

SEISMISCH RISICO IN NOORD-NEDERLAND

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

februari 1998

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, Afdeling Seismologie

Seismisch risico in Noord-Nederland

Samenvatting

Dit rapport geeft een schatting van het seismische risico in Noord-Nederland: Groningen, Drenthe en Noord-Holland. De directe aanleiding voor dit rapport is de beving bij Roswinkel op 19 februari 1997 met een kracht van 3,4 op de schaal van Richter. Het is de krachtigste aardbeving die tot nu toe in verband is gebracht met gaswinning. Een indirecte aanleiding vormt de trend van het aantal schokken, in deze studie 125, en de herijking van de magnitudes voor Noord-Nederlandse bevingen.

Het seismische risico is gedefinieerd als het product van de kans op een aardbeving, de kwetsbaarheid van de bouwwerken in het getroffen gebied en de maatschappelijke ernst of de geldswaarde van de gevolgen. Dit rapport handelt vooral over de schatting van de kans op een aardbeving. De laatste twee categorieën in de definitie van risico, kwetsbaarheid en gevolgen, kunnen worden beschreven met het begrip intensiteit. De intensiteiten, gemeten in Noord-Nederland, kunnen worden vertaald in financiële gevolgen. Hiermee kan het seismische risico berekend worden in gulden per jaar.

Dit rapport toont aan dat de vrijgekomen seismische energie in de vorm van aardbevingen constant is sinds 1993. De fluctuaties in energie zijn vooral het gevolg van de grootste bevingen. De toename van het aantal geregistreerde aardbevingen wordt voornamelijk veroorzaakt door verlaging van de detectiegrens omdat meer seismometers beschikbaar gekomen zijn.

Op basis van de aardbevingen in de periode 1986 tot 1997 is de beste schatting voor de maximale magnitude 3,8 op de schaal van Richter. Het aantal aardbevingen in de onderzochte serie met een magnitude groter dan 3,0 is gering (3). Als gevolg hiervan is het resultaat van de schatting van de maximale magnitude afhankelijk van een individuele beving. Wanneer de grootste beving, die bij Roswinkel, wordt weggelaten, is de maximale magnitude berekend op 3,6. Dit is conform eerdere schattingen.

De maximale intensiteit wordt geschat op VI-VII (6,5) op de Europese Macroseismische Schaal. Voor de omgeving van sommige gasvelden in Noord-Nederland kan lichte schade optreden aan veel gebouwen (geen constructieve schade) en matige schade aan enkele gebouwen (lichte constructieve schade, matige niet-constructieve schade). Intensiteit VI kan optreden met een overschrijdingskans van 65% in de komende periode van 10 jaar.

De schade aspecten van Noord-Nederlandse aardbevingen komen ook aan de orde in een studie van TNO-Bouw die gelijktijdig met dit rapport beschikbaar komt. De gezamenlijke rapporten van KNMI en TNO-Bouw vormen de beste schatting op dit moment van het seismische risico in het Noorden van Nederland.

De Bilt, februari 1998

INHOUD

Inleiding	1
Seismisch risico	2
Aardbevingen in de periode '86 -'97	3
Complete periodes	4
Vrijgekomen energie en aantal bevingen	5
Frequentie-magnitude relatie	6
Bepaling maximale magnitude	7
Intensiteit-magnitude relatie	11
Geïnduceerd, getriggered of tektonisch ?	13
Schade	15
Conclusies	16
Referenties	17
Appendix	19

Seismisch risico in Noord-Nederland

Inleiding

De vraag naar het seismische risico van aardbevingen in Noord-Nederland is in de laatste tien jaar steeds opnieuw gesteld door publiek, pers, overheden en industrie. Vooral nadat grotere schokken waren opgetreden werd het seismische risico weer actueel. Voorbeelden zijn de aardbevingen bij Eleveld in 1991 en 1992, bij Alkmaar in 1994 en het meest recent die bij Roswinkel in 1997. Het KNMI heeft in een serie rapporten op basis van het toen beschikbare materiaal een duidelijk en neutraal antwoord gegeven op de vraag naar de grootte van het seismische risico. De eerste seismische risico analyses van aardbevingen in Noord-Nederland zijn beschreven in Haak et al. (1993, 1994), zie ook het eindrapport van de Begeleidingscommissie Onderzoek Aardbevingen (BOA) uit 1993. Deze analyses waren gebaseerd op de eerste 24 waargenomen bevingen vanaf december 1986. In het rapport van De Crook et al. (1995) zijn de eerste 56 bevingen geanalyseerd.

De directe aanleiding tot dit rapport is het feit dat, tot voor kort, een beving zoals bij Roswinkel op 19 februari 1997 met een kracht van 3,4 werd gezien als de maximale magnitude die kan optreden in dit gebied (De Crook et al. (1995)). Statistisch gezien, viel deze beving weliswaar binnen de foutmarge van de bepaling van de maximale magnitude, maar de kracht van deze schok en de gerapporteerde schade riepen veel vragen op. Een indirecte aanleiding vormt de trend van het aantal schokken, in deze studie 125, en de herijking van de magnitudes voor Noord-Nederlandse bevingen, dit alles op grond van verbeterde seismische registraties.

De huidige analyse is van toepassing op Noord-Nederland als een geheel. Er is afgezien van een verdeling in kleinere gebieden zoals in voorgaande rapporten wèl het geval was. Weliswaar kan de geologie per gebied verschillen, waardoor in principe een variatie in de sterkte van aardbevingen mogelijk is, de onzekerheden omtrent de maximale magnitudes zijn echter te groot om op basis van het nu beschikbare materiaal tot een betekenisvolle schatting per gebied te komen.

De maximaal te verwachten magnitude is bepaald door toepassing van verschillende standaardmethodes, die ook worden toegepast bij tektonische aardbevingen. Doordat de seismische gegevens beperkt zijn en er diverse aannames gemaakt zijn, is de berekening van de maximale magnitude een schatting die voorzien moet worden van een foutmarge. Voor de berekening van het seismische risico is het van belang dat naast de maximale aardbeving ook de herhalingstijden van de grotere aardbevingen bekend zijn.

De aardbevingen in Noord-Nederland staan in verband met de gaswinning. Daarom worden deze aangeduid met de term geïnduceerde aardbevingen. Dit rapport documenteert de opgetreden aardbevingen in het Noorden op de risico-aspecten en geeft een prognose van het risico op basis van de tot nu toe beschikbare gegevens. Het moet met nadruk gesteld worden dat de prognose een afspiegeling is van de data zelf. Het gaat immers om relatief kleine gebieden waar de geologie en spanningssituatie per gasveld kunnen verschillen. Dit is in tegenstelling tot natuurlijke aardbevingen, die ontstaan uit een grootschalige tektoniek. Het

kan dus voorkomen dat in de toekomst gebieden door aardbevingen getroffen worden die nu nog niet of onvoldoende in de datareeks gerepresenteerd zijn. De gepresenteerde prognose is in dit opzicht vooral van waarde voor de gasvelden waar al bevingen zijn opgetreden. Uitspraken over alle gasvelden in Noord-Nederland berusten dus op extrapolatie.

Met de relatie tussen magnitude en intensiteit van aardbevingen in Noord-Nederland kan de maximale intensiteit berekend worden. Op zijn beurt is de maximale intensiteit de maat voor de te verwachten schade volgens de Europese Macroseismische Schaal (EMS) uit 1992.

Seismisch risico

Het seismische risico is gedefinieerd als het product van de kans op een aardbeving met een bepaalde kracht, een maat voor de kwetsbaarheid van het getroffen gebied en een maat voor de gevolgen van de aardbeving. In vorm van een vergelijking:

$$\text{Risico} = \text{Kans} \cdot \text{Kwetsbaarheid} \cdot \text{Gevolgen} = \text{Kans} \cdot \text{Effecten} \quad (1)$$

De kansverdeling van aardbevingen wordt meestal gegeven als het jaarlijks aantal bevingen boven een bepaalde magnitude. Dit wordt de cumulatieve frequentie-magnitude relatie genoemd. Deze kansverdeling is een belangrijk onderwerp van deze studie. Het gaat dus niet alleen om de maximale aardbeving, het gaat vooral om de vraag hoe vaak aardbevingen van de schade veroorzakende magnitude optreden. Studie van de geologie kan wel de grootst mogelijke aardbeving indiceren, maar niet de kans op een dergelijke aardbeving. Dit geldt ook voor de later te bespreken energiemethode en de verschillende vuistregels.

De hevigheid van de trillingen tijdens een aardbeving zijn niet uitsluitend af te leiden uit de magnitude. Andere factoren, zoals de diepte en de lokale gesteldheid van de ondiepe ondergrond kunnen ook belangrijke variabelen zijn voor het totaal van de gevolgen. De invloed van de ondiepe ondergrond wordt momenteel door KNMI en NITG nader onderzocht, het gaat hierbij vooral om verschijnselen zoals interferentie van aardbevingsgolven die de trillingsintensiteiten lokaal kunnen vergroten.

Het heeft de voorkeur, daar waar mogelijk, de optredende versnellingen of snelheden van de trillingen met instrumenten te meten. Deze metingen zijn voor de omgeving van Roswinkel ook inderdaad beschikbaar, dankzij de daar opgestelde versnellingsmeters. De term "Kans" moet dus gekwantificeerde uitspraken bevatten die uiteindelijk zijn om te zetten in het aantal keren per tijdseenheid dat een bepaald trillingsniveau overschreden wordt.

De term "Kwetsbaarheid" is de factor die aangeeft hoe verschillende bouwwerken op aardbevingstrillingen reageren, hoe kwetsbaar ze zijn. Het mag duidelijk zijn dat een hoog enkelsteens muurtje kwetsbaarder is dan een bouwwerk van gewapend beton. Voor de meeste bouwwerken ligt het echter wat subtieler. In de Nederlandse situatie bestaat de schade meestal uit kleinere of grotere scheuren die goed zichtbaar zijn. In het ene geval kan een dergelijke scheur alleen een esthetisch nadeel hebben, in het andere geval kan een scheur een constructieve schade aan het gebouw betekenen. Bouwnormen en bouwrichtlijnen beschrijven over het algemeen de kwetsbaarheid van gebouwen onder verschillende trillingsintensiteiten.

De "Gevolgen" van een aardbeving zijn in Nederland meestal financiële gevolgen. Daarom wordt deze term uit de formule ook wel eens aangeduid met "Waarde". Er is nog weinig ervaring in de schatting van de niet-materiële gevolgen. De gevolgen kunnen uitgesplitst worden naar de verschillende soorten kwetsbaarheden. Om het verschil tussen de begrippen "Kwetsbaarheid" en "Gevolgen" duidelijk te maken is het voorbeeld van een kerncentrale die door een aardbeving wordt getroffen verhelderend. De kwetsbaarheid van een kerncentrale wordt door een groot aantal maatregelen zo klein mogelijk gehouden. Daar staat tegenover dat de gevolgen van een ramp met een kerncentrale bijzonder groot kunnen zijn. Een slecht gebouwd schuurtje vormt het tegengestelde voorbeeld. De kwetsbaarheid is groot maar de gevolgen van instorten worden als veel geringer ervaren.

