



**SEISMISCHE ANALYSE
VAN DE AARDBEVINGEN BIJ
ALKMAAR OP 9 EN 10 SEPTEMBER
EN BERGEN AAN ZEE OP 10 OKTOBER 2001**

H.W. Haak, B. Dost, F.H. Goutbeek

NOVEMBER 2001

ISBN: 90-369-2203-8

Overname van gegevens is toegestaan mits daarbij wordt vermeld BRON: KNMI.

SEISMISCHE ANALYSE VAN DE AARDBEVINGEN BIJ

ALKMAAR EN BERGEN OP 9 EN 10 SEPTEMBER EN 10 OKTOBER 2001

Samenvatting

Dit rapport behandelt de seismische analyses van de twee bevingen bij Alkmaar en de beving bij Bergen aan Zee. De analyses zijn uitgevoerd door de Afdeling Seismologie van het KNMI.

De schokken bij Alkmaar, waarvan de epicentra tussen Alkmaar en Bergen liggen, zijn gevolgd op eerdere schokken op 6 augustus en 21 september 1994 in hetzelfde gebied en langs dezelfde breuklijn. Het KNMI gaat er van uit dat de schokken zijn veroorzaakt door de aardgaswinning in het Bergermeerveld gezien de ligging op een breuk in dit veld en het haardmechanisme van de bevingen. De aardbeving van 9 september is de krachtigste die tot nu toe in Noord-Nederland is geregistreerd.

Dit rapport behandelt niet alleen de aardbevingen bij Alkmaar, maar gaat ook in op de beving bij Bergen aan Zee op 10 oktober. Deze beving vond plaats langs de noordoostelijke randbreuk van het Bergenveld. Ook hier is een relatie met de gaswinning aannemelijk gezien de plaats en de diepte van de beving. Als resultaat van de analyses zijn de volgende gegevens naar voren gekomen:

	9 september	10 september	10 oktober
Epicentrum (RD)	x: 109.374 y: 518.265	x: 109.274 y: 518.445	x: 105.011 y: 521.739
Diepte	2,0 km	2,0 km	2,5 km
Intensiteit I_0	VI+	IV-V	III+
Magnitude M_L	3,5	3,2	2,7
Moment M_0	$1,9 \cdot 10^{14}$ Nm	$6,3 \cdot 10^{13}$ Nm	$1,8 \cdot 10^{13}$ Nm
Straal van breuk	680 m	470 m	460 m
Verschuiving	7,4 mm	5,0 mm	1,4 mm
Stress drop	2,8 bar = 0,28 MPa	2,9 bar	0,8 bar

De conclusie van dit rapport is dat de twee aardbevingen bij Alkmaar te beschouwen zijn als een tweeling door de sterke samenhang in tijd, kracht, plaats en haardmechanisme. Doordat ook de relatieve ligging van de epicentra bepaald kon worden, is vastgesteld dat de aardbevingen langs dezelfde breuk plaatsvonden die ook in 1994 actief was. Naar aanleiding van de sterkste beving van 9 september is schade gemeld in een gebied van ca. 100 km². In een klein aantal gevallen tot meer dan 6 km van het epicentrum. De meeste schademeldingen kwamen uit de westkant van Alkmaar en de zuidkant van Bergen waar de beving ook het sterkst is gevoeld. De beving van 10 oktober heeft voor zover bekend geen schade opgeleverd. Er kunnen in het gebied meer bevingen optreden. In dit licht kan de seismische registratie nog verbeterd worden en is het aan te bevelen versnellingsmeters te plaatsen.

De Bilt, november 2001

INHOUD

Inleiding	4
Seismische analyse van de bevingen bij Alkmaar en Bergen aan Zee	5
Bepaling relatieve epicentra	6
Haardparameters	7
Haardmechanisme	9
Macroseismische bevingen	10
Conclusie	10
Referenties	11
Tabel 1	12/13
Figuren 1-8	14-21

**SEISMISCHE ANALYSE VAN DE AARDBEVINGEN BIJ
ALKMAAR OP 9 EN 10 SEPTEMBER EN
BERGEN AAN ZEE OP 10 OKTOBER 2001**

Inleiding

Dit rapport behandelt de seismische analyses van twee aardbevingen bij Alkmaar op 9 en 10 september en de aardbeving bij Bergen aan Zee op 10 oktober 2001. Het is de tweede keer dat dit gebied in een beperkte periode wordt opgeschrikt door meerdere trillingen. De eerste keer was in 1994 op 6 augustus en 21 september. De volgorde van de bevingen is zodanig dat de sterkere wordt gevolgd door een zwakkere beving wat een traditionele naschok sequentie doet vermoeden. Er zijn echter geen andere schokken waargenomen in het tijdsvak tot november 2001, zodat kan worden aangenomen dat het om twee zelfstandige bevingen gaat. De derde aardbeving, die bij Bergen aan Zee, moet als onafhankelijk worden beschouwd van de eerdere bevingen in het gebied. De vier aardbevingen bij Alkmaar vonden plaats langs dezelfde breuk op kleine afstand van elkaar. De eerste aardbeving van de serie in 2001 behoort tot de krachtigste aardbevingen die in Nederland in verband zijn gebracht met de winning van aardgas. In dit verband is Noord-Holland dus even kwetsbaar als Noordoost-Nederland.

Naar aanleiding van de bevingen in 1994 is in het gebied rond Alkmaar een netwerk van drie boorgat seismometers geplaatst. Deze instrumenten hebben in de afgelopen periode naar behoren gefunctioneerd. De detectiegrens voor aardbevingen binnen het netwerk is ongeveer magnitude 1,0. Hierdoor is komen vast te staan dat in het Bergermeerveld geen aardbevingen zijn opgetreden groter dan magnitude 1,0 op de schaal van Richter. Toch is bij deze laatste schokken ook een nadeel aan het licht gekomen dat voortkomt uit een sterk accent op de detectie van de kleinste schokken die immers ook het meest talrijk zouden moeten zijn. De seismometers in de boorgaten hebben de schokken weliswaar goed gedetecteerd maar door de kracht van de aardbevingen zijn de instrumenten overstuurt voor een deel van de tijd, wat de analyse compliceert. Het plaatsen van versnellingsmeters zoals ook is toegepast in de omgeving van Roswinkel met vergelijkbare problemen kan hier een uitkomst bieden. Bovendien kunnen deze instrumenten de krachten schatten die tijdens de aardbevingen op gebouwen worden uitgeoefend.

De in september waargenomen kracht van de bevingen bij Alkmaar valt nog binnen de schatting die door het KNMI gemaakt is omtrent de grootste aardbeving die als gevolg van de gaswinning wordt verwacht, namelijk 3,8 op de schaal van Richter. Berekening met alle tot nu toe bekende gegevens laat zien dat het seismische risico iets is toegenomen. Voor een betere beoordeling van de schade kunnen versnellingsmeters in het gebied een goede dienst bewijzen. Daarnaast is een verbetering van het dynamisch bereik van de seismische instrumentatie wenselijk.

