

Retouradres: Postbus 80015, 3508 TA Utrecht

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat  
Projectdirectie gastransitie Groningen  
T.a.v. ...  
Postbus 20401  
2500 EK DEN HAAG



**Onderwerp**  
Bias studie fase 2

Geachte ... ,

In het kader van het EZK Werkprogramma 2019 (project E - Groningen) ontvangt u deze notitie betreffende de NAM risicoberekening voor de gaswinning uit het Groningen veld. U vraagt om kwalitatief te beoordelen of deze risicoberekening leidt tot een seismisch risico in Groningen, waarbij conservatieve aannamen op conservatieve aannamen worden gestapeld (te somber) of andersom (te rooskleurig). In wetenschappelijke termen: zijn er indicaties voor bias (een systematische fout) in de NAM berekeningen? Tevens vraagt u om tijdens het onderzoek rekening te houden met verschil van inzicht tussen experts, met ongepubliceerde argumenten en met voortschrijdend inzicht.

Bijgaande notitie bevat de door u gevraagde beoordeling. Wij verwachten u hiermee van dienst te zijn geweest. Indien u nog vragen heeft kunt u zich wenden tot ... .

Hoogachtend,

Drs. J.A.J. Zegwaard  
Hoofd Adviesgroep Economische Zaken

Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 42 56

**Datum**

16 december 2019

**Onze referentie**

AGE 19-10.057

**Contactpersoon**

...

**E-mail**

...

**Doorkiesnummer**

...

**Projectnummer**

060.38906/01.08.06

**Bijlage(n)**

1

Op opdrachten aan TNO zijn de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, zoals gedeponeerd bij de Griffie van de Rechtbank Den Haag en de Kamer van Koophandel Den Haag van toepassing. Deze algemene voorwaarden kunt u tevens vinden op [www.tno.nl](http://www.tno.nl). Op verzoek zenden wij u deze toe.

Handelsregisternummer 27376655.

**Datum**  
16 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.057

**Blad**  
2/12

## Notitie

### 1. Inleiding

Deze notitie geeft een kwalitatieve beoordeling van de door NAM uitgevoerde risicoberekening voor de gaswinning uit het Groningen veld. Er is specifiek ingegaan op de vraag of deze risicoberekening leidt tot een seismisch risico in Groningen, waarbij conservatieve aannames worden gestapeld (te somber) of andersom (te rooskleurig). In wetenschappelijke termen: zijn er indicaties voor bias (een systematische fout) in de NAM berekeningen.

Als modellen en/of aannames als somber worden geclassificeerd, dan resulteert dit in meer en/of zwaardere bevingen dan wat door TNO-AGE realistisch wordt geacht. Als deze als rooskleurig wordt geclassificeerd dan resulteert dit in minder en/of lichtere bevingen dan realistisch wordt geacht.

#### **NAM risicoberekening**

Deze notitie beperkt zich tot twee onderdelen van de risicoberekening. Het eerste onderdeel betreft het seismologische model (SM), dat het ontstaan en de eigenschappen (tijdstip, locatie, magnitude) van bevingen in de ondergrond beschrijft ten gevolge van gasproductie uit het Groningen veld. En het tweede onderdeel betreft de mate, waarin opgebouwde spanning in het gesteente vrijkomt tijdens bevingen (*stress drop* model of SD). In de NAM risicoberekening is het *stress drop* model onderdeel van het grondversnellingsmodel (GMM), maar omdat het gerelateerd is aan de bevingsbron wordt in deze notitie de *stress drop* behandeld bij het seismologische model.

De overige delen van de NAM risicoberekening beschrijven de gasproductie en de invoerparameters voor het seismologisch model (inclusief het reservoirmodel en het breukmodel), het GMM en het bezwijkgedrag per gebouwtype als gevolg van de blootstelling aan de trillingen in relatie tot de gestelde norm. Deze delen van de risicoberekening zijn in dit advies buiten beschouwing gelaten. Over het GMM is in juli 2018 advies uitgebracht aan uw ministerie (AGE 18-10.057).

#### **Seismologisch model (SM)**

Het SM is een probabilistische model en bestaat uit een aantal fysische relaties in tijd en ruimte. Het model bevat een aantal vereenvoudigingen om de rekentijd te versnellen. De NAM onderbouwt de relaties op grond van theoretische overwegingen, analyse van de Groningse bevingscatalogus en numerieke simulaties. De kern bestaat uit een frequentie-magnitude verdeling voor de Groningse bevingen, opgebouwd uit de volgende onderdelen:

- a. Verdeling van het aantal bevingen in ruimte en tijd (*activity rate*).
- b. *Epidemic Type Aftershock Sequence* Clusteringsmodel
- c. Beschrijving van de frequentie-magnitude verdeling:
  - Fit aan de observaties (b-waarde model).
  - Verdeling van de maximale magnitude<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> De maximale magnitude is de theoretisch zwaarst denkbare magnitude, welke zou kunnen optreden gegeven een specifiek bevingsscenario. Indien meerdere scenario's worden beschouwd, is sprake van een maximale magnitude verdeling.

**Datum**

16 december 2019

**Onze referentie**

AGE 19-10.057

**Blad**

3/12

d. *Rupture* model

Er zijn meerdere modelversies van het SM. V5 ligt ten grondslag aan het instemmingsbesluit over het winningsplan Groningen 2018.

**Stress drop model (SD)**

Het SD bevat een beslisboom, waarvan de takken verschillende relaties tussen magnitude en *stress drop* beschrijven.

**Aanpak**

De kwalitatieve beoordeling is als volgt aangepakt. TNO-AGE heeft de belangrijkste beschikbare bronnen bestudeerd en een voorlopige analyse uitgevoerd. Aansluitend zijn gesprekken met experts gevoerd om de verkregen inzichten te verifiëren en aan te vullen.

De belangrijkste geraadpleegde bronnen zijn:

- Van Elk, J. Bourne, S.J., Oates, S.J. (2017) Extreme threshold failures within a heterogeneous elastic thin sheet and the spatial-temporal development of induced seismicity within the Groningen gas field. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 10.1002/2017JB014356.
- Bourne, S.J., Oates, S.J., Van Elk, J. (2018) The exponential rise of induced seismicity with increasing stress levels in the Groningen gas field and its implications for controlling seismic risk. *Geophys. J. Int.* (2018) 213, 1693 – 1700.
- Dost, B., Edwards, B., Bommer, J.J. (2016) Local and moment magnitudes in the Groningen field. *NAM report*.
- NAM (2016) Report on Mmax Expert Workshop (8-10 March 2016). WTC, Schiphol Airport, The Netherlands

Er zijn gesprekken met experts van de volgende organisaties gevoerd:

- TNO, Professor J.D. van Wees, 20-11-2018
- EBN, M. Hetteema, 27-11-2018
- NAM, diverse experts, 30-11-2018
- TU Delft, Professor J.D. Jansen, 4-12-2018

Daarnaast zijn gesprekken gevoerd met de volgende internationale experts:

- Professor Dempsey (University of Auckland, New Zealand), 29-11-2018
- Professor Brodsky (University of California, Santa Cruz), 6-12-2018

De gespreksverslagen vindt u in Bijlage 1. Het SM en SD worden in de NAM risicoberekening afzonderlijk gemodelleerd. Daarom wordt eerst het SM behandeld en daarna het SD. De notitie wordt afgesloten met een aantal aanbevelingen.

**2. Bevindingen seismologisch model**

Het doel van het seismologisch model in de Groningen HRA is het omzetten van een gasproductie scenario voor de toekomst in een verwachting van seismiciteit in termen van locatie, timing en magnitude. Om het aantal verwachte bevingen voor een gegeven tijdsperiode te bepalen wordt gebruikt gemaakt van een zogenaamd *activity rate* model en het *Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS)* clustering model.

