

Analyse van het seismische risico in Noord-Nederland

Th. de Crook, B. Dost en H.W. Haak

Technisch rapport; TR-168

De Bilt, 1995

Postbus 201
3730 AE De Bilt
Wilhelminalaan 10
Telefoon 030-206 911
Telefax 030-210 407

UDC: 550.34
622.324
(492)
ISSN: 0169-1708
ISBN: 90-369-2075-2

© KNMI, De Bilt. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotocopie, microfilm, of op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het KNMI.

**ANALYSE
VAN HET SEISMISCHE RISICO
IN NOORD-NEDERLAND**

**T. de Crook
B. Dost
H.W. Haak**

MAART 1995

KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT

ANALYSE VAN HET SEISMISCHE RISICO IN NOORD-NEDERLAND

Samenvatting

Dit rapport geeft de resultaten weer van een studie naar het seismische risico in Noord-Nederland. Het rapport is opgesteld naar aanleiding van de relatief krachtige aardbevingen bij Middelstum en Alkmaar en de toename van het aantal geregistreerde aardbevingen in 1994 in Noord-Nederland. In algemene zin worden aardbevingen in Noord-Nederland in verband gebracht met de winning van aardgas.

In de periode van december 1986 tot en met september 1994 zijn in Noord-Nederland 56 aardbevingen geregistreerd waarvan 39 in de provincie Groningen, 14 in Drenthe en 3 in Noord-Holland. Vóór 1986 zijn hier geen aardbevingen geobserveerd. De vrijgekomen energie en het aantal bevingen is in de tijd toegenomen, met name in 1994.

Door de grotere aantallen kan nu voor het eerst een onderscheid gemaakt worden tussen het Groningenveld en de overige gasvelden in Noordoost-Nederland. Op basis van de statistiek van waargenomen aardbevingen zijn berekeningen gemaakt van de maximale magnitudes in de verschillende regio's.

Deze maximale magnitudes zijn 3,3 voor het Groningenveld, voor de overige gasvelden in Noordoost-Nederland 3,4 en voor de gasvelden rond Alkmaar 3,6. De bijbehorende waarden voor de maximale intensiteiten zijn respectievelijk V-VI, VI en VI-VII (6,3). De bepaling van de maximale magnitude voor de gasvelden rond Alkmaar is gebaseerd op 3 geregistreerde aardbevingen in de regio. Uitspraken over de gasvelden rond Alkmaar als apart gebied kunnen alleen gedaan worden wanneer aangenomen wordt dat ongeveer dezelfde statistiek geldt als in het noordoosten van Nederland. Met de bewaking van gasvelden rond Alkmaar sinds begin 1995 is de verwachting dat meer informatie beschikbaar komt omtrent de betrouwbaarheid van de aannames.

Ter controle van de bepaalde maximale magnitude voor de gasvelden rond Alkmaar is op basis van de lokale geologie een maximaal denkbare magnitude bepaald. Deze komt eveneens uit op 3,6. Dit ondersteunt de statistische methodes. De bepaalde maximale magnitudes en maximale intensiteiten voor het Groningenveld en de overige gasvelden in Noordoost-Nederland zijn in overeenstemming met de resultaten van de BOA-studie. De waarden voor de gasvelden rond Alkmaar zijn nieuw.

Voor het Groningenveld en de overige gasvelden in Noordoost-Nederland is volgens de EMS-intensiteitschaal lichte niet-structurele schade aan gebouwen mogelijk, met een kans van 40% in 10 jaar. Voor de gasvelden rond Alkmaar is zelfs matige schade aan enkele gebouwen niet uit te sluiten. Onder matige schade wordt verstaan lichte structurele schade en matige niet structurele schade.

De Bilt, maart 1995

INHOUD

Inleiding	1
Geregistreeerde aardbevingen	2
Aantal aardbevingen per maand	4
Toename van de vrijgekomen energie en het aantal bevingen	4
Verdeling van de aardbevingen in tijd en ruimte	7
Cumulatieve frequentie-magnitude relaties	7
Bepaling van de maximale magnitude in Noord-Nederland	11
Bepaling van de maximaal denkbare magnitude	14
Magnitude-intensiteit relatie in Noord-Nederland	16
Schade	19
De aardbevingen bij Alkmaar en Bergen	20
Conclusies	20
Referenties	21
Appendix I	22
Appendix II	25
Appendix III	29
Appendix IV	30

ANALYSE VAN HET SEISMISCHE RISICO IN NOORD-NEDERLAND

Inleiding

Deze studie naar het seismische risico voor Noord-Nederland moet worden gezien als een actualisering van de studie die verwerkt is in het Eindrapport van de Begeleidingscommissie Onderzoek Aardbevingen (BOA) van november 1993. De verantwoordelijkheid voor het huidige rapport ligt bij het KNMI, en dus niet meer bij de inmiddels opgeheven commissie.

De aanleiding tot dit rapport is het feit dat het aantal geregistreerde aardbevingen in één jaar (1994) verdubbeld is in vergelijking tot de voorgaande periode van zeven jaar. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat een deel van deze verdubbeling te danken is aan het operationeel worden van het boorgatstation Finsterwolde in 1992, waardoor meer aardbevingen van met name lagere magnitude geregistreerd werden. Voor grotere magnitudes ($\geq 2,5$) is een significante toename in de tijd waargenomen. Door de burgemeesters van Alkmaar, Bergen, Heiloo en Schoorl is expliciet op een actualisering van de BOA-studie aangedrongen in verband met de twee aardbevingen binnen de korte periode van anderhalve maand bij Alkmaar en Bergen.

In het rapport van Haak en De Crook (1994) is de seismische analyse van de 24 aardbevingen vanaf december 1986 t/m augustus 1993 in Noord-Nederland beschreven. Het aantal waargenomen bevingen tot en met september 1994 is gestegen tot 56. In dit rapport wordt het seismisch risico in Noord-Nederland opnieuw geanalyseerd. Ten opzichte van het BOA-eindrapport is in deze studie een aantal nieuwe elementen toegevoegd:

Ten eerste kan in deze studie bij de bepaling van de maximale magnitude voor het eerst een onderscheid gemaakt worden tussen het Groningenveld en de overige velden in Noordoost-Nederland. Het is, gezien de kleine dataset, nog niet mogelijk de gasvelden rond Alkmaar te isoleren van de rest van Noord-Nederland. Voor uitspraken over de overige velden in Noordoost-Nederland is het noodzakelijk de statistiek van aardbevingen in het Groningenveld bij de analyse te betrekken. Voor uitspraken over de regio rond Alkmaar is het noodzakelijk alle aardbevingen in Noord-Nederland te betrekken.

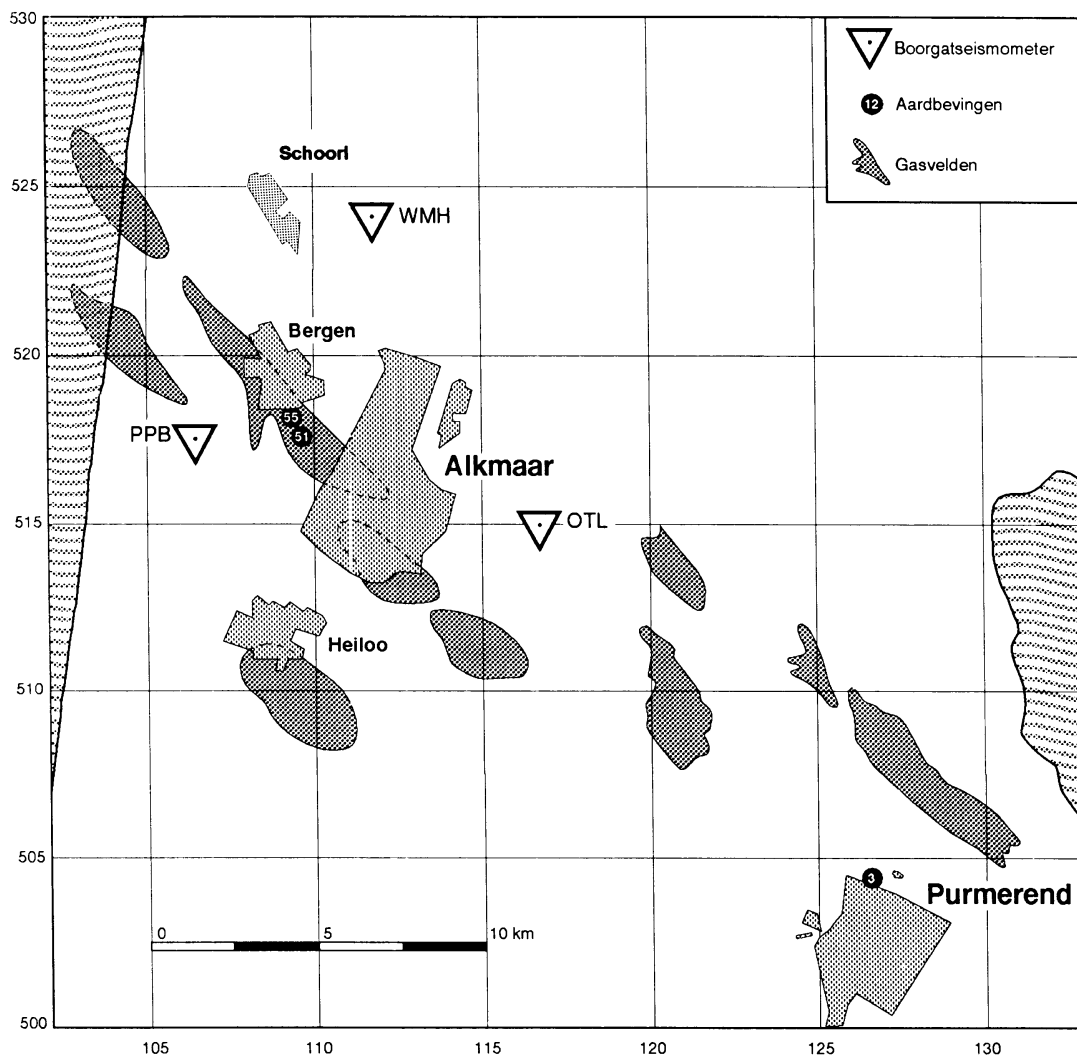
Ten tweede is een methodiek ontwikkeld om de maximale magnitude te bepalen met behulp van 'Monte Carlo' simulatie. Het voordeel van de methodiek is dat de evaluatie van fouten in de bepaling van de maximale magnitude nauwkeurig uit te voeren is. Tenslotte is uit een analyse van de lokale geologische structuur ook de maximaal denkbare magnitude uitgerekend op basis van de beschikbare breuklengtes.

Verder is er aandacht geschonken aan de relatie tussen magnitude en maximale intensiteit (I_0) in het epicentrale gebied. Intensiteit is een maat voor de waargenomen gevolgen van een aardbeving voor mensen en gebouwen. De intensiteit van een aardbeving neemt af naarmate de afstand tot het epicentrum groter wordt. De relatie tussen magnitude en I_0 voor aardbevingen in Noord-Nederland is geëxtrapoleerd naar een maximale intensiteit, behorend bij de al bepaalde maximale magnitude. Voor de evaluatie van de daarbij behorende schade is de European Macroseismic Scale (EMS) gebruikt.

