



> 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**

Datum 30 mei 2023

Betreft Advies met betrekking tot de voorgestelde operationele strategie  
Groningenveld gasjaar 2023-2024

Geachte [REDACTED],

In uw brief met kenmerk PDGGO/26837914 vraagt u het KNMI om advies met betrekking tot de voorgestelde operationele strategie voor het Groningenveld voor gasjaar 2023-24. 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 samengevat.

***Is de seismiciteit statistisch afgenomen sinds de afbouw van de gaswinning in 2013 is gestart?***

De statistische analyse van de frequentie van bevingen met magnitude 1,5 of hoger geeft een sterke aanwijzing voor een afname sinds 2013.

***In hoeverre komt de geobserveerde seismiciteit overeen met de eerdere verwachtingen? En wat betekent dat voor de verwachtingen die voor het gasjaar 2023-2024 zijn opgesteld?***

De geobserveerde seismiciteit is vergeleken met de door TNO gemodelleerde verwachting van de seismiciteit<sup>1</sup>. De statistische toets wijst uit dat de door TNO gemodelleerde afname in de frequentie van bevingen met een magnitude van 1,5 of hoger over de periode 2013-2022 niet compatibel is met de uit waarnemingen geschatte afname. De gemodelleerde afname is groter dan de waargenomen afname. Dit betekent dat er bij de interpretatie van de prognose rekening gehouden moet worden met de mogelijkheid dat ook de toekomstige afname minder snel verloopt dan gemodelleerd.

Hoogachtend,

[REDACTED]

<sup>1</sup> TNO (2023) Publieke Seismische Dreigings- en Risicoanalyse Groningen gasveld 2023, figuur 3.1

## **Bijlage: Statistische analyse van de verandering in seismiciteit (periode 2013-2022)**

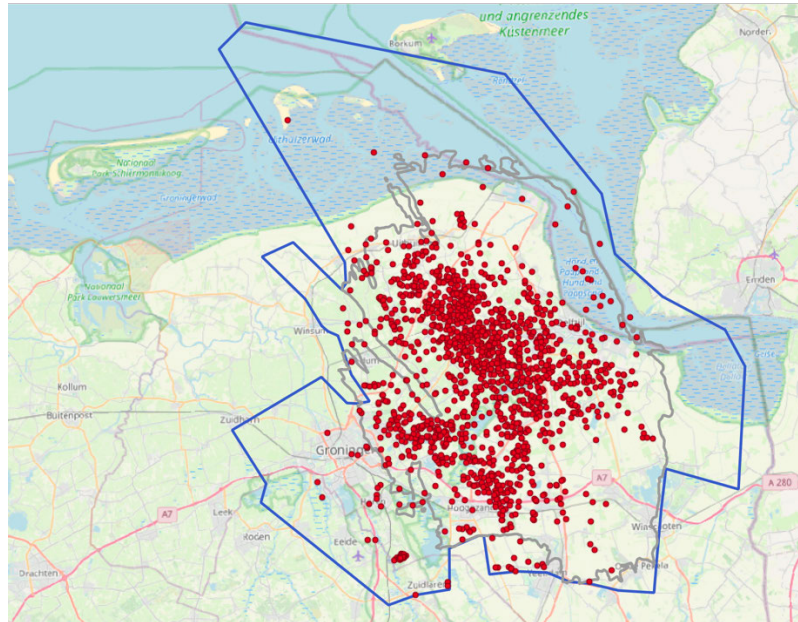
### **1. Is de seismiciteit statistisch afgenomen sinds de afbouw van de gaswinning in 2013 is gestart?**

Een statistische analyse is uitgevoerd op de dataset van waargenomen aardbevingen om de vraag in hoeverre sprake is geweest van een afname van de seismiciteit sinds de start van de afbouw van de gaswinning in 2013 te beantwoorden.