**Datum**

16 december 2019

**Onze referentie**

AGE 19-10.057

**Blad**

4/12

Vervolgens wordt er een verwachtingsverdeling gemaakt van de magnitudes van de verwachte bevingen. Hiervoor wordt gebruikt gemaakt van een b-waarde model en een maximale magnitude verdeling (de zogenaamde Mmax verdeling).

De parameters van het *activity rate* model, het *ETAS* clustering model en het b-waarde model worden gekalibreerd over een tijdsperiode waarin aardbevingen geregistreerd zijn en waarin de gaswinning bekend is. Vervolgens wordt het gekalibreerde model toegepast op een nog uit te voeren gaswinningsscenario. De Mmax verdeling is tot stand gekomen door middel van consultatie van verschillende experts (8-10 maart 2016).

In het hierop volgende deel wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste bevindingen voor wat betreft (model)onzekerheid, validatie, extrapolatie en bias.

**(Model)onzekerheid, incl. extrapolatie***Activity rate & clustering model*

Het *activity rate* model beschrijft hoe de door gaswinning veroorzaakte drukdaling (welke zich ontwikkelt door de tijd) leidt tot spanningsveranderingen op breuken, en hoe dit zich vervolgens vertaalt in een ruimtelijke verdeling van aardbevingen. Het *ETAS* model voegt daar clustering in ruimte en tijd aan toe. Na elke opgetreden beving is de kans op nog een beving lokaal tijdelijk groter. Deze laatste bijdrage is echter beperkt in het Groningenveld.

Het *activity rate* model dat NAM gebruikt heeft een zogenaamde '*film-rate*' karakteristiek. Dit houdt in dat enkel de grootte van de spanningsveranderingen die de gaswinning op breuken veroorzaakt van belang is voor het totaal aantal bevingen. De snelheid van de spanningsveranderingen speelt hierin geen rol. Deze keuze houdt in dat tijdsafhankelijke deformatie en aseismische ontlading niet wordt meegenomen in het model. Bodemdalingsstudies (TNO, 2013) en experimenteel werk (Pijnenburg et al., 2018) op Groningen reservoirgesteente laten zien dat tijdsafhankelijke deformatie een rol speelt in het Groningen reservoir. Het belang hiervan voor seismiciteit is echter niet duidelijk. De door NAM gebruikte '*film-rate*' aanname resulteert daarmee in een (sombere) bias waarbij de mate van impact onduidelijk is.

De door NAM gebruikte relatie tussen spanningsverandering en seismiciteit escaleert met voortzettende gaswinning (er is sprake van zogenaamde exponentiële groei). Dat wil zeggen dat de winning van een gegeven hoeveelheid gas steeds meer aardbevingen veroorzaakt naarmate er meer gas uit het Groningenveld geproduceerd is. De fysische verklaring die hiervoor wordt aangewend eist ook dat deze escalatie op een gegeven moment ophoudt. Met de mogelijke beëindiging van de escalatie wordt in het door NAM gebruikte model geen rekening gehouden. Hiermee wordt een (sombere) bias geïntroduceerd. Dit maakt het huidige model ongeschikt voor het opstellen van prognoses op de lange termijn. Hierover is consensus onder experts. Deze bias wordt van belang wanneer de exponentiële groei van seismiciteit in werkelijkheid ophoudt, terwijl het model deze nog wel voorspelt. Experts verschillen van mening of de huidige data hiertoe al aanwijzingen bevat.

In het door NAM gebruikte model wordt seismiciteit direct (d.w.z. zonder vertraging) gerelateerd aan spanningsverandering, welke op haar beurt direct

**Datum**

16 december 2019

**Onze referentie**

AGE 19-10.057

**Blad**

5/12

gerelateerd is aan drukverandering. Dit heeft als uiteindelijke consequentie dat het NAM *activity rate* model geen aardbevingen voorspelt wanneer de lokale druk niet daalt (afgezien van een korte periode met een kleine kans op naschokken via het ETAS model). Na het stopzetten van productie uit het Groningenveld volgt in het model na een periode van drukstabilisatie een vrijwel onmiddellijk einde van geïnduceerde seismiciteit. Dit modelresultaat is relatief rooskleurig. Zowel het gebruik van een tijdsafhankelijk deformatiemodel (zoals NAM gebruikt voor bodemdalingsvoorspellingen) als een model waarin seismiciteit afhankelijk is van de snelheid van spanningsverandering (zoals het veelgebruikte Dieterich model; Dieterich, 1994) zouden leiden tot een lange periode van seismiciteit na het stopzetten van productie. Er zijn echter ook modelstudies gepubliceerd in de wetenschappelijke literatuur (Van Wees et al., 2017) die laten zien dat doorzettende deformatie na een productiestop niet zou leiden tot doorzettende spanningsveranderingen. Al met al constateert TNO-AGE dat de keuze van NAM hier aan de rooskleurige kant is, gegeven het spectrum van mogelijkheden. Er is echter geen duidelijke aanwijzing dat hier daadwerkelijk sprake is van een systematische fout/bias.

#### Frequentie-magnitude verdeling

Alle experts zijn het over eens dat het b-waarde model een zeer gevoelig deel van de risicoberekening is; kleine veranderingen in b-waarde resulteren in grote veranderingen in het seismisch risico. Meerdere experts beoordelen het aantal geobserveerde bevingen in Groningen als te laag om iets anders dan een constante b-waarde model te kunnen gebruiken. NAM gebruikt momenteel een model waarin de b-waarde afneemt als gevolg van gasproductie, met als resultaat dat het relatieve aandeel van zware aardbevingen toeneemt in de tijd<sup>2</sup>. TNO-AGE constateert dat op dit punt verschillende inzichten bestaan. De door NAM gekozen aanpak leidt tot een hogere risico-inschatting vergeleken met een constante b-waarde model en is daarmee conservatiever. TNO-AGE constateert dat er momenteel echter geen overtuigende analyse beschikbaar is, waaruit blijkt dat deze conservatievere keuze leidt tot een bias<sup>3</sup>.

Ook de Mmax-verdeling is een gevoelig deel van de risicoberekening. Op basis van het aantal tot nu toe geobserveerde aardbevingen is de maximale magnitude niet vast te stellen, terwijl er vanuit een fysisch perspectief (energie balans) een maximale magnitude voor het Groningen-systeem moet bestaan. NAM geeft aan dat ze ervoor heeft gekozen een Mmax-verdeling vast te stellen door consultatie van internationale experts in een gezamenlijke workshop. TNO-AGE onderschrijft de door NAM gebruikte methodiek (expert consultatie) als zinvol en zoveel mogelijk objectief.

TNO-AGE plaatst de volgende kanttekeningen bij de Mmax verdeling zoals gerepresenteerd in de beslisboom van de workshop (Figuur 1):

1. In de *field specific* tak is een gewicht gekozen van 0.25 voor *propagate significantly out of reservoir/trigger local faults*. Recent gepubliceerde

<sup>2</sup> De b-waarde beschrijft de verhouding tussen lichte en zware aardbevingen in de optredende seismiciteit, maar zegt niets over het totale aantal bevingen.

