



> Retouradres Postbus 201 3730 AE De Bilt

Ministerie van Economisch Zaken en Klimaat
Directoraat generaal Klimaat en Energie
De heer [REDACTED]
Postbus 20401
2500 EK Den Haag

Bezoekadres
Utrechtseweg 297
3731 GA De Bilt
Postbus 201
3730 AE De Bilt
T 030-220 69 11
www.knmi.nl

Ing Bank NV
IBAN NL 05 INGB 0705000877
t.n.v. Min. IenW IBI KNMI
BIC INGBNL2A

Contactpersoon

[REDACTED]
T 06- [REDACTED]

Datum 20 mei 2021
Betreft Advies met betrekking tot de voorgestelde operationele strategie
Groningenveld gasjaar 2022-2023

Geachte heer [REDACTED]

In uw brief met kenmerk DGKE-PDG / 22134946 vraagt u het KNMI om advies met betrekking tot de voorgestelde operationele strategie voor het Groningenveld voor gasjaar 2022-23.

Ons kenmerk
KNMI-2022/1257

Uw kenmerk
DGKE-PDG / 22134946

Bijlage(n)
1

Uw adviesvragen luiden:

- Is de seismiciteit de afgelopen vijf jaar statistisch afgenomen?
- In hoeverre komt de geobserveerde seismiciteit overeen met de eerdere verwachtingen? En wat betekent dat voor de verwachtingen die voor het gasjaar 2022-2023 zijn opgesteld?

Ons advies is gebaseerd op een statistische analyse van de geobserveerde seismiciteit. Deze analyse is opgenomen in de bijlage. De antwoorden op de adviesvragen zijn hieronder gegeven.

Is de seismiciteit de afgelopen 5 jaar statistisch afgenomen?

Er zijn twee datasets van seismiciteit beschouwd, namelijk de frequentie van aardbevingen binnen de contour van het gasveld gemeten per gasjaar en de frequentie van aardbevingen binnen de grotere contour die gehanteerd wordt op het dashboard Groningen (<https://dashboardgroningen.nl/>) en die gemeten is per kalenderjaar. Beide datasets geven een vergelijkbaar resultaat. De statistische analyse van beide datasets wijst op een afname in de frequentie van bevingen met magnitude 1,5 of hoger sinds 2016. Deze aanwijzing is nog sterker wanneer de waarnemingen over de periode van 6 jaar van 2015 tot en met 2021 worden beschouwd.

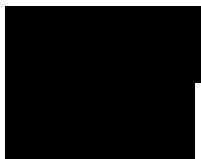
In hoeverre komt de geobserveerde seismiciteit overeen met de eerdere verwachtingen? En wat betekent dat voor de verwachtingen die voor het gasjaar 2022-2023 zijn opgesteld?

De geobserveerde seismiciteit is vergeleken met de door TNO gemodelleerde verwachting van de seismiciteit¹. De statistische toets wijst uit dat de door TNO

¹ TNO (2022) Publieke Seismische Dreigings- en Risicoanalyse Groningen gasveld 2022

verwachte afname in de frequentie van bevingen met een magnitude van 1,5 of hoger over de periode 2016-2021 compatibel is met de uit waarnemingen geschatte afname. De statistische analyse geeft daarom geen aanleiding om het model van de verwachte seismische activiteit aan te passen.

Hoogachtend,



Digitaal ondertekend
door [REDACTED]
Datum: 2022.05.20
11:32:28 +02'00'

[REDACTED]
Stratigisch Business Manager Seismologie en Akoestiek

Bijlage: Statistische analyse van de verandering in seismiciteit (periode 2016-2021)

1. Zijn de data consistent met een afname van de seismiciteit over de laatste vijf jaren?

Een statistische analyse is uitgevoerd op twee datasets om de vraag in hoeverre sprake is geweest van een afname van de seismiciteit over de periode van 2016 tot en met 2021 te beantwoorden. Als aanvulling hierop is ook verandering in seismiciteit vanaf 2015, dus voor een iets langere dataset, geanalyseerd.