Seismische analyse van de bevingen bij Alkmaar en Bergen aan Zee

Met behulp van de vele beschikbare registraties uit binnen- en buitenland zijn bijna alle mogelijke instrumentele bepalingen gedaan voor de bevingen van 9 en 10 september 2001 bij Alkmaar en de beving op 10 oktober 2001 bij Bergen aan Zee. Aanvankelijk zijn op grond van het station Heimansgroeve in Zuid-Limburg magnitudes berekend voor de twee bevingen bij Alkmaar. Doordat het stralingspatroon van de bevingen een minimum vertoont in de richting van dit station zijn de magnitudes in eerste instantie te laag berekend. In deze analyse is dat hersteld, waardoor nu de beving van 9 september tot de krachtigste bevingen in Noord-Nederland moet worden gerekend. De magnitudes van een aantal buitenlandse seismische data centra is ook weergegeven in onderstaande tabel. Het Franse LDG verschilt meer dan een halve magnitude met het Britse BGS.

	9 september 2001	10 september 2001	10 oktober 2001
Magnitude M_L	3,5 (NL) 3,8 LDG (F) 3,2 BGS (GB) 3,4 GRF(D)	3,2 (NL) 3,3 LDG (F) 3,0 GRF (D)	2,7 (NL)
Tijdstip UT (u m s)	06 58 12,64	04 30 15,35	06 41 09,36
Epicentrum NB	52,651°	52,653°	52,682°
OL	4,713°	4,712°	4,648°
RD-coördinaten	x = 109.374 y = 518.265	x = 109.274 y = 518.445	x = 105.011 y = 521.739
Diepte haard	2,0 ± 0,2 km	2,0 ± 0,2 km	2,5 km

In tabel 1 is een lijst weergegeven van seismische stations in Nederland, Duitsland, België, Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk die de aardbeving geregistreerd hebben. Bovendien zijn de aankomsttijden van de seismische golven en de afstand tot het epicentrum aangegeven.

In figuur 1 zijn de stations op een kaart weergegeven. Het epicentrum van de bevingen is op grond van deze instrumentele gegevens bepaald. Stations op grotere afstand (> 400 km) zijn met minder gewicht in de berekening meegenomen omdat deze de nauwkeurigheid van de epicentrumbepaling niet vergroten. Bovendien is de azimuthale verdeling van de stations zo gekozen dat er een evenwichtige verdeling ontstaat over alle richtingen, zodat systematische fouten zoveel mogelijk geminimaliseerd zijn. De seismometers in de boorgaten in de directe omgeving van de bevingen hebben het meest bijgedragen aan de nauwkeurige bepaling van het epicentrum. Op grond van deze stations is ook de diepte bepaald voor de bevingen bij Alkmaar. Voor de beving bij Bergen aan Zee is de diepte in de epicentrum berekening vast gezet. De epicentra van de twee bevingen bij Alkmaar komen binnen de foutengrens op de zelfde waarde uit. De epicentra in de bovenstaande tabel zijn absoluut voor de beving van 9 september en relatief berekend voor de beving van 10 september.

Bepaling relatieve epicentra

Naast de bepalingen aan de individuele bevingen is er een vergelijking gemaakt tussen de twee bevingen bij Alkmaar onderling. De seismogrammen van de twee bevingen zijn in grote mate identiek, afgezien van verschillen in bodemruis en amplitude (zie figuur 2). Hierdoor is een bepaling van relatieve epicentra mogelijk. De aardbeving bij Bergen aan Zee (zie figuur 3) is niet in de analyse meegenomen omdat de seismogrammen van deze beving te veel afwijken van de Alkmaarse schokken. In de meest nabij gelegen boorgat stations (WMH en PPB, zie figuur 7) is te zien dat voor de hoofdschok van 9 september een veel kleinere schok is opgetreden van ongeveer $M_L = 1,8$ met een tijdsverschil van 0,16 seconde met de hoofdschok (zie figuur 4). Dit heeft voor de verdere analyse geen nadelig effect gehad. De vergelijking is gemaakt door de kruiscorrelatie functies te berekenen van de seismogrammen van de stations OTL, PPB, WMH, FSW, WIT, WTSB, HGN, VKB, HWF, VBG, WIT, RDC en ENV.

Het gegeven van identieke seismogrammen in de verschillende stations betekent dat de richting van de verschuiving van de breukdelen in de twee aardbevingen precies gelijk is geweest; het haardmechanisme is identiek. Omdat er identieke seismogrammen zijn, kunnen correlatietechnieken worden toegepast om de onderlinge afstand tussen de twee aardbevingen nauwkeurig te bepalen. Wanneer uitsluitend van P-golven gebruik gemaakt wordt, geven de correlatiefuncties met bijvoorbeeld vier stations dus drie looptijdverschillen. Wanneer P- en S-golven gebruikt kunnen worden, kan per station één tijdsverschil en daarmee één afstandverschil worden bepaald (Mezcua, 1994). Beide methodes zijn in dit rapport gehanteerd. Het is belangrijk dat in de bepaling van relatieve epicentra de juiste seismische snelheden worden gebruikt. Deze kunnen verschillend zijn naar gelang het doorlopen pad van de seismische golven. Het resultaat, de relatieve locatie van de twee bevingen, is uiteindelijk verkregen door de RMS-verschillen van de berekende en de gemeten waarden uit te zetten (grid search). Het punt met de minimale afwijking is de plaats van het relatieve epicentrum. De nauwkeurigheid van deze bepaling is ± 50 meter. De kenmerkende tijdsverschillen liggen in de orde van 5 tot 10 milliseconden.

Uit berekeningen is gevonden dat de beving van 10 september binnen 205 meter ten noord-noordwesten van de beving op 9 september gelegen moet zijn langs dezelfde breuk. Dit komt goed overeen met de resultaten uit de reeks van 1994. De schokken zijn dus opnieuw goed gelijkende "tweeling-bevingen" met betrekking tot plaats, diepte, kracht en haardmechanisme. De afstand tussen de bevingen is kleiner dan de berekende straal van de eerste schok. Dit gegeven roept de vraag op of de tweede beving een nog niet verschoven deel van de breuk betrof, binnen het invloedsgebied van de eerste beving (barrier, asperity model, Scholz, 1990).

Het spreekt vanzelf dat de beving bij Bergen aan Zee niet in deze analyse is meegenomen omdat de coherentie tussen dit signaal en de signalen van de bevingen bij Alkmaar te klein is aangezien de onderlinge afstanden te groot zijn. De vergelijking met de twee bevingen bij Alkmaar uit 1994 is ook geprobeerd, maar leverde veel minder goede correlaties op zoals in figuur 2 te zien is. Bovendien was het aantal stations dat in 1994 en in 2001 de bevingen geregistreerd hebben te klein voor een goede bepaling. Wel kan worden aangenomen dat alle bevingen bij Alkmaar hetzelfde haardmechanisme hebben.

