

TNO-rapport 2012 R10198

Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit in Nederland

EU Office

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56
F +31 88 866 44 75
infodesk@tno.nl

Datum	25 juni 2012
Auteur(s)	Karin van Thienen-Visser, Manuel Nepveu, Jenny Hettelaar
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	19 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgevers	Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (NAM), Northern Petroleum, TAQA Energy BV, Vermilion Energy Inc.
Projectnaam	Update seismic hazard
Projectnummer	034.223640

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, 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 belang-hebbenden is toegestaan.

© 2012 TNO

Inhoudsopgave

1	Management samenvatting	3
2	Inleiding	4
3	Geïnduceerde seismiciteit sinds 2004.....	6
4	Indicatorparameters	8
4.1	Relatieve drukval: DP/P_{ini}	8
4.2	Parameter E: $E_{burden}/E_{reservoir}$ [-]	9
4.3	Parameter B: Breukoppervlakte ^{3/2} /bruto gesteente volume [-]	10
5	Kans op beven	12
5.1	Actualisatie van de kans op beven	12
5.2	Voorspellingen	13
6	Resultaten	14
7	Conclusies.....	17
8	Referenties	18
9	Ondertekening	19

Appendix A: confidntieel

1 Management samenvatting

In het kader van de Mijnbouwwet 2003 moeten seismische risicoanalyses in het winningsplan opgenomen worden. Bij olie- en gaswinning gaat het om geïnduceerde seismiciteit. In 2003 is door TNO en KNMI in opdracht van de mijnbouwmaatschappijen onderzoek uitgevoerd naar de seismische *hazard* door geïnduceerde aardbevingen. De resultaten van dit onderzoek zijn samengevat en vastgelegd in het TNO/KNMI rapport '*Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Integratie van deelstudies.*' (NITG-02-244-B, d.d. 20 december 2004).

Eens per 5 jaar wordt de Seismische Hazard Analyse en het rapport '*Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Integratie van deelstudies*' herzien aan de hand van nieuwe observaties m.b.t. geïnduceerde aardbevingen en additionele onderzoeksresultaten. In 2009 is besloten geen uitgebreide herziening te publiceren omdat de beschikbare data daar geen aanleiding toe gaven. In het huidige rapport wordt de deterministische hazard studie van TNO (NITG 04-171-C, d. d. 7 april 2004) geheel herzien.

Deze studie gebruikt gegevens over seismiciteit (bron: www.knmi.nl), (confidentiële) drukdata en eigenschappen van de voorkomens. De herziening heeft alle data meegenomen tot mei 2010, de datum tot waar de drukdata beschikbaar zijn. Aan de hand van eigenschappen van een voorkomen (drukval (DP), ratio Young's moduli reservoir en overburden (E) en breukdichtheid (B)) zijn in 2004 uitspraken gedaan over de kans op beven van dat voorkomen. Deze uitspraken worden onderschreven door de conclusies van de huidige studie, inclusief een kritische grens van eigenschappen waarboven een voorkomen gaat beven. Geen van de voorkomens, die in 2004 een verwaarloosbare kans op beven toegeschreven kregen, zijn gaan beven. Het aantal geobserveerde bevingen is bijna verdubbeld sinds 2004, dus dit is een sterke aanwijzing dat de statistische benadering een goede inschatting geeft van de kans op beven bij gaswinning van de Nederlandse voorkomens.

De herziene kansklassen worden hieronder weergegeven voor drukval over initiële druk (DP/P_{ini}), breukdichtheid (B) en Young's moduli ratio (E).

Reeds bevende voorkomens	
DP/P _{ini} ≥ 28%	B > 0,86 en E ≥ 1,34: P _h = 0.42 ± 0.08
	B > 0,86 en 1,01 ≤ E ≤ 1,33: P _l = 0.19 ± 0.05
	B < 0,86 en/of E < 1,01: verwaarloosbare kans
DP/P _{ini} < 28%	Verwaarloosbare kans

Sinds 2004 zijn enkele bevingen geregistreerd, die niet rechtstreeks aan gasproductie kunnen worden toegeschreven, omdat ze niet plaatsvonden boven een producerend gasveld (ten tijde van de beving) (Midlaren, Rodewolt, Weststellingwerf-Noord). Deze bevingen zijn niet meegenomen. De resultaten van de huidige studie gelden voor bevingen gerelateerd aan gaswinning. Over de kans op beven door andere oorzaken (zoals waterinjectie, fracturing of opslag van stoffen) kunnen geen conclusies worden getrokken op basis van de huidige studie.

2 Inleiding

In het kader van de Mijnbouwwet 2003 moeten seismische risicoanalyses in het winningsplan opgenomen worden. Bij olie- en gaswinning gaat het om geïnduceerde seismiciteit. In 2003 is door TNO en KNMI in opdracht van de mijnbouwmaatschappijen onderzoek uitgevoerd naar de seismische *hazard* door geïnduceerde aardbevingen. De resultaten van dit onderzoek zijn samengevat en vastgelegd in het TNO/KNMI rapport '*Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Integratie van deelstudies.*' (NITG-02-244-B, d.d. 20 december 2004).

Eens per 5 jaar wordt de Seismische Hazard Analyse en het rapport '*Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Integratie van deelstudies*' herzien aan de hand van nieuwe observaties m.b.t. geïnduceerde aardbevingen en additionele onderzoeksresultaten. In 2009 is besloten geen uitgebreide herziening te publiceren omdat de beschikbare data daar geen aanleiding toe gaven. In het huidige rapport wordt de deterministische hazard studie van TNO (NITG 04-171-C, d. d. 7 april 2004) geheel herzien.

