

Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 30 00
F +31 88 866 30 10

TNO-rapport

2014-R11662 | Eindrapport

Seismiciteit Groningen ten behoeve van NPR 9998

Fase 1

Datum 1 december 2014

Auteur(s)

Aan NEN Werkgroep Aardbevingen,
Oplage
Aantal pagina's 40 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen
Opdrachtgever Ministerie van Economische Zaken
Projectnaam
Projectnummer

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2014 TNO

Managementuittreksel

Titel : Seismiciteit Groningen ten behoeve van
NPR 9998, fase 1

Auteur(s):
1 december 2014
2014-R11662

Datum :
Rapportnr. :

Inleiding & probleemstelling

In opdracht van het ministerie van EZ werkt een NEN-werkgroep aan het opstellen van NPR 9998 betreffende de beoordeling van gebouwen onder aardbevingen t.g.v. de gaswinning in Groningen. Belangrijk basisgegeven is een Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), waarvan het resultaat wordt weergegeven als een kaart van grondversnellingen (PGA) die kunnen optreden met een bepaalde overschrijdingskans binnen een bepaalde periode.

De commissie is gestart met een PSHA uitgevoerd door het KNMI als basis.

De NAM heeft ook een PSHA opgeleverd in het kader van het winningsplan Groningen 2013. De PGA-kaartbeelden zijn voor de korte termijn in grote lijnen vergelijkbaar met die van het KNMI. Op het eerste gezicht lijken beide studies – in elk geval qua resultaat - dus uitwisselbaar v.w.b. toepassing voor de NPR.

Confrontatie van de PGA-kaart van het KNMI met de aard en dichtheid van de gebouwde omgeving boven het Groningen veld levert volgens de commissie een zorgelijk beeld op ten aanzien van de bestendigheid tegen de voorspelde PGA-niveau's en de logistieke haalbaarheid om daar tijdig maatregelen tegen te treffen. Dit heeft de commissie er toe aangezet om alsnog na te laten gaan, of er redenen zijn om aan te nemen, dat de voorspelde PGA-niveau's wellicht hoger zijn dan geotechnisch noodzakelijk, ook rekening houdend met de relatief korte termijn (1 tot 3 jaar) waarover de commissie een uitspraak wil/ moet doen. Dit heeft geresulteerd in een opdracht aan TNO, waarvoor EZ de middelen ter beschikking heeft gesteld.

Bevindingen TNO

TNO constateert het volgende m.b.t. de PSHA van het KNMI:

Seismologisch model

- De PSHA van het KNMI is een model dat inzicht geeft en niet te complex is; het sluit aan bij de traditionele PSHA modellen die ten grondslag liggen aan veel bouwnormen. Een beperking van de traditionele seismologische modellen is dat zij uitgaan van een stationair (d.w.z. tijdonafhankelijk) proces (b.v. plaattektoniek die tektonische bevingen veroorzaakt), terwijl het proces achter geïnduceerde seismiciteit niet-stationair is. Het KNMI heeft dit aspect in haar PSHA verwerkt door het aantal bevingen per jaar in de tijd exponentieel te laten toenemen op basis van de waargenomen trend in de afgelopen jaren en door te werken met een zonerings.

- Voor de maximale magnitude in de frequentie-magnitude relatie wordt de waarde $M_{\max}=5.0$ gekozen, zonder tijdsafhankelijkheid.
- Het KNMI heeft een gevoeligheidsanalyse op de einduitkomsten gedaan voor magnituden tussen 4 en 5, gebaseerd op elders waargenomen maximale magnitudes bij geïnduceerde seismiciteit.

Gebruik ondergrondmodel

- Het KNMI heeft een empirische (uitsluitend op de kaart met locaties van aardbevingen in het verleden gebaseerde) onderbouwde zonerings in drie deelgebieden toegepast.

Effect productie-maatregel

- De KNMI-aanpak heeft geen mogelijkheid om het effect van een productiebeperking op de seismiciteit (en PGA) in rekening te brengen (anders dan eventueel via een – arbitrair te kiezen - verlaging van het aantal bevingen per jaar voor de zichtperiode).

Ten aanzien van de PSHA van de NAM constateert TNO:

Seismologisch model

- Is, net als de PSHA van het KNMI, gebaseerd op de traditionele Gutenberg-Richter verdeling; de non-stationariteit wordt gerepresenteerd via de ontwikkeling van zowel de compactie als de partiticoëfficiënt (die zelf weer als een exponentiële functie van de compactie is gemodelleerd).
- In de simulaties wordt toegelaten, dat het via compactie opgebouwde reservoir-moment seismisch kan vrijkomen (partiticoëfficiënt tot 1), eventueel in slechts enkele events;
- Het seismologisch model kent geen ruimtelijke differentiatie (de relatie tussen de partiticoëfficiënt en de compactie is uniform voor het hele veld).

Gebruik ondergrondmodel

- De PSHA van de NAM maakt gebruik van informatie m.b.t. de ondergrond. In dit geval de ruimtelijke verdeling van de reservoircompactie.
- Het breukenpatroon in het ondergrondmodel wordt niet gehonoreerd; de stelling van NAM is, dat er overal breuken in het reservoir (kunnen) zitten, die een magnitude > 5.0 toelaten.

Effect productie-maatregel

- Tot nu toe geeft de NAM de voorkeur aan het Time Decay compactiemodel; kenmerk van dat model is een relatief grote tijdconstante, waardoor het model langzaam (en binnen de korte zichtperiode voor de NPR in feite niet) reageert op veranderingen in productie.

Als mogelijke verbeterpunten ziet TNO voor de kortere termijn:

Een variant ontwikkelen, die

- alternatieven bevat voor de distributie van de partiticoëfficiënt, Met name waar het gaat om een korte zichtperiode, lijkt een lagere bovengrens (b.v. 0,01 of 0,1) realistisch, mede gelet op de feitelijk waargenomen tot nu toe lage partiticoëfficiënt in het Groningen veld (orde 0,001 en lager) en andere gasvelden tot nu toe.
- het door TNO in 2013 ontwikkelde RTiCM compactiemodel als basis heeft, In dit model wordt kruip en relaxatie van het gesteente meegenomen. Dit model reageert gedeeltelijk instantaan op productieveranderingen en is reeds geïmplementeerd door TNO en toegepast in haar rapportages van december 2013 [TNO 2013] en maart 2014 [TNO 2014].
- breuken honoreert, gebaseerd op de geomechanische deelstudie van TNO in 2013 [TNO 2013].

Inmiddels zijn er aanwijzingen voor een effect ten gevolge van de productie-maatregel in de waargenomen seismiciteit [TNO 2014b]. Deze nieuwe informatie dient te worden gebruikt als voorwaarde voor de modellen, waardoor een beter onderbouwd en waarschijnlijk scherper zicht kan worden geboden op het korte termijn gedrag (de voor NPR relevante tijdhorizon) en ruimtelijke verdeling van de seismiciteit.

In dit rapport wordt gepoogd een relatie tussen reservoircompactie en het seismisch gedrag van breuken te leggen. Voorstellen worden gedaan hoe breuken op veldschaal kwantitatief mee te nemen in de Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) op basis van compactiemodellen. Dit levert inzicht in de maximale magnitude.

Voor een PSHA waarin slechts een korte tijd (3 jaar) vooruit gekeken wordt wijzen de berekeningen in dit rapport op een maximale magnitude in de range van 4,1-4,7 gebaseerd op een relatie tussen compactie en breuken. Gebaseerd op de door het KNMI uitgevoerde gevoeligheidsstudie lijkt een verlaging van M_{max} van 5,0 naar bovengenoemde waarden de piekgrondversnellingen aan het maaiveld met ca 10-20% te verlagen. Een nieuw uit te voeren PSHA moet deze voorlopige waarde nog bevestigen.

Inhoudsopgave

	Managementuittreksel.....	2
1	Inleiding	6
2	Probabilistische Seismische Hazard Analyse van het KNMI.....	8
2.1	Resultaten PSHA KNMI.....	8
2.2	Uitgangspunten PSHA KNMI.....	9
2.3	Bespreking KNMI model.....	11
3	Probabilistische Seismische Hazard Analyse NAM.....	12
3.1	Resultaten PSHA NAM bij ongewijzigde productiestrategie	13
3.2	Resultaten PSHA NAM bij stoppen gaswinning in centrumgebied.	14
3.3	De belangrijkste uitgangspunten van NAM in de PSHA.....	15
3.4	Overzicht resultaten PSHA NAM.....	18
3.5	Bespreking NAM model.....	19
4	Compactie van het reservoirgesteente	20
4.1	Compactiemodellen.....	20
4.2	Compactiebeeld in 2017 voor kabinetsbesluit productiescenario	21
4.3	Berekening partiticoëfficiënt voor RTiCM model	22
5	Combinatie compactie- en breukenmodel	23
5.1	Koppeling breuken en compactie	23
5.2	Definitie van breuken en invloedszone.....	24
5.3	Berekeningswijze voor maximale magnitude	25
5.4	Gehele reservoir als integratiegebied voor het reservoirmoment	25
5.5	Reservoirmoment voor breuken met 1 km invloedszone met willekeurige oriëntatie	26
5.6	Reservoirmoment voor breuken met 1 km invloedszone en met de oriëntaties zoals voorkomend in het Groningen	31
6	Aantal aardbevingen per jaar na productiebeperking	35
7	Conclusies.....	37
8	Literatuur	39
9	Ondertekening	40

1 Inleiding

Voor beoordeling van nieuwbouw en bestaande bouw onder aardbevingsbelasting zal gebruik gemaakt worden van Eurocode 8 (NEN-EN 1998-serie) inclusief Nationale Bijlage en van NEN 8700; hieraan wordt op dit moment gewerkt.

Als voorloper op bovenstaand normtraject is nu, in 2014, NPR 9998 in voorbereiding. Deze zal dienen als instrumentarium om te beslissen of en in welke mate de bestaande bouwwerken binnen de invloedssfeer van het Groningenveld versterkt moeten worden (afkeur- en verbouwniveau) als gevolg van geïnduceerde aardbevingen ten gevolge van de gaswinning van het Groningenveld. Ook geeft deze NPR richtlijnen voor nieuwbouw in hetzelfde gebied.

Belangrijke input voor de NPR zijn waarden van de piekgrondversnelling voor verschillende herhalingstijden welke in rekening gebracht dienen te worden bij een constructieve toets. Het KNMI (KNMI 2013) heeft op basis van een door haar uitgevoerde Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) waarden afgeleid voor de piekgrondversnelling (PGA) voor verschillende overschrijdingskansen per jaar in de periode 2013-2018. Uit deze analyse resulteerde voor woonhuizen op basis van de op dit moment geldende wettelijke norm voor het plaatsgebonden individueel risico (10^{-5}) PGA waarden voor het afkeurniveau van 0,50 g (waarbij g de versnelling van de zwaartekracht is) in het centrum van het Groningen gasveld tot PGA waarden aan de randen van het veld (met grote steden zoals Groningen-stad) tussen de 0,36 g en 0,18 g.

In de praktijk betreft de NPR 9998 (vooral aan de randen van het gebied) tienduizenden huizen; het is daarom zaak om in de probabilistische analyse de verdelingsfuncties op een zo reëel mogelijke wijze op te stellen en geen onnodige conservatismen te introduceren.

Voorliggend rapport heeft als doel hier enig inzicht in te bieden. Belangrijke uitgangspunten zijn:

- We kijken een korte tijd (maximaal 3 jaar) vooruit; onzekerheden met betrekking tot het gedrag in de verdere toekomst worden hiermee uitgeschakeld; we werken met de huidige onzekerheden.
- We dienen rekening te houden met de productiebeperking van het Groningenveld (kabinetsbesluit begin 2014): maximaal 3 mld m³/jaar in het centrumgebied van het Groningen gasveld, 3 mld m³/jaar meer productie in de overige clusters en daarnaast een productieplafond van 42,5 mld m³ voor 2014 en 2015 en 40 mld m³ voor 2016.
- We dienen rekening te houden met de plausibel gemaakte relatie tussen seismiciteit en compactie.

Als eerste gaan we in op de twee op dit moment beschikbare PSHA studies van het KNMI [KNMI, 2013] en NAM [NAM 2013b]. Deze studies worden besproken, waarna op basis van de nu beschikbare informatie een zo reëel mogelijk beeld wordt geschetst voor de parameters van de PSHA waarin we voor een korte tijd vooruitkijken.

In dit rapport wordt gepoogd een relatie tussen compactie en het seismisch gedrag van breuken te leggen. Voorstellen worden gedaan hoe breuken op veldschaal kwantitatief mee te nemen in de Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) op basis van compactiemodellen. Dit levert inzicht in de maximale magnitude en geeft een indicatie hoe effecten van productiescenarios meegenomen kunnen worden in de standaard PSHA modellen.

Ook wordt in dit rapport stilgestaan bij het aantal aardbevingen per jaar dat meegenomen zou moeten worden in de PSHA.

Het korte tijd vooruit kijken betekent wel dat de analyse frequent moet worden heroverwogen om mogelijke veranderende trends in de toekomst tijdig te verwerken in updates.

2 Probabilistische Seismische Hazard Analyse van het KNMI

Het KNMI [KNMI 2013] heeft ten behoeve van de NPR 9998 een Probabilistische Seismische Hazard Analysis uitgevoerd. Deze wordt hieronder kort beschreven.

2.1 Resultaten PSHA KNMI

Het KNMI heeft op basis van een door haar uitgevoerde Probabilistische Seismische Hazard Analysis een contourplot afgeleid voor de piekgrondversnelling $a_{g,ref}$ voor een overschrijdingskans van $2,0 \cdot 10^{-3}$ per jaar. Deze is weergegeven in Fig. 2.1.

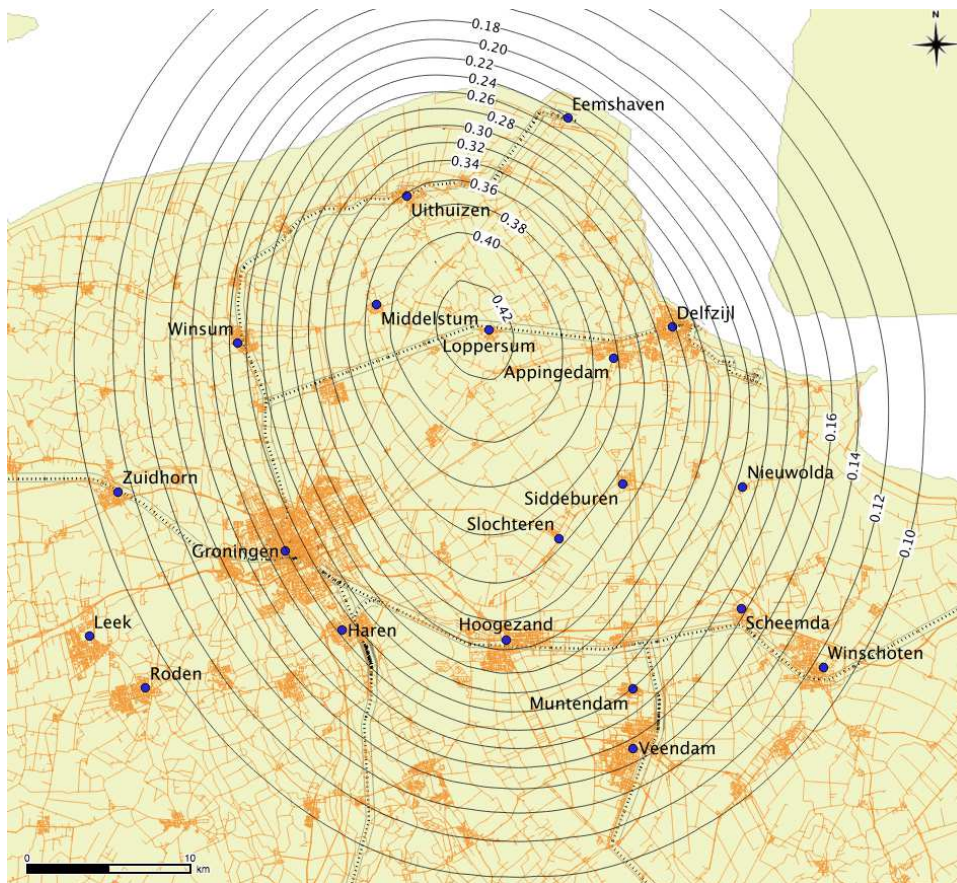


Fig. 2.1: Contourplot van de piekgrondversnellingen $a_{g,ref}$ op maaiveld voor een overschrijdingskans van $2,0 \cdot 10^{-3}$ per jaar, eenheid [g]; bron KNMI

Voor NPR 9998 zijn voor de Eurocode gevolgklassen op basis van het geldende wettelijk individueel risico voor bouwwerken ($IR=10^{-5}$) de herhalingstijden vastgesteld voor de ontwerpwaarde van de piekgrondversnelling voor de 'Near to Collapse' grenstoestand. Vermenigvuldiging van de PGA waarden uit Fig. 2.1 met de importance factoren γ_I uit Tabel 2.1 levert de ontwerpwaarden.

