

Empirical Model for Induced Earthquakes in the Groningen Gas Field

Jacques Hagoort

Formerly Professor of Reservoir Engineering - Delft University of Technology

Paper prepared at the invitation of the Guest Editors of the special Groningen issue of the Netherlands Journal of Geosciences (NJG), due for publication in the fourth quarter of 2017. Paper submitted to NJG on 21-02-2017. Paper declined on 09-03-2017. Rebuttal submitted on 21-03-2017. Rebuttal rejected on 01-04-2017. See Appendix for backstory.

Revised paper released on 24-04-2017



Free of Copyright. May be used and distributed freely.

Abstract

The paper presents an empirical model for the field-wide prediction of frequency and strength of earthquakes induced by gas production from the Groningen gas field. It is based on a statistical analysis of 284 earthquakes, the total number of recorded earthquakes with a magnitude greater than 1,5 on the Richter scale until 01-01-2017.

The statistical analysis shows that the cumulative number of earthquakes correlates very well with the cumulative gas production. Mathematically the correlation can be described by a simple quadratic equation. By using this equation we can predict the average yearly earthquake frequency for a given production rate profile. The observed yearly frequencies deviate substantially from the predicted frequencies, indicating a sizeable inherent natural variability.

Another outcome of the analysis is that the strength distribution of the earthquakes recorded so far can be fairly well described by the well-known Gutenberg-Richter equation and that this distribution is time-invariant, confirming earlier results by KNMI investigators. Consequently, the observed increase in stronger earthquakes in the course of time can be simply attributed to an increase in yearly earthquake frequency.

Extrapolation of the quadratic equation results in a total number of earthquakes for the entire life cycle of the field in the order of 700. This leaves over 400 earthquakes for the remaining production period until the abandonment of the field. Extrapolation of the Gutenberg-Richter equation indicates a maximum earthquake strength of magnitude 4,4 on the Richter scale.

The main application of the empirical model is in forecasting future field-wide seismicity for given gas production scenarios. Example forecasts are presented that highlight the impact of production rate level on the development of seismicity in Groningen.

Introduction

The Groningen gas field is situated in the province of Groningen in the Netherlands and is one of the larger gas fields in Europe. Discovered in 1959, production from the field started in 1963 by conventional pressure depletion. NAM (Nederlandse Aardolie Maatschappij BV), a joint venture of Shell and ExxonMobil, is the operator of the field. The gas-initially-in-place (GIIP) of the field is estimated at 2880 billion cubic meter¹. The cumulative recovery from the field at 01-01-2017 is 75 per cent of the GIIP.

The first earthquake in the field was recorded in 1991 in the village of Middelstum and had a strength of magnitude of 2,4 on the Richter scale. As of 01-01-2017 over 600 earthquakes with magnitude greater than 1 have been recorded over a large geographical area but concentrated in the center of the field near the town of Loppersum. The strongest earthquake with a

¹ By convention Groningen gas volumes are expressed in gas volumes at normal conditions, viz. a temperature of 0°C and a pressure of 1 bar

magnitude of 3,6 occurred in the summer of 2012 in the village of Huizinge. It was this event that triggered a massive effort to make the built environment in Groningen earthquake-proof so that the safety of the inhabitants of Groningen would be assured with the continued production from the field.

In this paper we present a statistical analysis of the historically observed earthquakes up to 01-01-2017. The main objective of the analysis is to establish and quantify trends in number and in strength of the earthquakes, if any. If successful the observed trends can be used for field-wide predictions of the future seismicity in Groningen. In the analysis we have restricted ourselves to earthquakes with a magnitude greater than 1,5 on the Richter scale. The reason for this cut-off is twofold. First, earthquakes with magnitudes less than 1,5 can be hardly felt at the surface and cause little if any damage to the built environment. Second, in the early days earthquakes with the lesser magnitudes may not have been picked up by KNMI's registration network operational at that time. However, there is no doubt that all earthquakes with magnitudes greater than 1,5 have been recorded since day one. Therefore, data on earthquakes with a magnitude greater than 1,5 constitute a statistically complete data set.

The outline of the paper is as follows. First we describe the available 'raw' data, the yearly recordings of the number of earthquakes and attendant strengths along with the yearly production data. We then take a closer look at possible trends in number of earthquakes and in strength of the earthquakes. Subsequently we estimate the total number of earthquakes and the strength distribution for the future earthquakes. Finally we present forecasts of the yearly earthquake frequencies for three different production scenarios, i.e. yearly production rates versus time, for the period from 2017 up to 2034.

Raw Data

Seismicity in Groningen is monitored through an extensive digital seismometer network operated by KNMI, the Royal Dutch Meteorological Institute. All data on seismic events in the Netherlands can be found in the KNMI earthquake database that can be accessed through KNMI's website (Ref. 1). A summary of the induced earthquakes for the Groningen gas field is also available at the website of NAM, which also provides data on gas production volumes since the start of production from the field in 1963 (Ref. 2).

Figure 1 displays the complete raw data set that we have used in our analysis. It comprises yearly gas production rates and yearly earthquake frequencies (= the number of earthquakes per year) with magnitudes greater than 1.5 recorded in the field from 1991, the year of the first earthquake in Middelstum, until 01-01-2017. The total number of earthquakes recorded in that period is 284. The stacked columns show the yearly frequencies in magnitude increments of 0,5, starting with a magnitude of 1.5. The line graph shows the annual production rate in billion cubic meter per year. The cumulative gas production from the field at 01-01-1991 amounted to 1240,19 billion cubic meter.

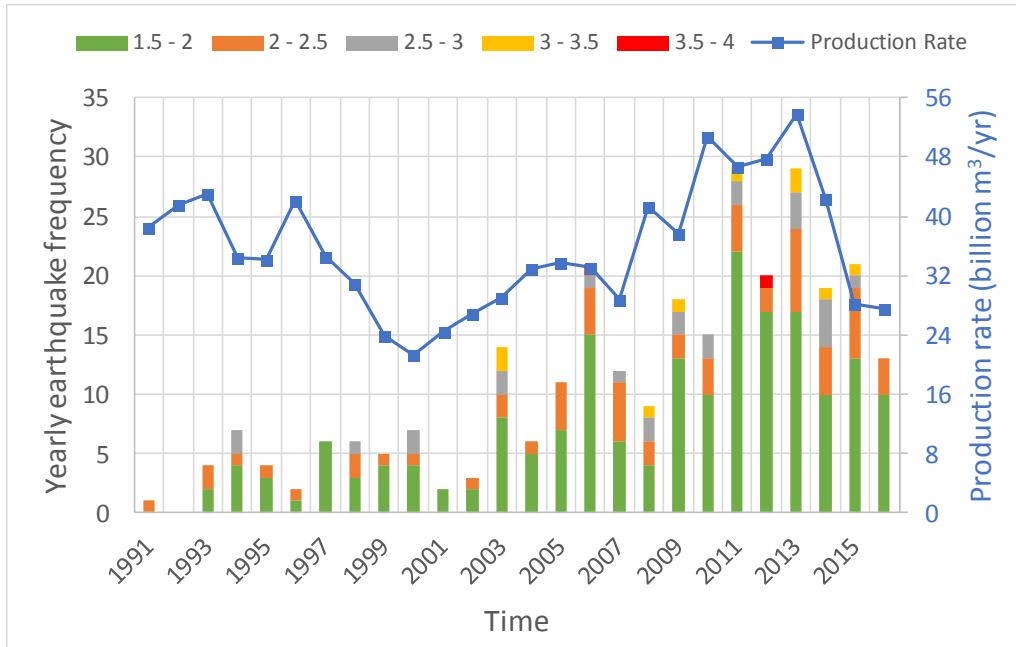


Figure 1 – Raw data set

The picture that emerges from Fig. 1 is rather confusing: production rates, earthquake frequencies and earthquake strengths seem to jump up and down without any clear trends. Seen from a distance, however, it looks like earthquake frequency and strength are increasing over time and thus with increasing depletion of the field.

