)	2.70	2.70
CLVD (percentage)	10.97	10.97
Magnitude M_L	2.70	2.70

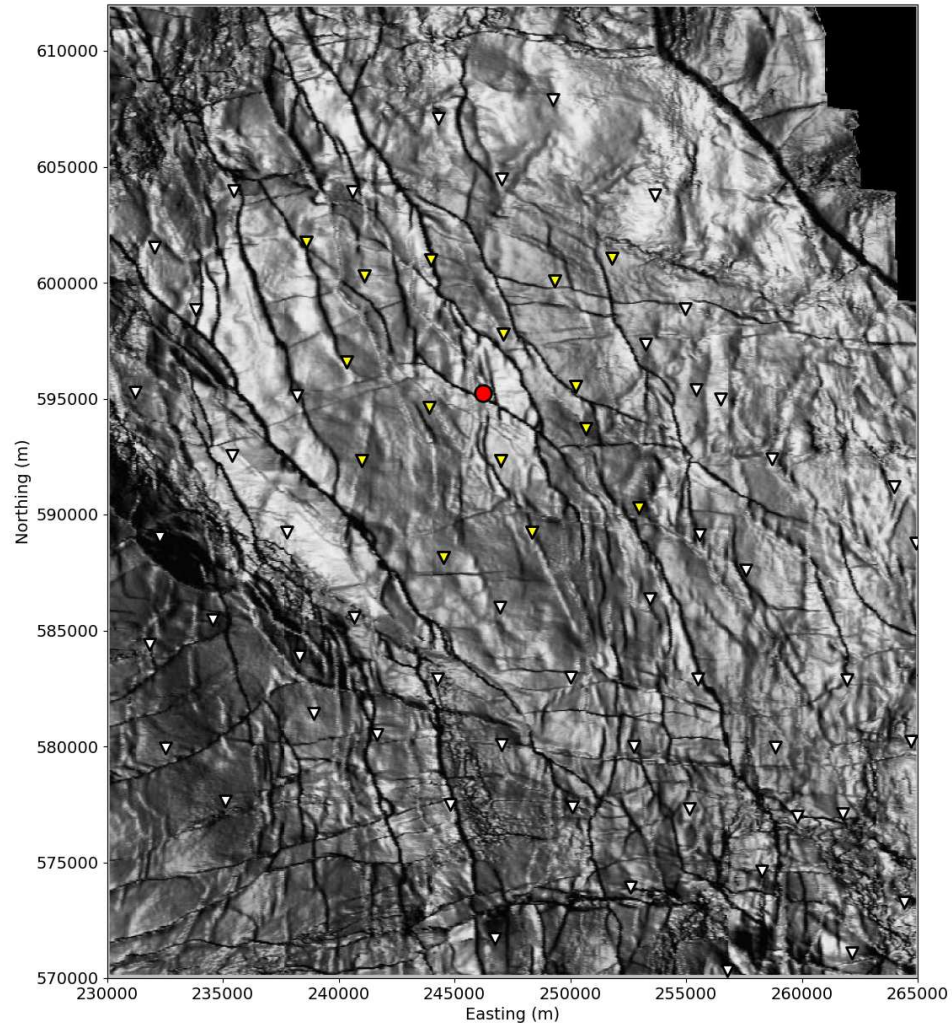
Magnitude summary



Regional and historical map

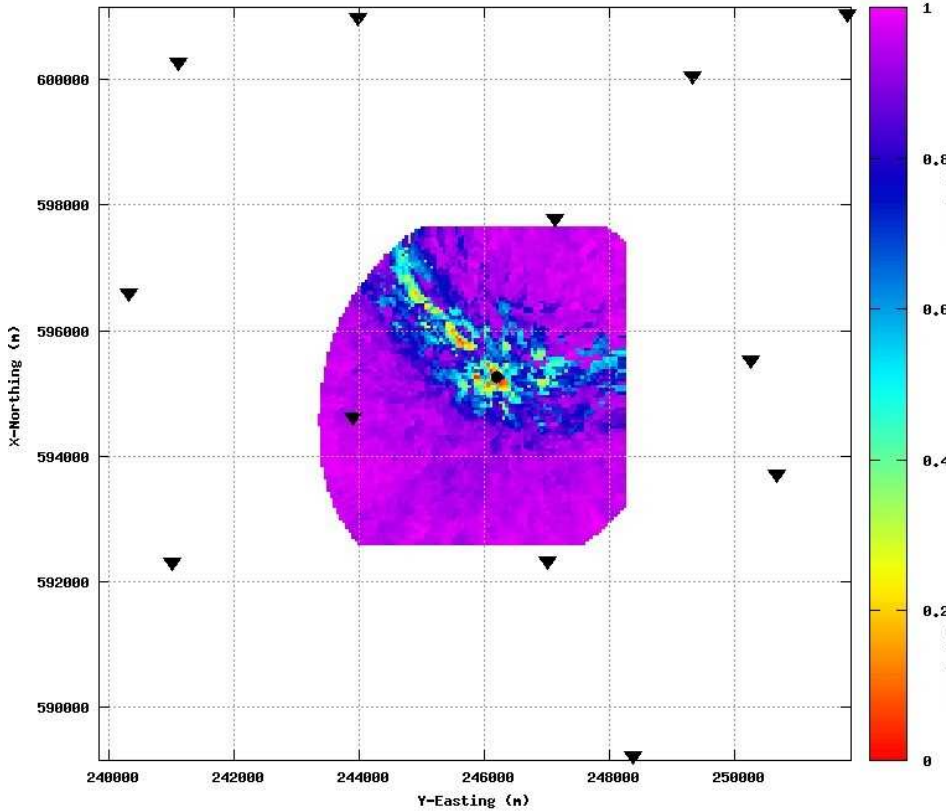