Tabel 2.1: Importance factoren γ_i voor Near Collapse

Gevolg- klasse	Nieuw		Bestaand	
	T [jaar]	γ_i [-]	T [jaar]	γ_i [-]
	CC1A	-		-
CC1B	1200	1,3	800	1,2
CC2	1800	1,5	1500	1,4
CC3	3600	1,7	3000	1,6

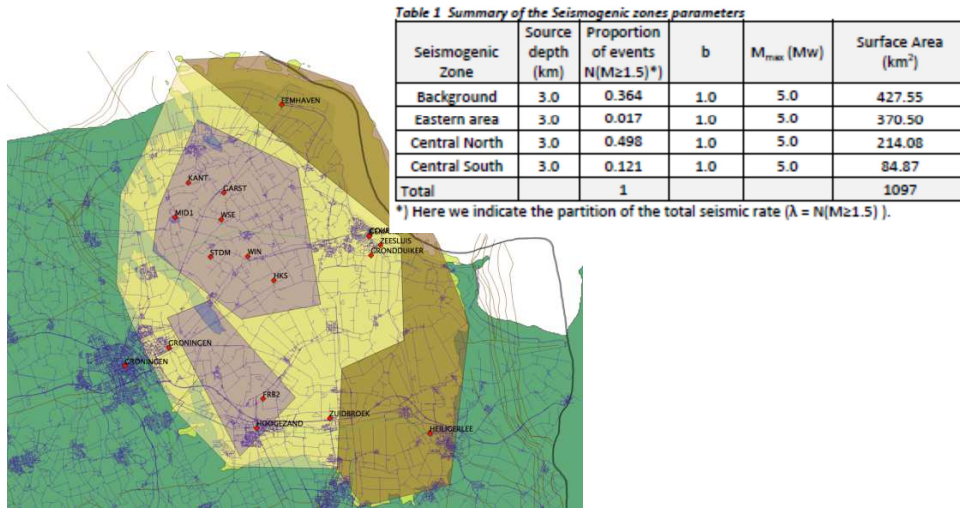
Voor bestaande woonhuizen (CC1B) wordt op deze wijze getoetst op basis van $1,2 * 0,42 g = 0,50 g$ voor het centrumgebied. Bestaande CC2 constructies (o.a. scholen, ziekenhuizen) worden getoetst op $1,4 * 0,42 g = 0,59 g$.

2.2 Uitgangspunten PSHA KNMI

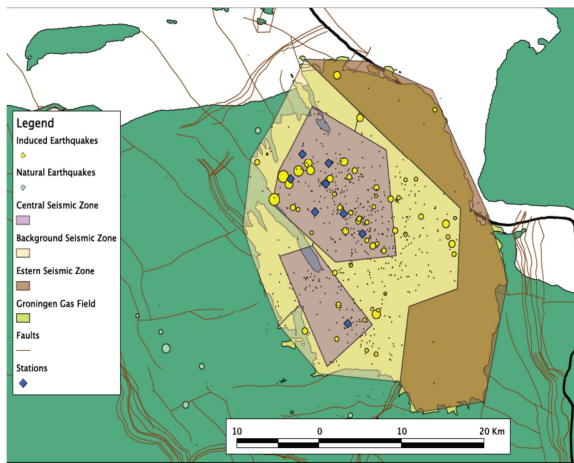
De belangrijkste uitgangspunten van het KNMI zijn de volgende:

1. Overall in het gasveld kan een aardbeving plaatsvinden, voor de magnitude van deze beving wordt over het gehele gasveld een exponentiële verdeling aangehouden met $b=1$ en een afkapwaarde van $M_{max}=5,0$. De verdelingsfunctie voor de magnitude is niet tijdsafhankelijk gekozen.
2. De maximale magnitude volgt uit een beschouwing van velden met geïnduceerde aardbevingen wereldwijd. De waarde $M_{max}=5,0$ volgt ook uit een breuk met een breuklengte van 20 km, een breedte van 1 km en een slip van 0,1 m met 1 MPa stress drop [KNMI, 2013].
3. Voor het aantal aardbevingen per jaar ('rate') met $M > 1,5$ wordt een zonering aangehouden, zie Fig. 2.2. In de randgebieden wordt een lagere rate aangehouden dan in het centrumgebied. Dit is gedaan op basis van het aantal waargenomen bevingen in de gebieden. Zie Fig. 2.2. De laatste jaren is sprake van een toename van de rate; voor de rate in het gehanteerde model (standaard model in de benaming van het KNMI) extrapoleert het KNMI 5 jaar vooruit en gebruikt de waarde $\lambda=40$, zie Fig. 2.4.
4. Voor de relatie tussen magnitude en piekgrondversnelling wordt de Ground Motion Prediction Equation (GMPE) van Akkar et al (2013) genomen inclusief de spreiding. Voor kleinere magnitudes is het gemiddelde van deze GMPE aangepast op basis van metingen in het gebied; de spreiding van Akkar bleek correct te zijn volgens de variatie in de metingen.

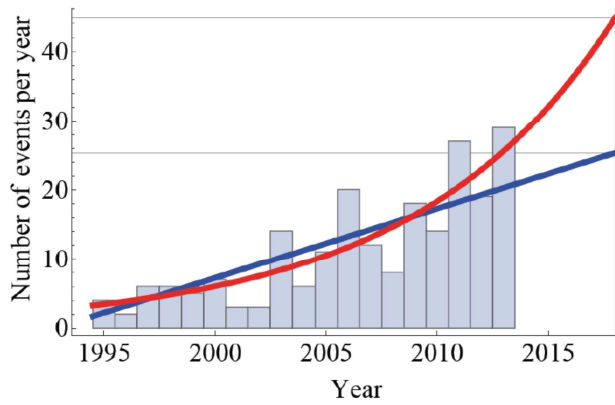
Uit de desaggregatie volgt dat bevingen met een magnitude $M = 4,7$ het meeste bijdragen aan de hazard.



Figuur 2.2. Zonering van de 'rate' in het gasveld [KNMI, 2013]



Figuur 2.3 Waargenomen aardbevingen in het gebied [KNMI, 2013]

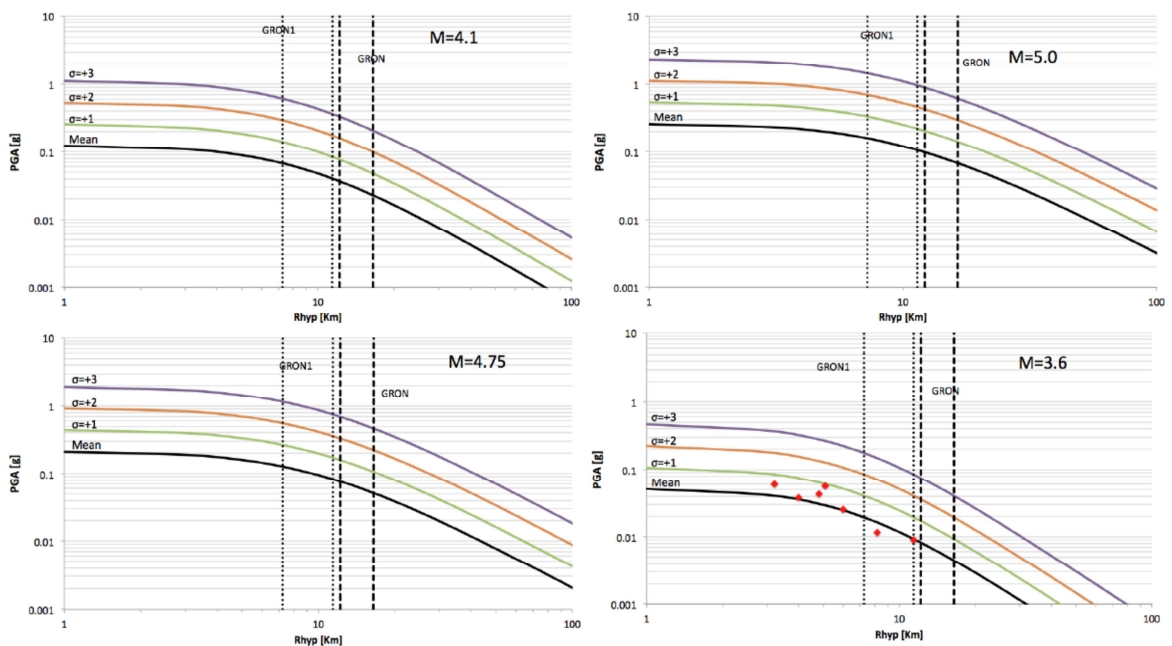


Figuur 2.4 Aantal aardbevingen per jaar en extrapolatie [KNMI, 2013].

2.3 Bespreking KNMI model

- Het KNMI model is een relatief eenvoudig model dat snel inzicht mogelijk maakt in de gevoeligheid voor de keuze van de parameters. Voor de NPR is het een model dat past bij de PSHA studies zoals die ten grondslag liggen aan vele normen wereldwijd (sluit b.v. aan bij JCSS Probabilistic Model Code welke de basis is van bouwnormen wereldwijd).
- Het aantal aardbevingen per jaar wordt vastgesteld op basis van een exponentiële extrapolatie; het resultaat hiervan is mogelijk aan de hoge kant, zie ook hoofdstuk 5.
- Een gedegen onderbouwing voor $M_{\max} = 5,0$ ontbreekt; deze zou uit de fysica (compactiemodellen) kunnen volgen.
- M_{\max} is overal in het Groningenveld hetzelfde en is niet tijdsafhankelijk. Echter er is een duidelijke relatie met compactie aangetoond in andere studies, er is dus een plaats- en tijdsafhankelijkheid.
- Het effect van een ingreep in de gasproductie kan niet berekend worden, omdat geen relatie met de productie en resulterende compactie wordt gelegd en het model uitgaat van gemeten seismiteit in het verleden. De gekozen zonering in het KNMI model laat wel enige relatie met de productie zien.

Het KNMI [KNMI 2014] heeft in de PSHA de gevoeligheid voor de M_{\max} onderzocht. Voor de randgebieden blijkt het aanhouden van een $M_{\max} < 5,0$ weinig effect te hebben; de grootste bijdrage aan de hazard ook voor de randgebieden wordt geleverd door de grotere magnituden in het centrumgebied. Middels een deterministische hazard analyse is de gevoeligheid voor de keuze van M_{\max} in het centrumgebied onderzocht. In onderstaande figuur is de PGA weergegeven als functie van de afstand tot het hypocentrum voor verschillende magnituden voor de Oost-rand van de stad Groningen (GRON1) en Groningen Centrum (GRON). Bij lagere magnituden (en dus lagere waarden voor M_{\max}) zijn de reducties zeer aanzienlijk. Verlaging van M van 5.0 naar 4.75 levert een reductie in de orde van grootte van circa 10-20% van de PGA waarde afhankelijk van de locatie.



Figuur 2.5: PGA als functie van de afstand tot het hypocentrum bij verschillende M-waarden en verschillende fractielen in de verdelingsfunctie van de GMPE. Deterministische hazard analyse (KNMI, 2014).

3 Probabilistische Seismische Hazard Analyse NAM

Studies [NAM 2013 en ook TNO 2013, TNO 2014 waarin TNO de Bourne & Oates methode uit [NAM 2013] ook heeft gebruikt] hebben uitgewezen, dat de compactie in het reservoir een goede correlatie vertoont met de geobserveerde seismiciteit. De geobserveerde seismiciteit (Magnitude ≥ 1.5) vindt alleen plaats daar waar de compactie groter is dan 0,15 à 0,20 m [NAM 2013]. Verder vinden in gebieden met grote compactie ($>0,30$ m) meer bevingen en met grotere magnitudes plaats dan in gebieden met relatief lage compactie (0,15 m). Dit wordt geïllustreerd aan de hand van onderstaande figuur uit (Bourne & Oates, 2013) waar de in Groningen geobserveerde aardbevingen zijn geplott tegen de compactie in het epicentrum. De meeste aardbevingen vonden plaats bij een compactie groter dan ca. 18 cm (90%). Hetzelfde effect is zichtbaar in de plots van de 18 cm compactie contourlijn in het gebied (toenemend in de tijd). Seismiciteit vindt bijna alleen plaats binnen deze contourlijn, daarbuiten lijkt de energie die opgewekt wordt door compactie bijna a-seismisch (micro bevingen) vrij te komen (of in het geheel niet vrij komt, i.e. opgeslagen blijft als potentiële energie).

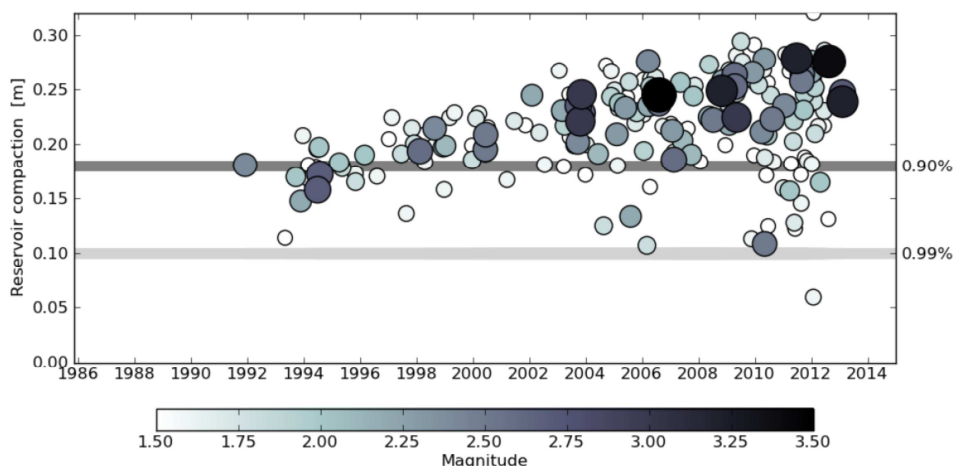


Figure 2.12 The observed earthquakes plotted for reservoir compaction against time. The size and color of the marker indicate the magnitude of the earthquake.

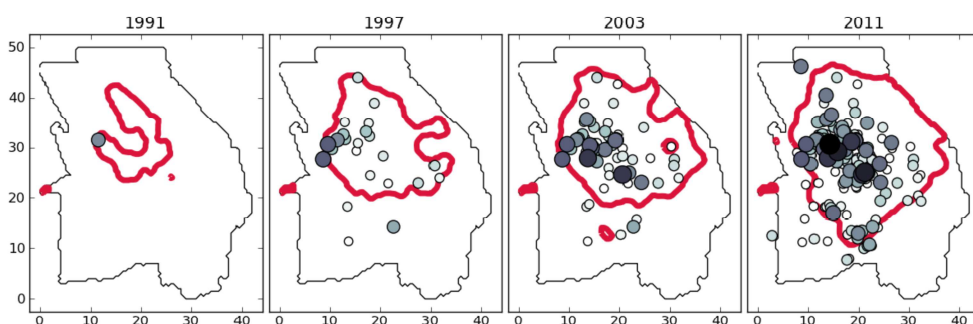


Figure 2.13 The observed earthquakes plotted on the map of the field together with the 18 cm compaction contour for four years (1991, 1997, 2003 and 2011).