Earthquake frequency

Let us first focus on the temporal trend in earthquake frequency. To this end we have re-arranged the time-series shown Fig. 1 in two ways. First we have replaced *time* by *cumulative gas production* as independent variable. Second, we have converted *yearly earthquake frequency* to *cumulative number of earthquakes*. By doing so we have reduced short-term fluctuations in both earthquake frequency and gas production rate. In addition, cumulative gas production is an excellent proxy for the average subsurface pressure of a gas reservoir; the average pressure of a gas reservoir declines with increasing production in a very predictable manner. As earthquakes are caused by changes in subsurface stress distribution induced by reservoir-pressure changes, we may expect a direct correlation between cumulative number of earthquakes and cumulative gas production. This is indeed the case as illustrated in Fig. 2, which shows a scatter plot of cumulative number of earthquakes with magnitude greater than 1,5 against cumulative gas production. It also shows a quadratic best fit through the observed cumulative number of earthquakes given by

$$N_q = a(G_p - G_{pr})^2 + b(G_p - G_{pr}) \quad G_p \geq G_{pr} \quad (1)$$

where N_q is the cumulative number of earthquakes, G_p is the cumulative gas production in billion cubic meter, G_{pr} is a reference cumulative gas production, and a and b are the coefficients

of the quadratic equation. We have taken $G_{pr} = 1240,19$ billion cubic meter, the cumulative production at 01-01-1991, the very first day of the year of the first earthquake in Groningen. The coefficients a and b are equal to $3,2148E-04$ and $7,6150E-03$, respectively. The coefficient of determination (R^2) of the best fit is $0,9987$ (1 is perfect). The coefficients a and b are both positive, consistent with a monotonically increasing upward-bending curve. An upward-bending trend means that at a constant production rate the earthquake frequency keeps increasing.

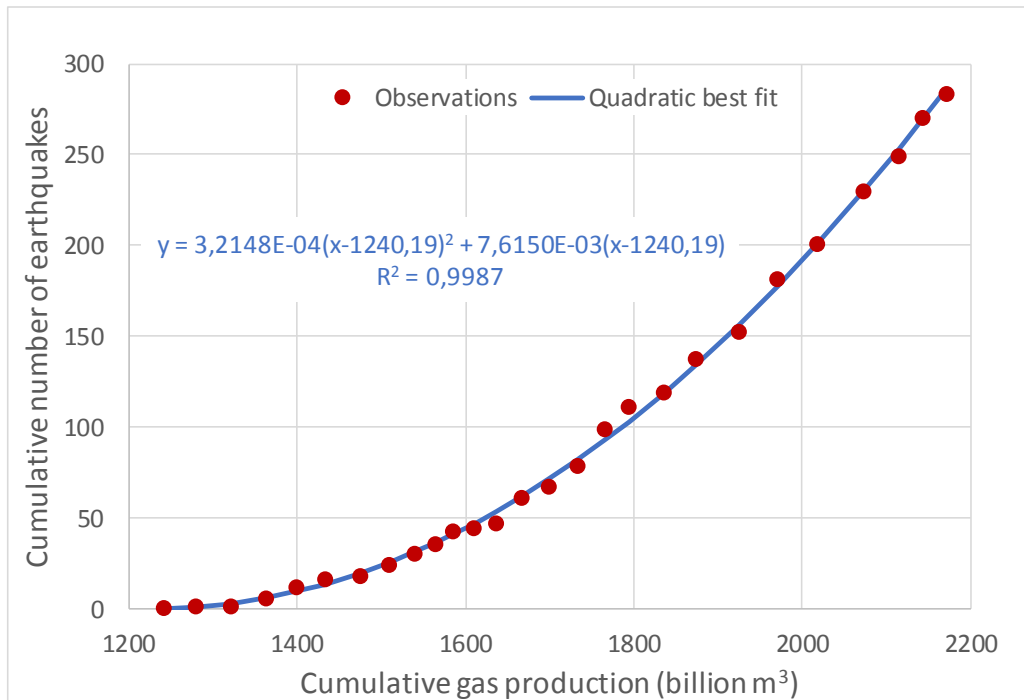


Figure 2 – Cumulative number of earthquakes versus cumulative gas production.

Having established a mathematical relationship between cumulative number of earthquakes and cumulative gas production, we can now predict earthquake frequency as a function of time for a given arbitrary production rate profile, i.e. production rate versus time. Suppose the production profile is available as a time table. First, we construct a time table for the cumulative production. Next, for each cumulative production entry in the table we calculate the cumulative number of earthquakes by means of Eqn 1. This yields a time table for the cumulative number of earthquakes from which we can directly determine the earthquake frequency. As the predicted earthquake frequencies are based on a best-fit equation for cumulative number of earthquakes as a function of cumulative gas production, the predicted frequencies should be considered *average* frequencies.

Fig. 3 shows a scatter plot of the actually observed yearly earthquake frequencies against the predicted yearly frequencies for the historical yearly production profile (see Fig. 1). Also shown is a solid straight line through the origin with a slope of unity. In the case of a perfect prediction all data points would fall on the straight line. Here the prediction is definitely not perfect but the data points do cluster around the straight line. The standard deviation of the predicted

earthquake frequency is equal to 4,3 earthquakes per year. The dashed lines parallel to the unit-slope line represent plus and minus two standard deviations. All 26 observed yearly frequencies except one (= 96 per cent) fall within two standard deviations of the predicted frequencies.

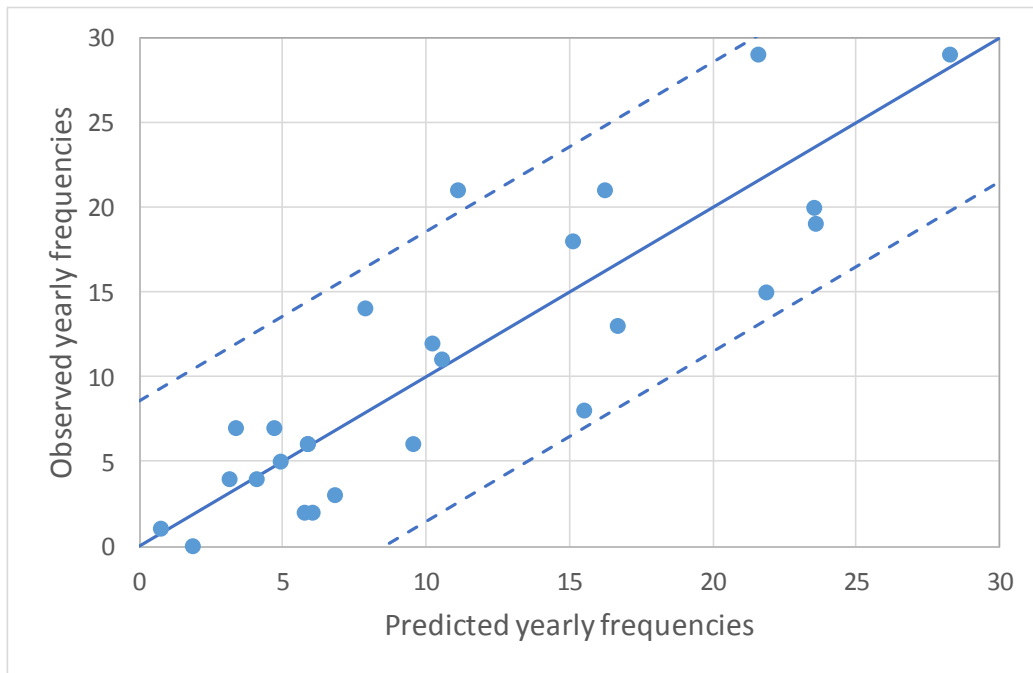


Figure 3 – Observed versus predicted yearly frequencies

Figure 4 shows the predicted and observed yearly frequency profiles in real time. The shaded zone around the predicted profile indicates the uncertainty of the predictions, which is taken at plus or minus two standard deviations. The variation in predicted frequency arises from the variation in yearly production rate. As we can see the observed frequencies may deviate substantially from the predicted ones. This deviation can be attributed largely to the inherent natural variability of the induced earthquakes. Because of the large natural variability, the observed frequency in a single year does not mean much on its own. In much the same way as the observed average temperature on a summer day is not representative of the average summer temperature. We further observe that in 2013 the upward trend in earthquake frequency has been effectively reversed. This is a direct consequence of the increasingly lower maximum-allowable production rates imposed by the Dutch government: from 53,87 billion cubic meter/year in 2013 down to 42,41, 28,10 and 27,95 billion cubic meter/year in 2014, 2015 and 2016, respectively. Lower production rates imply a lower decline rate of the subsurface reservoir pressure, resulting in a reduction in earthquake frequency.