<sup>3</sup> Dat wil zeggen: een keuze om een constant b-waarde model te gebruiken zou even goed kunnen leiden tot een rooskleurige bias

**Datum**  
16 december 2019

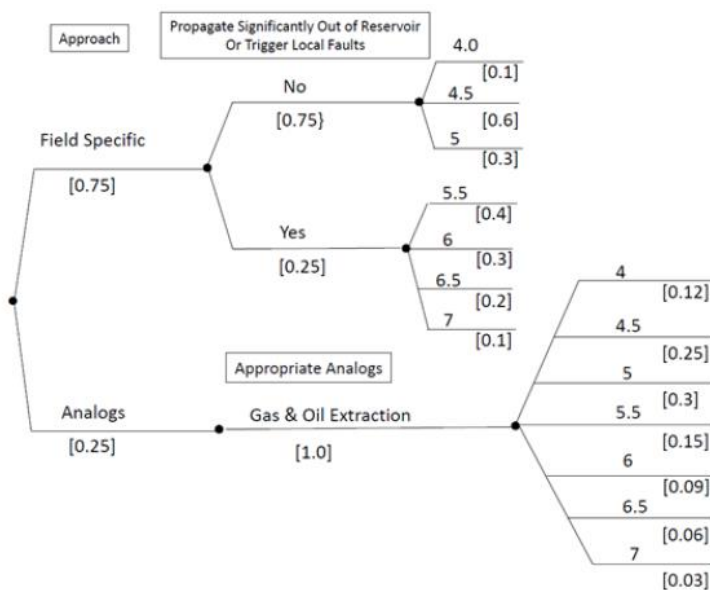
**Onze referentie**  
AGE 19-10.057

**Blad**  
6/12

geomechanische modellen<sup>4</sup> van reservoir compactie en slip op reservoir niveau laten geen significante stress perturbatie zien op een verticale afstand (in diepte) van meer dan 250 meter van het reservoir. Modelresultaten voorspellen in veel gevallen zelfs een stabiliserend effect op het breukdeel dat doorloopt onder het compacterend reservoir. De weging van 0.25 is veel hoger dan verwacht mag worden op basis van dergelijke geomechanische modelinzichten en de observeerde begrenzing van aardbevingen op reservoir niveau. Een bijstelling van de weegfactor naar beneden kan met wetenschappelijke argumenten worden onderbouwd. Zo is een waarde die 1 tot 3 ordes lager is, in overeenstemming met triggering van een grote natuurlijke beving (b.v.  $M > 5$ ) voor een zeer kleine stress perturbatie (d.w.z. conform de natuurlijke seismische *activity rate*; Brandes et al, 2019).

- De basis voor de tak *analogs* en *gas&oil extraction* is de database van Foulger<sup>5</sup> (zie ook NAM, 2016) aangevuld met Davies et al. (2013). Het betreft reservoirs zonder injectie en “*was used without additional refinement or review due to the time constraints of the project*”. Dit zijn reservoirs in gebieden met afwijkende natuurlijke seismiteit (typisch hoger dan Groningen). Ook de structurele condities en typen reservoirs zijn niet representatief voor Groningen (zie ook punt 1). Door de grote (en niet representatieve) bandbreedte van *appropriate analogs* wordt de frequentie van  $M_{max} > 5$  overschat. Daarnaast is de tak *analogs* impliciet ook al aanwezig in de tak *field specific* en wordt daardoor dubbel gewogen. Om deze twee redenen leidt de aanwezigheid van de tak *analogs* tot een sombere bias.

Vanwege bovenstaande redenen beoordeelt TNO-AGE de huidige  $M_{max}$ -verdeling in de beslisboom als te somber.



Figuur 1. Beslisboom (Logic tree) voor de beoordeling van  $M_{max}$  van het Groningen Gasveld (bron: Report on  $M_{max}$  Expert Workshop; 8-10 March 2016)

<sup>4</sup> Buijze et al., 2017; Van Wees et al., 2018; Buijze et al., 2019; Candela et al., 2019.

<sup>5</sup> Uiteindelijk in 2018 gepubliceerd: Foulger et al, 2018.

**Datum**  
16 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.057

**Blad**  
7/12

### Rupture model

Het *rupture* model beschrijft de ligging van het breukvlak t.o.v. de bevingshaard. De redenering is dat grotere bevingen zich niet laten omschrijven als puntbron, maar als een bron met een eindig oppervlak op een breuk. Het NAM grondbewegingsmodel conditioneert vervolgens de grondbewegingsverwachting op de kortste afstand van het observatiepunt tot het breukvlak. In de NAM implementatie maakt het *rupture* model geen gebruik van de breukbeschrijving die eerder in het bronmodel wel gebruikt wordt. Er wordt gebruik gemaakt van een stochastisch model van verticale, effen breukvlakken, waarvan de afmetingen geconditioneerd zijn op de magnitude. De strekking van de breuken wordt beschreven als een normale verdeling met een gemiddelde richting van 150° t.o.v. het Noorden (NNW-ZZO) en een standaardafwijking van 30°. Deze verdeling wordt toegepast op elke beving, onafhankelijk van de lokale breukgeometrie. Dit kan ertoe leiden dat er lokale onderschatting/overschatting plaatsvindt van het risico, omdat de *rupture* richting van bevingen niet consistent is met de oriëntatie van de lokale breuken. Het effect van deze inconsistentie is naar verwachting beperkt omdat de breuken in het Loppersum gebied (waar de meeste bevingen en de zwaarste bevingen verwacht worden) goed overeenkomt met de door het *rupture* model gebruikte breukgeometrie.

### **Validatie**

Het *activity rate* model, ETAS clustering model en het b-waarde model worden gekalibreerd aan de geregistreerd aardbevingen in het magnitude interval 1,5 – 3,6. De validiteit van de modellen beperkt zich in die zin tot de reeds opgetreden aantallen bevingen en magnitude bereik.

Volgens NAM is er in het SM V5 geen sprake (meer) van bias tussen de modelberekeningen en de veldgegevens. Echter, dit kan niet worden nagegaan in de beschikbare documentatie. Zo wordt de *a posteriori* verdeling van modelparameters niet getoond. Daardoor is het voor TNO-AGE en andere experts niet mogelijk om de kwaliteit te beoordelen van de kalibratie van de modelonderdelen, zoals uitgevoerd door de NAM.

### **Bias**

Samenvattend is op grond van de aannames in het SM V5 sprake van meerdere vormen van bias, waarvan sommige somber uitvallen en andere rooskleurig. Dit is weergegeven in Tabel 1.

*Tabel 1 Geobserveerde bias SM*

<b>SM modelonderdeel</b>	<b>bias</b>
'film-rate' karakteristiek <i>activity rate</i> model	somber
exponentiële groei van de seismiciteit	somber
geen tijdsafhankelijk gedrag spanningsverandering	mogelijk rooskleurig
b-waarde (frequentie-magnitude verdeling)	niet geïdentificeerd
Mmax-verdeling (frequentie-magnitude verdeling)	somber
<b>Rupture</b> model	niet geïdentificeerd



**Datum**  
16 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.057

**Blad**  
8/12

### 3. Bevindingen *stress drop* model

#### Onzekerheid

De modelonzekerheid omtrent het SD model is groot, daarover is overeenstemming onder experts. De oorzaak van deze onzekerheid ligt primair in het feit dat er (te) weinig gegevens beschikbaar zijn en dat de natuurlijke variatie groot is.

Een van de geconsulteerde experts is van mening, dat de *stress parameter*<sup>6</sup> in de huidige beslisboom onvoldoende variabel is gekozen. Dit geldt voor zowel de lagere magnitudes (5-10 MPa), als voor de hogere magnitudes (7,5-33 MPa). Ter vergelijking: voor natuurlijke bevingen wereldwijd worden waarden vastgesteld, variërend van 0,1 tot 100 MPa, met een mediaan van ongeveer 3 MPa (Abercrombie, 1995; Allmann & Shearer, 2009).

TNO-AGE merkt op dat de gekozen variatie van de *stress parameter* in de beslisboom niet bedoeld is om de gehele variatie van metingen en analogen te omvatten. Natuurlijke variaties in het GMM (m.n. *between-event* variabiliteit; Crempien & Archuleta, 2017) bevat ook variatie van de *stress drop*. Het totaal van variaties in de beslisboom en de natuurlijke variaties leidt in ieder geval tot medeneming van hoge *stress drop* waarden voor natuurlijke bevingen.