Fig. 3.1. Relatie tussen waargenomen aardbevingen en compactie uit [NAM 2013].

Diverse compactiemodellen zijn beschikbaar (zie ook Hoofdstuk 4). [NAM, 2013] gebruikt het Time-Decay model. Het Time-Decay model heeft een door NAM vastgestelde vaste

tijdsconstante van ongeveer 7 jaar. Aangezien de tijdsvertraging met een e-macht reageert duurt het $3 \cdot 7 = 21$ jaar voor de verandering van de gasproductie volledig wordt gerealiseerd in het model.

3.1 Resultaten PSHA NAM bij ongewijzigde productiestrategie

Op basis van de waargenomen relatie tussen compactie en seismiciteit hebben Bourne & Oates [NAM 2013] een probabilistische seismische hazard analyse (PSHA) uitgevoerd voor alleen het gebied rondom Loppersum. Het Time Decay compactiemodel is toegepast. Er is gekeken naar een model dat 3 jaar, 5 jaar en 10 jaar vooruit (m.i.v. 2013) kijkt bij verschillende overschrijdingskansen. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 3.1. De waarden behoren bij een ongewijzigde gasproductiestrategie (het 'market demand' scenario).

Tabel 3.1. PGA waarden uit [NAM 2013].

Period	Maximum Magnitude			Maximum PGA		
	P ₅₀	P ₁₀	P ₂	P ₅₀	P ₁₀	P ₂
2013 - 2016	3.4	4.1	4.6	0.02g	0.12g	0.30g
2013 - 2018	3.6	4.4	4.9	0.03g	0.18g	0.42g
2013 - 2023	3.9	4.8	5.3	0.06g	0.33g	0.67g

Summary of the maximum magnitude and maximum PGA values with 50%, 10% and 2% chances of exceedance over three different time periods of assessment according to the current production plan, the time-decay compaction model and the modified Akkar et al. (2013) GMPE.

Voor de NPR zijn we het meeste geïnteresseerd in het 3-jaar model. In figuur 3.2 zijn de contourlijnen voor de PGA weergegeven voor het 3-jaar model.

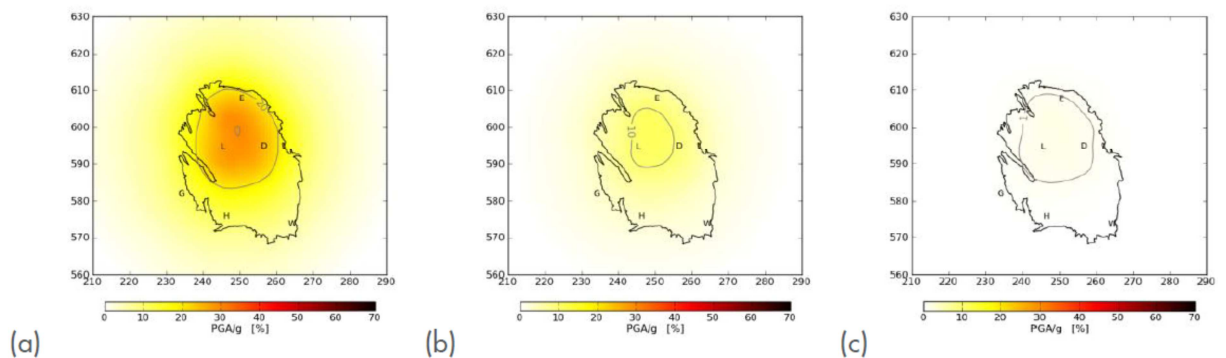


Figure 8.8 PGA hazard maps for the 3 years from 2013 to 2016 with a (a) 2%, (b) 10% and (c) 50% chance of exceedance. The maximum PGA in each case is (a) 0.30g, (b) 0.12g, and (c) 0.02g. The horizontal and vertical scales are Rijkdriehoek (RD) coordinates in km.

Fig. 3.2. Hazard kaarten van piekgrondversnellingen [NAM 2013].

De in bovenstaande tabel weergegeven overschrijdingskansen (50%, 10% en 2%) zijn overschrijdingskansen in de beschouwde periode 2013 tot 2016 en zijn daarom niet direct te vergelijken met de 0,2% overschrijdingskans per jaar zoals weergegeven in Fig. 2.1 van het KNMI.

De PGA-waarde met een overschrijdingskans van 2% in 3 jaar (komt overeen met een overschrijdingskans van ca 1/150 per jaar) bedraagt 0,3 g. Voor een overschrijdingskans van 1/500 per jaar zal de waarde hoger liggen. Deze kan worden afgelezen uit onderstaande grafiek uit Bourne & Oates (2013). De kans waarbij afgelezen dient te worden is $3 \cdot 0,002 = 0,006$. De bijbehorende PGA waarde is 0,48 g.

Opgemerkt wordt dat deze analyse niet geheel correct is omdat er sprake is van een in de tijd toenemende hazard.

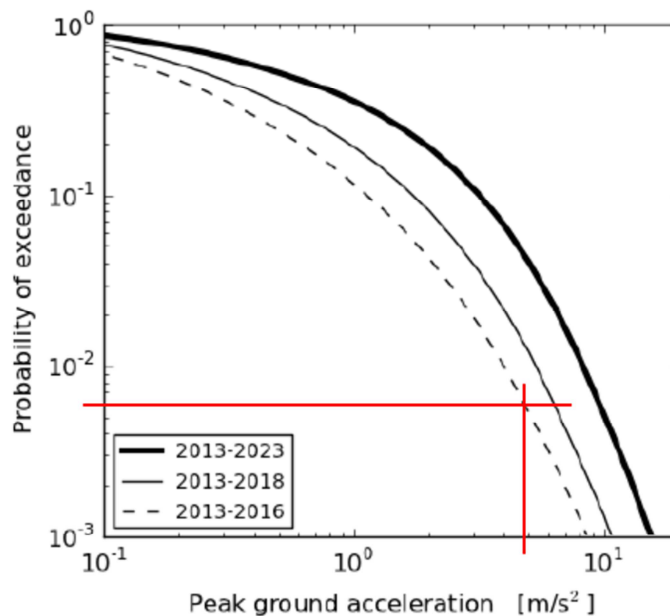


Fig. 3.3. Piekversnellingen met overschrijdingskansen voor verschillende periodes in de toekomst [NAM 2013].

Voor de korte termijn komt de waarde van het KNMI (0,42 g) redelijk overeen met de NAM waarde (0,48 g) bij ongewijzigde productiestrategie. Het NAM model laat wel een snellere uitdemping van de PGA naar de randen van het veld zien dan het KNMI model; dit komt doordat bij kleine compactie (aan de randen van het veld) de seismiciteit beperkt is. KNMI neemt een zonering aan, die conform de seismische events dichtheid is.

3.2 Resultaten PSHA NAM bij stoppen gaswinning in centrumgebied.

Door Bourne & Oates zijn ook seismische hazard berekeningen gemaakt voor de 10 jaar periode 2013 tot 2023 voor verschillende gasproductiescenario's.

Het direct stoppen in het centrumgebied van Groningen reduceert de maximum PGA met 2% overschrijdingskans in 10 jaar van 0,67 g tot 0,41 g, een reductie met 38%.

Voor het model 2013-2016 en 2013-2018 hebben Bourne & Oates geen berekeningen uitgevoerd van de reductie als gevolg van het beperken van de productie. Naar verwachting zal in het NAM model het effect hiervan beperkt zijn vanwege het gebruikte Time-Decay compactiemodel waarin een tijdconstante van de orde van 7 jaar is opgenomen.

3.3 De belangrijkste uitgangspunten van NAM in de PSHA

Het op compactie gebaseerde seismologische model van Bourne & Oates [NAM 2013] gaat uit van:

1. Geobserveerde bevingen in het Groningen gebied door het KNMI. Bevingen met magnitudes vanaf 1,5 zijn meegenomen in de beschouwing.
2. Relatie tussen magnitude en seismische moment van [Hanks & Kanamori 1979]
3. Unbounded Gutenberg-Richter verdeling van de seismische events. Deze komt overeen met de exponentiele verdeling gebruikt door het KNMI met $b=1,0$
4. Relatie tussen gesteenterek en reservoirmoment van [Kostrov 1974]
5. Gemodelleerde compactie van het Groningen reservoir als gevolg van de gasproductie waarbij de parameters dusdanig gekozen zijn dat de gemeten bodemdaling gemiddeld het beste fit. Het gebruikte model is het Time-Decay model [NAM2013b].

De bevingen in het Groningen veld zijn omgerekend naar een totaal seismisch moment, en met de relatie van Kostrov is het reservoirmoment bepaald uit de berekende compactie. Hieruit blijkt dat niet het gehele reservoirmoment wordt omgezet in seismische energie maar een deel daarvan. Dit deel wordt de partiticoëfficiënt genoemd.

3.3.1 Reservoirmoment en seismisch moment

Het KNMI rapporteert de door Groningen gasproductie geïnduceerde bevingen in termen van een magnitude M op een locatie x,y (in Rijksdriehoekcoördinaten) in het Groningen gebied. Deze magnitudes M worden door Bourne & Oates omgerekend naar seismische momenten M_0 met de formule van (Hanks en Kanamori, 1979):

$$M_0 = 10^{Md+c} \quad (1)$$

Met coëfficiënten $c = 9,1$ en $d = 1,5$. Bourne & Oates vinden een betere match met berekende seismische momenten dan als $d = 1,4$ gebruikt wordt. De eenheid van M_0 is Nm.

De inverse van deze relatie wordt gebruikt om van berekende seismische momenten weer terug te gaan naar magnitudes

$$M = (\log_{10}(M_0) - c)/d \quad (2)$$

Volgens de theorie van (Kostrov 1974) is het reservoirmoment gerelateerd aan een volumeintegraal over de rektensor. Bourne & Oates [NAM 2013] merken op dat voor Groningen deze rektensor benaderd kan worden met de één-dimensionale verticale compactierek die geïntegreerd over de hoogte de compactie $\Delta h(\mathbf{x}, t)$ in meters is die afhangt van de plaats $\mathbf{x} = (x, y)$ in het reservoir en de tijd.

Het seismisch moment kan geschreven worden als een zekere fractie $\alpha_f(\Delta h)$ van het reservoirmoment. De factor $\alpha_f(\Delta h)$ is de partiticoëfficiënt.

Het seismisch moment als functie van tijd wordt dan gegeven door:

$$M_r(t) = 2\mu \iint \Delta h(\mathbf{x}, t) \alpha_f(\Delta h(\mathbf{x}, t)) dS \quad (3)$$

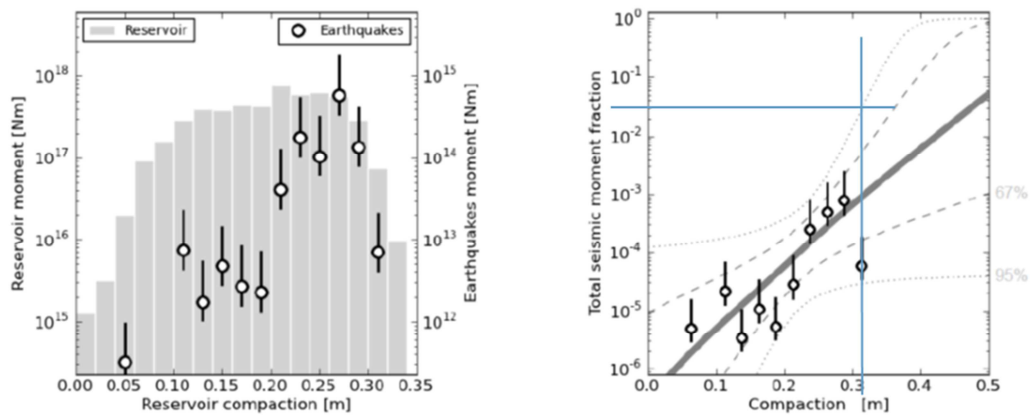
Hierin is μ de glijdingsmodulus van het reservoirgesteente, waarvoor Bourne en Oates een waarde van 10 GPa hebben genomen. Volgens [KNMI 2013b] is de schuifgolfsnelheid in het reservoirgesteente ongeveer 2200 m/s. De dichtheid van het reservoirgesteente is ongeveer 2300 kg/m³. Dit levert een glijdingsmodulus van 11.1 GPa, een vergelijkbare waarde met Bourne en Oates. De integraal wordt door Bourne & Oates over een gebied S uitgevoerd dat binnen zekere compactiecontouren ligt. De partiticoëfficiënt is zodanig dat het seismisch moment M_0 van alle bevingen tussen twee compactiecontouren bepaald met vergelijking (2) in de onzekerheidsband ligt van het berekende reservoirmoment M_r , met vergelijking (3). Op deze procedure wordt hierna dieper ingegaan.

3.3.2 Partiticoëfficiënt

Om te bepalen hoe de partiticoëfficiënt afhangt van de reservoircompactie is door Bourne & Oates [NAM 2013] iedere aardbeving in het Groningen gebied met magnitude $M \geq 1,5$ beschouwd vanaf april 1995 tot oktober 2012. Ieder van deze bevingen is meegenomen in de confrontatie met de 2012 compactiekaart. Deze kaart wordt verdeeld in discrete regio's met dezelfde compactie (binnen een bereik van 25 mm) gebruik makend van compactiecontouren. In elke regio binnen dezelfde compactiecontour is het totaal geobserveerde seismisch moment vergeleken met het reservoirmoment. Het reservoirmoment is het maximum seismisch moment als alle rek plaatsvindt door slip op breuken. De resultaten (Fig. 3.4) geven duidelijk aan dat de partiticoëfficiënt significant (exponentieel) toeneemt met de compactie.

Bourne & Oates hebben hier geen alternatieve modelvarianten beschouwd, zoals een gebiedsspecifieke partiticoëfficiënt. Het gevolg hiervan is dat de seismiciteit alleen over het Groningen veld als geheel wordt beschouwd. Variaties per gebied door bijvoorbeeld de breukdichtheid of breukoriëntatie worden niet meegenomen.

Als gevolg van het stochastisch karakter van de aardbevingen wordt het waargenomen totale seismisch moment benaderd via een random trekking uit de Pareto sum verdeling [Zaliapin et al. 2005]. Deze verdelingsfunctie is niet afgekapt bij een bepaalde magnitude en kenmerkt zich door een zeer 'dikke' rechterstaart; deze wordt veroorzaakt door de exponentiële verdeling van de magnitudes en de log-relatie (1) tussen magnitude en seismisch moment. De onzekerheden in dit partitiemodel (verticale lijnstukken in de figuren) zijn daarom bepaald op basis van een Monte Carlo bootstrap sample-resample methode. Het 95% betrouwbaarheidsinterval is weergegeven in Fig. 3.4. Op deze wijze wordt in rekening gebracht het feit dat indien er aardbevingen met grotere magnitudes zouden plaatsvinden in dit gebied de partiticoëfficiënt dichter bij de 1,0 komt. De groei van de partiticoëfficiënt met de compactie en de mate van onzekerheid in de partiticoëfficiënt die toeneemt bij extrapolatie in de tijd zijn van grote invloed op de prognose van de piekgrondversnellingen (PGA's) in de komende jaren. Indien slechts een korte periode vooruit gekeken wordt volstaat het werken met de waargenomen onzekerheden in combinatie met de Pareto verdeling van de seismisch momenten. Op basis van de huidige compactie volgens het Time Decay model is de partiticoëfficiënt die in 5% van de gevallen wordt overschreden ongeveer gelijk aan 0,03 (zie blauwe lijn in Fig. 3.4).