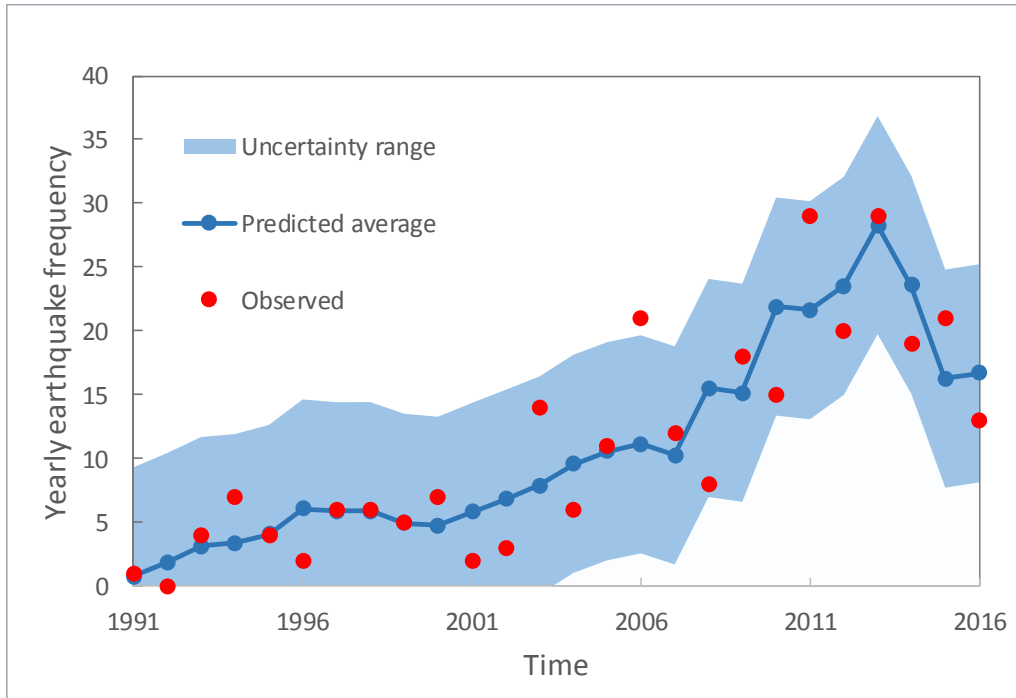


Figure 4 – Observed versus predicted yearly frequency in real time

Strength of Earthquakes

Let us now take a look at possible trends in the strength of the observed earthquakes. Traditionally, the strength distribution of earthquakes in earthquake areas is displayed in a Gutenberg-Richter plot (Ref. 3), which shows the logarithm of the cumulative number of earthquakes larger than a certain magnitude on the Richter scale as a function of the magnitude. In many earthquake areas the data points fall on a straight line with a negative slope close to unity. This means that the number of earthquakes becomes increasingly fewer by a constant factor 10 for each unit increase in magnitude. Thus, there are 10 times more earthquakes of magnitude 3 than 4, 100 times more earthquakes of magnitude 2 than 4, and 1000 times more earthquakes of magnitude 1 than 4. Although originally proposed for tectonic earthquakes, the Gutenberg-Richter equation also applies reasonably well to the induced earthquakes in the Groningen field (Ref. 4).

Figure 5 shows the Gutenberg-Richter plot for all of the induced earthquakes up to 01-01-2017, 284 in total. Here we have plotted the normalized cumulative frequency against magnitude for magnitudes larger than 1,5 up to 4 in magnitude intervals of 0,5. By definition, the normalized cumulative frequency for a magnitude of 1,5 is equal to unity. As we can see the cumulative frequencies indeed plot reasonably well on a straight line. We have fitted the data points by the exponential equation

$$F = ae^{-bM}, \quad (2)$$

where F and M denote cumulative frequency and magnitude, respectively, and a and b are constant coefficients. The best fit gives $a = 31,26$ and $b = 2,295$. The coefficient of determination of the best fit is $0,9846$. The coefficient b corresponds to a negative logarithmic slope of $0,997$ ($=2,295/\ln 10$), indeed close to unity. The last data point in Fig. 5 lies slightly below the best-fit straight line, which indicates that the Gutenberg-Richter plot might bend down at the higher magnitudes, which is not uncommon in these plots.

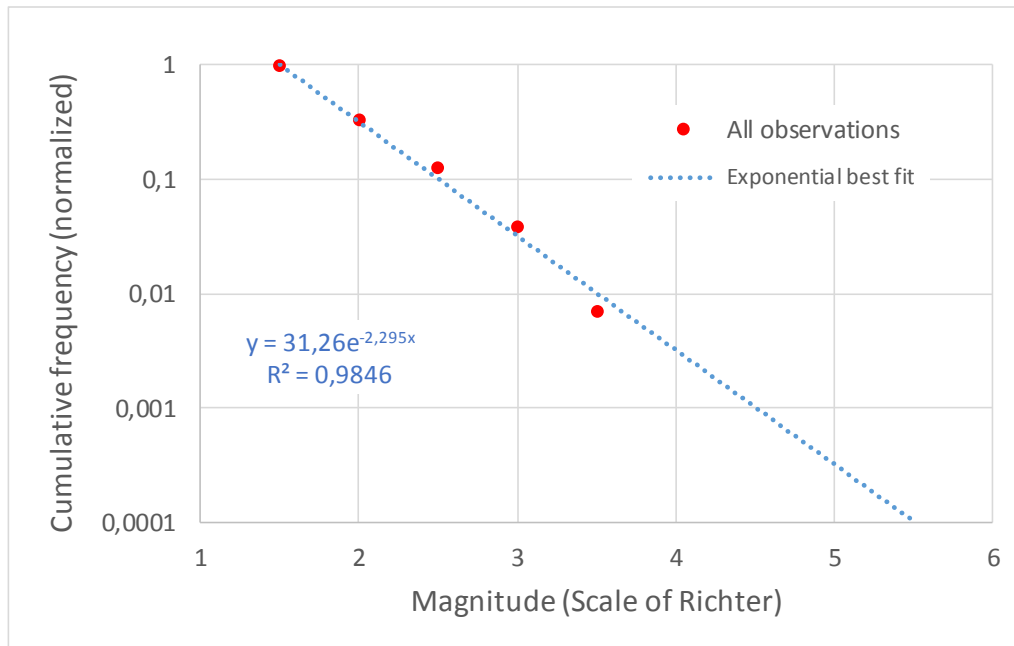


Figure 5 – Gutenberg-Richter plot for all Groningen earthquakes with magnitude > 1,5

To find out whether the strength distribution has changed over time we have divided the total dataset into two roughly equal subsets: the first half from 1991 to 2010 with 138 earthquakes and the second half from 2010 to 2017 with 146 earthquakes. Fig. 6 shows the Gutenberg-Richter plots for both subsets along with the exponential best-fit. For all practical purposes the two subsets show identical distributions. Hence the strength distribution may be considered time-invariant, confirming earlier results of Dost and Kraaijpoel (Ref. 4). In other words, there is no observational evidence that the earthquakes become stronger (or weaker) in time. It is true that up to 2013 the number of stronger earthquakes increased but this is merely due to the increase in yearly frequencies and not to a change in the strength distribution.