#### Validatie

De *stress parameter* wordt indirect uit metingen afgeleid. NAM heeft voor 23 bevingen met magnitudes tussen 2,5 tot 3,6 in Groningen de *stress parameter* afgeleid middels inversie (Bommer et al., 2018; peildatum 27-05-2017). In dit beperkte magnitudebereik is de *stress parameter* gevalideerd.

TNO-AGE kan zich vinden in deze aanpak.

#### Extrapolatie

NAM heeft haar extrapolatie uitgewerkt in een beslisboom, waarbij de takken verschillende relaties tussen magnitude en *stress parameter* beschrijven. Er is verschil van inzicht over de onderbouwing hiervan.

Als uitgangspunt voor een goede beslisboom geldt, dat er overeenstemming is tussen de beschikbare informatie (inclusief theoretische overwegingen), het aantal takken en de functionaliteit daarvan. Voor wat betreft de functionaliteit merkt TNO-AGE op, dat een relatie tussen magnitude en *stress drop* voor (geïnduceerde) seismiteit niet eenduidig is vastgesteld in de wetenschappelijke literatuur.

Diepte-afhankelijke *stress drop* is - met grote onzekerheid - beschreven voor natuurlijke breukbewegingen tussen 5 en 25 km diepte elders in de wereld (bijv. Goebel et al., 2015). De vraag is in hoeverre deze observaties representatief zijn voor de situatie in Groningen. Voor zover dat niet het geval is, zal gebruik van een dergelijke relatie hoogstwaarschijnlijk leiden tot de introductie van een systematisch fout.

---

<sup>6</sup> De *stress drop* kan worden onderscheiden in een *stress parameter* (op grond van seismische inversie van golfvormanalyse van bevingen) en een *stress drop* in geomechanische zin (verschil in Coulomb stress voor en na een breukbeweging). Model aannames maken dat een "gemeten" *stress parameter* niet 1-op-1 vergeleken kan/mag worden met een geomechanische *stress drop*. NAM hanteert de *stress parameter* in de beslisboom.



**Datum**  
16 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.057

**Blad**  
9/12

## Bias

Het is voor TNO-AGE moeilijk te beoordelen op basis van het uitgevoerde onderzoek of de gekozen modelaanpak en variatie van de *stress parameter* resulteert in een bias. Nader onderzoek naar mogelijke bias in het GMM, waaronder *stress drop*, wordt uitgevoerd in het KEM-02<sup>7</sup> onderzoeksproject.

## 4. Conclusies

Het huidige seismologisch model, met een exponentiele groei van het aantal bevingen naarmate er meer gas wordt geproduceerd, is ongeschikt voor prognoses op lange termijn. Experts zijn het hierover eens. Versnelde afbouw van de gaswinning en uiteindelijk beëindiging van productie vraagt om beter inzicht in het te verwachten aantal bevingen.

Het b-waarde model een zeer gevoelig deel van de risicoberekening. Experts verschillen van inzicht met betrekking tot het al dan niet gebruik van een constant b-waarde model. Er is echter geen overtuigend argument dat hier sprake is van een bias.

TNO-AGE plaatst een aantal kanttekeningen bij de Mmax verdeling. Recente inzichten rechtvaardigen een aanzienlijk lagere weging van bevingen die buiten het reservoir propageren. Daarnaast worden de opgevoerde analogen als niet representatief beschouwd. Dit leidt tot een sombere (d.w.z. te hoge) inschatting van de Mmax.

Het is moeilijk te beoordelen op basis van het uitgevoerde onderzoek of de gekozen modelaanpak en variatie van de *stress parameter* resulteert in een bias. Nader onderzoek naar mogelijke bias in het GMM kan hier meer inzicht in geven.

## 5. Aanbevelingen

Op grond van de gerapporteerde bevindingen beveelt TNO-AGE het volgende aan voor de  korte termijn:

- Pas meerdere, eenvoudige modellen toe voor zowel groei als afzwakking van de *activity rate* in het SM. Dit leidt tot meer inzicht in de modelonzekerheid omtrent het verwachte aantal bevingen in de komende jaren.
- Voer een herevaluatie uit voor de Mmax verdeling, voor zowel de weging van de *propagate significantly out of reservoir/trigger local faults* tak in de beslisboom als het gebruik van de tak *analogs* en *gas&oil extraction*. Dit leidt, in lijn met de huidige geomechanische inzichten, tot een meer realistische modelonzekerheid omtrent de verwachte maximum magnitude.
- Publiceer, t.a.v. de SM validatie, de a posteriori verdeling van modelparameters zodat een eventuele bias t.o.v. de veldgegevens kan worden uitgesloten, hetgeen het vertrouwen in het SM versterkt.

Wat betreft de  lange(re) termijn wetenschappelijke ontwikkeling brengen de geraadpleegde experts (Bijlage 1) o.a. het volgende, in volgorde van toegepast naar fundamenteel, naar voren:

---

<sup>7</sup> KEM-02: Evaluating, validating and improving the site-amplification component of the Groningen Seismic Risk Model ([www.kemprogramma.nl](http://www.kemprogramma.nl))

**Datum**

16 december 2019

**Onze referentie**

AGE 19-10.057

**Blad**

10/12

- Laat meerdere teams onafhankelijk van elkaar eenvoudige, alternatieve modellen ontwikkelen voor het SM.
- Voer een haalbaarheidsstudie uit naar de toegevoegde waarde van spanningsmetingen onder de gashoudende laag in Groningen.
- Onderzoek het dynamische gedrag met het oog op vertragingseffecten en het effect van aseismische spanningsontlasting in de ondergrond van Groningen.
- Voer een kwaliteitscontrole uit door toepassing van het seismologisch model in een of meer gebieden, waar veel meer bevingen zijn waargenomen dan in Groningen. Hiermee kan worden getest of het seismologisch model voldoende stabiel is.
- Ga na of en zo ja in welke mate de nu gehanteerde theorie (*extreme threshold theory*) adequaat is, denk daarbij aan statistische toetsing met (veel) realisaties.

**Vooruitblik & suggestie**

Vanuit het lopende NAM onderzoeksprogramma is voor zover TNO-AGE weet in ieder geval een nieuwe versie (V6) van het SM voorzien.

TNO-AGE verzoekt u om deze suggesties onder de aandacht te brengen bij het NAM onderzoeksprogramma, het Kennisprogramma Effecten Mijnbouw en het DeepNL onderzoeksprogramma.

**6. Referenties**

Abercrombie, R. E. (1995), Earthquake source scaling relationships from  $-1$  to  $5 M_L$  using seismograms recorded at 2.5-km depth, *J. Geophys. Res.*, 100( B12), 24015– 24036, doi:[10.1029/95JB02397](https://doi.org/10.1029/95JB02397).

Allmann, B. P., and Shearer, P. M. (2009), Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 114, B01310, doi:[10.1029/2008JB005821](https://doi.org/10.1029/2008JB005821).

Bommer, J., Edwards, B., Kruiver, P., Rodriguez-Marek, A., Stafford, P., Dost, B., Ntinalexis, M., Ruigrok, E. and Spetzler, J. (2018), V5 Ground-Motion Model (GMM) for the Groningen Field; Re-issue with Assurance Letter. *NAM report*.

Bourne, S.J., Oates, S.J., Van Elk, J. (2018), The exponential rise of induced seismicity with increasing stress levels in the Groningen gas field and its implications for controlling seismic risk. *Geophys. J. Int.* 213, 1693 – 1700.