Figuur 3.4 (a) De verdeling van reservoirmoment en seismisch moment met reservoircompactie. (b) De ratio van seismisch moment en reservoirmoment neemt toe met reservoircompactie; de getrokken lijn geeft de exponentiele fit weer (gemiddeld), de 68% en 95% betrouwbaarheids-intervallen zijn bepaald door Monte Carlo analyse.

3.3.3 Opzet PSHA van de NAM

Hieronder wordt de opzet van de PSHA weergegeven. In feite komt het neer op het omzetten van de door gasextractie beschikbare seismische energie in 'catalogi' van aardbevingen. Eén catalogus beschrijft een mogelijk realisatie van trekkingen van aardbevingen uit een 'vat' energie totdat dit 'vat' leeg is. De inhoud van dit vat energie zal een trekking uit een verdelingsfunctie zijn door de spreiding in de partiticoëfficiënt (partiticoëfficiënt gecombineerd volgens vergelijking (3) met het reservoirmoment t.g.v. van de gasextractie is de beschikbare seismische energie). Door het random gedrag van aardbevingen zal elke catalogus anders zijn, soms is met één grote magnitude het 'vat' snel leeg; soms zijn er veel kleine magnitudes nodig. De geobserveerde seismiciteit is gelijk aan één catalogus.

De procedure is als volgt:

1. Totaal seismisch moment: doe een trekking uit de verdeling (Pareto sum) van het totale seismisch moment op basis van een productie interval. Het totale seismische moment is het product van de volumeverandering per eenheid oppervlak en de partiticoëfficiënt geïntegreerd over het gehele reservoir.
2. Locatie: Daarna wordt een locatie bepaald door random een locatie te trekken uit het aardbevingsdichtheidgrid wat bepaald is uit de compactie van 2012. Op deze manier wordt een verdeling van de bevingen over het veld getrokken die vergelijkbaar is met de aardbevingsdichtheidkaart.
3. Magnitude: Kies een random magnitude van 1,5 of groter uit de frequentie-magnitude verdeling (exponentiële verdeling met $b=1,0$). Deze verdeling is afgekapt bij M_{\max} . Er is namelijk een bovengrens aan de maximum magnitude van aardbevingen die geïnduceerd kunnen worden door gasproductie als gevolg van de gelimiteerde energie of rek geassocieerd met de reservoir compactie en partiticoëfficiënt. De waarde van M_{\max} voor de eerste trekking van een magnitude correspondeert met de waarde van het totale seismisch moment in stap 1. Bij volgende trekkingen wordt M_{\max} verlaagd door de minder beschikbare seismische energie na de eerste trekking.

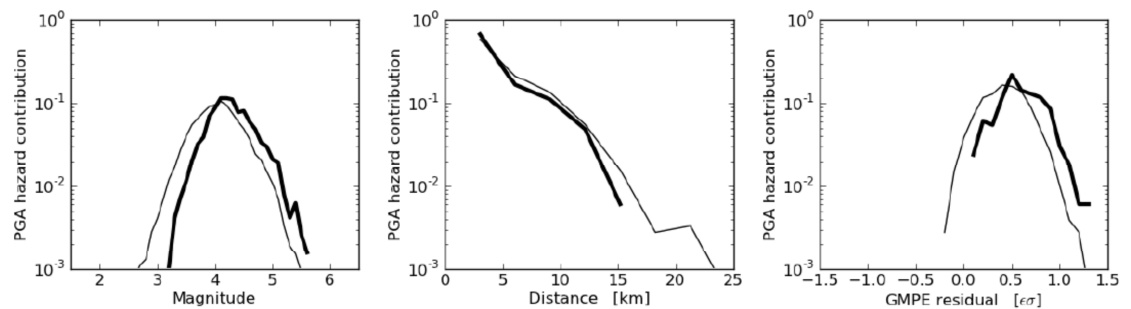
4. Vullen catalogus: Herhalen van stappen 2 en 3 totdat het totale seismisch moment is opgebruikt en vertaald in magnitudes.

5. Voor de relatie tussen magnitude en piekgrondversnelling wordt de Ground Motion Prediction Equation (GMPE) van Akkar et al (2013) genomen inclusief de spreiding. Voor kleinere magnitudes is het gemiddelde van deze GMPE aangepast op basis van metingen in het gebied. Dit is exact dezelfde aanpak als gevolgd door het KNMI.

6 Statistiek: bepalen van de PGA waarde met een bepaalde overschrijdingskans per 3, 5 of 10 jaar.

3.3.4 Resultaten desaggregatie

Desaggregatie van de hazard (Fig. 3.5) laat zien dat PGA waarden met 0,2%, 1% en 10% overschrijdingskans in de beschouwde periode worden gedomineerd door events met magnitude $M=4-5$. De maximum mogelijke aardbeving ($M_{\max}=6,5$; bij één event overeenkomende met het totale seismisch moment) komt met een zo kleine kans voor dat deze een verwaarloosbare invloed heeft.



Figuur 3.5: Desaggregatie voor de PGA warden met 0,2% (dike lijn) en 1% (dunne lijn) voor de periode 2013-2023 [NAM, 2013].

3.4 Overzicht resultaten PSHA NAM

In onderstaande tabel zijn de PGA waarden voor een herhalingsjijd van 475 jaar (overschrijdingskans van 0,2% per jaar) samengevat.

Periode	Ongewijzigde productie $PGA_{0,2\% \text{ per jaar}}$	Stilleggen productie centrum $PGA_{0,2\% \text{ per jaar}}$
2013-2016	0,48g	Geen berekening beschikbaar
2013-2018	0,54g	Geen berekening beschikbaar
2013-2023	0,67g	0,41g

Bij de productiebeperking wijst het Bourne & Oates model voor het Time-Decay compactiemodel voor de periode 2013—2023 op een significante reductie van de PGA waarde met een overschrijdingskans van 0,2% per jaar.

3.5 Bespreking NAM model

- Het Bourne & Oates model is een model dat theoretisch in staat is locatieafhankelijkheden en productiestrategieën door te rekenen.
- Ondergrondse kennis wordt meegenomen door een relatie aan te nemen tussen de compactie en de seismiteit. Met daarbij de belangrijke kanttekening, dat de parameters f en g , die de partiticoëfficiënt bepalen, uniform over het hele veld zijn genomen. Dit is geen fundamentele beperking van de methode, maar wel een keuze met grote impact zonder vergelijking met alternatieven. De keuze gemaakt door Bourne & Oates impliceert dat de breukdichtheid en –distributie overal gelijk is aan die in het Loppersum gebied, waarop het mode de facto is gekalibreerd, omdat daar de meeste en zwaarste bevingen zijn opgetreden.
- Voor de compactie is het Time-Decay model gebruikt, met reactietijd van ongeveer 7 jaar (zie Hoofdstuk 4). Die keuze is in belangrijke mate bepalend voor de ‘stuurbaarheid’ van de compactie d.m.v. productie;
- Van aardbevingen met grote magnitudes is bekend dat deze langs bestaande breuken plaatsvinden. Dit is niet verwerkt in het model, zie Hoofdstuk 6.
- Bij ongewijzigde productie komen voor 2013-2016 de KNMI en NAM waarden dicht bij elkaar.
- Het NAM model wijst op een reductie bij productiebeperking. Op dit moment is de productie in het centrumgebied beperkt. Het ligt dus voor de hand dit scenario voor de NPR 9998 in rekening te brengen. Op de huidige KNMI waarde van 0,42g voor het centrumgebied zou dus een reductiefactor in rekening gebracht mogen worden t.g.v. van de productiebeperking. Het loont dus zeer dit nader te verkennen.

4 Compactie van het reservoirgesteente

Gasproductie leidt tot drukdaling van het gas in het reservoirgesteente. Deze drukdaling leidt tot compactie van het reservoirgesteente, die afhangt van tijd en plaats. Er zijn diverse compactiemodellen beschikbaar. Deze worden hieronder besproken. Gebleken is in [TNO 2013] dat er een compactiemodel beschikbaar is dat beter de werkelijkheid representeert dan het model gebruikt in [NAM, 2013]. Daarom wordt de partiticoëfficiënt opnieuw berekend en worden de consequenties daarvan geïnventariseerd.

4.1 Compactiemodellen

In [TNO 2013] is een studie gemaakt van vier compactiemodellen:

- Time-Decay model zoals gebruikt door NAM
- Isotachenmodel zoals toegepast in de geotechniek voor slappe bodem
- Gelineariseerde versie van het geotechnische isotachenmodel
- Isotachen formulering van het rate type compactiemodel (RTiCM)

Het rapport concludeert dat het RTiCM model (Rate Type isotachen Compactie Model) het beste overeenkomt met de gemeten bodemdaling. Het RTiCM model is een afgeleide van laboratoriumexperimenten onder variërende loading rate; bovendien worden niet alle in het lab bepaalde parameters weer vrijgelaten bij fitting op veldschaal waardoor het aantal te fitten parameters beperkt blijft.

Het isotachenmodel uit de geotechniek is ongeschikt voor het beschrijven van compactie vanwege de logaritmische relatie tussen rek en druk die afwijkt van waargenomen meer lineaire relatie in experimenten op het Groninger zandsteen.

Het Time-Decay model, toegepast in [TNO 2013], geeft een onderschatting van de daling in het centrum en een overschatting van de daling aan de rand van het veld. De daling in het centrum wordt 4 tot 8 cm onderschat afhankelijk van het peilmerk waarop de daling wordt vergeleken.

Het RTiCM model heeft naast kruipgedrag ook een poro-elastische respons. Dit betekent dat het model (gedeeltelijk) direct reageert op een verlaging van de gasproductie (resp. vertraging in de drukdaling); het kruipgedrag heeft een tijdsconstante van enkele maanden. Het Time-Decay model heeft een vaste door de NAM bepaalde tijdsconstante van ongeveer 7 jaar en het duurt dus vele jaren voordat het model een duidelijke reactie aangeeft op een verlaging van de gasproductie.

Het bovenstaande leidt tot twee conclusies:

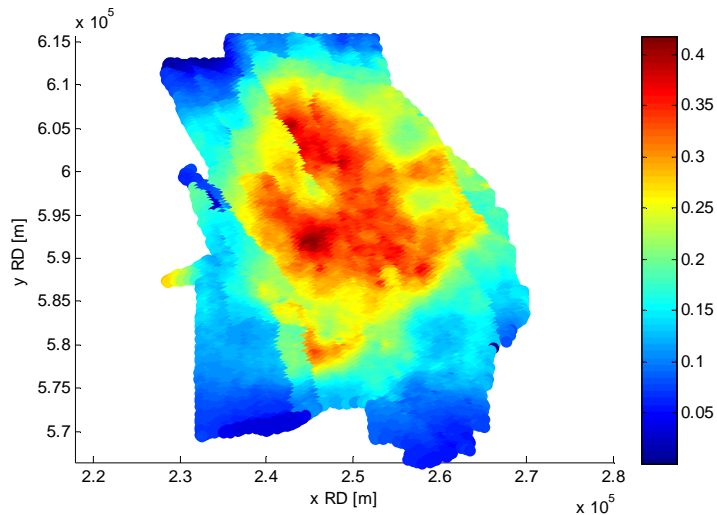
1. De 38 cm compactie (Figuur 4.2) berekend in het centrum van het veld met het RTiCM model in 2012 is groter dan de 32 cm compactie berekend met het Time-Decay model (zie Figuur 3.4).
2. Het RTiCM model reageert gedeeltelijk instantaan op een productiestop in het centrum van het veld (knik in figuur 4.2) volgens het kabinetsbesluitscenario, terwijl het Time-Decay model 7 jaar nodig heeft om op deze productiestop beperkt te reageren (volledige reactie na ~20 jaar) en tot die tijd met nagenoeg constante compactiesnelheid doorzet.

Bij de productiebeperking komt er dus in de periode tot 2017 relatief meer compactie bij met het Time-Decay model. Dit leidt ook tot grotere partiticoëfficiënten met het Time-Decay model ten opzichte van de situatie waarbij de partiticoëfficiënt bepaald zou zijn met het RTiCM model. Het Time-Decay model levert aldus grotere seismische momenten in de nabije toekomst.

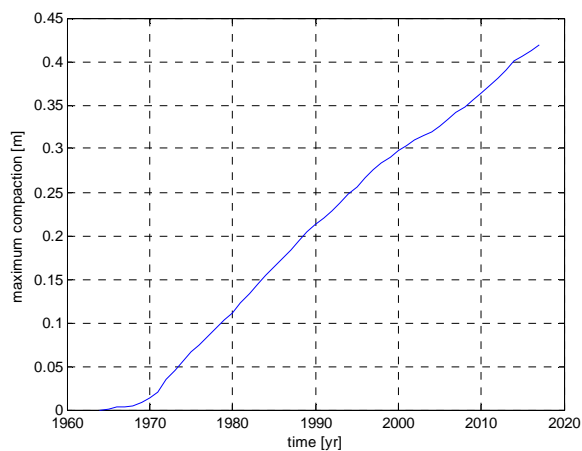
Zeerecente bodemdalingsmetingen (www.nlog.nl) bij Ten Post (centrumgebied met de grootste compactie) geven de indicatie dat de snelheid van de bodemdaling is verminderd redelijk snel na het voor 80% stopzetten van de gasproductie in het centrumgebied. Dit lijkt een bevestiging te zijn voor de aannamen in het RTiCM model.

4.2 Compactiebeeld in 2017 voor kabinetsbesluit productiescenario

Voor het productiescenario conform het kabinetsbesluit zijn reservoirsimulaties uitgevoerd en met de resulterende drukken zijn met (RTiCM) compactieberekeningen gemaakt [TNO 2014]. Onderstaande figuren tonen het ruimtelijke compactiebeeld in 2017 en de maximum compactie in de tijd. In de periode van 2014 tot 2017 neemt de maximum compactie toe van 0,40 m naar 0,42 m.



Figuur 4.1. Compactie in meters eind 2017.



Figuur 4.2. Maximum compactie in het centrum van het veld in meters versus de tijd. In 2014 is een knik zichtbaar in de grafiek die veroorzaakt is doordat het poro-elastische deel van de compactie in het RTiCM model instantaan reageert op de stop van productie in het centrum van het veld.

4.3 Berekening partiticoëfficiënt voor RTiCM model

In [TNO 2014] zijn parameterwaarden afgeleid voor de **verwachtingswaarde** van de partiticoëfficiënt op basis van de compactie berekend met het RTiCM model. De functie voor de partiticoëfficiënt wordt gegeven door

$$\alpha_f = \frac{e^{f+g\Delta h}}{1 + e^{f+g\Delta h}} \quad (4)$$

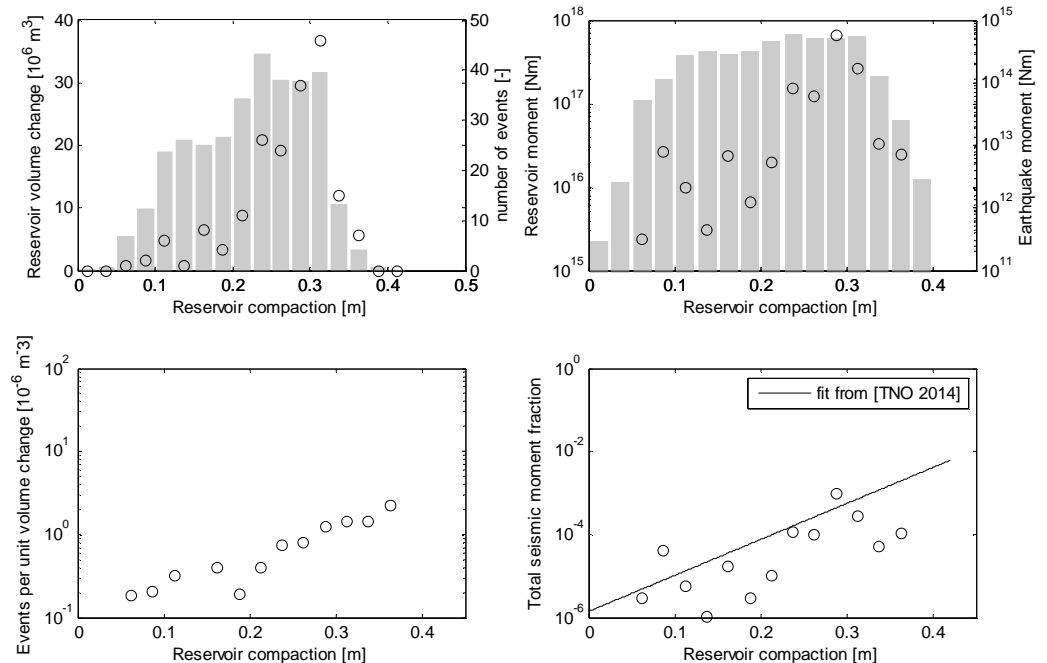
met $f = -13,5$ en $g = 20 \text{ m}^{-1}$; Δh is de compactie in meters.

