



> Retouradres Postbus 201 3730 AE De Bilt

Ministerie van Economisch Zaken en Klimaat
Directoraat generaal Klimaat en Energie

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

T
E

Datum 21 mei 2021

Betreft Advies met betrekking tot de voorgestelde operationele strategie
Groningenveld gasjaar 2021-2022

Geachte heer ██████████,

In uw brief met kenmerk DGKE-PDG/21069801 vraagt u het KNMI om advies met betrekking tot de voorgestelde operationele strategie voor het Groningenveld voor gasjaar 2021-22.

Ons kenmerk
KNMI-2021/2851

Uw kenmerk
DGKE-PDG /21069801

Uw adviesvragen luiden:

- Is de seismiciteit de afgelopen 5 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 2021-2022 zijn opgesteld?
- Zijn de eventuele verschillen op de hierboven genoemde vragen verklaarbaar?

Bijlage(n)

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. Er zijn verschillende scenario's beschouwd voor het aantal naschokken. Beide datasets geven een vergelijkbaar resultaat. Voor beide datasets wijzen de waargenomen jaarlijkse aantallen bevingen met magnitude 1,5 of hoger op een afname van de seismiciteit sinds 2015. De beperkte duur van de datasets die nu beschikbaar zijn, staat echter niet toe om stellige conclusies te trekken ten aanzien van de afname van de seismiciteit.

In hoeverre komt de geobserveerde seismiciteit overeen met de eerdere verwachtingen? En wat betekent dat voor de verwachtingen die voor het gasjaar 2021-2022 zijn opgesteld?

Het voorspelde aantal bevingen per jaar is gebaseerd op gasjaren en is daarom de voorspelling met één van de twee datasets uit de vorige vraag vergeleken. De statistische toets wijst op een minder snelle afname van de waargenomen frequenties van bevingen in de periode van 2015 tot en met 2020 ten opzichte

van de voorspelde frequentie. De beperkte duur van de dataset die nu beschikbaar is, staat echter niet toe om stellige conclusies te trekken ten aanzien van de mate waarin de KNMI voorspelling overeenkomt met de waarnemingen. Voor de verwachtingen die voor het gasjaar 2021-2022 zijn opgesteld betekent dit dat er nog geen noodzaak is om het huidige model aan te passen. Het is echter wel raadzaam om in de komende jaren de mate van daling in de aantallen geobserveerde bevingen opnieuw te analyseren.

Zijn de eventuele verschillen op de hierboven genoemde vragen verklaarbaar?

Er zijn duidelijke aanwijzingen voor een afname van de geobserveerde seismiciteit, maar deze afname lijkt minder snel te verlopen dan verwacht. Omdat er een grote jaarlijkse variatie zit in de aantallen bevingen en er een beperkt aantal jaren verstreken is sinds de afbouw van de gasproductie, verwachten wij in de komende jaren met meer stelligheid uitspraken te kunnen doen over de gestelde vragen.

Hoogachtend,

Digitally signed by
[redacted]
Date: 2021.05.25
15:27:22 +02'00'



Bijlage: Statistische analyse van de verandering in seismiciteit (periode 2015-2020)

1 Zijn de data consistent met een afname van de seismiciteit over 2015-2020?

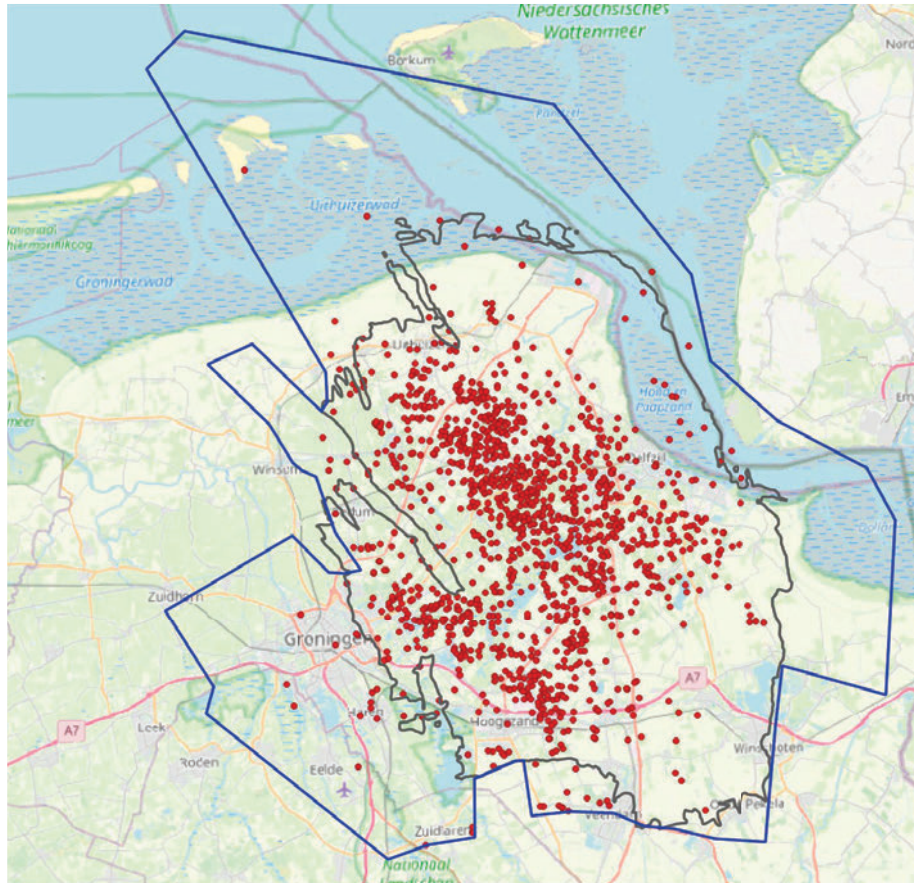
Een statistische analyse is uitgevoerd op twee datasets om de vraag in hoeverre sprake is geweest van een afname van de seismiciteit over de afgelopen vijf jaren te beantwoorden. De twee datasets zijn:

