



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

TNO innovation
for life

Retouradres Postbus 80015 3508 TA Utrecht

Ministerie van Economische Zaken
T.a.v. de heer [redacted]
Postbus 20401
2500 EK DEN HAAG
2500EK20401

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56

Onderwerp
Maximale magnitude Groningen veld

Geachte heer [redacted]

De definitie en het gebruik van de maximale magnitude in verschillende onderzoeken in het kader van de gaswinning Groningen levert in de praktijk verwarring op. Naar aanleiding daarvan heeft uw organisatie TNO en KNMI gevraagd (bespreking 13 maart 2017) een gezamenlijke notitie te schrijven om inzicht te bieden in de definitie en het gebruik van de maximale magnitude.

In de bijlage vind u deze notitie. In de hoop u hiermee van dienst te zijn geweest.

Hoogachtend,

Drs. [redacted]
Hoofd Adviesgroep Economische
Zaken, TNO

Prof. Dr. [redacted]
Vakgroepmanager R&D Seismology
and Acoustics, KNMI

Datum
8 juni 2017

Onze referentie
AGE 17-10.058

Contactpersoon
[redacted]

E-mail
[redacted]@tno.nl

Doorkiesnummer

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.
Op verzoek zenden wij u deze toe.

Handelsregisternummer: 27376655



Datum
8 juni 2017

Onze referentie
AGE 17-10 058

Blad
2/11

Definitie, bepaling en functie maximale magnitude in seismische hazard bepaling

1. Inleiding

Op verzoek van het Ministerie van Economische Zaken wordt in deze notitie van het KNMI en TNO ingegaan op het begrip maximale magnitude (M_{max}).

Achtereenvolgens worden behandeld:

- de definitie
- de methodes ter bepaling van de waarde van M_{max}
- de functie in de seismische hazard bepaling

Het Groningen gasveld dient als casus.

De notitie behandelt eerst de definitie van de maximale magnitude (Hoofdstuk 2) en gaat vervolgens in op de verschillende manieren, waarop deze kan worden bepaald (Hoofdstuk 3). In Hoofdstuk 4 wordt implementatie in een seismische hazard analyse toegelicht, terwijl Hoofdstuk 5 ingaat op hoe de maximale magnitude in praktische zin gebruikt wordt bij de veiligheidsbeoordeling van bouwwerken, installaties en infrastructuur in Groningen. Hoofdstuk 6 bevat een aantal aanbevelingen.

2. Definitie maximale magnitude

De maximale magnitude M_{max} is gedefinieerd als "de magnitude van de sterkst mogelijke aardbeving, die door een bron in een specifiek gebied gegenereerd kan worden"¹. M_{max} is de bovengrens in een frequentie-magnitude relatie². Daarnaast wordt M_{max} meestal beschouwd als een eigenschap van de diepe ondergrond^{3,4}.

¹ Wheeler, R.L., 2009, Methods of M_{max} Estimation East of the Rocky Mountains, USGS Open-File Report 2009-1018, 44 pp.

² Een veelgebruikte empirische vorm van frequentie-magnitude relatie heet Gutenberg-Richter.

³ Een alternatieve theorie (SOC, zie Ian Main, 'Earthquakes as critical phenomena: implications for probabilistic seismic hazard analysis' in Bulletin of the seismological Society of America, 85, p 1299-1308, 1995) beschouwt M_{max} niet als een systeemeigenschap, maar als een toestandsvariabele (vgl. de thermodynamica), waarvan de waarde afhangt van de specifieke spanningstoestand van het systeem. Deze theorie wordt hier niet verder behandeld.

⁴ In de literatuur wordt soms ook de verwachte maximale magnitude in een specifieke tijdsperiode gebruikt. Deze dient niet verward te worden met de maximale magnitude, zoals bedoeld in de definitie.



Datum
8 juni 2017

Onze referentie
AGE 17-10.058

Blad
3/11

3. Het bepalen van de maximale magnitude voor Groningen

Hoewel M_{\max} als systeemeigenschap een vaste waarde heeft, is die waarde van M_{\max} niet scherp te bepalen en kent deze een grote onzekerheid (model en kennis). De maximale magnitude kan op drie verschillende manieren worden bepaald, te weten op basis van statistiek, ondergrondkennis of analogieën. In de volgende paragrafen wordt hierop nader ingegaan.