Met het RTiCM model zijn partiticoëfficiënten afgeleid op dezelfde wijze als gedaan door Bourne en Oates met het Time-Decay model, zie Fig. 4.2.

Opgemerkt wordt dat door het gebruik maken van partiticoëfficiënten uit Fig. 4.2 in de PSHA de hazard voor het hele gebied sterk gedreven wordt door de specifieke compactie/seismiciteit-eigenschappen zoals die nu bepaald zijn voor slechts een klein deelgebied met de grootste compactie. Of deze aanname correct is, is de vraag.

De aanname van Bourne en Oates [NAM, 2013] is dat de aldus (uit compactiecontouren met bijbehorende seismiciteit) afgeleide partiticoëfficiënten toepasbaar zijn op elk volume-element van het compactiemodel. In de navolgende hoofdstukken zal met stroken langs een breuk gewerkt worden, hier kunnen dus ook de partiticoëfficiënten worden toegepast. Opmerking hierbij is dat indien de partiticoëfficiënt zou worden afgeleid voor een indeling in stroken er mogelijk hogere waarden gevonden worden omdat veel bevingen langs een breuklijn verwacht worden op te treden. Dit wordt in deze 1^e fase studie niet nader beschouwd ; echter het verdient aanbeveling hier nader onderzoek naar te doen .

Om een bovengrens af te tasten is in de berekeningen in de navolgende hoofdstukken gebruik gemaakt van constante waarden van de partiticoëfficiënten van resp. 0,01, 0,1 en 1, dit om de invloed op de magnitude te bestuderen van de beperkte onzekerheidsband wanneer slechts 3 jaar vooruit gekeken wordt.



Figuur 4.2. Reproductie van Fig. 20 van Bourne en Oates [NAM 2013], maar nu met compactie berekend met het RTiCM model en alle $M \geq 1,5$ bevingen tot en met 2013. De lijn in het plaatje rechtsonder is die uit [TNO 2014].

5 Combinatie compactie- en breukenmodel

Grote aardbevingen zullen langs bestaande breuken plaatsvinden, zie hoofdstuk 6 in [TNO 2013]. Microseismiciteit kan overal plaatsvinden door het verbreken van o.a. korrelcontacten in het zandsteen. Bevingen met middelgrote magnitudes kunnen ontstaan door lokale inhomogeniteiten in het gesteente.

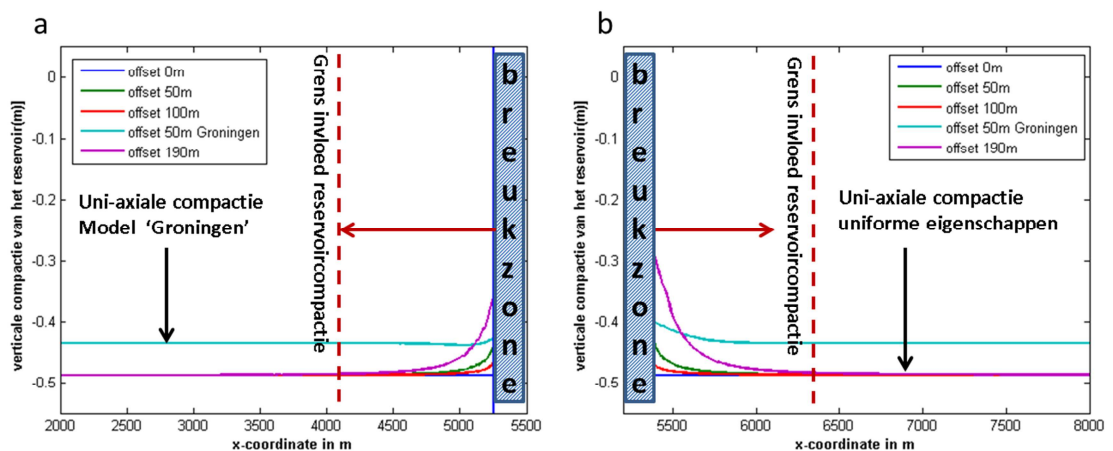
Daarom wordt hier een eerste poging gedaan compactiemodellen en breukenmodellen te combineren op basis van [TNO 2013].

Doel van dit hoofdstuk is het vaststellen van de afkapwaarde (maximale magnitude) in de verdelingsfunctie van de magnitude met fysisch plausibele argumenten. In dit hoofdstuk wordt de stap via een GMPE naar PGA waarden niet gemaakt.

5.1 Koppeling breuken en compactie

In [TNO 2013] is met eindige elementenberekeningen nagegaan, binnen welke invloedszone rondom een breukvlak de compactie bij kan dragen aan het seismisch moment voor een beving op het breukvlak. Het resultaat is weergegeven in Figuur 5.1.

Uitgangspunt van de berekeningen is dat grotere aardbevingen alleen kunnen ontstaan op bestaande breukvlakken. Het model bestaat uit een homogene reservoirlaag aan weerszijden van een breuk met een helling van 70 graden en een verzet (offset). Er wordt een drukdepletie in de reservoirlaag opgelegd en berekend wat dan de compactie is.



Figuur 5.1 Zone invloed reservoircompactie op seismisch moment uit [TNO 2013].

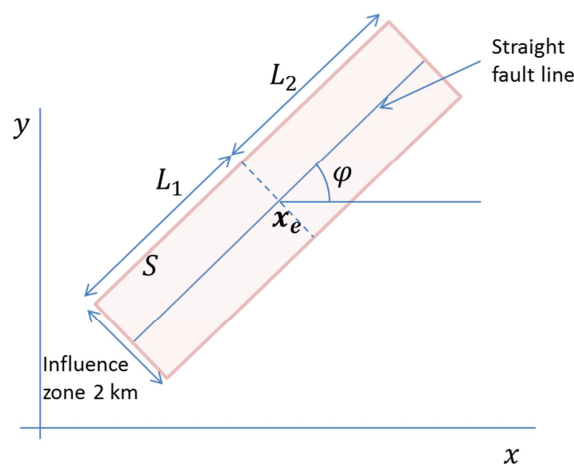
Op een afstand van circa 1 km van de breuk is de compactie gelijk aan de één-dimensionale compactie die zou optreden in een homogene horizontale reservoirlaag. Dichtbij de breuk is de compactie minder. Als er geen verzet is (blauwe lijn) heeft de breuk geen enkel effect en is de compactie overal gelijk aan de één-dimensionale compactie. Hoe groter het verzet is, hoe meer de compactie reduceert nabij de breuk. Hier "hangt" de reservoirlaag als het ware aan de breuk en kan niet geheel compacteren. Als de breuk volledig glad (frictieloos) zou zijn, zou de compactie het één-dimensionale beeld geven. Deze één-dimensionale compactie is het resultaat van een stabiel evenwicht. Wanneer de breuk afschuift en een beving genereert, dan vergroot de compactie weer richting het stabiele evenwicht.

Dit betekent dat de zone waar dit evenwicht bestaat niet bijdraagt aan het seismisch moment. In de berekeningen (Figuur 5.1) is dit het geval voor afstanden groter dan 1 km van de breuk voor alle onderzochte verzetten. Binnen deze 1 km zone draagt ook niet alle compactie bij aan het seismisch moment. Het maximale verschil tussen compactie binnen de 1 km zone en de één dimensionale compactie vindt plaats op het breukvlak zelf en is groter naarmate de offset groter is. In Figuur 6.1 is voor een offset van 190 m (dit is groter dan in het Groningen veld bestaat) de compactie op het breukvlak ongeveer 0,28 m, terwijl de één dimensionale compactie verder weg 0,48 m is. De compactie die mogelijk kan optreden door een beving in dit modelvoorbeeld is $0,48 - 0,28 = 0,2$ m. Dus maximaal $0,2/0,48 = 42\%$ van de compactie kan nog optreden als verplaatsing. Dit neemt af tot nul bij 1 km en is ook kleiner voor kleinere verzetten.

In dit rapport worden breuken bestudeerd met een 1 km invloedzone aan beide zijden van de breuk en wordt het reservoirmoment binnen deze zone berekend. Het niet volledig bijdragen van de compactie binnen deze 1 km zone wordt verdisconteerd in de partiticoëfficiënt en niet met expliciete functies.

5.2 Definitie van breuken en invloedzone

Het bovenstaande (paragraaf 5.1) is gebruikt voor het definiëren van het integratiegebied S voor het berekenen van het reservoirmoment in vergelijking (3). Laat een aardbeving plaatsvinden op locatie $\mathbf{x}_e = (x_e, y_e)$. Op deze locatie bevindt zich een breuk onder een hoek φ met de x -as. De breuk heeft lengte $L = L_1 + L_2$, waarbij L in de simulaties kan worden gevarieerd. In dit rapport wordt aangenomen dat $L_1 = L_2$. De zone van 1 km aan beide zijden van de breuk bepaalt dan het integratiegebied S .



Figuur 5.2. Breuk en invloedzone voor het definiëren van het integratiegebied S gebruikt in de berekeningen.

Als de oriëntatie van breuken onbekend is kan de hoek φ in stappen geroteerd worden en bepaald worden voor welke hoek het reservoirmoment maximaal is voor de locatie \mathbf{x}_e . Gerekend is met alle hoeken tussen 0 en 180 graden in stappen van 1 graad om een maximum voor het reservoirmoment te vinden. Is de breukoriëntatie bekend dan kan deze uiteraard als randvoorwaarde worden gebruikt.

5.3 Berekeningswijze voor maximale magnitude

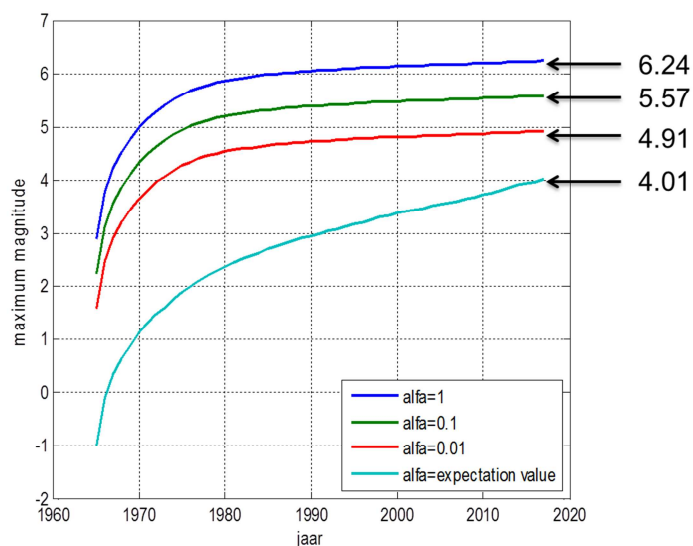
Voor een aantal varianten van het integratiegebied S en de partiticoëfficiënt $\alpha_f(\Delta h)$ is het reservoirmoment berekend met vergelijking (3) en omgerekend naar magnitude met vergelijking (2). Eerst wordt het hele Groningen reservoir als integratiegebied gebruikt met een partiticoëfficiënt om het maximum reservoirmoment dat überhaupt mogelijk is te bepalen samen met de daaruit volgende (overigens onrealistische) bovengrens voor de maximum magnitude. Daarna wordt gewerkt met lagere partiticoëfficiënten en later met breuken met verschillende lengtes als integratiegebied.

Belangrijke uitgangspunten voor de analyses in dit hoofdstuk zijn het gebruik van het RTiCM compactiemodel en het gasproductie scenario conform het kabinetsbesluit uit [TNO 2014].

In de berekening met de verwachtingswaarden van de partiticoëfficiënt wordt in de beschouwde invloedzone de compactie-afhankelijke waarde uit uitdrukking (4) genomen. Bij een bovengrensbenadering (partiticoëfficiënt 0,01 of 0,1) wordt de partiticoëfficiënt toegepast op de gehele beschouwde invloedzone; dit is een conservatieve aanname omdat de gehele invloedzone van een lange breuk door het gehele gebied alleen die delen van de invloedzone met hoge compactiewaarden te maken hebben met de grote partiticoëfficiënt; voor de overige gebieden geldt een partiticoëfficiënt die vele malen kleiner is (zie ook Fig. 4.2) .

5.4 Gehele reservoir als integratiegebied voor het reservoirmoment

Onderstaande figuur 5.3 toont de maximum magnitude in de tijd als de totale compactie gebruikt wordt om het reservoirmoment te berekenen voor het gehele reservoir met constante waarden voor de partiticoëfficiënten: 1, 0,1, 0,01 dan wel de verwachtingswaarde van de partiticoëfficiënt op basis van relatie in paragraaf 4.3..



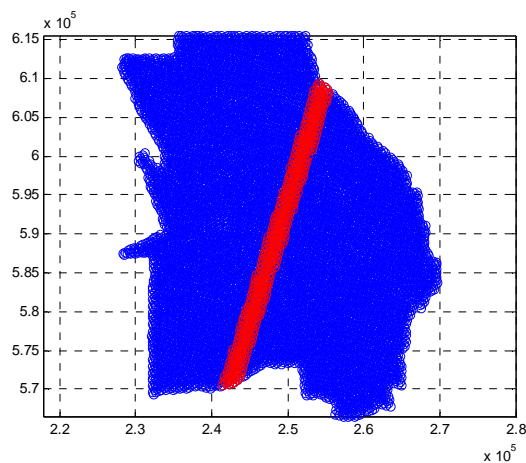
Figuur 5.3. Maximum magnitude berekend op basis van het totaal reservoirmoment in het hele veld als functie van tijd voor vier partiticoëfficiënten.

In deze berekeningen is het totale reservoirmoment gedeeld door 2 alvorens de magnitude te berekenen met vergelijking (2). Magnitudes zijn verdeeld volgens de Gutenberg-Richter relatie. Bourne en Oates hebben berekend (vergelijking 14 in [NAM 2013]), dat wanneer deze verdeling genomen wordt het totaal reservoirmoment 2 maal het reservoirmoment is behorende bij de beving met maximum magnitude.

Wanneer breuken met invloedszones genomen worden als integratiegebied geldt dit mogelijk niet meer, omdat elders in het veld nog reservoirmoment beschikbaar is voor bevingen zodanig dat de Gutenberg Richter relatie over het gehele veld gerealiseerd kan worden. Indien voor een smalle invloedszone rondom een breuk ook de Gutenberg Richter relatie zou moeten gelden (hetgeen moeilijk vast te stellen is) zou ook in dat geval het totale moment behorende bij de invloedszone gedeeld moeten worden door 2 alvorens de magnitude te berekenen. Hier wordt vooralsnog niet van uit gegaan. Hierdoor zijn de maximale magnitudes 0.2 magnitudepunt hoger dan als deze aanname wel gedaan kan worden. Dit is dus een conservatieve aanname (verhoging van de M_{\max}).

