

Diepe Ondergrond-Confidentieel
Budapestlaan 4
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T 030 2564675
F 030 2564680
info@nitg.tno.nl

TNO-rapport

NITG 04-171-C

**Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde
seismiciteit**

Datum	7 april 2004
Auteur(s)	Drs. RMHE van Eijs Dr. F.M.M. Mulders Dr. M. Nepveu
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	41
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. TOTAL E&P NEDERLAND B.V. BP Nederland Energie B.V. Wintershall Noordzee B.V.
Projectnaam	DHAIS
Projectnummer	005.84033

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 onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

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

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Doelstelling	5
1.2	Werkwijze	6
1.2.1	Eigenschappen van voorkomen en indicatorparameters	6
1.2.2	Gegevens van eigenschappen	8
1.2.3	Cumulatieve vrijgekomen seismische energie	8
1.2.4	Indeling rapport	8
2	Indicatorparameters	11
2.1	Drukval DP ₂₀₀₃	11
2.1.1	Eerste bevingen	12
2.2	Parameter E: Eburden/Ereservoir [-]	13
2.2.1	Bepaling Eburden en Ereservoir	13
2.2.2	Resultaten	15
2.3	Parameter B: Breukdichtheid: Breukoppervlakte ^{3/2} /bruto gesteente volume [-]	18
2.3.1	Bepaling van de breuklengte en breukoppervlakte	19
2.3.2	Resultaten	19
2.4	Andere parameters	20
2.4.1	Porositeit en horizontale permeabiliteit (Kh)	20
2.4.2	Dikte en diepte	21
2.4.3	Neotektoniek	21
2.4.4	Maximale breukbeweging (RSD _{max})	21
3	Statistische analyse van de indicatorparameters	27
3.1	Parameter E: Eburden/Ereservoir [-]	27
3.2	Parameter B: Breukoppervlakte ^{3/2} /bruto gesteente volume [-]	27
3.3	Kans op beven	27
3.4	Voorspellingen	28
3.5	Kans op beving voor voorkomens die al gebeefd hebben	29
4	Resultaten	31
4.1	Zuid-Holland en Brabant	31
4.2	Noord-Holland, Zuidwal en Friesland (oost)	32
4.3	Friesland en Groningen	33
4.4	Overijssel en Drenthe	34
5	Conclusies	35
6	Referenties	37
	Bijlage(n)	
A	Appendix A: Toelichting op hoofdstuk 3	39

1 Inleiding

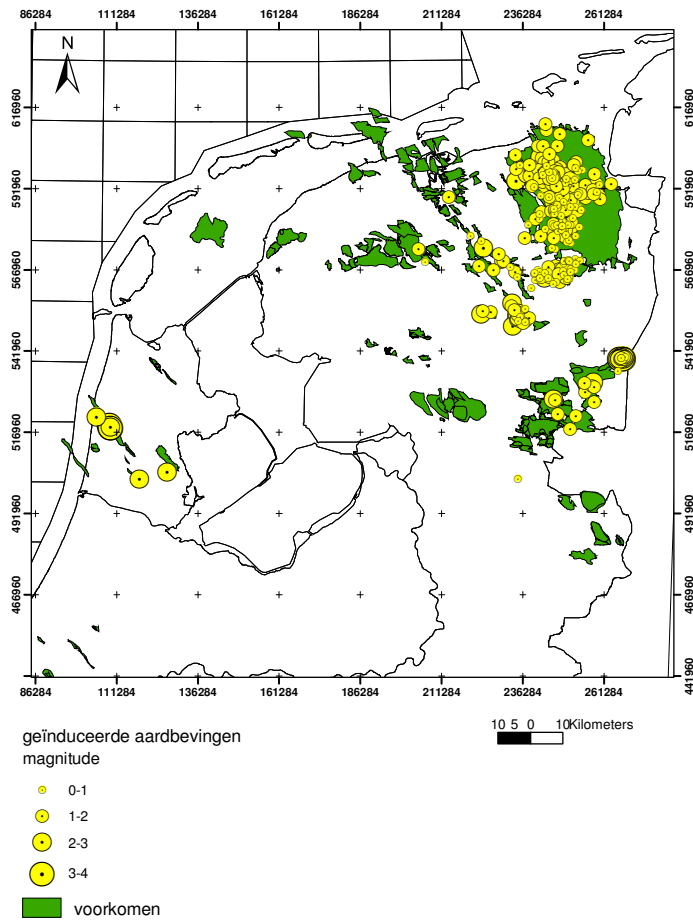
In het kader van de per 1 januari 2003 ingevoerde Mijnbouwwet is een door het Ministerie van Economische Zaken goedgekeurd winningsplan vereist, voordat de ‘operators’ mogen overgaan tot het winnen van delfstoffen in Nederland. Dit winningsplan moet conform artikel 35 lid f en 36 lid b een beschrijving van de bodembeweging, respectievelijk een beschrijving van de schade door bodembeweging worden gegeven. Deze beschrijving is alleen vereist voor voorkomens op land en binnen de 3-mijls zone. In dit kader heeft een consortium van partijen, bestaand uit Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., TOTAL E&P NEDERLAND B.V., BP Nederland Energie B.V. en Wintershall Noordzee B.V. opdracht verleend aan TNO-NITG om een mogelijke relatie te bepalen tussen het optreden van geïnduceerde aardbevingen (Figuur 1) en te meten eigenschappen van de in de winningsplannen genoemde voorkomens, en de kans te bepalen op het optreden van (een) beving(en) voor een specifiek voorkomen gedurende de winning van gas of olie.

1.1 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is een gekwantificeerde schatting te geven van het risico op een geïnduceerde beving in een producerend of een nog te produceren voorkomen aan de hand van (te meten) eigenschappen (geologische, productietechnische, mechanische) van dat voorkomen.

Een soortgelijke doelstelling had ook het ‘Shockgas’ project (Van Eijs en Scheffers, 2000). Ten tijde van dit project waren er echter niet voldoende kwantitatieve data voorhanden, zodat slechts kwalitatieve uitspraken konden worden gedaan voor de voorkomens waar tot nu toe geen bevingen zijn geregistreerd.

Het huidige onderzoek heeft wel toegang tot voldoende gegevens en zal op basis hiervan de kans op beven per voorkomen inschatten. Het onderzoek zal niet ingaan op de vraag hoe groot de frequentie en magnitude van de beving(en) dan zullen zijn. Voor het beantwoorden van deze vraag wordt verwezen naar het rapport van van Eck et al. (2004) en mogelijk vervolgonderzoek door het KNMI.



Figuur 1 Locaties van de epicentra van geïnduceerde bevingen (bron: KNMI) en de voorkomens (situatie 14-01-2004)

1.2 Werkwijze

1.2.1 Eigenschappen van voorkomens en indicatorparameters

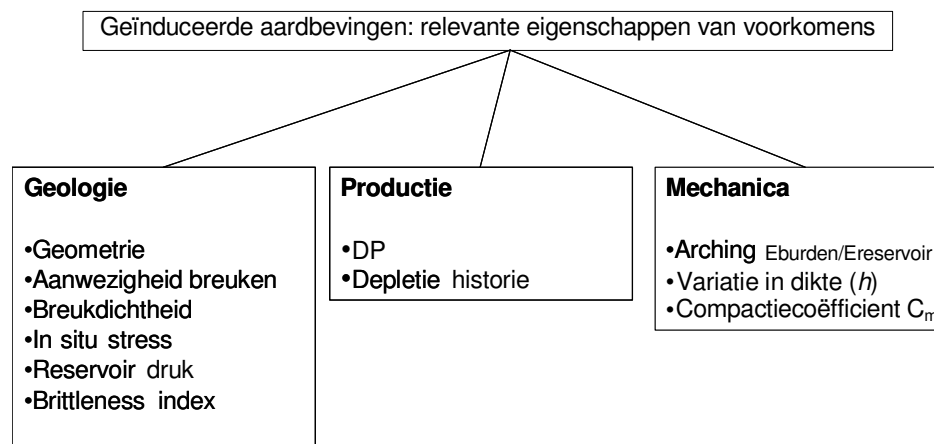
Zoals beschreven in de doelstelling wordt er gekeken naar eigenschappen van voorkomens die mogelijk invloed hebben op het wel of niet optreden van bevingen, waarbij een voorkomen wordt gedefinieerd als een natuurlijke accumulatie (in dit geval van aardgas en/of aardolie), waarbinnen een natuurlijk druk- en fase-evenwicht bestaat. In dit onderzoek wordt onderscheid gemaakt tussen voorkomens die al gebeefd hebben (bevende voorkomens) en voorkomens die (nog) niet gebeefd hebben (niet bevende voorkomens).

Eigenschappen van voorkomens die een relatie kunnen hebben met bevingen kunnen in drie groepen verdeeld worden:

1. Geologische eigenschappen. Dit betreft statische eigenschappen zoals dikte, oppervlakte en hoeveelheid breuken. Ook eigenschappen als porositeit en permeabiliteit behoren tot deze groep.
2. Productietechnische eigenschappen. Dit betreft dynamische eigenschappen zoals drukdaling en drukverdeling.

3. Mechanische eigenschappen. Deze groep omvat de statische eigenschappen zoals de stijfheid en sterkte van het gesteente in en om het voorkomen en de aanwezige breuken. Ook ‘arching’ effecten van spanningen in en rondom het voorkomen gedurende de productie van het voorkomen vallen binnen deze categorie.

Een uitgebreide lijst met eigenschappen is gegeven in Figuur 2. Deze lijst is samengesteld op basis van workshops met TNO-NITG, Shell-SEPTAR en KNMI. Naast deze lijst zijn ook andere eigenschappen meegenomen in het onderzoek (zie Tabel 1).



Figuur 2 Lijst van eigenschappen die mogelijk van invloed zijn op wel of niet voorkomen van geïnduceerde bevingen

Gezien de looptijd van het onderzoek is het niet realistisch om alle bovengenoemde eigenschappen individueel te correleren met bevingen. Daarom wordt de keuze gemaakt om te werken met ‘indicatorparameters’. Een indicatorparameter is in feite een fysisch verantwoorde, dimensieloze combinatie van één of meerdere eigenschappen uit Figuur 2. Deze ‘indicatorparameters’ geven een indicatie van de kans op seismiciteit bij winning van een voorkomen. De volgende eigenschappen van de ‘indicatorparameters’ worden wenselijk geacht:

- Hoog onderscheidend vermogen, wat wil zeggen dat ze zo duidelijk mogelijk een scheiding moeten laten zien tussen bevende en niet-bevende velden.
- Fysische relevantie. Aan elke parameter moet een relevante hypothese ten grondslag liggen
- Indicatorparameters kunnen meerdere eigenschappen omvatten uit Figuur 2 die indicatief zijn voor één proces
- Dimensieloos
- Relatief eenvoudig te bepalen

De relevantie van de gekozen indicator zal worden bepaald aan de hand van een statistische analyse.

Bij de auteurs van dit rapport is één publicatie bekend (Adushkin et al. 2000) waarin een vergelijking is gemaakt tussen bevende en niet-bevende voorkomens voor een aantal eigenschappen van producerende voorkomens, wereldwijd. Volgens deze publicatie neemt seismiciteit toe naarmate de dikte en diepte van het voorkomen groter worden en neemt af bij toenemende porositeit en permeabiliteit.

Deze eigenschappen zullen ook in dit onderzoek worden getoetst op mogelijke correlatie (zie paragraaf 2.4).

1.2.2 *Gegevens van eigenschappen*

Een belangrijke voorwaarde voor dit project was dat basisgegevens op eenvoudige manier verzameld en geraadpleegd konden worden. In dit perspectief zijn de winningsplannen uitermate belangrijk geweest. In Tabel 1 zijn de eigenschappen van voorkomens aangegeven die geëxtraheerd zijn uit de winningsplannen of andere bronnen. In totaal zijn 124 voorkomens gebruikt voor de database.