Haardparameters

Voor de bevingen bij Alkmaar en Bergen aan Zee zijn de haardparameters bepaald. Deze haardparameters zijn de gemiddelde straal van de verschoven breukdelen (r_0), de verschuiving zelf (d_0), de schuifspanningsverandering, de zgn. ‘stress drop’ (\mathbf{Ds}) en het seismisch moment (M_0). Deze bepaling is ook gedaan bij de eerdere aardbevingen in dit gebied. Brune heeft hiervoor een model ontwikkeld (Brune, 1970). Dit model beschrijft een aardbeving als een verschuiving langs een breuk. Vóór de beving is er door de aanwezige krachten een elastische vervorming van het gesteente aan weerszijden van de breuk. Tijdens de beving plant zich een verschuiving voort over het breukvlak met een snelheid die tussen de P- en de S-snelheid in ligt. Na de beving is een deel van de elastische vervorming verdwenen en de spanning is afgenomen.

Een aardbeving ontstaat door tangentiële krachten op het breukvlak. Aan weerszijden van het breukvlak hebben deze krachten een verschillend teken, er ontstaat dus een koppel van krachten. De waarde van dit koppel wordt weergegeven door het seismisch moment. Doordat één koppel van krachten aanleiding geeft tot rotaties is voor de correcte theoretische beschrijving een tweede even groot krachtenkoppel noodzakelijk. (Aki & Richards, 1980). Dit dubbel-koppel model van een aardbeving is het gangbare model en is vele malen in de praktijk geverifieerd o.a. aan de hand van het stralingspatroon van P-golven.

De gegevens voor het Brune model worden deels uit het seismogram bepaald en deels uit de mechanische eigenschappen van het gesteente ter plaatse van het hypocentrum. De gegevens uit het seismogram worden verkregen door de spectrale analyse. Het seismogram wordt daartoe gecorrigeerd voor de frequentie-afhankelijke vergroting van de seismometer. Uit de theorie volgt dat het frequentiespectrum vlak is voor lage frequenties tot aan de kantelfrequentie f_0 . Boven deze frequentie neemt het spectrum af met 20 dB per decade of 12 dB per octaaf. Uit de spectrale analyse zijn dus de gegevens f_0 en het niveau voor de spectrale dichtheid voor lage frequenties (W_0) te bepalen.

Voor het seismisch moment M_0 , de stressdrop \mathbf{Ds} , de gemiddelde straal van het breukvlak r_0 en de verplaatsing van de breuk d_0 zijn in het Brune model de volgende formules van kracht.

$$M = \frac{4\mathbf{p}n_b^3 r\Omega_0 R}{0,85}, \quad \Delta\mathbf{s} = \frac{106 rR\Omega_0 f_0^3}{0,85}, \quad r_0 = \frac{2,34n_b}{2\mathbf{p} f_0}, \quad d_0 = \frac{M_0}{\mathbf{p} r n_b^2 r_0}$$

$$M_0 = \mathbf{m}l_0 A = \mathbf{m}d_0 \mathbf{p} r_0^2, \quad M_w = \frac{\log M_0 - 9,1}{1,5} \quad (M_0 \text{ in Nm}) \quad (\text{Hanks en Kanamori, 1979})$$

test

waarin: v_b : de snelheid van S-golven bij het hypocentrum
 \mathbf{r} : de dichtheid van het gesteente bij het hypocentrum
 A : het oppervlak van de breuk
 W_0 : de spectrale dichtheid voor lage frequenties
 R : de afstand van de beving tot het seismisch station
 \mathbf{m} : de elastische schuifspanningsconstante (18 GPa)
 0,85 : de correctiefactor voor het stralingspatroon
 f_0 : de kantelfrequentie in de spectrale dichtheid van het seismogram
 M_w : de moment magnitude

Met deze formules kan ook voor kleine magnitudes een complete beschrijving van de aardbeving worden gegeven. Uit het seismisch moment M_0 kan de moment magnitude M_w worden berekend die in theorie weinig zou moeten afwijken van de lokale magnitude.

Het seismisch moment en de moment magnitude M_w op basis van de formule van Hanks en Kanamori (1979) van de bevingen is bepaald op:

	9-9-2001	10-9-2001	10-10-2001
M_0	$1,9 \cdot 10^{14}$ Nm	$0,63 \cdot 10^{14}$ Nm	$0,18 \cdot 10^{14}$ Nm
M_w	3,45	3,13	2,77

Voor deze bepaling zijn de volgende waarden gebruikt:

	9-9-2001	10-9-2001	10-10-2001
\mathbf{r}	$2,7 \cdot 10^3$ kg/m ³	$2,7 \cdot 10^3$ kg/m ³	$2,7 \cdot 10^3$ kg/m ³
v_b	$2,6 \cdot 10^3$ m/s	$2,6 \cdot 10^3$ m/s	$2,6 \cdot 10^3$ m/s
f_0	1,5 Hz	2,2 Hz	2,1 Hz

De gegevens W_0 en R zijn ontleend aan registraties van de stations HGN, WTSB, HWF, ZLV, WDB, VLW en DBN.

De stress drop, de gemiddelde straal van het breukvlak en de verschuiving gedurende de beving zijn bepaald op:

	9-9-2001	10-9-2001	10-10-2001
Ds	2,8 bar	2,9 bar	0,8 bar
r_0	680 meter	470 m	460 m
d_0	7,4 mm	5,0 mm	1,4 mm

Voor de bepaling van M_0 en W_0 is één element aan de analyse toegevoegd. De formule voor M_0 bevat namelijk wel een factor voor de geometrische spreiding van de aardbevingsgolven tussen haard en station maar geen factor voor de absorptie en verstrooiing van seismische golven. De absorptie is frequentie-afhankelijk. De amplitude-verandering door absorptie wordt gegeven door:

$$a = a_0 \exp\left(\frac{-P f R}{Q v_b}\right)$$

waarin: a_0 : de amplitude bij het epicentrum
 f : de frequentie
 R : de afstand tot het epicentrum
 v_b : de snelheid van de S-golven bij het hypocentrum
 Q : de kwaliteitsfactor ($1/Q$ is een dimensieloze maat voor de absorptie)

Doorgaans ligt de waarde van Q tussen 100 en 1000. In Nederland is Q geschat op 250-500 voor S-golven in de diepere lagen, voor ondiepe lagen (kwartair) kan Q kleine waarden (50) bereiken. Hierdoor moet W_0 per station gecorrigeerd worden. Voor een gemiddelde Q -waarde van 250 begint de attenuatie een rol te spelen voor afstanden tussen seismisch station en epicentrum die groter zijn dan 50 km.

Haardmechanisme

Uit de richting van de eerste uitslagen op de (verticale) seismogrammen kan worden bepaald in welke richting het gesteente langs de breuk verschoven is. Omdat de twee bevingen van 9 en 10 september identieke seismogrammen hadden, is één haardoplossing berekend voor beide bevingen. Van de twee bevingen zijn een groot aantal seismogrammen beschikbaar. Toch is niet ieder seismogram bruikbaar omdat het teken van de inzettingen van de P- en S-golven niet goed te bepalen is. Daarom is ook de amplitudeverhouding van P- en SH-golven gebruikt om het mechanisme te preciseren. In figuur 5 is het haardmechanisme weergegeven in de vorm van een stereografische projectie ('beach ball'). Voor de beving bij Bergen aan Zee was niet genoeg data beschikbaar voor een haardoplossing.

