

RUIMTELIJKE VEILIGHEID

EN RISICOBELEID

Spatial Planning, Safety and Risk Governance

Abstracts of Articles: Survey

Editorial Over het falen van de risicobeheerssystemen

A. Michiels van Kessenich

Óók Grenfell Tower: het kwaad van je werk niet goed doen

B.J.M. Ale

Teaching kids about risk in a spatial planning context

A. Michiels van Kessenich, R. Geerts

Zorgvuldigheid als troost, een ander repertoire een ander resultaat

R. Geerts, J. Heitink

Groningen wordt steeds bevingsgevoeliger voor verdere gaswinning: statistische analyse, geo- fysische verklaring en onzekere risicobeheersing

C.A.J. Vlek



The Role of Child in Risk Communication

Strategies Risk Communication: The Last Frontier?

B. Szewców

Juridisch Actueel

E. Broeren, J.H.K.C. Soer

Voldoen aan Omgevingswet via HLS-normen

W. Hagenbeek



Jrg. 8 – nr. 26/27 – augustus 2017

**Increasing seismicity in the Groningen gas field since 1990:
Statistical analysis, a plausible explanation and effective risk management**

Charles Vlek – University of Groningen (NL)

Summary

Almost three hundred induced earthquakes with magnitude $M \geq 1.5$ (Richter) in the huge Groningen gas field (NL) are statistically analysed. The resulting pattern of increasing seismicity over 1991-2016 justifies the hypothesis that the 900 km² large and 100 m thick sandstone reservoir has become increasingly sensitive to further gas extraction, particularly after 2001 when 60% of the total resource of 2800 billion cubic meters (bcm) had been recovered. After 2013, seismicity has significantly decreased, due to year-by-year reductions in annual extraction: from 54 bcm in 2013 to an intended 22 bcm in 2018. Nevertheless, under a non-decreasing annual volume after 2018 earthquake frequency would increase again, with a roughly expected seventeen earthquakes with $M \geq 1.5$ in 2021 under a steady 24 bcm/year production scenario. Well-fitting trend lines allow the prognosis that, before total resource depletion around 2050, another 450 earthquakes with $M \geq 1.5$ may be expected, some fifty of which having $M \geq 2.5$ and five or six with $M \geq 3.5$. Besides the stepwise reduction of gas extraction there is a beginning programme of large-scale building reinforcement meant to restore an acceptable level of safety for the 300,000 people living above the Groningen field. This, however, runs up against the apparent impossibility to define, model and assess seismic risk such that a 'safe' level of further extraction can be established. Two critical questions for further policy-making are briefly discussed.

Groningen wordt steeds bevingsgevoeliger voor verdere gaswinning: Statistische analyse, geofysische verklaring en onzekere risicobeheersing

kennis / analyse / discussie

C. (Charles) A.J. Vlek ¹

Abstract

In het Groningse gasveld hebben zich over 1991-2016 bijna driehonderd aardbevingen voorgedaan met Richter-magnitude $M \geq 1.5$, waarvan vijftientig met $M \geq 2.5$, tien keer zo sterk. Statistische analyse hiervan wijst uit dat er per vaste hoeveelheid gaswinning steeds meer aardbevingen zijn voorgekomen. Blijkbaar is de poreuze, gashoudende zandsteenlaag steeds gevoeliger geworden voor verdere drukverlaging. Dit gebeurde vooral na 2000 toen al 60% van het gas was gewonnen en de jaarproductie flink toenam van 25 miljard m³ in 2001 tot 54 mrdm³ in 2013.

Vanaf 2014 is de gasproductie stapsgewijze verminderd tot 28 mrdm³ in 2016, circa 24 mrdm³ in 2017 en volgens besluit tot 21,6 mrdm³ in 2018. Mede daardoor is het aantal bevingen met $M \geq 1.5$ verminderd van dertig in 2013 tot vijftien in 2016. Bij voortgaande winning van een vaste jaarhoeveelheid aardgas zal de seismische activiteit echter weer toenemen, met rond 2021 naar schatting zo'n zeventien aardbevingen bij 24 mrdm³ gaswinning per jaar. Statistische trendlijnen ondersteunen de prognose dat tot het einde van de gaswinning in totaal nog vierhonderdvijftig bevingen met $M \geq 1.5$ kunnen optreden, waarvan vijftig met $M \geq 2.5$ en vijf à zes met $M \geq 3.5$.

Naast de vermindering van de gaswinning komt een grootschalig programma-gebouwenversterking op gang. Dit moet binnen tien jaar leiden tot een 'aanvaardbaar' risiconiveau voor de 300.000 inwoners boven het Groningenveld. Deze versterkingsoperatie wringt echter met de kennelijke onmogelijkheid om een veilig niveau van gaswinning te bepalen, mede in het licht van kwantitatieve risico-normen (maximale overlijdenskansen) die eind 2015 zijn vastgesteld. Tot slot volgt een overzicht van markante acties, adviezen en beleidskeuzen in 2013-2017 van de NAM, het SodM en de minister van EZ. Twee klemmende beleidsvragen betreffen het jaarvolume van de gaswinning en de omvang van de versterkingsoperatie.

1. Inleiding

Geïnduceerde aardbevingen zijn een bekend verschijnsel rondom de winning van fossiele brandstoffen en het onder hoge druk injecteren van afvalwater van mijnbouwactiviteiten (Grasso, 1992; Keranen *et al.*, 2014; Weingarten *et al.*, 2015). In het enorme Groningenveld, in exploitatie sinds 1963, begonnen zich in 1991 aardbevingen voor te doen, toen circa 45% van alle 2800 miljard m³ aardgas naar boven was gehaald. Sindsdien zijn de bevingen toegenomen in aantal en sterkte (Van Eck *et al.*, 2006; Van Thienen-Visser & Breunese, 2015; Van Wees *et al.*, 2014), tot begin 2014.

Dit artikel geeft een bijgewerkt overzicht van de historische toename en van nieuwe prognoses van de aardbevingsactiviteit in Groningen sinds 1991. Dit gebeurt in het licht van een geofysische hypothese afgeleid uit statistische analyse van KNMI-geregistreerde aardbevingen met magnitude $M \geq 1.5$

¹ Emeritus-hoogleraar omgevingspsychologie en besliskunde, Faculteit Gedrags- en Maatschappijwetenschappen Rijksuniversiteit Groningen. (c.a.j.vlek@rug.nl). Hij is de beoordelaars van RV&R erkentelijk voor hun waardevolle opmerkingen en suggesties.

op de schaal van Richter. Qua doelstelling en methodiek sluit het betoog aan op recent werk van Bourne *et al.* (2014, 2015), Hagoort (2015, 2017), Nepveu *et al.* (2016) en Vlek (2016).

Om te beginnen komt de snelle ontwikkeling aan de orde van zowel de gaswinning als de aardbevingen in de periode 1991-2016, geteld per jaar en per drie jaar. Daaruit blijkt dat, terwijl de totaalhoeveelheid gewonnen gas al maar toenam, er steeds gemakkelijker nieuwe aardbevingen zijn opgetreden. Uit de analyse wordt een prognose afgeleid over het totaal aantal aardbevingen met $M \geq 1.5$ dat nog te verwachten is totdat de gehele Groningse gasvoorraad zal zijn gewonnen. Deze prognose komt goed overeen met de cumulatief-statistische analyse van Hagoort (2017, zie ook 2015). Vervolgens wordt de onderhavige analyse kort vergeleken met de Bayesiaans-statistische studie van Nepveu *et al.* (2016). Daarna volgt een overzicht van markante acties, adviezen en beslissingen door de NAM, het SodM en de minister van EZ in de politiek-dynamische periode 2013-2017. Tenslotte komen twee klemmende beleidsvragen aan de orde, respectievelijk over de wenselijkheid van verdere productieverlaging en over de noodzakelijke omvang van het versterkingsprogramma.

2. Trends en trendbreuken in gaswinning en seismiciteit

Na vierenvijftig jaar gaswinning bevat het 900 km² grote en drie km diepe Groningenveld nog ongeveer 600 van de oorspronkelijke 2800 miljard m³ (mrdm³). Deze restvoorraad is goed voor nog eens dertig jaar gaswinning met een gemiddelde van 20 mrdm³ per jaar. De geïnduceerde seismiciteit houdt verband met toenemende reservoircompactie (inklinking) langs talrijke breukvlakken die steeds 'kritischer' lijken te worden naarmate de cumulatieve hoeveelheid gewonnen aardgas toeneemt. Figuur 1 toont het verloop van de jaarlijkse gasproductie (mrdm³) en het aantal (N) aardbevingen met $M \geq 1.5$ en $M \geq 2.5$ als functie van de cumulatieve gaswinning met verloop van tijd. De perioden 1990-2000, 2001-2013 en 2014-2016 worden hier onderscheiden, omdat zij een verschillend beeld tonen van trends in en verbanden tussen gaswinning en seismische activiteit.