1.2.3 *Cumulatieve vrijgekomen seismische energie*

Ahorner & Pelzing (1985) geven een empirische relatie tussen de vrijgekomen seismische energie (E_s in Joule) en de magnitude (M_L) van een aardbeving:

$$\text{Log}E_s = 3,81 + 1,64M_L \quad (1)$$

Deze relatie is gebruikt om de bevingen (t/m 14-01-2004) per voorkomen om te rekenen naar seismische energie. De som van de energie van deze bevingen is gelijk aan de cumulatieve vrijgekomen seismische energie voor een bepaald voorkomen. Het voordeel hiervan is dat bevende voorkomens op een objectieve manier met elkaar vergeleken kunnen worden. Dit zal in het kader van dit onderzoek slechts kwalitatief gebeuren. De hoeveelheid vrijgekomen energie wordt niet als gegeven meegenomen in de statistische analyse, alleen het feit dat een voorkomen gebeefd heeft. Voorkomens die niet hebben gebeefd hebben een arbitraire waarde van 100 joule (=1E-04 [MJoule]) om het plotten van niet-bevende velden mogelijk te maken op log-schaal (zie bijv. Figuur 3).

1.2.4 *Indeling rapport*

Combinaties van eigenschappen (indicatorparameters) worden beschreven in hoofdstuk 2. Indicatorparameters worden vervolgens per voorkomen gecorreleerd met de vrijgekomen cumulatieve seismische energie tot eind 2003. In hoofdstuk 3 wordt de relevantie van de parameters, op basis van statistische analyse, bepaald. In hoofdstuk 4 worden de resultaten besproken voor de verschillende delen van Nederland.

Tabel 1 Gegevens met bijbehorende bronnen die gebruikt zijn in dit onderzoek

eigenschap	afkorting	Eenheid	bron
HCIIP	HCIIP	10^9 [m ³]	winningsplan
Ultimate recovery verwacht	UR	10^9 [m ³]	winningsplan
Cumulatieve productie tot nu toe	CP	10^9 [m ³]	winningsplan
Veld diepte	D	[m]	winningsplan
Gemiddelde porositeit	Por	[-]	winningsplan
Intra-reservoir breuken (lengte)	l_{ib}	[m]	winningsplan
Randbreuken (lengte)	l_{rb}	[m]	winningsplan
Breuklengte totaal	l_b	[m]	winningsplan
Compactiecoëfficiënt	C_m	[bar ⁻¹]	winningsplan
Dikte	h	[m]	winningsplan
Initiële druk	IP	[bar]	winningsplan
Drukval 2003	DP ₂₀₀₃	[bar]	winningsplan
Maximale drukval einde productie	DP _{eind}	[bar]	winningsplan
P/Z	-	[bar]	winningsplan
Drukval eerste beving	DP _{eb}	[bar]	winningsplan + gegevens KNMI *
Magnitude eerste beving	M _{eb}	[-]	gegevens KNMI *
Cumulatieve vrijgekomen seismische energie	-	[Joule]	gegevens KNMI *
Reservoir formatie	-	-	winningsplan
Inhoud (gas of olie)	-	-	winningsplan
Oppervlakte reservoir	A	[m ²]	winningsplan
Young's modulus (stijfheid) reservoir	Ereservoir	[GPa]	VpVs data; TNO-NITG database
Poisson's ratio reservoir	$\nu_{reservoir}$	[-]	VpVs data; TNO-NITG database
Young's modulus (stijfheid) omgevingsgesteente	Eburden	[GPa]	VpVs data; TNO-NITG database
Poisson's ratio omgevingsgesteente	ν_{burden}	[-]	VpVs data; TNO-NITG database
Neotektoniek**	-	-	TNO-NITG database

* Bron: KNMI, 14-1-2004

** Recente (TNO-NITG) neotektonische gegevens zijn gebruikt om correlatie te zoeken met de geïnduceerde bevingen. Deze correlaties konden alleen visueel bepaald worden en niet kwantitatief

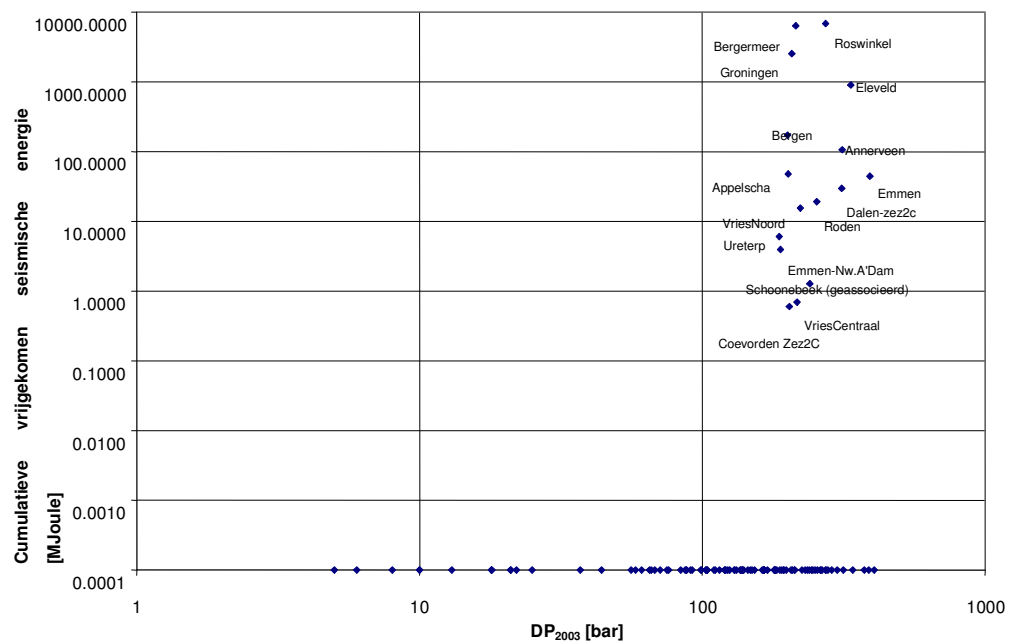
2 Indicatorparameters

2.1 Drukval DP_{2003}

Bij geïnduceerde aardbevingen is de drukval in een reservoir de drijvende kracht achter het vrijkomen van seismische energie in een voorkomen. Zonder deze drukval zal een voorkomen niet compacteren en zullen effectieve spanningen binnen een reservoir niet toenemen. Mulders (2003) beschrijft de differentiële spanning en differentiële compactie, als gevolg van drukdaling, als de belangrijkste mechanismen die bestaande breuken in een voorkomen kunnen reactiveren, wat kan leiden tot een beving.

De verwachting is dat een hogere DP_{2003} zal leiden tot een grotere kans op bevingen. De relatie tussen DP_{2003} en het optreden van bevingen is aangetoond in Figuur 3.

De data in Figuur 3 impliceren, dat er een minimale 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 3 cumulatieve gegevens worden gebruikt kan op basis hiervan geen uitspraak worden gedaan voor de minimale drukval waarbij een eerste beving in een bepaald voorkomen geregistreerd is. Voor de bevende voorkomens is daarom nagegaan bij welke DP_{2003} de eerste beving is opgetreden (minimale drukval). Gesteld wordt dat alleen de voorkomens boven deze minimale drukval de potentie hebben om te beven. Bij navolgende analyses moeten dus alleen deze voorkomens worden meegenomen. Voorkomens met een drukval lager dan de minimale drukval zijn klaarblijkelijk te jong in hun productiegeschiedenis om gebruikt te worden in verdere correlatie.



Figuur 3 Vrijgekomen seismische energie als functie van DP (situatie 14-01-2004)

2.1.1 Eerste bevingen

De relatie tussen DP en bevingen is nagegaan voor de eerste opgetreden beving in de individuele voorkomens (Tabel 2). Hierbij dient te worden opgemerkt dat de registraties van bevingen afhankelijk zijn van het KNMI netwerk dat in de loop der tijd verbeterd is. Hierdoor is het mogelijk dat vooral kleine bevingen gemist zijn in de periode voor 1986. We hebben in dit onderzoek ervoor gekozen te werken met de KNMI data zoals die publiekelijk worden vrijgegeven. Dit geldt ook voor het tijdstip van de eerste geregistreerde beving boven een bepaald voorkomen.

Voor dat tijdstip kan vervolgens in een P/Z plot de drukval worden afgelezen voor het betreffende voorkomen waarbij wordt gesteld dat de drukken vermeld in de P/Z plots een maat zijn voor de gemiddelde reservoirdruk.

Tabel 2 laat zien dat spreiding groot is voor de gemeten drukval op het moment van de eerste beving.

Tabel 2 Datum, DP en magnitude voor de eerste beving voor de verschillende voorkomens

Voorkomen	datum eerste beving*	DP [bar] eerste beving	magnitude [-] eerste gemeten beving*
Roswinkel	juni-92	212	2.7
Bergermeer (Rotliegend)	augustus-94	168	3.0
Groningen	december-91	197	2.4
Eleveld	december-86	217	2.8
Bergen (Rotliegend)	oktober-01	188	2.7
Annerveen	augustus-94	266	2.3
Appelscha	juni-02	173	1.8
Emmen	oktober-91	211	2.2
Dalen-zez2c	augustus-96	287	1.6
Roden	oktober-95	203	1.3
VriesNoord	december-96	112	1.9
Ureterp	april-99	171	1.0
Emmen-Nw.A'Dam	september-94	122	1.7
Schoonebeek (geassocieerd)	december -02	168	1.4
VriesCentraal	juli-00	226	1.0
Coevorden Zez2C	februari-97	253	1.2

*Bron: KNMI, 2004

Op basis van de gegevens uit Tabel 2 is af te leiden bij welke grens voor de drukval de kans op bevingen significant zal toenemen.

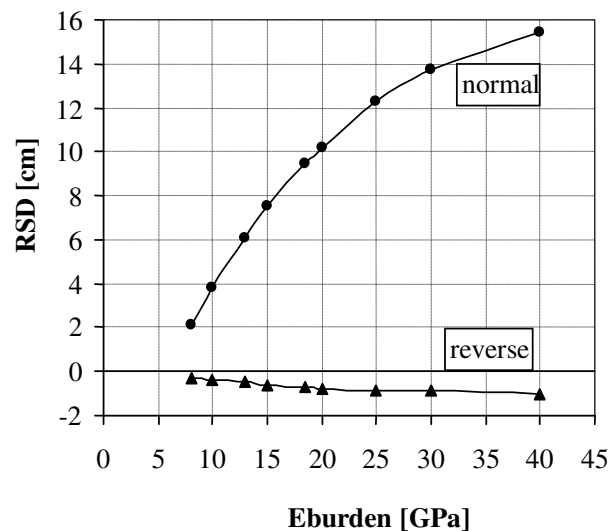
Bij de voorkomens die bevingen hebben vertoond is de geconstateerde minimale drukval 112 bar. Op basis van de methode die in Appendix A is beschreven, kan in principe een schatting worden gemaakt van de minimale drukval waarbij het optreden van een beving denkbaar is voor een arbitrair voorkomen. Om deze schatting te maken is een maximale drukval van 510 bar aangenomen. Dit getal is gelijk aan de hoogste maximale drukval die door een maatschappij is opgegeven in de winningsplannen. De methode, beschreven in Appendix A, laat zien dat de kritische ondergrens 72 ± 29 bar bedraagt.

Op basis van deze druk wordt de dataset gescheiden waarmee alleen de voorkomens (bevende en niet bevende) overblijven die op een verantwoorde manier met elkaar vergeleken kunnen worden.

Bij de navolgende bespreking van de relatie tussen de gedefinieerde indicatorparameters en het voorkomen van geïnduceerde bevingen gaan we er steeds van uit dat de drukval de kritische waarde van 72 bar heeft overschreden. Dit betekent dat er 97 van de 124 voorkomens (inclusief de gebefd hebbende voorkomens) mee worden genomen in de vervolganalyse.