Wanneer we ons beperken tot gemiddelde waarden dan is het begrip intensiteit een goede maat voor de "Effecten"; het product van "Kwetsbaarheid" en "Gevolgen". Het is opmerkelijk dat in veel gevallen een betekenisvolle rubricering gemaakt kan worden van dit gecompliceerde product in termen van intensiteit. Wat betreft de noordelijke aardbevingen, die op geringe diepte plaatsvinden, van gemiddeld 2,3 kilometer, is het gebied van de grootste intensiteit beperkt tot een klein gebied van slechts een tiental vierkante kilometers. Als gevolg van de grote verschillen in dichtheid van bebouwing kunnen dus ook grote verschillen optreden in de gevolgen. De mate van bebouwing in Alkmaar en Roswinkel vormen in dit opzicht voor Nederlandse begrippen bijna twee uitersten.

Uit bovenstaande beschouwing zal duidelijk zijn dat de onzekerheid in de kans op een aardbeving zeker niet de enige onzekerheid is in de bepaling van het seismische risico. Ook bouwkundige aspecten verdienen in dit opzicht de aandacht. Naast deze studie is een andere studie verricht waarbij is gekeken naar de schade aan gebouwen als gevolg van aardbevingen onder Nederlandse omstandigheden. Deze studie is door EZ opgedragen aan TNO-Bouw. De studie moet de kwetsbaarheid en de gevolgen onder Nederlandse omstandigheden beter definiëren dan mogelijk is met het algemene begrip intensiteit. De gegevens van de versnellingsmeters rond Roswinkel (zie Dost et al., 1998a) zijn voor deze studie gebruikt.

Aardbevingen in de periode '86 -'97

In de appendix zijn de gemeten parameters van 125 geregistreerde aardbevingen in het noorden weergegeven in de periode van 26 december 1986 tot en met 20 februari 1997. Het betreft gegevens zoals tijdstip, locatie, intensiteit, magnitude en diepte. De lokale magnitude (M_L) varieert tussen -0,2 en 3,4. De maximaal waargenomen intensiteit is VI. De bevingen vinden plaats op een diepte tussen 1 en 3,5 km. De gemiddelde diepte is 2,3 km.

De magnitudes van alle aardbevingen zijn opnieuw berekend volgens Dost et al. (1998b). Vergeleken met de magnitudes in het rapport van De Crook et al. (1995) zijn kleinere magnitudes in het algemeen iets kleiner geworden. De grotere magnitudes zijn ongeveer hetzelfde gebleven. De verbetering in de nauwkeurigheid van de magnitudes is het gevolg van een betere attenuatie curve voor de noordelijke diepe ondergrond, doordat meer aardbevingen met meerdere boorgat seismometerstations geregistreerd werden. De systematische fout die voorheen gemaakt is, heeft geen invloed gehad op de schattingen van de maximale magnitude, omdat die vooral van de grote magnitudes afhangen. De fout in de magnitudes tussen 1,5 en 1,6 is 0,14 magnitude-eenheid, tussen 1,7 en 2,2 is dit 0,13. Bij de grotere magnitudes neemt

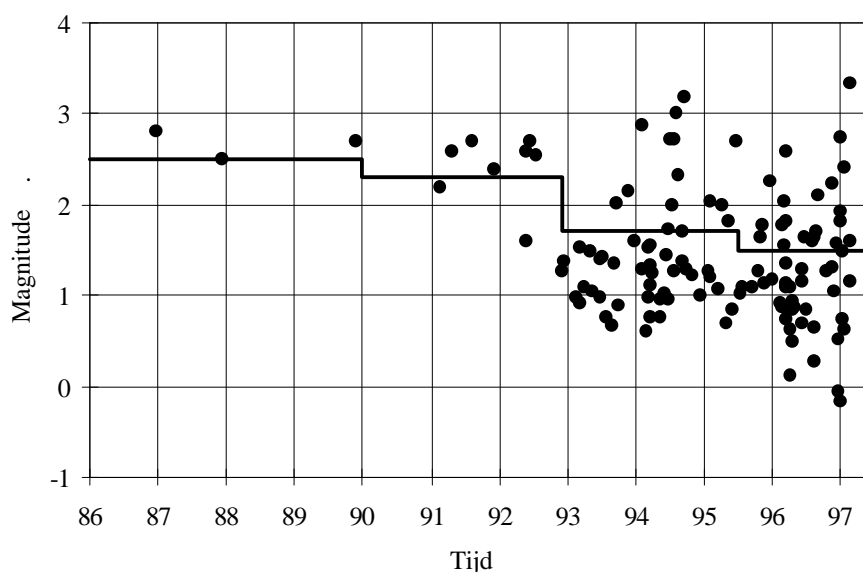
de fout in de bepaling verder af omdat meerdere stations de bevingen geregistreerd hebben. Tussen 2,3 en 2,4 is de fout 0,11 en voor 2,5 en hoger 0,09.

Complete periodes

In statistische analyses is het van belang een aardbevingscatalogus te gebruiken die compleet is, dus dat circa 90% van alle aardbevingen groter dan een bepaalde magnitude zijn geregistreerd en in de catalogus zijn opgenomen. Vaak is deze magnitude de grens voor de detectie in een seismisch netwerk en wordt detectiegrens genoemd. De detectiegrens kan variëren in de tijd naar gelang het netwerk van seismische stations meer of minder dicht is opgebouwd. In figuur 1 zijn daarom de magnitudes van de 125 aardbevingen uitgezet in de tijd vanaf december 1986.

De detectiegrens van het Nederlandse seismische netwerk is voor Noord-Nederland ongeveer 2,5. Dus, alle aardbevingen die zijn opgetreden in de periode vóór 1990 met een magnitude groter dan magnitude 2,5 zijn geregistreerd. In 1989 is het seismische netwerk rond Assen in gebruik genomen. Hiermee is de detectiegrens voor Noordoost-Nederland verlaagd naar 2,3. Rekening houdend met de inwerkperiode van het Assen-netwerk zijn de bevingen zeker compleet vanaf 1990 voor magnitude 2,3 en hoger. De boorgatseismometer bij Finsterwolde is in het najaar van 1992 operationeel geworden. Hiermee kwam de detectiegrens voor Noordoost-Nederland op 1,7 voor de provincie Groningen op 1,5. Nadat was vastgesteld dat de experimentele boorgat seismometer bij Finsterwolde goed functioneerde, is een netwerk van boorgat seismometers opgezet in Groningen, Drenthe en Noord-Holland. Dit netwerk is midden 1995 operationeel geworden. De detectiegrens is daarmee verbeterd tot 1,5 voor Noord-Nederland. Daarmee zijn de aardbevingen die zijn opgetreden vanaf juli 1995 compleet voor magnitude 1,5 en hoger.

Statistisch gezien is de serie van aardbevingen boven de getrapte lijn in figuur 1 compleet. Dit databestand bestaat uit 47 bevingen. Alleen deze bevingen zijn in verdere berekeningen betrokken.



Figuur 1. Magnitudes van aardbevingen uitgezet tegen de tijd. Boven de getrapte lijn is de serie van aardbevingen compleet.

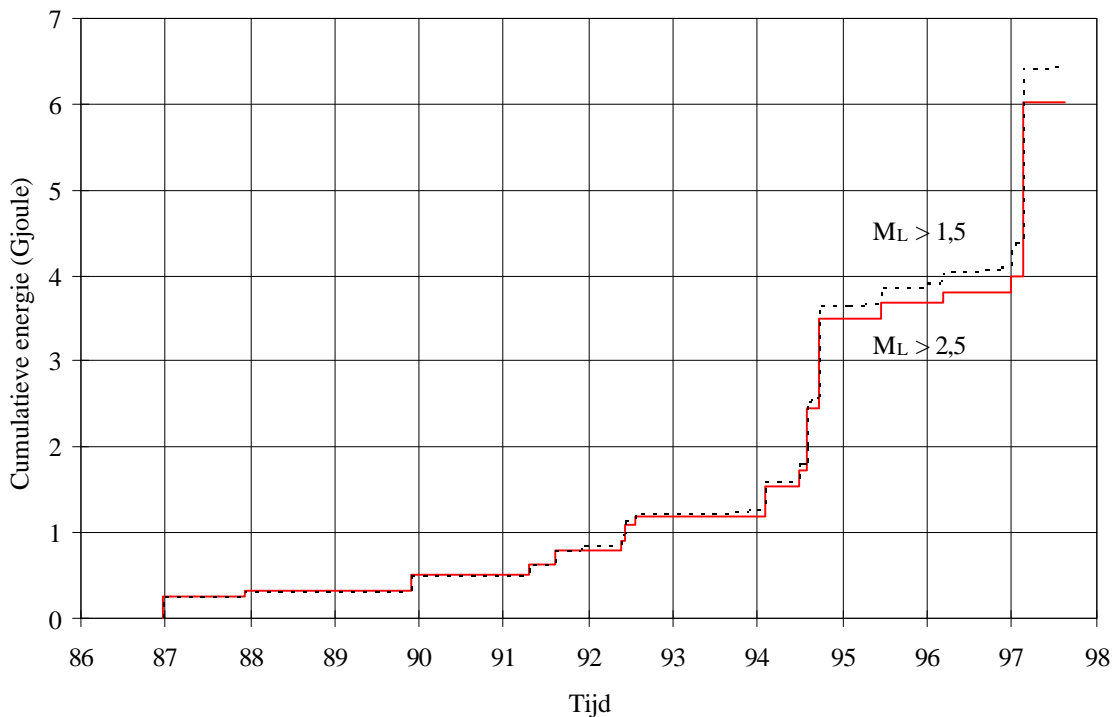
Vrijgekomen energie en aantal bevingen

De meeste verhandelingen over tektonische aardbevingen gaan uit van een "steady state" benadering. Dat wil zeggen het gemiddelde aantal bevingen en de uitgestraalde energie per tijdseenheid wordt constant verondersteld, als gevolg van een constante tektonische beweging. Deze benadering is ook in deze studie gebruikt. Het is overigens de vraag of Noord-Nederland al helemaal in een "steady state" verkeert. Om de ontwikkeling in de tijd te volgen is de cumulatieve energie van de aardbevingen uitgerekend. Hiervoor is gebruik gemaakt van de relatie afgeleid door Ahorner en Pelzing (1985):

$${}^{10}\log(E) = 3,81 + 1,64 M_L \quad (2)$$

in deze vergelijking is E de vrijgekomen seismische energie in joules en M_L is de lokale magnitude.