3.1 Maximale magnitude op basis van statistiek

Het is mogelijk om op basis van een statistische analyse van een aardbevings-catalogus een waarde voor M_{\max} af te leiden. Indien nieuwe waarnemingen worden toegevoegd aan de catalogus, kan de afgeleide waarde van M_{\max} variëren.

Het KNMI heeft in verschillende rapporten de maximale magnitude bepaald voor Noord Nederland en Groningen (Dost et al., 2012). De laatst gepubliceerde schatting van M_{\max} op basis van een statistische berekening (Zöller en Holschneider, 2016) komt voor Groningen uit op een maximale magnitude van $M_{\max}=4,4$ met een overschrijdingskans van 10%.

3.2 Maximale magnitude op basis van kennis van de ondergrond

M_{\max} kan worden berekend op basis van een schatting van het in de ondergrond aanwezige breukoppervlak⁵ en veronderstelde mechanische eigenschappen daarvan. Het aanwezige breukoppervlak is bepalend voor de grootste bewegingen, die kunnen optreden. Om een goede indruk te krijgen van de in de tijd oplopende spanningen en het aanwezige breukoppervlak wordt gebruik gemaakt van geomechanische modellen. Gezien de omvang van het Groningen veld en de complexiteit van de breuken op diepte is het lastig om tot een eenduidige waarde voor M_{\max} te komen op basis van uitsluitend geomechanische modellering.

TNO (2015) berekent een maximale magnitude van het Groningen veld van 4,7 in het jaar 2017 en een maximale magnitude van 4,8 voor de gehele productieperiode. Deze berekeningen zijn gebaseerd op een beschouwing over compactie en breuken onder de aanname dat bewegingen op breuken zich beperken tot het gebied waar veranderingen in spanningen geheel worden bepaald door drukverlaging in het reservoir. Deze aanname is alleen geldig als er geen nabij kritische, natuurlijke spanningen op de Groningse breuken voorkomen.

3.3 Maximale magnitude op basis van analogieën

Kennis van analoge situaties bij andere gasvelden wereldwijd kunnen extra inzicht verschaffen over de maximale magnitude in Groningen, althans voor zover deze analoge situaties voldoende vergelijkbaar zijn met de situatie in Groningen. De mate waarin dit het geval is moet per geval beoordeeld worden.

⁵ Als in de ondergrond spanningen groter worden en daardoor een bepaalde grenswaarde overschreden wordt, dan zal een plotselinge verschuiving langs bestaande breuken plaatsvinden. Deze plotselinge verschuiving uit zich in een aardbeving.



Datum
8 juni 2017

Onze referentie
AGE 17-10.058

Blad
4/11

De laatste schatting van M_{max} door het KNMI (Dost et al., 2013) is gebaseerd op een literatuurstudie naar geïnduceerde bevingen door gas- en olieproductie in gebieden buiten Groningen. Het KNMI komt uit op een maximale magnitude van 5,0.

3.4 Getriggerde bevingen

Getriggerde bevingen kunnen alleen optreden, als de natuurlijke spanningen op de aanwezige breuken hoog zijn. En wel zo hoog, dat een beving, die begint in het reservoir, kan doorschieten onder of naast het reservoir. Als dit gebeurt komt een groter breukoppervlak in beweging tijdens een beving en dat leidt tot een sterkere beving.

In de historie in Groningen zijn geen natuurlijke aardbevingen geregistreerd. Het reservoir heeft vanaf het begin van de gaswinning tot 1991 geen bevingen en tot 2003 geen bevingen groter dan magnitude 3,0 laten zien. Deze observaties wijzen erop, dat de natuurlijke spanning in het gebied gering is. Dit is relevante informatie met het oog op de kans op het optreden van getriggerde bevingen (zie ook Van Wees et al., 2014 en DeDontney et al., 2016).

3.5 Combinatie van uitkomsten van de methodes

De NAM heeft een workshop georganiseerd met als doel om de onzekerheid in de waarde van de M_{max} van Groningen in beeld te brengen. De workshop is uitgevoerd volgens het internationaal geaccepteerde "Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC)" protocol (SSHAC, 1997). Door internationale experts is op basis van *expert judgement* een verdeling voor M_{max} voorgesteld, gebaseerd op enerzijds kennis van het Groningen gasveld en anderzijds analoge situaties bij olie- en gasvelden van overal ter wereld. De workshop maakte gebruik van beschikbare data (zowel internationale ervaringen als lokale data), methodieken (statistiek en geomechanica) en modelberekeningen (Bommer and Van Elk, 2017). De resultaten van de workshop zijn vastgelegd in "Report on M_{max} Expert workshop" (2016).