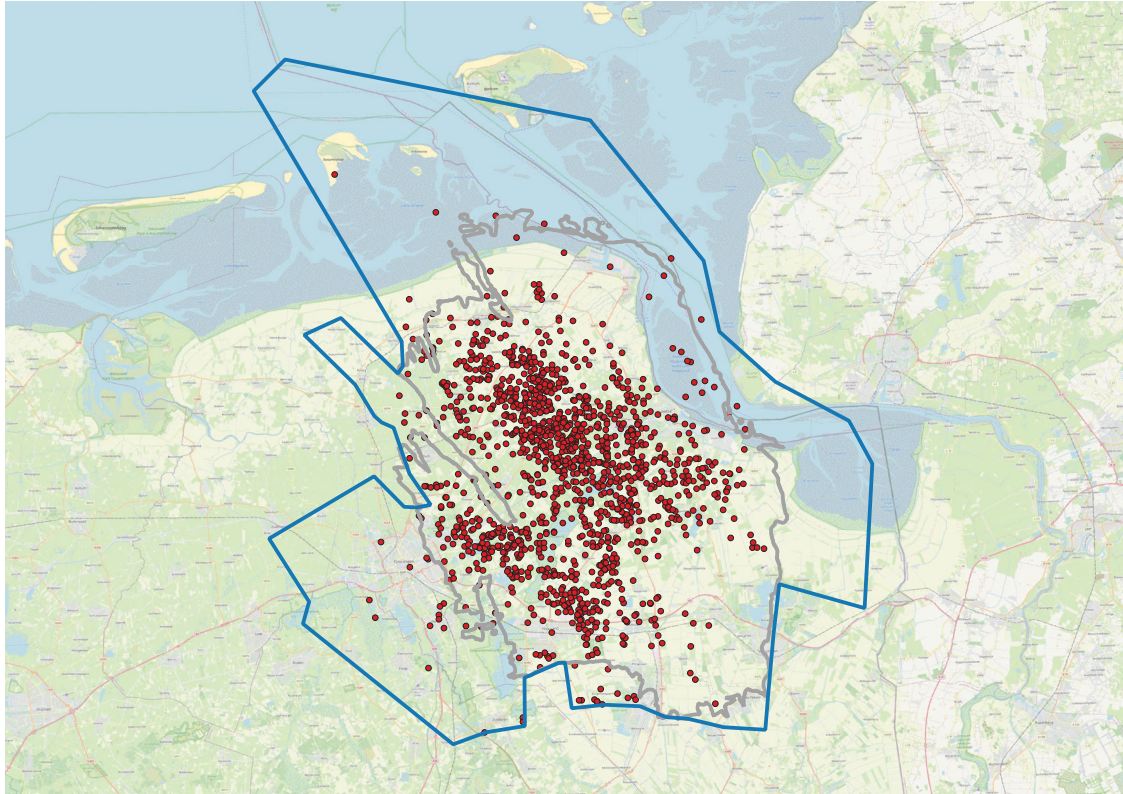
De twee datasets zijn:

- Gegevens van het aantal bevingen met magnitudes groter of gelijk aan 1,5 binnen de polygoon van het gasveld van Groningen, geordend per gasjaar. In de hazard berekeningen van TNO wordt uitgegaan van gasjaren. Een gasjaar loopt van 1 oktober tot en met 30 september van het volgende jaar.
- Gegevens van het aantal bevingen met magnitudes groter of gelijk aan 1,5 afgeleid van de gegevens op het dashboard (<https://dashboardgroningen.nl>), die gebaseerd zijn op een groter geografisch gebied, geordend per kalenderjaar.