In figuur 2 is voor de aardbevingen met magnitude groter dan 2,5 in Noord-Nederland de vrijgekomen energie uitgezet tegen de tijd. Aardbevingen kleiner dan 2,5 leveren relatief weinig energie. Figuur 2 laat zien dat sinds 1986, het begin van de aardbevingsreeks, de vrijgekomen energie is toegenomen. De eerste periode tot 1993 kenmerkt zich door relatief lange tijdsintervallen tussen de verschillende aardbevingen. Sinds 1993 is de vrijgekomen energie, ondanks grote fluctuaties, vrij constant. Dit ondersteunt de aanname van een "steady state". Door vergelijking met figuur 1 kan de conclusie worden getrokken dat de toename van het *aantal* geregistreerde bevingen met vooral kleine magnitudes, voornamelijk veroorzaakt is door verlaging van de detectiegrens.



Figuur 2. Vrijgekomen energie uitgezet tegen de tijd. De gestippelde lijn geeft de energie voor alle aardbevingen met een magnitudes 1,5 of groter.

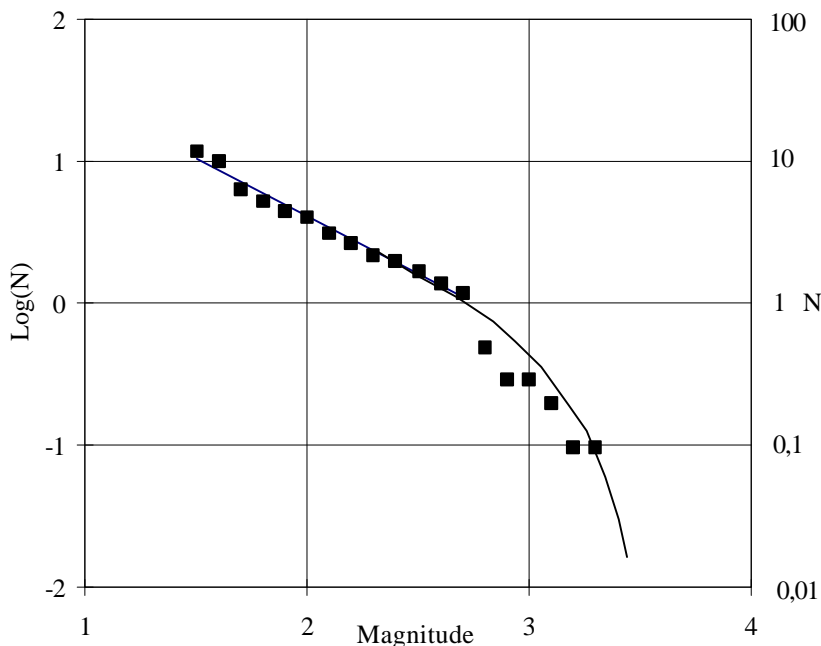
Frequentie-magnitude relatie

Om inzicht te verkrijgen in de verdeling van de sterkte van aardbevingen wordt de frequentie-magnitude relatie bepaald. In figuur 3 is de relatie weergegeven voor de situatie in Noord-Nederland. De verdeling ontstaat door de logaritme van het cumulatieve jaarlijkse aantal aardbevingen (N) uit te zetten tegen de magnitude. Dus het punt in de figuur met magnitude 1,5 geeft aan dat het jaarlijkse gemiddelde aantal bevingen met een magnitude groter dan 1,5 circa 10 bedraagt. De verdeling wordt onder meer gebruikt om de maximale magnitude te berekenen. Het lineaire deel van de cumulatieve frequentie-magnitude relatie wordt ook wel de wet van Gutenberg en Richter genoemd. Deze wetmatigheid tussen de aantallen van aardbevingen en hun sterkte wordt overal ter wereld gevonden en heeft zijn geldigheid in brede zin bewezen.

In vergelijking 3 is de cumulatieve frequentie-magnitude relatie van aardbevingen in Noord-Nederland gegeven die uit de data bepaald is.

$${}^{10}\log(N) \pm 0,04 = (2,23 \pm 0,07) - (0,81 \pm 0,03) M_L \quad (3)$$

N is het cumulatieve jaarlijkse aantal aardbevingen. De formule is geldig voor $1,5 \leq M_L \leq 2,7$. De correlatie-coëfficiënt van de aanpassing aan de data is 0,99 hetgeen betekent dat de data goed kan worden gerepresenteerd door een rechte. De coëfficiënten van vergelijking 3 zijn berekend met de kleinste kwadraten methode. Wanneer de Monte-Carlo methode wordt gebruikt om de aanpassing aan een rechte uit te voeren zijn de "a- en de b-waarde" respectievelijk $2,27 \pm 0,24$ en $0,84 \pm 0,12$. De waarden zelf zijn vergelijkbaar, echter de kleinste kwadraten methode onderschat de werkelijke fouten in de meetwaarden.



Figuur 3. Frequentie-magnitude relatie voor Noord-Nederland als geheel.

Voor de berekende waarde voor de helling van de rechte de b-waarde is dus $0,8 \pm 0,12$ genomen. Voor tektonische aardbevingen in heel Nederland is deze waarde 0,7 (De Crook, 1996). Er is dus geen duidelijk verschil in de b-waarde voor aardbevingen in Noord-Nederland en tektonische aardbevingen in Nederland. Dit staat in tegenstelling tot eerdere bevindingen, waarbij de b-waarde hoger was. Dit is een gevolg van de betere berekening van de magnitudes.

Het gekromde gedeelte van de lijn in figuur 3 van de frequentie-magnitude relatie is het resultaat van berekeningen die veronderstellen dat de aardbevingsreeks in Noord-Nederland een maximale magnitude kent. De kracht van een aardbeving wordt beperkt door de ruimte die beschikbaar is voor de verschuiving langs een breuk. Beperkte breukdimensies in de diepe ondergrond begrenzen de magnitude en zijn dus aanleiding tot een maximale magnitude. Het gevolg is dat de grootste aardbevingen relatief minder vaak voorkomen.

Uit de grafiek van figuur 3 is af te lezen dat aardbevingen met een kracht van meer dan 3,0 op de schaal van Richter gemiddeld in Noord-Nederland ongeveer eens in de 2 jaar kunnen optreden op basis van de statistiek die tot nu toe is opgebouwd. Met andere woorden de frequentie-magnitude relatie is de gezochte kansverdeling uit vergelijking 1, onder de aanname dat de verleden aardbevingen model kunnen staan voor toekomstige aardbevingen. Theoretisch gezien zal de maximale magnitude met een verdwijnend kleine kans optreden. Deze grootte is vooral van belang om het gekromde gedeelte van de frequentie-magnitude relatie te modelleren. In dit geval is dat het segment met een lokale magnitude tussen 2,7 en 3,5 op de schaal van Richter.

Bepaling maximale magnitude

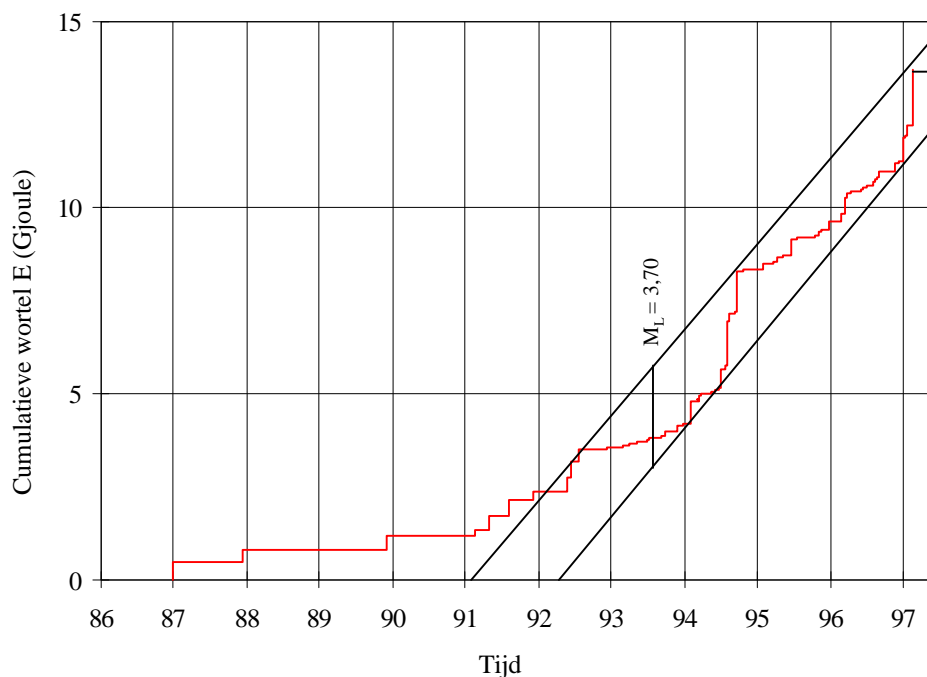
De maximale magnitude kan uit statistische aardbevingsgegevens worden bepaald met verschillende methodes: de vuistregel, de Energie methode en de Monte-Carlo methode. Deze methodes worden standaard toegepast voor het berekenen van de maximale tektonische aardbeving in een seismotektonische zone, die wordt gedefinieerd als een zone met een homogene seismiciteit en die een eenheid is in geologische, tektonische en geofysische karakteristieken. Een dergelijke zone wordt ook homogeen verondersteld wat betreft de spanningsopbouw. De Roerdal-slenk in het zuidoosten van Nederland is een voorbeeld van een seismotektonische zone. De methodes zijn dus in principe alleen toepasbaar voor elk gasveld of elk homogeen gebied afzonderlijk. In de volgende berekeningen is Noord-Nederland als één seismotektonische zone opgevat. Een verdere differentiatie is weliswaar mogelijk maar weinig zinvol met de huidige gegevens.

In de waargenomen cumulatieve frequentie-magnitude kromme treedt een afbuiging op naar de maximale aardbeving bij grotere magnitudes. Als eerste vuistregel geldt dat de maximale beving doorgaans ongeveer $3/4$ magnitude-eenheid groter is dan het punt waar de kromme van het lineaire gedrag afwijkt. Een tweede vuistregel is dat de maximale magnitude ongeveer 0,5 eenheid groter is dan de maximaal waargenomen magnitude. De maximale magnitude is het gemiddelde van deze twee waarden. Een schatting van de fout van deze methode is niet goed mogelijk omdat het hier om een empirische regel gaat die nog weinig op foutgrenzen onderzocht is. De maximale magnitude voor Noord-Nederland is met deze methode bepaald op 3,7.