Brandes, C, Plenefisch, T, Tanner, DC, Gestermann, N, Steffen, H. (2019), Evaluation of deep crustal earthquakes in northern Germany – Possible tectonic causes. *Terra Nova*, 31, 83– 93. doi:[10.1111/ter.12372](https://doi.org/10.1111/ter.12372)

Buijze, L., van den Bogert, P. A., Wassing, B. B., Orlic, B., & ten Veen, J. (2017), Fault reactivation mechanisms and dynamic rupture modelling of depletion-

**Datum**

16 december 2019

**Onze referentie**

AGE 19-10.057

**Blad**

11/12

induced seismic events in a Rotliegend gas reservoir. *Netherlands Journal of Geosciences*, 96(5), s131-s148.

Buijze, L., van den Bogert, P. A. J., Wassing, B. B. T., & Orlic, B. (2019). Nucleation and arrest of dynamic rupture induced by reservoir depletion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 3620– 3645.  
doi:[10.1029/2018JB016941](https://doi.org/10.1029/2018JB016941)

Candela, T., Osinga, S., Ampuero, J. P., Wassing, B., Pluymaekers, M., Fokker, P. A., ... & Muntendam - Bos, A. G. (2019), Depletion - induced seismicity at the Groningen gas field: Coulomb rate - and - state models including differential compaction effect. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(7), 7081-7104.

Crempien, J.G.F. & Archuleta, R.J. (2017), *Pure Appl. Geophys.* 174: 3451.  
<https://doi.org/10.1007/s00024-017-1615-x>

Davies, R., G. Foulger, A. Bindley, P. Style (2013), Induced seismicity and hydraulic fracturing for the recovery of hydrocarbons. *Marine and Petroleum Geology* 45, 171- 185.

Dieterich, J. (1994), A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering, *J. Geophys. Res.*, 99( B2), 2601– 2618,  
doi:[10.1029/93JB02581](https://doi.org/10.1029/93JB02581).

Dost, B., Edwards, B., Bommer, J.J. (2016) Local and moment magnitudes in the Groningen field. *NAM report*.

Goebel, T.H.W., Hauksson, E., Shearer, P.M., Ampuero, J.P. (2015). Stress-drop heterogeneity within tectonically complex regions: a case study of San Geronio Pass, southern California, *Geophysical Journal International*, Volume 202, Issue 1, Pages 514–528, <https://doi.org/10.1093/gji/ggv160>

Foulger, G. R., Wilson, M. P., Gluyas, J. G., Julian, B. R., & Davies, R. J. (2018). Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*, 178, 438-514.

NAM, (2016) Report on Mmax Expert Workshop (8-10 March 2016). WTC, Schiphol Airport, The Netherlands.

Pijenburg, R. P. J., Verberne, B. A., Hangx, S. J. T., & Spiers, C.J. (2018). Deformation behavior of sandstones from the seismogenic Groningen gas field: Role of inelastic versus elastic mechanisms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 5532– 5558. <https://doi.org/10.1029/2018JB015673>

TNO (2013). Toetsing van de bodemdalingsprognoses en seismische hazard ten gevolge van gaswinning van het Groningen veld. *TNO-rapport R11953*

**Datum**

16 december 2019

**Onze referentie**

AGE 19-10.057

**Blad**

12/12

Van Elk, J. Bourne, S.J., Oates, S.J. (2017) Extreme threshold failures within a heterogeneous elastic thin sheet and the spatial-temporal development of induced seismicity within the Groningen gas field. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 10.1002/2017JB014356

Van Wees, J., Fokker, P., Van Thienen-Visser, K., Wassing, B., Osinga, S., Orlic, B., . . . Pluymaekers, M. (2017). Geomechanical models for induced seismicity in the Netherlands: Inferences from simplified analytical, finite element and rupture model approaches. *Netherlands Journal of Geosciences*, 96(5), S183-S202. doi:10.1017/njg.2017.38

Van Wees, J. D., Osinga, S., Van Thienen-Visser, K., & Fokker, P. A. (2018). Reservoir creep and induced seismicity: inferences from geomechanical modeling of gas depletion in the Groningen field. *Geophysical Journal International*, 212(3), 1487-1497.

# SOURCE MODEL + STRESS DROP

Gesprek met Prof J.D.A.M. van Wees, 20 november 2018

**TNO** innovation  
for life

# TNO EXPERT

Prof. Jan Diederik van Wees, (UU/TNO)



# NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL

- Seismological model is based on compaction strains

Underlying stress changes are the prime driver (i.e. NJG paper Van Wees et al., 2017).

Using strains instead results in a (conservative) bias in the calculated risk.

In a stress oriented approach the model response to temporal changes in production are likely more direct (e.g. Van Wees et al., 2018) .

## NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL

- Seismic response is growing with cumulative/increasing strain

This behavior is fundamentally different from e.g. self organised criticality approach that results in long term flattening rather than ongoing escalation.

Using a continuously growing response results in a (conservative) bias in the calculated risk.

Relevance of this bias depends on time window. Model developers restrict its used to 5 yrs (Bourne, Oates and Van Elk, 2018, Geophys. J. Int.)

Any ideas / indications for the effect on risk prognoses 3, 5, 10 years ahead?  
-Difficult to say as nobody can tell when flattening might occur.

## ALTERNATIVES

Several approaches can be used. One alternative has been scientifically published (Dempsey and Suckale, GRL, 2017):

The Dempsey model (sponsored by NAM).

This model currently lacks a spatial component.

# ALTERNATIVES

Another option is the MACRIS-Dieterich approach (TNO):

Fully geomechanical approach.

This model applies a delayed response. Thus flexible, but it comes with a high degree of freedom.

# POTENTIAL MODEL CONSTRAINTS

- Activation level (when does seismicity kicks in?)  
Absolute Coulomb stress change >>>> Coulomb stress rate change  
In situ stress situation related to natural seismicity is important but largely unknown.  
NB indirect indications? All gas fields require perturbation over 100 bars before induced seismicity kicks in. Large parts of NW Europe shows limited neotectonism and no natural seismicity
- With > 700 faults, fault response is likely to be levelled out (almost fault fabric independent)  
This is an argument in favor of using compaction strains.
- response to temporal changes in production  
Linear compaction models tend to be overbiased in delay aspects as stress relaxation is not included.  
PM V5 uses linear compaction?

# POTENTIAL MODEL CONSTRAINTS

- Threshold stress, after which seismicity occurs  
Not implemented in V5, hence an immediate response.

What does that mean for the calculated risk, if anything?

Bridge to stress drop issue.



# STRESS DROP

- Tectonic regime ~ stress drop and absolute stress drop is depth dependent.
  - Stress drop thresholds are typically outside natural tectonism catalogues.
  - Theoretically: a slip length threshold occurs before rupture, once this threshold has been overcome a stress drop kicks in (e.g. cf Buijze et al., 2017)
- This behavior is not detected in simple spring-block models (e.g. Baisch et al., 2010, in a low to normal stress drop range).

# STRESS DROP

- Can stress drop grow over time?
- V5 b-value model gives the highest weight to the biggest quake. This may introduce significant, conservative bias. Alternative approaches may be considered.

# STRESS DROP - CONFINEMENT

- Groningen: overpressured in situ reservoir stress, shale memory. Hence, a high probability of a (pressure) confined reservoir.

V5 considers an unconfined reservoir?

Current (remarkably) high stress drop interpretations of recent quakes all at or close to reservoir depths are in favor of a confinement.

# STRESS DROP - CONFINEMENT

- In case of confinement classical Gutenberg-Richter relations only apply to initial stages of seismicity. A cutoff is expected at later stages related to maximum area versus depth of fault movement.

Trade-off relation in case of a confined reservoir:

- High(er) stress drop events result in a higher seismic risk.
- Maximum area / depth ratio of events result in a lower seismic risk.