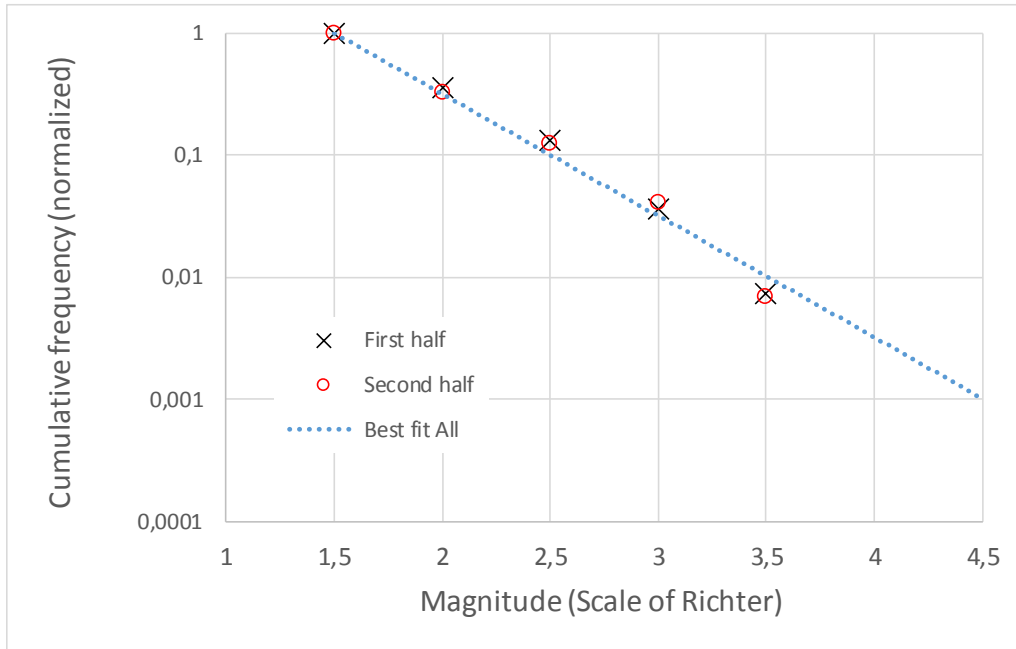


Figure 6 – Gutenberg-Richter plot for first-half and second-half subsets

Ultimate number of earthquakes

Assuming that the empirical relation Eqn (1) also holds in the future, we may estimate the ultimate number of earthquakes at abandonment of the field. At this point it is technically no longer possible to continue production because the subsurface pressure of the gas reservoir has become too low to sustain the flow of gas to the surface. The ultimate cumulative gas production at abandonment can be accurately estimated given the advanced depletion state of the field. The ultimate number of earthquakes then follows directly from Eqn (1). It is a fixed number, regardless of the applied gas production rates; it is only determined by the abandonment pressure of the field and thus by the ultimate cumulative gas production. Yearly production level does affect the number of yearly earthquakes, but it has no bearing on the ultimate number of earthquakes. A lower/higher production rate simply means that the total number of earthquakes is spread out over a longer/shorter time period.

The gas-initially-in-place (GIIP) of the Groningen field is estimated at 2880 billion cubic meter. Assuming a recovery factor of 95%, we then calculate a cumulative gas production at abandonment of $0,95 \times 2880 = 2736$ billion cubic meter. Insertion of this number into Eqn (1) yields a total of 730 earthquakes. This is the total number of earthquakes during the entire lifecycle of the Groningen gas field.

Now that we have a figure for the ultimate number of earthquakes, we can also estimate the maximum strength of an earthquake under Groningen conditions, provided the observed Gutenberg-Richter strength distribution as given by Eqn (2) also applies to future earthquakes. Let us assume that there is just one earthquake with the maximum magnitude. As there are 730 earthquakes in total, the normalized frequency of this maximum earthquake is $1/730 =$

0,000137. Extrapolation of the cumulative frequency distribution Eqn (2) down to a frequency of 0,000137 gives a maximum magnitude of 4,4. The extrapolation assumes that the fitted straight line in the Gutenberg-Richter plot (see Fig. 5) remains straight beyond the so far maximum observed magnitude of 3,6 and thus ignores the possible downward bend in the plot. Hence the maximum magnitude of 4,4 should be considered a pessimistic estimate. In passing we note that the 4,4 estimate compares favorably with the most likely value of the range of maximum magnitudes that arose from an expert workshop aimed at estimating the maximum magnitude of induced earthquakes in Groningen (Ref. 5).

As of 01-01-2017 we have already seen 284 of the total of 730 earthquakes, a little over 40 per cent of the total. That means that for the remaining field life we may expect an additional 446 (730 -284) earthquakes, almost 60 per cent of the total. Figure 7 displays the magnitude distribution of the remaining 446 earthquakes, which follows straightforwardly from the empirical Gutenberg-Richter Eqn (2).

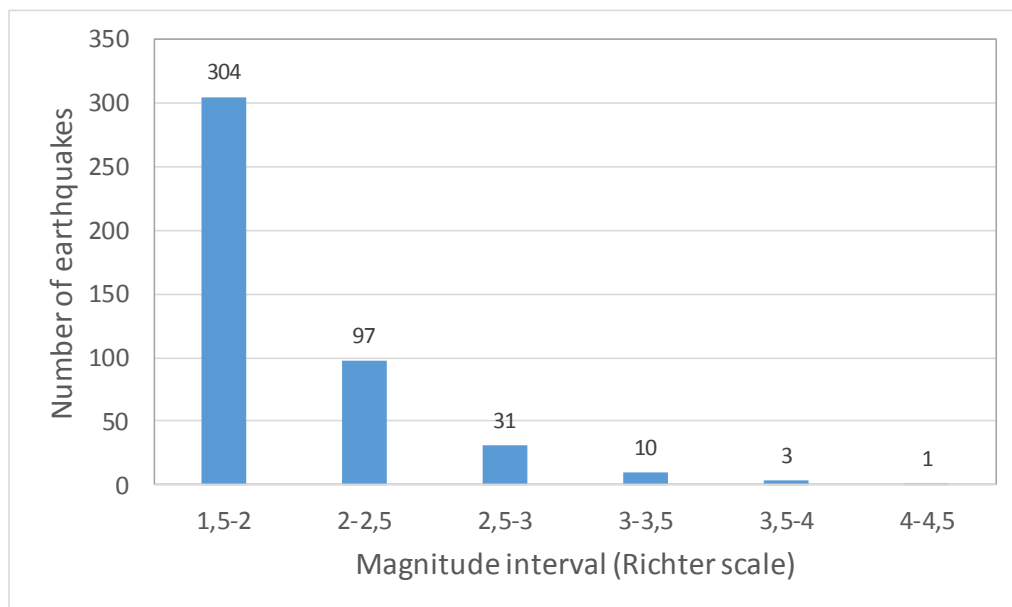


Figure 7 – Magnitude distribution of remaining earthquakes

Production scenarios

The main application of the empirical correlations is in forecasting the yearly earthquake frequency and associated strength distribution for a given future production scenario, i.e. annual production rate as a function of time. A common future production scenario consists of production at a constant plateau rate followed by a period of declining production rates, called tail period. During the plateau period the subsurface reservoir pressure is sufficiently high to enable production at the plateau rate. At a certain point, however, the reservoir pressure becomes too low for the plateau rate to be sustained. This point marks the end of the plateau period and the onset of the tail production period. During the tail period the field is producing

at maximum capacity but the capacity is steadily declining. The lower the plateau production rate, the lower is the pressure decline and thus the longer the plateau period takes.