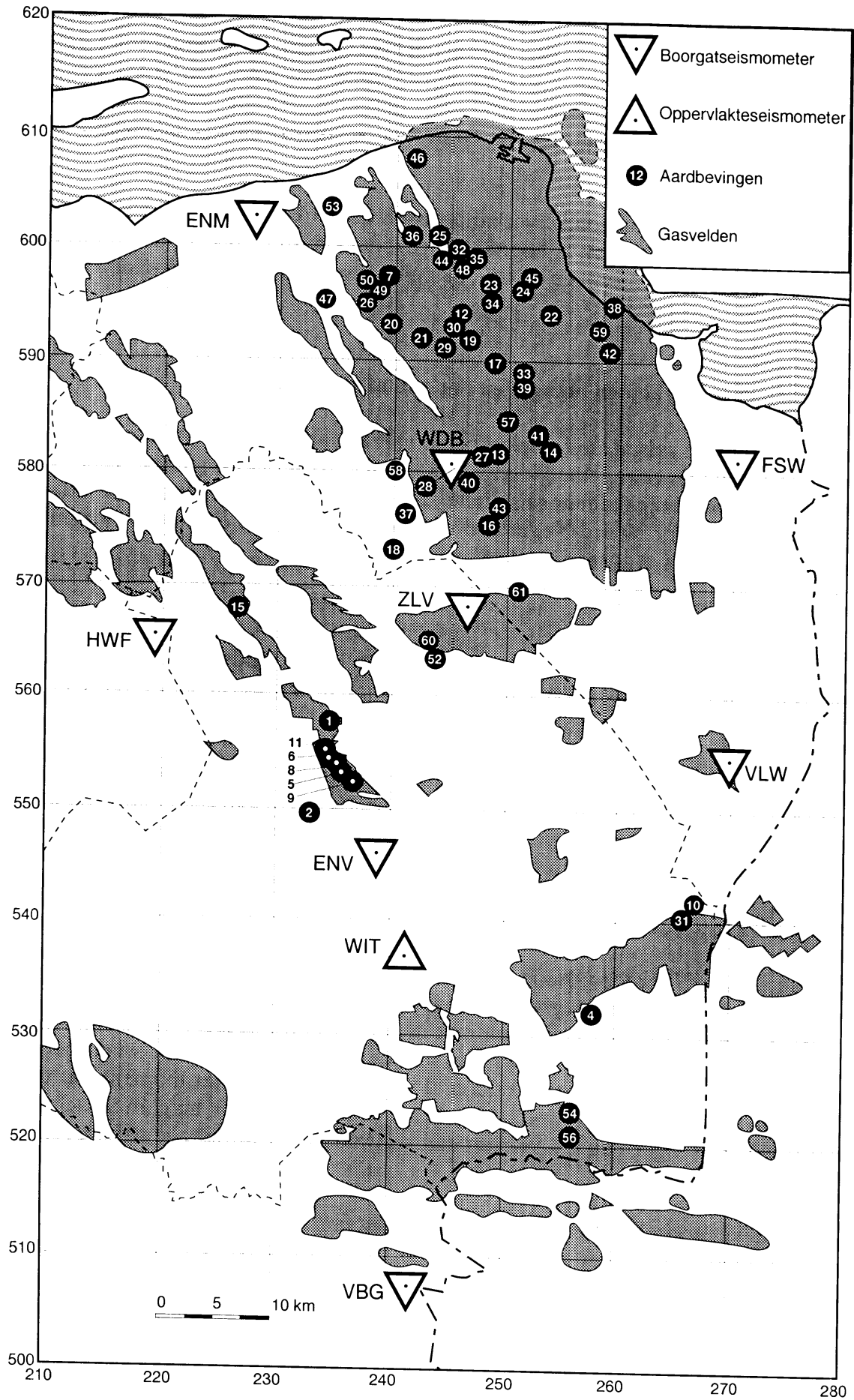
Geregistreerde aardbevingen

In tabel 1 van Appendix I zijn de parameters van de 56 geregistreerde aardbevingen vermeld zoals tijdstip, lokatie, intensiteit, magnitude en diepte. De magnitudes variëren tussen 1,1 en 3,2. De maximaal waargenomen intensiteit is V. De bevingen vinden plaats op een diepte tussen 0,8 en 3,5 km. Dit is de primaire dataset waarop dit rapport gebaseerd is. In de figuren 1 en 2 zijn de lokaties van deze epicentra getekend.

De nauwkeurigheid van de plaatsbepaling van de meeste bevingen is beperkt (± 2 km) doordat zij alleen door het seismische boorgatstation in Finsterwolde geregistreerd zijn. Voor de bepaling van de magnitude was ook in de meeste gevallen slechts één station beschikbaar. De nauwkeurigheid van de magnitude bepaling is circa 0,2 magnitude-eenheid. De bepaling van de diepte is relatief het minst nauwkeurig. Via enquêtes is de diepte bepaald met een nauwkeurigheid van ± 500 m.



Figuren 1 en 2. Overzicht (tot januari 1995) van epicentra (cirkels) in Noord-Holland (1) en Noordoost-Nederland (2), boorgatseismometer lokaties (driehoeken) en gasvelden (gearceerde oppervlakken). Langs de assen zijn Amersfoortcoördinaten aangegeven.



Aantal aardbevingen per maand

In figuur 3 is het aantal aardbevingen per maand weergegeven, waarbij de totale periode (1986-1994) in beschouwing is genomen. Het is opvallend dat in januari en oktober geen bevingen zijn waargenomen en in november slechts één. Voor de kleinere gasvelden lijkt de verdeling van de bevingen over het jaar gelijkmatiger dan voor het Groningenveld.

Een onderzoek naar het mogelijke verband tussen de drukdaling in de gasreservoirs en het optreden van aardbevingen is nog niet uitgevoerd omdat daarvoor de benodigde aantallen aardbevingen ontbreken. Hiervoor zullen overigens ook de drukdalingsgegevens bekend moeten zijn.

Toename van de vrijgekomen energie en het aantal bevingen

Veranderingen in de seismiciteit, bijvoorbeeld van het aantal en de sterkte van de aardbevingen, kunnen overzichtelijk gepresenteerd worden in een grafiek waarbij de totale (cumulatieve) vrijgekomen seismische energie wordt uitgezet tegen de tijd. Dit is in figuur 4 gedaan voor Noord-Nederland met de relatie tussen energie en magnitude M_L zoals afgeleid door Ahorner en Pelzing (1985):

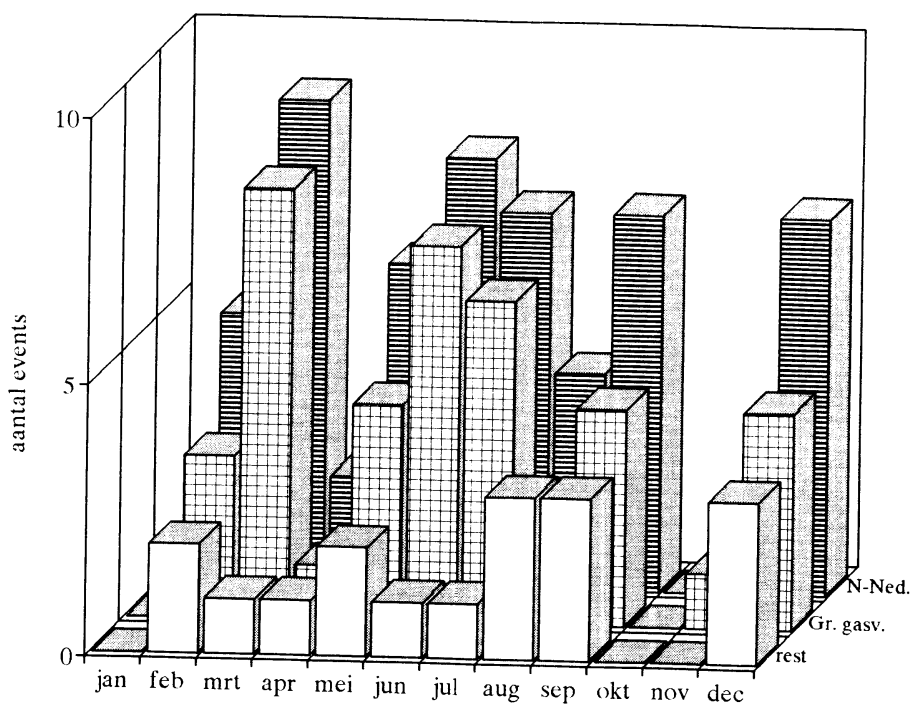
$$\log(E) = 3,81 + 1,64 M_L \quad (1)$$

E is de vrijgekomen seismische energie in joules. Er is een duidelijke toename van de vrijgekomen energie te zien. In figuur 5 is het aantal aardbevingen tegen de tijd uitgezet ook hier is een aanzienlijke toename te zien.

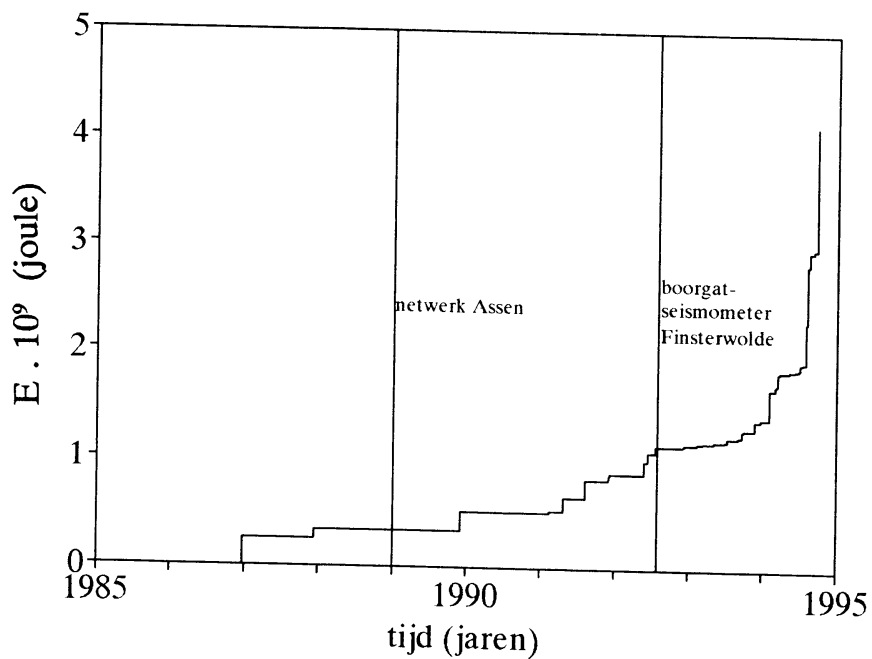
In 1989 is het Assen-netwerk in gebruik genomen en in het najaar van 1992 de boorgatseismometer in Finsterwolde. Hierdoor zijn meer en zwakkere aardbevingen geregistreerd. Het is heel goed mogelijk dat in Noord-Nederland in de periode vóór 1989 en 1992 meer bevingen zijn opgetreden, die niet zijn geregistreerd. De toename van de vrijgekomen energie en van het aantal bevingen is dus wellicht minder dan figuur 4 en 5 laten zien.

In figuur 6 is voor Noordoost-Nederland (Groningen en Drenthe) de wortel uit de cumulatieve energie uitgezet tegen de tijd. De wortel uit de energie is evenredig met de amplitude van seismische golven en met de verplaatsing langs de breuk tijdens een aardbeving. Er is een significante toename van de vrijgekomen energie vanaf begin 1994. De dataset voor Noordoost-Nederland is compleet vanaf het moment dat de boorgatseismometer bij Finsterwolde in gebruik is genomen voor magnitude 1,7 en hoger. Magnitudes lager dan 1,7 leveren een verwaarloosbare bijdrage aan de vrijgekomen energie.

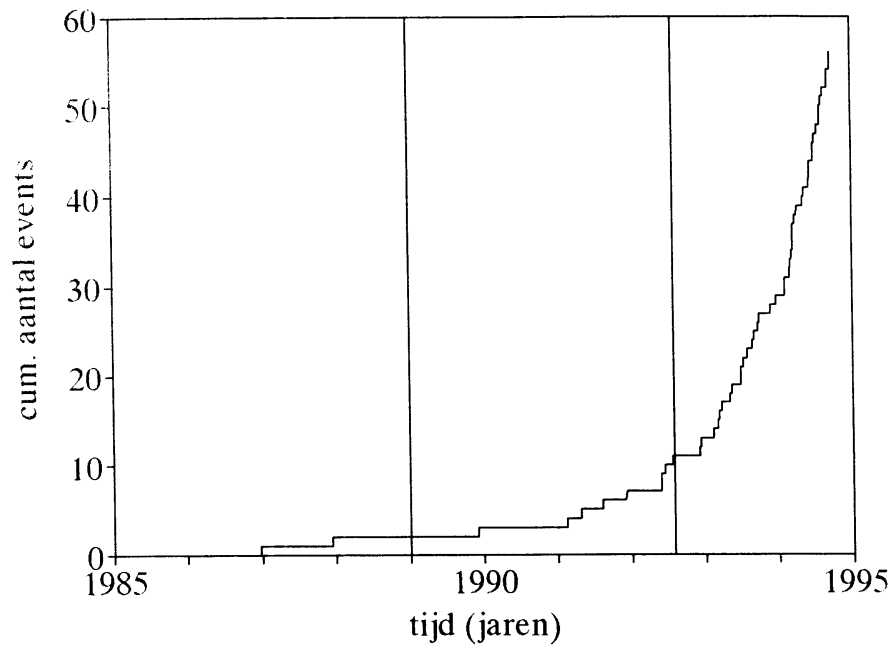
Voor Noord-Nederland geldt dat de detectiegrens van het hele Nederlandse seismische netwerk vanaf het begin van de seismische activiteit in 1986 op magnitude 2,5 lag. Voor aardbevingen met een magnitude groter dan 2,5 is een significante toename in de tijd waar te nemen (zie figuur 7).