Energie methode:

De fluctuaties in de energie om een lineaire trend in de tijd zijn een maat voor de maximale magnitude. In figuur 4 is de cumulatieve waarde van de wortel uit de energie van de aardbevingen uitgezet tegen de tijd. De relatieve maxima en minima zijn verbonden door twee evenwijdige lijnen. De verticale afstand tussen deze twee lijnen is een maat voor de maximale magnitude. Hierbij wordt aangenomen dat de totaal beschikbare elastische energie kan vrijkomen tijdens een enkele aardbeving. Bij deze methode wordt dus de aanname gemaakt dat de energie accumulatie in de tijd vergelijkbaar is met het energie budget in een gebied. Deze methode geeft betrouwbare resultaten wanneer de reeks van aardbevingen compleet is en wanneer de reeks tenminste twee cycli van verhoogde activiteit heeft.

Uit figuur 4 komt naar voren dat in Noord-Nederland net twee cycli aanwezig zijn. De schatting voor de maximale magnitude met deze methode is 3,7. De bepaling van de maximale magnitude heeft met deze methode een standaardafwijking van ongeveer 0,2 magnitude-eenheid.



Figuur 4. Cumulatieve waarden van de wortel uit energie uitgezet tegen de tijd.

Monte-Carlo methode:

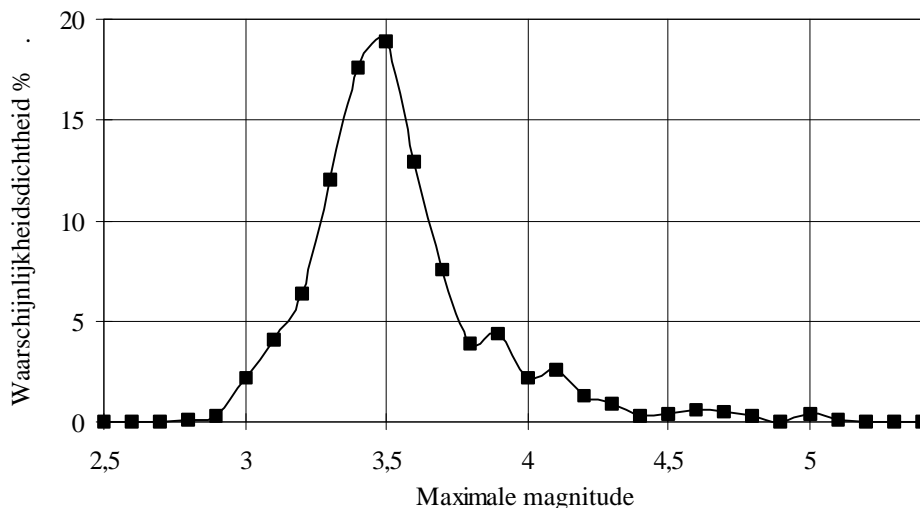
Wanneer de volledige frequentie-magnitude relatie gemodelleerd wordt inclusief de afbuiging en dus een uitdrukking beschikbaar is voor de beschrijving van de hele kromme in figuur 3, kan een goede schatting van de maximale magnitude worden gegeven door een optimale aanpassing aan de data. Deze methode laat vooral een goede foutendiscussie toe. De methode is beschreven in De Crook et al. (1995).

In figuur 5 is de verdelingsfunctie afgebeeld van de berekening van de maximale magnitude met de Monte-Carlo methode. Het zijn de resultaten na 1000 experimenten. In de experimenten zijn de fouten in de primaire gegevens met een random-generator ingebracht. De fouten in de gemeten magnitudes zijn normaal verdeeld en de variaties van het aantal

aardbevingen in de tijd voldoen aan de Poisson-verdeling. De kleine variaties die de verdelingsfunctie van figuur 5 nog laat zien in afwijking van een gladde belvormige curve zijn het gevolg van het eindige aantal van 1000 experimenten en hebben geen fysische betekenis.

Uit de modellering van de frequentie-magnitude relatie die uiteindelijk resulteert in de gevonden verdelingsfunctie volgt dat de gemiddelde maximale magnitude 3,54 is en de standaardafwijking 0,24. De standaardafwijking komt ongeveer overeen met de halve breedte van de curve op halve hoogte. Hiermee is de foutendiscussie compleet.

Een goede benadering voor de maximale magnitude is de gemiddelde maximale magnitude waarbij de standaardafwijking is opgeteld. Dit resulteert in een maximale magnitude van 3,8. 85% van de verdelingsfunctie wordt hiermee afgedekt. Wanneer een nog voorzichtiger schatting gemaakt wordt kan ook tweemaal de standaardafwijking bij de gemiddelde waarde worden opgeteld. Dit betekent een maximale magnitude 4,0. In dat geval is zelfs 95% van de verdelingsfunctie afgedekt.



Figuur 5. De verdelingsfunctie van M_{max} na 1000 experimenten.

Er zijn ook berekeningen uitgevoerd waarbij de krachtigste aardbeving ($M_L = 3,4$) op 19 februari 1997 bij Roswinkel is weggelaten. Voor dit geval is de gemiddelde maximale magnitude 3,42 en de standaardafwijking 0,22. Dit resultaat is vrijwel conform eerdere berekeningen in De Crook et al. (1995) met minder gegevens. De grote bevingen beïnvloeden de schatting van de maximale magnitude in sterke mate.

De Monte-Carlo methode is de meest betrouwbare methode voor het bepalen van de maximale magnitude met de beschikbare gegevens. De berekende maximale magnitude van 3,8 valt binnen de foutmarges van de vuistregel en de energie methode. In figuur 3 is volledige frequentie-magnitude relatie gegeven met een M_{max} van 3,5 omdat deze waarde de kleinste fout geeft in de aanpassing van de gemeten waarden aan het model. Hiermee is de "Kans-term" uit formule 1 dus bekend. Omdat naast de magnitudes ook de te verwachten dieptes van de aardbevingshaard bekend is, kan een berekening worden gemaakt van de te verwachten snelheden en versnellingen aan het aardoppervlak. Dit is bijvoorbeeld op uitgebreide schaal gedaan door Campbell in 1997 ook voor ondiepe aardbevingen op geringe

afstand. Zijn empirische formules zijn getoetst aan de schaarse versnellingsgegevens die beschikbaar zijn voor de omgeving van Roswinkel en zijn daarmee goed in overeenstemming. Het alternatief voor deze aanpak is een beschouwing over intensiteiten waar meer gegevens over bestaan voor Noord-Nederland.

In voorgaande studies is ook de maximaal denkbare magnitude bepaald uit geologische gegevens. Dit is een tijdsafhankelijke schatting van de maximale magnitude. Met reële aannames voor wat betreft de schuifspanningsconstante, de breukdimensies en de verschuiving van de breukdelen kan een schatting verkregen worden van deze magnitude. De onzekerheden van deze bepaling zijn echter even groot of groter dan wanneer statistische methoden gebruikt worden.

De schatting van de breukdimensies en de verschuiving van de breukdelen kunnen doorgaans worden getoetst aan schaalwetten die in de seismologie empirisch bepaald zijn met behulp van een groot aantal aardbevingen. Daarbij wordt uitgegaan van een min of meer constante spanningsafname (stress drop) in het gesteente tijdens de aardbeving. Wanneer de "stress drop" groot is, kunnen binnen relatief kleine breukdimensies grote verschuivingen langs de breuk optreden, waardoor de magnitude groter kan zijn binnen een bepaalde breukzone dan bij bevingen met een lage "stress drop". Een bijkomend effect is dat de frequenties van de optredende trillingen hoger worden. Bij een kleine "stress drop" zal het aantal bevingen groter zijn die nodig zijn om een bepaalde verschuiving langs een breuk te realiseren. De waarden zoals die berekend zijn in De Crook 1995 voor de maximaal denkbare aardbeving van $3,5 \pm 0,5$ kan gehandhaafd blijven, voor een seismogene zone boven het Carboon die op circa 3 km diepte is verondersteld. Deze waarde sluit aan bij de waarden uit de Monte-Carlo methode.

In figuur 3 is de frequentie-magnitude relatie weergegeven voor de aardbevingen in de dataset die de basis vormen van dit rapport. Het model waarmee via de Monte-Carlo methode de maximale beving is berekend gaat uit van een exponentiële verdeling voor de grootste magnitudes. De gegevens in figuur 3 laten echter ook een andere verklaring toe voor de waargenomen herhalingsfrequenties van de aardbevingen.

Voor magnitudes tussen 2,7 en 3,4 kan een lineair verband aangenomen worden. Het gevolg is dat voor dit magnitudebereik een andere b-waarde van kracht is. Deze waarde wordt geschat op 1,5. Volgens Rundle (1993) komt deze b-waarde overeen met de situatie waarin de lengte van de breuk veel groter is dan de breedte, zodat de grootste aardbevingen in essentie een eendimensionaal gedrag vertonen.

Simulaties met eenvoudige modellen hebben dit gedrag bevestigd (Bak et al., 1989, Brown et al., 1991). Dus de kleinste breukdimensie, bijvoorbeeld de hoogte van een breuk, kan door de geologie ter plaatse beperkt zijn. De lengte van de breuk, bijvoorbeeld in horizontale zin, is echter nog niet aan een limiet gebonden voor dit magnitudebereik. De frequentie van de grotere bevingen neemt daardoor sneller af met de magnitude. Het echte maximum van de magnitude wordt bij grotere waarden bereikt.

Het ontbreken van een duidelijk maximum in deze verklaring van de data betekent echter nog niet dat de kracht van de aardbevingen in dit geval ongelimiteerd is. In de eerste plaats is er een praktische grens in de tijd, omdat de duur van de gaswinning beperkt is. Daarmee is ook het risico beperkt. Een lineaire extrapolatie van de data over een periode van 50 jaar laat zien dat de krachtigste beving niet veel afwijkt van wat met de Monte-Carlo methode gevonden is, namelijk 3,5 op de schaal van Richter. Net als bij de Monte-Carlo methode blijft de kans op een magnitude 4,0 kleiner dan eens in de 100 jaar. In de tweede plaats kan de afbuiging bij grotere magnitudes optreden, waarvan nu nog geen gegevens beschikbaar zijn.

De bovenstaande analyse houdt echter wel in, dat evenals in het geval van de "getriggerde" bevingen, in sommige gevallen grotere bevingen mogelijk zijn. Uit de huidige data is af te leiden dat door de grote intervaltijden het werkelijk optreden van deze bevingen onwaarschijnlijk is binnen de periode van actieve gaswinning. De huidige analyse laat tevens zien dat de geologische gesteldheid van de diepe ondergrond een grote rol kan spelen in waarde van de maximale beving.