As an example, we have elaborated the yearly earthquake frequency profiles for three different production scenarios with plateau production rates of 21, 27 and 33 billion cubic meter/year. They describe the continued production by pressure depletion from 2017 up to 2034 as discussed in the recent Winningsplan of NAM (Ref. 6). We have taken the yearly production rates of these production scenarios directly from the Winningsplan. NAM determined the length of the plateau period and the declining rates during the tail period by mathematical reservoir simulation. The plateau ends at 2028, 2023 and 2020 for the production scenarios of 21, 27 and 33 billion cubic meter/year, respectively.

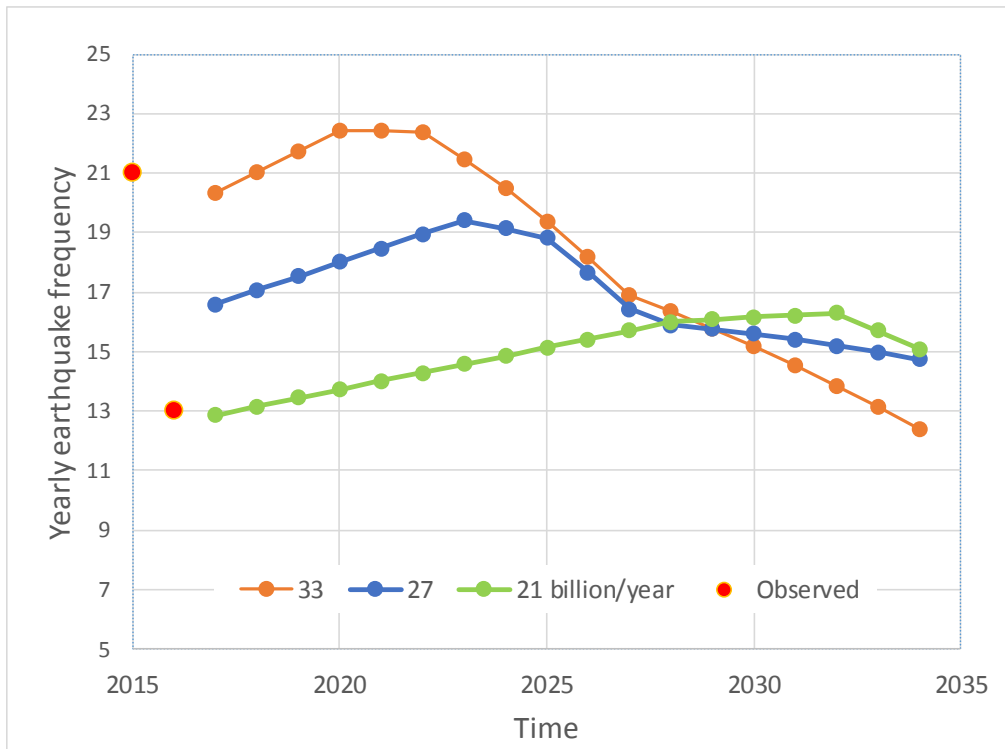


Figure 8 – Forecast of yearly earthquake frequency for 33, 27 and 21 billion cubic meter/year

Figure 8 shows the average earthquake frequency as a function of time for the three production scenarios. As a reference we have also included the observed frequencies in 2015 and 2016 with the associated yearly production rates of 28,10 and 27,95 billion cubic meter, respectively. Initially, the field can be produced at the constant plateau rate in all three cases. Production rate level has a marked effect on earthquake frequency in the plateau period. A larger plateau production rate gives rise to a stronger pressure-decline rate and this leads to a higher earthquake frequency. In addition, the frequency during the plateau period increases linearly with time and with a slope proportional to the plateau production rate. This increase is a direct consequence of the quadratic term in Eqn (1). The earthquake frequency begins to drop the moment the field enters the tail production phase. By and large, the magnitude of and the

trends in earthquake frequencies shown in Fig. 8 are in fair agreement with the results of the NAM predictions (Ref.6). NAM's predictions are based on a seismic model with reservoir compaction as the driver for the induced earthquakes.

As for the strength of the future earthquakes, we may assume that the strength distribution, taken over a sufficiently long period, is time invariant as we have observed in the past. The distribution of the earthquakes in any one year, however, may deviate substantially from the long-term distribution. The yearly distribution can be pictured as resulting from the random sampling from a vase filled with earthquakes with a known strength distribution. In the beginning of the forecast period the vase contains 446 earthquakes, of which 1 with a magnitude between 4 and 4,5, 3 between 3,5 and 4, 10 between 3 and 3,5, 31 between 2,5 and 3, 97 between 2 and 2,5 and 304 between 1,5 and 2. Each year we randomly draw a number of earthquakes from the vase depending on the production rate in that year. As the yearly number is very small compared with the total number of earthquakes, at least initially, the sampling is strongly biased leading to significant year-to-year variations in strength distribution.

The strongest earthquake with a magnitude of 4,4 can happen, in theory, at any time during the remaining production period. The probability that this happens in a given year is equal to the frequency of the 4,4 earthquake ($=0,000137$) times the yearly earthquake frequency in that year and thus depends on the yearly production rate. This yearly frequency in 2017 for a production rate of 33, 27 and 21 billion cubic meter/year is 20, 17 and 13, respectively. Hence the probability of a 4,4 earthquake happening in 2017 at a production rate of 33, 27 and 21 billion cubic meter/year is 4,5, 3,8 and 2,9 per cent/year, respectively.

Conclusions

1. The observed cumulative number of earthquakes with a magnitude greater than 1,5 correlates very well with cumulative gas production and can be very well described mathematically by a quadratic equation.
2. The quadratic equation can be used to predict the average yearly earthquake frequency for a given production rate profile. Observed yearly frequencies deviate substantially from the predicted frequencies, indicating a sizeable inherent natural variability.
3. The strength distribution of the earthquakes is fairly well described by the Gutenberg-Richter equation for cumulative frequency as a function of magnitude. For all practical purposes this distribution is time-invariant.
4. The observed increase in stronger earthquakes in the course of time can be attributed to an increase in yearly earthquake frequency.
5. The ultimate number of earthquakes with a magnitude greater than 1,5 over the entire life cycle of the field is of the order of 700. This number is not affected by yearly production rate: a lower/higher production rate simply means that the total number of earthquakes is spread out over a longer/shorter time period.
6. Up to 01-01-2017 roughly 300 earthquakes with a magnitude greater than 1,5 have been recorded, leaving 400 earthquakes for the remaining production period.

7. The magnitude of the strongest future earthquake is estimated at 4,4 on the Richter scale.
8. Example forecasts are presented that highlight how yearly production rate affects the development of seismicity in Groningen.

References

1. Website KNMI (www.knmi.nl), seismologie, Aardbevingen in Nederland/all induced.pdf
2. Website NAM (www.nam.nl), Feiten en cijfers/Aardbevingen (Gr.) & Feiten en cijfers/Gas- en oliewinning/Groningen-gasveld
3. Gutenberg, B. and Richter, C.F. (1941), Seismicity of the Earth, Geological Society of America Special Paper 34, 1-131
4. Dost, B. and Kraaijpoel, D. (2013), The August 16, 2012 earthquake near Huizinge (Groningen), KNMI, De Bilt
5. Report on Mmax Expert Workshop (2016), Website NAM (www.nam.nl), Feiten en cijfers/Onderzoeksrapporten 2016
6. NAM, Winningsplan (2016), Website NAM (www.nam.nl), Feiten en cijfers/Winningsplan 2016

Acknowledgement

The author has benefitted greatly from the critical comments and constructive suggestions of known and unknown peer reviewers. Many thanks.