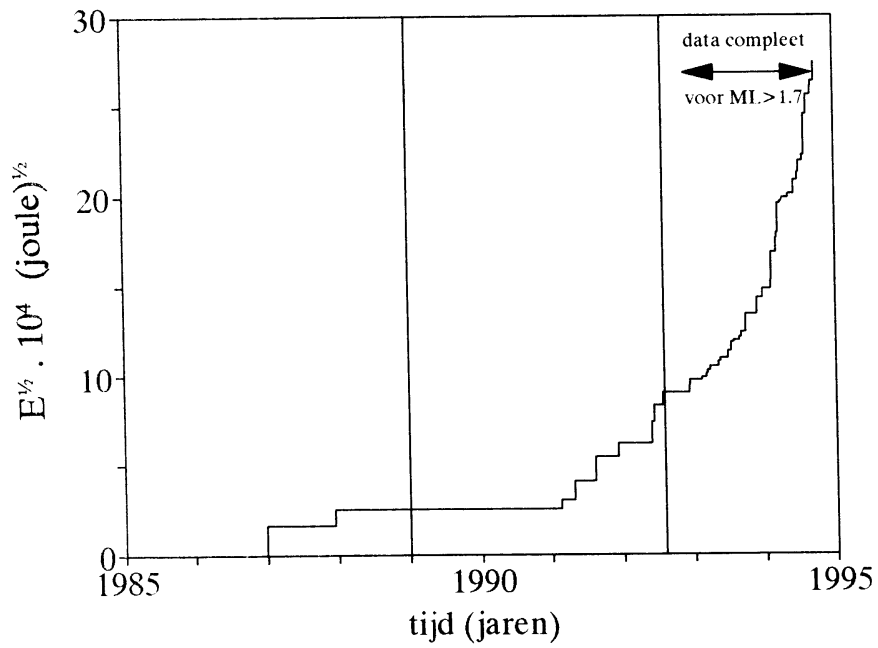
Figuur 3. Aantal aardbevingen per maand in Noord-Nederland, opgesplitst in Groningen gasveld en de rest. Hierbij zijn alle aardbevingen in de periode 1986-1994 meegenomen.



Figuur 4. Cumulatieve energie van de aardbevingen in Noord-Nederland versus tijd. De twee verticale lijnen markeren de ingebruikname van het netwerk Assen en boorgatseismometer Finsterwolde.



Figuur 5. Cumulatief aantal bevingen in Noord-Nederland versus tijd.



Figuur 6. Cumulatieve \sqrt{E} in Noordoost-Nederland uitgezet tegen de tijd.

Verdeling van de aardbevingen in tijd en ruimte

In figuur 7 zijn de magnitudes van de 56 aardbevingen uitgezet tegen de tijd. Dit geeft een overzicht voor welke periodes de lijst van de 56 bevingen compleet is. De aardbevingen zijn opgetreden vanaf december 1986. De detectiegrens van het Nederlandse seismische netwerk in die tijd was voor Noord-Nederland ongeveer magnitude 2,5. Dus voor de periode van december 1986 t/m september 1994 is de lijst compleet vanaf magnitude 2,5.

De eerste schok met een magnitude kleiner dan 2,5 is in februari 1991 bij Emmen waargenomen. Deze beving is geregistreerd door het Assen-netwerk dat in 1989 in gebruik is genomen. Hiermee is de detectiegrens voor Noordoost-Nederland verlaagd naar 2,3. Dus voor de periode februari 1989 t/m september 1994 is de dataset compleet vanaf magnitude 2,3 voor Noordoost-Nederland.

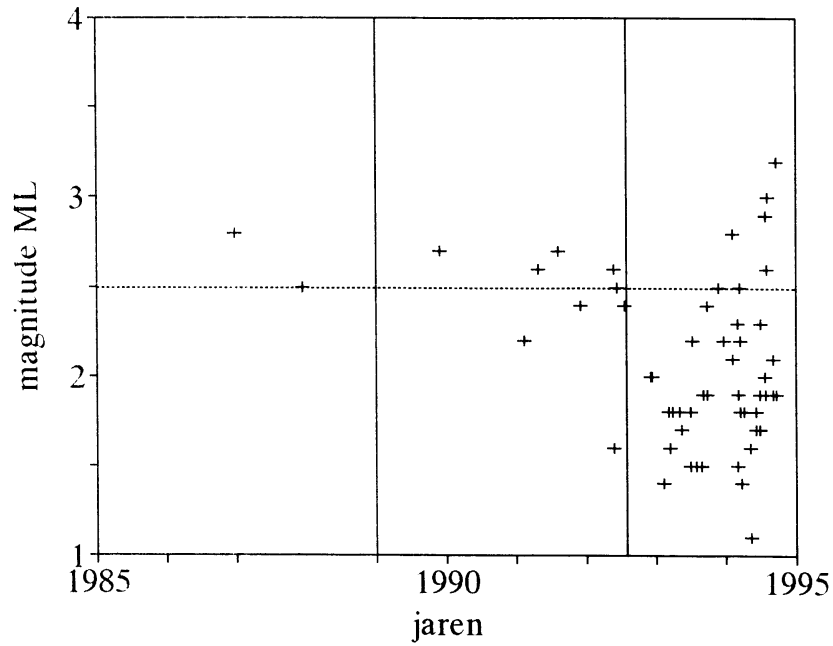
De kleinere bevingen beneden magnitude 2,3 worden waargenomen vanaf december 1992. In de periode hiervoor zijn de kleinere bevingen dus niet opgetreden òf niet geregistreerd. De boorgatseismometer in Finsterwolde is in het najaar van 1992 operationeel geworden. Hiermee kwam de detectiegrens voor Groningen op magnitude 1,5 en voor Noordoost-Nederland op 1,7. De lijst is compleet vanaf magnitude 1,5 in de periode na december 1992 voor Groningen en vanaf 1,7 voor Noordoost-Nederland.

In figuur 8 zijn de aantallen bevingen verdeeld over drie gebieden. In het gasveld van Groningen zijn 39 bevingen waargenomen, in Drenthe 14 en in de gasvelden rond Alkmaar 3. Voor de gasvelden rond Alkmaar zijn alleen aardbevingen geregistreerd met magnitudes groter dan 2,5. Eventueel opgetreden bevingen die kleiner zijn dan 2,5 zijn niet geregistreerd, zodat de volledigheid van de data onzeker is. Bij het bepalen van de lineaire cumulatieve frequentie-magnitude relaties is met het bovenstaande expliciet rekening gehouden door middel van de bepaling van de complete periodes.

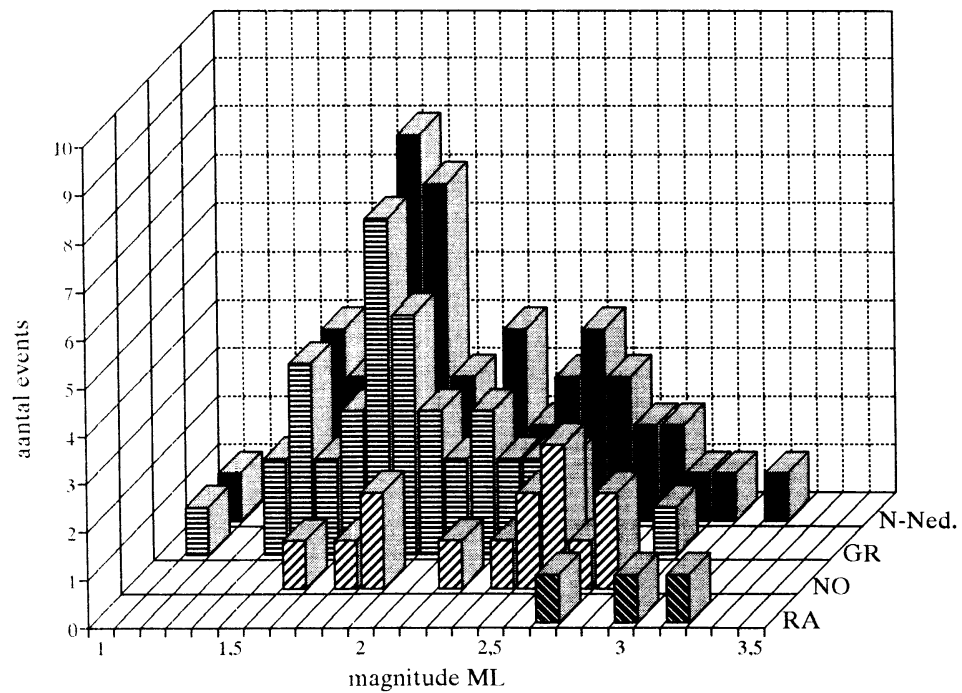
Opgemerkt moet worden dat de periode waarin de aardbevingen optraden kort is en dat het aantal bevingen in de drie genoemde gebieden (gasveld Groningen met 39 bevingen, de gasvelden in Noordoost-Nederland met 53 bevingen en Noord-Nederland met 56 bevingen) nog te klein is voor zeer nauwkeurige statistische berekeningen. Met name de herhalingstijden van de grotere bevingen bevatten nog grote onzekerheden. Dit maakt een analyse van de onzekerheden in de bepaling van de maximale magnitude noodzakelijk.

Cumulatieve frequentie-magnitude relaties

Voordat een bepaling gemaakt kan worden van de maximale magnitudes, is het van belang het verband tussen de logaritme van de cumulatieve frequentie en de magnitude te onderzoeken. Dit verband is lineair voor kleine magnitudes en neemt bij grotere magnitudes sneller dan lineair af.



Figuur 7. Magnitude uitgezet tegen de tijd voor aardbevingen in Noord-Nederland. De horizontale lijn markeert magnitude 2,5. Boven deze magnitude wordt elke aardbeving in Nederland tijdens de onderzochte periode (1986-1994) gedetecteerd.



Figuur 8. Aantal aardbevingen uitgezet tegen de magnitude voor Noord-Nederland, het gasveld van Groningen [GR], de overige gasvelden in Noordoost-Nederland [NO] en de gasvelden rond Alkmaar [RA].

Het lineaire deel staat bekend als de Gutenberg-Richter relatie. De algemene vergelijking van de Gutenberg-Richter relatie is:

$$\log N = a - b M_L \quad (2)$$

N is het jaarlijks aantal aardbevingen met een magnitude groter dan M_L ; a en b zijn coëfficiënten, die met behulp van een regressie-analyse, de kleinste kwadraten-methode, bepaald zijn voor verschillende gebieden (zie tabel 2). De regressie-coëfficiënt r is een maat voor de correlatie tussen $\log N$ en M_L . Een waarde van r dicht bij 1,0 geeft aan dat de metingen aan vergelijking 2 voldoen.