2.2 Parameter E: Eburden/Ereservoir [-]

Op basis van de analyse van de mechanische eigenschappen is er een correlatie aangetoond tussen de ratio van de Young's modulus van de (over)burden en Young's modulus van het reservoir en het optreden van bevingen. Ook Mulders (2003) toont aan dat de hoeveelheid beweging ('Relative Shear Displacement') toeneemt naarmate de ratio groter wordt (Figuur 4). De beweging neemt toe door lokale veranderingen van de richtingen en magnitudes van de initiële hoofdspansingen. Bij een grotere ratio tussen de Young's moduli zal de hoek tussen de kleinste (subhorizontale) hoofdspansing en de invalshoek van de breuk kleiner worden. Bovendien zal het verschil in magnitude tussen de grootste en de kleinste hoofdspansing iets toenemen. Hierdoor neemt de schuifspanning toe op de breuk bij hogere Eburden/Ereservoir ratio. Het numeriek model wat hierbij werd gebruikt is kenmerkend voor een Rotliggend voorkomen in de Nederlandse ondergrond.



Figuur 4 Berekende maximum en minimum RSD waarden voor 'normal' en 'reverse' bewegingen langs een breukvlak. De Young's modulus van het omgevingsgesteente is gevarieerd terwijl de Young's modulus van het voorkomen constant is gehouden op 13 GPa (naar: Mulders, 2003)

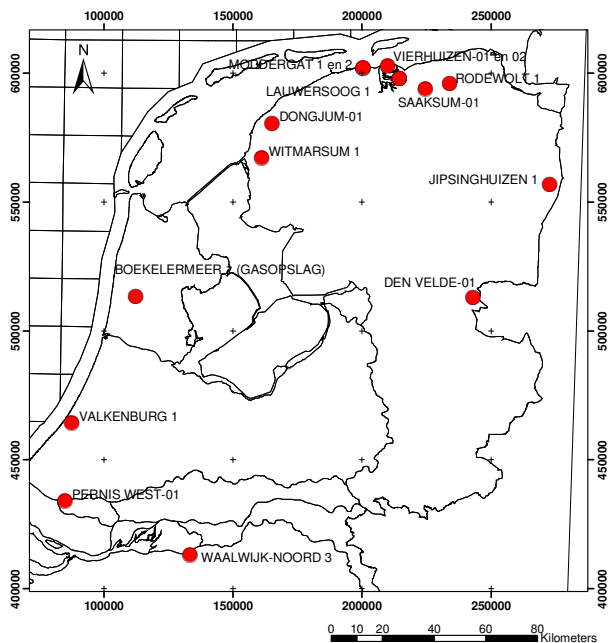
2.2.1 Bepaling Eburden en Ereservoir

Gegevens van statische eigenschappen van gesteentes uit de Nederlandse ondergrond zijn in zeer beperkte mate aanwezig binnen de confidentiële TNO-

NITG database. Logan et al. (1997) geeft een gedetailleerd overzicht van deze eigenschappen van de Platten-dolomiet en de Rotliegend-zandsteen die aanwezig zijn in de ondergrond van de winningsvergunning Bergen. Omdat deze data onvoldoende zijn om uitspraken te doen voor de voorkomens in de rest van Nederland is er gekozen om dynamische eigenschappen te bepalen uit logs voor verschillende laagpakketten in de Nederlandse ondergrond en deze later te converteren naar statische eigenschappen.

2.2.1.1 V_p/V_s

Uit de literatuur (bijv. Fjær et al., 1992, Schön, 1996) is bekend dat de voortplanting van een geluidsgolf in gesteente afhangt van de stijfheid en de dichtheid van het gesteente. In theoretische zin kan de stijfheid van het gesteente expliciet worden afgeleid van de akoestische snelheid. Echter, om de dynamische Young's modulus en Poisson's ratio te bepalen is zowel de snelheid van een seismische drukgolf (V_p) als de snelheid van de seismische schuifgolf (V_s) nodig. Deze gegevens kunnen worden afgelezen uit logs die met 'multipole' en, in sommige gevallen, met 'monopole' 'sonic tools' opgenomen zijn. Inventarisatie van de TNO-NITG database leidt tot veertien boringen die beschikken over informatie over V_p en V_s (Figuur 5).



Figuur 5 Locatie van boringen met informatie over V_p/V_s snelheden

De informatie is, binnen TNO-NITG, beschikbaar op papieren en sepi logs waardoor er slechts een visueel gemiddelde over bepaalde trajecten bepaald kan worden. Het beschikbaar zijn van digitale logs zou de berekening kunnen verbeteren en objectiveren.

De volgende relaties (Fjær et al., 1992) zijn gebruikt om de gemiddelde V_p (in km/s) en V_s (in km/s) waarden om te rekenen naar dynamische Young's modulus (E_d in GPa) en dynamische Poisson's ratio (ν_d):

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2)$$

$$\nu_d = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (3)$$

waarbij ρ (in 10^3 kg/m^3) de bulkdichtheid is. Deze bulkdichtheid wordt, in het geval dat deze niet gemeten is, bepaald uit de V_p op basis van de empirische relaties die beschreven worden in Castagna et al. (1993).

2.2.1.2 Statische versus dynamische gesteente-eigenschappen

De afgeleide dynamische eigenschappen zijn vervolgens gekoppeld aan een lithostratigrafisch laagpakket (Boogaert en Kouwe, 1997). Hiervoor zijn de 'composite logs' gebruikt die in digitale vorm aanwezig zijn bij het TNO-NITG. Het type lithologie dat vermeldt staat op de 'composite log' is tevens bepalend voor de bulkdichtheid (Castagna et al., 1993) en daarmee ook de E_d .

Echter in dit onderzoek zijn statische materiaaleigenschappen vereist omdat deformatie binnen het reservoir relatief langzaam plaatsvindt t.o.v. de deformatie ten gevolge van geluidsgolven. Uit de literatuur is het bekend dat het verschil in deformatiesnelheid en -grootte leidt tot een verschil in, met name, de grootte van de Young's modulus. Veel onderzoek is uitgevoerd naar empirische relaties tussen statische en dynamische parameters (bijv. Schön, 1996, McCann & Entwisle, 1992, Eissa & Kazi, 1988).

Voor dit onderzoek wordt de relatie gebruikt van Eissa & Kazi (1988), waarbij de Young's moduli in GPa worden uitgedrukt:

$$E_{stat} = 0.64 \cdot E_{dyn} - 0.32 \quad (4)$$

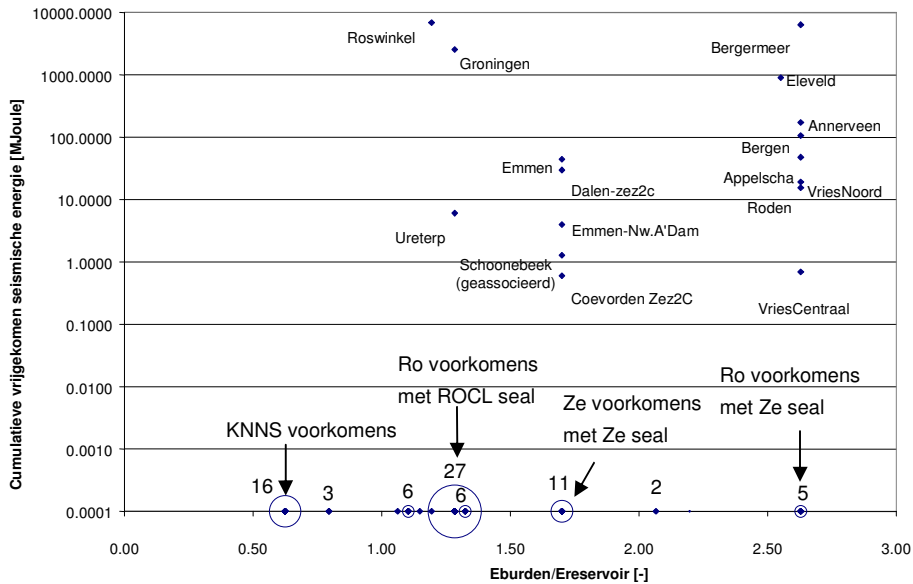
Deze relatie past het beste bij de bevindingen die Logan et al. (1997) rapporteren en komt tevens overeen met de ervaring binnen Shell (pers. com. C. Kenter).

2.2.2 Resultaten

De gegevens van de statische eigenschappen zijn vervolgens gemiddeld per laagpakket, waarbij de spreiding van de waarden in de verdere analyses niet meer wordt meegenomen. Er is dus bijvoorbeeld één gemiddelde waarde bepaald voor het Ten Boer Laagpakket (ROCLT) die gebruikt wordt in alle voorkomens waar het Ten Boer Laagpakket, hoofdzakelijk bestaande uit kleisteen, de veronderstelde seal is.

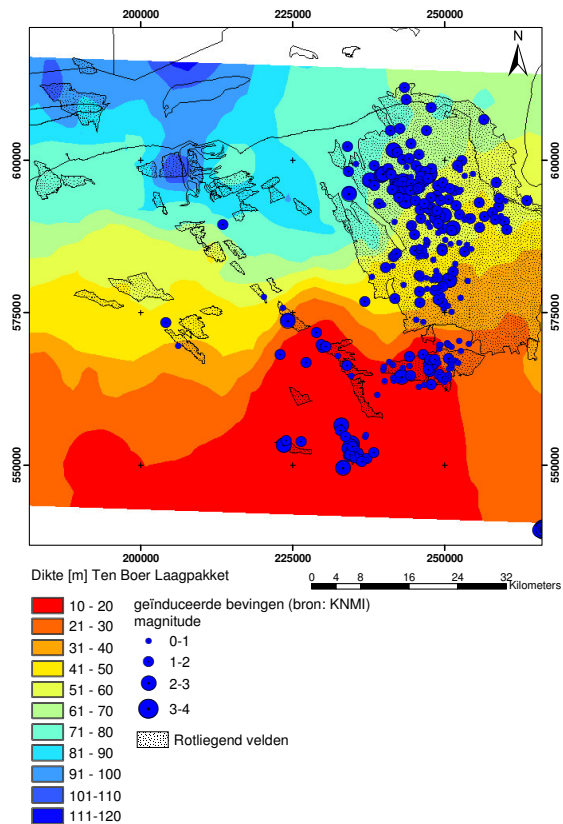
De ratio Eburden/Ereservoir wordt uiteindelijk bepaald door de Young's modulus van de 'overburden' te delen door de Young's modulus van het reservoir. In Figuur 6 is de cumulatieve vrijgekomen seismische energie als functie van deze ratio te zien voor voorkomens die een drukval boven de 72 bar kennen (zie paragraaf 2.1). Omdat er gemiddelde waarden worden gebruikt per laagpakket worden de waarden voor een aantal voorkomens over elkaar heen geplot in het geval van de niet bevende voorkomens. De cirkels geven aan hoeveel voorkomens over elkaar zijn geplot. Ter vergelijking: de grootste cirkel geeft de 27 Rotliegend voorkomens aan met het Ten Boer Laagpakket als seal.

Bevende voorkomens onderscheiden zich op basis van seismische energie, maar kunnen, als ze dezelfde Eburden/Ereservoir ratio hebben, op een verticale lijn liggen. Bij de bevende voorkomens is er duidelijk een positieve trend aanwezig. Naarmate de ratio hoger is zijn er meer voorkomens die beven.