Event location - Map

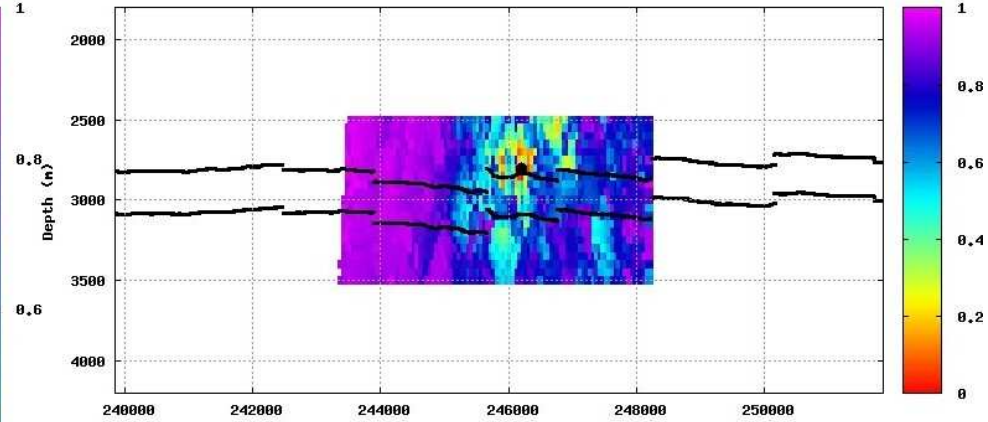


Event location and depth (initial)

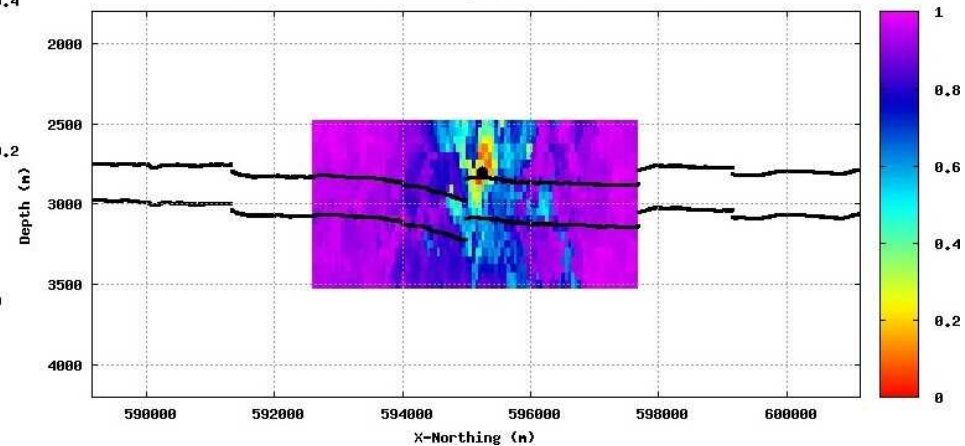
CORRVL, depth slice at ZSHT=2800m event:8 binmul:16