Uit het onderzoek uit 2004 bleek dat het mogelijk is om aan de hand van eigenschappen van een voorkomen uitspraken te doen over de kans op beven van dat voorkomen. Drie parameters bleken van invloed te zijn op de kans op beven: de drukval in het reservoir (DP), de E-parameter, die de verhouding tussen de Young's moduli van de overburden en het reservoir geeft, en de B-parameter die een maat is voor de breukdichtheid. Op basis van statistisch onderzoek naar de combinatie van deze parameters en gebruikmakend van informatie over de voorkomens die gebeefd hebben waren de voorkomens in het rapport van 2004 ingedeeld in 4 kansklassen (0%, 10 %, 52% en 100%).

Dit rapport is een actualisering van de 2004 studie, gebruik makend van nieuwe gegevens over de geïnduceerde seismiciteit (seismiciteit vanaf 14 januari 2004 tot en met 10 mei 2010) en nieuwe beschikbare productiegegevens van de voorkomens in Nederland binnen de 3-mijls zone. De nieuw beschikbare productiegegevens in 2012 zijn de gegevens van 2010. Daarom is gekozen voor mei 2010 als datum waar zowel productiegegevens als seismiciteit gegevens beschikbaar zijn. Gebruik makend van deze nieuwe gegevens wordt de deterministische methode van 2004 gebruikt om nieuwe kritische waarden voor de verhouding tussen de Young's moduli van de overburden en het reservoir (E) en de breukdichtheid van het reservoir (B) te vinden. De drukval in het reservoir wordt, anders dan de 2004 studie, gekoppeld aan de initiële druk in de reservoirs waardoor een relatieve drukval (DP/P_{ini}) wordt verkregen. De kritische waarden die hieruit volgen worden gebruikt in de verdere analyse voor een nieuwe kansverdeling voor het optreden van seismiciteit bij de depleterende voorkomens in Nederland.

Hoofdstuk twee beschrijft de velden die sinds 2004 zijn gaan beven en vergelijkt de DP/P_{ini} , E en B- parameters met de kritische waarden van de 2004 studie. In hoofdstuk drie staat de actualisering van de kritische parameters waarna in hoofdstuk vier de actualisering van de kansklassen volgt.

3 Geïnduceerde seismiciteit sinds 2004

In het TNO rapport uit 2004 (Van Eijs et al., 2004) zijn 346 geïnduceerde bevingen meegenomen tot en met 14 januari 2004. Sinds 14 januari 2004 tot en met 10 mei 2010 zijn er 308 geïnduceerde bevingen geregistreerd. In deze periode zijn zeven nieuwe voorkomens gaan beven (rode voorkomens in Tabel 3-1).

Tabel 3-1. Datum, drukval (DP), relatieve depletie (DP/P_{ini}) en magnitude voor de eerste geregistreerde bevingen van de voorkomens. In rood, voorkomens die sinds de vorige studie uit 2004 voor de eerste keer gebeefd hebben.

Voorkomen	datum eerste beving	Drukval (DP) eerste beving [bar]	DP/P _{ini}	Magnitude [-] eerste gemeten beving*
Groningen	december-91	197	0,57	2,4
Ameland-Oost	maart-05	487	0,87	1,8
Dalen-zez2c	augustus-96	287	0,76	1,6
Coevorden Zez2C	februari-97	253	0,76	1,2
Schoonebeek (geassocieerd)	december-02	168	0,47	1,4
Vries Centraal	juli-00	226	0,63	1,0
Annerveen	augustus-94	266	0,77	2,3
Vries Noord	december-96	112	0,31	1,9
Appelscha	juni-02	173	0,57	1,8
Ureterp	april-99	171	0,61	1,0
Bergermeer (Rotliegend)	augustus-94	168	0,74	3,0
Bergen (Rotliegend)	oktober-01	188	0,86	2,7
Emmen-Nw.A'Dam	september-94	122	0,33	1,7
Emmen	oktober-91	211	0,46	2,2
Eleveld	december-86	217	0,58	2,8
Bedum	mei-04	180	0,52	1,4
Metslawier	mei-05	414	0,74	1,4
Roden	oktober-95	203	0,59	1,3
Roswinkel	juni-92	212	0,64	2,7
Saaksum-Oost	december-06	187	0,45	1,3
Q04-A	juli-09	219	0,85	2,7
Q04-B	oktober-08	149	0,57	2,6
Q01-halfweg	juni-08	200	0,64	2,1

* bron: KNMI, 10-05-2010

Naast de zeven nieuw bevende voorkomens zijn ook bevingen geregistreerd boven de voorkomens Groningen (206), Annerveen (19), Eleveld (13), Emmen (4), Roswinkel (3), Bedum (5), Vries-Centraal (2), Midlaren (42), Rodewolt (3), Weststellingwerf-Noord (1) en Warffum (1). Midlaren en Rodewolt zijn niet geproduceerd in de periode 2004 tot 2010 waardoor de geïnduceerde bevingen niet door gasdepletie kunnen zijn veroorzaakt. Deze bevingen hebben een onbekend mechanisme en kunnen niet worden meegenomen in deze studie. In 2009 is er een

beving geregistreerd boven het voorkomen Weststellingwerf-Noord. Dit voorkomen is echter in 2006 gestopt met produceren. Op dit moment wordt onderzocht of deze beving het gevolg was van waterinjectie in het Weststellingwerf-Noord voorkomen. Aangezien deze beving niet door de depletie van gas is veroorzaakt, wordt ook deze beving buiten beschouwing gelaten. Het Warffum veld heeft in 1994 en in 2006 gebeefd. Dit veld wordt alleen gebruikt in piektijden en is maar sporadisch gedepleteerd. Vanwege de ligging van dit veld, nabij Groningen, kan niet met zekerheid worden vastgesteld dat de bevingen in Warffum ten gevolge van de depletie van het Warffum veld zijn en niet ten gevolge van de depletie in het Groningen veld. Daarom is ook dit veld niet meegenomen in de analyse. Van de overige nieuw bevende velden is er een (Bedum) met meerdere (5) geregistreerde geïnduceerde bevingen. Volgens de indicatorparameters uit de 2004 studie vielen alle nieuw bevende voorkomens, waarvan met enige zekerheid te stellen is dat de beving geïnduceerd is door de gasdepletie in de velden, in de geringe kansklasse (10% kans op beven). De indicatorparameters voor de bevende voorkomens staan in Tabel 3-2.