5.5 Reservoirmoment voor breuken met 1 km invloedszone met willekeurige oriëntatie

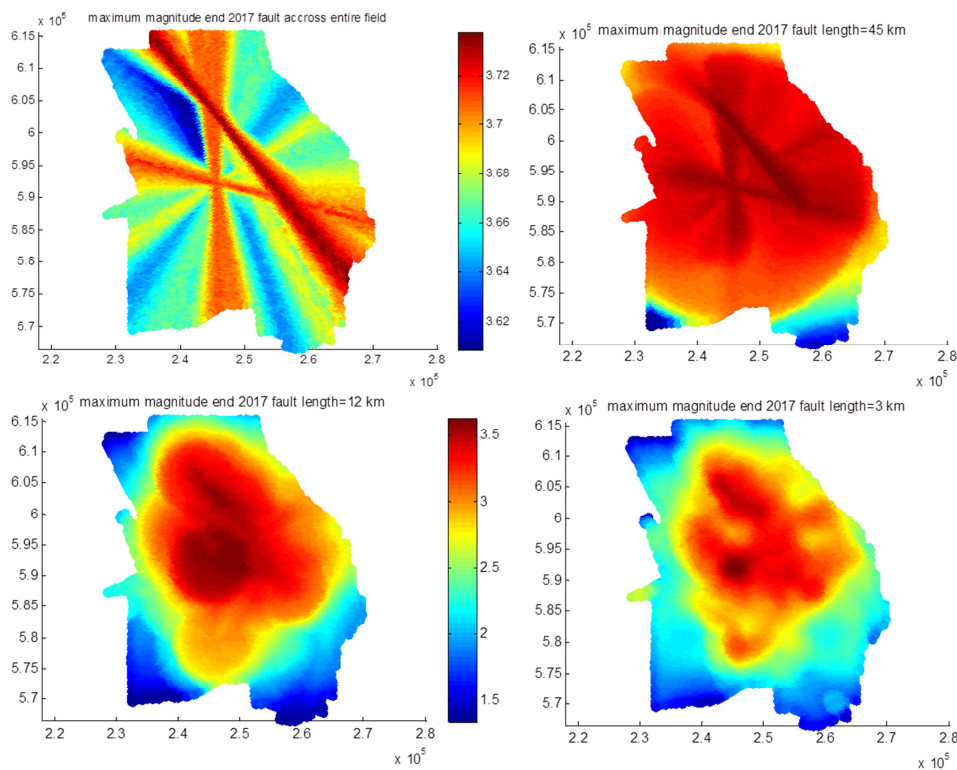
De compactie is berekend in 9070 cellen van het reservoir [TNO2013, TNO2014]. Het centrum van ieder van deze cellen is als punt x_e gekozen waar een aardbeving plaats kan vinden en is zoals in figuur 6.2 een breuk gedefinieerd in dit punt. Vervolgens is de hoek van de breuk onder geroteerd over 180 graden in stappen van 1 graad en voor ieder van deze hoeken is het reservoirmoment berekend met vergelijking 3 waarbij het integratiegebied S bepaald is door voor een zekere breuklengte L te nemen met 1 km invloedszone aan beide zijden van de breuk. Onderstaande figuur toont een voorbeeld van een breuk die het hele veld doorsnijdt bij een hoek van 72 graden met de horizontaal.



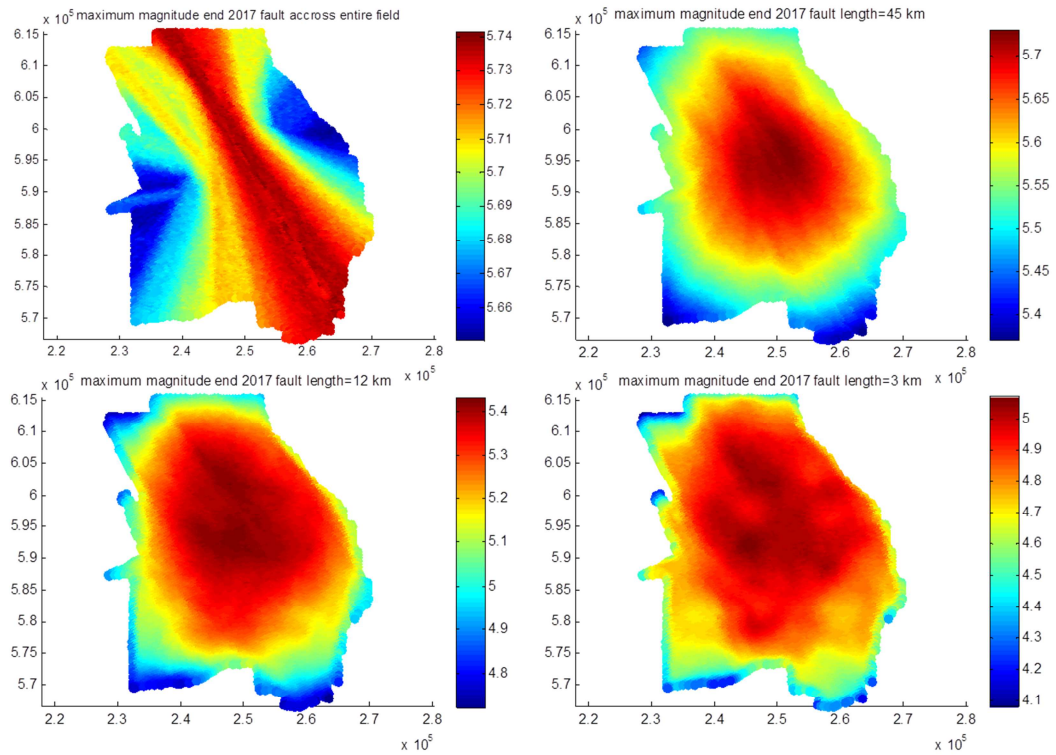
Figuur 5.4. Breuk en invloedszone voor een breuk die het hele veld doorsnijdt onder een hoek van 72 graden met de breedtegraad.

Voor een gegeven breuklengte wordt voor iedere oriëntatie het reservoirmoment berekend en de corresponderende magnitude volgens vergelijking 2. Het maximum van deze magnitudes is opgeslagen als de maximum magnitude in dit punt x_e . Het proces wordt herhaald voor alle 9070 punten in het reservoir. De berekeningen zijn gemaakt voor de totale compactie vanaf 1964 tot en met 2017. Er zijn geen berekeningen uitgevoerd voor tussenliggende tijdsmomenten.

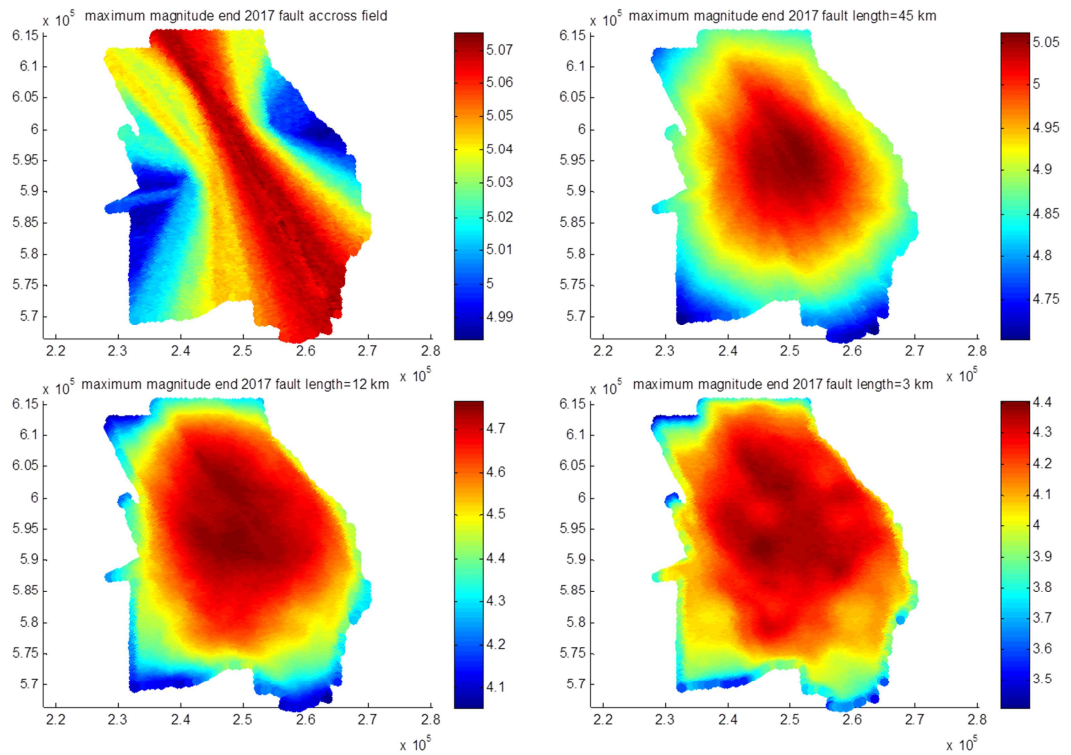
De Figuren 5.5 tot en met 5.8 tonen de resultaten voor breuklengtes van 3 km, 12 km, 45 km en een breuk door het hele veld heen. Figuur 5.5 laat de resultaten zien voor de verwachtingswaarde van de compactie afhankelijke partiticoëfficiëntfunctie volgens [TNO 2014]. Figuren 5.6, 5.7 en 5.8 laten resultaten zien voor constante waarden van de partiticoëfficiënt van respectievelijk 1, 0,1 en 0,01.



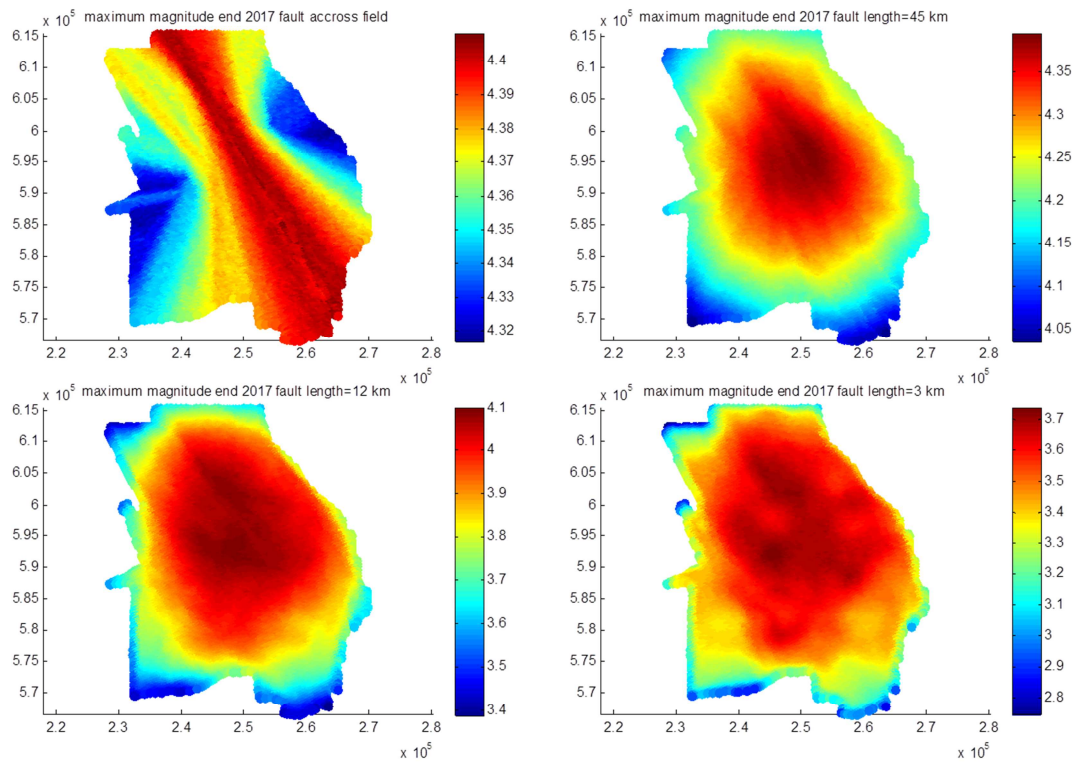
Figuur 5.5. Maximum magnitudes op basis van reservoirmoment berekend met de verwachtingswaarde voor de partitionering voor willekeurige georiënteerde breuken met lengtes 45, 12, 3 km en door het hele veld.



Figuur 5.6. Maximum magnitudes op basis van reservoirmoment berekend voor partitiescoëfficiënt 1 voor willekeurige georiënteerde breuken met lengtes 45, 12, 3 km en door het hele veld.



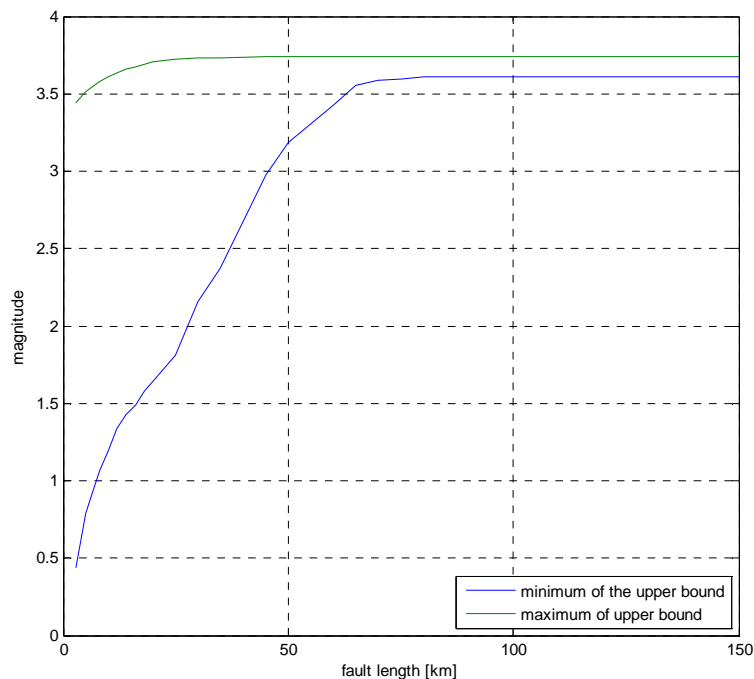
Figuur 5.7. Maximum magnitudes op basis van reservoirmoment berekend voor partiticoëfficiënt 0,1 voor willekeurige georiënteerde breuken met lengtes 45, 12, 3 km en door het hele veld.



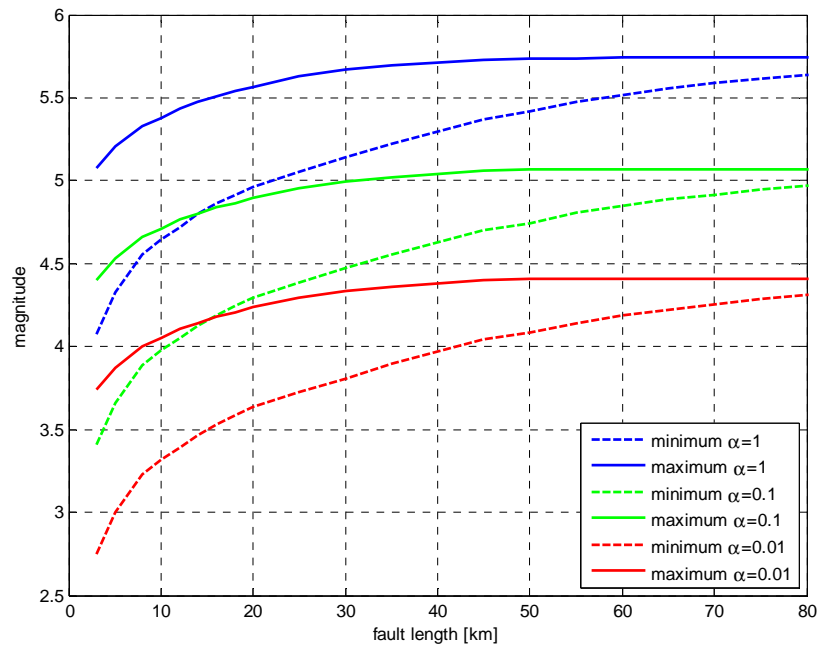
Figuur 5.8. Maximum magnitudes op basis van reservoirmoment berekend voor partiticoëfficiënt 0,01 voor willekeurige georiënteerde breuken met lengtes 45, 12, 3 km en door het hele veld.