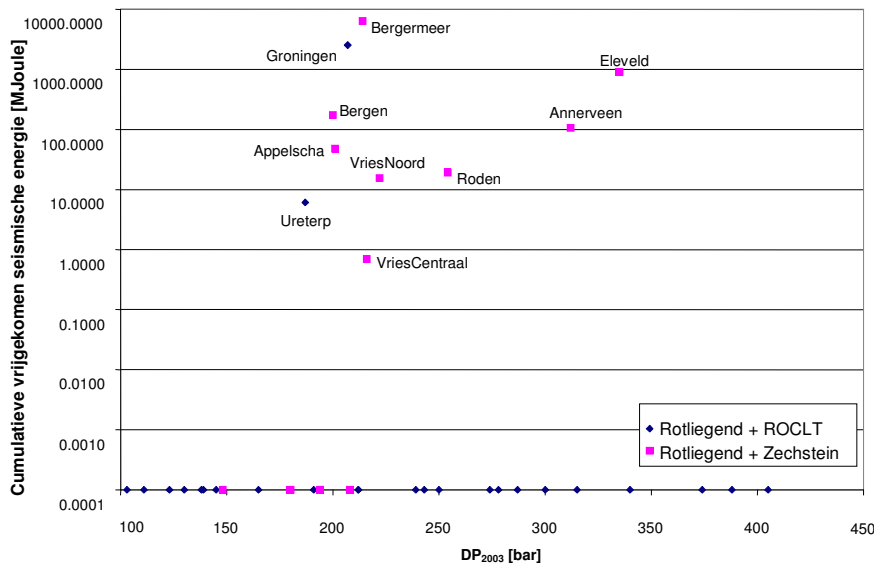
Figuur 6 Relatie tussen Eburden / Ereservoir ratio en de vrijgekomen energie

De waarden voor parameter E boven 2,5 gelden voor situaties waarbij het Z1 Carbonaat Laagpakket (dolomiet + anhydriet) direct boven de Slochteren Formatie (zandsteen) ligt en voor situaties waar het Ten Boer Laagpakket dun en zandig is. In dit laatste geval kan het Ten Boer Laagpakket worden beschouwd als een 'waste zone' waarvan verwacht wordt dat deze mee zal depletteren, waardoor Zechsteindolomieten en -anhydrieten als werkelijke 'seal' kunnen worden beschouwd. Figuur 7 toont een diktekaartje van het Ten Boer Laagpakket met Rotliggendvoorkomens, waarbij opvalt dat de meeste bevingen in de kleinere voorkomens geconcentreerd zijn in het gebied waar het Ten Boer Laagpakket dun (en zandig) is. De bevingen in het Groningen voorkomen hebben waarschijnlijk een andere oorzaak omdat voor dit voorkomen een lagere Eburden/Ereservoir geldt. Waarschijnlijk worden de bevingen in het Groningen voorkomen veroorzaakt door de combinatie van de grootte van het voorkomen met een hoge breukdichtheid.



Figuur 7 Dikte Ten Boer Laagpakket (ROCLT) in Friesland en Groningen

Wanneer de Rotliegend-voorkomens verder worden geanalyseerd wordt het verschil in het type 'seal' en de invloed daarvan op de vrijgekomen seismische energie nog duidelijker. Figuur 8 laat de vergelijking tussen twee clusters binnen de Rotliegend reservoirs zien: één cluster met ROCLT als 'seal' en een andere cluster met Zechstein-dolomiet en -anhydriet als 'seal'. De voorkomens zijn in Figuur 8 gerangschikt op basis van DP. De voorkomens die meer dan 220 bar gedepleteerd zijn en een Zechstein 'overburden' hebben beven allemaal. Dit geldt niet voor de voorkomens met een Ten Boer 'overburden', deze beven geen van allen boven de 220 bar, zelfs niet bij 300-400 bar depletie (zoals bijv. Ameland-Oost).



Figuur 8 Seismische energie als functie van de DP_{2003} voor Rotliegend reservoirs waarbij de reservoirs zijn gesplitst op basis van 'seal' type

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

Het is waarschijnlijk dat breukdichtheid een positieve correlatie met bevingen zal geven. Aangetoond is immers (bijv. Roest en Kuilman, 1994, Rijkers et al., 1998, Mulders, 2003) dat de meeste geïnduceerde bevingen plaatsvinden op locatie van bestaande zwaktezones zoals breuken. Bij de parameter breukdichtheid wordt tevens verondersteld dat de kans op een ongunstige breukblok configuratie (in de zin van bevinggevoeligheid) groter wordt naarmate het aantal breuken binnen een voorkomen toeneemt (Mulders, 2003).

De parameter voor de breukdichtheid binnen een voorkomen wordt opgebouwd uit de volgende eigenschappen:

h : maximale dikte van de gaskolom van het voorkomen [m]

l_b : totale breuklengte van de intra-reservoir breuken en randbreuken van een bepaald voorkomen [m]

A : oppervlakte (gemeten binnen de GWC dieptecontour) van het voorkomen [m²]

Deze parameter is dan dimensieloos te schrijven als:

$$\frac{\text{breukoppervlakte}^{3/2}}{\text{brutogesteentevolume}} = \frac{l_b^{3/2} \cdot h^{3/2}}{A \cdot h} = \frac{l_b^{3/2} \cdot \sqrt{h}}{A} \quad (5)$$

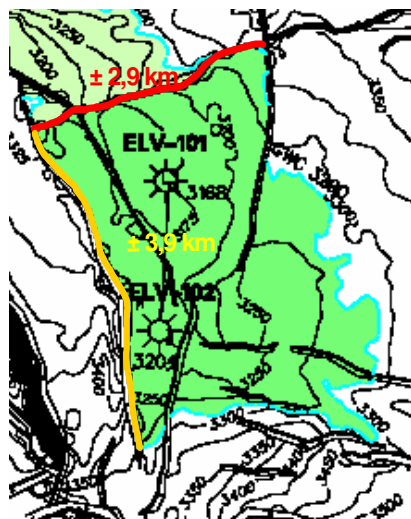
Oorspronkelijk was het idee om volume en breukoppervlakte als aparte parameter te beschouwen, maar hier is van afgezien om de volgende redenen:

1. Volume en breukoppervlakte zijn lastig dimensieloos te maken.
2. Er bestaat een correlatie tussen breukoppervlakte en volume. Beide parameters zijn afhankelijk van de dikte en de kans op een groter

breukoppervlakte wordt groter naarmate het volume van een voorkomen toeneemt.

2.3.1 *Bepaling van de breuklengte en breukoppervlakte*

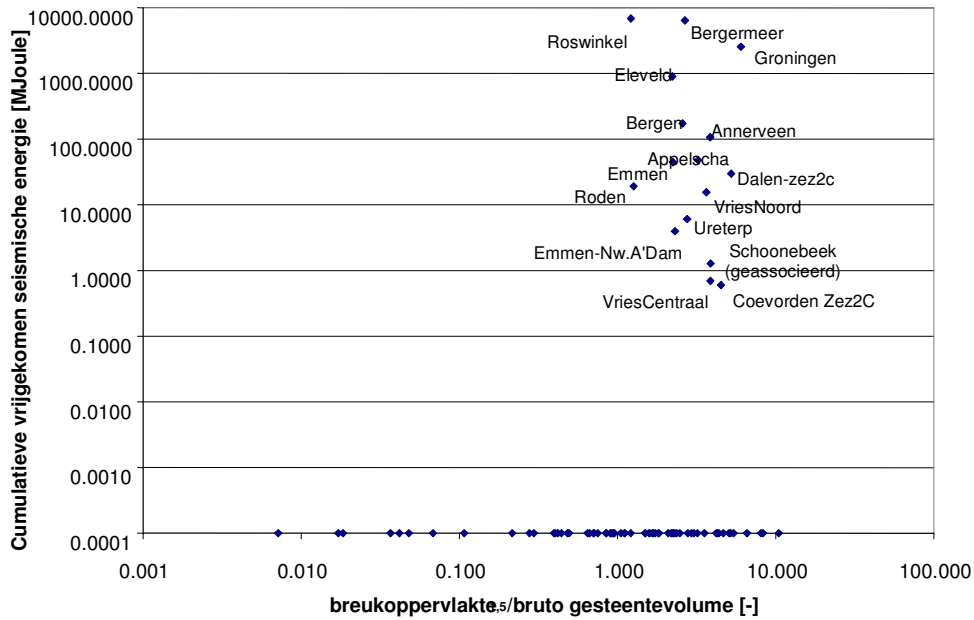
De breuklengte wordt bepaald door het opmeten van de breuken in de top reservoir kaarten zoals die gegeven zijn in de winningsplannen (een voorbeeld is gegeven in Figuur 9). Er bestaat echter geen norm of protocol voor het maken van top reservoir kaarten en bovendien zijn deze gemaakt op basis van seismische interpretatie waarbij verschillende soorten seismiek (2D versus 3D, hoge versus lage resolutie) zijn gebruikt. Daarom is de bepaling van B omgeven met enige onzekerheid. Een voordeel hierbij is dat veel voorkomens worden geëxploiteerd door een en hetzelfde bedrijf, waarbij de verwachting is dat de kwaliteit binnen een bedrijf van constanter niveau is. De breukoppervlakte wordt vervolgens bepaald door de breuklengte in een bepaald voorkomen met de maximale hoogte van de gaskolom van dat voorkomen te vermenigvuldigen.



Figuur 9 Breuklengte bepaling van 2 randbreuken voor het Eleveld voorkomen

2.3.2 *Resultaten*

De resultaten voor de 97 voorkomens (met een DP_{2003} boven de 72 bar) zijn gegeven in Figuur 10. Duidelijk komt naar voren dat voorkomens met een lage breukdichtheid geen aanleiding geven tot geïnduceerde seismiciteit. Voorbeelden van voorkomens met een lage B-waarde zijn de Vlieland voorkomens in Friesland. De laagste waarde voor de parameter breukdichtheid waarbij bevingen zijn waargenomen is 1,21. Voorkomens die een zeer hoge waarde voor deze parameter hebben maar niet hebben gebeefd zijn bijv. de 'Bunter'-voorkomens in Zuid-Holland en de Carboon/Zechstein-voorkomens in Overijssel en Drenthe.



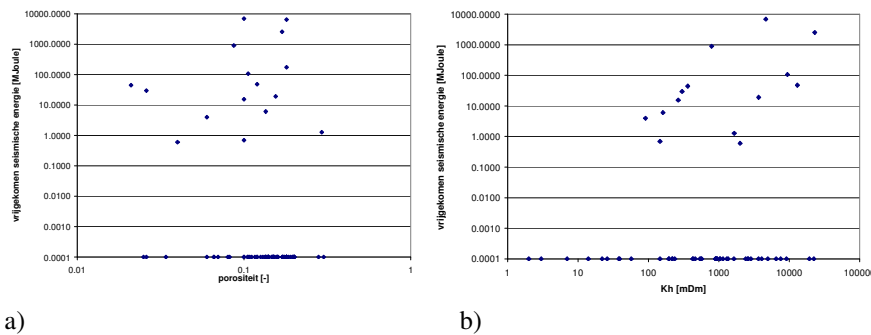
Figuur 10 Relatie tussen breukdichtheid en vrijgekomen seismische energie

2.4 Andere parameters

In deze paragraaf worden een aantal parameters beschreven die wel zijn onderzocht, maar die niet gebruikt zijn voor verdere analyse om diverse redenen. Een lijst van alle gebruikte gegevens is te vinden in Tabel 1.

2.4.1 Porositeit en horizontale permeabiliteit (K_h)

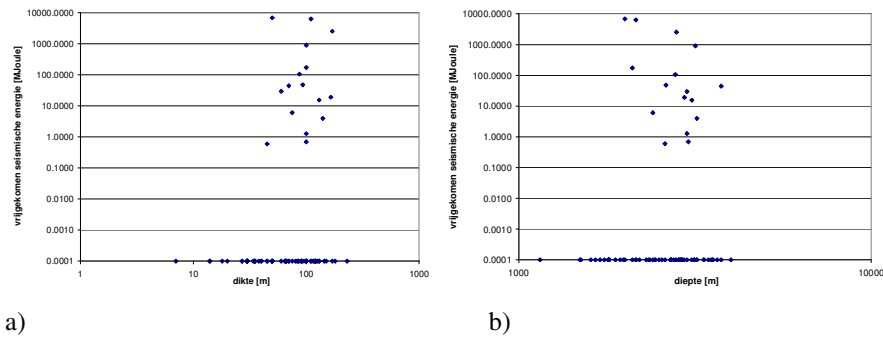
Adushkin et al. (2000) concludeerde dat bevende voorkomens (wereldwijd) gemiddeld een geringere porositeit en permeabiliteit kennen dan niet bevende voorkomens. Dezelfde conclusie kan niet worden getrokken voor de gasvoorkomens in Nederland. Figuur 11 laat de grafieken zien voor de porositeit, respectievelijk de K_h versus de vrijgekomen seismische energie. Duidelijk is dat beide eigenschappen niet (porositeit) of nauwelijks (K_h) de bevende voorkomens van de niet bevende voorkomens kunnen onderscheiden.