PM Triggering of (much) deep(er than reservoir level) events is (much) less likely in confined situation? This also reduces seismic risk. This could be incorporated in the logic tree and/or cutoff of G-R (cf. truncated pareto maximum magnitude)

# STRESS DROP - CONFINEMENT

V5 b-value model based on G-R probably overestimates the likelihood of high magnitude events, thus risk.

Whilst at the same time the V5 model is relatively realistic in terms of event rate?

# STRESS DROP - CONFINEMENT

V5 b-value model applies a consistent lowering of the b-value through the production period. This behavior is not commonly observed in tectonic or injection driven cases. Does this show the influence of production management measures on seismicity? And what does the mean in terms of seismic risk?

PM Small events don't feel system boundaries, large events do. This could help to explain a (rather abrupt) trend deviation in the b-value model. Such a deviation hence can not be ruled out upfront.

- The effect may be captured through studying interevent times per GR-portion.



# BRONMODEL+STRESS DROP

Gesprek met Marc Hettema, 27 november 2018

**TNO** innovation  
for life

# EBN EXPERT

Marc Hettema

## GENERAL REMARKS

- Knowledge of the Dutch subsurface (and Groningen in particular) is key in understanding the relevant physical mechanisms at play. One has to be careful in directly translating knowledge obtained in different areas and geological settings to the particular case of Groningen.
- In general, stacking of conservative assumptions of multiple models leads to a worst case result, rather than to an objective/realistic risk estimate.

# NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL

- The NAM model is a good mix between statistics and geomechanics
  - Analytical stress solution for faults with throw is elegantly derived, as is the inclusion of thickness variations within the reservoir
- Compaction is decent variable to use as seismicity predictor since it is strongly linked to pressure changes. It also provides a way to include surface deformation data, which is an independent data source. However, I'm missing some links to the physics on the faults.
- In my opinion, one should consider three types of faults:
  - Open intra-reservoir faults
  - Closed intra-reservoir faults
  - (Closed) bounding faults
- The NAM model only considers the open intra-reservoir faults. Likely, they are the most important for seismicity, but not the only faults that contribute to the total field seismicity.

## NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL

- Exponential growth derived from tail end of Pareto distribution leads to potentially uncontrolled growth prognosis of earthquakes in the model. Consequently, the long term predictive power of the model may be compromised in a conservative manner.
- I don't see much evidence in the data for an exponential growth of seismicity as a function of ongoing pressure depletion. Rather, the trend I see is a quadratic growth as a function of cumulative produced volume. This empirical observation results in a linear increase of the ratio of seismic activity over production with increasing cumulative volume produced (Hettema et al., 2017, *An empirical relationship for the seismic activity rate of the Groningen gas field, Netherlands Journal of Geosciences*).
- In the activity rate formulation, the  $\theta_2$  parameter includes both the stress path coefficient ( $\gamma$ ) and the static friction coefficient ( $\mu$ ). This is surprising to me, since both are independent and important parameters for most Coulomb stress based models.
- Bvalue model: In my opinion, one should consider the b value of the field as a holistic property. Performing a regional/local or temporally limited analysis violates the holistic assumption of the G-R analysis / integrity of the data set.

## ALTERNATIVES

- Dempsey's model uses a shear modulus ( $G$ ) of 37.5 GPa. This is unrealistically high for Groningen.
- One cannot use the McGarr total energy approach in a gas depletion context to determine  $M_{max}$ , since more than half the energy goes into decompression of the gas phase. I'm not sure whether this energy is still available to be released seismically. This effect is planned to be addressed in the 2019's article of Hettema on fault reactivation model.
- It would be interesting to investigate a potential link between  $b$  value and mechanical (fault) properties. I can imagine such a link exists.
- I recommend considering using a Weibull distribution in the prior of model parameters. Some parameters are better described this way, such as cohesive strength and friction coefficient.

# ALTERNATIVES

The Hettema fault reactivation model, 2019's article in review:

- This model is generic (i.e. not specific for Groningen) and not meant to be a full seismological source model. However, it does provide some key insights in induced seismicity and fault behaviour in a depletion setting.
- Deterministic and static in nature
- Coulomb stress approach, introducing an induced shear stress based on differential compaction.
- Geertsma influence functions
- Stress rotations around faults
- 3 types of faults (intra reservoir closed, intra reservoir open, boundary faults)
- Differential pressure across faults is accounted for, leading to the ratio of depletion on either side of the fault as controlling parameter.
- Fault throw/reservoir thickness ratio turns out to be an important parameter (link to NAM model)
- Faults with a high dip angle becomes progressively more sensitive to pressure depletion with increasing throw and increasing pressure differential across the fault. This is in line with the observation that much of the Groningen seismicity occurs on (sub-)vertical faults.

# STRESS DROP

- I'm not an expert on this topic so I have no opinion in this particular matter.
- Some general remarks:
  - Geomechanical models can be used to derive a stress drop. This could add insights for the Groningen case in addition to insights from other disciplines (such as geophysics and seismology) to derive a stress drop based on certain assumptions.
  - A possible constraint on stress and pressure conditions below the reservoir could be obtained through petrophysical analysis of log data from wells going into the Carboniferous.
  - The Hettema fault reactivation model, 2019's article aims to work out the effect of how the material properties can influence the dynamic stress drop. For brittle rock, it is sudden, but the article is trying to link the creep/plasticity behavior during unloading to the different rock/mineral types. Unfortunately, this is also very temperature and stress-dependent. This could explain why some rock types are more seismogenic than others.



# SOURCE MODEL+STRESS DROP

Interview with prof. D. Dempsey, 29 November 2018

**TNO** innovation  
for life

# EXPERT

Senior Lecturer David Dempsey. University of Auckland, New Zealand

# NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL - GENERAL

- NAM theoretically considers seismicity evolving towards a steady state equilibrium (in their Pareto distribution)
- The Generalized Pareto failure model has a sound theoretical basis
- The Generalized Pareto failure model is a way to *approximate* the effects of heterogeneous stress, and as such NAM's approach does not *explicitly* incorporate heterogeneous stress
- Elegant Bayesian approach with appropriate likelihood function (non-homogenous Poisson)

## NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL - BIAS

- NAM assumes Groningen seismicity to follow an exponential trend with increases stressing
  - This assumption is not conclusively proven in the publications. Not very convincing.
  - The available data (event rates versus bulk reservoir volume decrease) seem to be in support of flattening towards equilibrium rather than of full exponential behavior.
  - This is an example of conservative bias and it prevents long term forecasting of seismicity.
- Relevant questions:
  - What is the likelihood of having passed the exponential state of the Pareto distribution?  
*Using a logistic function's approach, David shows that this likelihood is of 90%.*
  - What does this mean for the reliability of the 5 yr forecast?
  - What happens to seismicity after gas production stop?
- A logic tree approach is a crude approximation for sampling a cumulative distribution function.

## NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL - BIAS

- The current publications / reports do not show the full 12 x 12 parameter calibration plots.

Hence, it is not possible to judge the quality of the calibration.

It is thus impossible to decide on bias being present after calibration.

## NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL - BIAS

- NAM applies a b-value model with changing magnitude over time (depending on the Coulomb stress).

In order to justify the use of this assumption rather than a constant b-value model (within a data-defined uncertainty range) → strong evidence is needed (from data or physics) in support of such dynamic behavior.

Such evidence is not presented in the publications.

It is worth noting that if David had seen the full parameter calibration plots (12x12), it may have been possible to determine the strength of the evidence and whether their b-value model is sufficiently determined/supported by the evidence.

Thus, it is not possible to be sure about bias.

PM The risk estimation is highly sensitive to the b-value model.

## NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL - BIAS

- The NAM logic tree accounts for rupture into the basement

All observed quakes in Groningen are induced by depletion. Ongoing production results in more quakes, which increases the probability of observing quakes with higher moment magnitudes without requiring non-stationarity in the underlying process.

Since there are no inferences from the data for quakes occurring below the reservoir, forecasting such events means dealing with possibility rather than with probability. One has to be aware of out of sample bias (blind spots).

## RECOMMENDATION (I)

- Drilling wells into the basement to measure stress levels is highly recommended, given the huge uncertainty in stress conditions in the layers below the Groningen reservoir. Only such measurements can help to reduce the risk uncertainty related to this blind spot.

The last recommendation is particularly important in light of possible future policy changes as to prolonging gas production from Groningen.



## RECOMMENDATION (II)

Model improvement:

- Apply a constant b-value model (preferably constrained by the observed events) until strong evidence for other behavior becomes available (from data or physics).
- Do not constrain  $M_{\max}$  (i.e. no truncation model), use the calibrated probability density function instead.
- Constrain the models by data rather than by community (elicitation).

# ALTERNATIVES

Four seismological models for Groningen recently published:

1. Zoller and Holzschneider (2016)
2. Dempsey and Suckale (2017)
3. Bourne and Oates (2017)
4. Bourne, Oates and Van Elk (2018)

All mentioned models act on same principles, variations in e.g.:

- Proxy for fluid pressure depletion
- Spatial distribution in relation to activity rate
- Uncertainties in reservoir model input
- B-value models

A very high opinion on model (4), it's currently the best available model.

# STRESS DROP

- I'm not an expert on the seismological part of this topic, so I will restrict myself to the (reservoir) stress conditions.

What is the worst case stress drop?

A large stress drop (in the reservoir) related to dynamic weakening.

- Groningen reservoir has undergone a large pressure change, however,
- observed stress drops are pretty small. Quite a few fall on the lower end of the spectrum (below 1 bar or 0.1 MPa).

PM This fits the shallow character of the Groningen quakes.

- A fast calculation results in a worst case stress drop of 120 bar (12 Mpa) with associated uncertainty.
- All NAM logic tree branches for stress drop are below this estimate.

No indications for substantial bias here, NAM approach seems reasonable.

# SEISMIC SOURCE MODEL AND STRESS DROP

Conversation with NAM, November 30 2018

**TNO** innovation  
for life

## EXPERTS

Stephen Bourne (Shell)

Steve Oates (Shell)

Dirk Doornhof (NAM)

Jan van Elk (NAM)

Julian Bommer (consultant)

Benjamin Edwards (University of Liverpool)

Bernard Dost (KNMI)

Elmer Ruigrok (KNMI)

## NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL

- Fit for purpose model: use in PSHRA for production plan with max. 5 year period ahead + yearly updates for dealing with the possibility of more complex future behaviour
- Balanced physics model: Enough physics to match predictions with data. With simplifications where appropriate, to speed up calculations.
- Enough model complexity to enable a history match without overfitting. Faster models enable more complete investigation of uncertainties in history match and forecast.
- Focus on exponential seismicity rate trend with depletion justified by the absence of observed seismicity before gas production and delayed exponential-like emergence of seismicity rates relative to depletion
  - Quadratic could also work: indistinguishable from exponential in Taylor expansion
  - Within Extreme Threshold Theory, the tail of the initial stress distribution is described by a generalised Pareto Distribution (GPD), and optimal performance is achieved with the exponential distribution which is a special case of the GPD.
  - No indication in the data yet that induced seismicity rates have moved beyond the tail of the initial stress distribution.
  - **The initial seismicity rate model with the exponential trend was** a heuristic model based on the observed trend. The current model replaces this heuristic model with a different exponential trend model based on the physics of Coulomb friction failures within the tail of a stochastic initial stress distribution.
  - For forecasting, at some point this unbound exponential will result in conservatism

## NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL

- For a range of alternative seismological model covariates (pressure, compaction, Coulomb stress) the inclusion of aftershocks via the Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) model improves the history match of year-to-year event rate variability and significantly improves out-of-sample forecast performance.
- Limited sample of quakes (ca. 300) +
- History matching the delayed emergence of seismicity rates is a part of the history match
- Uncertain inversion with lots of parameters, trade offs are present
- Smoothing parameter changed from ~5000m to ~3500m between v2 (WP2016) and v5 (HRA 2017):
  - Represents improved resolution accessible with more events to better constrain the model.
  - Might be because the underlying physics better represents reality
  - May not reduce significantly in the future as the lateral resolution of the reservoir compaction model is limited to about 3000m.

## NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL

- For sufficiently small depletion, the exponential activity rate trend may be approximated as a linear activity rate trend with respect to the elastic thin-sheet Coulomb stress model. Further approximating this elastic thin-sheet model as a uniform homogeneous elastic layer makes the model equivalent to Shapiro's seismological index model. Note that McGarr's model is for the total seismic moment and not the activity rate. For a constant b-value the expected total seismic moment of Shapiro's model is equivalent to McGarr's model.
  - Note: The key point here is that Shapiro's and McGarr's models lead (respectively) to number of events or total seismic moment being **linearly** proportional to the extracted or injected volume.
- The Mmax distribution from the expert panel has 7 points. NAM resampled to a 3 point distribution for speed. This leads to a slightly conservative risk estimate.
- Coupling the elastic thin-sheet stress model within the Dieterich (1994) Rate and State seismicity model does not perform better than the previous Extreme Threshold failure model:
  - The Dieterich seismicity model may benefit from modifications to account for the transition from initially stable to re-activated faults, and the significant increase in effective normal stress with depletion.
  - Either temporally or spatially performing well, never both at the same time



## NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL

- Linear compaction model assumed, because this is the best performing model from inversion over the entire production history of the field (quotes Stijn Bierman).
- ETAS: parameters well constrained when fixing  $c$  and  $d$  to typical values. Can also fix  $p$  and  $q$  without influencing productivity parameters  $K$  and  $a$ .
  - 10-20% aftershocks predicted by ETAS parameters
- Seismic noise levels can be expected to vary between the seasons (increased ocean wave action in the winter is a likely mechanism) and this will influence the system's detectability threshold and hence the number of events detected. This spurious effect is removed by only considering events above the catalogue's magnitude of completeness.

## NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL

- Maturity of the model: fit for purpose
  - Event-event interaction not captured by physics but empirically by ETAS
  - Model is in the Coulomb limit of the rate and state formulation.
  - **No dependence of initial Coulomb stresses on fault segment orientation.**
  - Opportunity to further constrain the model by allowing for a time-dependent magnitude of completeness.
  - Strikes of seismically active faults align with stress direction
    - Focal mechanisms can provide additional insight
    - These faults also tend to be characterized by a different fault throw to reservoir thickness ratio than the N-S striking faults
- Maturity of the model not guaranteed for other purposes:
  - Expect a transition to a maximum steady state seismicity rate with respect to depletion if fault reactivations progress beyond the tail of the initial stress distribution. At present there is no knowledge about the possible character of this transition should it occur.
  - Shorter term (5 year) seismological forecasts are more reliable than longer term (>5 years) forecasts. This model may not be suitable for long term seismicity forecasting until the full recovery of the gas contained in the field.

## NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL

- b-value model (inverse power-law of incremental Coulomb stress):
  - Inspired by fibre-bundle physics
  - Uses a 4 parameter formulation
  - It provides a forecast benefit over using a constant b-value (all tests since 2014)
  - Prior includes a constant b-value model

# ALTERNATIVES

See rate and state comments. No comments on other peoples work.