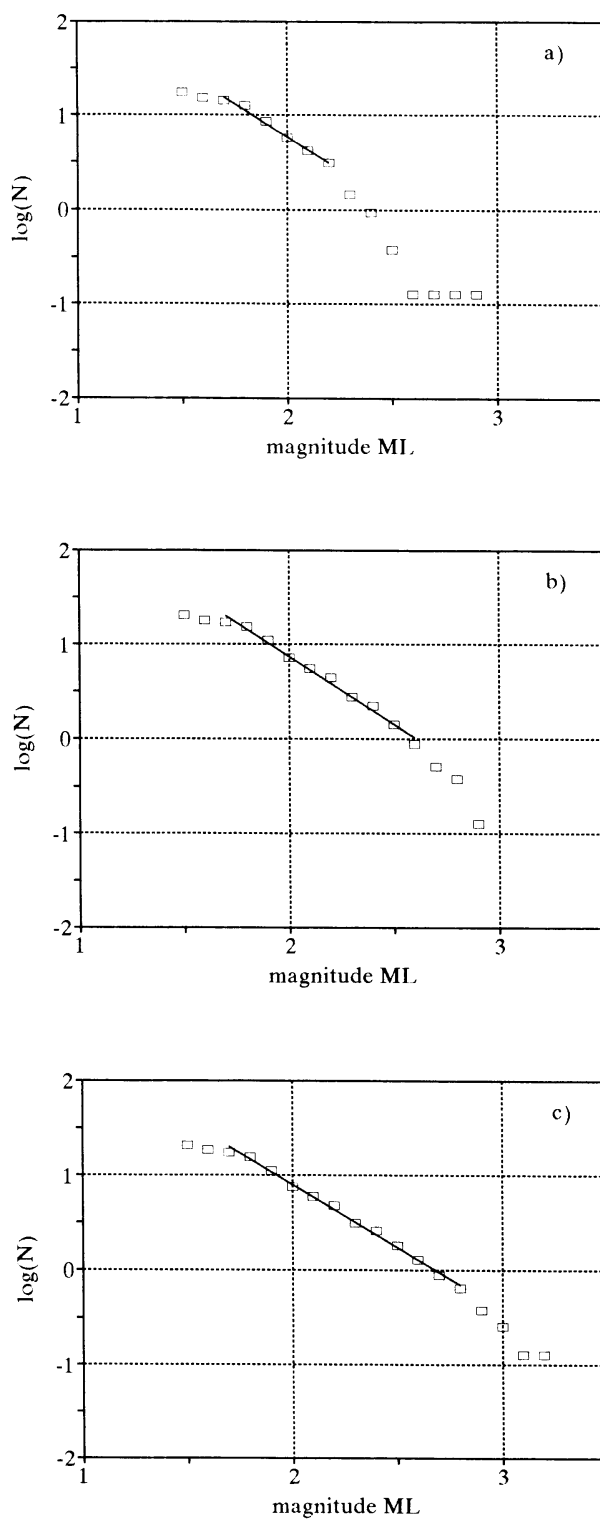
	a	b	r	# bevingen	M_L range
Groningenveld (fig. 9a)	$3,5 \pm 0,2$	$1,4 \pm 0,1$	0,99	23	1,7-2,2
Overige gasvelden NO-Ned. (fig. 9b)	$3,7 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,1$	0,99	38	1,7-2,6
Noord-Nederland (fig. 9c)	$3,6 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,1$	1,0	42	1,7-2,8

Tabel 2. Resultaten regressie-analyse

De kleinste magnitude in de regressie-analyse wordt bepaald door de detectiegrens in de complete periode. Het aantal bevingen gebruikt in de berekeningen is lager dan het aantal waargenomen bevingen. De overige bevingen deden zich voor buiten de complete periode of buiten het gekozen magnitude-interval.

Bij het berekenen van de coëfficiënten a en b is aangenomen dat de fout in de magnitudes niet van belang is, in vergelijking met die in de $\log(N)$ -waarden. Weliswaar is de onzekerheid in de bepaling van de magnitudes van $\pm 0,2$ niet te verwaarlozen, maar door de keuze van de magnitude intervallen ("binning") van de x-as komt de fout in de magnitude alleen tot uiting in de aantallen N van de y-as. Bovendien zijn de regressie-coëfficiënten ongeveer 1 zodat het niet veel meer uitmaakt welk type kleinste kwadraten methode wordt toegepast (Morgan, 1960; Guest, 1961).

De berekende b-waarde voor Noord-Nederland is 1,3. Voor tektonische aardbevingen in Zuid-Nederland is deze waarde 0,67. Er is dus een duidelijk verschil in de b-waarde voor aardbevingen in Noord-Nederland en tektonische aardbevingen in Zuid-Nederland. In Appendix II wordt nader ingegaan op de betekenis van de b-waarde.



Figuur 9. Frequentie-magnitude relatie van aardbevingen.
a) voor het gasveld van Groningen.
b) voor gasvelden in Noordoost-Nederland.
c) voor gasvelden in Noord-Nederland.

Bepaling van de maximale magnitude in Noord-Nederland

Onder maximale magnitude M_{\max} wordt verstaan de magnitude die hoort bij de 'maximale aardbeving'. Er zijn verschillende definities van het begrip maximale aardbeving (DePolo and Slemmons, 1990). In het algemeen wordt onder maximale aardbeving verstaan de grootste aardbeving die kan plaatsvinden in een bepaald tijdsinterval en in een bepaalde regio. Deze definitie wordt in dit rapport gehanteerd.

Voor de bepaling van de maximale magnitude (M_{\max}) wordt in deze studie een statistische analyse van opgetreden aardbevingen uitgevoerd om daarmee na te gaan, wat in de toekomst verwacht mag worden. Het verleden wordt naar de toekomst geëxtrapoleerd onder de aanname van vergelijkbare randvoorwaarden. De nauwkeurigheid van deze extrapolatie hangt af van de volledigheid van de gegevens uit het verleden. Een controle van de verkregen waarden van M_{\max} is mogelijk door vergelijking met berekende waarden van de maximaal denkbare magnitude. Deze parameter wordt bepaald op basis van de lokale geologie en gaat uit van de maximale elastische energie die in het gesteente opgeslagen kan zijn.

De maximale magnitude voor aardbevingen in Noord-Nederland is met drie verschillende statistische methodes bepaald. Deze methodes worden vooral toegepast voor de berekening van de maximale tektonische aardbeving in een seismotektonische zone. Een seismotektonische zone is een eenheid die wordt gedefinieerd door de overeenkomsten in waargenomen seismiciteit, de geologie, de tectoniek en de geofysische karakteristieken van de zone. Binnen een seismotektonische zone worden deze karakteristieken homogeen en constant verondersteld evenals de spanning-opbouw binnen de zone. De Roerdalslenk in Zuidoost-Nederland is een voorbeeld van een seismotektonische zone.

De statistische methodes voor de bepaling van M_{\max} zijn strikt genomen alleen toepasbaar binnen een seismotektonische zone. Voor Noord-Nederland betekent dit dat elk gasveld in principe als afzonderlijk beschouwd moet worden. Omdat de tektonische verschillen per gasveld niet erg groot zijn en omdat per veld over het algemeen te weinig bevingen zijn waargenomen, zijn grotere zones gedefinieerd. Een doorslaggevend argument voor het gebruik van grotere zones is een grotere variëteit van breukdimensies, waardoor in het algemeen een realistischer schatting kan worden gemaakt van de maximale magnitude. Hierdoor wordt M_{\max} niet te klein geschat. Voor een toelichting op de statistische methodes wordt verwezen naar Appendix II. De vuistregel methode is een zeer ruwe methode, die enkel gebruikt wordt indien de dataset klein is. De energie methode geeft betere resultaten. De Monte Carlo methode geeft de meest nauwkeurige schatting van M_{\max} inclusief de foutenmarge.

Methode-1; vuistregel methode: In de waargenomen cumulatieve frequentie-magnitude kromme treedt een afbuiging op voor grotere magnitudes en nadert de kromme asymptotisch tot M_{\max} . Als eerste vuistregel geldt dat M_{\max} doorgaans ongeveer 3/4 magnitude-eenheid groter is dan het punt waar de kromme van het lineaire gedrag afwijkt. De tweede vuistregel is dat M_{\max} ongeveer 1/2 magnitude-eenheid groter is dan de maximaal waargenomen magnitude.

Methode-2; energie methode: De fluctuaties in de energie om een lineaire trend in de tijd zijn een maat voor de maximale magnitude. De wortel van de cumulatieve energie

van de aardbevingen wordt uitgezet tegen de tijd. Doorgaans is dan de lineaire trend zichtbaar. De relatieve maxima en minima worden verbonden door twee evenwijdige lijnen. De verticale afstand tussen deze twee lijnen is een maat voor de maximale magnitude. Hierbij wordt de aanname gemaakt dat de totaal beschikbare elastische energie kan vrijkomen door één enkele aardbeving. Bij deze methode wordt ook de aanname gemaakt dat in de onderzochte periode de totale energie accumulatie in de tijd ongeveer hetzelfde is als de totaal vrijgekomen energie in het gebied. Om deze methode toe te passen is een complete dataset nodig met tenminste twee cycli van verhoogde aardbevingsactiviteit.

Wanneer de data niet compleet is, wordt de gemiddelde maximale magnitude berekend uit een representatief aantal simulaties van aardbevingssequenties met dezelfde statistiek. De aardbevingssequenties worden "random" gegenereerd, zodat voldaan wordt aan de Poisson-verdeling. In figuur 10 zijn voorbeelden te zien van simulaties voor de drie onderzochte gebieden.

Aangezien gebruik gemaakt wordt van een cumulatieve functie, zal de fout van de functie in de tijd toenemen. De invloed van de meetfout in M_L bij de bepaling van M_{max} geeft een fout van ca. $\pm 0,2$ magnitude-eenheid.

Methode-3; Monte Carlo methode: Een uitwerking van methode-1 is de beschrijving van de volledige kromme inclusief de afbuiging. Hierdoor kan een optimale aanpassing aan de data verkregen worden. Deze methode laat een betere berekening van de foutmarges toe. De complete beschrijving van de methode staat in Appendix III.

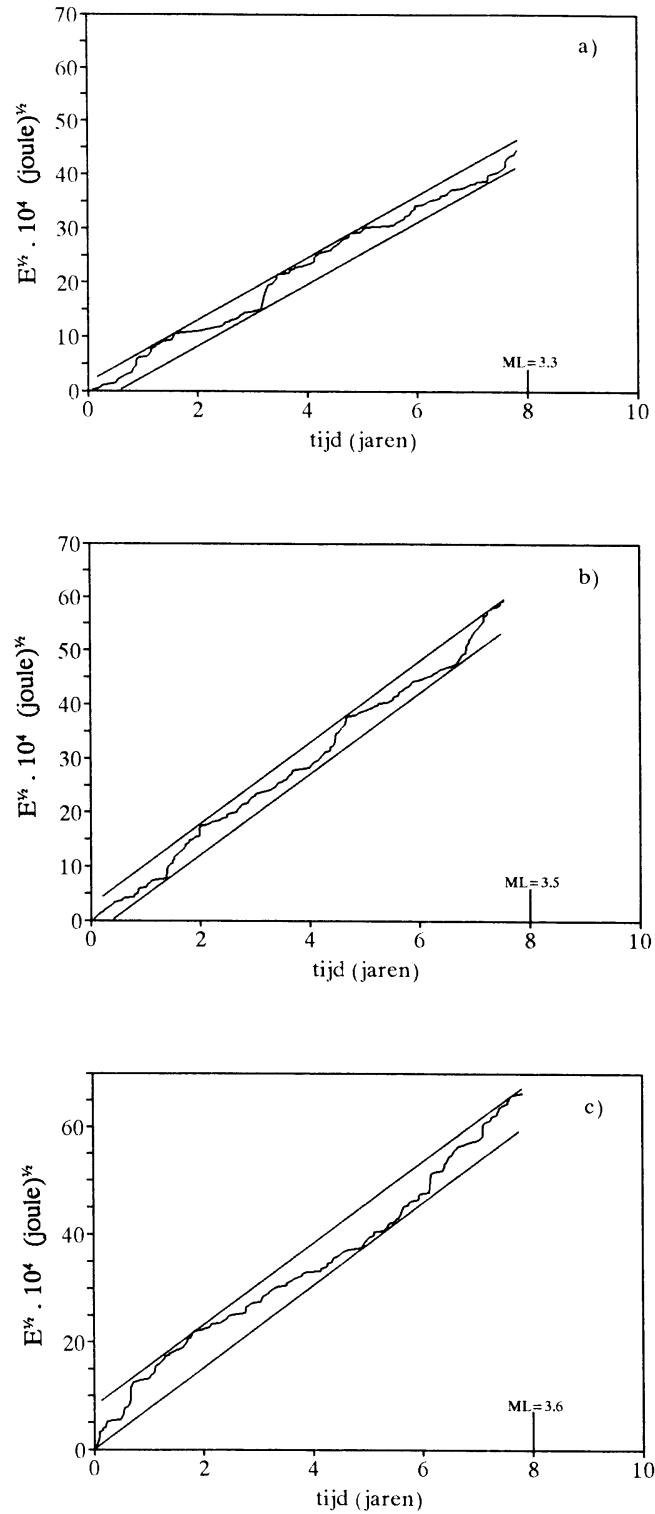
Andere in de literatuur beschreven methodes voor het bepalen van de maximale magnitude, zoals de statistische benadering die gebruik maakt van de extreme-waarden theorie, kunnen hier niet worden toegepast, omdat de reeks van aardbevingen te klein is.