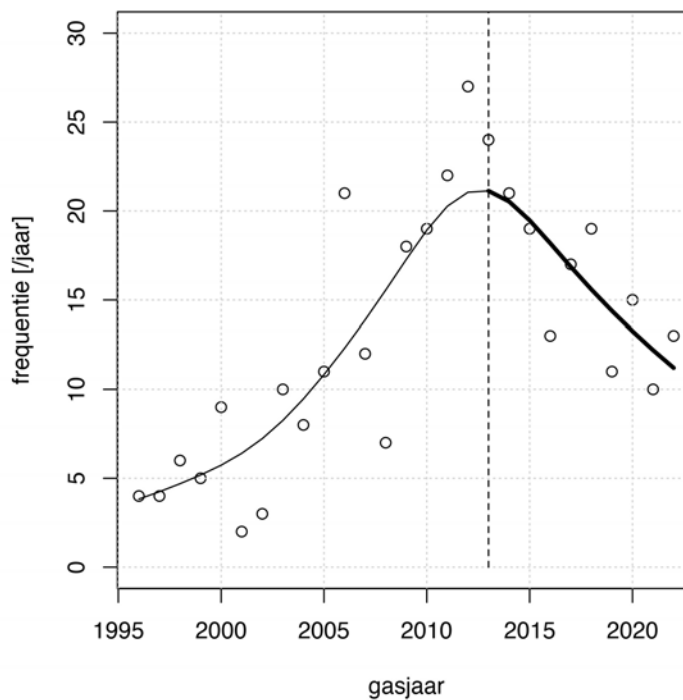
De dataset bestaat uit de gegevens van het aantal bevingen met magnitudes groter of gelijk aan 1,5 binnen de polygoon van het dashboard (<https://dashboardgroningen.nl>), geordend per gasjaar. Een gasjaar loopt van 1 oktober tot en met 30 september van het volgende jaar. Deze dataset is gevisualiseerd in Figuur 1. Het aantal bevingen per jaar voor de periode 1996 tot en met 2022 is 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 (Wood, 2020).

Uit Figuur 2 blijkt dat 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 gasextractie uit het Groningen veld gerelateerde bevingen tot en met 30 september 2022 (rode stippen) binnen de grenzen van Groningen dashboard gebied (blauwe lijn). Ter informatie is ook de grens van het Groningen gasveld weergegeven (grijze lijn).



Figuur 2: Geregistreerd aantal bevingen met magnitudes groter of gelijk aan 1,5 per gasjaar binnen de contour van het Groningen dashboard, weergegeven met stippen. De geschatte curve (zwarte lijn) is bepaald met  $f = 0,73$ , overeenkomend met 27% naschokken( Post et al, 2021). De periode 2013-2022 is dikgedrukt. De gasjaren zijn geplot op eindjaar. Als voorbeeld: het datapunt bij 2013 in de grafiek geeft het aantal bevingen weer in het gasjaar dat loopt van 1 oktober 2012 tot en met 30 september 2013.

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 (2021) en 15% naschokken ( $f= 0.85$ ), het middelpunt van de bandbreedte uit Bourne et al (2018). De in Figuur 2 geplote lijn is bepaald uit de trendlijn geschat uit de aantallen bevingen geschaald met  $f= 0.73$ , die vervolgens weer zijn teruggeschaald naar de lijn 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 2013 (dikke deel van de lijn 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 2022 en in 2013 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 2013-2022). Dit levert een realistischer referentiemodel op dan wanneer dit alleen gebaseerd zou zijn op de data over 2013-2022. 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 2022 en in 2013 berekend; deze is ongeveer 0,5. 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

De dataset is 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 voor afname ( $p$ -waarden) voor de periode 2013-2022.

aanname over naschokken	$p$ -waarde
geen getriggerde events	0,0030
15% getriggerde events	0,0053
27% getriggerde events	0,0076