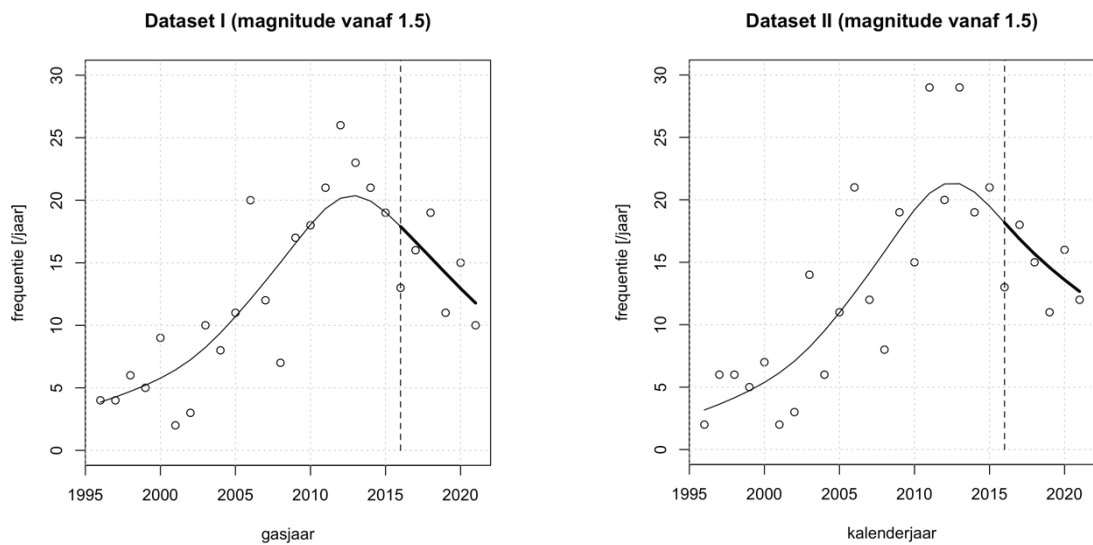
De geografische grenzen van de twee gebieden en de ligging van de aardbevingen tot en met 2021 zijn weergegeven in Figuur 1. Het aantal bevingen per jaar is voor de periode 1996 tot en met 2021 voor beide datasets weergegeven in Figuur 2. Vanaf 1996 is de aardbevingscatalogus compleet voor magnitudes groter of gelijk aan 1,5. Daarom is 1996 als startpunt van de datasets beschouwd.

Het verloop van de frequentie (= verwachting van het aantal bevingen per jaar) in de tijd is gemodelleerd met een gladde trendlijn (zwarte lijnen in Figuur 2). De logaritme van de frequentie wordt weergegeven als een gewogen som van gegeven gladde functies, die elk alleen van nul afwijken over een beperkt tijdinterval. De weegfactoren van deze functies worden geschat uit de data op zo'n manier dat ook de mate van gladheid van de trendlijn kan worden bepaald uit de data.

Uit Figuur 2 blijkt dat de geregistreerde aantallen bevingen per jaar in beide datasets globaal overeenkomen en in detail verschillen. Het aantal bevingen per jaar varieert sterk over de jaren. Vanaf ongeveer 2013 lijken de waargenomen aantallen bevingen over het algemeen af te nemen. De statistische betekenis van deze schijnbare afname wordt in deze sectie onderzocht.



Figuur 1: De aan de gasextractie gerelateerde bevingen in Groningen tot en met 2021 (rode stippen) met de grenzen van het gasveld voor dataset I (grijze lijn) en de gr nz en van het Groningen dashboard gebied voor dataset II (blauwe lijn).



Figuur 2: Geregistreerd aantal bevingen met magnitudes groter of gelijk aan 1,5 per gasjaar voor dataset I (links) en per kalenderjaar voor dataset II (rechts), weergegeven met stippen. De geschatte curv , bepaald m t $f = 0,73$, is weergegeven met de zwarte lijn, waarbij de periode 2016-2021 dik gedrukt is.

Het waargenomen aantal bevingen per jaar fluctueert sterk in de tijd. Als model voor de fluctuatie gebruiken we een Poisson proces met tijdsafhankelijke frequentie (= verwachting van het aantal bevingen per jaar). Dit betekent dat voor ieder jaar het aantal bevingen een Poisson verdeling heeft met een gemiddelde gelijk aan de frequentie voor dat jaar.