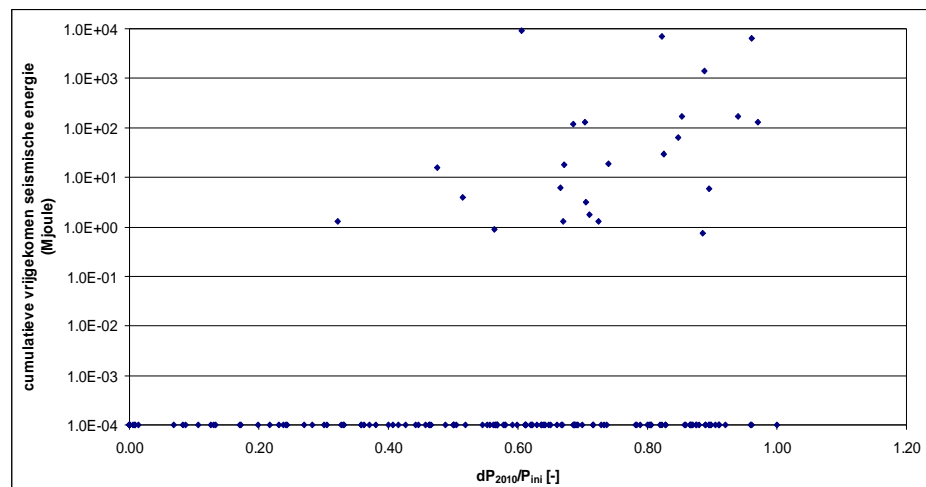
Tabel 3-2. Naam van het voorkomen, datum eerste beving, relatieve drukval (DP/P_{ini}), E en B parameterwaarden

Voorkomen	datum eerste beving	DP/P_{ini}	E	B
Groningen	december-91	0,57	1.28	6.03
Ameland-Oost	maart-05	0,87	1.28	5.42
Dalen-zez2c	augustus-96	0,76	1.70	5.23
Coevorden	februari-97	0,76	1.70	4.50
Zez2C				
Schoonebeek (geassocieerd)	december-02	0,47	1.70	3.88
VriesCentraal	juli-00	0,63	2.63	4.72
Annerveen	augustus-94	0,77	2.63	3.85
VriesNoord	december-96	0,31	2.63	3.85
Appelscha	juni-02	0,57	2.63	3.23
Ureterp	april-99	0,61	1.28	2.76
Bergermeer (Rotliegend)	augustus-94	0,74	2.63	2.67
Bergen (Rotliegend)	oktober-01	0,86	2.63	2.58
Emmen- Nw.A'Dam	september-94	0,33	1.70	2.76
Emmen	oktober-91	0,46	1.70	2.24
Eleveld	december-86	0,58	2.55	2.22
Bedum	mei-04	0,52	1.28	2.42
Metslawier	mei-05	0,74	1.28	3.15
Roden	oktober-95	0,59	2.63	1.26
Roswinkel	juni-92	0,64	1.19	1.21
Saaksum-Oost	december-06	0,45	1.28	1.53
Q04-A	juli-09	0,85	1.09	1.73
Q04-B	oktober-08	0,57	1.09	2.17
Q01-halfweg	juni-08	0,64	2.69	3.31

4 Indicatorparameters

4.1 Relatieve drukval: DP/P_{ini}

De drukval in het reservoir is de drijvende kracht achter het vrijkomen van seismische energie in een voorkomen. Breuken worden geactiveerd door differentiële compactie en differentiële spanningen, die als gevolg van de drukdaling optreden in de reservoirs. Van Eijs et al (2004) liet zien dat er een verband bestaat tussen de drukdaling en het voorkomen van seismiciteit. Een benadering via dimensieloze parameters is het meest betekenisvol vanuit fysisch standpunt. In deze actualisering is daarom dan ook gekozen voor de relatieve drukval in het reservoir. Deze is gedefinieerd als de drukval over de initiële druk van het reservoir (DP/P_{ini}). De relatieve drukval geeft een mate van depletie van het veld. Figuur 4-1 laat de relatieve drukval als functie van de cumulatieve vrijgekomen seismische energie zien. De data in Figuur 4-1 suggereren dat er een minimale relatieve drukval bestaat, waarboven een verhoogde kans op het optreden van bevingen bestaat en waaronder de kans op een beving vrijwel nihil is. Aangezien in Figuur 4-1 de cumulatieve gegevens worden gebruikt, kunnen deze niet worden gebruikt om de kritische grens te bepalen. Voor de bevende voorkomens is daarom gekeken bij welke relatieve drukval de eerste beving plaatsvond.