Figuur 11 a) porositeit versus vrijgekomen seismische energie b) K_h versus vrijgekomen seismische energie

2.4.2 Dikte en diepte

Volgens Adushkin et al. 2000 zijn dikte en diepte eigenschappen die een positieve relatie lijken te hebben met het optreden van geïnduceerde seismiciteit in olie- en gasvoorkomens. De dikte wordt meegenomen in de parameter 'breukdichtheid', maar heeft als eigenschap afzonderlijk nauwelijks onderscheidend vermogen. De parameter diepte heeft matig onderscheidend vermogen wat waarschijnlijk veroorzaakt wordt door de relatie tussen diepte en maximale DP. Diepe reservoirs hebben over het algemeen een grotere maximale DP dan ondiepe reservoirs.



Figuur 12 a) dikte versus vrijgekomen seismische energie b) diepte versus vrijgekomen seismische energie

2.4.3 Neotektoniek

Recente neotektonische gegevens (TNO-NITG database, van Eijs en Dalfsen, 2004) zijn gebruikt om correlatie te vinden met de geïnduceerde bevingen. Deze correlaties konden alleen visueel bepaald worden en niet kwantitatief, waardoor het niet mogelijk was deze mogelijke correlatie verder statistisch te analyseren.

2.4.4 Maximale breukbeweging (RSD_{max})

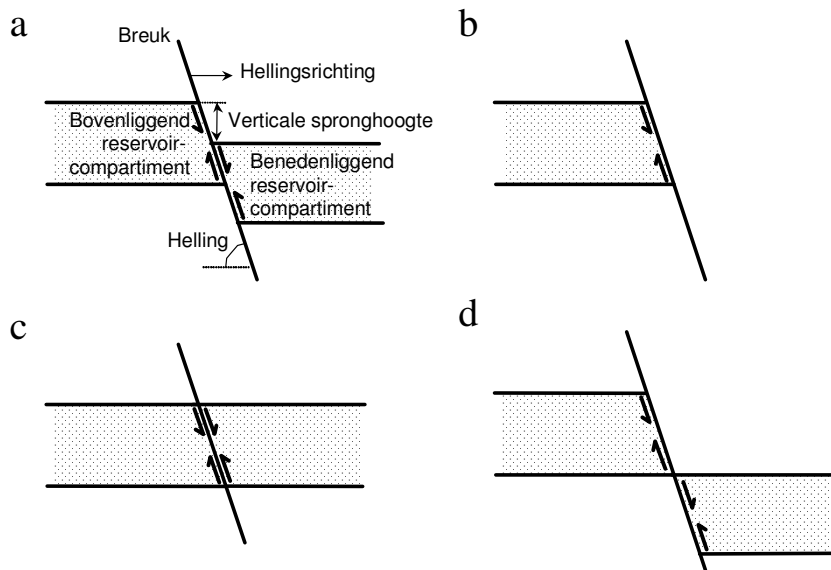
Gaswinning en de daarmee samenhangende veranderingen in het lokale ondergrondse spanningsveld kunnen leiden tot reactivatie van geologische breuken. Breukbeweging kan geleidelijk of plotseling plaatsvinden, waarbij in het laatste geval een aardbeving gegenereerd wordt.

Breukbeweging, aangeduid door RSD (Relative Shear Displacement), is het resultaat van differentiële reservoircompactie (Roest & Kuilman 1994, Mulders 2003). Deze treedt op, als de compactie aan weerszijden van een breuk met verschillende richting en/of magnitude plaatsvindt.

Een voorbeeld hiervan is schematisch weergegeven in Figuur 13a. Een steilstaande afschuiving verdeelt een reservoir in een benedenliggend ('hangingwall') en een bovenliggend ('footwall') reservoir compartiment. Wanneer productie in beide compartimenten plaatsvindt zal door reservoircompactie de bovenkant van de compartimenten naar beneden bewegen, terwijl de onderkant naar boven beweegt. Overlapping van beide bewegingen zal zorgen voor een vergroting van de totale beweging op het breukvlak. Breukbeweging tijdens depletie bij deze configuratie zal dus hoger zijn dan de beweging van het breukvlak in Figuur 13b (randbreuk van een reservoir) of Figuur 13c (breuk zonder verzet). In termen van maximale breukbeweging (RSD_{max}) is een configuratie, waarbij de onderkant van het

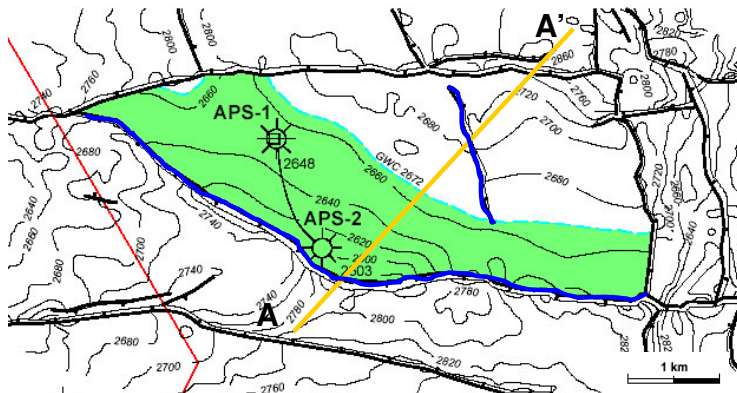
benedenliggende reservoircompartiment op dezelfde diepte ligt als de bovenkant van het bovenliggende compartiment (zie Figuur 13d), het meest kritisch.

Behalve de geometrie van de configuratie spelen ook andere factoren een rol bij differentiële compactie, zoals variatie van stijfheid van het reservoirgesteente aan weerszijden van de breuk, initiële poriëndruk en drukdaling tijdens depletie. Aangenomen dat de gesteente-eigenschappen, initiële poriëndruk en drukdaling tijdens gaswinning in beide reservoircompartimenten gelijk zijn, zou de breukbeweging voor de configuratie in Figuur 13c nihil zijn.



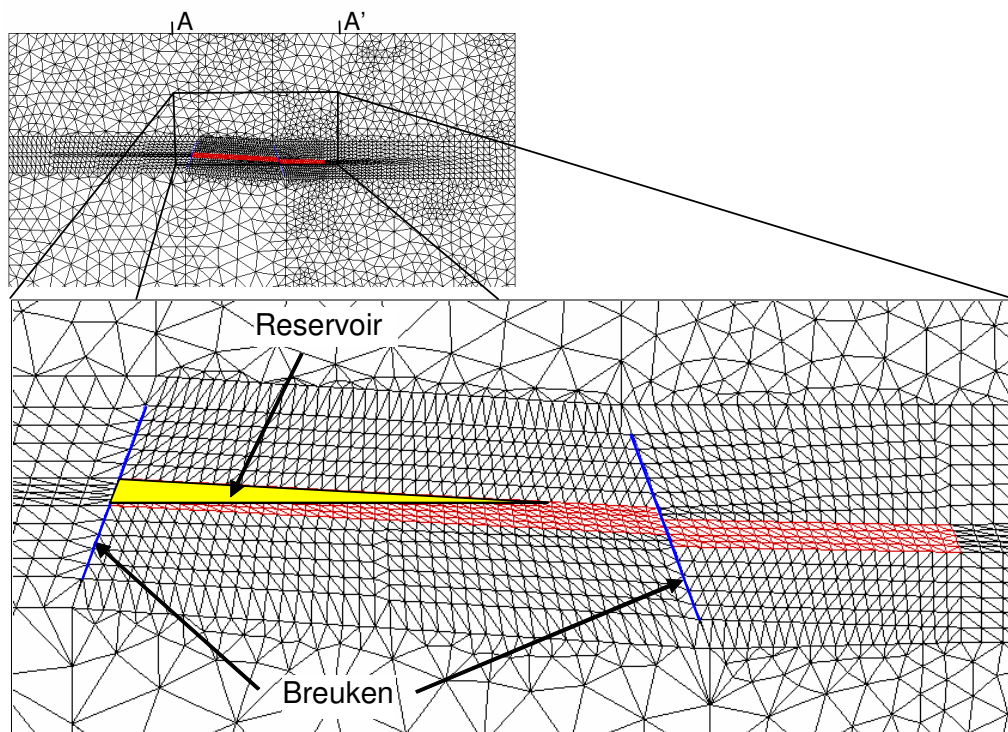
Figuur 13 Definitie van geometrische begrippen m.b.t. breuken in reservoirs en schematische weergave van vier verschillende configuraties. De pijltjes geven de bewegingen aan van de reservoirblokken langs de breuk t.g.v. compactie.

Op basis van het voorgaande zijn achttien velden geanalyseerd op voorkomende breukstructuren (zie Tabel 3). Dit zijn elf velden waarbij geïnduceerde seismiciteit is waargenomen en zeven additionele velden die het scala aan verschillende typen reservoirs in Nederland afdekken. Voor elk veld is een geologische dwarsdoorsnede bepaald, die door de meest kritische breukconfiguratie van het veld verloopt; een voorbeeld hiervan is getoond in Figuur 14.



Figuur 14 Diepte top reservoir kaart van Appelscha met indicatie van breuken (in blauw: gemodelleerde breuken) en geologische dwarsdoorsnede (bron: NAM, 2004).

Deze dwarsdoorsnede is vervolgens ingevoerd in het eindige elementen pakket DIANA waarna de RSD_{max} berekend kan worden. De dwarsdoorsnede die in DIANA gemaakt is van het Appelscha voorkomen, is afgebeeld in Figuur 15.



Figuur 15 DIANA eindige elementen grid voor Appelscha.

Gesteente-eigenschappen, initiële reservoir-poriëndruk, reservoirdiepte en reservoirdikte zijn conform de data die verzameld zijn in dit onderzoek (Tabel 1). De initiële poriëndruk in het reservoiromgevend gesteente is hydrostatisch. Breukbeweging is berekend voor een drukafname in het reservoir t/m het jaar 2003. Gezien het feit dat de parameter 'maximale breukbeweging' zo eenvoudig mogelijk bepaald dient te worden en de modellering alleen de berekening van de maximale breukbeweging op reservoirniveau beoogt, zijn bij de modellering de volgende aannamen gemaakt:

- Geologische gelaagdheid is buiten beschouwing gelaten, d.w.z. gesteenten hebben homogene isotrope eigenschappen.
- De reservoirdikte is gelijk aan de maximale hoogte van de producerende gaskolom.
- Gedeelten van een breuk die aan beide zijden door reservoirgesteente begrensd worden hebben een initiële poriëndruk gelijk aan de reservoirdruk en depletieren met het reservoir mee.
- Gedeelten van een breuk die aan geen of slechts aan één zijde begrensd worden door reservoirgesteente hebben een initiële hydrostatische poriëndruk en depletieren niet mee.
- De initiële horizontale effectieve spanning is 40% van de initiële verticale effectieve spanning ($K_0 = 0,4$) (Mulders, 2003).

- De breuk incorporeert Mohr-Coulomb-frictie met een interne wrijvingshoek van 30° en een cohesie van 0 MPa (Mulders, 2003).
- De dichtheid van alle gesteenten is 2400 kg/m³.