Op grond van de nu beschikbare gegevens is nog geen onderscheid te maken tussen beide modellen. Uit de geologie is enerzijds nog te weinig bekend over de gemiddelde breedte van de seismogene breuken in Noord-Nederland, anderzijds kunnen ook in een model waarin bestaande tektonische krachten een rol spelen de grootste breukdimensies slechts met grote onzekerheden getoetst worden omdat gegevens dieper dan het Carboon in Noord-Nederland veelal ontbreken. In de huidige data reeks van 125 aardbevingen zijn echter geen aanwijzingen gevonden dat dieptes groter dan ongeveer 3,5 km voorkomen. Dit maakt het waarschijnlijk dat de seismogene zone inderdaad beperkt is tussen 0,5 en 3,5 km.

Intensiteit-magnitude relatie

De relatie tussen magnitude en gemeten maximale intensiteiten I_0 van aardbevingen in Noord-Nederland in de periode 1986-1997 is weergegeven in figuur 6 en vergelijking 4.

$$I_0 (\pm 0,56) = (-0,51 \pm 0,39) + (1,70 \pm 0,17) M_L \quad (4)$$

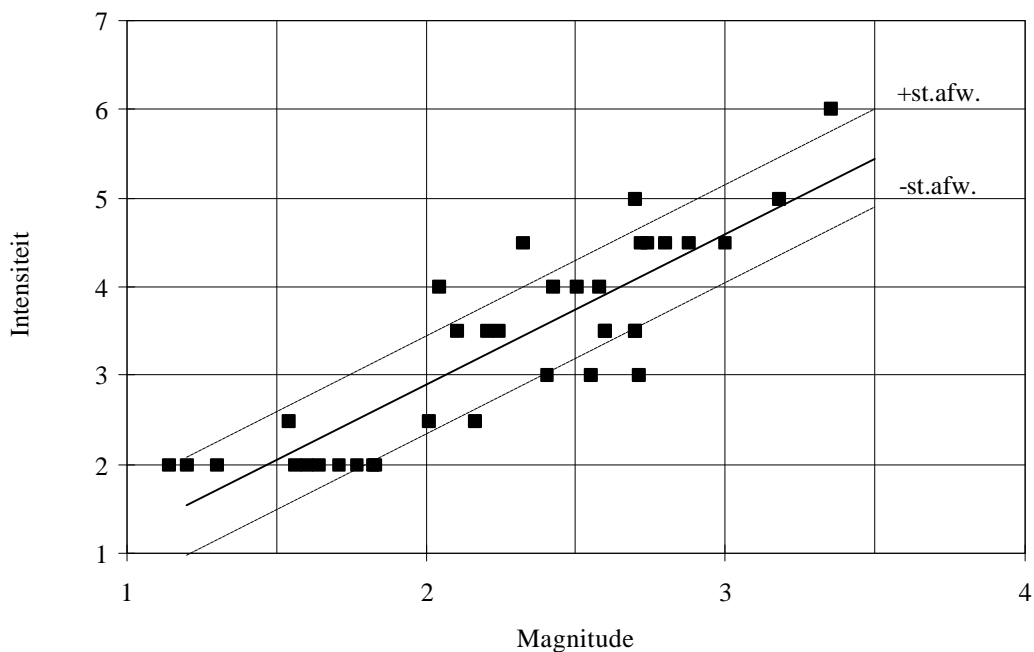
Deze lijn is gebaseerd op 36 aardbevingen met een gemiddelde diepte van 2,3 km en $I_0 \geq II$. De coëfficiënten van de vergelijking 4 zijn berekend met de kleinste kwadraten methode. De correlatie-coëfficiënt is 0,87. Deze waarde geeft aan dat een redelijke aanpassing aan de rechte mogelijk is.

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 6 wordt voor een deel veroorzaakt door meetfouten in de magnitude- en intensiteitsbepaling en voor een deel is de spreiding het gevolg van de dieptes waarop de bevingen plaatsvonden en de variatie in de bodemgesteldheid. De grootste uitschieters naar grotere intensiteiten zijn Purmerend, Annen, Annen2, en Roswinkel13. Eleveld2 en Roswinkel3 zijn afwijkend naar kleinere intensiteiten. Een aantal van deze aardbevingen heeft een diepte die afwijkt van de gemiddelde diepte.

Een correctie voor het effect op de intensiteit van de haarddiepte is achterwege gelaten omdat een dergelijke correctie de correlatie-coëfficiënt niet verbetert voor de gehele serie aardbevingen. Dit geeft aan dat andere factoren, zoals de bodem gesteldheid in de laatste 50 meter, de intensiteit minstens even sterk bepalen. De uitgezette waarden in figuur 6 zijn dus de werkelijk waargenomen waarden en vormen een directe afspiegeling van het schadebeeld. De vergelijking 5 geeft een orde van grootte van de dieptecorrectie met de formule van Sponheuer (1962).

$$M_I = 0,52 I_o + 1,56 \log(d) + 0,7 \pm d \quad (5)$$

In deze vergelijking is M_I de magnitude op basis van de intensiteit, I_o de intensiteit in het epicentrum, d de diepte en \pm de demping. Als waarde voor \pm kan 0,1 of 0,2 genomen worden. Voor geringe diepte heeft deze vergelijking de eigenschap de correcties te groot te maken.



Figuur 6. Intensiteit-magnitude relatie voor Noord-Nederland.

Met de relatie 4 kan voor elke magnitude de bijbehorende intensiteit berekend worden. De standaardafwijking is 0,6 intensiteitseenheden. Het is gebruikelijk dat bij de intensiteit de standaardafwijking wordt opgeteld voor een schatting van de maximale intensiteit.

Uitgaande van de berekende maximale magnitude 3,8 voor Noord-Nederland is de maximale intensiteit VI-VII (6,5). Ondanks het feit dat de maximale magnitude nu groter is geschat, 3,8 in plaats van 3,6 (De Crook et al. 1995), blijft de maximale intensiteit gelijk. Dit komt doordat de intensiteit-magnitude relatie iets vlakker is ten opzichte van voorgaande berekeningen.

Geïnduceerd, getriggered of tektonisch ?

De schatting van het seismische risico in Noord-Nederland steunt op de wijze waarop de bevingen ontstaan zijn. In dit rapport is er vanuit gegaan dat de oorzaak van de bevingen direct gelegen is in de gaswinning. Wanneer een aardbeving een substantieel deel van de energie ontleent aan menselijk ingrijpen in de ondergrond worden deze aardbevingen "geïnduceerd" genoemd. De spanning die door een proces zoals gaswinning is opgebouwd kan door aardbevingen weer worden afgebouwd. De veronderstelling in dit rapport is dat het merendeel van de bevingen in Noord-Nederland geïnduceerd zijn.

Aardbevingen die "getriggerd" zijn ontleen hun energie aan de natuurlijke spanningen in de diepe ondergrond. Deze aardbevingen ontstaan doordat een kleine overspanning door menselijk ingrijpen in de ondergrond als het ware de "trekker" is waardoor het (aardbevings)-schot afgaat. Dit type aardbeving kan in principe veel krachtiger zijn in vergelijking met het geïnduceerde type omdat de natuurlijke of tektonische spanningen groot kunnen zijn en zich over grote gebieden uitstrekken.

Tot slot zijn er natuurlijke of tektonische aardbevingen die geheel en al worden veroorzaakt door natuurlijke spanningen. Deze aardbevingen vinden bijvoorbeeld in Zuid-Nederland plaats. Daar worden de kritische spanningen overschreden door een langzame grootschalige tektoniek waarbij de plastische reactie van het gesteente niet snel genoeg is om de opgebouwde spanningen weer te verminderen. De bovenstaande definities worden niet alleen door het KNMI gehanteerd maar hebben ook een internationale betekenis (McGarr et al., 1997).

Wat betreft de noordelijke bevingen is het duidelijk dat het niet gaat om natuurlijke seismiciteit. De argumenten voor deze stelling zijn te vinden in de ligging van de epicentra in de directe nabijheid van de gasvelden, de dieptes waarop de bevingen voorkomen en de relatie die geconstateerd is in de tijd, met de afname van de reservoirdruk. Deze stelling is al verwoord in het eindrapport van de multidisciplinaire studie naar de relatie gaswinning en aardbevingen (BOA, 1993). In deze studie is eveneens de conclusie getrokken dat de aardbevingen geïnduceerd waren. De vraag die we ons hier stellen is of deze stelling nog steeds juist is. Weliswaar zijn er in de periode vóór de gaswinning geen bevingen geregistreerd, toch gaan de meeste geofysici (Scholz, 1990) ervan uit dat de aardkorst vrijwel overal, dus ook in Noord-Nederland, in een kritische spanningstoestand verkeert. Hiermee wordt bedoeld dat de spanningen in de korst zo groot zijn dat relatief kleine krachten genoeg zijn om beweging aan bestaande breuken te veroorzaken. Dit kunnen aardbevingen zijn maar de beweging kan ook via aseismische slip plaatsvinden. Het is bovendien kenmerkend voor de kritische toestand dat de bewegingen die optreden gepaard gaan met een spanningsdaling die klein is ten opzichte van het heersende tektonische spanningsveld.

De aardbevingsreeks bij Roswinkel suggereert dat *lokale* tektonische spanningen een rol kunnen spelen in het ontstaan van deze bevingen samen met de spanningsverandering door de gaswinning. Het is vast komen te staan dat de bevingen bij Roswinkel zich allen bevonden aan de top van het gasreservoir op de rug van een anticlinaal, een opwaartse welving in de diepe ondergrond, waarbij mogelijk ook zouttektoniek tot de spanningen heeft bijgedragen. Een dergelijke geologische situatie kan zich ook elders in het Noorden voordoen.

Het geologisch beeld van Noord-Nederland vertoont op een aantal punten overeenkomsten met dat van Zuid-Nederland. De belangrijkste overeenkomsten zijn dat in beide gebieden extensie in NO-ZW richting het spanningsveld bepaalt, waardoor beide gebieden een "graben-structuur" bezitten. Deze graben-structuur van horsten en slenken is met name evident in Groningen en Drenthe. Het is de vraag of tektonische activiteit ook in de bovenste lagen van het pakket te zien zijn, dus in geologisch recente tijden. Voor de zouttektoniek is dit wel het geval.

Met betrekking tot de tektonische spanningen kan worden geconcludeerd op basis van model studies (Grünthal, 1992; Gölke, 1996) dat de plaatsspanning door de invloed van de Mid-Atlantische Rug en de Afrikaanse plaat weinig kan variëren over afstanden van 300 km dus voor Noord-en Zuid-Nederland. Lokale verschillen in de structuur van de korst kunnen wèl verschillende responsies op de krachten opleveren. Ook kunnen spanningen ontstaan door lokale spanningsbronnen, bijvoorbeeld door dichtheidsverschillen.