Figuur 4-1. Vrijgekomen seismische energie als functie van relatieve drukval (dP_{2010}/P_{ini}) (situatie 10-05-2010)

Tabel 3-1 geeft de depletie ten opzichte van de initiële druk van de voorkomens ten tijde van de eerste beving weer (DP_{beving}/P_{ini}) alsook de depletie (DP) ter vergelijking met de 2004 studie. Voor de nieuw bevende velden zijn P/Z plots gemaakt waaruit de drukval ten tijde van de beving wordt afgelezen. Deze drukval is een gemiddelde over het veld. De minimale drukval van voorkomens die bevingen hebben vertoond is 112 bar (Tabel 3-1). Deze ondergrens is niet veranderd sinds Van Eijs et al (2004).

De Z factor varieert over de depletiegeschiedenis van een voorkomen door drukveranderingen (Sutton, 2005) en door verandering in de gassamenstelling. De fout die hierdoor wordt geïntroduceerd in de P/Z plots kan oplopen tot 10%. Dit is

niet meegenomen in de P/Z analyses. Daarnaast is de meetfout van de drukmetingen, die afhankelijk is van de methode van de drukmeting, niet meegenomen. De meetfout in de druk en de variatie in Z factor zijn onafhankelijk van elkaar zullen een gering effect hebben op de kritische grens voor relatieve drukval die hieronder bepaald wordt.

De hypothese die getest wordt is of de voorkomens met een relatieve drukval boven een minimale waarde de potentie hebben om te beven. Voorkomens met een relatieve drukval lager dan de kritische relatieve drukval zijn blijkbaar te jong in hun productiegeschiedenis om gebruikt te worden in de verder analyses. De ondergrens van de waargenomen relatieve drukval is 0.31 (zie Tabel 3-1). Voor de bovengrens wordt 1.0 aangenomen, aangezien een voorkomen niet meer in druk kan dalen dan de waarde van de initiële druk. Met de deterministische methode van 2004 is de kritische grens voor de relatieve drukval bepaald op:

$$(DP/P_{ini})_{grens} = 0,28 \pm 0,034$$

De gehele dataset wordt hierna gescheiden in voorkomens die een relatieve depletie in 2010 van meer dan 0,28 hebben en voorkomens die een relatieve depletie in 2010 van minder dan 0,28 hebben. De eerste groep representeert de voorkomens die op basis van hun huidige drukval potentieel geïnduceerde seismiteit kunnen vertonen. De tweede groep representeert de voorkomens die (nog) geen geïnduceerde seismiteit kunnen vertonen. Voor de actualisering van de kritische waarden voor de verhouding tussen de Young's moduli (E) en de breukdichtheid (B) worden dan ook alleen de voorkomens meegenomen die in 2010 een relatieve depletie van meer dan 0,28 hebben.

4.2 Parameter E: $E_{burden}/E_{reservoir}$ [-]

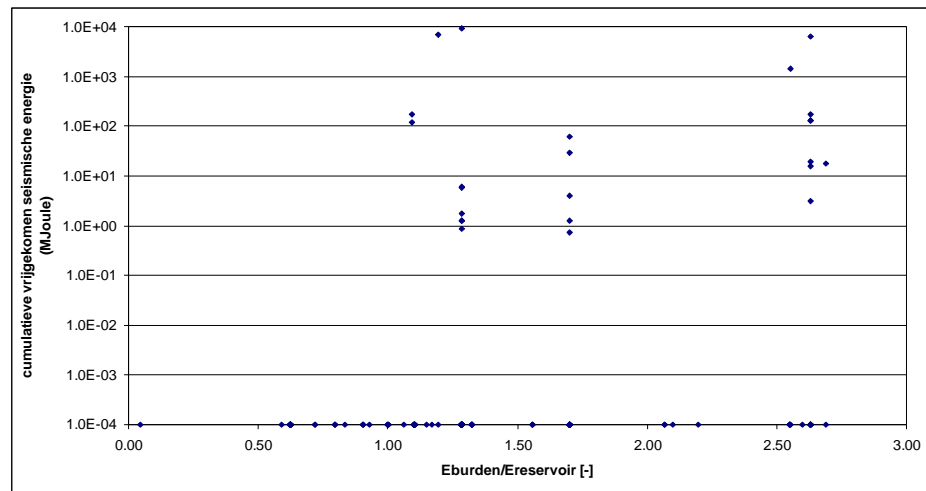
Mulders (2003) heeft door middel van numerieke analyse aangetoond dat de schuifspanningen op rekbreuken in het reservoir (steeply dipping normal faults) voorafgaand aan depletie hoger zijn bij aanwezigheid van een seal/overburden stijver dan het reservoir dan in het geval van dezelfde stijfheid. Hierdoor kunnen de breuken in het reservoir bij aanwezigheid van een stijve overburden makkelijker gereactiveerd worden ten gevolge van de spanningsveranderingen die optreden tijdens depletie. Dezelfde conclusie is ook getrokken door Van Eijs et al (2004) door middel van een statistische analyse van geregistreerde geïnduceerde bevingen in NL gerelateerd aan gas productie: een overburden met de Young's modulus hoger dan de Young's modulus van het reservoir vergroot de kans op het optreden van geïnduceerde bevingen. De gevonden kritische grens voor de E-parameter (Young's modulus overburden/ Young's modulus reservoir) in 2004 was $0,93 \pm 0,03$ (Van Eijs et al., 2004). Alle nieuwe bevende voorkomens sinds 2004 vallen boven deze kritische grens.