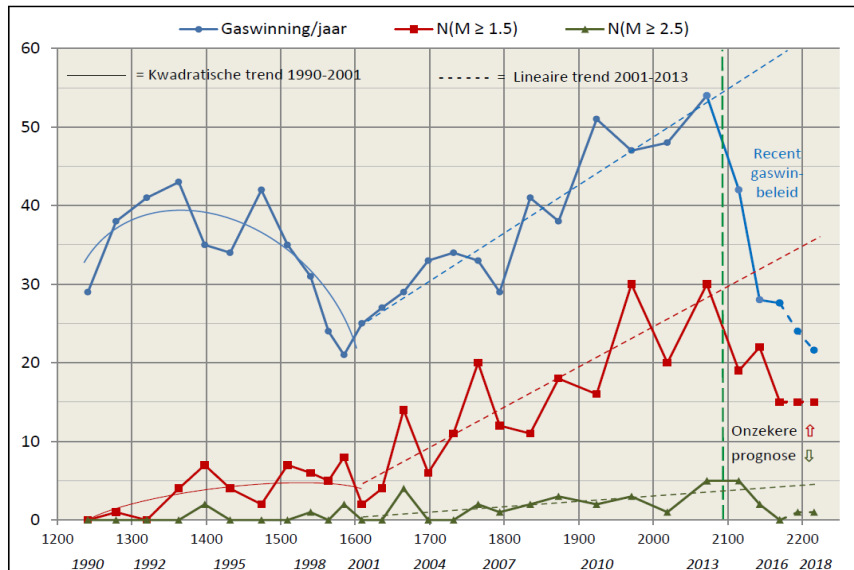
De onderhavige analyse gaat alleen over aardbevingen met $M \geq 1.5$ (over 1991-2016 zo'n 294) omdat deze sinds 1990 behoorlijk zijn geregistreerd en ook waarneembaar zijn door plaatselijke bewoners. Ook gaat het hier over veldbrede (*field-wide*) aardbevingsaantallen, omdat subregionale differentiatie van alle bevingen met $M \geq 1.5$ sterk afbreuk zou doen aan de validiteit van statistische analyse.

Ruwe aardbevingsgegevens zijn verkregen via de lijst van alle ruim 1300 geïnduceerde aardbevingen in Nederland sinds 1986, zoals bijgehouden en gepubliceerd door het KNMI (2017; ca. 40 pp.), met veruit de meeste daarvan in Groningen, na 1990. Met behulp van een topografische kaart werd vervolgens bepaald welke aardbevingen hun oorsprong vonden in het Groningse gasveld, ruwweg tussen de lengtegraden 6.5° (Garnwerd) en 7.0° (Borgsweer) en tussen de breedtegraden 53.07° (Wildervank) en 54.50° (Waddenzee).

Zoals Figuur 1 laat zien was het jaaraantal (N) bevingen met $M \geq 1.5$ tussen 1990 en 2000 tamelijk bescheiden maar nam het niettemin langzaam toe. Daarbij lijken variaties in $N(M \geq 1.5)$ nauwelijks verband te houden met variaties in de jaarlijkse gaswinning. Opmerkelijk genoeg bleef $N(M \geq 1.5)$ in de tweede helft van de 1990-er jaren langzaam toenemen bij een gestaag *dalende* gaswinning, van 42 mrdm³ in 1996 naar 20 mrdm³ in 2000. Aardbevingen met $M \geq 2.5$ waren nog zeldzaam: ze deden zich slechts voor in 1994 (2), 1998 (1) en 2000 (2). Kennelijk was de compactie van het gasreservoir toen nog onvoldoende om serieuze aardbevingen op te leveren.

Maar omstreeks 2001, toen bijna 60% van alle 2800 mrdm³ aardgas was opgepompt, begon de bevingsactiviteit sterker te stijgen. Zoals Figuur 1 laat zien, ging deze ontwikkeling gepaard met significante verhogingen van de jaarlijkse gasproductie tot en met recordjaar 2013. In dat jaar gaf groeiende sociale en politieke bezorgdheid over (nog) meer en sterkere aardbevingen de aanzet tot een veertiental studies die pas begin 2014 leidden tot een neerwaartse bijstelling van het toegestane jaarvolume aan gaswinning, van een ongebruikelijke 54 mrdm³ in 2013 tot een meer 'normale' 42 mrdm³ in 2014 en later tot circa 28 mrdm³ in 2015 en 2016. Voor de jaren 2017-2021 is in september 2016 besloten tot een jaarvolume van 24 mrdm³ gaswinning. Eind mei 2017 werd besloten

dat dit vanaf 1 oktober 2017 verder wordt verminderd tot 21,6 mrdm³/jaar. Zie het beleidsoverzicht in par. 6.



Figuur 1. Jaarlijkse gaswinning (mrdm³; bovenste curve) versus jaaraantal (N) aardbevingen met $M \geq 1.5$ en $M \geq 2.5$ (Richter; onderste curven) gedurende 1990-2016, uitgezet tegen cumulatieve gaswinning sinds 1963 (abscis, $x = \text{mrdm}^3_{\text{cum}}$). De ordinaat (y) past zowel bij de jaarlijkse gasproductie (mrdm³) als bij het jaaraantal aardbevingen, $N(M)$. Basisgegevens zijn afkomstig van NAM (2016a) and KNMI (2017).

- Kwadratische trend 1990-2001 voor gaswinning: $y = -0,0004x^2 + 1,04x - 680$, met $R^2 = 0,74$.
- Kwadratische trend 1990-2001 for $N(M \geq 1.5)$: $y = -8E-05x^2 + 0,247x - 181,93$, met $R^2 = 0,50$.
- Lineaire trend 2001-'13 voor gaswinning (tussen 1609 en 2072 mrdm³_{cum}): $y = 0,061x - 73,28$, met $R^2 = 0,89$.
- Lineaire trend 2001-'13 for $N(M \geq 1.5)$: $y = 0,05x - 75,86$, met $R^2 = 0,73$.
- Lineaire trend 2001-'13 for $N(M \geq 2.5)$: $y = 0,006x - 9,54$, met $R^2 = 0,32$.

In Figuur 1 en voor de periode 1990-2001 weerspiegelt de negatieve kwadratische component in zowel gaswinning als $N(M \geq 1.5)$ een sterkere resp. zwakkere concaviteit (neerwaartse bolling) met de toename van de cumulatieve gaswinning tot circa 1600 mrdm³_{cum}. Voor 2001-2013 (met extrapolatie t/m 2018) zijn lineair-stijgende trendlijnen gefit; kwadratische trendfitting doet het hier nauwelijks beter. Het veel zwakkere verband met mrdm³_{cum} voor $N(M \geq 2.5)$, met $R^2 = 0,32$, is niet verrassend vanwege het veel kleiner aantal van dergelijke krachtiger bevingen.

De sterke evenwijdigheid tussen de twee trendlijnen voor gaswinning en $N(M \geq 1.5)$ over 2001-2013 in Figuur 1 geeft aan dat er in de jaren ná 2013, als het kabinet niet had ingegrepen, tezamen met een toenemende jaarproductie van aardgas steeds meer en ook zwaardere aardbevingen zouden zijn opgetreden.

De welhaast parallel stijgende lineaire trendlijnen over 2001-2013 in Figuur 1 kunnen redelijkerwijs worden geïnterpreteerd als de weerspiegeling van een causale samenhang tussen (cumulatieve) gaswinning en aantal aardbevingen. Deze interpretatie wordt versterkt door wat er is gebeurd ná 2013, toen de jaarlijkse gasproductie, met het compactietempo, aanzienlijk werd verminderd. Daarmee liep ook het aantal aardbevingen terug, van $N(M \geq 1.5) = 30$ in 2013 tot $N(M \geq 1.5) = 15$ in 2016; te zelfder tijd verminderde $N(M \geq 2.5)$ van vijf naar nul per jaar.²

² Van jan.-juni 2017 deed zich één beving met $M \geq 2.5$ voor, op 27/5 met epicentrum bij Slochteren ($M = 2.6$).

Opvallend in Figuur 1 is de onregelmatige covariatie van jaarlijkse gaswinning en aardbevingsaantal; kennelijk is er een forse natuurlijke variabiliteit in seismische activiteit, onder meer door variaties in de lokatie en aard van ondergrondse breukvlakken, spanningen en differentiële compactie. Bovendien lijkt het jaarvolume van de gaswinning op zichzelf van secundair belang. De geïnduceerde seismische activiteit in Groningen houdt primair verband met de al maar toenemende totaalhoeveelheid gewonnen aardgas sinds 1963 en de daarmee samengaannde compactie van het gasreservoir.