Wanneer de verdeling van de gasvelden die seismisch actief zijn bekeken wordt, valt op dat deze velden tot nu toe alleen te vinden zijn in Groningen, Drenthe en Noord-Holland. Hoewel er ook bijna gedepleteerde velden in Friesland zijn te vinden, hebben zich daar nog geen aardbevingen voorgedaan. Dit kan samenhangen met de geologische structuur. Een nadere studie op dit punt is wenselijk.

Wanneer de aardbevingen in Noord-Nederland geheel en al geïnduceerd zijn is een samenhang te verwachten met de gasdruk en de lokale geologie. In het geval dat een getriggered mechanisme een rol speelt waarbij het regionale spanningsveld belangrijk is zal de optredende seismiciteit de karakteristieken dragen die verbonden zijn met het regionale veld. Dat kan bijvoorbeeld worden afgeleid uit haardmechanismen van de bevingen. Een ander belangrijk gegeven is de werkelijke grootte van het spanningsveld in vergelijking met de spanningsverandering in de gasvelden als gevolg van de exploitatie.

Tot nu toe wijzen de gegevens nog steeds in de richting van geïnduceerde bevingen als dominant mechanisme voor de noordelijke aardbevingen. Daarmee is nog geen verklaring gevonden voor de observatie dat het ene gebied wel en het andere gebied geen seismische activiteit vertoont. Dit geldt ook voor individuele gasvelden. Voorlopig is de conclusie dat, wanneer getriggerde bevingen in Noord-Nederland een rol spelen, de maximale magnitudes groter kunnen zijn dan op basis van deze studie te verwachten is. In McGarr et al. (1997) wordt bijvoorbeeld gesteld dat het overwegende mechanisme van aardbevingen door winning van aardolie en gas van het getriggerde type zou zijn met een grotere maximale magnitude dan voor het geïnduceerde geval. Alleen nader onderzoek kan in dit opzicht het inzicht in deze vraagstelling vergroten.

Schade

De maximale magnitude wordt in deze studie geschat op 3,8 en de maximale intensiteit op VI-VII. De schade als gevolg van aardbevingen met deze kracht en intensiteit kan worden afgelezen aan de Europese Macroseismische Schaal (EMS) 1992.

Volgens de EMS is de schade die optreedt bij intensiteit VI-VII:

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

De schade bij intensiteit VI is:

verwaarloosbare tot lichte schade aan veel gebouwen (geen constructieve schade) en matige schade aan weinig gebouwen (lichte constructieve schade, matige niet-constructieve schade)

De EMS schaal geldt voor heel Europa. De in Nederland toegepaste bouwwijze, waarin relatief licht wordt geconstrueerd, is gunstig voor het voorkomen van schade door aardbevingen. De indruk bestaat dat hierdoor het bovengenoemde schadebeeld waarschijnlijk iets te zwaar is ingeschat. Daar staat tegenover dat in veel gebieden al lichte scheuren aanwezig zijn als gevolg van verzakkingen. Deze scheuren zullen ongetwijfeld bij een aardbeving gereactiveerd worden. In Nederland wordt bij het bouwen geen rekening gehouden met aardbevingen (NEN 6702).

De kans dat de maximale aardbeving inderdaad optreedt is zeer klein. In theorie is deze kans zelfs oneindig klein. De kans op een beving met een intensiteit die een ½ intensiteitseenheid lager is dan de maximale intensiteit is natuurlijk groter. In deze berekeningen is dat intensiteit VI. De herhalingsstijd van een dergelijke beving kan bepaald worden door de cumulatieve frequentie-magnitude kromme te extrapoleren en is ongeveer 10 jaar. Bij de gegeven herhalingsstijd is de overschrijdingskans op een dergelijke beving ongeveer 65% in de komende periode van 10 jaar.

In het voorbeeld van de aardbeving bij Roswinkel op 19 februari 1997 zijn niet alleen de intensiteiten gemeten maar ook versnellingen en snelheden. Hierdoor is een completer beeld ontstaan van de omstandigheden waaronder de schade bij Roswinkel en Emmer-Compasuum ontstaan is. De opgetreden versnellingen van 290 cm/s^2 , snelheden van 46 mm/s en verplaatsingen van $1,5 \text{ mm}$ hebben de normen voor het ontstaan van schade ruim overschreden (Van Staalduinen, 1993). Bovendien is een vrij hoge dominante frequentie van 10 Hz waargenomen die met name de grote versnelling kan verklaren. Een meer algemene en uitgebreide uitwerking van deze resultaten is te vinden in de studie door TNO-Bouw (Van Staalduinen et al., 1998)

Conclusies

Dit rapport is een vervolg op eerdere studies omtrent het seismische risico door geïnduceerde aardbevingen in Noord-Nederland, waarvan de laatste recent in 1995 verschenen is. De toegepaste methoden zijn in deze korte tijd niet veranderd, wel zijn er meer gegevens beschikbaar gekomen. Daarom is voor een opzet gekozen die naar vorm en inhoud niet zoveel afwijkt van de voorgaande studies. De conclusies van dit rapport zijn hieronder puntsgewijs weergegeven.

- De kans op een aardbeving is weliswaar een belangrijke factor in de bepaling van het seismische risico, maar niet de enige factor. De kwetsbaarheid van gebouwen en de omvang van de gevolgen zijn andere risico bepalende factoren. De onzekerheden in deze laatste factoren zijn minstens even groot als die in de berekening van de waarschijnlijkheid van een krachtige aardbeving.
- De analyses in dit rapport zijn alleen gedaan voor Noord-Nederland. Een onderverdeling in kleinere gebieden is niet gemaakt.
- Sinds 1993 is de vrijgekomen energie vrij constant. De fluctuaties zijn vooral te danken aan enkele grotere bevingen.
- De toename van het aantal geregistreerde bevingen wordt voornamelijk veroorzaakt door verlaging van de detectiegrens omdat meer seismometers beschikbaar gekomen zijn.
- Op basis van de aardbevingen in de periode 1986 tot 1997 is beste schatting voor de maximale magnitude (M_{\max}) een waarde van 3,8 op de schaal van Richter.
- De bepaling van de maximale magnitude kent een aantal onzekerheden. Kort samengevat komen deze op de volgende punten neer:
 1. De cumulatieve aantallen geïnduceerde bevingen uitgezet tegen de magnitude kent twee interpretaties die verschillende maxima met zich meebrengen. In het tijdsbestek van de gaswinning hoeft dat geen verschil te betekenen in de werkelijk optredende sterkste aardbevingen.
 2. Wanneer een getriggered mechanisme voor het ontstaan van een aantal aardbevingen in Noord-Nederland voor mogelijk wordt gehouden zijn grotere magnitudes dan de boven aangegeven mogelijk. Nader onderzoek kan op dit punt meer helderheid verschaffen.
 3. Statistisch gezien wordt de maximale magnitude gegeven door een verdelingsfunctie. De schatting van 3,8 voor de maximale magnitude is een keuze, waarbij 85% van de verdelingsfunctie wordt afgedekt.
- Het aantal aardbevingen in de serie boven magnitude 3,0 is gering (3) daardoor is het resultaat van de schatting van de maximale magnitude sterk afhankelijk van een individuele beving. Wanneer de Roswinkel beving van $M_L = 3,4$ wordt weggelaten is de $M_{\max} = 3,6$.
- De maximale intensiteit wordt geschat op VI-VII (6,5).
- In de omgeving van gasvelden in Noord-Nederland kan door geïnduceerde aardbevingen lichte schade aan veel gebouwen (geen constructieve schade) en matige schade aan enkele gebouwen (lichte constructieve schade, matige niet-constructieve schade) optreden met een overschrijdingskans van 65% in de komende periode van 10 jaar.

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.
- Bak, P. and C. Tang, 1989: Earthquakes as a Self-Organized Critical Phenomenon, Journal of Geophysical Research, Vol. 94, No. B11, pp 15.635-15.637.
- Begeleidingscommissie Onderzoek Aardbevingen (BOA), 1993: Eindrapport multidisciplinair onderzoek naar de relatie tussen gaswinning en aardbevingen in Noord-Nederland, pp. 1-76.
- Brown, S.R., C.H. Scholz, and J.B. Rundle, 1991: A simplified Spring-block Model of Earthquakes, Geophysical Research Letters, Vol. 18, No. 2, pp 215-218.
- Campbell, K.W., 1997: Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra, Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, Pages 154-179, January/February 1997.
- Crook, Th. de, B. Dost en H.W. Haak, 1995: Analyse van het seismische risico in Noord-Nederland, KNMI publicatie TR-168.
- Crook, Th. de, 1996: A seismic zoning map conforming to Eurocode 8, and practical earthquake parameter relations for the Netherlands, Geologie en Mijnbouw, No 75, paginas 11-18, 1996.
- Dost, B., en H.W. Haak, 1998a: Seismische analyses van de aardbevingen bij Roswinkel in de periode 1992-1998 (In voorbereiding)
- Dost, B., en H.W. Haak, 1998b: Attenuation in the northern part of the Netherlands; implications for M_L determination (In voorbereiding)
- Gölke, M., 1996: Patterns of stress in sedimentary basins and the dynamics of pull-apart basin formation, proefschrift Vrije Universiteit te Amsterdam.
- Grünthal, G. (ed.), 1993: European Macroseismic Scale 1992 (up-dated MSK-scale). Published in Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol.7, Luxembourg.
- Grünthal, G. and D. Stromeyer, 1992: The recent crustal stress field in Central Europe - trajectories and finite element modeling, Journal of Geophysical Research, Vol. 97, Pages 11805-11820, 1992.

- Haak, H.W. en Th. de Crook, 1993: Seismische analyse van aardbevingen in Noord-Nederland, Bijdrage aan het multidisciplinaire onderzoek naar de relatie tussen gaswinning en aardbevingen, KNMI publicatie.
- Haak, H.W. en Th. de Crook, 1994: Seismische analyse van aardbevingen in Noord-Nederland, KNMI publicatie WR 94-1.
- McGarr, A. and D. Simpson, 1997: Keynote lecture: A broad look at induced and triggered seismicity, Rockburst and Seismicity in Mines, Gibowicz & Lasocki (eds.) © Balkema Rotterdam, ISBN 90 5410 8908.
- Rundle, J.B., 1993: Magnitude-Frequency Relations for Earthquakes Using a Statistical Mechanical Approach, Journal of Geophysical Research, Vol. 98, No. B12, pp 21.943-21.949.
- Scholz, C.H., 1990: The mechanics of earthquakes and faulting, §5.4, §6.5.4, Cambridge University Press, ISBN 0-521-40760-5, 1990
- Sponheuer, W., 1962: Untersuchung zur Seismizität von Deutschland, Veröffentlichungen des Institutes für Bodendynamik und Erdbebenforschung in Jena, Heft 72, s. 23-52, 1962.
- Staalduinen, P.C. van, 1993: Schade aan bouwwerken door trillingen, Meet- en beoordelingsrichtlijn, Richtlijn 1, Stichting Bouw Research, ISBN 90-5367-079-3
- Staalduinen, P.C. van, C.P.W. Geurts en H.S. Buitenkamp, 1998: De relatie tussen schade aan gebouwen en lichte, ondiepe aarbevingen in Nederland: inventarisatie, TNO-Bouw.