Appendix – Backstory on Manuscript NJG-OA-2017-0009: “Empirical Model for Induced Earthquakes in the Groningen Gas Field”

Timeline

16-09-2016	Announcement of a special Groningen issue of Netherlands Journal of Geosciences (NJG) and invitation by Guest Editors (Dr Lucia van Geuns and Dr Karin van Thienen-Visser) to contribute a paper on the statistics of induced seismicity in Groningen
17-09-2016	Invitation accepted
21-02-2017	Manuscript submitted to NJG (registered under NJG-OA-2017-0009)
09-03-2017	Manuscript declined based on two negative anonymous peer reviews (see below)
21-03-2017	Rebuttal of peer review submitted to Guest Editors including request to reconsider decline decision (see below)
01-04-2017	Rebuttal rejected (see below)
24-04-2017	Revised paper placed in public domain

Decline Decision

09-Mar-2017

Dear Dr. Hagoort

I write you in regards to manuscript # NJG-OA-2017-0009 entitled "Empirical model for induced earthquakes in Groningen gas field" which you submitted to the Netherlands Journal of Geosciences.

In view of the criticisms of the reviewer(s) found at the bottom of this letter, your manuscript has been rejected as it is not suitable for publication in the Netherlands Journal of Geosciences.

Thank you for considering the Netherlands Journal of Geosciences for the publication of your research. I hope the outcome of this specific submission will not discourage you from the submission of future manuscripts.

Sincerely,

Dr. Karin van Thienen-Visser

Associate Editor, Netherlands Journal of Geosciences

Reviewer 1

The author calls his paper: "Empirical model for induced earthquakes in Groningen gas field". He establishes a quadratic relation between cumulative production and cumulative seismic events of $M > 1.5$. On the basis of this relation he predicts the total number of events with $M > 1.5$ to be

expected until end production. Furthermore, he treats the problem of time (in)variance of the Gutenberg-Richter law at the Groningen field.

The model amounts to no more than a strong numerical connection and does not contain an ounce of physics. In fact, using CUMULATIVE seismic events masks what must / might have happened in the Groningen field around 2003, just before the situation became explosive. After the production was cut back in January 2014 the number of events dropped, as shown in a careful analysis elsewhere (Nepveu et al. 2016, Pijpers, CBS 2013-16). It is not unlikely that the quadratic curve will flatten on account of the production cut back.

Whether the number of quakes will keep following the production swings remains to be seen, and also whether there is a possible bonus effect on lowering production. The author, however, takes a so-called film effect for granted. It all depends on the question whether production HISTORY (cumulative subsidence) counts or not (see for instance Pruiksmā et al., 2015). That depends on the physics. But there is no physics to be found in the paper.

The question whether The Gutenberg-Richter law changed is a valid one in principle, but the chosen technique to investigate it seems somewhat arbitrary. It could be treated with stochastic methods. No easy matter.

In conclusion:

- 1) the aspects in the paper that the author wants to put forward are treated far too casually.
- 2) There is no physics to be found and no statistically acceptable treatment of the stochastic aspects of the events.

Reviewer 2

I cannot recommend this paper for publication.

There are a number of fundamental problems with the approach that the author takes to the issue of induced earthquakes in the Groningen gas field. The issue of the relationship between earthquakes and gas production in itself is of great societal importance and deserves good statistical scrutiny worthy of a high-quality scientific publication.

Where this paper falls short is:

1. The author chooses not to include any references, not even to the (online available) NAM winningsplan, referred to in the text on page 7 line 17. The author does not appear to even be aware of the research by eg. TNO and CBS underpinning the advice of the regulator (State Supervision of Mines), which is directly relevant to precisely the problem addressed by him. This alone is sufficient reason to reject the paper.
2. While it is attractive to plot cumulative earthquake numbers against cumulative production numbers, the high R² measure of the fit is deceptive. Firstly because the cumulative quantities hide a lot of real variation, secondly because the improvement in R² compared to eg. a linear fit for the range since 2003 is insufficient to justify the additional parameter of a quadratic fit. The date of 2003 is of particular interest given eg. the change point analysis result reported by van Thienen-Visser et al. (2015). This is an insufficiently self-critical analysis.

3. The scatter plot of fig 3 shows the yearly frequencies of earthquakes (observed vs. predicted) which is an unfortunate choice, because this particular binning in time completely suppresses any intrayear variation that would be the result of the annual variation in production. This choice therefore suppresses what would otherwise be the most sensitive measure of any deviations of the data with respect to the authors' hypothesis. The author should be attempting to disprove his own hypothesis, rather than gear his analysis to remove effects of deviations from his putative relationship.

4. An analysis of the Gutenberg Richter relationship along the lines carried out by the author has been done elsewhere, eg. by researchers of KNMI, in greater detail, and therefore does not add to the extant literature.

5. The analysis leading to a maximum magnitude estimate of 4.4 is not above the level of a back-of-the-envelope order of magnitude guess. A considerable amount of research has been carried out to provide estimates, which make better use of the stochastic nature of earthquakes and the possible tails or cut-offs that are allowed within the margins of uncertainty with which the Gutenberg-Richter distribution is established. The author would do well to familiarize himself with this body of research.

6. The guesstimate forecast of the 'remaining' number of earthquakes relies heavily on the putative relationship between cumulative production and cumulative numbers of earthquakes. Point 4 of the conclusions specifically points to what sometimes is referred to as the 'frame-rate effect'. However, there is some evidence that there is more than this that plays a role in determining the rate of earthquakes, and that particularly the quadratic relationship proposed by the author is unlikely to be appropriate. The author is advised to study eg. the research by TNO and CBS underpinning the advice of the regulator (State Supervision of Mines).

7. The author takes very little account of the stochastic nature of earthquakes, Poissonian or otherwise, nor indeed of the possible occurrence of aftershocks for which the distribution function in time and space would be different than for earthquakes directly triggered by the effects of gas production on the reservoir material and on many the faults sectioning that reservoir. Any of the author's 'certainties' in terms of forecasts are invalidated by this omission.

reference

van Thienen-Visser, K., P. Fokker, M. Nepveu, D. Sijacic, J. Hettelaar, and B. van Kempen (2015). Recent developments on the seismicity of the Groningen field in 2015. Technical report, TNO.

Rebuttal Peer Review

Geachte Gast Editors van de 'Groningen' issue van NJG, Beste Lucia en Karin,

De afwijzing van mijn manuscript voor publicatie in de NJG heeft mij ten zeerste verbaasd. In september 2016 nodigde u mij uit om een bijdrage te leveren aan een speciale uitgave van NJG over een onderwerp waar ik mij in het verleden intensief mee heb bezig gehouden. Over dat onderwerp heb ik in maart 2015 een rapport uitgebracht dat een ruime publiciteit heeft gekregen. Door vriend en vijand is de studie indertijd positief ontvangen. Verbazing alom dat je

met een betrekkelijk eenvoudige analyse van de historische gegevens tot tamelijk vergaande conclusies kan komen over een zeer gecompliceerd aardwetenschappelijk probleem.

Ik heb de uitnodiging graag geaccepteerd, vooral vanwege de gelegenheid de oorspronkelijke studie aan te vullen met de laatste gegevens uit het veld. Maar ook om de op- en aanmerkingen te verwerken van lezers van de oorspronkelijke studie en van toehoorders van lezingen die ik over het onderwerp heb gehouden. De laatste veldgegevens lijken de eerdere conclusies te bevestigen. Mijn voorspellingen van de ontwikkeling van de seismiciteit voor de door het SodM gespecificeerde productiescenario's (33, 27 en 21 miljard kubieke meter per jaar) liggen dicht bij die van de NAM.