Tabel 1 geeft een wat meer geaggregeerd beeld van zowel $N(M \geq 1.5)$ als $N(M \geq 2.5)$, nu *per drie jaar* vanaf 1990, als functie van de cumulatieve hoeveelheid gewonnen aardgas sinds 1963.

Tabel 1. Driejaarlijkse én cumulatieve gaswinning (GW, in mrdm³), driejaarlijkse $N(M \geq 1.5)$ en $N(M \geq 2.5)$, en periodieke $N(M \geq 1.5)$ per 30 mrdm³ gaswinning (zie ook Figuur 3).

Driejaarperiode eindigend in:	1992	1995	1998	2001	2004	2007	2010	2013	2016	Totaal
GW per 3 jaar, mrdm ³	109	112	108	70	88	96	130	148	97	--
GW, mrdm ³ _{cum} sinds 1963	1320	1432	1540	1610	1698	1794	1924	2072	2170	--
$N(M \geq 1.5)^a$	1	15	15	15	24	43	45	80	56	294
$N(M \geq 2.5)^b$	0	2	1	2	4	3	7	9	7	35
$b = \log[N(M \geq 1.5)/N(M \geq 2.5)]$	--	.874	1.18	.874	.778	1.16	.808	.950	.903	.924
$N(M \geq 1.5)/30 \text{ mrdm}^3$	.276	4.1	4.5	5.75	8.2	13.5	10.4	16.2	17.3	

Noot. Gegevens voor negen opeenvolgende driejaarperiodes, resp.: 1990-'92, 1993-'95 enz., tot en met 2014-'16 (de laatste niet opgenomen in trendberekeningen).

De een na laatste rij geeft schattingen van de Gutenberg-Richter b-waarde, kenmerkend voor de statistische verdeling van aardbevingssterkten. De laatste rij geeft $N(M \geq 1.5)$ per 30 mrdm³ gaswinning voor elke driejaarperiode. Basisgegevens afkomstig van NAM (2016b) en KNMI (2017).

^a Kwadratische trend 1990-2013 voor $N(M \geq 1.5)$: $y_{1.5} = 0,0001x^2 - 0,29x + 185,15$, met $R^2 = 0,96$.

^b Kwadratische trend 1990-2013 voor $N(M \geq 2.5)$: $y_{2.5} = 1E-05x^2 - 0,034x + 21,1$, met $R^2 = 0,92$.

Over 1990-2013 (acht driejaarperiodes, totaal 24 jaar) blijkt hier een kwadratische trendlijn voor beide magnitude-frequenties beter te passen dan een lineaire trendlijn (met $R^2 = 0,89$ voor $N(M \geq 1.5)$ en $0,86$ voor $N(M \geq 2.5)$); dit is consistent met Figuur 1.

Ook blijkt dat $N(M \geq 1.5)$, met uitzondering van de eerste periode, 1990-1992, ongeveer acht keer zo groot is als $N(M \geq 2.5)$; dit wijst op een relatief tijds-, of beter: productie-onafhankelijke Gutenberg-Richter b-waarde van circa 0,90. Deze b-parameter (Gutenberg & Richter, 1941; Utsu, 1999) wordt wereldwijd gebruikt als een maat voor de karakteristieke (Poisson-)frequentieverdeling van aardbevingssterkten. Zich beperkend tot 1995-2015 komen Bourne en Oates (2015, Part 2, p. 33) voor het Groningenveld tot een schatting van een eveneens stabiele b-waarde tussen 0,8 en 1,1.

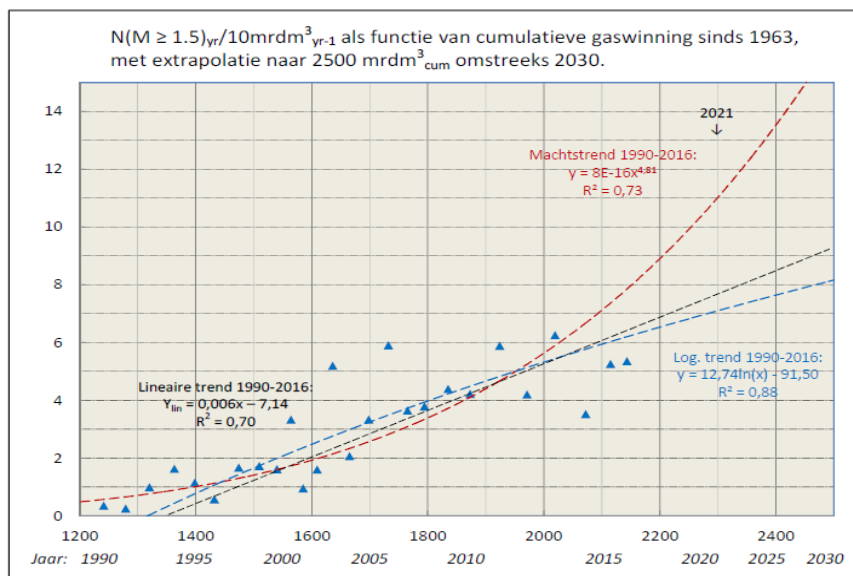
Figuur 1 en Tabel 1 weerspiegelen de kennelijk prominente rol van het gedurende 2001-2013 toegenomen jaarvolume in relatie tot de cumulatieve hoeveelheid gewonnen aardgas. Dit patroon is verenigbaar met de geofysische hypothese dat de poreuze, gashoudende zandsteenlaag bij toenemende reservoircompactie steeds kwetsbaarder wordt voor verdere drukverlaging. Bijgevolg zullen bij verdere gaswinning steeds gemakkelijker aardbevingen optreden.

3. Cumulatie van gaswinning faciliteert nieuwe aardbevingen

Deze 'grondhypothese' kan statistisch worden verhelderd door te kijken naar de verhouding tussen $N(M \geq 1.5)$ en een zeker aantal mrdm³ gaswinning in een bepaalde periode, hier één en drie jaar.

Vervolgens kunnen we dit quotient: $N(M \geq 1.5)_{jr}/(\dots) \text{mrdm}^3_{jr}$, uitzetten tegen de cumulatieve gaswinning sinds 1963. Figuur 2 toont het jaaraantal aardbevingen met $M \geq 1.5$ per 10 mrdm^3 gewonnen gas in het voorafgaande jaar, voor elk van de zesentwintig jaren tussen 1991 en 2016. Figuur 3 geeft een meer uitgemiddeld beeld, gebaseerd op tellingen *per drie jaar*: $N(M \geq 1.5)_{3jr}/30\text{mrdm}^3_{3jr}$, als functie van het cumulatieve aantal mrdm^3 per het midden van de betreffende periode.

Figuur 2. Jaarlijkse $N(M \geq 1.5)$ per 10 mrdm^3 gaswinning in het voorafgaande jaar, (y), versus cumulatieve gaswinning sinds 1963 (x), over 1991-2016. De drie statistische trendlijnen beschrijven $N(M \geq 1.5)$ als een machtsfunctie (met $R^2 = 0,73$), een lineaire ($R^2 = 0,70$) en logaritmische functie ($R^2 = 0,88$) van cumulatieve gaswinning.



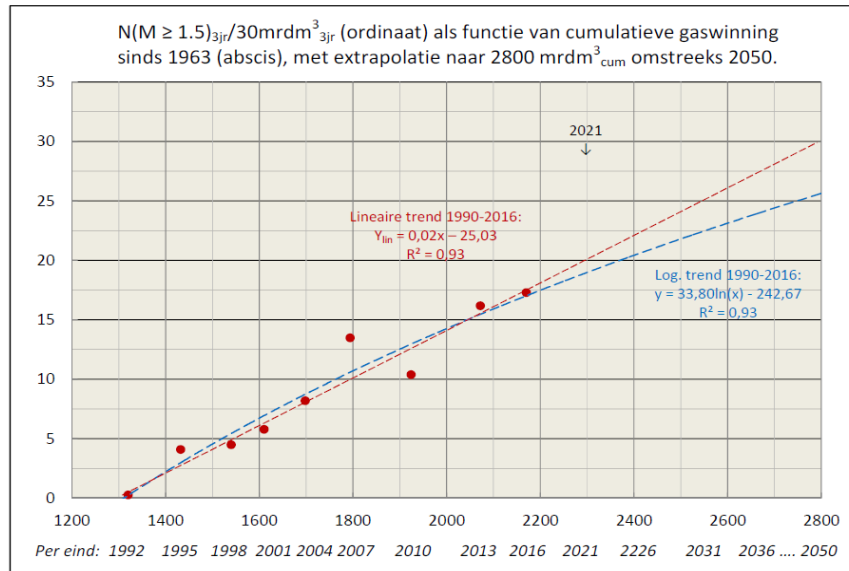
De statistisch best passende trendlijn in Figuur 2 benadert de 'ruizige' $N(M \geq 1.5)_{jr}/10\text{mrdm}^3_{jr-1}$ als een logaritmische functie van de cumulatieve hoeveelheid mrdm^3 , met de passendheidsmaat $R^2 = 0,88$. Een lineaire functie en een machtsfunctie passen wat minder goed, met resp. $R^2 = 0,70$ en $R^2 = 0,73$. Met inachtneming van een flinke natuurlijke variabiliteit in de seismische activiteit over de afzonderlijke jaren kunnen we daarom – onzeker – extrapoleren naar het jaar 2021, bij een waarschijnlijk cumulatief totaal van circa 2300 mrdm^3 gaswinning.