De berekende maximale breukbeweging (RSD_{max}) is vermeld per voorkomen in Tabel 3 en uitgezet tegen het cumulatieve seismische energie t/m het jaar 2003 in Figuur 16. De magnituden van de RSD_{max} -waarden uit Tabel 3 zijn in de orde van grootte van eerder modelleringswerk door Roest en Kuilman (1994), Van Eijs (1999), Orlic et al. (2002), van Wees et al. (2003) en Mulders (2003).

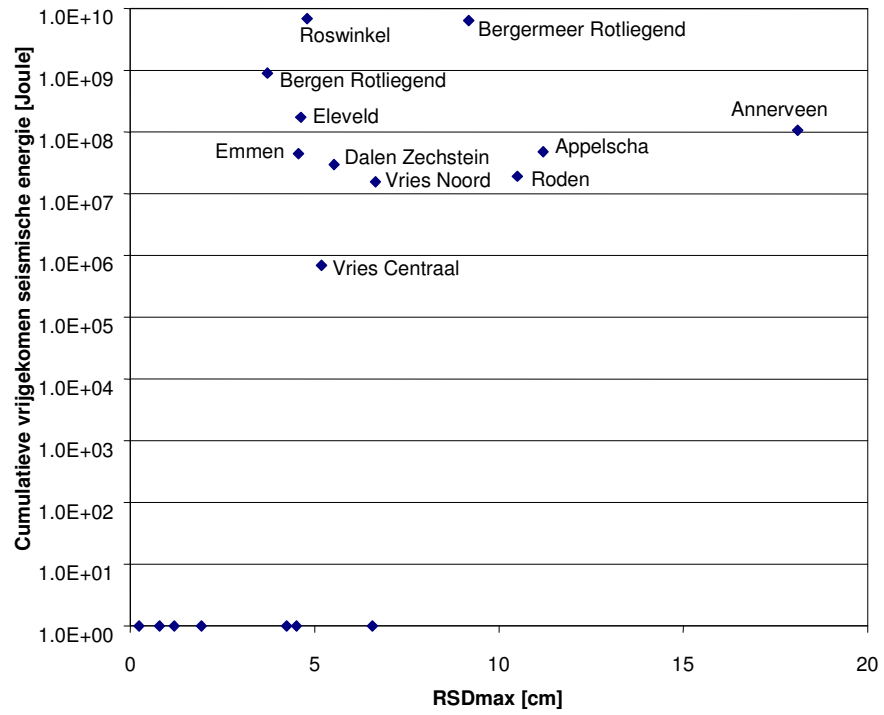
Visueel kan voor RSD_{max} een cut-off vastgesteld worden van 3,7 cm. Echter op basis van deze hoeveelheid data kan de statistische cut-off niet worden berekend.

Geconcludeerd kan worden, dat maximale breukbeweging een geschikte parameter lijkt om producerende voorkomens van koolwaterstoffen in Nederland in te delen in verschillende seismisch-risicoklassen. Nadelen zijn echter enige mate van subjectiviteit bij het kiezen van een geologische dwarsdoorsnede van een veld en het tijdsintensieve bouwen van de geomechanische modellen. Een derde nadeel is de mate van afhankelijkheid die ontstaat met de andere parameters. Zowel de ratio Eburden/Ereservoir als de breukdichtheid zijn geïncorporeerd in het model en spelen een rol bij de berekening.

Om deze redenen is de parameter uiteindelijk niet gebruikt voor de bepaling van seismisch-risicoklassen.

Tabel 3 Numeriek berekende maximale breukbeweging (RSD_{max}) en cumulatieve vrijgekomen seismische energie t/m het jaar 2003 voor verschillende velden in Nederland.

Veldnaam	Cumulatieve vrijgekomen seismische energie (15-01-2004) [MJoule]	RSD_{max} (depletie t/m 2003) [cm]
Roswinkel	6870	4,8
Bergermeer Rotliegend	6370	9,2
Eleveld	901	3,7
Bergen Rotliegend	173	4,6
Annerveen	106	18,1
Appelscha	48	11,2
Emmen	45	4,6
Dalen Zechstein	30	5,5
Roden	19	10,5
Vries Noord	16	6,7
Vries Centraal	1	5,2
Ameland Oost	0	4,5
Ameland Westgat	0	0,8
Blija Ferweradeel	0	0,2
Bottlek	0	1,9
Groet Rotliegend	0	6,6
Schermer Rotliegend	0	4,2
Tietjerksteradeel	0	1,2



Figuur 16 Cumulatieve vrijgekomen seismische energie versus numeriek berekende maximale breukbeweging (RSD_{max})

3 Statistische analyse van de indicatorparameters

3.1 Parameter E: Eburden/Ereservoir [-]

Figuur 6 laat zien dat er voor E-waarden kleiner dan 1,19 geen bevingen worden waargenomen. De hypothese wordt gesteld dat er een grenswaarde voor Eburden/Ereservoir bestaat waaronder geen bevingen zullen optreden. De vraag is dan hoe groot deze grenswaarde (kritische grens) is.

Door het toekennen van gemiddelde waarden voor de Young's moduli aan gesteentelagen en het beperkt voorkomen van overburden-reservoir combinaties, is variatie in waarden voor parameter E beperkt. De maximumwaarde die we in de data hebben gevonden is 2,63 (bij twaalf voorkomens). Dit nemen we aan voor de maximumwaarde in de Nederlandse ondergrond die gebruikt wordt voor de methode zoals beschreven in Appendix A. Voor de genoemde kritische grens wordt de volgende waarde bepaald:

$$E_{\text{grens}} = 0,93 \pm 0,03$$

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

Wanneer de cumulatieve vrijgekomen seismische energie van voorkomens wordt gesorteerd op de dimensieloze parameter B constateren we dat geen bevingen zijn geregistreerd bij waarden van deze parameter onder 1,21 (Figuur 10).

We stellen wederom de hypothese op dat er een grenswaarde voor B bestaat waaronder geen bevingen zullen optreden (kritische grens).

De maximale waarde voor deze dimensieloze parameter is gelijk aan de maximale waarde in de dataset. Deze is 10,47.

Dan wordt met de, in Appendix A, beschreven methode de volgende kritische grens gevonden:

$$B_{\text{grens}} = 0,98 \pm 0,16$$

3.3 Kans op beven

Het mogelijke optreden van bevingen gebeurt in de klasse van voorkomens die gekarakteriseerd worden door de eis dat $B \geq B_{\text{grens}}$ en $E \geq E_{\text{grens}}$.

Hierbij wordt de eerste conditie afgekort met B+, de tweede met E+ en de ontkenningen met B- en E-. In de dataset van de voorkomens boven de kritische drukval (DP > 72 bar), bestaande uit 97 voorkomens, wordt de volgende verdeling gevonden:

E+ B+:	64	voorkomens
E- B+:	1	voorkomen
E+ B-:	14	voorkomens
E- B-:	18	voorkomens

Van de 64 voorkomens in de klasse “met beefpotentieel” zijn er 39 met een $E \leq 1,33$; de overige voorkomens in deze klasse (25) hebben een $E \geq 1,70$

Hoe kunnen we uit deze getallen een bevingkans schatten voor voorkomens? We kunnen ieder voorkomen opvatten als een “experiment”, met twee mogelijke uitkomsten. Let wel dat het hier een experiment betreft dat niet af is. De huidige berekende kansen moeten dus worden opgevat als minimum kansen.

In de categorie $E \leq 1,33$ zijn er 39 voorkomens, waarvan er tot nu toe 3 gebeefd hebben. Voor een dergelijke situatie is de regel van Laplace toepasbaar (zie Appendix A en Jaynes, Hoofdstukken 6, 18).

Voor de categorie met een modulusverhouding lager dan of gelijk aan 1,33 geldt voor de bevingkans P_l :

$$P_l = 0,10 \pm 0,05$$

Voor de categorie met een E-waarde groter dan of gelijk aan 1,70 geldt dat van de 20 voorkomens er 13 zijn gaan beven. De regel van Laplace levert nu voor de bevingkans P_h :

$$P_h = 0,52 \pm 0,09$$

Het verschil tussen de waarden van P_l en P_h is significant, het is in absolute waarde 4 maal zo groot als $(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$. Dit betekent dat het verschil in kans tussen de twee categorieën $E \leq 1,33$ en $E \geq 1,70$ niet berust op toevalligheden in de dataset. Er is ook een grenswaarde berekend tussen deze twee categorieën op een vergelijkbare maar meer gecompliceerde manier als beschreven in Appendix A. Deze waarde is 1,34.

Er is een complicatie bij de bovenstaande analyse. Reservoirs die nu niet beven kunnen dat eventueel nog gaan doen in de toekomst. Het “experiment” – de metafoor die hierboven is gebruikt - is in principe slechts afgelopen als het voorkomen in kwestie is gestopt met produceren en er weer een evenwichtstoestand bestaat in het reservoir. Dit houdt in dat de kanswaarden in de toekomst kunnen veranderen. Ook de validiteit van de twee parameters E en B zal in de toekomst bij nieuwe gegevens getoetst moeten worden.

3.4 Voorspellingen

In onze dataset hebben we 27 voorkomens waarbij de drukval onder de kritische grens van 72 bar ligt. Hoe liggen de bevingkansen van deze voorkomens bij voortgaande productie, wanneer de drukval boven de kritische grens komt? Ten eerste wordt er gekeken naar de maximale drukval van deze voorkomens.

Bij slechts 12 van de 27 voorkomens komt deze in de toekomst boven de waarde van 72 bar.

Uitgaande van de hypothesen die wij in het voorafgaande hebben besproken stellen we dat voor het optreden van beving noodzakelijk is dat een voorkomen in de klasse (E+ B+) ligt, zoals boven gedefinieerd. Van de 12 voorkomens liggen er 9 in deze klasse. Van deze 9 liggen 7 voorkomens in de klasse P_l ($P_l = 0,10 \pm 0,05$) en 2 in de klasse P_h .

Voor de situatie tot 14-01-2004 zijn in Figuur 17 de kansen voor de voorkomens op basis van DP, E en B gegeven.

3.5 Kans op beving voor voorkomens die al gebeefd hebben

In dit onderzoek wordt gesteld dat de kans op een beving voor een voorkomen dat al gebeefd heeft moet worden berekend volgens het PSHA model (van Eck, 2004). Dat betekent dat de kans op beven voor deze voorkomens in dit onderzoek op 1 wordt gesteld.

Reeds bevende voorkomens: P=1 (16) hazard model KNMI	
DP > 72 (81)	B > 0,98 en E > 1,34: $P_h=0,52 \pm 0,10$ (12)
	B > 0,98 en $0,93 < E < 1,34$: $P_l=0,10 \pm 0,05$ (36)
	B < 0,98 en/of E < 0,93 P=0 (33)
DP < 72 (27)	P=0 (27)

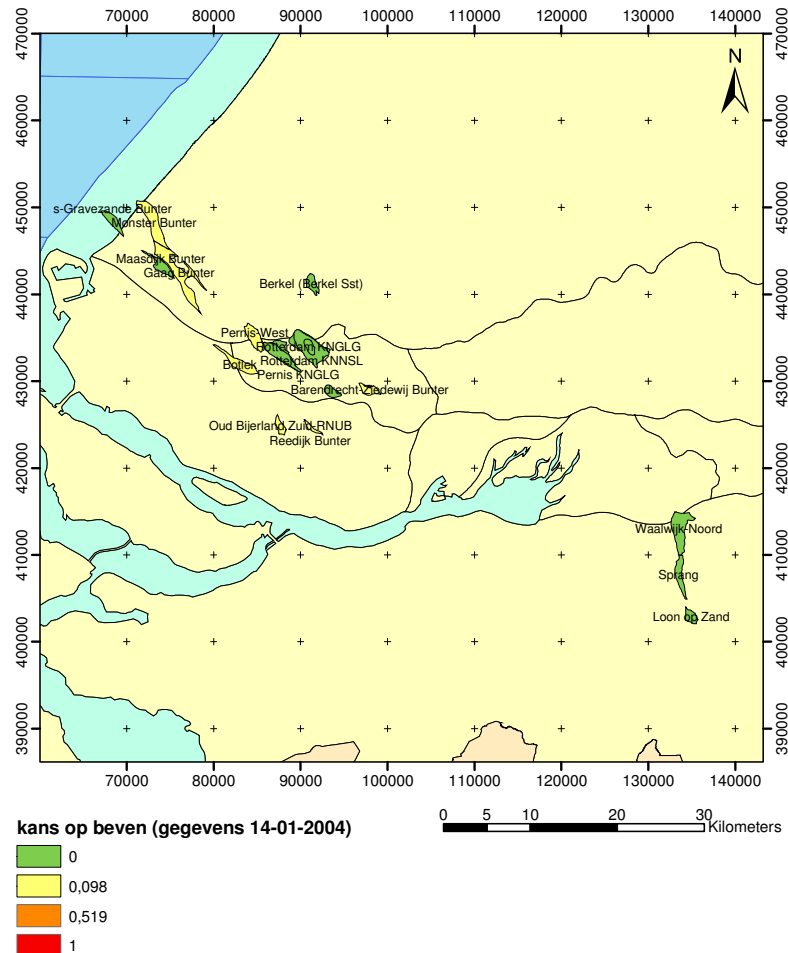
Figuur 17 Minimum kansen op aardbevingen de verschillende voorkomens op basis van de key parameters (status 14-01-2004)

4 Resultaten

Resultaten worden gegeven voor verschillende delen van Nederland. Details van de verschillende voorkomens worden gegeven in Appendix B. Omdat het hier vertrouwelijke informatie betreft zal detail informatie per operator worden gesplitst. Er bestaan dus uiteindelijk 4 versies van dit rapport.