Voor de nieuwe velden zijn de Young's moduli van de overburden en het reservoir op dezelfde manier bepaald als in 2004 (Tabel 3-2). Er is één gemiddelde waarde gebruikt per gesteentepakket (bijvoorbeeld; de Ten Boer Laagpakket (ROCLT) of Zechstein (ZE2C) voor de overburden). Figuur 4-2 geeft de ratio (E) weer als een functie van de cumulatieve vrijgekomen energie per voorkomen. De verticale oplijningen in de figuur worden veroorzaakt door de gemiddelde Young's moduli die

genomen zijn over heel Nederland voor dezelfde pakketten. Voor E-waarden kleiner dan 1,09 zijn geen bevingen waargenomen. Deze minimale waarde was in Van Eijs et al (2004) hoger, te weten: 1,19. De maximaal geobserveerde waarde is 2,63. Dezelfde methode als in Van Eijs et al (2004) is gebruikt om de geactualiseerde kritische grens te bepalen.

$$E_{grens} = 1,01 \pm 0,08$$

De kritische grens is in deze actualisatie verschoven richting de 1.0, wat veroorzaakt wordt door bevingen van een aantal voorkomens met relatief kleinere Young's modulus ratio's. Een kritische grens van 1.0 geeft aan dat reservoirs met een afsluitende laag met een relatief hogere stijfheid ten opzichte van het reservoir ($E > 1.0$) een grote kans op bevingen hebben. Een afsluitende laag met een relatief lagere stijfheid ten opzichte van het reservoir ($E < 1.0$) daarentegen levert een verwaarloosbare kans op beven op.



Figuur 4-2. Relatie tussen Eburden/Ereservoir ratio en de cumulatieve vrijgekomen energie

4.3 Parameter B: Breukoppervlakte^{3/2}/bruto gesteente volume [-]

De geïnduceerde bevingen vinden, over het algemeen, plaats op bestaande breuken in de ondergrond waarschijnlijk ten gevolge van differentiële compactie over de breuk. Bij deze parameter wordt ook verondersteld dat de kans op een kritische oriëntatie van een breuk zal toenemen naarmate de breukdichtheid in een veld toeneemt. De parameter B is gedefinieerd als:

$$B = \frac{\text{breukoppervlakte}^{3/2}}{\text{brutogesteentevolume}} = \frac{l_b^{3/2} \cdot h^{3/2}}{A \cdot h} = \frac{l_b^{3/2} \cdot \sqrt{h}}{A},$$

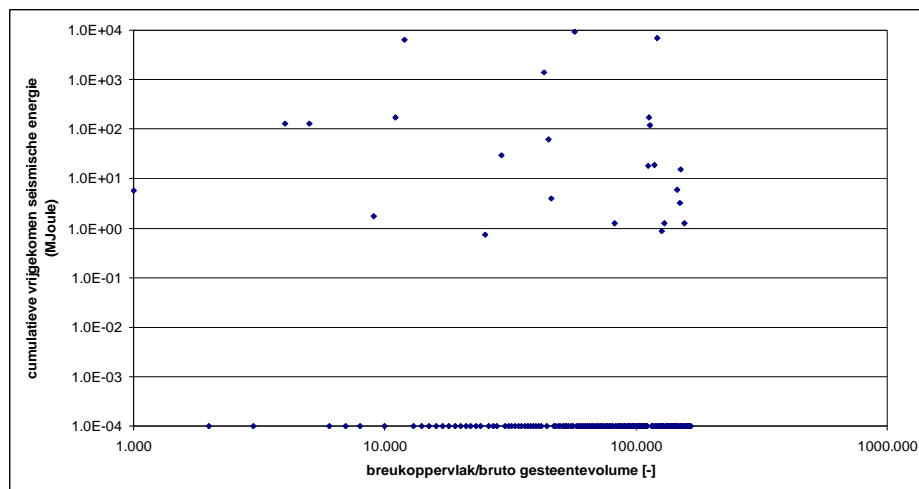
Waarbij h de maximale dikte van de gaskolom van het voorkomen is, l_b de totale breuklengte van de intra-reservoir breuken en de randbreuken van het voorkomen en A het oppervlakte (gemeten binnen de GWC dieptecontour) van het voorkomen [m^2]. De bepaling van B is, net als in de 2004 studie, afhankelijk van de informatie

in de winningsplannen en het voorkomen van 2D of 3D seismiek. Hierdoor is de bepaling van B enigszins onzeker. In 2004 werd er een kritische grens vastgesteld voor de B-parameter van $0,98 \pm 0,16$.

Figuur 4-3 laat de relatie tussen parameter B en cumulatieve vrijgekomen energie zien. Er zijn geen bevingen geregistreerd bij waarden van de B parameter onder 1,21. De maximale waarde voor B in de database is 10,47. De B waarden van de nieuwe bevende voorkomens vallen boven de kritische grens van 2004 (Van Eijs et al., 2004). De actualisering van de kritische grens voor de B-parameter is:

$$B_{grens} = 0,86 \pm 0,29$$

De kritische grens is kleiner dan in 2004 en heeft een grotere standaard deviatie. Dit wordt veroorzaakt door de relatief lage B-waarden voor de nieuw bevende velden.



Figuur 4-3. Relatie tussen breukdichtheid en cumulatieve vrijgekomen seismische energie

5 Kans op beven

5.1 Actualisatie van de kans op beven

In deze actualisatie worden de voorkomens die een relatieve drukval hebben boven $(DP/P_{ini})_{grens}$ verdeeld in de klassen $B \geq B_{grens}$ ($B_{grens} = 0,86$) en $E \geq E_{grens}$ ($E_{grens} = 1,01$) voor het mogelijke optreden van bevingen. De eerste conditie wordt hierbij afgekort tot B+ en de tweede met E+. De ontkenningen van deze karakteristiek worden beschreven met E- en B-. Van de 162 voorkomens in de database hebben 126 voorkomens een relatieve drukval boven de kritische grens ($DP_{2010}/P_{ini} \geq 0.28$). De verdeling van deze voorkomens in de klassen staat in Tabel 5-1.