CORRVL, slice at X-Northing 595250m event:8 binmul:16

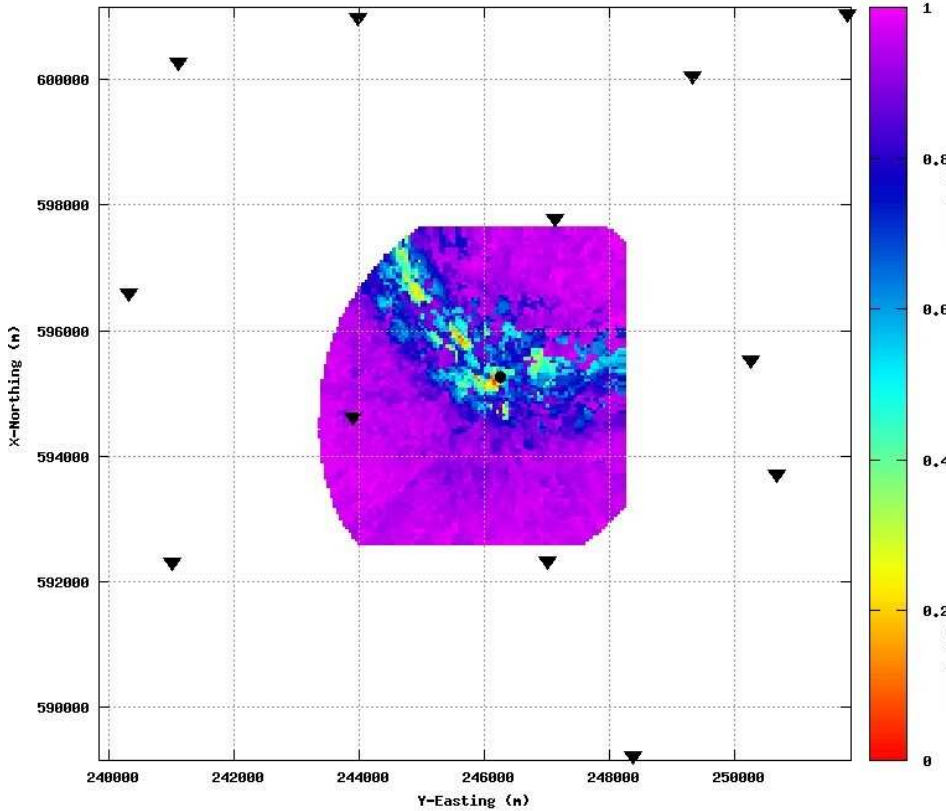


CORRVL, slice at Y-Easting 246200m event:8 binmul:16

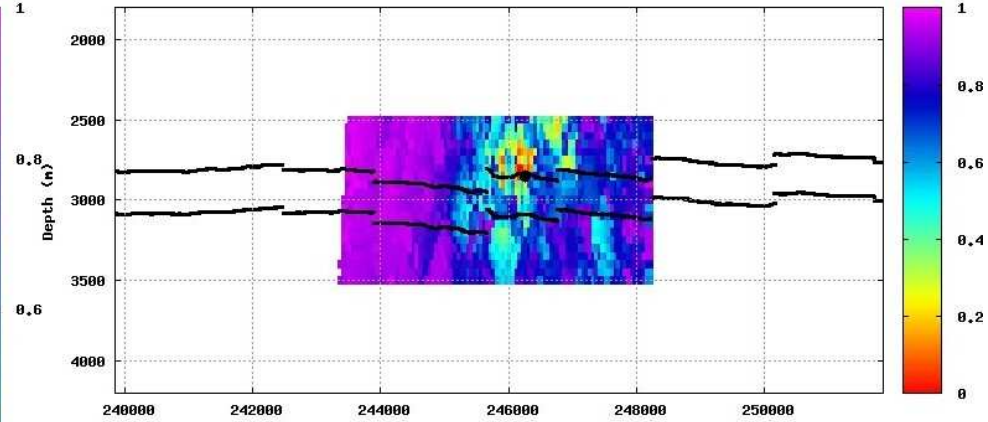


Event location and depth (alternative)

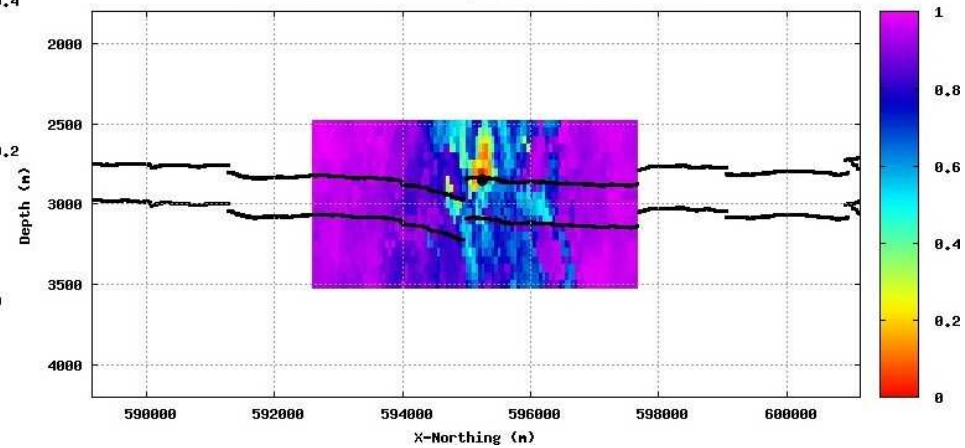
CORRVL, depth slice at ZSHT=2850m event:8 binmul:16