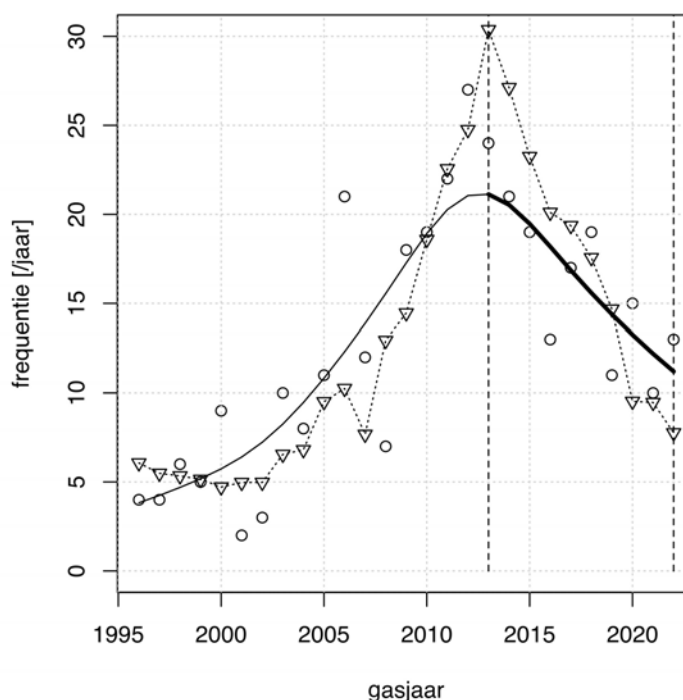
Voor alle aannamen voor de fractie getriggerde events zijn de  $p$ -waarden vrij klein. Dit is een sterke aanwijzing voor een afname van de frequentie van bevingen met magnitude 1,5 of hoger sinds 2013.

### Conclusies van de eerste statistische toets

De statistische analyse wijst sterk op een afname in de waargenomen frequentie van bevingen met magnitude 1,5 of hoger sinds 2013.

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

De tweede statistische toets vergelijkt de geschatte verhouding van de frequenties in 2013 en 2022 (zie Sectie 1) met de door TNO verwachte frequentie (Figuur 3.1 uit TNO, 2023). De gasjaren 1995-2022 zijn door TNO gebruikt om hun model te kalibreren met het gekalibreerde model is een hindcast en een forecast berekend, met de drukken in het veld in ruimte en tijd zoals NAM die aan TNO heeft aangeleverd. In deze statistische analyse is alleen de periode 2013-2022 beschouwd. De TNO hindcast is vergeleken met de waargenomen aantallen aardbevingen. Figuur 3 toont de waargenomen frequentie van bevingen, de geschatte frequentie van bevingen (gelijk aan Figuur 2) en de door TNO gemodelleerde frequentie (driehoeken verbonden met stippellijn).



Figuur 3: Geregistreerd aantal bevingen met magnitudes groter of gelijk aan 1,5 per gasjaar (cirkels) en de geschatte frequentie van deze bevingen (curve) en de door TNO gemodelleerde frequentie (driehoeken verbonden met stippellijn).

De toets die is toegepast lijkt sterk op de voorgaande. De getoetste propositie is in dit geval niet dat de frequenties in 2013 en 2022 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.

### Resultaat van de statistische toets

De dataset is wederom 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 2 en hieronder uitgelegd.

Tabel 2: Resultaten statistische toets voor relatieve afname zoals verwacht ( $p$ -waarden) voor de periode 2013-2022.

aanname over naschokken	$p$ -waarde
geen getriggerde events	0,00041
15% getriggerde events	0,00097
27% getriggerde events	0,0026

Voor de veronderstelling dat de relatieve afname in frequentie over 2013-2022 niet minder is dan de voorspelde afname varieert de  $p$ -waarde tussen 0,00041 en 0,0026 afhankelijk van de aanname over naschokken. De  $p$ -waarde is aanmerkelijk kleiner dan 0,05, wat betekent dat de gemodelleerde afname niet compatibel is met de uit de waarnemingen geschatte afname. De gemodelleerde afname is groter dan de geobserveerde afname in de periode 2013-2022.

### Conclusie van de tweede statistische toets

De statistische toets wijst uit dat de door TNO gemodelleerde afname in de frequentie van bevingen met een magnitude van 1,5 of hoger over de periode 2013-2022 niet compatibel is met de uit waarnemingen geschatte afname. De door TNO gemodelleerde afname is groter dan de waargenomen afname. Dit betekent dat er bij de interpretatie van de prognose rekening gehouden moet worden met de mogelijkheid dat ook de toekomstige afname minder snel verloopt dan gemodelleerd.

## 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>

TNO (2023). Publieke Seismische Dreigings- en Risicoanalyse Groningen gasveld 2023. TNO rapportnummer TNO 2023 R10682 d.d. 7 april 2023.

Wood, SN (2020). Inference and computation with generalized additive models and their extensions, *Test* 29(2), 307–339.