4.1 Zuid-Holland en Brabant

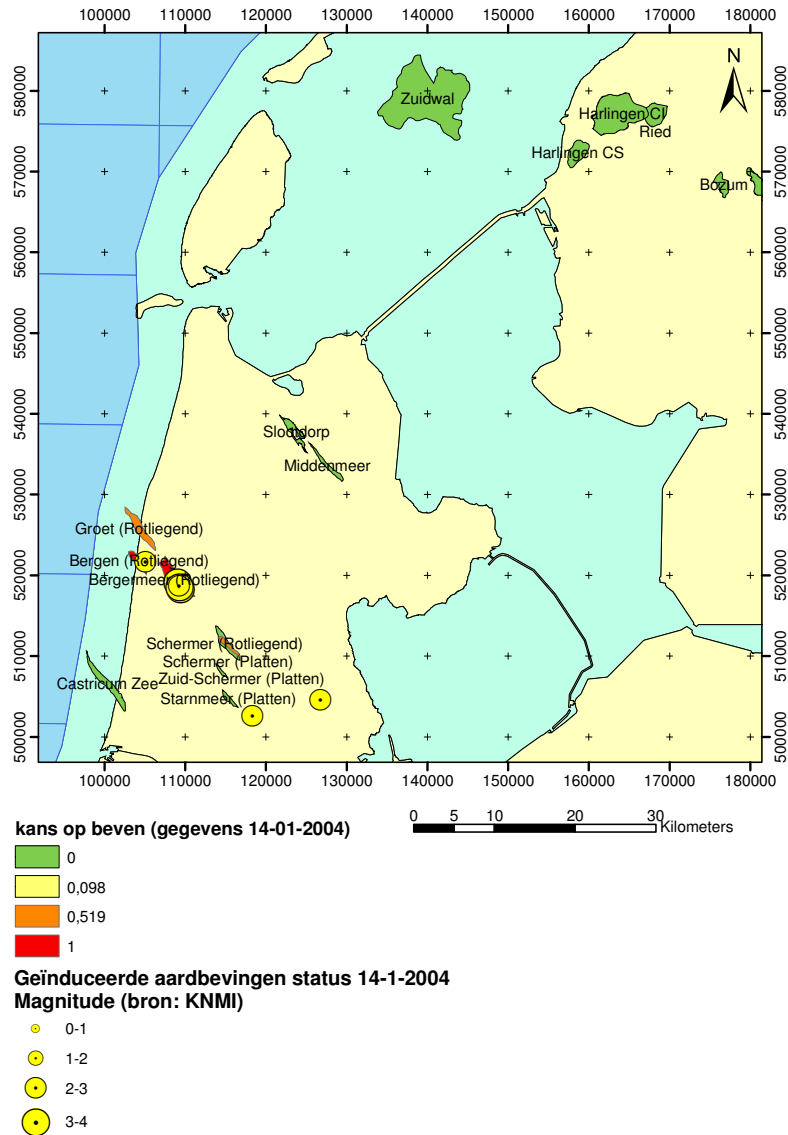
De voorkomens in Zuid-Holland en Brabant tonen een laag risico (Figuur 18). Aan de olie-voorkomens is een kans van 0 op het voorkomen van een aardbeving toegekend, omdat de DP in deze voorkomens niet boven de 72 bar zal uitkomen. De 'Bunter' voorkomens in deze regio worden gekenmerkt door de hoge breukdichtheid en een waarde rond de 1 voor de Eburden/Ereservoir ratio. Voor deze voorkomens wordt een gering risico voorspeld.



Figuur 18 Kans op beven voor de voorkomens in Zuid-Holland

4.2 Noord-Holland, Zuidwal en Friesland (oost)

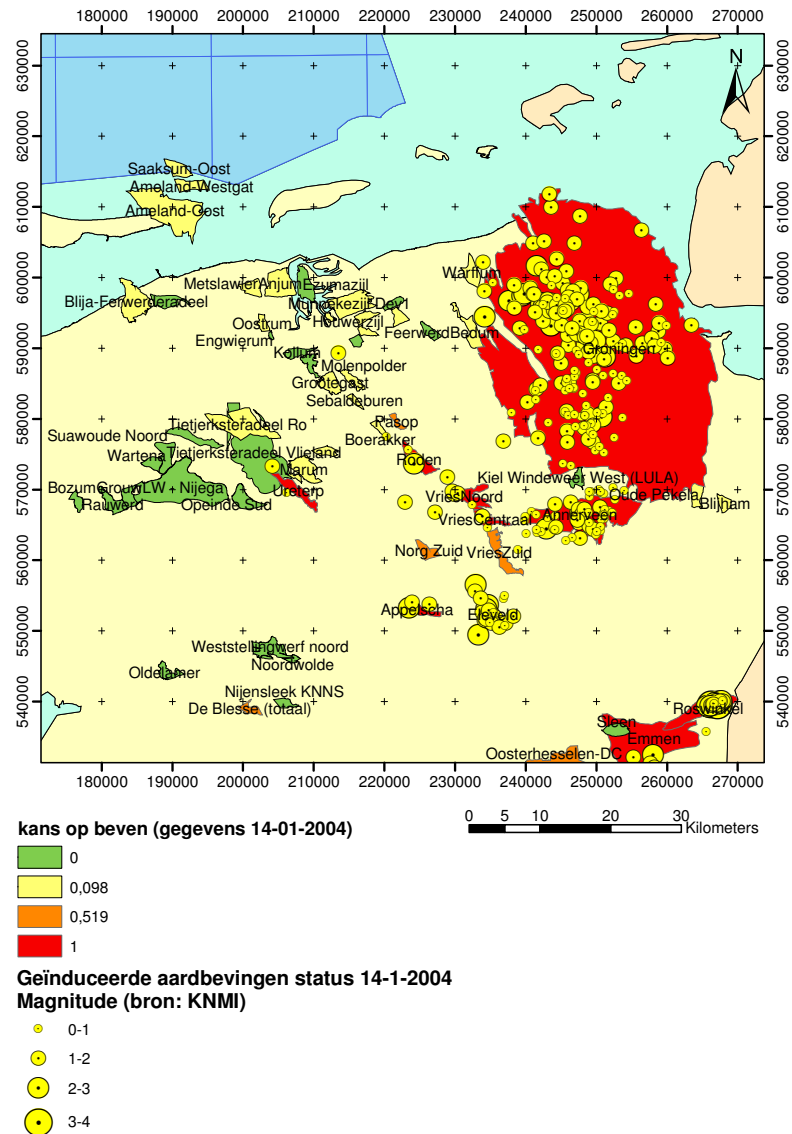
Een aantal voorkomens in Noord-Holland wordt gekenmerkt door het optreden van relatief zware aardbevingen. Op basis van parameter E en B hebben andere voorkomens, die sterk lijken op de voorkomens die reeds gebeefd hebben, een relatief hoge kans op beven.



Figuur 19 Kans op beven voor de voorkomens in Noord-Holland en Friesland (oost).

4.3 Friesland en Groningen

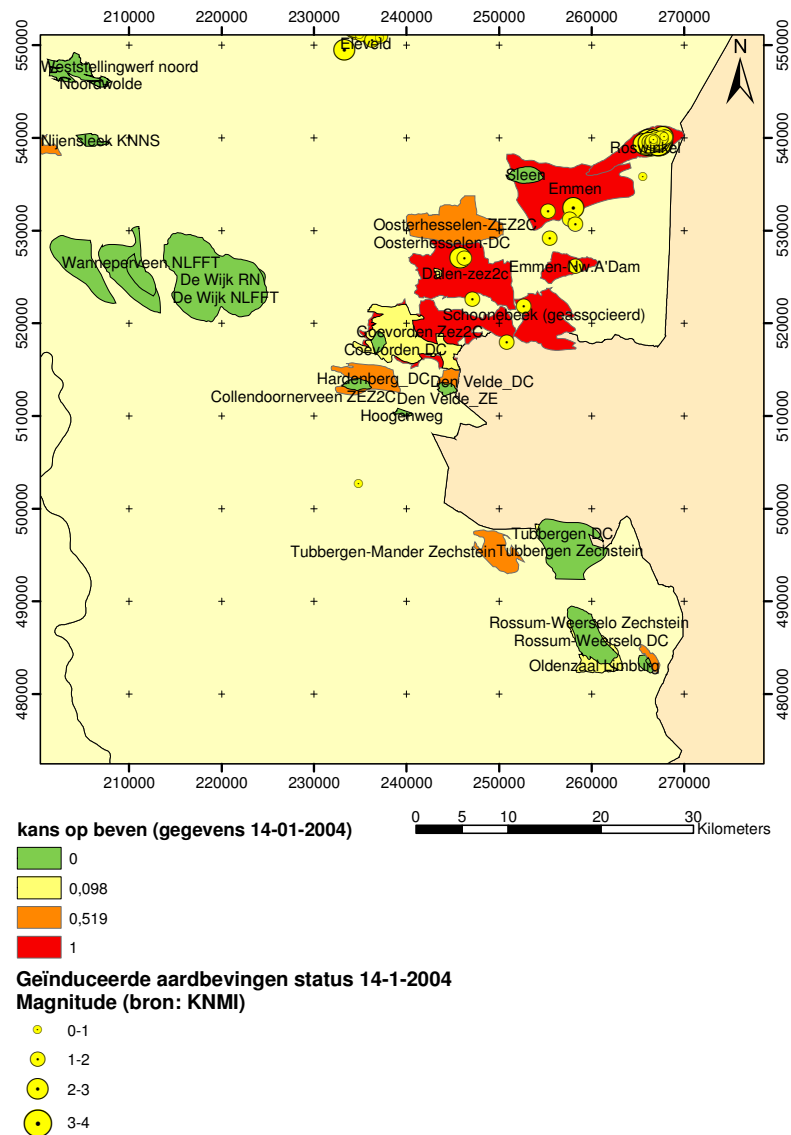
Er is duidelijk een tweedeling te zien in Figuur 20. De ondiepere KNNS voorkomens hebben een kans van 0 op beven terwijl de diepere Rotliegend voorkomens een geringe tot redelijke kans op beven laten zien (bij een DP > 72). Duidelijk waarneembaar is dat de kleine zuidelijke Rotliegend voorkomens de hoogste kans op beven kennen vanwege de combinatie met een zechstein 'seal'.