Redelijkerwijs te verwachten voor dat jaar zijn dan tussen zeven en elf aardbevingen per 10 mrdm^3 gaswinning. In het geval van een jaarvolume van 24 mrdm^3 in 2017-2021 zouden dit er in 2021 tussen de zeventien en zesentwintig worden. Ongeveer een achtste daarvan, twee à drie, zou een magnitude hebben van $M \geq 2.5$, tien keer zo sterk.³

Figuur 3 geeft het *driejaarlijks* aantal bevingen, $N(M \geq 1.5)_{3jr}$ per 30 mrdm^3 gaswinning in dezelfde periode. De negen datapunten in deze uiteraard minder ruizige weergave laten zich even goed en redelijk sterk passend beschrijven met een lineaire en een logaritmische functie van cumulatieve mrdm^3 ; in beide gevallen komt een $R^2 = 0,93$ uit de bus. Daarnaast zou een versnellende machtsfunctie (zoals in Fig. 2), met $R^2 = 0,73$, minder passend zijn. Figuur 3 maakt duidelijk dat er, naarmate de cumulatieve hoeveelheid gewonnen gas toeneemt, meer aardbevingen optreden per 30 mrdm^3 (nieuwe) gaswinning.

³ Wanneer de analyse van $N(M \geq 1.5)_{jr}/10\text{mrdm}^3_{jr-1}$ wordt beperkt tot de jaren 2001-2016: tussen 1609 en 2143 $\text{mrdm}^3_{\text{cum}}$ gaswinning, dan blijken verschillende trendlijnen *alle* slecht te passen, met R^2 tussen slechts 0,23 voor een lineaire trend en $R^2 = 0,29$ voor een machtsfunctie. Een mogelijke, na 2015 weer omlaag neigende negatief-kwadratische trendfunctie met $R^2 = 0,26$ zou aangeven dat het aantal bevingen per 10 mrdm^3 gaswinning na 2015 geleidelijk zou afnemen. De lezer kan zich deze verkennende exercitie voorstellen door het linkergedeelte van Figuur 2 (periode 1990-2000, tot 1600 $\text{mrdm}^3_{\text{cum}}$) af te dekken.

Figuur 3. Driejaarlijkse $N(M \geq 1.5)$ per 30 mrdm³ gaswinning, (y), versus cumulatieve gaswinning sinds 1963 (x), voor negen perioden over 1990-2016; zie onderste rij Tabel 1. Even goed passende trendlijnen (met $R^2 = 0,93$) beschrijven $N(M \geq 1.5)_{3jr}/30\text{mrdm}^3_{3jr}$ als een lineaire en een logaritmische functie van het cumulatieve aantal mrdm³ sinds 1963. Een minder goed passende trendlijn volgt een machtsfunctie over 1990-2016: $y = 9E-21x^{6,45}$, met $R^2 = 0.73$.



Zoals bij Figuur 3 kan er ook hier worden geëxtrapoleerd naar het jaar 2021 – met circa 2300 cumulatieve mrdm³ gaswinning. Dan valt te concluderen dat er rond die tijd per 30 mrdm³ gaswinning ongeveer eenentwintig aardbevingen met $M \geq 1.5$ kunnen worden verwacht. Bij een jaarproductie van 24 mrdm³ (indien volgehouden gedurende 2017-2021) zou dit resulteren in circa zeventien aardbevingen in 2021, waarvan circa twee met $M \geq 2.5$. Omdat deze driejaar-extrapolatie is beperkt tot de lineaire en logaritmische trends in Figuur 3 (een machtsfunctie past minder goed), zijn deze schattingen conservatiever dan ‘tussen zeventien en zesentwintig’ zoals bij Figuur 2.

Figuren 2 en 3 laten duidelijk zien dat, wanneer de gaswinning gestaag wordt voortgezet, het aantal aardbevingen met $M \geq 1.5$ en daarmee ook de kans op sterkere bevingen (tot ooit een $M_{max} \approx 5.0$, zie par. 4) waarschijnlijk zal toenemen. Bij ongeveer 2300 cumulatieve mrdm³ in 2021 ligt een redelijkerwijs geprojecteerde $N(M \geq 1.5)$ op acht à negen bevingen per 10 mrdm³, dan wel op circa twintig bevingen bij 24 mrdm³ gaswinning per jaar. Bij een toegenomen totaalwinning van circa 2400 mrdm³_{cum} omstreeks 2026 zouden dan per 10 mrdm³ ongeveer tien aardbevingen per jaar kunnen worden verwacht. Bij een jaarlijkse gaswinning van 24 mrdm³ zou dit neerkomen op gemiddeld vierentwintig bevingen met $M \geq 1.5$ per jaar.

Een en ander houdt in dat ook bij een gestage gaswinning van slechts 12 mrdm³ per jaar (cf. SodM, 2013) het aantal bevingen met $M \geq 1.5$ langzaam zou blijven toenemen. Deze statistische implicatie wijkt af van de conclusie van Muntendam-Bos en De Waal (2013) dat er, wanneer de gaswinning zou worden beperkt tot 12 mrdm³ per jaar, na enige tijd vrijwel geen bevingen met $M \geq 1.5$ meer zouden voorkomen; zie ook het beleidsoverzicht in Tabel 2, par. 6.

4. Hoeveel aardbevingen zijn nog te verwachten?

Vanuit de *lineaire* trendlijn in Figuur 3 is een projectie mogelijk van de resterende $N(M \geq 1.5)$ totdat alle 2800 mrdm³ aardgas omhoog is gehaald. Met nog circa 600 mrdm³ te winnen in jaarvolumes van, zeg, 20 mrdm³, kunnen er de komende dertig jaar nog twintig stappen van 30 mrdm³ worden gezet; elke stap zou dan anderhalf jaar bestrijken.⁴ Voor de *lineaire* trend begint de geprojecteerde

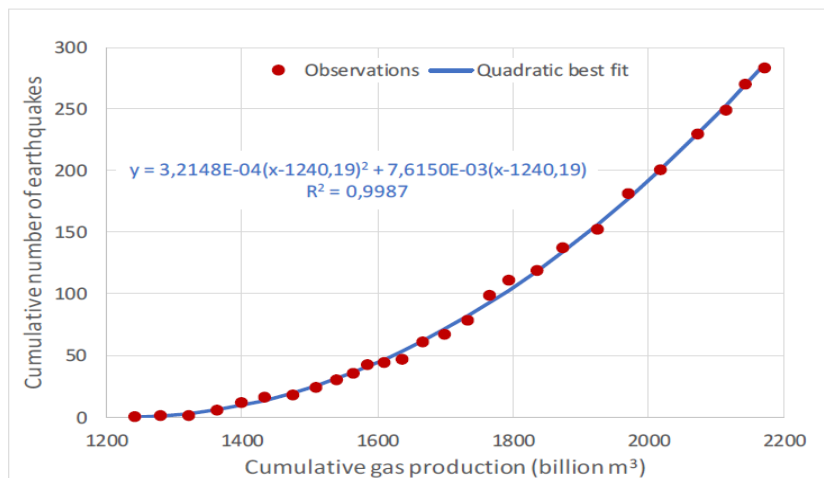
⁴ In feite wordt de jaarlijkse gaswinning steeds moeilijker naarmate het gasreservoir verder wordt leeggehaald. Daarom zou een geleidelijk *afnemend* jaarvolume realistischer zijn. Dit zou echter geen verandering brengen in de algemene conclusie dat de seismische activiteit met elke 10, 20 of 30 mrdm³ gaswinning zal blijven toenemen.

$N(M \geq 1.5)$ met negentien bevingen bij 2200 mrdm³_{cum} (eind 2017) en loopt deze in twintig stappen van 0.65 beving op (dus: 19,65, 20,30, enz.) naar tweeëndertig bevingen bij 2800 mrdm³_{cum}. Het totale aantal tussen 2017 en eind 2047 te verwachten aantal bevingen met $M \geq 1.5$ valt gemakkelijk te berekenen dan wel af te lezen uit Figuur 3; het zou ongeveer 500 bedragen.