Een deel van de geregistreerde bevingen kunnen echter naschokken zijn, geactiveerd door eerdere bevingen ("triggered events"). Post et al (2021) schatten dat 27% van de bevingen met magnitudes vanaf 1,3 naschokken zijn. Bourne et al (2018) schatten een lagere fractie, namelijk van 10 tot 20%. Voor zover bekend is de verhouding tussen gewone bevingen en naschokken constant.

Naschokken hebben twee mogelijke effecten op de statistische analyse:

1. Ze kunnen de trend in de frequentie van bevingen met magnitudes groter of gelijk aan 1,5 beïnvloeden.
2. Het aantal van deze bevingen in een jaar wordt variabeler, waardoor de aanname van een Poisson proces niet meer op zou gaan.

De eerste effect kan worden uitgesloten door alleen naar *relatieve* veranderingen in de frequentie van bevingen te kijken. Deze relatieve verandering wordt niet beïnvloed door de naschokken, mits de fractie daarvan constant is.

Met het tweede effect is in de analyse expliciet rekening gehouden. Dit is gedaan door voorafgaand aan de analyse de geregistreerde aantallen bevingen te schalen met de fractie f van bevingen die geen naschok zijn, deze af te ronden, en daarmee de analyse uit te voeren. Voor deze geschaalde data kan vervolgens als benadering de Poisson verdeling gehanteerd worden. Er is uitgegaan van 27% naschokken ($f= 0.73$) volgens Post et al (2021) en 15% naschokken ($f= 0.85$), het middelpunt van de bandbreedte uit Bourne et al (2018). De in Figuur 2 geplote lijnen zijn bepaald uit trendlijnen geschat uit de aantallen bevingen geschaald met $f= 0.73$, die vervolgens weer zijn teruggeschaald naar de lijnen voor alle typen bevingen door middel van deling door f .

De hypothese die getoetst wordt is in hoeverre de afname in de geschatte frequenties sinds 2016 (dikke deel van de lijnen in Figuur 2) compatibel is met de veronderstelling dat de werkelijke frequentie niet is veranderd in deze periode, of met andere woorden dat de afname in Figuur 2 toevallig is. In de berekening wordt ervan uitgegaan dat het verschil van de logaritmen van de geschatte frequenties in 2021 en in 2016 normaal verdeeld is; de variantie van dit verschil is bepaald uit het geschatte model voor de trendlijn. Dit type toets staat bekend als een Wald toets. In de huidige context heeft deze toets het voordeel dat alle data kunnen worden gebruikt voor de schatting van het referentiemodel waarmee getoetst wordt (en niet alleen de data over 2016-2021). Dit levert een realistischer referentiemodel op dan wanneer dit alleen gebaseerd zou zijn op de data over 2016-2021. In plaats van een

hypothese te verwerpen of niet te verwerpen, zoals vroeger de gewoonte was, wordt de p -waarde met een kwalificatie gegeven (Amrhein et al, 2019).

Voor de toets is eerst de verhouding van de geschatte frequenties in 2021 en in 2016 berekend; deze is ongeveer 0,6. Vervolgens is de kans dat de geschatte verhouding kleiner of gelijk is aan deze verhouding berekend, onder de aanname dat de werkelijke verhouding gelijk is aan 1. Deze kans wordt de p -waarde genoemd. Een zeer kleine p -waarde zou erop wijzen dat de veronderstelling van een gelijkblijvende frequentie niet consistent is met de data.

Resultaat van de statistische toets

Beide datasets worden getoetst met de aanname van geen naschokken, 15% naschokken (Bourne et al, 2018) en 27% naschokken (Post et al, 2021). De gevonden p -waarden zijn samengevat in Tabel 1 en hieronder uitgelegd.