Maar helaas, de door u aangestelde twee anonieme peer reviewers leveren een review af waar, met alle respect, de honden geen brood van lusten. Zowel toonzetting als inhoud zijn een wetenschappelijk tijdschrift onwaardig. Vooral reviewer 2 laat zich gelden wat dat betreft. Het heeft er alle schijn van dat de reviewers een hun onwelgevallige publicatie met alle middelen willen tegenhouden. Zij tonen zich vooringenomen, neerbuigend, en doen geen enkele moeite hun kennelijke weerzin te verpakken in een wat meer afstandelijke, zakelijke tekst. De reviewers adviseren een totale afwijzing van het manuscript, een advies dat door u integraal wordt overgenomen. Ik vraag me in gemoede af wat hen heeft beziel. Welke snaar heb ik geraakt?

Hieronder treft u puntsgewijs mijn weerlegging van de kritiek van de reviewers. Op de keper beschouwd komt hun kritiek er op neer dat ik in het manuscript ten onrechte niet heb verwezen naar studies waar beide reviewers wellicht zelf bij zijn betrokken. Alle andere punten van kritiek zijn niet ter zake doend en/of eenvoudig te weerleggen. Het is mij dan ook een groot raadsel waarom u het advies van deze reviewers zonder meer hebt gevolgd. De arrogante toonzetting alleen al had bij u bellen moeten laten rinkelen.

Gezien de vergaande kritiek van de reviewers had het meer voor de hand gelegen als u de reviewers de ruimte had geboden voor een geschreven kritiek in de NJG die dan gelijktijdig met mijn artikel gepubliceerd zou kunnen worden. En mijn repliek daarop natuurlijk, ik zou daar met veel plezier aan willen meewerken. Het voordeel van deze procedure is dat een groter publiek kennis kan nemen van de bezwaren en de tegenwerpingen, en vervolgens een eigen oordeel kan vormen. Maar ook dat de reviewers dan gedwongen zijn hun kritiek wetenschappelijk te onderbouwen.

De vraag dringt zich intussen op waarom u mij überhaupt hebt uitgenodigd een artikel te schrijven over de aardbevingen in Groningen? U hebt dat gedaan, neem ik aan, in de volle wetenschap van wat mijn bijdrage zou inhouden. Kennelijk vond u de inhoud in september 2016 de moeite waard, maar in maart 2017 niet meer. Wat is er in die tussentijd gebeurd?

Gelet op bovenstaande overwegingen verzoek ik u vriendelijk uw beslissing tot afwijzing van mijn manuscript te herzien. Met een afwijzing kan ik vrede hebben, maar die moet dan wel gestoeld zijn op soliede wetenschappelijke gronden en niet op ongrijpbare sentimenten.

Met vriendelijke groet,

Jacques Hagoort

Reviewer 1

1. An ounce of physics

De bewering dat er geen ‘ounce of physics’ in het model zit is onjuist. De keuze van cumulatieve gasproductie als onafhankelijke variabele (i.p.v. de tijd) heeft alles te maken met de natuurkunde van de gaswinning en de natuurkunde van ge-induceerde bevingen (voor zover we daar al iets over kunnen zeggen). Dat wordt ook duidelijk gemaakt in het artikel maar is de reviewer kennelijk ontgaan. Ik wijs de reviewer op de scope van het artikel zoals aangegeven in de inleiding: wat kunnen we leren van de aardbevingshistorie in Groningen? Het is een beperkte scope en geen allesomvattende poging om die natuurkundig te verklaren.

2. Cumulative events

De reviewer heeft bezwaar tegen het gebruik van cumulative seismic events. Daarmee zou het begin van alle ellende, de ‘explosive growth’ startend in 2003, worden gemaskeerd. Of er sprake is van een ‘explosive growth’ is zeer de vraag. Ik ben op de hoogte van de statistische hypothese dat er in 2003 een omslagpunt is geweest. Maar dat is niet meer dan een hypothese waarvoor tot op de dag van vandaag een bevredigende fysische onderbouwing ontbreekt (‘an ounce of physics’). Ik zie in de historische gegevens geen ‘explosive growth’, wel een toenemende seismiciteit bij hogere productiesnelheden en een gestaag oplopende seismiciteit bij constante productiesnelheid.

De reden om met cumulatieve events te werken is, zoals ook uitgelegd in het artikel, dat je daarmee korte termijn fluctuaties (in dit geval van jaar tot jaar) onderdrukt. Geen gek idee als je naar een lange-termijn correlatie op zoek bent, lijkt me.

3. Production cutbacks

De reviewer beweert dat de verlaging van de productie de kwadratische kromme zal afvlakken. Dat is wellicht mogelijk, over 5 jaar zullen we het weten. Tot die tijd moeten we het doen met de historische verbanden. En die laten zien dat het aantal events inderdaad is afgenomen sinds de productieverlaging in 2015. Precies zoals het empirische model (‘in a careful analysis’) voorspelt.

4. Gutenberg-Richter

De reviewer acht de behandeling van de Gutenberg-Richter Law willekeurig. Wat hij daarmee precies bedoelt is mij niet duidelijk. Ik waag mij niet aan sophisticated stochastische methoden om de verdeling te duiden. Is hij het niet eens met de conclusie dat de distributie time-invariant is? Natuurlijk kun je nog van alles verzinnen over hoe Gutenberg-Richter er uit ziet bij de lage frequenties. Maar dat is koffiedik kijken. Zie ook mijn repliek op punt 4 en 5 van reviewer 2.

5. Far too casual treatment

Ik weet niet wat de reviewer hiermee precies bedoelt. Als hij bedoelt dat het een simpele benadering is voor een complex probleem, dan heeft hij helemaal gelijk. Maar het is wel gebaseerd op historische gegevens en dus geen onzin. Dat er meer is dan dit eenvoudige verhaal is ook waar. Ik ben ook zeer benieuwd naar de allesomvattende fysische theorie die alles zal verklaren. Helaas zal dat nog wel even duren. Tot die tijd kan een empirisch model zoals in het artikel beschreven een nuttige bijdrage leveren aan het denken over de toekomstige seismiciteit in Groningen. In het bijzonder over het effect van productiesnelheid op seismiciteit.

6. No physics to be found

Strict genomen onjuist, zie 1. hierboven. Maar het is bovenal een stropop argument. De scope van het artikel is een statistische analyse van de historische gegevens. De auteur vervolgens verwijten dat er geen (uitgebreide) natuurkunde aan te pas komt is onzinnig.

Reviewer 2

1. References

De bewering dat het artikel geen referenties bevat is onjuist. Er wordt expliciet gerefereerd naar de websites van KNMI en NAM en naar het Winningsplan 2016. Misschien zit de pijn bij de reviewer er vooral in dat er geen referenties zijn opgenomen naar het werk van TNO en CBS. Ik ben op de hoogte van de studies van TNO en CBS. Voor het opnemen van referenties hanteer ik een simpele stelregel. Als het een rol heeft gespeeld in de ontwikkeling van het verhaal dan vermeld ik het. Dus een referentie naar de 'raw' data en naar het Winningsplan. Al het andere is overbodig en bladvulling; ik schrijf geen review artikel, noch bouw ik voort op de TNO en CBS studies.

Overigens is het verwijt tamelijk hypocriet, in de TNO en CBS studies ben ik ook geen verwijzing tegengekomen naar mijn studie waarop dit artikel is gebaseerd en dat sinds maart 2015 beschikbaar is. Dat hoeft ook niet wat mij betreft, maar het is wel opvallend gezien het belang dat de reviewer hecht aan uitgebreide referenties.

2. Deceptive fit

Het is zoals het is. Als je de cumulatieven tegen elkaar uitzet, dan komt er uit wat er uit komt. En ja, dat leidt tot een verbazingwekkend resultaat (een R^2 van 0,9998). Had ik in de verste verten niet verwacht. Maar om dat vervolgens 'deceptive' te noemen getuigt van een kwaadaardige vooringenomenheid. Zoals uitgelegd in het artikel zijn de cumulatieven juist gekozen om de korte-termijn variaties te onderdrukken. En later geef ik ruim baan aan de jaar tot jaar variaties. Dan blijkt dat de natuurlijke variatie in de jaarlijkse events rond de 8 bedraagt. Is dat dan ook 'deceptive'?