Tabel 5-1. Karakteristiek van de voorkomens boven de kritische drukval

Karakteristiek	Aantal voorkomens
E+ B+	84
E- B+	7
E+ B-	16
E- B-	19

Van de 84 voorkomens met “beefpotentieel” (E+B+ groep) hebben 23 voorkomens gebeefd. We beschouwen alle voorkomens als experimenten waarop alleen ‘beven’ of ‘niet beven’ van toepassing is. Voor velden die al gebeefd hebben is het experiment afgelopen en hebben de velden ‘beven’ als uitkomst van het experiment. Voor velden in de E-B+, E+B- en E-B- categorieën geldt dat de velden, volgens de hypothese, niet gaan beven. Aangezien het experiment nog niet afgelopen is en de grenswaarden voor DP/P_{ini} , E en B daardoor nog kunnen veranderen, hebben we deze categorieën een verwaarloosbare kans op beven toegekend. Het experiment is niet af omdat de velden nog, in veel gevallen, worden gedepleteerd. Velden die op dit moment niet in productie zijn, kunnen in theorie weer in gebruik genomen worden waardoor het experiment mogelijk nooit eindigt – het experiment is als het ware gesuspenseerd.

De potentieel bevende velden in de E+B+ groep die nog niet gebeefd hebben worden in twee subgroepen verdeeld gelijk aan Van Eijs et al., 2004. In Figuur 4-2 is de verdeling te zien tussen de bevende velden en de E waarde. De bevende voorkomens worden in twee subgroepen verdeeld gebaseerd op deze figuur. De eerste subgroep wordt gevormd door voorkomens met waarden voor de E-parameter kleiner of gelijk aan 1,33 (= klasse P_l). In de tweede subgroep zitten voorkomens met een waarde voor E groter dan of gelijk aan 1,34 (= klasse P_h). De subklassen worden gekozen om de hypothese te testen of voorkomens met een relatief lage ratio een kleinere kans op beven hebben dan de voorkomens met een relatief hogere ratio. De verdeling van de ratio over de voorkomens. Van de 23 bevende voorkomens hebben 9 voorkomens een E waarde van kleiner dan of gelijk aan de 1,33 en 14 voorkomens hebben een E waarde van groter dan of gelijk aan 1,34. Van de niet bevende voorkomens in de E+B+ groep (61), hebben 41 voorkomens een E waarde kleiner dan of gelijk aan 1,33 en 20 voorkomens hebben een E waarde groter dan of gelijk aan 1,34. De kans op beven voor deze subgroepen wordt berekend door middel van de Laplace regel (Van Eijs et al., 2004) en het resultaat wordt gegeven in Tabel 5-2. De berekende kansen op beven zijn de minimale kansen omdat,

volgens de Laplace regel, het experiment nog niet afgelopen is en de kansen nog groter kunnen worden.

De kans op beven neemt toe met de waarde voor de E parameter. Het verschil tussen de kans klassen P_l en P_h is significant te achten. In absolute waarde meer dan twee keer zo groot als $\sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}$ Waarbij de twee sigma's de standaarddeviaties zijn binnen de twee klassen.. De totale kans op beven (voor de gehele dataset) is 0.28 ± 0.05 . In vergelijking met de eerdere studie is de kans op beven voor de P_l kans klasse verhoogd van 10% naar 19%. Veel van de voorkomens die sinds 2004 zijn gaan beven, vallen in deze categorie (Q04-A, Q04-B, Saaksum Oost, Metslawier, Bedum en Ameland Oost). Alleen Q01-halfweg valt in de P_h kans klasse. De kans op beven voor de P_h klasse is dan ook afgenomen van 52% naar 42%. De standaard deviaties zijn niet significant anders dan de studie uit 2004 (Van Eijs et al., 2004).

Tabel 5-2. Minimum kansen op aardbevingen van de verschillende voorkomens op basis van sleutel parameters

Reeds bevende voorkomens	
DP/ $P_{ini} \geq 28\%$	B > 0,86 en E $\geq 1,34$: $P_h = 0.42 \pm 0.08$
	B > 0,86 en $1,01 \leq E \leq 1,33$: $P_l = 0.19 \pm 0.05$
	B < 0,86 en/of E < 1,01: verwaarloosbare kans
DP/ $P_{ini} < 28\%$	Verwaarloosbare kans