Tabel 1: Resultaten statistische toets (p -waarden) voor twee datasets voor periode 2016-2021.

aanname over naschokken	p -waarde	
	dataset I	dataset II
geen getriggerde events	0,021	0,030
15% getriggerde events	0,025	0,037
27% getriggerde events	0,040	0,058

Voor beide datasets en alle aannames voor de fractie getriggerde events zijn de p -waarden vrij klein. Dit wijst op een afname van de frequentie van bevingen met magnitude 1,5 of hoger sinds 2016. Echter, de aanwijzing is niet sterk. Deze bevinding is dezelfde als in de analyse van vorig jaar op basis van de schattingen voor de jaren 2015-2020. De voornaamste reden voor de zwakke aanwijzing is dat er een vrij kort interval, namelijk 5 jaar, is beschouwd. De aanbeveling van vorig jaar was om een langere periode in de analyse mee te nemen.

We hebben derhalve de analyse herhaald voor de periode van zes jaar, van 2015 tot en met 2021. De resultaten zijn samengevat in Tabel 2. Voor beide datasets en voor alle aannames voor de fractie van getriggerde events zijn de p -waarden beduidend kleiner door een extra jaar in de analyse te betrekken. Dit komt doordat de onzekerheid iets kleiner is geworden, en doordat in 2015 relatief veel bevingen zijn waargenomen (zie Figuur 2). Met inachtneming van getriggerde events liggen de p -waarden in de orde van 2-4%, wat in aardwetenschappelijke toepassingen als een duidelijke aanwijzing voor een afname wordt beschouwd. Bovendien zijn deze p -waarden aanmerkelijk kleiner dan vorig jaar

gerapporteerd op basis van de schattingen voor 2015-2020. Dit versterkt onze conclusie dat de seismiciteit sinds 2015 is afgenomen.

Tabel 2: Resultaten statistische toets (p -waarden) voor twee datasets voor periode 2015-2021.

aannname over naschokken	p -waarde	
	dataset I	dataset II
geen getriggerde events	0,012	0,015
15% getriggerde events	0,016	0,021
27% getriggerde events	0,029	0,036

Het is waarschijnlijk dat dataset I een grotere fractie naschokken bevat dan dataset II. Dataset II is namelijk gebaseerd op een groter gebied. De bevingen die in het gebied tussen het veld en de grens van het in dataset I beschouwde gebied voorgekomen zijn, zijn ontstaan in een aquifer die in contact staat met het reservoir. Omdat in de aquifer geen gasextractie plaatsvindt, zijn deze “extra” bevingen per definitie getriggerd. Dit lijkt te worden bevestigd door schattingen van de variantie van het aantal bevingen per gasjaar uit beide datasets, welke wijzen op een grotere variantie voor dataset I. De precisie van deze schattingen is echter lastig vast te stellen; daarom zijn ze niet direct gebruikt in de toetsing.

Conclusies van de eerste statistische toets

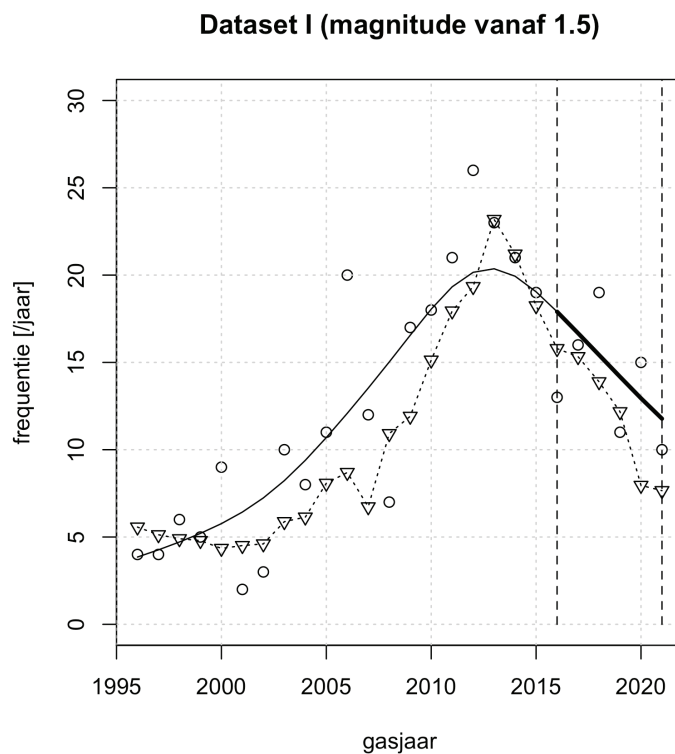
De statistische analyse van beide datasets wijst op een afname in de waargenomen frequentie van bevingen met magnitude 1,5 of hoger sinds 2016. Beschouwen we net als vorig jaar de periode vanaf 2015, dan geven beide datasets nu een sterkere aanwijzing dat de frequentie van bevingen sindsdien is afgenomen. We bevelen aan om volgend jaar de verandering in seismiciteit sinds 2015 te onderzoeken, zodat er op basis van nieuwe gegevens steeds meer zekerheid verkregen kan worden.