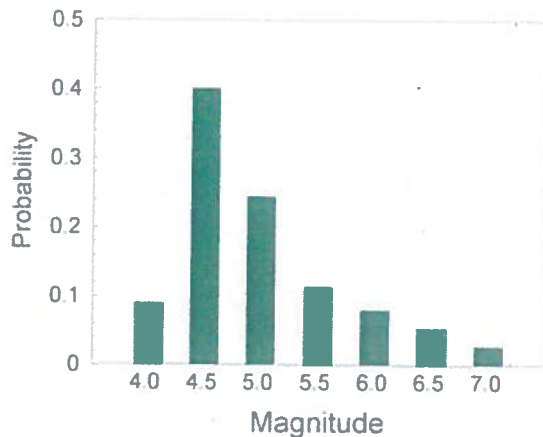
Er zijn drie verschillende verdelingen gepresenteerd met elk van de drie een zekere gewichtsfactor. De eerste verdeling is die, waarbij in een veldspecifieke beschouwing, bevingen alleen binnen het reservoir plaatsvinden (geïnduceerde seismiciteit). De tweede verdeling is die, waarbij in een veldspecifieke beschouwing, gekeken is naar bevingen die starten in het reservoir en propageren naar dieptes tot onder het reservoir (getriggerde bevingen). De derde verdeling is een niet-veldspecifieke beschouwing waarin gekeken is naar analoge situaties elders op de wereld. De door de internationale experts voorgestelde verdeling van M_{max} waarden is een combinatie van deze verdelingen en geeft de onzekerheid in de maximale magnitude weer (Figuur 1). In Figuur 1 is op de verticale as het relatieve gewicht uitgezet, dat aan een bepaalde maximale magnitude is toegekend door de experts tijdens de workshop.



Datum
8 juni 2017

Onze referentie
AGE 17-10.058

Blad
5/11



Figuur 1. Door expert team voorgestelde verdeling van M_{max} voor Groningen (Bommer and Van Elk, 2017) met de gewichtsfactoren.

Het expert team heeft aanbevelingen gedaan om de onzekerheid in M_{max} te reduceren. Deze aanbevelingen zijn o.a.: nadere bestudering van case histories van grotere bevingen geassocieerd met gaswinning wereldwijd, bepalen van accurate parameters van de ondergrond uit gemeten data door het seismisch netwerk, metingen uitvoeren en modelleren van spanningen in het reservoir en analyse van geodetische data.

De in de workshop voorgestelde verdeling (Figuur 1) kan gebruikt worden in probabilistische hazard berekeningen.

3.6 Winningsplan 2016

Voor de bepaling van de seismische hazard heeft de NAM in het winningsplan Groningen van april 2016 drie scenario's meegenomen: een maximale magnitude van 5; 5,75 en 6,5, waarbij elk scenario een gewicht van 0,33 heeft gekregen.

De NAM heeft toegezegd (winningsplan 2016), dat de resultaten van de expert workshop deel worden van het voortdurende studieprogramma van NAM.



Datum
8 juni 2017

Onze referentie
AGE 17-10.058

Blad
6/11

4. Functie van maximale magnitude in seismische hazard analyses

In dit hoofdstuk wordt de implementatie van de (verdelingsfunctie) van de maximale magnitude in de seismische hazard analyse toegelicht.

4.1 Veiligheidseis als startpunt

Startpunt van de seismische hazard en risicoanalyse is het vereiste niveau van veiligheid.

Een van de belangrijke parameters in een seismische hazard analyse is de keuze van de herhalingsstijd oftewel de kans op overschrijden van een bepaald trillingsniveau in een bepaalde periode. Een veel gebruikte herhalingsstijd is 475 jaar hetgeen identiek is aan een kans van 10% in 50 jaar of 0.2% per jaar. Afhankelijk van de toepassing en het vereiste niveau van veiligheid kan een hogere of lager waarde voor de herhalingsstijd worden vastgesteld.