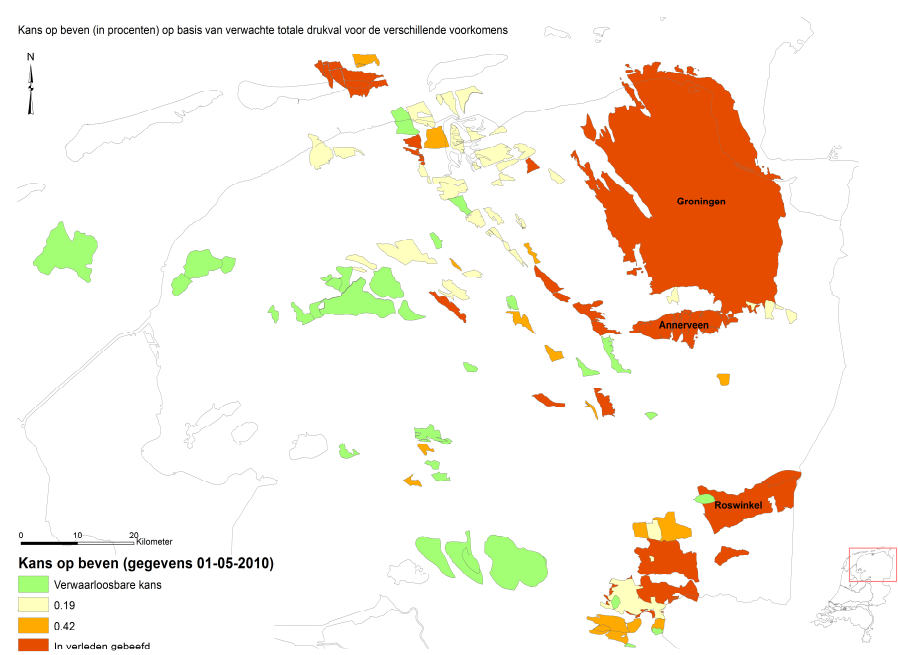
5.2 Voorspellingen

In de dataset zitten 36 voorkomens waarbij de huidige relatieve drukval onder de kritische grens van 28% ligt. We voorspellen de kans op beven aan de hand van de geschatte relatieve drukval aan het einde van de productie en de E en B waarden. Bij 22 van de 36 voorkomens is de verwachting, volgens het winningsplan, dat de uiteindelijke relatieve drukval boven de kritische grens komt. Van deze 22 voorkomens liggen 13 voorkomens in de E+ B+ groep, 4 daarvan zitten in de P_h kans klasse en 9 in de P_l kans klasse. Volgens de kansen zoals gedefinieerd in Tabel 5-2, zouden van de 4 voorkomens in klasse P_h uiteindelijk een à twee gaan beven en uit de 9 voorkomens in de P_l klasse uiteindelijk twee.

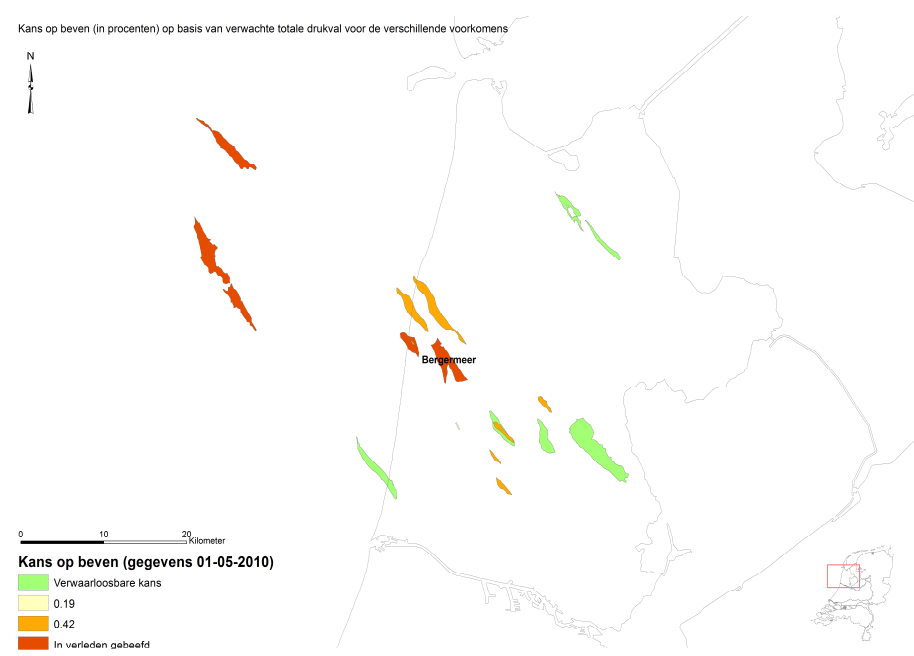
6 Resultaten

Figuur 6-1, Figuur 6-2 en Figuur 6-3 laten de resultaten van de update van de seismische hazard zien voor de voorkomens in Nederland. De verschillen met de studie van 2004 zitten in de toename van het aantal voorkomens en de toegekende kans op beven. De kans op beven is veranderd door de verschillende grenswaarden voor B en E, het gebruik maken van de relatieve depletie (DP/P_{ini}) i.p.v. de absolute depletie (DP) en nieuwe ontwikkelingen in de depletie van de voorkomens (totale verwachte depletie, depletie in 2010).