Appendix

Lijst van aardbevingen in Noord-Nederland die gebruikt zijn voor deze studie

Plaats	NR	Datum	Tijd (UT)	Coördinaten °N.B. °O.L.	Amersfoort coördinaten	Intensiteit I _o	Magnitude M _L	Diepte km	Opmerkingen
Assen	1	26/12/1986	07:47	52.99; 06.55	556.4; 233.0	IV-V	2.80	1	Enquête
Hooghalen	2	14/12/1987	20:49	52.93; 06.55	549.7; 233.2	IV	2.50	1.5	Enquête
Purmerend	3	01/12/1989	20:09	52.53; 04.97	504.7; 126.7	V	2.70	1.2	Enquête
Emmen	4	15/02/1991	02:11	52.77; 06.91	532.5; 258.0	III-IV	2.20	3	Enquête
Geelbroek	5	25/04/1991	10:26	52.95; 06.57	552.2; 234.8	III-IV	2.60	3	Enquête
Eleveld	6	08/08/1991	04:01	52.96; 06.57	553.2; 234.2	III-IV	2.70	3-4	
Middelstum	7	05/12/1991	00:24	53.36; 06.66	597.5; 239.6	III	2.40	< 2	Enquête
Geelbroek II	8	23/05/1992	15:29	52.95; 06.57	552.4; 234.8	III-IV	2.60	3.1	
Geelbroek III	9	24/05/1992	18:00	52.95; 06.57	552.0; 234.5	II	1.60	-	
Roswinkel	10	11/06/1992	17:09	52.831; 07.032	539.3; 265.8	III-IV	2.70	1.5	Enquête
Eleveld II	11	22/07/1992	23:23	52.96; 06.58	552.8; 234.5	III	2.55	3.5	Ook Finsterwolde
Ten Boer	12	06/12/1992	20:34	53.32; 06.77	593.1; 247.2	I	1.26	-	Alleen Finsterwolde
Slochteren	13	11/12/1992	13:00	53.22; 06.79	581.8; 248.7	I	1.37	-	Alleen Finsterwolde
Noordbroek	14	12/02/1993	11:46	53.22; 06.87	582.1; 253.7	I	0.99	-	Alleen Finsterwolde
Langelo	15	05/03/1993	22:27	53.09; 06.44	568.2; 225.2	II-III	1.54	-	Enquête
Hoogezand	16	12/03/1993	22:12	53.16; 06.79	575.8; 248.6	I	0.92	-	Alleen Finsterwolde
Overschild	17	26/03/1993	18.34	53.29; 06.80	590.0; 249.1	I	1.10	-	Alleen Finsterwolde
Haren	18	05/05/1993	20:08	53.14; 06.66	572.8; 240.1	I	1.49	-	Alleen Finsterwolde
Ten Post	19	14/05/1993	19:39	53.30; 06.76	591.5; 246.5	I	1.05	-	Alleen Finsterwolde
Bedum	20	27/06/1993	02:09	53.32; 06.66	593.4; 239.7	I	1.40	-	Alleen Finsterwolde
Stedum	21	27/06/1993	02:57	53.31; 06.70	592.4; 242.5	I	0.99	-	Alleen Finsterwolde
Appingedam	22	10/07/1993	00:22	53.33; 06.86	594.5; 253.1	I	1.43	-	Alleen Finsterwolde
Loppersum	23	27/07/1993	13:39	53.35; 06.79	596.9; 248.1	I	0.77	-	Alleen Finsterwolde
Nijenklooster	24	23/08/1993	00:51	53.35; 06.83	596.3; 251.3	I	0.68	-	Alleen Finsterwolde

Plaats	NR	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	1.35	-	Alleen Finsterwolde
Middelstum II	26	22/09/1993	17:37	53.35; 06.64	596.3; 238.5	II-III	2.01	-	Alleen Finsterwolde, enquête
Slochteren II	27	25/09/1993	00:21	53.21; 06.77	581.3; 247.7	I	0.89	-	Alleen Finsterwolde
Slochteren III	28	23/11/1993	12:31	53.22; 06.78	582.6; 247.7	II-III	2.16	-	Alleen Finsterwolde, telefonische enquête
Ten Post II	29	23/12/1993	01:35	53.29; 06.75	590.2; 246.0	I	1.61	-	Alleen Finsterwolde
Winneweer	30	04/02/1994	21:32	53.32; 06.74	593.6; 245.2	I	1.30	-	Alleen Finsterwolde
Roswinkel II	31	05/02/1994	15:10	52.833; 07.045	539.6; 266.7	IV-V	2.88	1.2	Enquête
Garsthuizen	32	28/02/1994	21:00	53.38; 06.74	599.9; 244.7	I	0.61	-	Alleen Finsterwolde
Steendam	33	02/03/1994	10:36	53.28; 06.83	589.0; 250.9	I	1.53	-	Alleen Finsterwolde
Eenum	34	06/03/1994	20:02	53.34; 06.79	595.2; 248.2	I	0.99	-	Alleen Finsterwolde
't Zandt	35	14/03/1994	09:31	53.37; 06.76	599.4; 246.2	I	1.34	-	Alleen Finsterwolde
Zandweer	36	14/03/1994	10:44	53.39; 06.68	600.7; 241.7	I	1.55	-	Alleen Finsterwolde, geen trigger, geschatte afstand en magnitude
Westerbroek	37	14/03/1994	22:32	53.17; 06.68	576.4; 241.3	I	1.11	-	Alleen Finsterwolde
Delfzijl	38	24/03/1994	05:29	53.33; 06.95	594.6; 259.1	I	0.77	-	Alleen Finsterwolde
Steendam II	39	04/04/1994	18:46	53.28; 06.83	589.0; 250.9	I	1.25	-	Alleen Finsterwolde
Kolham	40	07/05/1994	20:08	53.19; 06.76	579.6; 246.9	I	0.95	-	Alleen Finsterwolde
Hellum	41	10/05/1994	01:34	53.23; 06.85	583.4; 252.8	I	0.76	-	Alleen Finsterwolde
Weiwerd	42	05/06/1994	02:14	53.30; 06.95	591.1; 259.3	I	1.01	-	Alleen Finsterwolde
Achterdiep	43	06/06/1994	04:08	53.17; 06.80	576.8; 249.2	I	1.03	-	Alleen Finsterwolde
Garsthuizen II	44	08/06/1994	22:20	53.37; 06.72	599.3; 243.9	I	1.45	-	Alleen Finsterwolde
De Klip	45	26/06/1994	17:44	53.35; 06.84	596.6; 251.6	I	0.97	-	Alleen Finsterwolde
Uithuizermeeden	46	27/06/1994	20:59	53.45; 06.69	607.7; 241.3	I	1.74	-	Alleen Finsterwolde
Stedum II	47	01/07/1994	06:27	53.315; 06.687	592.7; 241.6	I	2.73	-	Alleen Finsterwolde
't Zandt II	48	19/07/1994	08:17	53.37; 06.75	598.9; 245.9	I	2.00	-	Alleen Finsterwolde
Middelstum III	49	30/07/1994	09:18	53.345; 06.642	596.0; 238.5	IV-V	2.72	0.9	Alle Nederlandse stations, telefonische Enquête

Plaats	NR.	Datum	Tijd (UT)	Coördinaten °N.B. °O.L.	Amersfoort coördinaten	Intensiteit I _o	Magnitude M _L	Diepte km	Opmerkingen
Naschok Middelstum III	50	30/07/1994	09:53	53.345; 06.642	596.0; 238.5	I	1.27	-	Alleen Finsterwolde
Alkmaar	51	06/08/1994	18:02	52.66; 04.72	519.0; 110.0	IV-V	3.00	2.2	Enquête, FIN,WIT,WTS,ENN,HGN,WSB,BVS
Annen	52	16/08/1994	14:37	53.061; 06.715	564.5; 244.0	IV-V	2.32	3.0	Schrift. Enquête FIN, WSB, BVS, WIT, WTS
Warffum	53	07/09/1994	22:06	53.41; 06.58	603.2; 234.4	I	1.38	-	Alleen Finsterwolde
Z.O. Drenthe	54	09/09/1994	15:57	52.69; 06.88	523.0; 256.0	I	1.71	-	Alleen Finsterwolde
Alkmaar II	55	21/09/1994	01:13	52.66; 04.71	519.0; 109.0	V	3.18	2,5	Enquête, alle Ned. stations, België, VK, D'land, Frankrijk
Schoonebeek	56	23/09/1994	19:50	52.67; 06.88	521 ; 256	II	1.30	-	ENN, WTS
Schildwolde	57	26/10/1994	21:41	53.24; 06.81	585.1; 249.9	I	1.22	-	Alleen Finsterwolde
geen lokatie	58	13/12/1994	21:50			I	1.00	-	WIT(BB); Finsterwolde alleen op papier
Amsweer	59	24/01/1995	09:38	53.31; 06.91	592.7; 256.8	I	1.26	-	Alleen Finsterwolde
Annen II	60	31/01/1995	19:48	53.055; 06.723	563.8; 244.5	IV	2.04	2.8	FIN, WSB, BVS, WIT; enquête (t+s)
Veendam	61	01/02/1995	00:31	53.10; 06.82	569.1; 250.6	II	1.20	-	Alleen Finsterwolde
Bierum	62	21/03/1995	16:37	53.41; 06.95	604.0; 258.6	I	1.07	-	Alleen Finsterwolde, (buiten de kust bij Bierum)
Loppersum II	63	06/04/1995	08:03	53.34; 06.76	595.7; 246.2	I	1.99	-	Alleen Finsterwolde
Zuidlaren	64	26/04/1995	17:35	53.088; 06.703	567.5; 243.1	I	0.69	1.4	Alleen Zuidlaarderveen (ZLV) (instr.)
Weiwerd II	65	15/05/1995	09:52	53.31; 06.96	592.2; 259.6	I	1.83	-	Alleen Finsterwolde
Zevenhuizen	66	03/06/1995	22:06	53.141; 06.352	573.0; 219.5	I	0.86	2.0	Haulerwijk en Zuidlaarderveen
Roswinkel III	67	20/06/1995	08:59	52.829; 07.024	539.1; 265.2	III	2.71	-	ENV, ZLV, VLW, WTS, WIT, FIN op papier
Veenhuizen	68	15/07/1995	16:05	53.19; 06.82	578.6; 251.0	I	1.03	2.6	ZLV, WDB en FIN
Meedhuizen	69	21/07/1995	23:24	53.30; 06.92	591.1; 257.5	I	1.10	-	FIN, WDB
Wirdumerdraai	70	13/09/1995	21:34	53.312; 06.785	592.5; 248.1	I	1.09	2.8	FIN, WDB, ZLV (hypo)
Altena	71	18/10/1995	00:34	53.120; 06.493	570.8; 229.0	I	1.27	2.7	ENV, HLW, WDB en ZLV (hypo)
Loppersum III	72	02/11/1995	00:07	53.378; 06.744	594.2; 245.4	II	1.64	3.0	FSW, HWF, WDB, ZLV (hypo)
Uithuizerwad	73	04/11/1995	05:50	53.479; 06.713	611.0; 243.0	I	1.78	3.5	ZLV (2x), FSW op papier
Steendam III	74	20/11/1995	03:20	53.275; 06.806	588.4; 249.6	I	1.13	3.1	FWS, WDB, ZLV, (ENV) (hypo)