CORRVL, slice at X-Northing 595250m event:8 binmul:16

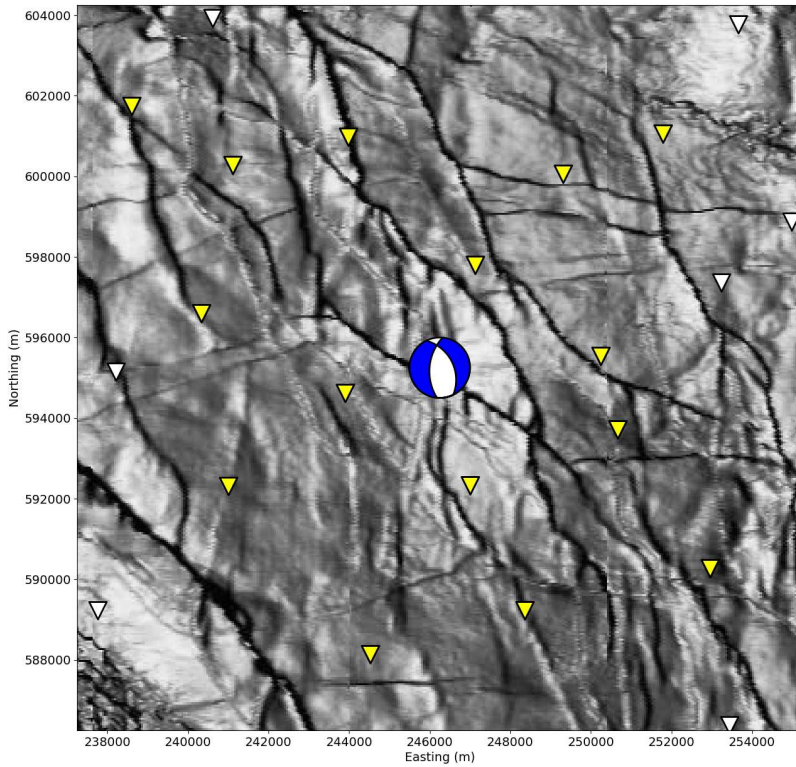


CORRVL, slice at Y-Easting 246250m event:8 binmul:16

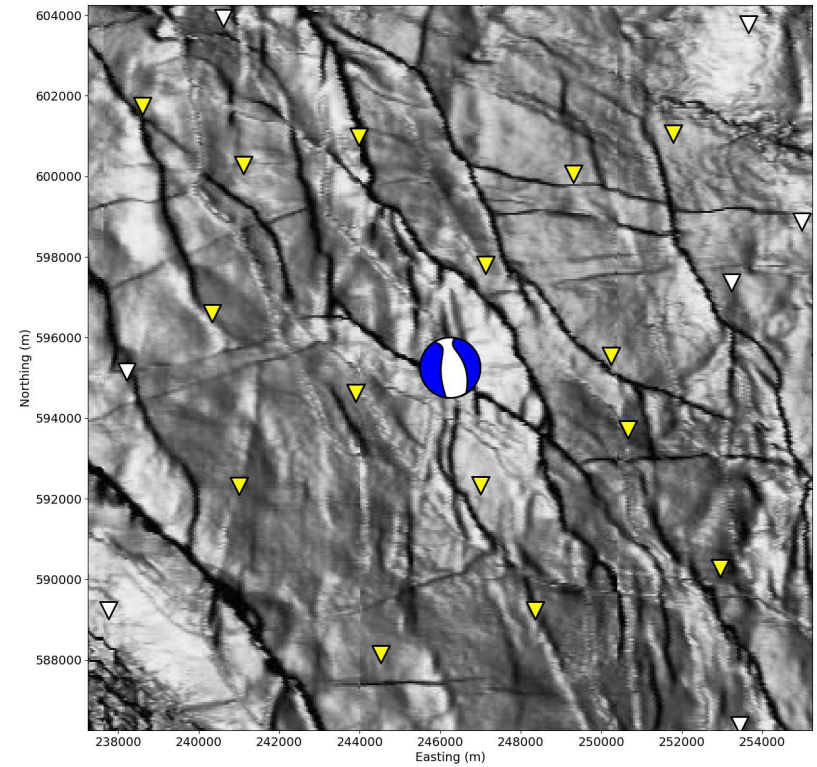


Moment tensor

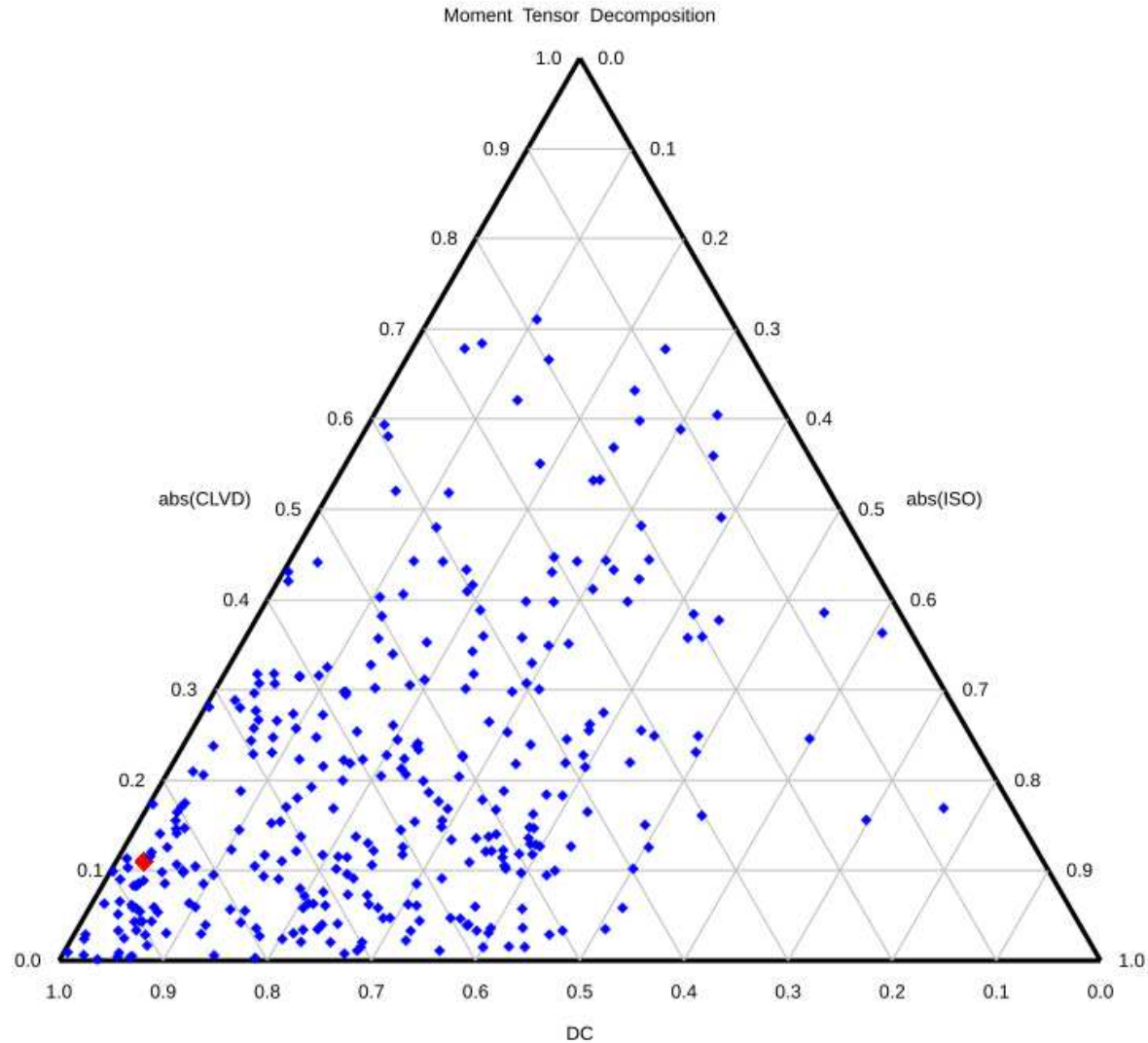
Double-coupled part



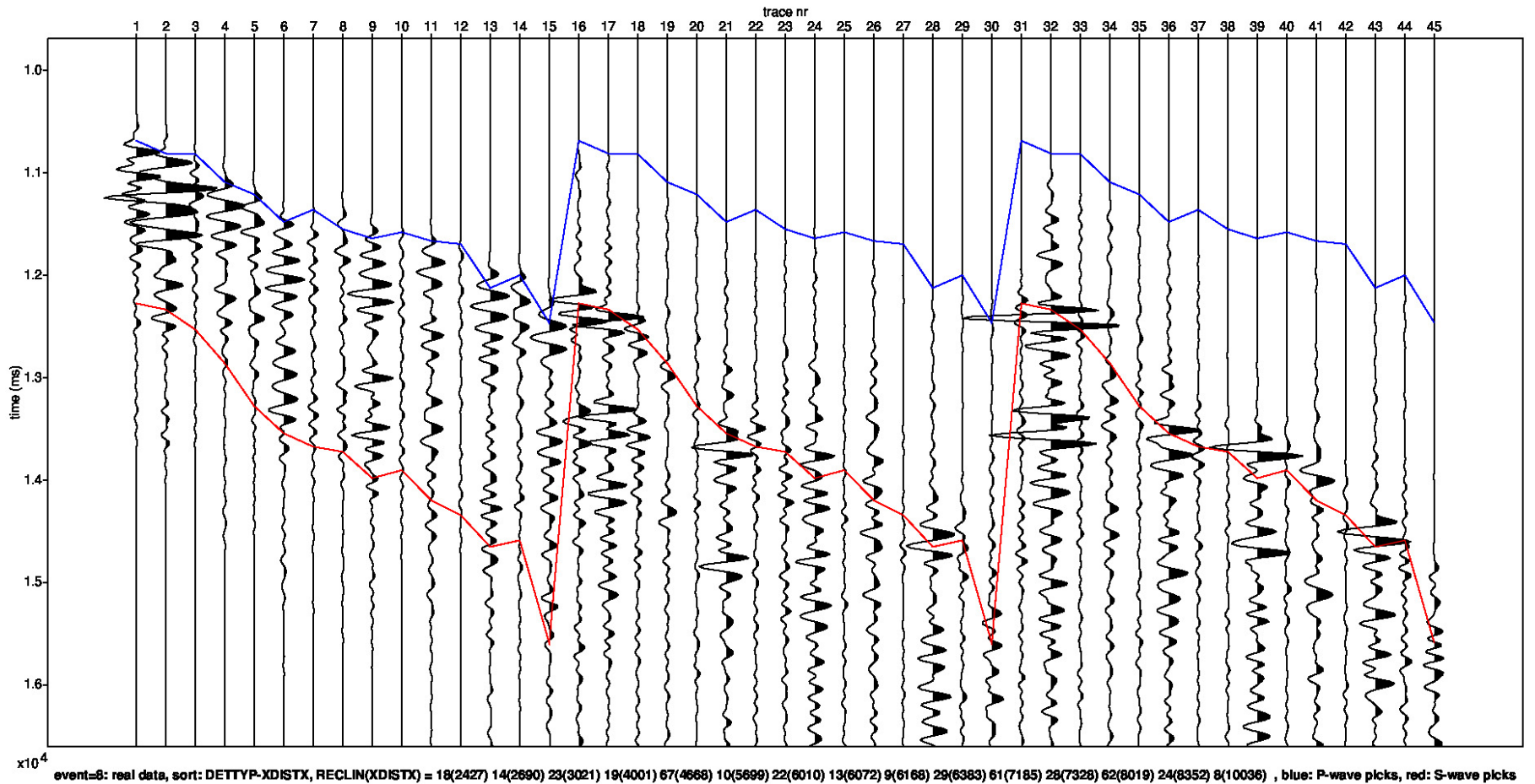
Full



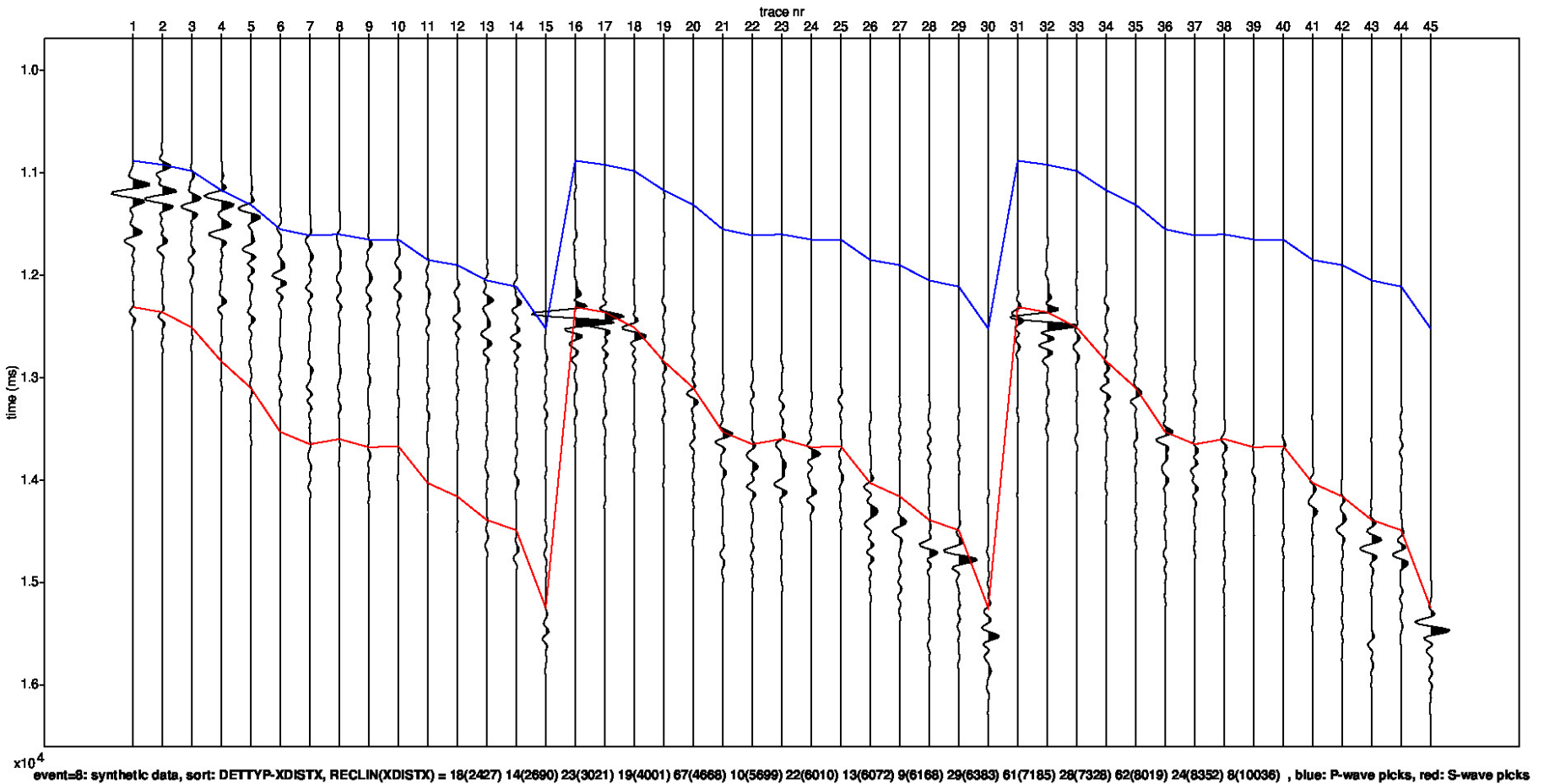
Moment Tensor: Decomposition



Field data traces



Modelled data traces



Appendix - Figure Captions

Page

- 3 Detailed parameter summary for the event. Both primary and secondary focal plane solutions are provided from the moment tensor inversion.