Het haardmechanisme sluit precies aan bij de richting van de strekking van de breuk waarlangs de aardbevingen hebben plaatsgevonden (zie figuur 6 en 7). Het is dezelfde breuk en hetzelfde mechanisme als van de bevingen uit 1994. Het haardmechanisme, kan omschreven worden als een inzakking langs een overhellende breuk met een strekking van 130° , een hellingshoek van 66° en een duiking van 73° . De breuk midden in het gasveld heeft een overeenkomstige hellingshoek van ca. 70° en een strekking van 127° en loopt door tot aan de basis van het Tertiair. Uit figuur 6 wordt duidelijk dat de breuk ontstaan is in een proces van afschuiving (normal faulting). Het proces dat nu tijdens de drukkaling door gaswinning plaatsvindt is opschuiving (reverse faulting). Hierbij zakt het gesteente onder het overhangende deel in en vormt daarmee een bijdrage aan de compactie.

Macroseismische bevindingen van de bevingen bij Alkmaar

Op grond van de meldingen van schade is een kaart samengesteld (zie figuur 8). De verdeling van de schade is vergeleken met de schade van de bevingen uit 1994. Omdat het tijdsverschil tussen de twee bevingen op 9 en 10 september zo klein is, kan er moeilijk een onderscheid gemaakt worden tussen schade van de eerste of de tweede beving. De trillingen van de eerste beving op 9 september waren tenminste een factor twee krachtiger dan de bevingen op 10 september. Toch was de beving van 10 september nog een factor 1,2 groter in amplitude dan de beving van 21 september 1994 (zie de seismogrammen in figuur 2). Uit de verspreiding en de aard van de gemelde schade wordt duidelijk dat in het epicentrum een intensiteit van VI is bereikt. Dit is in overeenstemming met de magnitude van de beving op 9 september. De straal R_4 waarbinnen de intensiteit IV of hoger is, wordt voor deze beving geschat op 6 km. Dit is ook de straal waar binnen de meeste meldingen van schade gelegen waren.

Conclusie

De aardbevingen bij Alkmaar en Bergen aan Zee kunnen door hun ligging en haardmechanisme niet los worden gezien van de gaswinning in de velden Bergermeer en Bergen. De grote doorgaande breuk midden in het bergermeerveld en de noordoostelijke randbreuk van het bergenveld zijn actief. De bevingen bij Alkmaar van 1994 en 2001 zijn bijna identiek qua hypocentrum alleen de plaatsing langs de breuk verschilt. De ervaring elders in Noord-Nederland leert dat in velden die seismisch actief zijn, meer aardbevingen kunnen optreden. Dit kan ook na periodes van relatieve rust. Het gasveld Eleveld in Drenthe is hiervan een voorbeeld.

De gevolgen van de grootste aardbeving uit de serie met een kracht van 3,5 op de schaal van Richter zijn proportioneel met de kracht van de beving.

De plaatsing van een drietal boorgatseismometers heeft veel bijgedragen aan de kennis van deze reeks aardbevingen. De plaatsing in een klein gebied dicht op het te verwachten epicentrum brengt echter een dilemma met zich mee. Enerzijds is het van belang ook hele zwakke schokken te registreren, wat een gevoelige instrument-instelling met zich mee brengt. Anderzijds is het van belang ook de grootste schokken goed en onvervormd te kunnen meten. De uitweg uit dit dilemma is het dynamisch bereik van de instrumenten te vergroten. Dit gaat het KNMI in de komende periode uitvoeren. Daarnaast is het van belang versnellingsmeters te plaatsen voor de juiste beoordeling van de schade, zoals ook in de omgeving van Roswinkel gedaan is. Er is door de TU Delft met computer modellen gerekend aan de Alkmaarse schokken. Het verdient aanbeveling deze berekening in het licht van deze laatste schokken opnieuw onder de loep te nemen en daar waar nodig bij te stellen.