2. In hoeverre komt de g observ r seismiciteit ov r n me t de r r verwachting n?

De tweede statistische toets vergelijkt de geschatte verhouding van de frequenties in 2016 en 2021 (zie Sectie 1) met de door TNO verwachte frequentie (Figuur 3.1 uit TNO, 2022). Figuur 3 toont de waargenomen frequentie van bevingen en de geschatte frequenties uit Figuur 2, met de verwachte frequenties (gestippelde lijn). De verwachte frequentie is alleen

bekend voor de gasjaren en voor het geografische gebied van het veld, wat overeenkomt met dataset . Dataset is in deze analyse niet beschouwd.

De toets die is toegepast lijkt sterk op de voorgaande. De getoetste propositie is in dit geval niet dat de frequenties in 2016 en 2021 gelijk zijn (geen relatieve afname), maar dat de relatieve afname is zoals verwacht. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de verwachting alle typen bevingen omvat. Een mogelijke systematische onderschatting van alle frequenties in de vorm van een constante factor heeft geen enkel effect op de toets, omdat deze alleen de relatieve verandering beschouwt.



Figuur 3: Gemiddeld aantal vindingen met magnitude groter of gelijk aan 1,5 per gasjaar (circels) voor dataset I, en de geschatte frequentie van bevingen (curve) en verwachte frequentie (drie hoeken en stippellijn).

Resultaat van de statistische toets

Voor de veronderstelling dat de relatieve afname in frequentie over 2016-2021 niet minder is dan de voorspelde afname is de p -waarde 0,10 en 0,11 onder de aanname van respectievelijk 27% en 15% naschokken. De p -waarde is aanmerkelijk groter dan 0,05, wat betekent dat de verwachte afname compatibel is met de uit de waarnemingen geschatte afname. Voor de iets langere periode van 2013 tot en met 2021 bedragen de p -waarden 0,19 en 0,22, wat deze conclusie versterkt.

C nclusie van de tweede statistische toets

De statistische toets wijst uit dat de door TNO verwachte afname in de frequentie van bevingen met een magnitude van 1,5 of hoger over de periode 2016-2021 compatibel is met de uit waarnemingen geschatte afname. De statistische analyse geeft daarom geen aanleiding om het model van de verwachte seismische activiteit aan te passen.

3. Literatuur

Amrhein, V., Greenland, S., & McShane, B. (2019). Scientists rise up against statistical significance (Comment). *Nature* 567, 305-307. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-00857-9>

Bourne, S., Oates, S., & Van Elk, (2018). The exponential rise of induced seismicity with increasing stress levels in the Groningen gas field and its implications for controlling seismic risk. *Geophysical Journal International*, 213(3), 1693-1700. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy084>

Post, RA, Michels, MA, Ampuero, P, Candela, T, Fokker, PA, van Wees, D, van der Hofstad, RW & van den Heuvel, ER (2021). Interevent-time distribution and aftershock frequency in non-stationary induced seismicity. *Scientific reports*, 11(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82803-2>

TNO (2022) Publieke Seismische Dreigings- en Risicoanalyse Groningen gasveld 2022. TNO rapportnummer TNO2022 R10517 d.d 25 maart 2022.