- I. 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.
- II. 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.

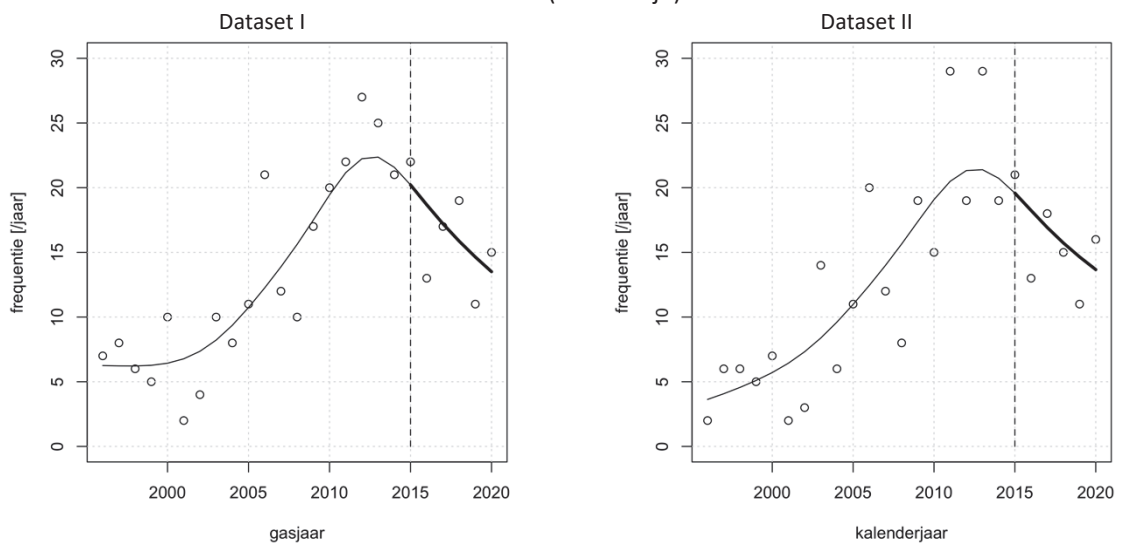
De geografische grenzen van de twee gebieden en de ligging van de aardbevingen tot en met 2020 zijn weergegeven in Figuur 1. Het aantal bevingen per jaar is voor de periode 1996 tot en met 2020 voor beide datasets weergegeven in Figuur 2. Vanaf 1996 is de aardbevingscatalogus compleet voor magnitudes 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 2020 (rode stippen) met de grenzen van het gasveld voor dataset I (grijze lijn) en de grenzen 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 curve, bepaald met $f = 0,73$, is weergegeven met de zwarte lijn, waarbij de periode 2015-2020 dikgedrukt 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 variabel, waardoor de aanname van een Poisson proces niet meer op zou gaan.

Het 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 (2020) 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 2015 (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 2020 en in 2015 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 2015-2020). Dit levert een realistischer referentiemodel op dan wanneer dit alleen gebaseerd zou zijn op de data over 2015-2020. 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 2020 en in 2015 berekend; deze is ongeveer 0,7. 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 de twee datasets voor de periode 2015-2020.

aannname over naschokken	p -waarde	
	dataset I	dataset II
geen getriggerde events	0,030	0,036
15% getriggerde events	0,039	0,049
27% getriggerde events	0,057	0,069

Dataset I

Voor dataset I onder aanname van 27% naschokken (Post et al, 2021) komt de berekende p -waarde uit op 0,057. Dit is vrij klein. De data wijzen dus op een afname van de frequentie van bevingen met magnitude 1,5 of hoger sinds 2015. Echter, het bewijs daarvoor is niet sterk. Daarvoor zouden p -waarden van lager dan circa 0,01 gevonden moeten worden. De onzekerheid is blijkbaar nog aanzienlijk. De voornaamste reden is dat er een vrij kort interval is beschouwd, namelijk 5 jaar. Voor een iets langere periode, van 2013 tot en met 2020, bedraagt de p -waarde 0,035. Deze kleinere waarde ondersteunt deze uitleg.