Vanuit de meer conservatieve *logaritmische* trendcurve kan op soortgelijke wijze worden afgeleid dat er tot het einde van de gaswinning in totaal nog 450 bevingen met $M \geq 1.5$ zijn te verwachten, d.w.z. gemiddeld vijftien per jaar, waarvan twee met $M \geq 2.5$.

Hagoort (2017) geeft de groei van de seismische activiteit in het Groningenveld weer door het *cumulatieve* totaal aantal, $N(M \geq 1.5)_{\text{cum}}$ sinds 1991 uit te zetten tegen de cumulatieve totaalhoeveelheid gewonnen gas sinds 1963; zie Figuur 4. Op grond van een vrijwel perfect passende kwadratische trendcurve met $R^2 = 0,999$ voorspelt Hagoort dat waarschijnlijk nog eens 446 aardbevingen met $M \geq 1.5$ zullen optreden voordat het totaal van 2800 mrdm³ aardgas omhoog is gehaald. Een kwadratische trend in cumulatieve seismiciteit betekent dat jaarlijks steeds meer aardbevingen voorkomen naarmate de totaalhoeveelheid gewonnen gas toeneemt. Wat dit betreft is Figuur 4 compatibel met de 'niet-cumulatieve' lineaire trendlijn over 2001-2013 gegeven in Figuur 1. Ook vertoont Figuur 4 grote gelijkenis met *Figure 4* van Bourne en Oates (2015, *Part 1*, p. 12). Deze auteurs concluderen tot een *exponentiële* toename in de cumulatieve aardbevingsactiviteit met het verminderen van de ondergrondse gasvoorraad.

Figuur 4. Hagoort's (2017) weergave van het cumulatieve aantal aardbevingen met $M \geq 1.5$ in het Groningenveld over 1990-2016, als een kwadratische functie van cumulatieve gaswinning sinds 1963. In de formule en op de abscis markeert de beginwaarde van 1240,19 mrdm³_{cum} het einde van 1991. Figuur 4 is hier overgenomen met toestemming van auteur Hagoort.

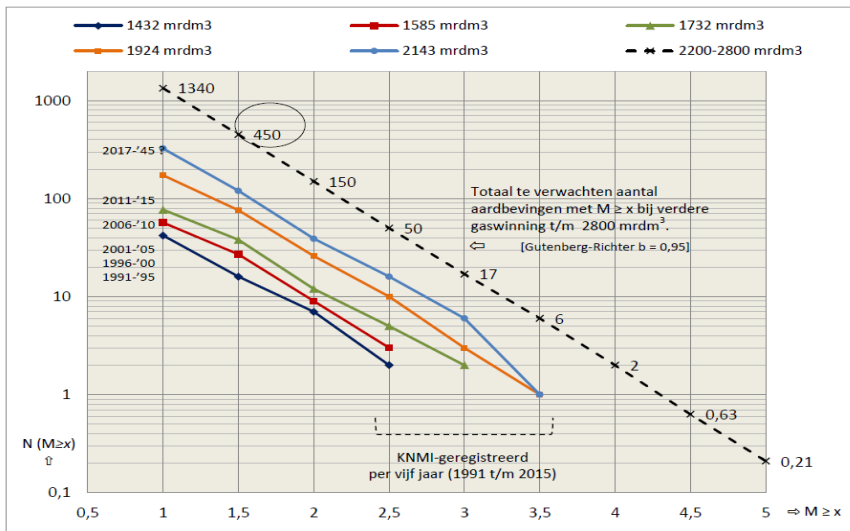


Met toepassing van een empirisch geschatte Gutenberg-Richter b-waarde van 1 specificeert Hagoort dat er tot het einde van de 2800 mrdm³ gaswinning rond 2050 ongeveer 45 (10% van 446) bevingen met $M \geq 2.5$ kunnen worden verwacht, waarvan er vier à vijf (1%) magnitude $M \geq 3.5$ (honderd keer zo sterk) zouden hebben; éénmaal zou zelfs een aardbeving met $M \geq 4.5$ kunnen optreden. Op kortere termijn zou het jaarlijks winnen van meer of minder gas leiden tot verkorting dan wel verlenging van de tijdschaal van de seismische activiteit, zonder dat het nog te verwachten totaal aantal bevingen zou veranderen (zie ook Hagoort, 2015). Deze conclusie is verenigbaar met die van Nepveu *et al.* (2016) dat een reductie in jaarlijkse gaswinning zal leiden tot minder aardbevingen *per jaar*. Gezien het bovenstaande kunnen we stellen dat $N(M \geq 1.5) = 450$ een redelijke schatting is van de totale seismische activiteit tussen 2017 en 2050, aangenomen dat de Groningse gaswinning wordt voortgezet. Met toepassing van een Gutenberg-Richter b-waarde van 0,95 (Zöller & Holschneider, 2016),⁵ laten zich vanuit deze totale $N(M \geq 1.5) = 450$ ook totaal frequenties afleiden van andere

⁵ Een b-waarde van 0,95 zou tevens een compromis zijn tussen de empirische schattingen van Hagoort ($b = 1,0$) en schrijver dezes ($b = 0,90$; zie par. 2).

bevingsmagnitudes, en wel volgens een log-lineaire functie van M tussen 1.0 en maximaal 5.0; zie Figuur 5. Deze laat ook zien dat de *empirische* verdelingen van magnitude-frequenties (per vijf jaar) voor vijf niveaus van cumulatieve gaswinning (per eind 1995, 2000, '05, '10, and '15) onderling behoorlijk evenwijdig zijn, met een hellingscoëfficiënt van circa 0,90 (zie par. 2).

Figuur 5. Onderste vijf lijnen: magnitude-frequentieverdeling voor vijf niveaus van cumulatieve gaswinning, resp. per eind 1995, 2000, 2005, 2010 en 2015. Bovenste, gestippelde lijn: totaal voor de komende circa dertig jaar te verwachten magnitude-frequenties tussen 2200 mrdm³ (eind 2017) en 2800 mrdm³ (ca. 2047) cumulatieve gaswinning. Omcirkeld is $N(M \geq 1.5) = 450$, de uitgangswaarde voor het ontvouwen van de bovenste lijn.



De conclusie is dat er, wanneer de Groningse gaswinning wordt voortgezet totdat alle (geschatte) 2800 mrdm³ aardgas naar boven is gehaald, nog ongeveer vijftig aardbevingen kunnen optreden met potentieel schadelijke en/of levensbedreigende magnitudes groter dan 2.5 op de schaal van Richter. Ongeveer zeventien van deze bevingen zouden een magnitude hebben van $M \geq 3.0$ en twee hiervan zouden krachtiger zijn dan $M = 4.0$. Voor de resterende tijd van de gaswinning (dertig jaar?) zou de kans op een aardbeving met $M \geq 5.0$ ongeveer 20% zijn, of 0,67% per jaar. Op dit punt komt de onderhavige conclusie goed overeen met de schattingen van een internationale groep deskundigen tijdens een speciale werkbijeenkomst over $M_{\max}$ (NAM, 2016b; zie ook Zöller & Holschneider, 2016).

5. Vergelijking met Bayesiaans-statistische analyse

De hierboven gerapporteerde aardbevingsanalyse is betrekkelijk eenvoudig en steunt op frequentietellingen, grafische weergaven en statistisch optimale *trend fitting* en extrapolatie. Beperking van de analyse tot goed-geregistreerde aardbevingen met $M \geq 1.5$ in plaats van 1.0 belemmert een meer gedetailleerde analyse op het niveau van deelregio's van het gaswingebied. Bijkomend probleem is het 'ruizige' karakter van de ruwe gegevens als gevolg van de natuurlijke variabiliteit in de jaarlijkse c.q. halfjaarlijkse seismische activiteit. Verwachtingen omtrent toekomstige aardbevingsfrequenties kunnen dan ook slechts bij benadering worden geformuleerd; dat gebeurt ook bij de NAM (2016c) en het SodM (2015, 2016).

In een doorwrochte poging om de Groningse aardbevingsactiviteit te beschrijven, verklaren en voorspellen hebben Nepveu *et al.* (2016) een statistisch meer geavanceerde route verkend. In hun '*Bayesian change-point analysis*' over 1996-2015 identificeren de schrijvers januari 2003 als het beginpunt van een sterke toename in aardbevingen — waarbij zij werken met de veel frequentere bevingen met $M \geq 1.0$ (goed geregistreerd vanaf 1996); daardoor kan ook de subregionale seismiteit worden geanalyseerd.