De energie methode geeft een bovengrens voor de maximale magnitude. Dit is besloten in de aanname dat de totaal beschikbare energie kan vrijkomen door één enkele aardbeving. De Monte Carlo methode evalueert de fout in de bepaling van de maximale magnitude. Wanneer de waarden van de maximale magnitudes onderling vergeleken worden moet voor de Monte Carlo methode de standaardafwijking bij de gevonden waarde van M_{max} worden opgeteld.

Resultaten: In tabel 3 zijn de resultaten samengevat.

	Monte Carlo methode	energie methode	vuistregel methode	M_{max}
Groningenveld	-	3,3	3,2	3,3
Overige gasvelden in NO-Nederland	$3,2 \pm 0,2$	3,5	3,4	3,4
Gasvelden rond Alkmaar	$3,4 \pm 0,2$	3,6	3,6	3,6

Tabel 3. Maximale magnitudes bepaald uit de verschillende methodes. De laatste kolom geeft de uiteindelijke waarde voor M_{max} .



Figuur 10. Simulatie cumulatieve \sqrt{E} uitgezet tegen de tijd.
 a) voor het gasveld in Groningen.
 b) voor de overige gasvelden in Noord-Nederland.
 c) voor de gasvelden rond Alkmaar.

Voor de gasvelden rond Alkmaar en de overige gasvelden in Noordoost-Nederland zijn de waarden voor M_{\max} bepaald door de drie methodes, met elkaar in overeenstemming.

Voor het Groningenveld is de Monte Carlo methode toegepast. Echter, aangezien de dataset boven magnitude 2,5 slechts één magnitude 2,9 bevatte, bleek de methode instabiel. De energie methode geeft wèl een schatting van de maximale magnitude.

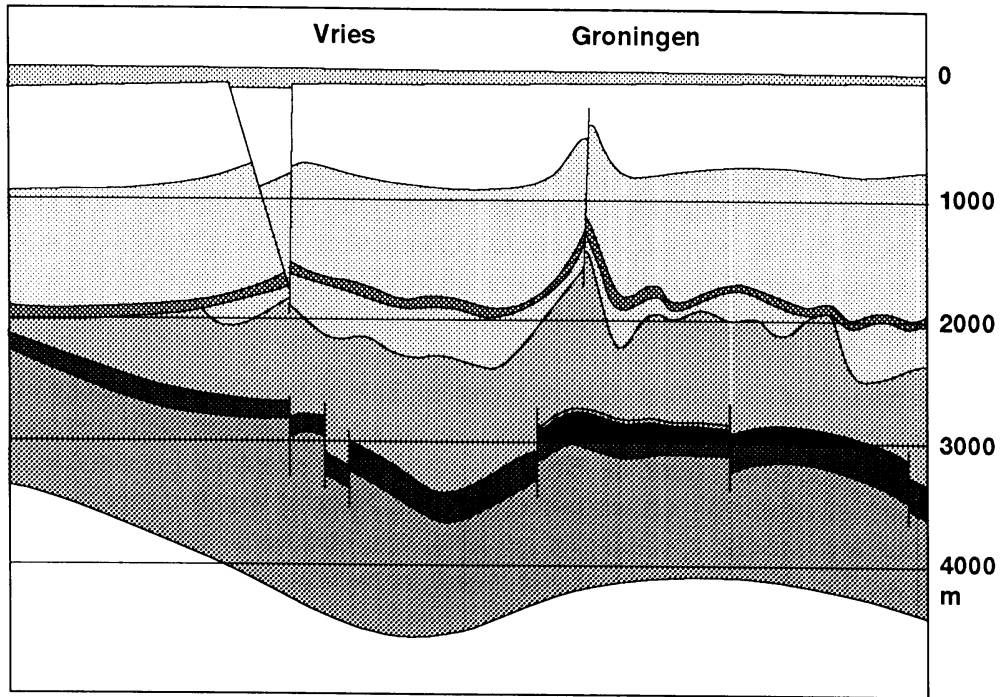
Bepaling van de maximaal denkbare magnitude

De maximaal denkbare magnitude wordt gedefinieerd als een tijdonafhankelijke schatting van de maximale magnitude die kan voorkomen. Deze definitie komt overeen met de definitie van 'maximum credible earthquake' van DePolo and Slemmons (1990). De schatting van de maximaal denkbare magnitude wordt hier verkregen uit geologische gegevens en vormt een goede controle op de berekeningen die uitgaan van de seismiciteit. In de figuren 11 en 12 zijn schematische doorsneden getekend van de ondergrond in Groningen en de gasvelden rond Alkmaar op basis van gegevens van de Rijks Geologische Dienst. Het meest opvallende verschil is de aanwezigheid van een dik zoutpakket in Groningen. Bovendien is de diepte van het Groningenveld groter. In dit zoutpakket lopen de breuken niet door. Bij de veel dunnere Zechstein-pakketten rond Alkmaar is dit wèl het geval.

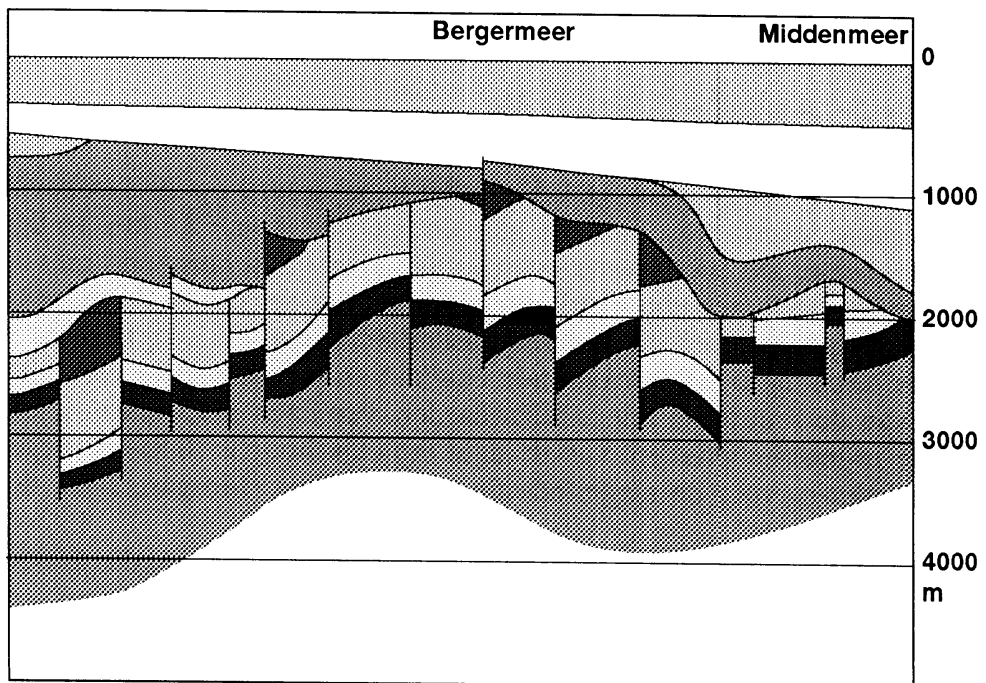
Uit modelberekeningen en uit hypocentrubepalingen van de aardbevingen in Noord-Nederland blijkt dat de bevingen zich voordoen in de directe omgeving van het gasreservoir of daarboven. De lengteschaal in verticale zin wordt gegeven door de hoogte van de breuken. Deze is beperkt van het Carboon tot de basis van het Tertiair. Boven het Tertiair is de schuifspanningsconstante μ zo klein dat dit nauwelijks bijdraagt aan de energie van een beving. In Groningen doet zich de situatie voor dat de breuken worden onderbroken door het Zechstein. De meest ondiepe beving, tot nu toe die van Middelstum, is bepaald op 800 meter; de basis van het Tertiair. De lengteschaal van breuken in horizontale zin kent minder sterke begrenzingen. De breuken in de beschouwde gebieden kunnen over vele tientallen kilometers doorlopen. In het algemeen zullen scherpe richtingsveranderingen van de breuken de horizontale lengteschaal bepalen. Conform schaalregels wordt in deze studie de horizontale lengteschaal maximaal tweemaal de verticale lengteschaal genomen.

De schuifspanningsconstante μ is ontleend aan de waarden die in de BOA-studie gebruikt zijn. De schuifspanningsconstante is bepaald op 17 GPa voor de diepere aardbevingen. Deze waarde is consistent met de gemiddelde waarde van de snelheid van S-golven (v_s) voor dieptes tussen 1 en 3 km, $\mu = v_s^2 \rho$, hierbij is ρ de gemiddelde dichtheid van het gesteente. Voor ondiepe aardbevingen is een waarde van 8 GPa aangehouden.

Voor Groningen is aangenomen dat de lengteschaal van de breuken circa 800 meter is. Voor de gasvelden rond Alkmaar circa 1000 meter. De maximale magnitude komt volgens deze methode op 3,5 voor Groningen en op 3,6 voor de gasvelden rond Alkmaar.



Figuur 11. Dwarsdoorsnede van de ondergrond in Groningen (illustratie).



Figuur 12. Dwarsdoorsnede van de ondergrond rond Alkmaar (illustratie).

Door de sterke afhankelijkheid van het seismisch moment (zie Appendix IV) met de lengteschaal tot de derde macht, zijn de onzekerheden in de maximale magnitudes groot. Een variatie van 20% in de lengteschaal komt overeen met 0,2 magnitude-eenheid. Er kan ook een variatie optreden in de verhouding tussen de lengteschaal en de verschuiving langs de breuk. Deze komt overeen met 0,5 magnitude-eenheid. De onzekerheden van deze methode zijn vrijwel even groot als die van de statistische methodes. Ze zijn niet alleen van rekentechnische aard maar ze reflecteren een reële natuurlijke variatie. Overigens is voor de aardbeving van Alkmaar van 21 september 1994 berekend dat de verhouding tussen verschuiving en lengteschaal ongeveer $2 \cdot 10^{-5}$ is. Er is geen zekerheid dat dit een meer algemene regel is voor héél Noord-Nederland of voor volgende aardbevingen.

Deze rekenvoorbeelden laten ook zien dat de kracht van de geïnduceerde aardbevingen als gevolg van aardgaswinning beperkt blijft. De achtergrond van deze stelling is dat daarvoor onder de Noord-Nederlandse omstandigheden eenvoudig de ruimte tussen gasreservoir en tertiair ontbreekt. Hierbij wordt aangenomen dat op deze dieptes tectonische spanningen geen rol van betekenis spelen. Voor een toelichting op de geologische methode wordt verwezen naar Appendix IV.

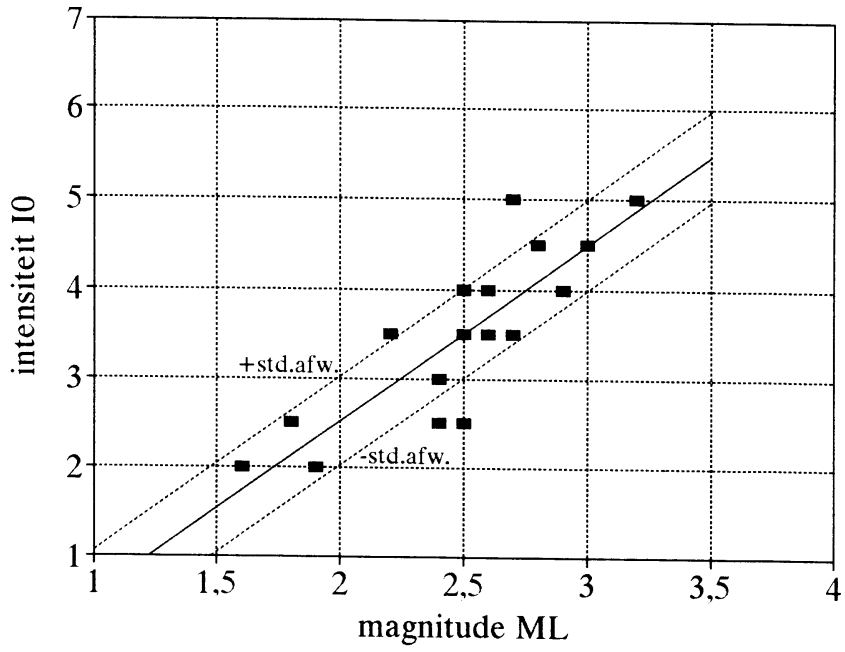
Magnitude-intensiteit relatie in Noord-Nederland