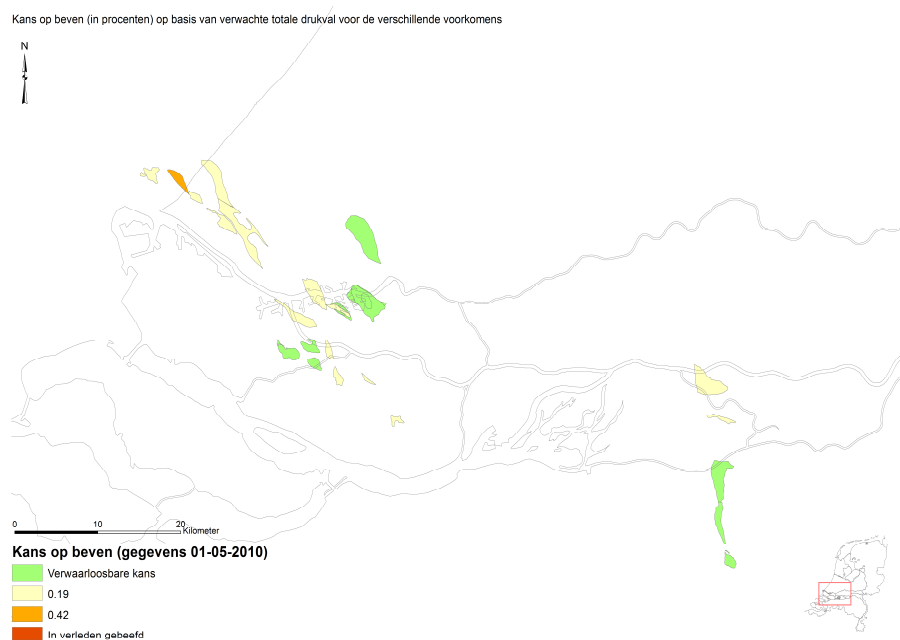
In Friesland en Groningen (Figuur 6-1) hebben meer voorkomens gebeefd in vergelijking met de 2004 studie. Net als in de vorige studie hebben ondiepere KNNS (Vlieland zandsteen) voorkomens een verwaarloosbare kans op beven en de diepere Rotliegend voorkomens een geringe tot redelijke kans op beven. De zuidelijke Rotliegend voorkomens hebben een relatief hogere kans op beven (0.42) vanwege de combinatie met een Zechstein 'seal'. In Noord-Holland (Figuur 6-2) hebben een aantal voorkomens gebeefd (Bergermeer, Bergen). Voorkomens die sterk op deze bevende voorkomens lijken hebben een relatief hogere kans op beven (0.42). Zuid-Holland en Brabant (Figuur 6-3) tonen een laag risico. De Bunter velden hebben over het algemeen een $E_{burden}/E_{reservoir}$ waarde van rond de 1. Dit voorspelt een gering (0.19) risico op beven per voorkomen. De uitzondering hierop is het 's Gravezande Bunter voorkomen. Dit voorkomen heeft een hogere $E_{burden}/E_{reservoir}$ waarde ($E=1,56$) vanwege de 'seal' (Dolomiet). De olievoorkomens hebben een verwaarloosbare kans op beven vanwege de lage drukvallen in de reservoirs.



Figuur 6-1. Kans op beven op basis van de verwachte totale drukval voor de verschillende voorkomens (Noord Nederland).



Figuur 6-2. Kans op beven op basis van de verwachte totale drukval voor de verschillende voorkomens (Noord-Holland).



Figuur 6-3. Kans op beven op basis van de verwachte totale drukval voor de verschillende voorkomens (Zuid Nederland).

7 Conclusies

In deze studie naar het seismische hazard van geïnduceerde aardbevingen in Nederland zijn nieuw beschikbare gegevens gebruikt van de geïnduceerde seismiciteit (bron: KNMI) en productiegegevens (bron Nederlands Olie en Gas portaal: www.nlog.nl) om de oorspronkelijke hazard studie uit 2004 (Van Eijs et al., 2004) te herzien. In de studie uit 2004 kwamen drie parameters naar voren die invloed uitoefenen op het optreden van geïnduceerde seismiciteit. Deze parameters waren de drukval in het reservoir (DP), de verhouding tussen de Young's moduli van de overburden en het reservoir (E) en de breukdichtheid (B). Na toetsing met de nieuwe gegevens blijven deze parameters bepalend voor het optreden van geïnduceerde seismiciteit in een voorkomen. Voor de drukval in het reservoir is de keuze gemaakt om deze relatief ten opzichte van de initiële druk (DP/P_{ini}) te maken aangezien dimensieloze parameters fysisch betekenisvoller zijn. De bepaalde grenswaarden voor de parameters zijn veranderd ten opzichte van de 2004 studie. Verder zijn meer voorkomens in productie genomen en hebben meer voorkomens gebeefd. Op basis van statistisch onderzoek naar de combinatie van deze parameters en gebruik makend van informatie over de voorkomens die gebeefd hebben, worden de voorkomens ingeschaald in 4 kansklassen vergelijkbaar met de klassen in de studie van 2004. De geringe kans klasse uit 2004 ($P_l = 0,10 \pm 0,05$) blijkt een hogere kans op beven te geven ($P_l = 0,19 \pm 0,05$) volgens de nieuwe gegevens. De hogere kans klasse ($P_h = 0,52 \pm 0,10$) uit 2004 geeft een lagere kans met de nieuwe gegevens ($P_h = 0,42 \pm 0,08$), doordat veel van de nieuw bevende velden juist in de lagere kansklasse zaten. De geringe en hogere kansklasse komen zo dicht bij elkaar. Daarnaast is nog een klasse met verwaarloosbare kans op geïnduceerde bevingen gedefinieerd.

8 Referenties

Mulders, F.M.M. (2003) Modelling of stress development and fault slip in and around a producing gas reservoir. Proefschrift, TU Delft.

Stichting Bouwresearch, SBR richtlijn A (2002). (www.sbr.nl)

Sutton, R.P., 2005. Fundamental PVT Calculations for Associated and Gas/Condensate Natural Gas Systems, SPE Annual Technical Conference October 2005, Dallas, Texas; **SPE 97099**

Van Eck, T., Goutbeek, F., Haak, H. en B. Dost, 2004. Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes. KNMI, Scientific report; **WR 2004-01**

Van Eijs, R. M. H. E., Mulders, F. M. M., Nepveu, M., 2004. Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiteit. TNO-rapport **NITG 04-171-C**

Van Eijs, R. M. H. E., Mulders, F. M. M., Nepveu, M., Kenter, C. en Scheffers, B.C., 2006. Correlation between hydrocarbon reservoir properties and induced seismicity in the Netherlands. *Engineering Geology*, **84**, 99-111.

Wassing, B. B. T., van Eck, T. en van Eijs, R. M. H. E., 2004. Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Integratie van deelstudies. TNO rapport **NITG 04-244-B**, KNMI publicatie 208, **ISBN 90-369-2263-1**

9 Ondertekening

Utrecht, 25 juni 2012



Ingrid Kroon

Research Manager



Karin van Thienen-Visser, Manuel
Nepveu, Jenny Hettelaar

Auteurs