Over de jaren vóór 2003 concluderen deze schrijvers (p. 3353; vert. ChV): “een constant-tempo [van bevingen] model is volstrekt aanvaardbaar”, waarbij er géén verband lijkt te zijn tussen de jaarlijkse gaswinning en het aantal bevingen. Bovendien schatten zij dat de seismische reactie enkele maanden na-ijlt op een significante verandering in gaswinning (b.v. in winter versus zomer). Een dergelijke uitsteltijd past bij wat er bekend is over de verspreidingssnelheid van drukveranderingen in het gasreservoir. Vanuit een wat breder perspectief concluderen Nepveu *et al.* tenslotte (2016, p. 3358; vert. ChV): “Productieveranderingen zijn niet de enige factoren van seismische activiteit, naar verwachting speelt ook de productiegeschiedenis een rol.”

Voor een kort commentaar op deze Bayesiaanse modeloefening kunnen we even terugkijken naar Figuur 1 in paragraaf 2 om vervolgens vast te stellen dat hier eerder een keerpunt te zien is *omstreeks 2001*, waarna de jaarlijkse gaswinning aanzienlijk is toegenomen. Deze groei ging gepaard met een toename in het jaaraantal aardbevingen. Bij 2003 vertoont Figuur 1 inderdaad een markante verhoging in $N(M \geq 1.5)$, zo ook in 2006 en in 2011, maar gegeven de hoge natuurlijke variabiliteit (het ‘gezigzag’) van het bevingsaantal in Figuur 1 als geheel lijkt het hachelijk om januari 2003 aan te wijzen als een beduidend ‘veranderpunt’. Hiervoor geven Nepveu *et al.* (2016) trouwens geen speciale verklaring. Vanuit het Staatstoezicht op de Mijnen concludeerden Muntendam-Bos en De Waal al in 2013 (vert. ChV): “Er is een gestage non-lineaire toename in het jaarlijkse aantal trillingen [*tremors*] sinds 1991. Dit geldt voor het totaal aantal trillingen alsook voor de verschillende magnitudecategorieën.”

Daarnaast lijkt het minder valide om, gezien de reeds langzame toename in bevingingsactiviteit over 1991-2000 (zie Fig. 1), vast te houden aan een constant-tempo model van bevingingsactiviteit voor de jaren vóór 2003; het daarbij gehanteerde vertrekpunt van 1996 en het meerekenen van de cijfers voor 2001-2002 kunnen ietwat misleidend zijn. Figuur 1 laat namelijk duidelijk zien dat de jaarlijkse gaswinning tussen 1996 en 2000 gestaag daalde van 42 naar 20 mrdm³ per jaar, waardoor daarop na-ijlende bevingingsactiviteit tot in 2002 kan zijn gematigd; cf. de bescheiden *negatieve* kwadratische component in de aardbevingstrendcurve over 1991-2000 in Figuur 1.⁶

Nepveu *et al.* (2016) concluderen uiteindelijk dat de Groningse seismiciteit ná januari 2003 duidelijk in verband staat met de jaarlijkse gaswinning en dat verdere gaswinning de ‘criticaliteit’ verhoogt van de talrijke breukvlakken in het gasreservoir. Dit komt – enigszins impliciet – overeen met de hoofdconclusies van de onderhavige analyse (par. 2-4), namelijk dat, vanaf 2001, voortgezette gaswinning uit het Groningenveld het relatief zachte reservoirgesteente steeds kwetsbaarder (d.w.z. aardbevingingsgevoeliger) maakt voor verdere drukverlaging naarmate de cumulatieve hoeveelheid reeds gewonnen aardgas – de ‘productiegeschiedenis’ – toeneemt.

Deze conclusie ligt in de lijn van het ‘primaire effect’ aangegeven door Bourne *et al.* (2014, p. 9010; vert. ChV): “Ten eerste neemt het seismisch moment [de totale bevingingsactiviteit] dat vrijkomt per eenheid gaswinning toe met de compactie van het reservoir.” Het tweede, tegen-gestelde effect houdt in dat de Groningse gaswinning te zijner tijd vanzelf zal afnemen, waardoor ook de seismiciteit zal verminderen; dit is echter een kwestie van decennia, niet van jaren.

6. Acties, adviezen, beslissingen van NAM, SodM en EZ

Gegeven de gestage toename in aardbevingingsactiviteit sinds 1991, vooral in 2001-2013 (zie Figuur 1), raakten de voornaamste partijen bij de gaswinning: exploitant NAM, toezichthouder SodM en de minister van Economische Zaken, vanaf eind 2012 intensief betrokken in een stroomversnelling van onderzoek, advies, debat en besluitvorming. Daarbij werd het jaarvolume van de Groningse gaswinning verminderd van 54 mrdm³ in 2013 tot een in april 2017 aangekondigde 21,6 mrdm³ per 1 oktober 2017, een reductie van 60% in vijf jaar tijd. Als gevolg hiervan en van een dalende internationale gasprijs zijn de staatsinkomsten uit het Groningengas substantieel teruggelopen, van een recordbedrag van € 13 miljard in 2013 tot circa € 2 miljard in 2016. De mijlpalen in deze

⁶ Een tweede trendbreuk doet zich uiteraard voor aan het begin van 2014 (bij 2100 mrdm³_{cum}), toen de jaarlijkse gaswinning begon af te nemen tot en met 2016 en, zoals aangekondigd, verder in 2017-2018; zie Figuur 1, bovenste curve.

dynamische, ingewikkelde en meerjarige (r)evolutie inzake het Groningenveld zijn samengevat in Tabel 2.

Tabel 2. Opeenvolgende acties/adviezen/beslissingen door NAM, SodM en de minister van Economische Zaken sinds jan. 2013. [AB = aardbeving; GW = gaswinning, mrdm³ = miljard kubieke meter, M = magnitude.

	Exploitant NAM	Toezichthouder SodM	Min. Economische Zaken
Jan. 2013	Volgt 10-jaar vergunning (2006-'15) voor jaarvolume van 42,5 mrdm ³ (NAM, 2007). Verwerpt 'ineffectieve' reductie van GW.	Waarschuwt voor meer/sterkere AB'n. Stelt dat AB'n met $M \geq 1.5$ bij 12 mrdm ³ /jr zouden stoppen en dat mogelijke $M_{\max} \geq 3.9$.	Houdt vast aan NAM's 10-jaar vergunning en geeft opdracht tot 14 verschillende onderzoeken met rapportage vóór eind 2013.
jan.-maart 2014	Diende eind 2013 gewijzigd GW-plan met 'acceptabel risico' in. Verzoekt behoud van vergunning voor 42,5 mrdm ³ /jaar tot 2021.	Stelt voor om NAM-plan af te wijzen en herziening te vragen per medio 2015. Adviseert GW rondom Loppersum te stoppen.	Vergunt NAM een GW van 42,5, 42,5 en 40 mrdm ³ in 2014-2016. Vermindert GW in Loppersum-gebied met 80%.
dec. 2014	Analyseert recente 2.8-beving bij Groningen-stad. Rapporteert onvoorziene veranderingen in plaatselijke seismiteit.	Constateert minder seismiteit rondom Loppersum, maar méér in zuidelijke regio. Stelt voor GW te beperken tot 39,4 mrdm ³ /jaar.	Reduceert NAM-vergunning tot 39,4 mrdm ³ voor 2015-2016. Vraagt nieuw winningsplan per medio 2016.
febr. 2015	<i>[Publicatie van kritisch rapport door Onderzoeksraad voor Veiligheid (OvV, 2015) waarin wordt gewezen op decennialange verwaarlozing van de omgevingsveiligheid van de gaswinning in Groningen]</i>		Stelt een 'Nationaal Coördinator Groningen' aan voor grootschalig programma woningversterking. Beperkt de GW tot 16,5 mrdm ³ voor eerste half jaar 2015.
juni 2015	Publiceerde 'Hazard and Risk Assessment for Induced Seismicity Groningen' (NAM, 2015; 2 delen).	Dringt aan op specificatie van numerieke risiconormen en een zodanige GW-reductie dat aan die normen wordt voldaan.	Besluit dat Groningse GW voor heel 2015 wordt beperkt tot 30 mrdm ³ .
dec. 2015	Rapporteert seismische risico-analyse voor GW van 33, 27 and 21 mrdm ³ /jaar, met weer toenemende AB'n na 2016.	Adviseert GW zó te verlagen dat seismisch risico minimaal wordt, zonder GW-fluctuaties. Schrijft: 'het systeem is beheersbaar'.	Accepteert uitspraak Raad van State (2015): GW moet om veiligheidsredenen worden beperkt tot 27 mrdm ³ in 2015-2016.
mei/sept. 2016	Nieuw winningsplan for 2016-2021, met 33/27/21 mrdm ³ /jaar- scenario's, stelt 27 mrdm ³ voor, vindt 33 mrdm ³ 'veilig genoeg'.	Interpoleert seismische implicaties van 27 en 21 mrdm ³ per jaar, adviseert 24 mrdm ³ als 'veilig', met vermindering van fluctuaties. ^a	Besluit tot een GW van 24 mrdm ³ per jaar in 2017-2021. Verlangt zorgvuldige controle en tussen-tijdse evaluatie per 1 okt. 2018.
april 2017	Rapporteert over onverwacht terugkerende seismiteit in regio Loppersum, door langzame druk-verevning in het gasreservoir.	Adviseert tot vasthouden aan 24 mrdm ³ /jaar, maar tot verlaging met 10% bij overschrijding van grenswaarde voor seismiteit. ^a	Wijkt af van SodM-advies en kondigt voornemen aan om GW per 1 okt. 2017 met 10% te verlagen tot 21,6 mrdm ³ per jaar.