4.2 Seismische hazard analyse

De maximale magnitude heeft betekenis indien geïmplementeerd in een probabilistische seismische hazard analyse (PSHA, zie b.v. <http://www.share-eu.org>)⁶. Behalve een keuze van M_{max} is voor de PSHA ook een Ground Motion Prediction Equation (GMPE) benodigd; deze legt het verband tussen magnitude op diepte en de grondversnelling aan het oppervlak. Daar er sprake is van natuurlijke variabiliteit van de eigenschappen van de ondergrond en van modelonzekerheden wordt ook bij de GMPE gebruik gemaakt van verdelingsfuncties van relevante input parameters. Het resultaat van de hazardanalyse is een kaart van de groundbeweging aan het maaiveld voor een gegeven overschrijdingskans van optreden van bevingen.

Opgemerkt wordt dat het gebruik van de grotere M_{max} waarden in de PSHA gepaard dient te gaan met een GMPE die recht doet aan het karakter van deze grote M_{max} waarden. GMPE en M_{max} verdeling dienen daarom niet los van elkaar beschouwd te worden.

4.3 Invloed maximale magnitude op uitkomsten hazardanalyse

Indien het vereiste veiligheidsniveau hoog is (belangrijke gebouwen, dijken, installaties met gevaarlijke stoffen), wordt voor een lange herhalingsstijd gekozen. Daarmee neemt de invloed van de grotere waarden van de maximale magnitude op de hazard berekeningen toe. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 2.

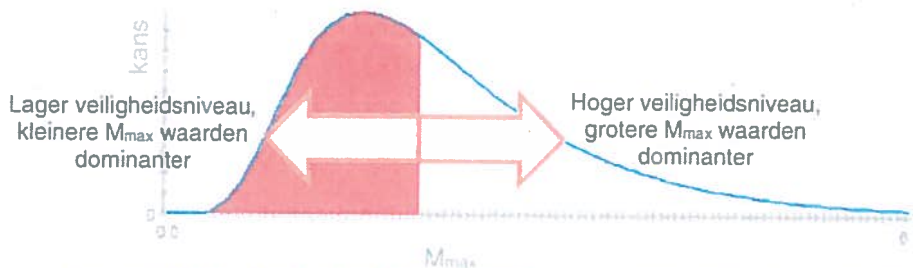
⁶ Hoewel bij SHARE uitsluitend tektonische aardbevingen worden meegenomen, kan de methodiek ook toegepast worden op geïnduceerde bevingen.



Datum
8 juni 2017

Onze referentie
AGE 17-10.058

Blad
7/11



Figuur 2. Illustratie relatie gewenst veiligheidsniveau en maximale magnitude.

Deze aanpak garandeert dat de maximale magnitude niet te onveilig en ook niet te conservatief wordt meegenomen. De maximale magnitude is daarmee geen keuze die gemaakt kan worden door een gebruiker; uit het gewenste veiligheidsniveau van het te beoordelen bouwwerk volgt hoe dominant de grotere waarden voor de maximale magnitude zijn.

5. Veiligheidsbeoordeling bouwwerken, installaties en infrastructuur

In dit hoofdstuk wordt toegelicht hoe de (verdelingsfunctie) van de maximale magnitude in praktische zin gebruikt wordt bij de veiligheidsbeoordeling van bouwwerken, installaties en infrastructuur in Groningen. Ook wordt toegelicht hoe (de verdelingsfunctie) van de maximale magnitude aansluit bij de nu gebruikte toetsmethoden.

5.1 Rekenwaarden grondbeweging en bijbehorende maximale kans van optreden

Eisen met betrekking tot persoonlijk veiligheid in Nederland maken dat het vereiste veiligheidsniveau van bouwwerken, installaties en infrastructuur leidt tot het rekenen met een grondbeweging aan het maaiveld welke een kans van optreden heeft tussen orde 0,02% en 1% per jaar⁷. De kans van orde 1% per jaar wordt gebruikt, daar waar nauwelijks kans is op persoonlijk letsel. De kans van orde 0,02% per jaar wordt gebruikt, daar waar een grote kans is op persoonlijk letsel.

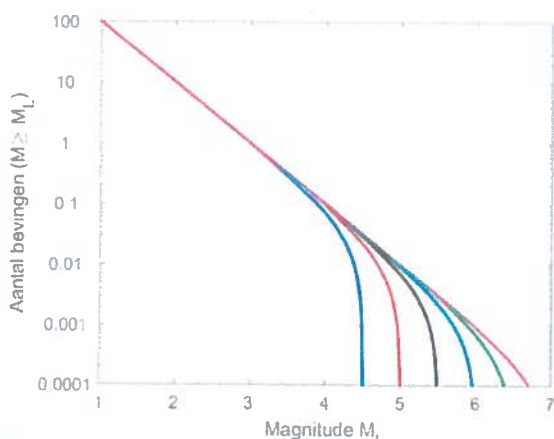
⁷ Met andere woorden een beving met een herhalingsjijd van 100 tot 5000 jaar.