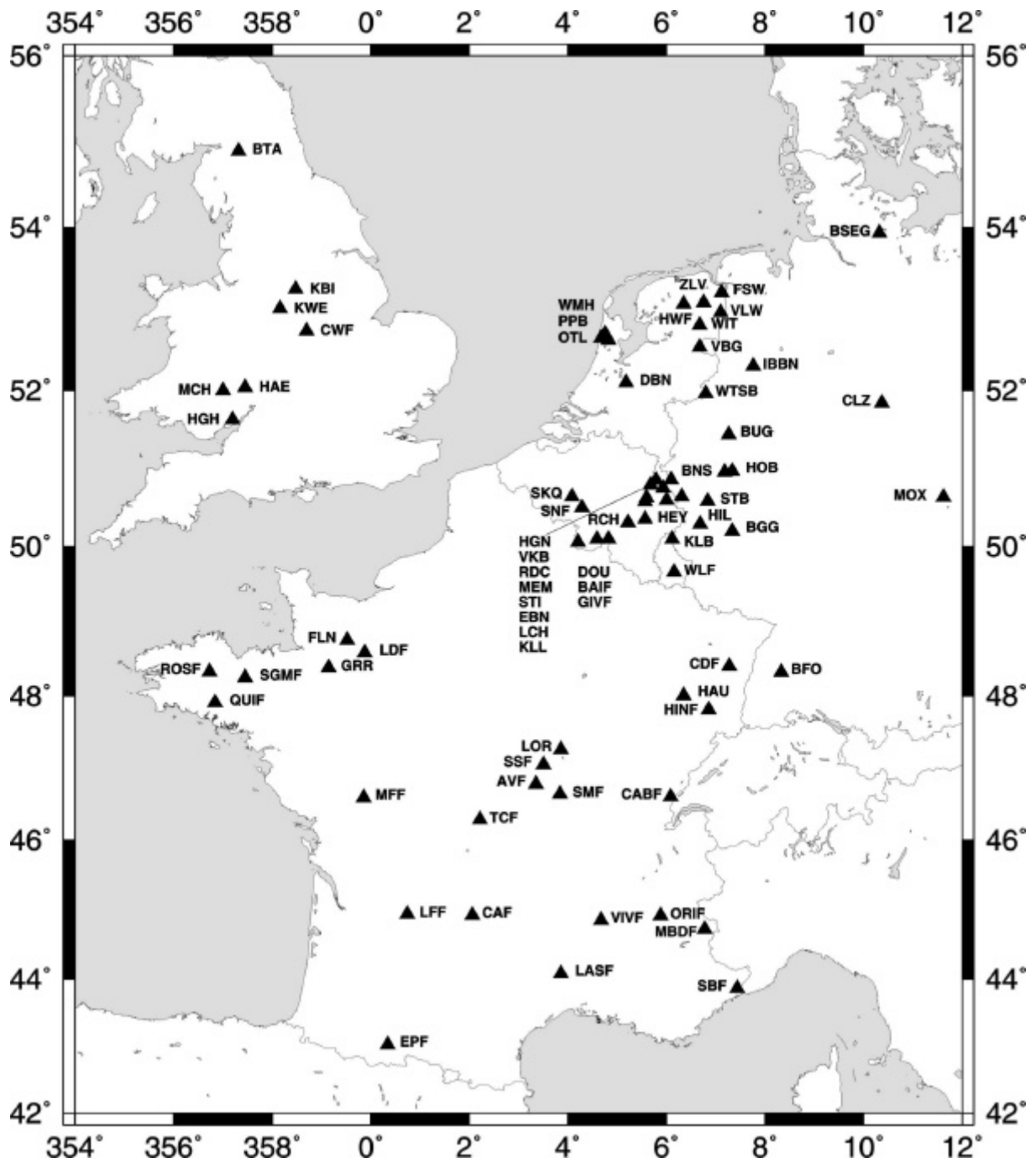
Referenties

- Aki, K. and P.G. Richards, 1980 - Quantative Seismology-Theory and Methods. Volume I. Freeman, San Francisco, pp. 37-60.
- Brune, J.N., 1970 - Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. J. Geophys. Res. **75**, No. 26, pp. 4997-5009 (**76** No. 20, pp. 5002: correction).
- De Rubeis, V., A. Maramai and A. Tertulliani, 1994 - National borders earthquakes: an attempt at intensity maps unification. Annali di Geofisica, **37**, N.1, pp. 77-91.
- Gasparini, C., V. De Rubeis, A. Maramai and M. Murru, 1993 - The November 23, 1980 Irpinia earthquake: an analysis with the new procedure of intensity evaluation. Annali di Geofisica, **36**, N.5-6, pp. 35-46.
- Hanks, T.C. and H. Kanamori, 1979 - A Moment Magnitude Scale. J. Geophys. Res. **84**, No. B5, pp. 2348-2350.
- Mezcua, J. and J. Rueda, 1994 - Earthquake relative location based on waveform similarity. Tectonophysics, **233**, pp. 253-263.
- Scholz, C.H., 1990 - The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge University Press.
- Seismische analyse van de aardbevingen bij Geelbroek op 25 april 1991, Eleveld op 8 augustus 1991 en Middelstum op 5 december 1991. Intern KNMI-rapport, 1991.
- Seismische analyse van de aardbevingen bij Alkmaar op 6 augustus 1994. Intern KNMI-rapport TR-166, 1994.
- Seismische analyse van de aardbevingen bij Alkmaar op 21 september 1994. Intern KNMI-rapport TR-167, 1994.
- Sponheuer, W., 1962 - Untersuchung zur Seismizität von Deutschland, Veröffentlichungen des Instituts für Bodendynamik und Erdbebenforschung in Jena. Heft 72, S. 23-52.