^a Zie tekst voor verdere SodM-overwegingen in 2016-'17.

Terwille van de overzichtelijkheid zijn de rollen en acties van andere, met name regionale partijen hier grotendeels buiten beschouwing gelaten. Wél dient vermeld dat vanuit Groningse bewonersorganisaties, provincie- en gemeentebesturen gestaag wordt aangedrongen op sterke vermindering van de gaswinning, in overeenstemming met het advies van het SodM (jan. 2013) dat $N(M \geq 1.5)$ binnen afzienbare tijd praktisch nul zou worden wanneer de gasproductie hooguit 12 mrdm³ per jaar zou bedragen.⁷ Damveld/SP-fractie (2017) hebben de ontwikkeling

⁷ Op grond van de statistische analyse en conclusies in par. 3 is deze stelling vatbaar voor verdere discussie.

van het gaswinnings- en veiligheidsbeleid voor Groningen overzichtelijk in kaart gebracht, inclusief de welhaast voelbare spanning tussen ‘leveringszekerheid’ en omgevingsveiligheid.

Uit de tweede kolom van Tabel 2 wordt duidelijk dat de NAM nog geruime tijd wilde vasthouden aan haar tien-jaarvergunning om gemiddeld per jaar 42,5 mrdm³ gas te winnen. NAM schikte zich slechts langzaam naar de op veiligheid gerichte overheidsstrategie tot vermindering van de jaarproductie.

Daartegenover (vierde kolom) wilde ook de minister van Economische Zaken gevolg blijven geven aan de lopende NAM-vergunning. Hij negeert dan ook de conclusie uit SodM (2013) dat er bij een gaswinning van 12 mrdm³ per jaar nauwelijks nog aardbevingen met $M \geq 1.5$ zouden optreden (zie noot 8). Pas na een vol jaar van nader onderzoek (2013) honoreerde de minister de toegenomen maatschappelijke en politieke aandrang om de jaarlijkse gaswinning te verlagen. Maar daarbij ging de minister in eerste instantie slechts terug naar de ‘normale’ 42,5 mrdm³ per jaar van de onderbroken tien-jaarvergunning 2006-2015. Het kostte de minister zeven opeenvolgende beslissingen om van het record van 54 mrdm³ in 2013 te komen tot de voor 1 okt. 2017 aangekondigde 21,6 mrdm³ per jaar.

Tussen de NAM en de minister van EZ staat toezichthouder SodM die enerzijds kritisch moet zijn ten opzichte van de NAM en anderzijds de minister (kritisch) moet adviseren. In hun (na 2012) eerste advies bespreekt SodM (2013) twee hoofdstrategieën voor risicobeheersing: (1) aanzienlijke verlaging van de jaarlijkse gasproductie teneinde de ‘seismische dreiging’ van meer en zwaardere aardbevingen te verkleinen, en (2) het versterken van duizenden kwetsbare gebouwen om het ‘seismisch risico’ van gebouwschade en mogelijk fatale instorting te verminderen.

In juni 2015 adviseert het SodM de minister om een getalsmatige norm vast te stellen voor het individuele overlijdensrisico van een paar honderdduizend gebiedsbewoners. De jaarlijkse gaswinning zou dan zó ver moeten worden verminderd dat aan deze veiligheidsnorm wordt voldaan. In december 2015 schrijft het SodM (p. 24) bovendien: “De seismiciteit is regelbaar door de hoogte en de verdeling van de productie te variëren.”

Bij de evaluatie van het nieuwe winningsplan voor 2017-2021 van de NAM (2016c) beklemtoont het SodM (2016) wederom de preventie van aardbevingsschade door (verdere) reductie van de jaarlijkse gaswinning, bij voorkeur in combinatie met - ‘nu bewezen’- vlakke winning zonder veel fluctuaties in tijd en ruimte.⁸ Daarnaast wijst het SodM (2016) op een eerder, nog niet vervuld verzoek aan de NAM om aan te geven

“..bij welke combinatie van jaarproductie, productieverdeling en gebouwenversterking het omslag-punt ligt naar een veiligheidsniveau dat voldoet aan de vastgestelde norm” (SodM, 2015, p. 5, 11).

Met andere woorden, het SodM vraagt de NAM om een effectieve seismisch-ricicogestuurde strategie te ontwerpen voor de verdere gaswinning. Dit was en is kennelijk te veel gevraagd; tot op heden is de NAM er (nog) niet in geslaagd om een kwantitatief model en schattingen van individueel risico en groepsrisico (overlijdenskansen) te produceren die zouden kunnen dienen als basis voor het veilig reguleren van de verdere gaswinning.

Een opmerkelijke standpuntverandering komt naar voren in een tussentijds advies van het SodM (2017). Daarin wordt geconcludeerd: (1) dat de nog in 2016 aanbevolen strategie van verminderde en meer ‘vlakke’ gaswinning niet lijkt te werken, en (2) dat – gegeven de ‘*state of the art*’ – een veilig niveau van gaswinning niet kan worden aangegeven. Het SodM constateert dat de in 2016 vastgestelde ‘alarmeringswaarde’: 0,25 aardbeving met $M \geq 1.0$ per km² per jaar, sindsdien niet is overschreden.⁹ Daarom adviseert het SodM de minister om voorlopig vast te

⁸ In Vlek (2016, par. 3.6) worden duidelijke seizoensverschillen aangetoond in gaswinning én aantal aardbevingen met $M \geq 1.5$ tussen 2000 en 2015. Tegelijkertijd wordt beredeneerd dat ‘vlakke’ gaswinning op langere termijn weinig zal (kunnen) uitmaken.

⁹ Voor het Groningenveld van 900 km² als geheel zou deze alarmeringswaarde betekenen dat $N(M \geq 1.0)$ onder de 225 per jaar (één beving per vier km²) zou moeten blijven, dat $N(M \geq 1.5)$ /jaar minder dan 75 (225/3) zou moeten zijn en dat het jaaraantal bevingen met $M \geq 2.5$ niet meer dan ruim acht (75/9) zou mogen zijn. De hierbij toegepaste Gutenberg-Richter b-waarde is 0,95. *Relativering*: de seismische dreiging is lang niet overal zo hoog als rondom Loppersum, waar de alarmeringswaarde het gemakkelijkst overschreden kan worden.

houden aan een jaarproductie van 24 mrdm³ (zoals in sept. 2016 besloten) en om de gaswinning eerst met 10 procent te verlagen wanneer deze grenswaarde later wel overschreden zou worden.

De herziene opvattingen van het SodM (2017) zijn vanuit wetenschappelijk gezichtspunt begrijpelijk alhoewel misschien nog ietwat voorbarig. Vanuit politiek gezichtspunt lijkt het recente SodM-advies (2017) echter zowel verrassend als frustrerend, omdat het eerdere verwachtingen en de hoop ondermijnt dat het Groningenveld gedurende de lange nog resterende duur van de gaswinning – nog minstens dertig jaar – veilig zou kunnen worden geëxploiteerd. In een prompte, van het advies afwijkende reactie op SodM (2017) kondigde de minister van EZ aan zich te gaan voorbereiden op verdere inperking van de winningsvergunning, en wel met tien procent tot jaarlijks 21,6 mrdm³ per 1 oktober 2017 (EZ, 2017a). Tegen het formele besluit daaromtrent (EZ, 2017b) heeft de NAM officieel beroep aangetekend. De Raad van State zal hierover na 1 september 2017 uitspraak doen.

7. Ter afronding

De provincie Groningen ligt in een *tectonisch* inactieve regio en heeft ongeveer 600.000 inwoners, wier woningen en andere bouwwerken nimmer aardbevingsbestendig hoefden te zijn. Sinds 1963 heeft gestage gaswinning uit het 900 km² grote en 100 m dikke zandstenen gasreservoir van oorspronkelijk 2800 mrdm³ aardgas geleid tot toenemende compactie met vanaf 1990 een steeds sterkere seismische reactie op verdere gaswinning, in elk geval tot 2014. Feitelijk is de jaarlijkse gaswinning uit het rijke Groningenveld steeds riskanter geworden, speciaal na 2001 toen 60% van het gasreservoir al was leeggehaald.