# STRESS DROP

- Important to distinguish dynamic stress drop (stress parameter) from inversion of seismological data (waveform) and physical (static) stress drop from geomechanical considerations.
- Stress drop scales with depth, with an upper limit on the stress parameter in the model.
- Rectangular fault assumption into basement (simple approach)
- If ruptures confined to the reservoir, then Mmax distribution truncation at much lower levels
  
- Apparent lower stress drop compared to expected tectonic stress drop. Upper branch in logic tree assigned values consistent with tectonic earthquakes.
- Stress drop in logic tree is function of magnitude (so basement rupture events have a different stress drop than M3)
- Very hard to predict stress drop over 4 orders of magnitude with data from 1 order of magnitude (M2.5 to M3.6)
- Weights to branches in logic tree are hard to assign. There is no data available. Least confidence in lower branch.

# BRONMODEL+STRESS DROP

Gesprek met prof. J.D. Jansen, 4 december 2018

**TNO** innovation  
for life

# EXPERT

Professor dr. ir. J.D. Jansen (prof. Reservoir Systems and Control en decaan Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen TU Delft)

## GENERAL REMARKS

- We as a community do not take into account enough variability.  
This may result in bias in both directions
- You need a full Bayesian framework.  
This is what NAM advocates. Computation times make it necessary to make short cuts.



## GENERAL REMARKS

- Input into the seismological model comes from one realisation of the (history matched) reservoir model. Thus, NAM still makes limited use of ensembles.

This is a weakness as there are always major uncertainties in the geological (structural, sedimentological) and petrophysical parameters in any reservoir model. Moreover, history matching of the reservoir model intrinsically presents an ill-posed problem. Hence, (small) errors in the data may have (major) effects on parameter estimates. If these sensitivities are counteracted through regularization, the risk is that the posterior is (too) strongly influenced by the prior.

I recommend taking large standard deviations in the prior for the reservoir properties, and use ensembles of realizations for geological and petrophysical parameters.

Not doing so may result in an underestimation of uncertainties and bias in both directions.

PM Using a logic tree approach is a valid approach to discretize probability density functions, especially when computation time needs to be feasible.

## NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL

- Impressed by V5 seismological model and the way it captures a non-linear trend linked to a localisation effect using extreme threshold theory.
- NAM uses a statistical physical approach.
- And all sorts of assumptions.

## NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL

- V5 model is lacking a slow fault motion component describing stress relaxation. This could be a potential source of conservative bias. However, I have no insight in the potential magnitude of this effect. I know that NAM considers it unimportant.
- Friction is important. The presence of salt above the reservoir could be a source of bias, given that the Groningen reservoir and the Zechstein salts have different (static) frictional behavior. This could result in either conservative or non-conservative bias.
- There is no consensus among experts on the likelihood of quakes extending below reservoir into the basement. This is reflected in the NAM Mmax distribution. I doubt whether fault movement far into the basement will take place at all. This certainly presents a non-conservative bias.  
PM The hazard is dominated by medium sized quakes.

## NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL

- Thin sheet approximation may present a local bias.
- Scale matters when it comes to heterogeneities around faults. This is not involved in traditional reservoir model. Due to the lack of data constraints, an ensemble or probabilistic approach is needed here as well.
- Exxon mechanistic fault model predicted quakes in the wrong areas of the field. This is now dealt with by applying an offset threshold. The rationale behind this is salt.  
Does that provide for a proper explanation?
- Unclear to me what is the predictive power beyond exponential behavior towards equilibrium.

## ALTERNATIVES

- I prefer using multiple simpler models - if time permits as opposed to trying to build one *as good as possible* model  
For reference the BP formalized approach (Williams et al., 2004: “Top-down reservoir modelling”. <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-89974-MS>) and a recent Wiemer paper (Kiraly-Proag et al., 2018: “Multicomponent ensemble models to forecast induced seismicity”. *Geoph. J. Int.* **212** 476–490. <https://doi:10.1093/gji/ggx393> ).

I recommend working with multiple experts groups doing independent model development resulting in multiple models.

## ALTERNATIVES

- Especially when considering longer time scales including a production decline, stop and abandonment phase,

I recommend developing more knowledge on dynamic effects.

For example performing an extensive expert assessment of the effect of slow fault creep on stress relaxation.

- Modeling the pressure transient including multiphase effects and fault lubrication is a step beyond what is being done now. It may have a significant or even major effect on the risk estimate.

It needs to be calibrated. Especially important to look at statistics around productions clusters after shut in. I am concerned about longer term effects (weeks to months to years).

PM Short term effects (days) on the risk estimate imposed by switching off wells are small.

# STRESS DROP

- Beyond my expertise

# SOURCE MODEL + STRESS DROP

Interview with prof. E. Brodsky, 6 december 2018

**TNO** innovation  
for life



# EXPERT

Professor E.E Brodsky (UCSC)

## GENERAL REMARKS

- Problem of over-fitting because of only few events to calibrate. The full approach could be unstable. I would implement the NAM framework for other settings (where mitigation procedures have been also applied – e.g. Oklahoma) with much more EQs. Test the framework and it's capabilities.
- Number of EQs in Groningen may be too small from a scientific point of view for thorough analysis. I try to avoid fitting ETAS parameters over any dataset smaller than 1000 EQs.

# NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL

- The NAM approach is very unusual
- The use of Extreme Threshold Theory is an innovation:
  - Just not sure if it is the right theoretical framework for this problem
  - Not sure if implemented correctly (also not convinced it is implemented incorrectly, just not sure)
  - Equation 66 in JGR paper is key (event rate proportional to time derivative of prob of failure) - Typically, we take event rate proportional to  $1/P_f$
- The framework is strictly a Coulomb failure mode, which is fundamentally different from Dieterich (1994) rate&state seismicity theory:
  - In the NAM framework, fault healing is not considered (strength is constant through time)
  - Several pieces of information reveal that significant healing (and therefore evolution of strength) occurs on the timescale of years
  - Using a strict Coulomb failure model over a rate-and-state (Dieterich) framework may lead to a lower estimation of the event rate in the forecast

# NAM V5 SEISMOLOGICAL MODEL

- ETAS is added to the background seismicity rate to account for clustering:
  - The ETAS model by itself does include earthquake-earthquake interaction statistically (not physically). The problem in this implementation is that it is a hybrid model where the interaction is not couple back into the background. Here the interactions are viewed as independent of the background forcing which may or may not be the case.
  - There are alternatives for ETAS which may describe the clustering better
  - I try to avoid fitting ETAS parameters over any dataset smaller than 1000 EQs
- Extreme Threshold Theory
  - Tail equivalent of Central Limit Theory
  - For Central Limit Theory to hold, you need a lot of realizations. Not sure if this also applies to Extreme Threshold Theory, but I would do some statistical testing to see if this is an appropriate statistical description of the problem
- B value model: I'm not as critical on b-value evolution as I used to be. There seems to be a link between fault dimensionality (roughness), stress states and b-value
  - Mitigation measures in Oklahoma seem to have mitigated the small events but not the big ones

# STRESS DROP

- Observationally, there is very little evidence for magnitude-dependence in stress drops. If there is a dependence it's very small
- I tend to prefer empirical evidence over theoretical calculations. That may be my personal bias.
- Larger earthquakes require rupture into the basement. Evidence that deeper ruptures result in higher stress drops is fuzzy. The community is divided on this, no consensus.
- For natural earthquakes there seems to be consensus that 3MPa is the mean stress drop. You probably want to add a 0.3 MPa and a 30 Mpa branch as well.
- For natural EQs, we see ruptures jump between faults. The size of the stress perturbation does not determine the magnitude of the quake.
- To determine whether rupture into the basement is feasible, stress measurements could support your understanding of the stress state in the basement.
  - Calculate using Critical Stress Theory (CST).
  - Compare to KTB borehole.
  - If your measurements agree with both KTB and CST estimate, a small number (~3) of measurements would help in supporting that understanding.