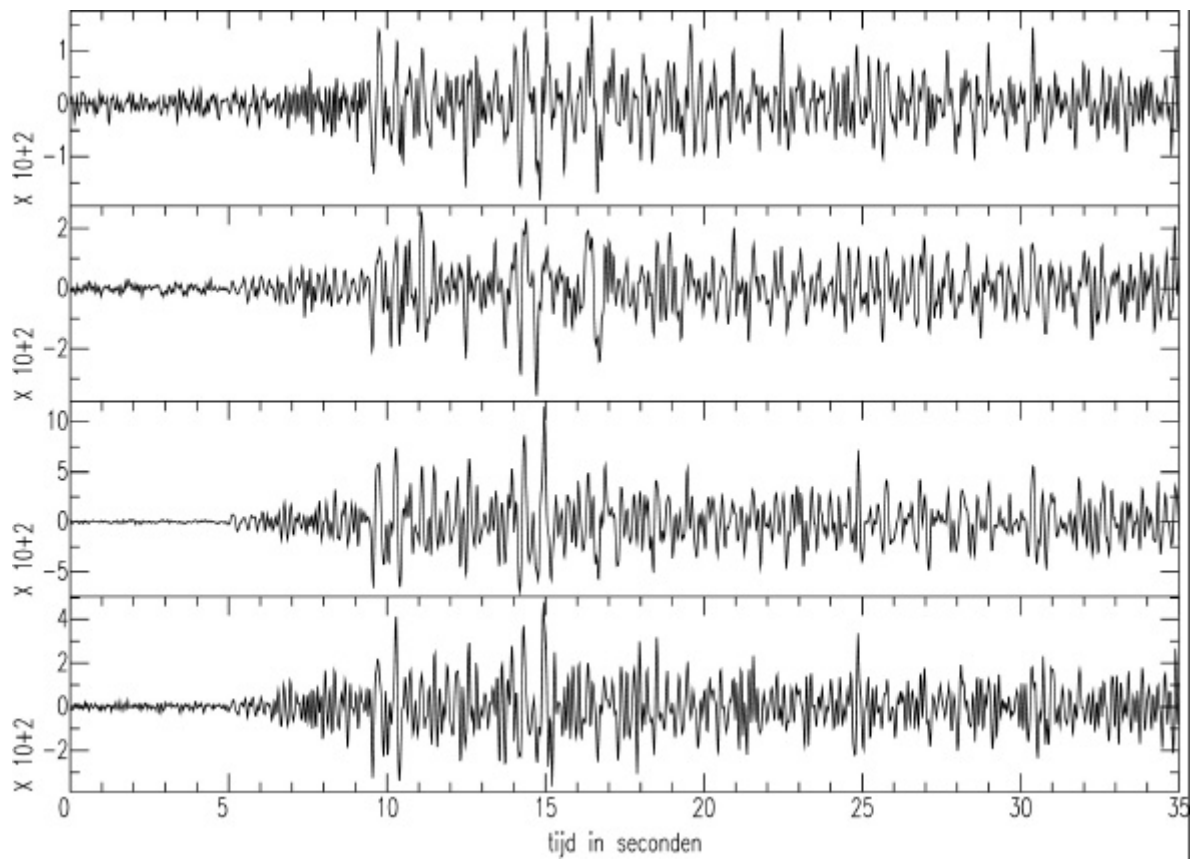
Tabel 1: Seismische registraties

Station	Code	Fase	Aankomsttijd beving 9 sept	Aankomsttijd beving 10 sept	Aankomsttijd beving 10 okt	Afstand
Philisteinse polder(NL)	PPB	P	06 58 13,89	04 30 16,74	06 41 10,53	3
		S		17,70	12,04	
Warmenhuizen (NL)	WMH	P	06 58 14,65	04 30 17,49	06 41 11,35	7
		S	15,97	18,87	13,57	
Oterleek (NL)	OTL	P	06 58 14,91	04 30 17,78	06 41 12,50	8
		S	16,26	19,14	15,51	
De Bilt (NL)	DBN	P	06 58 26,38			69
Haulerwijk (NL)	HWF	P	06 58 34,67	04 30 37,23		120
		S	50,48	53,26		
Venebrugge (NL)	VBG	P	06 58 36,56	04 30 39,71		133
		S	53,18	55,76		
Witteveen (NL)	WIT	P	06 58 36,94	04 30 39,63		133
		S	54,55	57,56		
Zuidlaarderveen (NL)	ZLV	P	06 59 00,51			146
Winterswijk (NL)	WTSB	P	06 58 39,44	04 30 42,24	06 41 58,34	161
Vlagtwedde (NL)	VLW	P	06 58 41,10	04 30 44,41		165
		S	59 01,80	31 04,83		
Fensterwolde (NL)	FSW	P	06 58 41,12	04 30 45,93		174
		S	59 05,03	31 07,35		
Heimansgroeve (NL)	HGN	P	06 58 46,98	04 30 49,85	06 41 50,76	226
Eben-Emael (B)	EBN	P	06 58 46,09			217
La Chartreuse (B)	LCH	P	06 58 48,10			232
Seneffe (B)	SNF	P	06 58 49,16			240
Heyd (B)	HEY	P	06 58 52,25			243
Membach (B)	MEM	P	06 58 50,13			244
Rochefort (B)	RCH	P	06 58 53,99			271
Kalborn (LUX)	KLB	P	06 58 57,33			
Walferdange (LUX)	WLF	P	06 59 03,20			331
Ibbenbueren (D)	IBBN	P	06 58 49,00			195
Bochum (D)	BUG	P	06 58 47,30			203
Kalltalsperre (D)	KLL	P	06 58 55,28	04 30 58,17		250
		S	59 19,86			
Bensberg (D)	BNS	P	06 58 56,42	04 31 00,19		253
		S	59 22,17	28,02		
Hohbusch (D)	HOB	P	06 58 57,15	04 31 01,16		262
		S		26,65		
Steinbach (D)	STB	P	06 58 59,04	04 31 01,89		274
		S	59 27,35	30,06		
Hillesheim (D)	HIL	P	06 59 02,83	04 31 06,38		300
Burgeitz (D)	BGG	P	06 59 07,72	04 31 08,00		328
		S	37,55	40,99		
Clausthal-Zellerfeld (D)	CLZ	P	06 59 08,80			381
Bad Segeberg (D)	BSEG	P	06 59 10,70			392
Moxa (D)	MOX	P	06 59 25,60			508
		S	07 00 44,80			
Schiltach (D)	BFO	P	06 59 27,00			526
Berggiesshubel (D)	BRG	P	06 59 42,60			648
		S	07 01 25,90			

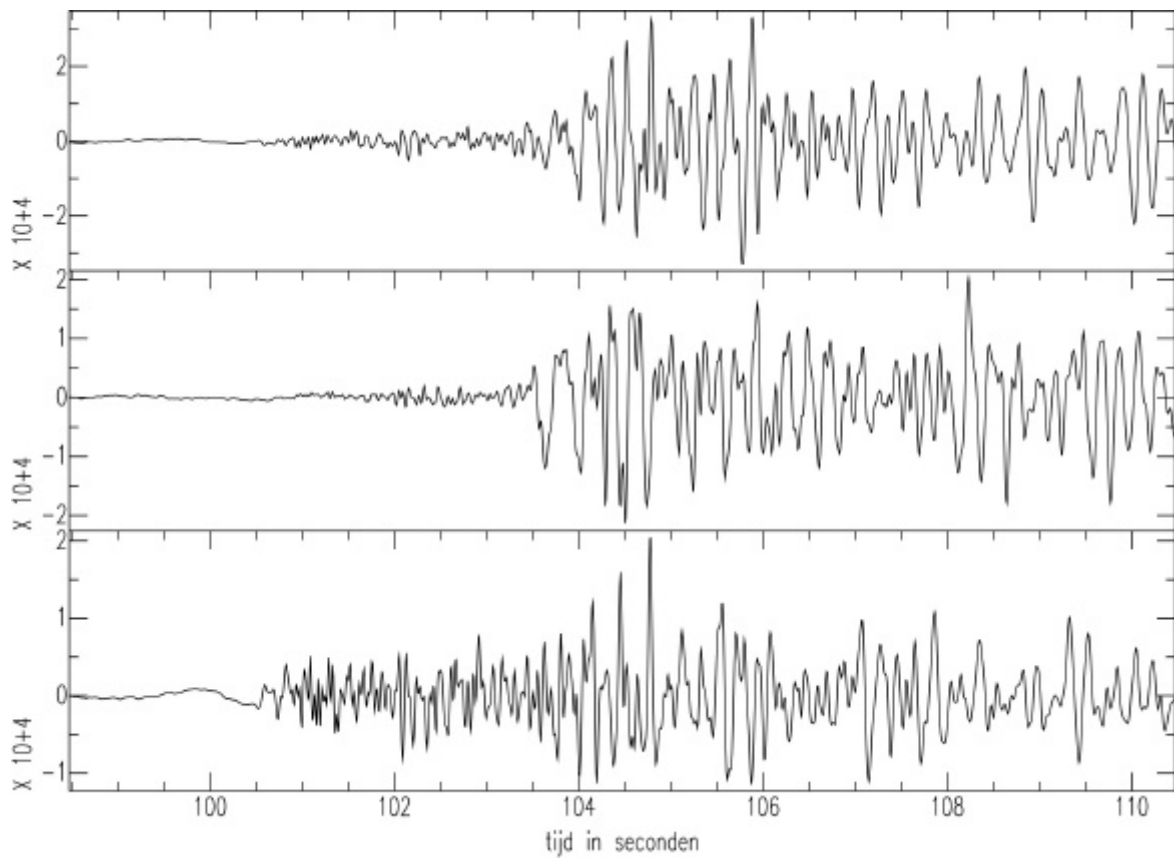
Station	Code	Fase	Aankomsttijd beving 9 sept	Aankomsttijd beving 10 sept	Aankomsttijd beving 10 okt	Afstand
Charnwood Fst (UK)	CWF		06 59 10,67			407
Birley Grange (UK)	KBI		06 59 11,98			425
Weaver Farm (UK)	KWE	P	06 59 14,77			444
Alders End (UK)	HAE	P	06 59 21,80			499
Gray Hill (UK)	HGH	P	06 59 25,17			527
Michaelchurch (UK)	MCH	P	06 59 25,70			531
Talkin (UK)	BTA	P	06 59 27,67			548
Givet (F)	GIVF	P	06 58 53,70	04 30 57,70		275
		S	59 17,80	04 31 25,80		
Baives (F)	BAIF	P	06 58 55,20	04 30 59,20		280
		S	59 23,30	31 37,90		
Champ du Feu (F)	CDF	P	06 59 22,30	04 31 24,80		503
		S	07 00 08,90	42,90		
Haudompre (F)	HAU	P	06 59 25,30	04 31 28,30		524
		S	07 00 37,50			
La Druitiere (F)	LDF	P	06 59 27,80	04 31 31,80		548
		S	07 00 23,00	32 25,00		
La Foliniere (F)	FLN	P	06 59 29,30	04 31 30,80		550
		S	07 00 49,10	32 28,10		
Hinteralfeld (F)	HINF	P		04 31 32,80		555
Lormes (F)	LOR	P	06 59 32,80	04 31 35,90		591
		S	07 00 28,00	32 33,60		
Gorron (F)	GRR	P	06 59 34,80	04 31 36,90		600
		S	07 00 33,00	32 36,60		
Saint Saulge (F)	SSF	P	06 59 35,30	04 31 39,40		616
		S	07 00 33,00	04 32 39,60		
Signal de Mont (F)	SMF	P	06 59 40,80	04 31 42,40		630
				32 49,10		
Avril sur Loire (F)	AVF	P	06 59 38,30			647
		S	07 00 40,50	04 31 43,40		
La Chapelle aux Bois (F)	CABF	P	06 59 42,90	04 31 46,40		673
		S	07 01 07,20			
St-Gilles-du-Mene (F)	SGMF	P	06 59 46,40	04 31 48,40		693
		S	07 00 56,60			
Rostrenen (F)	ROSF	S	07 01 03,10			710
Toulx Ste. Croix (F)	TCF	P	06 59 48,90	04 31 51,90		717
		S	07 00 55,10	33 00,70		
Quistinic (F)	QUIF	P	06 59 53,90			736
		S	07 01 09,60			
St Martin du Fouilloux (F)	MF	P	06 59 51,90			743
		S		04 33 07,70		
Oris-en-Rattier (F)	ORIF	P	07 00 04,90	04 32 09,50		856
Montbardon (F)	MBDF	P	07 00 10,90			857
Saint-Julien-le-Roux (F)	VIVF	P	07 00 06,40	04 32 08,50		857
			07 02 11,80			
Calviac (F)	CAF	P	07 00 06,90	04 32 10,00		868
		S	01 30,20	33 34,80		
La Frestal (F)	LFF	P		04 32 13,50		891
		S	07 01 34,70			
Ste Croix de Caderle (F)	LASF	P	07 00 16,50			915
Sospel (F)	SBF	P		04 33 03,70		991
Esparras (F)	EPF	S	07 02 22,90			1077