Uit de figuren blijkt dat met afnemende breuklengte het verschil tussen magnitudes in het centrum van het veld en aan de rand groter wordt. De maximum magnitude in het centrum van het veld varieert niet significant in het geval van de verwachtingswaarde van de partitiescoëfficiënt, zie Figuur 5.5. Dit komt doordat de partiticoëfficiënt exponentieel toeneemt met de compactie en dus in het centrum van het veld bijna twee orders hoger ligt in vergelijking met de randen (zie ook [TNO, 2014]). Voor een breuk die door het centrum van het veld loopt, dragen de gedeelten verder weg van het centrum nauwelijks bij aan het reservoirmoment vanwege de geringe compactie. Dit verschijnsel is inzichtelijk gemaakt door voor iedere doorgerekende breuklengte de maximum magnitude in het centrum en die aan de rand te plotten (Figuren 5.9 en 5.10).

De vraag kan gesteld worden bij welke breuklengtes of aspectratio's van het breukvlak de aardbeving nog als puntbron gezien kan worden (dit is de aanname in de PSHA en de gebruikte GMPE), ook in ogenschouw nemend dat de bevingen plaatsvinden op circa 3 km diepte. 3 km lijkt hier een redelijke waarde, bij een breuklengte van 12 km kan eigenlijk niet meer gesproken worden over een puntbron. Door dit toch als een puntbron te beschouwen wordt een overschatting verkregen van de PGA's (peak ground acceleration). Dit is dus een zeer conservatieve bovengrens.



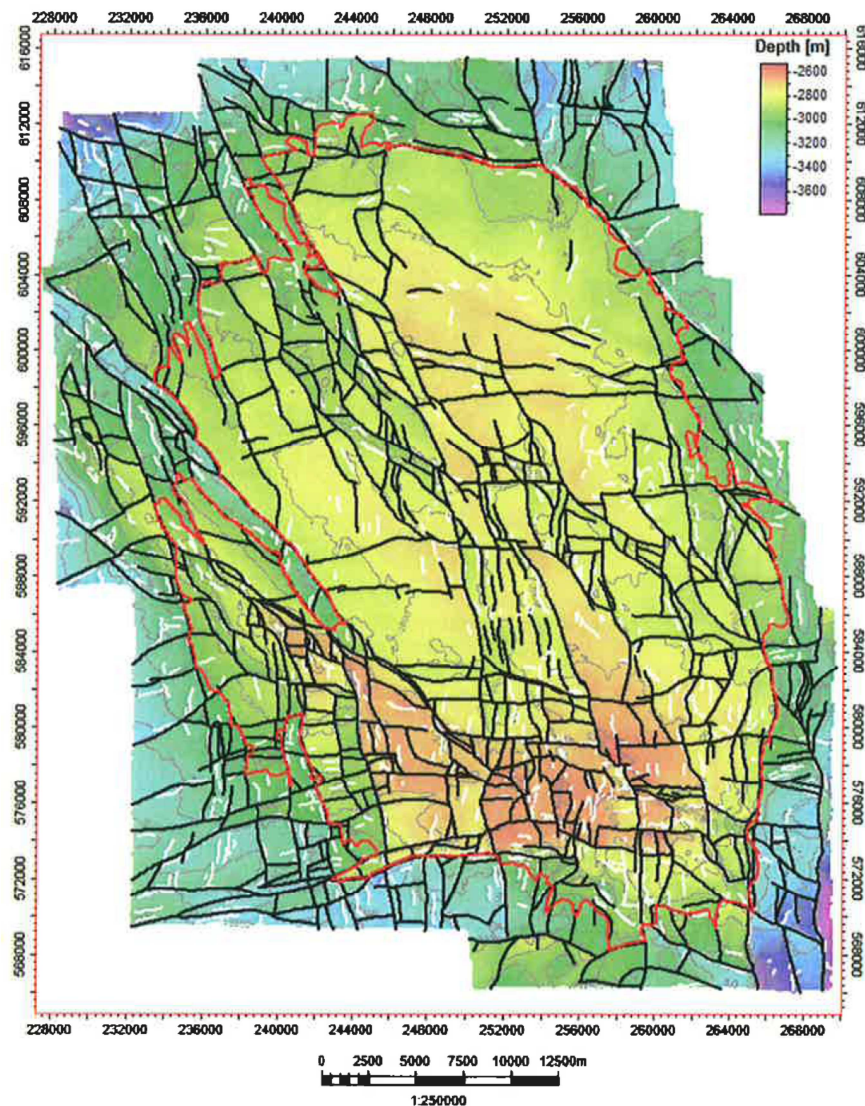
Figuur 5.9. Maximum en minimum van de bovengrens magnitude op basis van reservoirmoment berekend met de verwachtingswaarde voor partiticoëfficiënt als functie van de breuklengte.



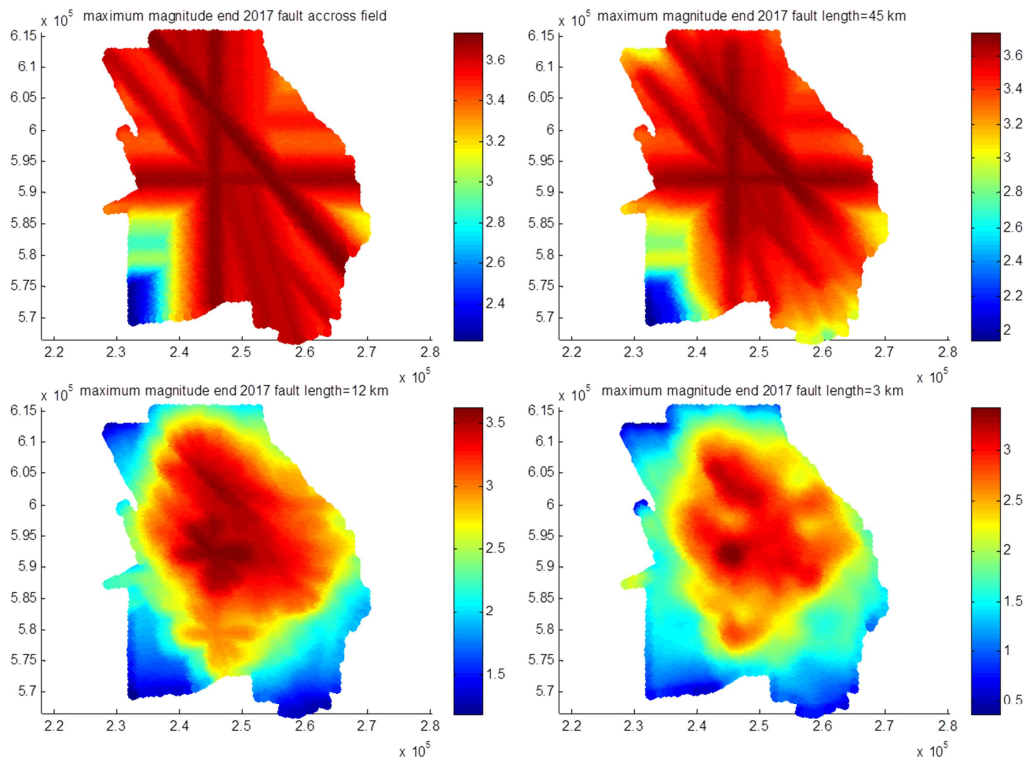
Figuur 5.10. Maximum en minimum van de bovengrens magnitude op basis van reservoirmoment berekend voor partitiescoëfficiënten 1, 0,1 en 0,01 als functie van de breuklengte.

5.6 Reservoirmoment voor breuken met 1 km invloedzone en met de oriëntaties zoals voorkomend in het Groningen

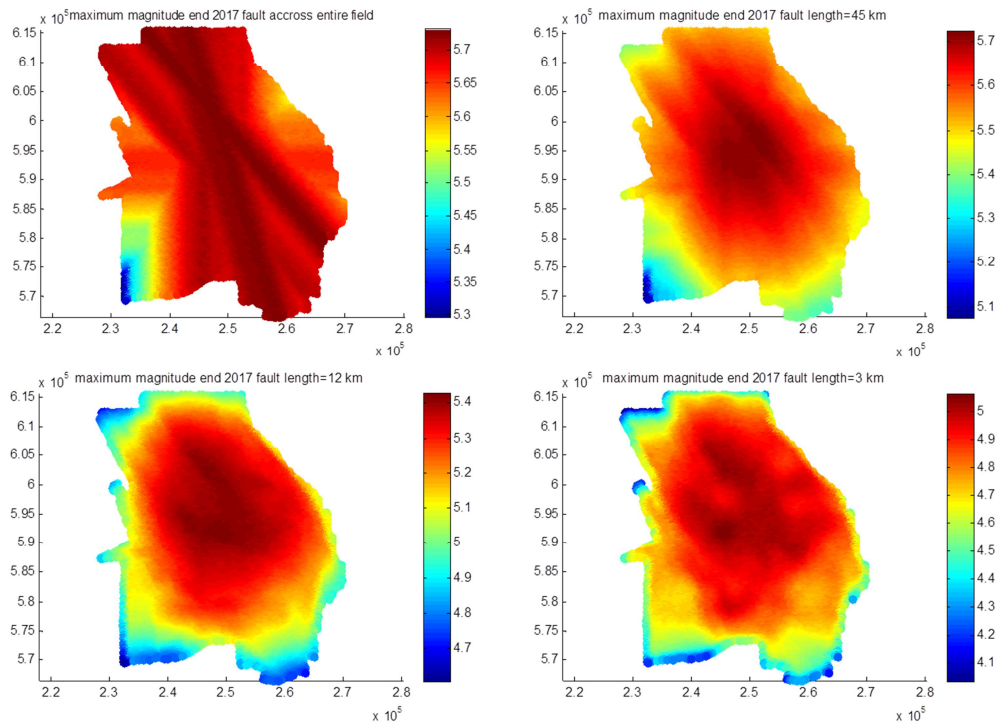
Figuur 5.11 (afkomstig uit [TNO 2013]) laat de breuken in het Groningenveld zien die opgenomen zijn in het geologische model. Breuken zijn veelal NNW-ZZO en Oost-West georiënteerd. Een aantal grote breuken zijn zichtbaar met een hoek van 107 graden of 130 graden met de x-as. In de berekening van het reservoirmoment worden breukoriëntaties met hoeken: 0, 90, 107 en 130 graden meegenomen, als zijnde representatief voor het Groningen veld. Figuren 5.12, 5.13, 5.14 en 5.15 tonen de resultaten voor respectievelijk de gemiddelde waarde van de partiticoëfficiënt, partiticoëfficiënt 1 (alle compactie-energie komt vrij in de vorm van bevingen), partiticoëfficiënt 0,1 en partiticoëfficiënt 0,01. Te zien is dat de maximum magnitude niet sterk wijzigt met deze oriëntaties, maar dat deze aan de randen sterker varieert. Figuur 5.16 en Figuur 5.17 laat het minimum en maximum van deze (bovengrens van de) magnitudes zien als functie van de breuklengte. Deze figuren laat een groter verschil tussen magnitudes in het centrum en aan de rand zien dan Figuur 5.9 en 5.10.



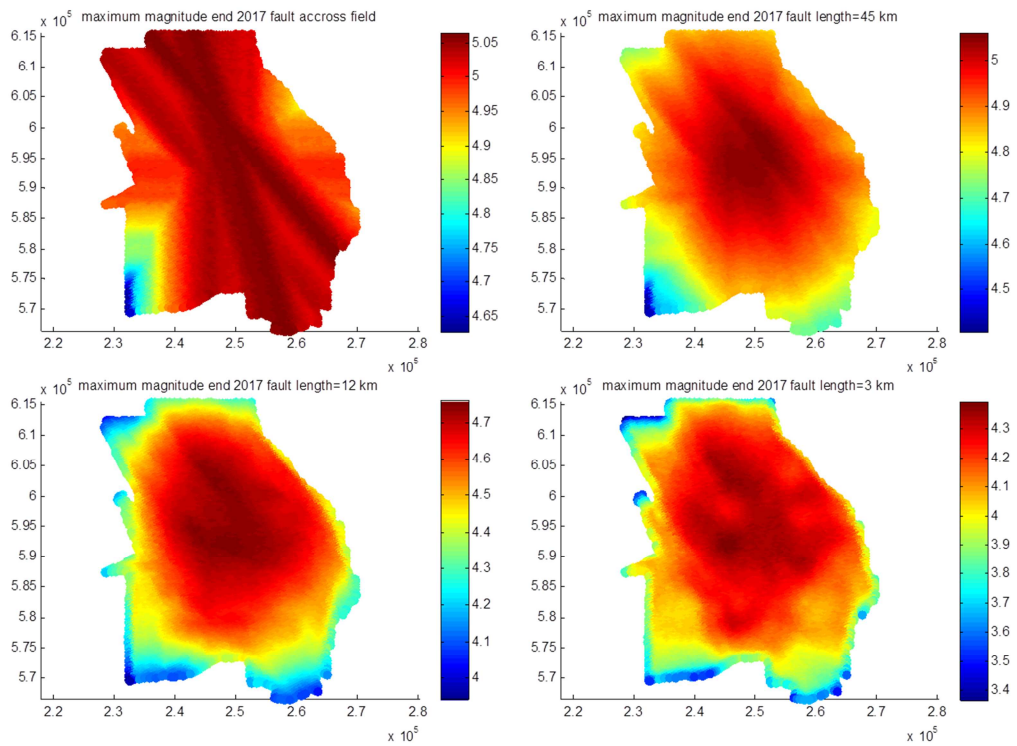
Figuur 5.11. Top Rotligend dieptekaart met de gemodelleerde breuken (zwart) en de additionele breuken (wit).



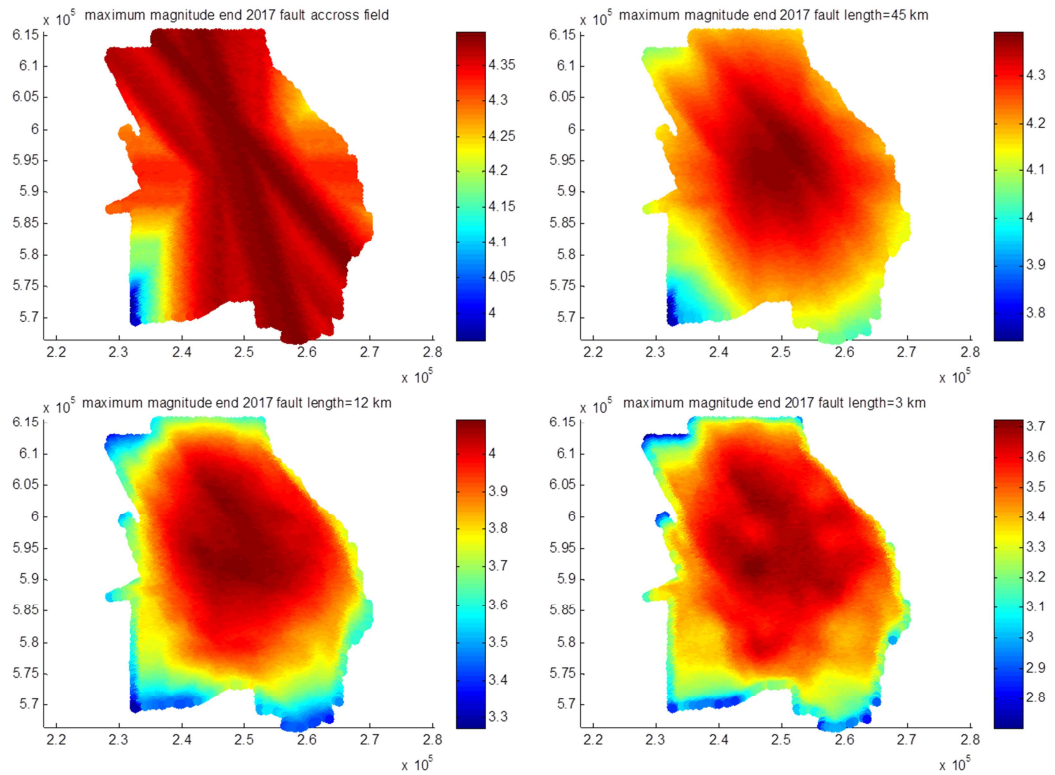
Figuur 5.12. Maximum magnitudes op basis van reservoirmoment berekend voor de verwachtingswaarde van de partiticoëfficiënt voor breuken met oriëntaties voorkomend in het Groningen veld met lengtes 45, 12, 3 km en door het hele veld.