Datum
8 juni 2017

Onze referentie
AGE 17-10.058

Blad
8/11



Figuur 3. Illustratie van een getrunkeerde M_{max} verdeling in de frequentie magnitude grafiek, waarbij de lijnen van links naar rechts maximale magnitudes vertegenwoordigen van 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5 en 7,0..

Voor een hoog veiligheidsniveau is er een aanzienlijke bijdrage aan de hazard van de grotere waarden van de maximale magnitude (Figuur 1 en 2).

Bij de implementatie van de voorgestelde M_{max} verdeling in de hazard analyse is de invloed van $M_{max} > 5.5$ van minimaal belang voor de meeste toepassingen⁸.

De bijdrage van de rechterstaart van de maximale magnitudeverdeling (vooral tussen $M_{max} = 6,5$ en $M_{max} = 7,0$) is verwaarloosbaar klein (zie Figuur 3) en daarmee in praktische zin niet van belang.

5.2 Aansluiting M_{max} op de veiligheidsbeoordeling

Voor gebouwen en infrastructuur wordt nu gewerkt met een seismische hazard bepaald conform de PSHA en de internationale standaarden. Hier kan een verdelingsfunctie van M_{max} conform hoofdstuk 4 worden geïmplementeerd.

In afwijking hiervan is voor de beoordeling van de chemische industrie de zogenaamde maatgevende aardbevingsbelasting⁹ geformuleerd. De werkgroep maatgevende aardbevingsbelasting voor de industrie heeft een maximale magnitude van 5,0 aangenomen in het centrum van aardbevingsgebied. Dit komt overeen met het gemiddelde van de verdelingsfunctie van M_{max} . Voor de voortplanting vanaf bron op reservoirniveau tot maaiveld wordt met gemiddeld gedrag gerekend en wordt de natuurlijke variabiliteit van de ondergrond niet meegenomen. Het betreft een gekozen scenario (zowel voor magnitude als afstand als voortplanting tot maaiveld) zonder koppeling met een streefwaarde voor veiligheid.

⁸ Met typische herhalingscycli < 2500 jaar.

⁹ Rapportage maatgevende aardbevingsbelasting voor de industrie, 2016.



Datum
8 juni 2017

Onze referentie
AGE 17-10.058

Blad
9/11

De verdelingsfunctie van M_{max} is niet gebruikt bij het bepalen van de maatgevende aardbevingsbelasting. Op basis van de verdelingsfunctie van M_{max} en de PSHA kan terug geredeneerd worden hoe veilig het gekozen scenario uiteindelijk is en of het geschikt is voor een toets van het gewenste veiligheidsniveau.

6. Aanbevelingen

KNMI en TNO komen tot de volgende aanbevelingen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen aanbevelingen op grond van de huidige, publiek beschikbare kennis (peildatum mei 2017) en aanbevelingen, die stapsgewijs zullen bijdragen aan meer inzicht in de maximale magnitude voor de casus Groningen.

a) Aanbevelingen op korte termijn

- Gebruik de probabilistische seismische hazardanalyse (PSHA) conform internationale standaarden.
- Gebruik bij voorkeur voor gebouwen, industrie en infrastructuur eenzelfde aanpak, waarbij de aardbevingsbelasting op basis van de PSHA wordt bepaald voor het gewenste veiligheidsniveau per toepassing.
- Implementatie in een PSHA van de maximale magnitudeverdeling, zoals voorgesteld in de expert workshop, moet met zorg uitgevoerd worden daar deze verdeling een combinatie is van geïnduceerde seismiciteit en getriggerde bevingen.
- Bij het opstellen van de versterkingsopgave voor de komende periode wordt aanbevolen om als uitgangspunt de maximale magnitudeverdeling te gebruiken, zoals voorgesteld door het expert team.

b) Aanbevelingen voor vervolgstappen

- Creëer meer inzicht in de maximale magnitude(verdeling) door:
 - Analyse van analoge situaties, waarbij grotere en vermoedelijk getriggerde bevingen een rol spelen, voor zover en in de mate, waarin dit op een onderbouwde wijze plausibel is voor Groningen,
 - Analyse van natuurlijke spanningen in en nabij het Groningen gasveld.