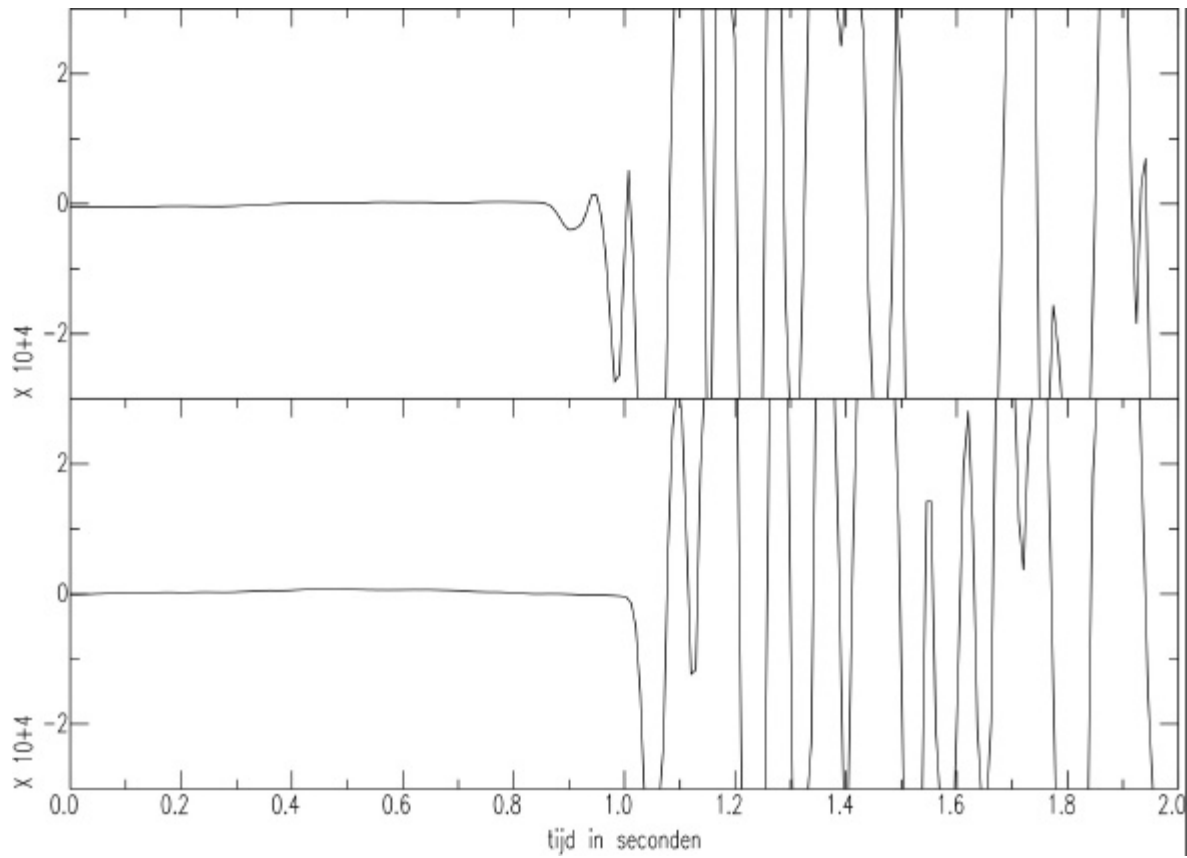
Figuur 1. Overzicht van de seismische stations die de aardbeving bij Alkmaar van 9 september 2001 geregistreerd hebben.