De gevolgen van de aardbevingen in Noord-Nederland zijn bepaald door middel van een tiental enquêtes onder de bevolking. De enquêtes hebben onder meer de intensiteit in het epicentrale gebied (I_0) opgeleverd. Met deze gegevens kan tevens de relatie tussen magnitude en intensiteit voor Noord-Nederland vastgesteld worden. De relatie tussen intensiteit en magnitude wordt gegeven door de empirisch bepaalde lineaire vergelijking:

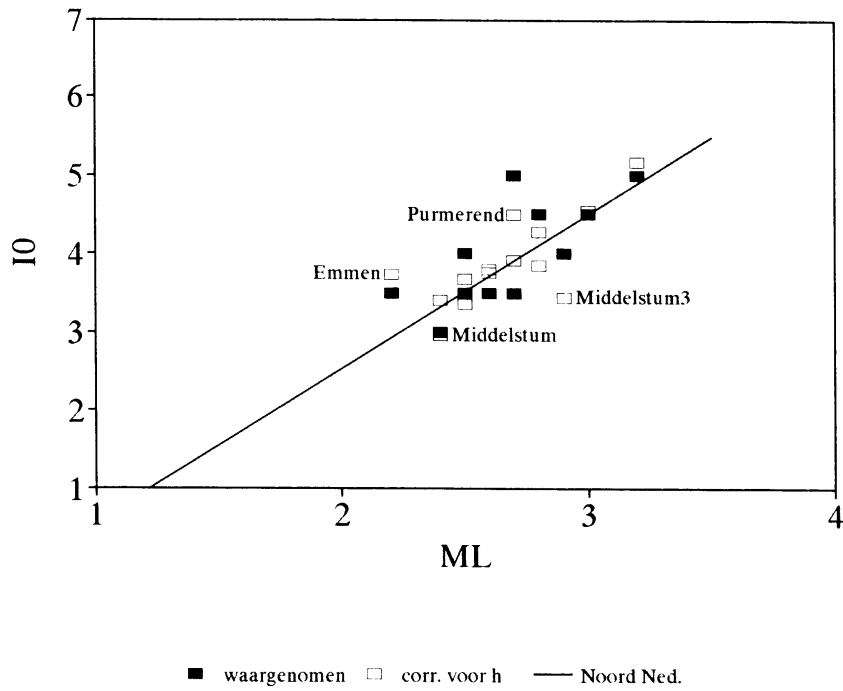
$$I_0 \pm 0,5 = (-1,4 \pm 0,8) + (2,0 \pm 0,3) M_L \quad (3)$$

De regressie-coëfficiënt (r) is 0,84. Deze lijn is gebaseerd op 20 aardbevingen, waarvan een intensiteit bekend was, met een gemiddelde diepte van 2,1 km. In figuur 13 is de relatie afgebeeld. De coëfficiënten van vergelijking 3 zijn berekend met de kleinste kwadraten methode, waarbij wordt aangenomen dat de fout in de magnitudewaarden klein zijn, vergeleken met die in de intensiteitswaarden. De onzekerheid in de magnitude bepaling is $\pm 0,2$ magnitude-eenheid en niet geheel te verwaarlozen ten opzichte van de fout in de intensiteitswaarden, van circa $\pm 0,5$ intensiteitseenheid. Omdat de regressiecoëfficiënt van de data tamelijk hoog is (0,84) is vergelijking 3 een goede benadering voor de magnitude-intensiteit relatie (Morgan, 1960; Guest, 1961).

Het epicentrale gebied waarin I_0 wordt waargenomen is voor ondiepe bevingen klein, in de orde van enkele vierkante kilometers. De spreiding van de meetwaarden in figuur 13 wordt voor een deel veroorzaakt door meetfouten in de magnitude- en intensiteitsbepaling en voor een deel door de spreiding van de dieptes waarop de bevingen plaatsvonden. Bovendien speelt de variatie in bodemgesteldheid een rol. Dit is waarschijnlijk de belangrijkste variabele. De aardbevingen van Purmerend, Middelstum II en Slochteren III laten de grootste afwijkingen zien.



Figuur 13. Magnitude-intensiteit relatie voor Noord-Nederland.



Figuur 14. Magnitude-intensiteit relatie voor Noord-Nederland. Intensiteiten gecorrigeerd voor de diepte.

In figuur 14 zijn alle waargenomen bevingen (14) met een berekende diepte (zie tabel 1) afgebeeld. Diepere bevingen hebben een relatief kleinere intensiteit en ondiepere een relatief grotere intensiteit. De regressie-coëfficiënt is 0.76. De intensiteiten in figuur 14 zijn gecorrigeerd voor de diepte ten opzichte van de gemiddelde diepte van 2,1 km. De correctie is evenredig verondersteld aan de horizontale afname van de intensiteit van elke beving tussen 2 en 3 km. Voor het geval deze afname niet bekend is, wordt deze gelijk gesteld aan de gemiddelde afname van de intensiteit tussen 2 en 3 km (0,44 intensiteitseenheid). De regressie-coëfficiënt komt hiermee op 0,73 en is iets kleiner geworden. Dat wil zeggen dat corrigeren voor de diepte geen zin heeft zolang de andere variabelen van groter belang zijn. De resterende afwijkingen, vooral variaties in bodemgesteldheid, spelen dus een minstens zo belangrijke rol. Het ligt in de bedoeling het onderzoek naar de relatie tussen intensiteit en magnitude voort te zetten.

Met vergelijking 3 kan voor elke magnitude de bijbehorende intensiteit berekend worden. De standaardafwijking is ongeveer een 1/2 intensiteitseenheid. Het is gebruikelijk dat bij de intensiteit de standaardafwijking wordt opgeteld voor een schatting van de maximale intensiteit.

Voor het Groningenveld, de overige gasvelden in Noordoost-Nederland en de gasvelden rond Alkmaar zijn de maximale magnitude (M_{\max}), de bijbehorende intensiteit (I_0) en de maximaal mogelijke intensiteit ($I_0 \max$) weergegeven in tabel 4.

Vaak kan de maximale intensiteit als vuistregel bepaald worden door één intensiteits-eenheid samen met de standaardafwijking in intensiteit van 1/2 intensiteitseenheid op te tellen bij de maximaal waargenomen intensiteit. Voor het Groningenveld, de overige gasvelden in Noordoost-Nederland en de gasvelden rond Alkmaar zijn de maximaal waargenomen intensiteiten respectievelijk IV, IV-V en V. De waarden in tabel 4 komen ongeveer overeen met deze vuistregel.

De waargenomen intensiteiten bij een bepaalde magnitude zijn in Noord-Nederland groter dan de intensiteiten bij dezelfde magnitude die in Zuid-Nederland of Duitsland waargenomen worden. Voor magnitude 3,0 bedraagt dit bijvoorbeeld één intensiteits-eenheid (Haak en De Crook, 1994). Dit wordt veroorzaakt door de grotere diepte van tectonische aardbevingen (5-15 km) en de gesteldheid van de bodem.

	M_{\max}	I_0	$I_0 \max$
Groningenveld	3,3	V	V-VI (5,7)
Overige gasvelden in Noordoost-Nederland	3,4	V-VI	VI (5,9)
Gasvelden rond Alkmaar	3,6	VI	VI-VII (6,3)

Tabel 4. Maximale te verwachten magnitude en intensiteit voor het gasveld van Groningen, de overige gasvelden in Noordoost-Nederland en de gasvelden rond Alkmaar.

Schade

De schade, die het gevolg kan zijn van een aardbeving, kan via het begrip intensiteit worden geschat aan de hand van de European Macroseismic Scale (EMS), Grünthal 1993. Volgens deze schaal treedt er pas schade op bij intensiteiten vanaf V.

Schade bij intensiteit V:

verwaarloosbare tot geringe schade (geen structurele schade) aan enkele gebouwen.

Schade bij intensiteit V-VI:

verwaarloosbare tot geringe schade (geen structurele schade) aan een relatief groter aantal gebouwen.

Schade bij intensiteit VI:

verwaarloosbare tot lichte schade (geen structurele schade) aan veel gebouwen en matige schade (lichte structurele schade, matige niet-structurele schade) aan enkele gebouwen.

Schade bij intensiteit VI-VII:

verwaarloosbare tot lichte schade (geen structurele schade) aan zeer veel gebouwen en matige schade (lichte structurele schade, matige niet-structurele schade) aan betrekkelijk veel gebouwen en aanzienlijke tot zware schade (matige structurele schade, zware niet-structurele schade) aan enkele gebouwen.

De EMS schaal geldt voor heel Europa. In Nederland wordt waarschijnlijk beter gebouwd dan gemiddeld in Europa, hierdoor zijn de bovengenoemde schades wellicht iets te hoog is ingeschat. In Nederland wordt bij het bouwen meestal geen rekening gehouden met aardbevingen, zie Nederlandse Norm (NEN 6702). Anderzijds moet opgemerkt worden dat tijdens de twee aardbevingen bij Alkmaar en Bergen al in het gebied met intensiteit IV een enkele melding is gedaan van geringe schade. Het KNMI stelt zich echter niet tot taak de schade te beoordelen.

De kans dat de maximale aardbeving inderdaad optreedt is zeer klein. In theorie is deze kans zelfs oneindig klein. De kans op een aardbeving met een intensiteit die een 1/2 intensiteitseenheid lager is dan de maximale intensiteit is natuurlijk groter. De herhalingsperiode voor een dergelijke beving kan bepaald worden door de kansdichtheidsfunctie die is afgeleid van de Gutenberg-Richter relatie te interpoleren en is ongeveer 20 jaar. Dat wil zeggen dat de kans op een dergelijke aardbeving ongeveer 40% is in een periode van 10 jaar. Dus voor het gebied van het Groningenveld en de overige gasvelden in Noordoost-Nederland kan geringe schade aan gebouwen optreden. Er is daar geen sprake van structurele schade. Voor de gasvelden rond Alkmaar kan lichte schade aan veel gebouwen en matige schade aan enkele gebouwen optreden. Dit is lichte structurele schade, en matige niet-structurele schade met een kans van 40% in 10 jaar.

Gezien de afwijkende magnitude-intensiteit relatie voor Noord-Nederland in vergelijking met Zuid-Nederland en Duitsland, is het van belang de opgetreden schade te relateren aan de gevonden intensiteiten en niet direct te koppelen aan magnitudes. Hiermee is tevens het belang van enquêtes ter bepaling van de intensiteit aangetoond.

De aardbevingen bij Alkmaar en Bergen

De aardbevingen bij Alkmaar en Bergen vormen een apart probleem wat betreft risicoschattingen omdat het aantal bevingen te gering is om specifiek voor dit gebied statistische berekeningen uit te voeren. In dit stadium moet worden afgegaan op de berekeningen voor Noord-Nederland als geheel en op de berekeningen die op de geologische aanpak gebaseerd zijn. Het op te zetten netwerk van boorgatseismometers zal in de toekomst specifieke statistische berekeningen mogelijk maken wanneer meer seismische gegevens voorhanden zijn.

De twee aardbevingen hebben zeer kort na elkaar plaatsgevonden op vrijwel dezelfde plaats. Wanneer deze bevingen met magnitudes 3,0 en 3,2 tegelijkertijd en op dezelfde plaats waren opgetreden zou de magnitude op 3,3 zijn uitgekomen.

Conclusies

De conclusies van dit rapport laten zich puntsgewijs als volgt samenvatten:

- ◇ Het aantal aardbevingen in Noord-Nederland is met name in 1994 toegenomen.
- ◇ De kracht van de aardbevingen is eveneens toegenomen ook al betreft dit een minderheid van het aantal schokken.
- ◇ Op basis van de waargenomen aardbevingen en geologische gegevens zijn berekeningen gemaakt van de maximale magnitude en intensiteit.
- ◇ De maximale magnitude van aardbevingen in het Groningenveld is 3,3 met intensiteit V-VI (5,7).
- ◇ Voor de overige gasvelden in Noordoost-Nederland is de maximale magnitude 3,4 met intensiteit VI (5,9).
- ◇ Voor de gasvelden rond Alkmaar is de maximale magnitude 3,6 met intensiteit VI-VII (6,3).
- ◇ Voor het Groningenveld en de overige gasvelden in Noordoost-Nederland is volgens de EMS-intensiteitschaal geringe niet-structurele schade aan gebouwen mogelijk, met een kans van 40% in 10 jaar. Voor de gasvelden rond Alkmaar is zelfs matige schade aan enkele gebouwen niet uit te sluiten. Dit is lichte structurele schade en matige niet-structurele schade.