Voor de periode 2015-2020 en de aanname dat 15% van de bevingen naschokken zijn (Bourne et al, 2018) bedraagt de p -waarde 0,039 in plaats van 0,057. Dit is een iets sterkere indicatie voor een afname van de frequentie. Indien er niet gecorrigeerd wordt voor naschokken, dan bedraagt de p -waarde 0,030. De onzekerheid zou met deze aanname onderschat worden, maar de conclusie zou hetzelfde zijn: er is een aanwijzing voor de afname van de frequentie van bevingen met magnitude 1,5 of hoger sinds 2015.

Dataset II

Voor dataset II wordt onder de aanname van 27% naschokken een p -waarde van 0,069 gevonden, onder de aanname van 15% naschokken een p -waarde van 0,049 en zonder correctie voor naschokken een p -waarde van 0,036. Dit zijn iets hogere p -waarden dan voor dataset I. Deze waarden bevestigen de conclusie uit dataset I: de data wijzen op een afname van de frequentie van bevingen met magnitude 1,5 of hoger sinds 2015.

Het is waarschijnlijk dat dataset II een grotere fractie naschokken bevat dan dataset I. 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 II 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 II. De precisie van deze schattingen is echter lastig vast te stellen; daarom zijn ze niet direct gebruikt zijn in de toetsing.

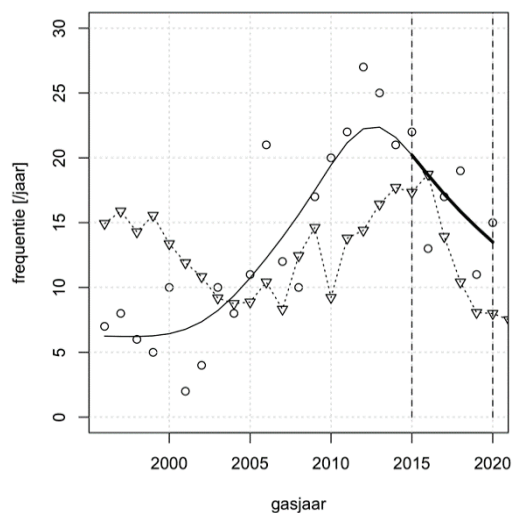
Conclusie van de eerste statistische toets

Voor beide datasets wijzen de waargenomen jaarlijkse aantallen bevingen op een afname in de frequentie van bevingen met magnitude 1,5 of hoger sinds 2015. De beperkte duur van de datasets die nu beschikbaar zijn, staat echter niet toe om stellige conclusies te trekken ten aanzien van de afname van seismiciteit.

2 In hoeverre komt de geobserveerde seismiciteit overeen met de eerdere verwachtingen?

De tweede statistische toets vergelijkt de geschatte verhouding van de frequenties in 2015 en 2020 (zie Sectie 1) met de door KNMI voorspelde verhouding. Figuur 3 toont de waargenomen frequentie van bevingen en de geschatte frequenties uit Figuur 2, met de voorspelde frequenties (gestippelde lijn). De voorspelde frequentie is alleen berekend voor de gasjaren en voor het geografische gebied van het veld, wat overeenkomt met dataset I. Dataset II 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 2015 en 2020 gelijk zijn (geen relatieve afname), maar dat de relatieve afname is zoals voorspeld. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de voorspelling 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: Geregistreerd aantal bevingen met magnitudes groter of gelijk aan 1,5 per gasjaar (cirkels) voor dataset I, en de geschatte frequentie van deze bevingen (curve) en de voorspelde frequentie (driehoeken en stippellijn).

Resultaat van de statistische toets

Voor de veronderstelling dat de relatieve afname in frequentie over 2015-2020 niet minder is dan de voorspelde afname is de p -waarde 0,049, 0,053 en 0,040 onder de aanname van respectievelijk 27%, 15% en 0% naschokken. Dit wijst erop dat de waargenomen frequentie minder snel afneemt dan de voorspelde frequentie. Echter, het is geen sterke aanwijzing.

Voor een iets langere periode (2013-2020), bedraagt de p -waarde 0,12, waarmee de aanwijzing dat de voorspelde afname te sterk is zwakker wordt. De gevoeligheid voor de gekozen periode zou deels het gevolg kunnen zijn van het vrij snel op en neer gaan van de voorspellingen. Wanneer de voorspellingen net als de waarnemingen worden gladgestreken, dan zijn de uitkomsten vergelijkbaar. Er is echter geen goede reden om de voorspellingen glad te strijken.

Conclusie van de tweede statistische toets

De statistische toets wijst op een minder snelle afname van de waargenomen frequentie van bevingen in de periode van 2015 tot en met 2020 ten opzichte van de voorspelde frequentie. De beperkte duur van de dataset die nu beschikbaar is, staat echter niet toe om stellige conclusies te trekken ten aanzien van de mate waarin de KNMI voorspelling overeenkomt met de waarnemingen.

Mogelijk is dit over enkele jaren anders: de voorspelling laat een voortgaande sterke daling van het aantal bevingen zien, wat tot uiting zou moeten komen in de aantallen bevingen per gasjaar die zullen worden gemeten.

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, SJ, Oates, SJ, & Van Elk, J (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, JP, Candela, T, Fokker, PA, van Wees, JD, 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>