Figuur 20 Kans op beven voor de voorkomens in Friesland en Groningen

4.4 Overijssel en Drenthe

Het betreft hier veel Zechstein voorkomens die alle een redelijke kans op beven kennen of al gebeefd hebben (Figuur 21).



Figuur 21 Kans op beven voor de voorkomens in de provincies Drenthe en Overijssel.

5 Conclusies

Uit dit onderzoek is gebleken dat het mogelijk is om aan de hand van eigenschappen van een voorkomen een uitspraak te doen over de kans op beven van dat voorkomen. Daarvoor zijn twee parameters gekozen die voldoen aan de volgende criteria: onderscheidend vermogen, fysische relevantie, dimensieloos en eenvoudig te bepalen.

Parameter E beschrijft de verhouding tussen de Young's moduli van de overburden en het reservoir, parameter B is een maat voor de breukdichtheid. Op basis van statistisch onderzoek naar de combinatie van deze parameters en gebruikmakend van informatie over de voorkomens die gebeefd hebben, kunnen voorkomens ingedeeld worden in 4 kansklassen. Dit kansmodel kan niet als statisch worden beschouwd omdat er in de toekomst meer informatie zal vrijkomen. Niet alleen kansen kunnen dan veranderen maar ook de validiteit van de twee parameters zal getoetst moeten worden. Aanbevolen wordt deze toetsing jaarlijks uit te voeren.

Als 'spin-off' van dit onderzoek worden nog twee observaties in dit onderzoek uitgelicht. Geconstateerd is dat de 182 bevingen in het Groningen-voorkomen hebben plaatsgevonden gedurende slechts 10 bar drukval. Op het moment van de eerste beving (1991) was de druk 197 bar terwijl deze eind 2003 207 bar was. Het voorkomen zal in de toekomst nog 110 bar in druk dalen wat waarschijnlijk zal leiden tot meer bevingen.

Door gebruik te maken van de meest recente dieptekaarten van formaties is gebleken dat het zoutkussen onder het Roswinkel voorkomen waarschijnlijk nog actief zijn. Actief diapirisme is een mogelijke verklaring voor het feit dat er veel bevingen zijn geregistreerd boven dit voorkomen.

6 Referenties

- Adushkin, V., Rodionov, V. N., and Turuntaev, S., 2000, Seismicity in the Oil Field: Oilfield Review, 1, pp. 2–17.
- Ahorner, L., Pelzing, R. (1985) The source characteristics of the Liège earthquake on November 8, 1983, from digital recordings in West Germany. In: P. Melchior (ed), Seismic activity in Western Europe. D. Reidel, Dordrecht, pp. 263-289.
- Castagna, J. P., Batzle, M. L. and Kan, T. K., 1993, Rock physics - the link between rock properties and AVO response in Castagna, J. P. and Backus, M. M., Eds., Offsetdependent reflectivity - theory and practice of AVO analysis: Soc. Expl. Geophys. Investigations in Geophysics, Vol. 8.
- Eissa, E.A. and Kazi, A. (1988): Relation between static and dynamic Young's Modulus of rocks, Int. J. Rock Mech. Min Sci., Vol. 25, No. 6, pp. 479-482.
- Feller, W. (1957) An Introduction to Probability Theory and Its Applications, Volume 1, John Wiley & Sons.
- Fjær, E., R.M. Holt, P. Horsrud, A.M. Raaen, R. Risnes. (1992) Petroleum-Related Rock Mechanics. Developments in Petroleum Science 33. Elsevier Science.
- Jaynes, E.T. (2003) Probability Theory – The Logic of Science, Cambridge University Press.
- Logan, J. M., Higgs, N.G., Rudnicki, J.W. (1997) Seismicity risk assessment of a possible gas storage project in the Bergermeer Field. Bergen Concession. (confidentieel).
- McCann, D.M., and Entwisle, D.C., 1992, Determination of Young's modulus of the rock mass from geophysical well logs: in Hurst, A., Griffiths, C.M., and Worthington, P.F., eds., Geological Applications of Wireline Logs II: Geological Society Special Publication 65, pp. 317-325.
- Mulders, F.M.M. (2003) Modelling of stress development and fault slip in and around a producing gas reservoir. Proefschrift, TU Delft.
- NAM (2004) Annual Review of Petroleum Resources 1-1-2004. CD-ROM (confidentieel)
- Orlic, B., Van Eijs, R., Zijl, W. & Van Wees, J.D. (2002) Building a 3D geomechanical model of a gas field for geohazard prediction. 64rd EAGE Conference & Exhibition. CD-ROM, paper G-36. Florence.
- Roest, J.P.A., W. Kuilman; Geomechanical analysis of small earthquakes at the Eleveld gas reservoir. In: Eurock '94, rock mechanics in petr. engineering, Proc. of a conference by the Society of Petroleum Engineers, the Intern. Society of Rock Mechanics and TU Delft, 29-30 August '94, Delft, NL, ISBN 90-5410-502,

- A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1994, pp. 573-580.
- Roest, J.P.A., Mulders, F.M.M., Kuilman, W. (1998) Geomechanical modeling of the Roswinkel gasfield. TU Delft. Report TA/IG/98/15. 27 pp. (confidentieel)
- Rijkers, R., Apon, W., Pagnier, H. (1999) Studie aardbevingen Roswinkel. Deel A: Structureel-geologische kartering. TNO-rapport NITG 99-41-C, 31 pp.
- Schön, J.H. (1996) Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics: New York (Pergamon Press).
- Van Eijs, R.M.H.E. (1999) Studie aardbevingen Roswinkel. Deel B: Geomechanisch onderzoek. TNO-Report NITG 99-8-C. 31 pp. (confidentieel)
- Van Eijs, R.M.H.E., Scheffers, B.C. (2000) Shockgas; Aardbevingen als gevolg van gaswinning. TNO-Report NITG 99-264-C, 22 pp. (confidentieel)
- Van Wees, J.D., Orlic, B., van Eijs, R., Zijl, W., Jongerius, P., Schreppers, G.J., Hendriks, M., Cornu, T. (2003) Integrated 3D geomechanical modelling for deep subsurface deformation: a case study of tectonic and human-induced deformation in the eastern-Netherlands. In nieuwland, D.A. (ed.) New insights into structural modelling. Geological Society, London, Special publications, 212, pp. 313-328
- Van Adrichem Boogaert, H.A., Kouwe, W.F.P. (Eds.) (1993–1997) Stratigraphic nomenclature of the Netherlands, revision and update by RGD and NOGEPa. Mededelingen Rijks Geologische Dienst 50.
- van Eck, T., Goutbeek, F., Haak, H., Dost, B. (2004) Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes. Concept report, Seismology Division, KNMI.

A Appendix A: Toelichting op hoofdstuk 3

Het probleem dat we in dit onderzoek tegenkomen is het volgende.

Olie- en gasvoorkomens worden beschouwd in hun afhankelijkheid van een positieve parameter a . Voor waarden van a tussen a_0 (minimum) en a_1 (maximum) hebben sommige voorkomens bevingen opgeleverd, voor waarden onder a_0 is er geen enkel voorkomen waarbij een beving is geconstateerd. We veronderstellen dat er een grenswaarde van a bestaat, noem deze waarde A , waaronder nooit bevingen voorkomen. We postuleren dus twee klassen: de voorkomens die nooit zullen beven en degenen die dat mogelijkwelks wel doen of al gedaan hebben.

Gegeven de data, wat is de beste schatting van A en de onzekerheid daarin?

Dat wil zeggen dat we de grootte van het “window” willen bepalen waarin er door voorkomens eventueel gebeefd zou kunnen worden.

Voordat we een oplossing geven van het bovenstaande probleem, merken we op dat Feller een matig bevredigende oplossing heeft beschreven voor een sterk verwant probleem (Feller, 1957, hoofdstuk IX.3, voorbeeld (e)), terwijl door Jaynes (2003) een vollediger, Bayesiaanse oplossing is gegeven voor datzelfde verwante probleem (Jaynes, hoofdstuk 6.20-22).

Zij $\pi(A)$ de á priori kansverdeling voor A , $p(data|A)$ de zogenaamde “likelijkheid” van de data gegeven A , $p(A|data)$ de a posteriori kansverdeling voor A . Deze laatste verdeling willen we weten.

De relatie tussen deze verdelingen wordt gegeven door de stelling van Bayes-Laplace:

$$p(A|data) = \frac{p(data|A) \cdot \pi(A)}{\int p(data|A) \cdot \pi(A) dA} \quad (6)$$

waarbij de integraal zich uitstrekt over de a-priori mogelijke waarden van A .

Alles wat we a-priori over A kunnen zeggen is dat $0 \leq A \leq a_0$ en dus kiezen we $\pi(A) = 1/a_0$ in deze range. De likelijkheid $p(data|A)$ wordt gegeven door de kans dat m datapunten vallen in een “window” ter grootte van $(a_1 - A)$. Zijn waarde is proportioneel aan $1 / (a_1 - A)^m$. Hierbij is m in ons geval het totale aantal voorkomens, dat gevonden is tussen de grenzen a_0 en a_1 .

We vinden dan met (6) dat:

$$p(A|data) = \frac{(m-1) \cdot (a_1 - A)^{-m}}{[(a_1 - a_0)^{1-m} - a_1^{1-m}]} \quad (7)$$

Met behulp van deze kansverdeling kunnen we $G(p) \equiv \langle (a_1 - A)^p \rangle$ berekenen, het p^e moment van $(a_1 - A)$:

$$G(p) = \frac{[(m-1)/(m-p-1)] \cdot [(a_1 - a_0)^{1-m+p} - a_1^{1-m+p}]}{[(a_1 - a_0)^{1-m} - a_1^{1-m}]} \quad (8)$$

(m is in alle ons interesserende gevallen veel groter dan p, zodat “speciale” gevallen als $m = p+1$ niet apart beschouwd hoeven te worden)

Van belang in deze studie zijn $G(1)$ en $G(2)$. $G(1)$ is de te verwachten grootte van het “window” waarin potentiële bevingen zitten.

De variantie hiervan vinden we als $G(2) - G(1)^2$.

In deze studie zijn we geïnteresseerd in een probabilistische schatting van de plaats van de scheidslijn tussen de twee klassen, een scheidslijn die onder a_0 ligt. De bovengrenzen a_1 waarmee we in deze studie te maken hebben zijn niet messcherp; ze zullen i.h.a. groter zijn dan de maximale waarde waarbij een voorkomen is gevonden. Beperkte onzekerheid in a_1 werkt in de bepaling van de scheidslijn tussen de klassen door als een “correctie op een correctie”. We bepalen ons in voorkomende gevallen tot het aannemen van een fysisch redelijke waarde van a_1 en zullen geen onzekerheden meenemen als gevolg van de niet messcherpe bovengrens a_1 .

A.1 Regel van Laplace

In het hoofdstuk 3 is sprake van de regel van Laplace, of zoals hij in het Engels genoemd wordt, “the rule of succession”. We beperken ons hier tot een korte schets van wat deze regel inhoudt.

Er zijn N zogenaamde “tweewaardige” experimenten uitgevoerd: elk experiment geeft een resultaat dat in een van twee klassen valt: Ja/Nee, Wit/Zwart, Succes/Mislukking.

Hierbij is geconstateerd dat R experimenten een “Ja”/“Wit”/ “Succes” hebben opgeleverd. Hoe moet U de kans schatten dat U bij het volgende experiment weer een “Ja” & zult zien?

Onder de uitdrukkelijke voorwaarde dat U niets anders weet van de experimenten dan dat zij inderdaad een “Ja” en een “Nee” kunnen opleveren, dus echt “tweewaardig” zijn, wordt de kans op een volgend succes berekend als $(R+1)/(N+2)$. De berekening heeft wederom de stelling van Bayes-Laplace als uitgangspunt. (In Jaynes, hoofdstuk 6, kunnen de details worden gevonden, alsmede een uitvoerige bespreking van alle misverstanden waartoe deze regel aanleiding gegeven heeft).