In aansluiting op de aanbevelingen van het expert team. Op de langere termijn kunnen dan op basis van dit onderzoek de gewichtsfactoren in de maximale magnitudeverdeling aangepast worden.

- Voer onderzoek uit naar de relatie tussen gasproductie en de bevingen¹⁰.
- De locatie van de bestaande breuken in het Groningen veld en de verwachte maximale beweging op de breuken kan een waardevolle bijdrage leveren aan de inschatting van de maximale magnitude.

Deze aanbevelingen voor de korte en lange termijn faciliteren de ontwikkeling van een realistische PSHA.

¹⁰ Ook wel het seismologisch model (of seismic source model) genoemd.



Datum
8 juni 2017

Onze referentie
AGE 17-10.058

Blad
10/11

7. Referenties

Bommer, J. J. and J. Van Elk, 2017, Comment on "The Maximum Possible and the Maximum Expected Earthquake Magnitude for Production-Induced Earthquakes at the Gas Field in Groningen, The Netherlands" by Gert Zöller and Matthias Holschneider, *Bulletin of the Seismological Society of America*, accepted

Bommer JJ, Dost B, Edwards B, Stafford PJ, van Elk J, Doornhof D, Ntinalexis Met al., 2016, Developing an Application-Specific Ground-Motion Model for Induced Seismicity, *BULLETIN OF THE SEISMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*, Vol: 106, Pages: 158-173, ISSN: 0037-1106

Bourne, S.J., S.J. Oates, J. van Elk & D. Doornhof (2014). A seismological model for earthquakes induced by fluid extraction from a subsurface reservoir. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* **119**, doi: 10.1002/201JB011663.

DeDontney, N., Gans, C., Burnett, W.A., Burch, D., Garzon, J., Gist, G., Hsu, S., Lele, S., Pais, D., Rehermann, P.S., Searles, K., Symington, B., Tomic, J., Terell, M., Younan, A., Maximum magnitude of induced earthquakes in the Groningen gas field, ExxonMobil Upstream Research Company, report July 2016 (<http://feitenencijfers.namplatform.nl/download/rapport/36dea690-c7eb-4164-9d94-d9725381c426?open=true>).

Dost, B., M. Caccavale, T. van Eck and D. Kraaijpoel, 2013, Report on the expected PGV and PGA values for induced earthquakes in the Groningen area, KNMI report, 26pp

Dost, B., F. Goutbeek, T. van Eck and D. Kraaijpoel (2012) Monitoring induced seismicity in the North of the Netherlands: status report 2010, KNMI Scientific Report, WR 2012-03.

NAM report, 2016, Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen Update Post-Winningsplan 2016 Progress and Schedule, <http://www.nam.nl/feiten-en-cijfers.html>

Report on Mmax Expert workshop, 8-10 March 2016. <https://nam-feitenencijfers.data-app.nl/download/rapportdialog/cef44262-323a-4a34-afa8-24a5afa521d5>

Rapportage werkgroep Maatgevende aardbevingsbelasting voor de industrie, 4 nov 2016,
<https://www.tweedekamer.nl/downloads/document?id=ed5b5f8b-3aa3-4832-8423-6e9e189883fe&title=Rapportage%20werkgroep%20Maatgevende%20aardbeving%20belasting%20voor%20de%20industrie.pdf>



Datum
8 juni 2017

Onze referentie
AGE 17-10.058

Blad
11/11

SSHAC 1997. Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and use of experts (No. U.S. Nuclear Regulatory Commission Report, NUREG/CR-6372), U.S. Nuclear Regulatory Commission Report, NUREG/CR-6372. Washington, D.C
TNO 2015 Seismicity in Groningen for the NPR 9998, phase 2.

Van Wees, J. D., Buijze, L., Van Thienen-Visser, K., Nepveu, M., Wassing, B. B. T., Orlic, B., & Fokker, P. A., 2014. Geomechanics response and induced seismicity during gas field depletion in the Netherlands. *Geothermics* 52 (0): 206-219.

Zöller, G. and M. Holschneider, 2016, The Maximum Possible and the Maximum Expected Earthquake Magnitude for Production-Induced Earthquakes at the Gas Field in Groningen, The Netherlands, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **106**: 2917-2921, doi: 10.1785/0120160220.