- 4 Magnitude summary. Prior years are displayed as a “heat map” where the number of events for a given magnitude is displayed per grid cell. The current event is displayed in red.
- 5 Regional map showing the historical events from KNMI (1986-2019) in blue and the location of the current event in red.
- 6 Event depth summary. Depths from our automatic workflow (2018-2020) are shown in blue and the current event depth is shown in red. The resolution of the vertical grid is 50m.
- 7 Event location details for the current event, superimposed on the top Rotliegend depth horizon. Station locations as shown as inverted triangles. Blue triangles are the actual stations used to locate the event whose epicentre is shown by the red dot.
- 8 QC displays extracted from the objective function for the initial event location. The colour attribute displayed is 1 minus the normalized cross correlation between observed and synthetic waveforms. Station locations are shown as black inverted triangles on the map and the event location is shown by the black dot (left plot). The west to east and north to south vertical profiles are shown on the right. The top and base reservoir are shown for reference as black lines.

Appendix - Figure Captions (continued)

Page

- 9 QC displays extracted from the objective function for the alternative event location. The colour attribute displayed is 1 minus the normalized cross correlation between observed and synthetic waveforms. Station locations are shown as black inverted triangles on the map and the event location is shown by the black dot (left plot). The west to east and north to south vertical profiles are shown on the right. The top and base reservoir are shown for reference as black lines.
- 10 Moment tensor inversion results for the event. The double couple portion of the moment tensor is shown on the left and the full moment tensor is displayed on the right. Station locations used in the inversion are shown as inverted triangles.
- 11 Ternary diagram showing the moment tensor decompositions into relative double-couple(DC), isotropic (ISO) and compensated linear vector dipole (CLVD) contributions. The automatic Shell events (2018-2020) are shown in blue and the current event is highlighted in red.
- 12 Observed traces for each station and each component. The automatic picks for the P- and S-waves are indicated by the blue and red lines respectively.
- 13 Modelled waveform data for each station and each component. The automatic picks for the P- and S-waves are indicated by the blue and red lines respectively.