Sinds begin 2014 is een strategie in gang gezet van risicobeheersing door vermindering van de jaarproductie. De bedoeling is – voorlopig – om deze strategie door te zetten tot in 2018; vgl. de bovenste curve in Figuur 1, vanaf 2014. Bovendien kan meer ‘vlakke’ winning in tijd (seizoenen) en ruimte (subregio’s) een gunstig (veiliger) effect hebben op plaatselijke belevingsactiviteit op korte termijn. Als gevolg van de hoge gasdoorlatendheid (permeabiliteit) van de poreuze zandsteenlaag kan dit effect op langere termijn echter beperkt blijken te zijn. Ook de Mijnraad (2016) oordeelde dat de veiligheidsbijdrage van ‘vlakke’ gaswinning nog moeten worden aangetoond. Volgens het SodM (2017) zelf is de effectiviteit van deze strategie tot nog toe niet bevestigd.

Medio 2017 klemmen twee strategische beleidsvragen. Ten eerste, zal de aardbevingsactiviteit slechts beperkt blijven dan wel verminderen wanneer de gaswinning van jaar op jaar blijft afnemen, zoals tussen 2014 en – naar bedoeling – 2018? Ten tweede, hoe verstrekkend, ongemakkelijk en kostbaar moet het regionale programma-gebouwenversterking worden om tijdig voldoende veiligheid te waarborgen voor tienduizenden bewoners, hun huizen en andere fysieke infrastructuur?

Op deze vragen kan vooralsnog geen overtuigend antwoord worden gegeven. Zij maken nog eens duidelijk dat zowel de voortdurende gaswinning als de uitdijende versterkingsoperatie onzekere projecten zijn waarvan noodzaak en gevolgen niet volledig te overzien zijn. Dit noopt tot goedberedeneerde, begrijpelijke beleidskeuzes die zo nodig tussentijds kunnen worden bijgesteld.

8. Verwijzingen

Bourne, S.J., Oates, S., Van Elk, J., & Doornhof, D. (2014). A seismological model for earthquakes induced by fluid extraction from a subsurface reservoir. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 8991–9015.

Bourne, S.J., & Oates, S. (2015). *An activity rate model of induced seismicity within the Groningen Field (Parts 1 and 2)*. Assen (NL): NAM, February & July. <https://www.sodm.nl/onderwerpen/aardbevingen-groningen/documenten/publicaties/2016/06/21/12> (& idem/13).

Damveld, H., & SP-fractie (2017). *Gas uit Groningen. Vijf jaar na de aardbeving bij Huizinge*. Provinciale Statenfractie Socialistische Partij, p/a Provinciehuis Groningen.

- EZ (2017a). *Advies SodM over seismiteit Groningenveld*. Brief aan Tweede Kamer, BBR/17059208, 18 april. Den Haag: Ministerie van Economische Zaken (EZ).
- EZ (2017b). *Wijziging instemmingsbesluit winningsplan Groningenveld*. Brief DGETM-EO/17074807. Den Haag: Ministerie van Economische Zaken (EZ), 24 mei.
- Grasso, J.-R. (1992). Mechanics of seismic instabilities induced by the recovery of hydrocarbons. *Pure and Applied Geophysics*, 139, (3/4), 507-533.
- Gutenberg, B., & Richter, C.F. (1941). Seismicity of the Earth. *Geological Society of America Special Paper* 34, 1-131.
- Hagoort, J. (2015). Aardbevingen in Groningen. Statistiek en risicoanalyse. *Ruimtelijke Veiligheid en Risicobeleid*, Jrg 6, 19, 11-21.
- Hagoort, J. (2017). *Empirical model for induced earthquakes in the Groningen gas field*. Amsterdam (NL): ongepubliceerd manuscript. Amsterdam, NL.
- Keranen, K.M., Weingarten, M., Abers, G.A., Bekins, B.A., & Ge, S. (2014). Sharp increase in central Oklahoma seismicity since 2008 induced by massive wastewater injection. *Science*, 345, 448-451.
- KNMI (2017). *Lijst van alle geïnduceerde aardbevingen in Nederland sinds 1986*. http://cdn.knmi.nl/knmi/map/page/seismologie/all_induced.pdf.
- Mijnraad (2016). *Advies Mijnraad winningsplan Groningenveld 2016*. Den Haag. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/brieven/2016/06/24/advies-mijnraad>.
- Muntendam-Bos, A.G., & De Waal, J.A. (2013). *Reassessment of the probability of higher magnitude earthquakes in the Groningen gas field*. Den Haag: Staatstoezicht op de Mijnen (SodM), 16 januari.
- NAM (2007). *Aanvraag wijziging Winningsplan Groningen*. http://www.nam.nl/promos/winningsplan-2007/_jcr_content.stream/1453407372973/77d86b3bdb57faa1f214d9eab285d02e6b8ae767678f5b2a7ff4c45ab8e526bf/groningen-winningsplan-2007-scanned1.pdf.
- NAM (2015). *Hazard and risk assessment for induced seismicity Groningen. Study 1: Hazard assessment. Idem: Study 2: Risk assessment*. Assen: NAM (mei).
- NAM (2016a). *Feiten en cijfers over gaswinning*. www.namplatform.nl/feiten-en-cijfers/feiten-en-cijfers-gaswinning.
- NAM (2016b). *Report from the expert panel on maximum magnitude estimates for probabilistic seismic hazard and risk modelling in Groningen gas field*. 25 April 2016. <http://www.nam.nl/feiten-en-cijfers/onderzoeksrapporten>.
- NAM (2016c). *Winningsplan Groningen gasveld 2016, incl. Technical addenda & Supplement*. Assen: NAM. <http://www.namplatform.nl/mediatheek/winningsplan-2016.html>.
- Nepveu, M., Van Thienen-Visser, K., & Sijacic, D. (2016). Statistics of seismic events at the Groningen field. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14 (12), 3343–3362 (December).
- OvV (2015). *Aardbevingsrisico's in Groningen. Onderzoek naar de rol van veiligheid van burgers in de besluitvorming over de gaswinning (1959-2014)*. Den Haag: Onderzoeksraad voor Veiligheid, www.onderzoeksraad.nl.
- Raad van State (2015). *Uitspraak 201501544/1/A4 over gaswinning en aardbevingen in Groningen*. 18 november. www.rvs.nl.
- SodM (2013). *Brief aan de minister van EZ*. Den Haag: Staatstoezicht op de Mijnen, 22 January.
- SodM, (2015). *Seismisch risico Groningenveld. Beoordeling rapportages & advies*. Den Haag: Staatstoezicht op de Mijnen (juni). <https://www.sodm.nl/onderwerpen/aardbevingen-groningen/documenten/publicaties/2015/06>.
- SodM, (2015). *Seismisch risico Groningenveld. Beoordeling rapportages & advies*. Den Haag: Staatstoezicht op de Mijnen (Dec.). <http://www.sodm.nl/documenten/publicaties/2015/12>.
- SodM (2016). *Advies Winningsplan Groningen 2016*. Den Haag: Staatstoezicht op de Mijnen (mei). <http://www.sodm.nl/documenten/publicaties/2016/06>.
- Utsu, T. (1999). Representation and analysis of the earthquake size distribution: A historical review and some new approaches. *Pure and Applied Geophysics*, 155, 509–535.

- Van Eck, T., Goutbeek, F.H., Haak, H.W. & Dost, B. (2006). Seismic hazard due to small-magnitude, shallow-source, induced earthquakes in the Netherlands. *Engineering Geology*, 87, 105-121.
- Van Thienen-Visser, K., & Breunese, J.N. (2015). Induced seismicity of the Groningen gas field: History and recent developments. *The Leading Edge*, special section: Injection-induced seismicity. June, 664-671.
- Van Wees, J.D., Buijze, L., Van Thienen-Visser, K., Nepveu, M., Wassing, B.B.T., Orlica, B., & Fokker, P.A. (2014). Geomechanics response and induced seismicity during gas field depletion in the Netherlands. *Geothermics*, 52, 206–219, October.
- Vlek, C.A.J. (2016). Toekomstperspectief gaswinning met aardbevingen in Groningen: ontwikkeling van de seismische dreiging en een ‘veiliger’ gaswinstrategie. *Ruimtelijke Veiligheid en Risicobeleid*, 7 (24), 12-35.
- Weingarten, M., Ge, S., Godt, J.W., Bekins, B.A., & Rubinstein, J.L. (2015). High-rate injection is associated with the increase in U.S. mid-continent seismicity. *Science*, 348, 1336–1340.
- Zöller, G., & Holschneider, M. (2016). The maximum possible and the maximum expected earthquake magnitude for production-induced earthquakes at the gas field in Groningen, The Netherlands. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106 (6), 2917-2921.