Referenties

- Ahorner, L. and R. Pelzing, 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.
- Begeleidingscommissie Onderzoek Aardbevingen, 1993: Eindrapport multidisciplinair onderzoek naar de relatie tussen gaswinning en aardbevingen in Noord-Nederland, pp. 1-76.
- De Crook, Th., 1993: Probabilistic seismic hazard assessment for The Netherlands - Geologie en Mijnbouw 72. pp. 1-13.
- DePolo, C.M. and D.B. Slemmons, 1990: Estimation of earthquake size for seismic hazards. In: E.L. Krinitsky and D.B. Slemmons (eds.): Neotectonics in earthquake evaluation, Reviews in Engineering Geology. Geol.Soc. of America, pp. 1-28.
- Grünthal, G. (ed.), 1993: European Macroseismic Scale 1992 (up-dated MSK-scale). Published in Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, vol.7, pp. 1-79.
- Guest, P.G., 1961: Numerical methods of curve fitting, Cambridge University Press.
- Haak, H.W. en T. de Crook, 1994: Seismische analyse van aardbevingen in Noord-Nederland, KNMI publicatie WR 94-1, pp. 1-38.
- Mandelbrot, B.B., 1977: Fractals, W.H. Freeman and Company, pp. 1-365.
- Morgan, W.A., 1960: Determination of the straight line of best fit to observational data of two related variates when both sets of values are subject to error - Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 86, pp. 107-113.
- Scholz, C.H., 1990: The mechanics of earthquakes and faulting, Cambridge University Press, pp. 1-439.

APPENDIX I

Plaats	Datum	Tijd (UT)	Coördinaten °N, B. °O.L.	Amersfoort coördinaten	Intensiteit I_0	Magnitude M_L	Diepte km	Opmerkingen
Assen	26/12/1986	07:47	52.99; 06.55	556.4; 233.0	IV-V	2.8	1	Enquête
Hooghalen	14/12/1987	20:49	52.93; 06.55	549.7; 233.2	IV	2.5	1.5	Enquête
Purmerend	01/12/1989	20:09	52.53; 04.97	504.7; 126.7	V	2.7	1.2	Enquête
Emmen	15/02/1991	02:11	52.77; 06.91	532.5; 258.0	III-IV	2.2	3	Enquête
Geelbroek I	25/04/1991	10:26	52.95; 06.57	552.2; 234.8	III-IV	2.6	3	Enquête
Eleveld I	08/08/1991	04:01	52.96; 06.57	553.2; 234.2	III-IV	2.7	3-4	
Middelstum	05/12/1991	00:24	53.36; 06.66	597.5; 239.6	III	2.4	< 2	Enquête
Geelbroek II	23/05/1992	15:29	52.95; 06.57	552.4; 234.8	III-IV	2.6	3.1	
Geelbroek III	24/05/1992	18:00	52.95; 06.57	552.0; 234.5	II	1.6	-	
Foswinkel	11/06/1992	17:09	52.85; 07.04	541.5; 266.3	III-IV	2.5	1.5	Enquête
Eleveld II	22/07/1992	23:23	52.96; 06.58	552.8; 234.5	III	2.4	3.5	Ook Finsterwolde
Ten Boer	06/12/1992	20:34	53.32; 06.77	593.1; 247.2	I	2.0	-	Alleen Finsterwolde
Slochteren	11/12/1992	13:00	53.22; 06.79	581.8; 248.7	I	2.0	-	Alleen Finsterwolde
Noordbroek	12/02/1993	11:46	53.22; 06.87	582.1; 253.7	I	1.4	-	Alleen Finsterwolde
Langelo	05/03/1993	22:27	53.09; 06.44	568.2; 225.2	II-III	1.8	-	Enquête
Hoogezand	12/03/1993	22:12	53.16; 06.79	575.8; 248.6	I	1.6	-	Alleen Finsterwolde
Overschild	26/03/1993	18:34	53.29; 06.80	590.0; 249.1	I	1.8	-	Alleen Finsterwolde
Haren	05/05/1993	20:08	53.14; 06.66	572.8; 240.1	I	1.8	-	Alleen Finsterwolde
Ten Post	14/05/1993	19:39	53.30; 06.76	591.5; 246.5	I	1.7	-	Alleen Finsterwolde
Bedum	27/06/1993	02:09	53.32; 06.66	593.4; 239.7	I	1.8	-	Alleen Finsterwolde
Stedum	27/06/1993	02:57	53.31; 06.70	592.4; 242.5	I	1.5	-	Alleen Finsterwolde
Appingedam	10/07/1993	00:22	53.33; 06.86	594.5; 253.1	I	2.2	-	Alleen Finsterwolde
Loppersum	27/07/1993	13:39	53.35; 06.79	596.9; 248.1	I	1.5	-	Alleen Finsterwolde
Nijenklooster	23/08/1993	00:51	53.35; 06.83	596.3; 251.3	I	1.5	-	Alleen Finsterwolde

Tabel 1. Overzicht van de geregistreerde aardbevingen in Noord-Nederland van december 1986 t/m september 1994.

Plaats	Datum	Tijd (UT)	Coördinaten °N.B. °O.L.	Amersfoort coördinaten	Intensiteit I_0	Magnitude M_L	Diepte km	Opmerkingen
Oldenzijl	25 04/09/1993	02:24	53.39; 06.72	601.1; 243.7	I	1.9	-	Alleen Finsterwolde
Middelstum II	26 22/09/1993	17:37	53.35; 06.64	596.3; 238.5	II-III	2.4	-	Alleen Finsterwolde, enquête
Slochteren II	27 25/09/1993	00:21	53.21; 06.77	581.3; 247.7	I	1.9	-	Alleen Finsterwolde
Slochteren III	28 23/11/1993	12:31	53.22; 06.78	582.6; 247.7	II-III	2.5	-	Alleen Finsterwolde, telefonische enquête
Ten Post II	29 23/12/1993	01:35	53.29; 06.75	590.2; 246.0	I	2.2	-	Alleen Finsterwolde
Winneweer	30 04/02/1994	21:32	53.32; 06.74	593.6; 245.2	I	2.1	-	Alleen Finsterwolde
Roswinkel II	31 05/02/1994	15:10	52.84; 07.02	540.4; 265.0	IV-V	2.8	1,2	Enquête
Garsthuizen	32 28/02/1994	21:00	53.38; 06.74	599.9; 244.7	I	1.5	-	Alleen Finsterwolde
Steendam	33 02/03/1994	10:36	53.28; 06.83	589.0; 250.9	I	2.3	-	Alleen Finsterwolde
Eenum	34 06/03/1994	20:02	53.34; 06.79	595.2; 248.2	I	1.9	-	Alleen Finsterwolde
't Zandt	35 14/03/1994	09:31	53.37; 06.76	599.4; 246.2	I	2.2	-	Alleen Finsterwolde
Zandeweer	36 14/03/1994	10:44	53.39; 06.68	600.7; 241.7	I	2.5	-	Alleen Finsterwolde, geen trigger!¹
Westerbroek	37 14/03/1994	22:32	53.17; 06.68	576.4; 241.3	I	1.8	-	Alleen Finsterwolde
Delfzijl	38 24/03/1994	05:29	53.33; 06.95	594.6; 259.1	I	1.4	-	Alleen Finsterwolde
Steendam II	39 04/04/1994	18:46	53.28; 06.83	589.0; 250.9	I	1.8	-	Alleen Finsterwolde
Kolham	40 07/05/1994	20:08	53.19; 06.76	579.6; 246.9	I	1.6	-	Alleen Finsterwolde
Hellum	41 10/05/1994	01:34	53.23; 06.85	583.4; 252.8	I	1.1	-	Alleen Finsterwolde
Weiwerd	42 05/06/1994	02:14	53.30; 06.95	591.1; 259.3	I	1.7	-	Alleen Finsterwolde
Achterdiep	43 06/06/1994	04:08	53.17; 06.80	576.8; 249.2	I	1.8	-	Alleen Finsterwolde
Garsthuizen II	44 08/06/1994	22:20	53.37; 06.72	599.3; 243.9	I	1.8	-	Alleen Finsterwolde
De Klip	45 26/06/1994	17:44	53.35; 06.84	596.6; 251.6	I	1.7	-	Alleen Finsterwolde
Lithuizermeeden	46 27/06/1994	20:59	53.45; 06.69	607.7; 241.3	I	1.9	-	Alleen Finsterwolde
Onderdendam	47 01/07/1994	06:27	53.34; 06.51	595.5; 234.1	I	2.3	-	Alleen Finsterwolde
't Zandt II	48 19/07/1994	08:17	53.37; 06.75	598.9; 245.9	I	2.0	-	Alleen Finsterwolde
Middelstum III	49 30/07/1994	09:18	53.32; 08.14	596.0; 338.5	IV	2.9	0.8	Alle Nederlandse stations, telef. enquête

¹ Geschatte afstand en magnitude.

Plaats	Datum	Tijd (UT)	Coördinaten °N.B. °O.L.	Amerfoort coördinaten	Intensiteit I_0	Magnitude M_L	Diepte km	Opmerkingen
Naschok Middelstum III50	30/07/1994	09:53	53.39; 06.56	601.2; 233.3	I	1.9	-	Alleen Finsterwolde
Alkmaar 51	06/08/1994	18:02	52.66; 04.72	519.0; 110.0	IV-V	3.0	2.2	Enquête, FIN,WIT,WTS,ENN,HGN,WSB,BVS
Annen 52	16/08/1994	14:37	53.05; 06.71	563.0; 244.0	IV	2.6	-	Schrift. enquête FIN, WSB, BVS, WIT, WTS
Warffum 53	07/09/1994	22:06	53.41; 06.58	603.2; 234.4	I	2.1	-	Alleen Finsterwolde
Z.O. Drenthe 54	09/09/1994	15:57	52.69; 06.88	523.0; 256.0	I	1.9	-	Alleen Finsterwolde
Alkmaar II 55	21/09/1994	01:13	52.66; 04.71	519.0; 109.0	V	3.2	2.5	Enquête, alle Ned. stations, België, VK, D'land, F
Schoonebeek 56	23/09/1994	19:50	52.67; 06.88	521 ; 256	II	1.9	-	ENN, WTS

Statistische methodes

De statistische methodes voor de bepaling van de maximale magnitude gaan uit van een tweetal aannames.

Ten eerste wordt aangenomen dat de tijdsvolgorde van de aardbevingen voldoen aan een Poisson proces. Individuele aardbevingen worden als onafhankelijk van elkaar beschouwd.

$$P(n) = \frac{(\lambda\tau)^n}{n!} \cdot e^{-\lambda\tau} \quad \text{A2.1}$$

In deze formule is $P(n)$ de kansdichtheidsfunctie; de kans dat n gebeurtenissen (aardbevingen) optreden in het tijdsinterval τ . Het tijdsgemiddelde jaarlijkse aantal wordt gegeven door λ .