3. Unfortunate choice

Uitgaan van jaarlijkse aantallen is inderdaad een keuze. Ik had ook uit kunnen gaan van halfjaarlijkse, tweejaarlijkse of driejaarlijkse om maar iets te noemen. Ik ben van jaarlijkse aantallen uitgegaan omdat dat nu eenmaal gebruik is in de (beleids)discussies over de Groningse bevingen, althans tot januari 2015. Daarbij komt dat het resultaat op puur natuurkundige gronden zeer verdedigbaar is. Het aantal aardbevingen wordt bepaald door

de drukdaling van het veld. En bijgevolg de frequentie door de drukdaalsnelheid zoals bepaald door de productiesnelheid. In mijn ogen een volstrekt logisch resultaat. Het zou best kunnen dat als je fijnmaziger gaat kijken er meer detail uit komt. Maar de gepresenteerde (grofmazige) trends zullen blijven bestaan. De seismiciteit in de afgelopen twee jaar met een gereduceerde productiesnelheid lijken zich dan ook helemaal te gedragen volgens de voorspelling van het empirisch model.

4. Extant literature

De bewering dat ik niets toevoeg aan de bestaande literatuur is onjuist. Ik voeg twee dingen toe. Allereerst laat ik op een simpele manier zien dat de magnitude verdeling praktisch gesproken tijdsinvariant is. Ik heb dat op deze manier niet eerder gezien. Ten tweede, geef ik een schatting van de zwaarste beving die je kunt verwachten op basis van het totaal aantal events in Groningen. Dat laatste volgt uit de kwadratische regressievergelijking. Ook dat ben ik nergens tegen gekomen.

Ik ben uiteraard op de hoogte van het werk voor mij. Ik heb geen enkel bezwaar om eerder werk te vermelden voor zover dat relevant is in mijn artikel. De reden dat ik dat niet heb gedaan is dat ik op geen enkele manier gebruik maak van dat eerdere werk.

5. Back-of-the-envelope order of magnitude guess

De reviewer karakteriseert mijn schatting van de maximale magnitude neerbuigend als een 'back-of-the-envelope-order-of-magnitude guess'. Zo mag hij dat wat mij betreft noemen ook al heeft zo'n kwalificatie weinig wetenschappelijke zin. Waar het mij om te doen is dat je op grond van de cumulatieve kwadratische vergelijking het totaal aantal bevingen kunt schatten. En als je dat weet kun je met een extrapolatie van de Gutenberg-Richter vergelijking komen tot een maximale magnitude van 4,4. Natuurlijk is dat niet het eind van de discussie. Het is alleen de consequentie van de empirische kwadratische vergelijking en de empirische Gutenberg-Richter vergelijking. En dat is alles wat ik wilde laten zien.

Overigens, mijn 'back-of-the-envelope-order-of-magnitude guess' is geheel in lijn met de resultaten van de door NAM georganiseerde Mmax Expert Workshop van maart 2016.

6. Putative relationship

De reviewer twijfelt aan de empirische vergelijking op basis van 'some evidence' dat er meer aan de hand is. Ik vermoed waar de reviewer op doelt maar ik ben niet onder de indruk, voorlopig is het in mijn ogen niet meer dan speculatie. Er zal nog veel gas uit de Groningse putten moeten stromen om van 'some evidence' te komen tot 'undisputable evidence'. Waar het mij omgaat is dat de historie een eenvoudige empirische vergelijking oplevert. En dat je daarmee de toekomstige seismiciteit op veldschaal in kaart kan brengen. Misschien te simpel naar de smaak van de reviewer maar wel gebaseerd op harde empirische gegevens. En ook in overeenstemming met de natuurkunde van de gaswinning. Er is ongetwijfeld meer aan de hand, ik ben de eerste om dat toe te geven. Intussen lijkt het mij niet onverstandig in het beleid meer uit te gaan van werkelijk waargenomen harde data en minder van speculatieve hypothesen. Tot slot wijs ik er op dat mijn voorspellingen op grond van de 'putative relationship' redelijk overeenkomen met die van NAM uit het laatste

Winningsplan gebaseerd op het NAM compactiemodel. En dat het SodM in zijn advies aan de regering expliciet van deze laatste voorspellingen gebruik maakt.

7. Stochastic nature of earthquakes

De reviewer constateert dat ik geen aandacht besteed aan de 'stochastic nature of earthquakes and of the possible occurrence of aftershocks'. Dat is een ridicuul verwijt. De scope van mijn artikel is beperkt tot een analyse van de historische gegevens van de seismiciteit in Groningen. En de doelstelling is om te onderzoeken of daar verbanden in zijn te vinden. Het is puur een empirisch verhaal, niet meer en niet minder. Je kunt er van alles en nog wat bijhalen maar dat is wat mij betreft 'beyond the scope' van mijn artikel. Hoe ingewikkeld kun je of wil je het maken? (Keep It Simple, Stupid) Dat neemt niet weg dat ik zeer geïnteresseerd ben in een verhandeling van de 'stochastic nature of earthquakes and of the possible occurrence of aftershocks' en hoe je op die manier de toekomstige seismiciteit in Groningen kunt voorspellen. Tot die tijd lijkt het mij verstandig om gebruik te maken van een eenvoudig empirisch model zoals in mijn artikel beschreven.

Rejection rebuttal

01-04-2017

Beste dr. ir. Hagoort,

Dank voor uw uitgebreide mail m.b.t. de afwijzing van uw manuscript voor de Special Issue van de Netherlands Journal of Geosciences (NJG) over het Groningen gas veld.

Zoals u weet zijn Karin van Thienen-Visser en ik de gasteditors voor deze NJG special, die eind dit jaar wordt gepubliceerd. Het Netherlands Journal of Geosciences is een wetenschappelijk tijdschrift. Wij hebben daarom wetenschappers benaderd voor deze special die in het verleden zich hebben uitgelaten (in wetenschappelijke tijdschriften, populaire bladen en/of media) over de aardbevingsproblematiek in Groningen. We hoopten dat u, uw eerdere publicaties en uitingen kon omzetten in een wetenschappelijke artikel ook gezien uw achtergrond van de TU Delft.

Na ontvangst van uw artikel eind februari hebben we overwogen het niet naar reviewers te sturen gezien het feit dat een essentieel onderdeel mist: de referenties om dit artikel in een kader te plaatsen. Het is in een wetenschappelijke tijdschrift niet gewoon dat je alleen refereert naar bronnen die je hebt meegenomen ten tijde van de studie. Het is normaal om het werk in een wetenschappelijk kader te plaatsen en zo volledig mogelijk te zijn in de verwijzingen naar bestaande literatuur op het moment van schrijven van het artikel.

Wij (als editors) hebben dit artikel een kans willen geven en doorgestuurd naar twee reviewers. De reviewers zijn experts op hun vakgebied en zijn gekozen als reviewer omdat hun onderwerp raakt aan dat in het artikel. Deze twee reviewers hebben het artikel beoordeeld op wetenschappelijke inhoud en de mate waarin het artikel past bij het wetenschappelijke tijdschrift NJG.

Als regel geldt dat als deze reviewers beide een 'reject' geven voor het ingestuurde artikel dat het artikel niet geaccepteerd kan worden. Dit geldt voor elk ingeleverd artikel voor dit special issue. Bij twijfel (bijvoorbeeld 1 x reject en 1 x major revision) zal een derde reviewer worden benaderd om de twijfel weg te nemen.

Reviewers zijn inhoudelijk expert, geen experts op het gebied van communicatie. De toon van de review kan hierdoor tegenvallen. Dit is jammer, maar kan helaas niet verholpen worden door de editors.

Wij betreuren het dat het zo heeft gelopen, maar kunnen helaas niets meer doen.

Met vriendelijk groet,

Lucia van Geuns

Special editor NJG 'Groningen'