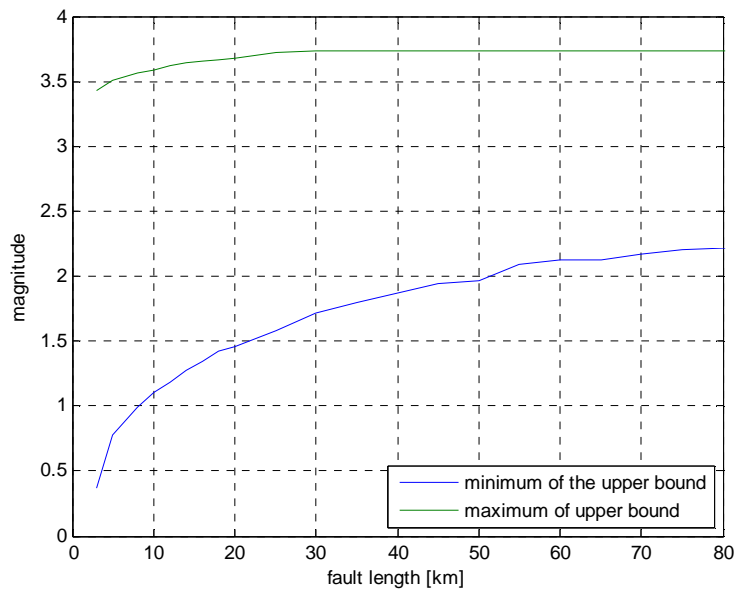
Figuur 5.13. Maximum magnitudes op basis van reservoirmoment berekend voor partiticoëfficiënt 1 voor breuken met oriëntaties voorkomend in het Groningen veld met lengtes 45, 12, 3 km en door het hele veld.



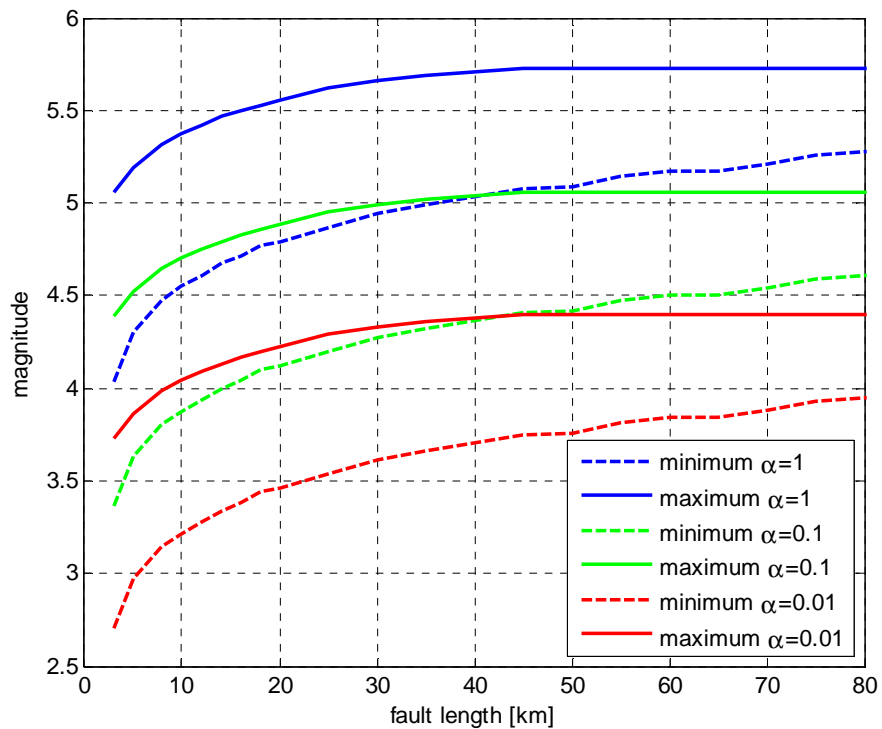
Figuur 5.14. Maximum magnitudes op basis van reservoirmoment berekend voor partiticoëfficiënt 0,1 voor breuken met oriëntaties voorkomend in het Groningen veld met lengtes 45, 12, 3 km en door het hele veld.



Figuur 5.15. Maximum magnitudes op basis van reservoirmoment berekend voor partiticoëfficiënt 0,01 voor breuken met oriëntaties voorkomend in het Groningen veld met lengtes 45, 12, 3 km en door het hele veld.



Figuur 5.16. Maximum en minimum van de bovengrens magnitude op basis van reservoirmoment berekend voor de verwachtingswaarde van de partiticoëfficiënt voor breuken met oriëntaties voorkomend in het Groningen veld als functie van de breuklengte.



Figuur 5.17. Maximum en minimum van de bovengrens magnitude op basis van reservoirmoment berekend voor partiticoëfficiënten 1, 0,1 en 0,01 voor breuken met oriëntaties voorkomend in het Groningen veld als functie van de breuklengte.

6 Aantal aardbevingen per jaar na productiebeperking

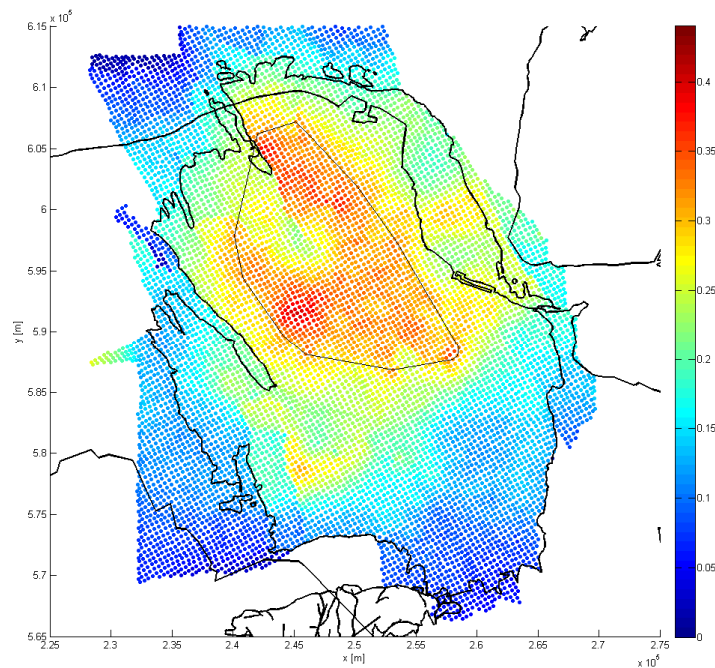
In [TNO 2014b] wordt het aantal aardbevingen in de verschillende zone's van het Groningen aardbevingsgebied geanalyseerd. Door middel van statistische analyses wordt gekeken naar een mogelijke invloed van de productiebeperking in het Loppersum cluster. Hieronder wordt een eerste indicatie gegeven van de stand van zaken tot en met de eerste helft van 2014.

In tabel 6.1 wordt een overzicht gegeven van alle geobserveerde bevingen ($M \geq 1.5$) in het Groningenveld in 2011, 2012, 2013 en 2014.

Tabel 6.1: Overzicht van de aantallen bevingen in het Groningengasveld in de jaren 2011, 2012, 2013 en 2014, onderverdeeld naar de eerste twee kwartalen (Q1 en Q2) en het eerste half jaar (Q1+Q2).

Bevingen $M \geq 1,5$	2011	2012	2013	2014
Q1	6	10	14	8
Q2	7	7	0	2
Q1+Q2	13	17	14	10

Het lijkt erop dat de stijging van het aantal bevingen is omgezet in mogelijk een daling van het aantal aardbevingen.



Figuur 6.1. Compactie in januari 2014 met het polygoon (zwart) die het Loppersum gebied definieert. Het polygoon is de omhullende van alle cellen met een compactie groter dan 32 cm in 2014.

In Tabel 6.2 is voor het centrumgebied (Loppersum) hetzelfde overzicht gegeven. De regio Loppersum is het gebied waar half januari 2014 de productie in de clusters met 80% is gereduceerd. De regio is hier gedefinieerd door de omhullende van de punten die in januari 2014 een compactie groter dan 32 cm hebben (Figuur 6.1). In de regio Loppersum laat de seismiciteit tot en met het tweede kwartaal een afname zien van het aantal bevingen met magnitude > 1,5.

Tabel 6.2: Overzicht van de aantallen bevingen in de regio Loppersum in de jaren 2011, 2012, 2013 en 2014, onderverdeeld naar de eerste twee kwartalen en het eerste half jaar.

Bevingen M\geq1,5	2011	2012	2013	2014
Q1	3	4	8	3
Q2	3	4	0	1
Q1+Q2	6	8	8	4

De daling van het aantal aardbevingen vindt vooral plaats in het centrumgebied, zoals verwacht vanwege de productieverlaging aldaar. In andere locaties is het beeld gelijk gebleven of zeer licht gestegen, zoals verwacht vanwege de gelijke of iets gestegen (3 mld m³) productie aldaar [TNO 2014b].

Bovenstaande informatie lijkt erop te wijzen dat de KNMI aanname in de PSHA mogelijk conservatief is ($\lambda=40$ waarvan een groot aantal in het centrumgebied), echter de tijdsperiode waarin de daling wordt waargenomen is beperkt. Het werken met het aantal uit 2013 ($\lambda=27$) lijkt op dit moment een redelijke aanname voor 2017 [TNO 2014b].

7 Conclusies

In dit rapport is aangetoond dat compactiemodellen in de PSHA tot het inzicht kunnen leiden wat het effect is van maatregelen in de productie op de PGA waarden. Een eerste poging is gedaan een compactiemodel en een breukenmodel te combineren. Het verdient de aanbeveling dit model nader uit te werken.

Voor de korte termijn NPR 9998 is de opzet van het PSHA volgens de KNMI methode aan te bevelen met enkele wijzigingen welke hieronder genoemd zijn. De hier uiteindelijke geadviseerde waarden zijn een tijdelijke oplossing welke voor een korte tijd in de NPR 9998 geïmplementeerd worden.

Tabel 7.1 geeft een overzicht van de maximum magnitude voor het centrumgebied zoals deze berekend is voor de verschillende gevallen.

Tabel 7.1: Overzicht maximale magnitude

Partiticoëfficiënt	Maximum magnitude bij breuk door hele veld	Maximum magnitude bij breuk door hele veld (Groningen oriëntatie)	Maximum magnitude bij 12 km breuk
0,01	4,4	4,4	4,1
0,1	5,0	5,0	4,7

In dit rapport is getoond dat de nu waargenomen partiticoëfficiënt laag is, deze varieert van ordegrootte 10^{-6} tot 10^{-3} (de hoogste waargenomen waarde bij de grootste compactie). Met name waar het gaat om het afleiden van de maximale magnitude voor een korte zichtperiode, lijkt voor het bepalen van M_{\max} een bovengrens van 0,01 of 0,1 een conservatieve aanname.

Dat een beving wordt gegenereerd door een breukbeweging door het gehele veld wordt als onrealistisch gezien vanwege de aspectratio van het breukvlak; 12 km lengte wordt in dit kader als conservatief maximum gezien. Een oriëntering volgens de bestaande breuklijnen wordt meest realistisch gezien.

Bovenstaande argumenten leveren een maximale magnitude tussen de 4,1 en 4,7 voor het centrumgebied. Aanbevolen wordt in de PSHA een verdelingsfunctie voor M_{\max} aan te houden; dit wordt ook geadviseerd in de JCSS Probabilistic Model Code. Het voorlopig aanhouden van $M_{\max}=4,5$ voor de korte termijn zou ook een mogelijkheid kunnen zijn voor het centrumgebied.

Voor de randgebieden varieert M_{\max} tussen de ongeveer 3,5 en 4,0.

Het aanhouden van $M_{\max}=5,0$ lijkt voor de korte periode waarin vooruit gekeken wordt (tot het niveau van compactie in 2017) een te conservatieve benadering; voor langere zichtperiodes (meer compactie en dus meer seismiciteit) is deze aanname mogelijk wel redelijk; dit dient nader uitgezocht te worden.

Voor het aantal aardbevingen per jaar λ lijkt een extrapolatie naar de toekomst met exponentieel meer aardbevingen per jaar niet voor de hand te liggen. Het werken met het

aantal uit 2013 ($\lambda=27$) lijkt een redelijke aanname tot 2017. De door het KNMI aangehouden differentiatie in aantallen tussen de verschillende gebieden zou mogelijk ook aangepast kunnen worden aan de nieuwe verhoudingen in de waargenomen 'rate' in de verschillende zones.

De deterministische hazard analyse in Fig. 2.5 levert bij een verlaging van M van 5,0 naar 4,75 een reductie in de orde van grootte van 10-20% van de PGA waarden. Het is moeilijk te voorspellen wat precies het effect van het introduceren van een verdelingsfunctie voor M_{\max} of een lagere M_{\max} in de PSHA is; zeker is dat de PGA waarden omlaag gaan omdat ook lagere waarden dan M_{\max} gaan bijdragen aan de hazard. Gebaseerd op de door het KNMI uitgevoerde gevoeligheidsstudie in Fig. 2.5 lijkt een verlaging van M_{\max} van 5,0 naar bovengenoemde waarden de piekgrondversnellingen aan het maaiveld met orde grootte 10-20% te verlagen. Een nieuw uit te voeren PSHA moet deze voorlopige waarde nog bevestigen.

8 Literatuur

[KNMI 2013] T. van Eck, M. Caccavale, B. Dost, D. Kraaijpoel, Probabilistic Seismic Hazard Analysis Induced Earthquakes Groningen, KNMI, December 2013 / March 2014.

[KNMI 2013b] The August 16, 2012 earthquake near Huizinge (Groningen) Bernard Dost and Dirk Kraaijpoel

[KNMI 2014] Note KNMI "Discussion PGA values for the town Groningen" Response to TNO note 11/4/2014. 25/4/2014; Torild van Eck, Mauro Caccavale, Bernard Dost

[NAM 2013] S.J. Bourne, S. Oates, Induced strain and induced earthquakes withing the Groningen Gas Field: Earthquake probability estimates associated with future gas production, 29 april, 2013.

[NAM 2013b] Wijziging winningsplan Groningen 2013, inclusief technische bijlage Groningen winningsplan 2013. Versie 29 november 2013.

[Kostrov 1974] V.V. Kostrov, Seismic moment and energy of earthquakes, and seismic flow of rocks. Izv. Acad. Sci. USSR PHys. Solid Earth, 1, Eng. Transl. 23-44.

[TNO 2013] TNO, Toetsing van de bodemdalingsprognoses en seismische hazard ten gevolge van gaswinning van het Groningen veld, december 2013, rapport TNO 2013 R11953

[TNO 2014] K. van Thienen-Visser, J.N. Breunese, Technisch rapport behorende bij "Effecten verschillende productiescenario's op de verdeling van compactie in het Groningen veld in de periode 2014 tot en met 2016", TNO rapport 2014 R10426, 7 maart 2014

[TNO 2014b] Rapport in voorbereiding, TNO rapport 2014 Rxxxx, 4 december 2014

[Hanks & Kanamori 1979] Hanks, T., Kanamori, H., 1979. Moment magnitude scale. Journal of Geophysical Research 84, 2348-2350,

KNMI, lijst van geïnduceerde bevingen <http://www.knmi.nl/seismologie/aardbevingen-nederland.html>

JCSS Probabilistic Model Code, <http://www.jcss.byg.dtu.dk/>

9 Ondertekening

Delft, 01-12-2014

TNO

Afdelingshoofd

Auteurs