Ten tweede wordt aangenomen dat het lineaire deel van de frequentie-magnitude relatie wordt gegeven door de empirische wetmatigheid die door Gutenberg en Richter gevonden is.

$$\log(n(>M)) = a - b.M \quad \text{A2.2}$$

In de formule is $n(>M)$ het jaarlijks aantal bevingen met een kracht groter dan magnitude M , a en b zijn constanten. Aan de constante b wordt een meer dan gewone betekenis toegekend omdat deze ook niet-heeltallige waarden kan aannemen. Het een en ander wordt duidelijker wanneer de formule wordt omgeschreven naar de vorm:

$$n(>M) = \alpha \cdot e^{-\beta M} \quad \text{A2.3}$$

met $\alpha = 10^a$ en $\beta = b \cdot \ln(10)$

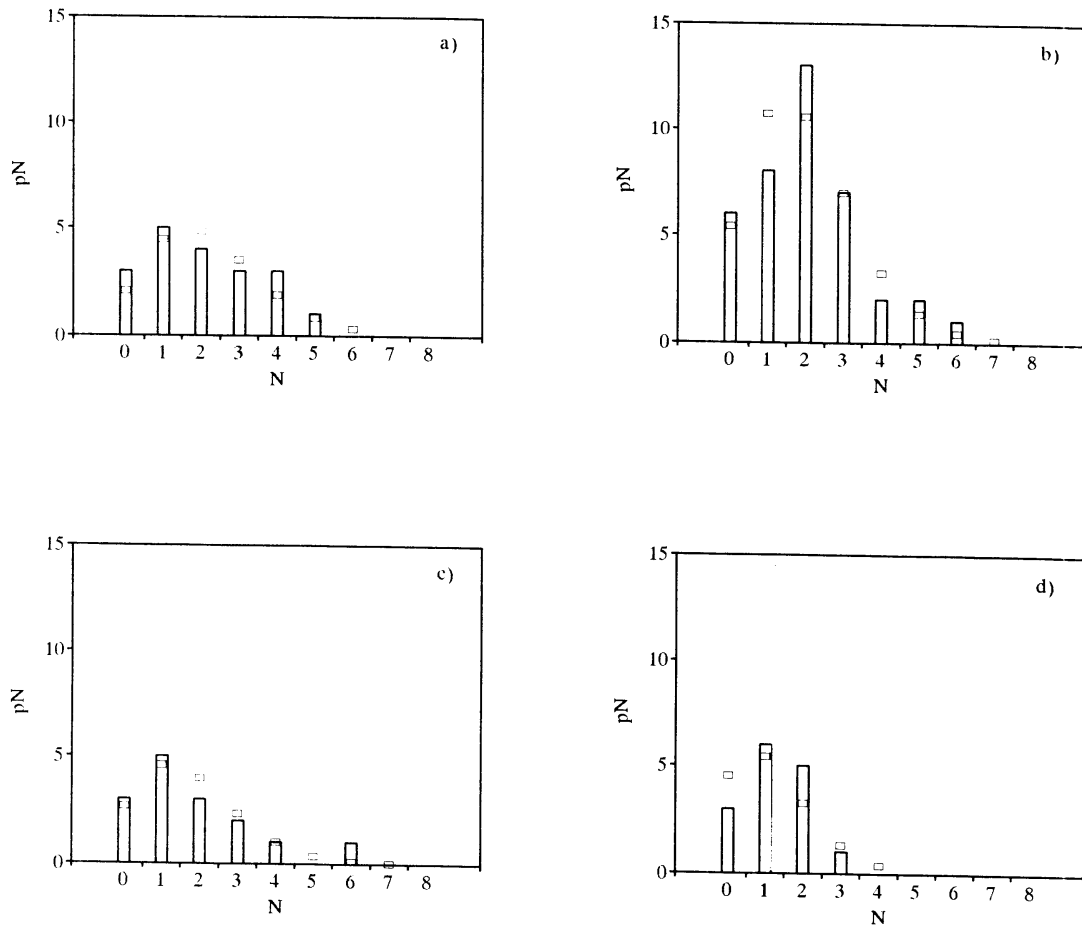
Nu heeft de formule een vorm die ook wordt gevonden in situaties waar "fractals" een rol spelen. Deze fractals zijn kenmerkend voor veel geofysische processen. Voorbeelden van fractals zijn boomstructuren en grillige kustlijnen. Ze zijn aanvankelijk vooral beschreven door Mandelbrot (1977). Breuken in de ondergrond zijn in dit opzicht ook goede voorbeelden van fractal-structuren. Een belangrijk kenmerk van deze structuren is "self-similarity" of "scaling". Dit is de eigenschap dat een structuur grote gelijkenis vertoont over een breed scala van lengteschalen. Daarom gebruiken geologen een persoon, hun hamer of een muntstuk als lengtemaat wanneer zij foto's van rotsformaties maken.

Het spreekt vanzelf dat de lengteschaal naar boven begrensd is. Er kan dus een grootste breuklengte gevonden worden en daarmee ook een grootste magnitude die onder gegeven geologische condities mogelijk is. Voor de beschrijving van de grootste magnitudes is de volgende relatie gebruikt:

$$n(>M) = \alpha \left[\frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_{\max}}}{1 - e^{-\beta M_{\max}}} \right] \quad \text{A2.4}$$

De functie is afgeleid van de Gutenberg-Richter relatie, en is in deze studie gebruikt om de maximale magnitude (M_{\max}) te schatten. Met het Poisson-gedrag in de tijd en de Gutenberg-Richter relatie voor de verhouding van de magnitudes is een complete beschrijving gegeven van het optreden van aardbevingen.

Simulaties van aardbevingen voor Noordoost-Nederland voldoen inderdaad aan de Poisson-verdeling zoals de figuren 15a-d laten zien. Dit geldt overigens ook voor het complete deel van de aardbevingscatalogus van Noordoost-Nederland voor december 1986 t/m september 1994. (zie figuren 16a-c). De tectonische aardbevingen in Nederland als geheel voldoen ook aan de Poisson-verdeling (De Crook, 1993). Er is dus vertrouwen in de dataset en de simulaties.



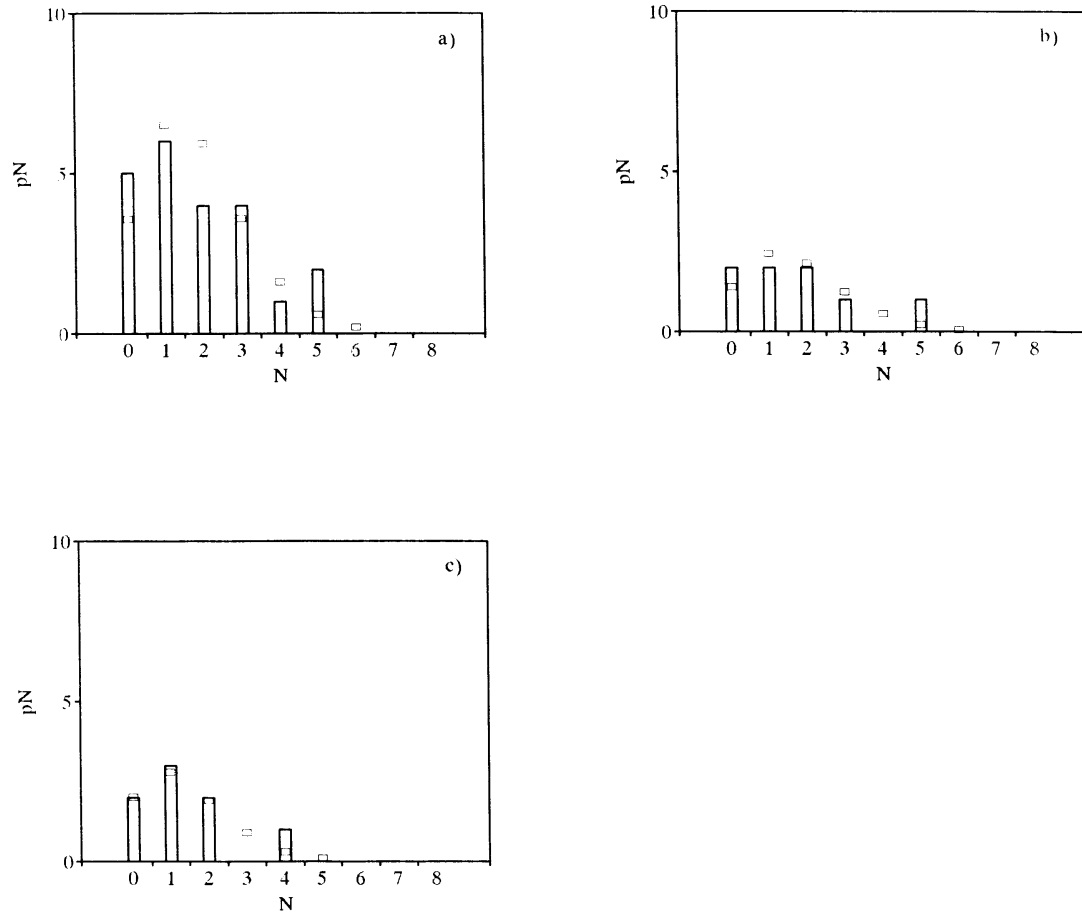
Figuur 15. Test van Poisson verdeling van een simulatie van aardbevingen in Noordoost-Nederland. Het histogram is de waargenomen verdeling en de open vierkantjes is de theoretische Poisson functie. pN = aantal tijdsintervallen met hetzelfde aantal N .

a) voor magnitudes 1,5 t/m 1,7.

b) voor magnitudes 1,8 t/m 2,0.

c) voor magnitudes 2,1 t/m 2,3.

d) voor magnitudes 2,4 t/m 2,9.



Figuur 16. Test van Poisson verdeling van het complete deel van de waargenomen aardbevingen van december 1986 t/m september 1994 in Noordoost-Nederland.

a) voor magnitudes 1,5 t/m 2,9.

b) voor magnitudes 2,3 t/m 2,9.

c) voor magnitudes 2,5 t/m 2,9.

Beschrijving van methode-3: Monte Carlo

In deze methode wordt de volledige frequentie-magnitude relatie, inclusief de afbuiging, beschreven aan de hand van de cumulatieve kansdichtheidsfunctie A2.4. De functie wordt aangepast aan de data. Hiertoe wordt een nieuwe functie gedefinieerd, de 'misfit functie', die de afwijking tussen theorie en gemeten data beschrijft. De misfit functie wordt in dit geval gegeven door:

$$F = \sum_i | \log(N_i^{data}) - \log(N_i^{th}(\alpha, \beta, M_{max})) | \quad A3.1$$

De maximale magnitude (M_{max}) wordt berekend door het minimum van de misfit functie te bepalen.

Nu het voorwaartse probleem goed gedefinieerd is, is het ook mogelijk de invloed van fouten in de data op de bepaling van M_{max} te modelleren. Dit wordt bereikt door het voorwaartse probleem door te rekenen voor een groot aantal verschillende datasets.

De gemeten dataset wordt beschouwd als één realisatie uit een groot aantal mogelijke realisaties. Andere realisaties worden gesimuleerd door de gemeten dataset te perturberen. Bij deze perturbaties wordt aangenomen dat de fout in de gemeten magnitudes normaal verdeeld is en dat de bevingen in de tijd voldoen aan de Poisson-verdeling.

In deze studie zijn voor de bepaling van M_{max} 300 experimenten uitgevoerd. De gevonden waarden voor M_{max} zijn Poisson verdeeld. Uit modellering van de gevonden verdelingsfunctie is vervolgens het gemiddelde van M_{max} en de standaardafwijking bepaald.

Geologische methode

De bepaling van de maximale aardbeving uit de geologische structuur maakt gebruik van het gegeven dat de kracht van een aardbeving afhangt van het oppervlak van het verschoven breukdeel, de mate van verschuiving en de elastische schuifspanningsconstante van het gesteente in de omgeving van de breuk. Dit wordt samengevat in de formules voor het seismisch moment (A4.1) van een aardbeving en de relatie tussen moment en magnitude van Hanks en Kanamori (A4.2).

$$M_0 = \mu A d \quad \text{A4.1}$$

Met M_0 de waarde van het seismische moment (Nm), μ de schuifspanningconstante (Pa) en $A.d$ het produkt van breukoppervlak en verschuiving.

$$M_L = \frac{\log(M_0) - 9,1}{1,5} \quad \text{A4.2}$$

M_L is de lokale magnitude. Dus voor een schatting van de maximale magnitude moeten μ , A en d bepaald worden.

De parameters zijn niet onafhankelijk van elkaar. Er bestaan ook voor aardbevingen zogenaamde schaalwetten (Scholz, 1990). Deze zijn het directe gevolg van de observatie dat de "stress drop", de spanningsverandering tijdens een aardbeving, constant is en dus onafhankelijk van de magnitude. Dit betekent vervolgens dat ook de "strain drop", de relatieve lengteverandering, dus de relatieve verschuiving langs de breuk, constant is.

De lengte-breedte verhouding van het breukoppervlak ligt doorgaans binnen een factor 2. De verhouding van de verschuiving d en de wortel uit het oppervlak A (de lengtemaat) ligt tussen 10^{-4} en 10^{-5} . In deze studie is het gemiddelde van deze waarden aangenomen. Dit is consistent met de berekeningen via het Brune-model van een aantal bevingen in Noord-Nederland. Deze schaalwetten beperken dus de bepaling van de maximale magnitude tot de bepaling van de grootste breukdimensie die op grond van geologische overwegingen beschikbaar is en de schatting van de elastische constante voor schuifspanning. De bepalingen van de haardparameters via het model van Brune van de aardbevingen in Noord-Nederland hebben deze schaalwetten ook voor dit gebied bevestigd.