Plaats	NR.	Datum	Tijd (UT)	Coördinaten °N.B. °O.L.	Amersfoort coördinaten	Intensiteit I _o	Magnitude M _L	Diepte km	Opmerkingen
Polder Wormer	75	24/12/1995	13:26	52.519; 04.823	503.5; 116.7	I	2.26	-	alleen OTL
Roswinkel IV /Emmen	76	30/12/1995	02:04	52.84; 07.02	540.4; 265.0	I	1.19	-	ENV, VLW en WIT (BB)
Schaaphok	77	12/02/1996	14:02	53.23; 06.75	583.8; 246.0	I	0.91	-	WDB, (VLW en ENM continue)
Emmen II	78	24/02/1996	03:31	52.761; 06.922	531.4; 258.6	II	1.77	2	ZL2, FSW, VLW, VBG, ENV, HWF en WIT (BB) (hypo)
Roswinkel V	79	25/02/1996	13:55	52.838; 07.062	540.2; 267.8	I	0.88	1.5	VLW (zie beving 83)
Eppenhuisen	80	29/02/1996	09:07	53.345; 6.627	596.0; 237.5	I	2.03	-	ENM, ZLV, FSW(papier)
Roswinkel VI	81	06/03/1996	09:20	52.838; 07.062	540.2; 267.8	II	1.56	1.5	VLW (zie beving 83)
Schuilingsoord	82	12/03/1996	00:51	53.081; 06.698	566.7; 242.8	II	1.14	-	ENV, WDB, ZLV en ZL2
Roswinkel VII	83	12/03/1996	12:13	52.838; 07.060	540.2 267.7	IV	2.58	1.2	ENM, ENV, FSW, VLW, WDB, WIT, ZLV, en ZL2 (hypo)
Schuilingsoord II	84	12/03/1996	18:32	53.082; 06.698	566.8; 242.8	I	0.75	-	ZLV en ZLV2
Roswinkel VIII	85	14/03/1996	22:24	52.838; 07.064	540.1; 267.9	I	1.09	-	ENV en VLW (zie beving 83)
Siddeburen	86	16/03/1996	04:16	53.268; 06.880	587.7; 254.6	I	1.36	2.5	FSW, WDB, ZLV en ZL2 (hypo)
Roswinkel IX	87	21/03/1996	18:19	52.835; 07.054	539.8; 267.3	II	1.82	1.5	ENV, VLW, ZLV
Amen	88	01/04/1996	18:53	52.945; 06.608	551.5; 237.0	I	0.62	-	ENV, ZLV, ZL2
Nieuw Annerveen	89	01/04/1996	23:27	53.069; 06.783	565.5; 248.5	I	0.13	-	ZLV, ZL2
Spijkerboor	90	09/04/1996	13:58	53.074; 06.790	566.0; 249.0	I	1.10	-	ZLV, ZL2
Ten Post	91	15/04/1996	03:41	53.299; 6.726	591.0; 244.2	I	0.86	-	FSW, WDB, ENM
Holwierde	92	17/04/1996	19:05	53.352; 06.884	597.1; 254.6	I	0.93	-	FSW, WDB (ENM) (hypo)
Warffum II	93	21/04/1996	21:36	53.382; 06.568	600.0; 233.5	I	0.50	-	alleen ENM
Delfzijl II	94	25/04/1996	23:22	53.335; 06.929	595.2; 257.6	I	0.88	-	FSW, WDB, ENM (ZL2)
Annerveenschekanaal	95	07/06/1996	04:20	53.088; 06.799	567.6; 249.5	I	1.15	-	Alle stations behalve HWF en VBG, (Hypo)
Hoeksmeer	96	07/06/1996	08:34	53.294; 06.793	590.5; 248.7	I	1.29	-	FSW, WDB, ZLV (hypo)
Annerveenschekanaal II	97	07/06/1996	14:59	53.088; 06.799	567.6; 249.5	I	0.70	-	ZLV, ZL2
Eleveld III	98	16/06/1996	02:53	52.951; 06.585	552.1; 235.5	I	1.65	2.0	Door alle boorgatstations geregistreerd, WIT, (hypo)
Spijkerboor II	99	03/07/1996	21:40	53.077; 6.773	566.3; 247.8	I	0.84	-	ZLV, ZL2
Wachtum	100	04/08/1996	00:42	52.723; 06.743	526.9; 246.6	I	1.61	2.0	ENV, FSW, HWF, VLW, VBG, WIT(BB), ZLV, ZL2 (hypo)

Plaats	NR.	Datum	Tijd (UT)	Coördinaten °N.B. °O.L.	Amersfoort coördinaten	Intensiteit I _o	Magnitude M _L	Diepte km	Opmerkingen
Weerdinge	101	06/08/1996	13:38	52.815; 06.888	537.3; 256.1	I	1.62	2.0	ENV, ZLV, ZL2, VLW, (VBG, HWF, WDB, FSW) (hypo)
Annen III	102	09/08/1996	02:31	53.066; 06.708	565.0; 243.5	I	0.28	-	ZLV, ZL2
Oterdumerwarven	103	09/08/1996	06:38	53.289; 06.974	590.2; 260.8	I	1.64	2.0	ENM, FSW, WDB, ZL2 (hypo)
Emlichheim (D)	104	11/08/1996	01:10	52.596; 06.823	512.9; 252.2	I	0.65	2.0	VBG, ENV
Geelbroek IV	105	25/08/1996	22:24	52.943; 06.566	551.2; 234.2	II	1.71	2.5	ENM, ENV, FSW, HWF, VBG, VLW, WDB, ZLV, ZL2 (WIT) (hypo)
Nieuw-Roden	106	02/09/1996	05:20	53.137; 06.398	572.6; 222.6	III-IV	2.10	2.5	ENM, ENV, FSW, VBG, VLW, WDB, ZLV, ZL2 (WIT) (hypo)
Amen II	107	16/10/1996	05:09	52.947; 06.602	551.7; 236.6	I	1.26	2.5	ENM, HWF, ZLV, ZL2 (hypo)
't Zandt III	108	16/11/1996	03:33	53.360; 06.762	597.8; 246.5	I	1.32	3.0	WDB, ENM, FSW, ZLV, HWF (hypo)
Wachstum II	109	17/11/1996	04:59	52.724; 06.722	527.0; 245.1	III-IV	2.24	3.0	ENM, ENV, FSW, HWF, VBG, VLW, WDB, WIT, ZLV, ZL2 (hypo)
Leek	110	30/11/1996	20:27	53.163; 06.416	575.5; 223.8	I	1.04	3.0	ENM, HWF, WDB, ZLV (hypo)
Roswinkel X	111	06/12/1996	16:46	52.835; 07.055	539.8; 267.4	I	1.58	1.5	ENV, FSW, VLW, ZLV (zie beving 87)
Annerveenschekanaal III	112	16/12/1996	16:01	53.086; 06.773	567.4; 247.8	I	0.53	2.5	ZLV, ZL2 (zie beving 95/97)
Annerveenschekanaal IV	113	16/12/1996	16:06	53.088; 06.771	567.6; 247.7	I	-0.06	2.5	ZLV, ZL2
Schaaphok II	114	26/12/1996	19:51	53.237; 06.751	584.1; 246.0	I	-0.17	2.5	Alleen WDB
Winde	115	28/12/1996	00:54	53.115; 06.506	570.3; 229.9	I	1.94	2.5	ENM, ENV, FSW, HWF, VBG, VLW, WDB, WIT, ZLV, ZL2 (hypo)
Roswinkel XI	116	28/12/1996	18:17	52.834; 07.042	539.7; 266.5	IV-V	2.74	1.2	ENM, ENV, FSW, HWF, VBG, VLW, WDB, WIT, ZLV, ZL2 (hypo)
Donderen	117	28/12/1996	23:39	53.102; 06.506	568.8; 229.9	II	1.83	2.5	ENM, ENV, FSW, HWF, VBG, VLW, WDB, WIT, ZLV, ZL2 (hypo)
Westeremden	118	08/01/1997	01:21	53.349; 06.727	596.5; 244.2	I	1.50	2.5	ENM, FSW, WDB, ZLV, ZL2 (hypo)
Geelbroek V	119	14/01/1997	21:13	52.941; 06.580	551.0; 235.1	I	0.74	3.0	ENV, ZLV, HWF (hypo)
Roswinkel XII	120	16/01/1997	00:12	52.836; 07.044	539.9; 266.6	IV	2.42	1.5	ENM, ENV, FSW, HWF, VBG, VLW, WDB, WIT, ZLV, ZL2 (hypo)
Annen IV	121	24/01/1997	04:00	53.065; 06.667	564.9; 240.7	I	0.64	2.5	ZLV, ZL2
Beverwijk	122	30/01/1997	10:05	52.468; 04.616	498.0; 102.6	III	2.00	2.5	OTL, PPB en WMH (tektonische aardbeving)
Zijldijk	123	17/02/1997	07:20	53.389; 06.769	601.1; 246.9	I	1.60	2.5	ENM, FSW, WDB (hypo)
Eleveld IV	124	17/02/1997	11:16	52.940; 06.574	551.0; 234.8	I	1.15	2.5	ENV, FSW, HWF, ZLV (hypo)
Roswinkel XIII	125	19/02/1997	21:54	52.832; 07.035	539.4; 266.0	VI	3.35	1.5	Alle Nederlandse stations (hypo), enquête