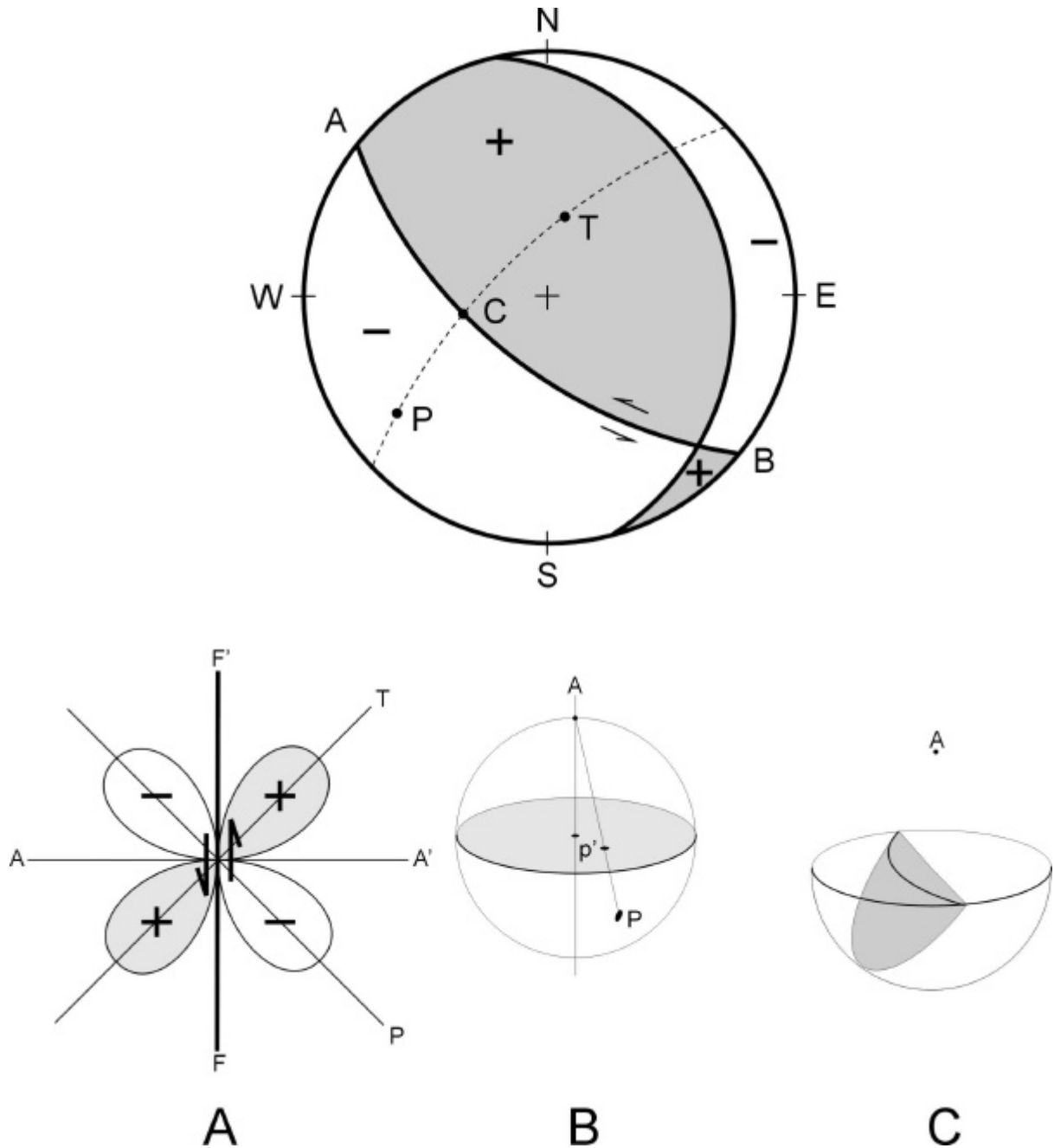
Figuur 2. Seismogrammen van de aardbevingen bij Alkmaar van 6 augustus en 21 september 1994 en die van 9 en 10 september 2001 van het station Heimansgroeve (HGN). De verticale beweging is weergegeven. De correlatie tussen de bevingen uit 1994 en 2001 is minder groot dan de correlatie tussen de twee uit 1994 en de twee uit 2001 onderling.



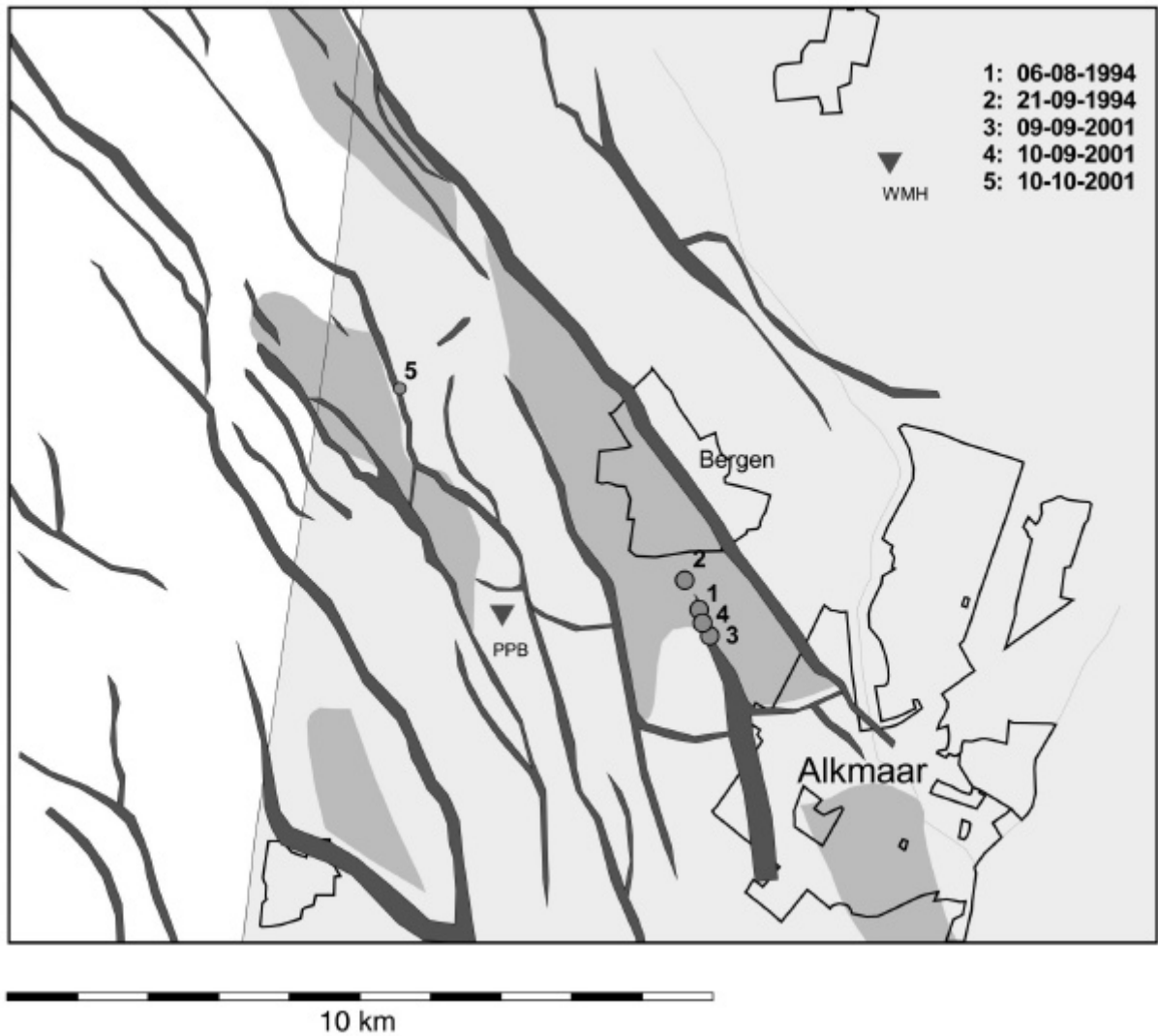
Figuur 3. Seismogrammen van de aardbeving bij Bergen aan Zee van 10 oktober 2001 van het station Oterleek (OTL). De radiële (boven), transversale (midden) en verticale component (onder) zijn weergegeven.



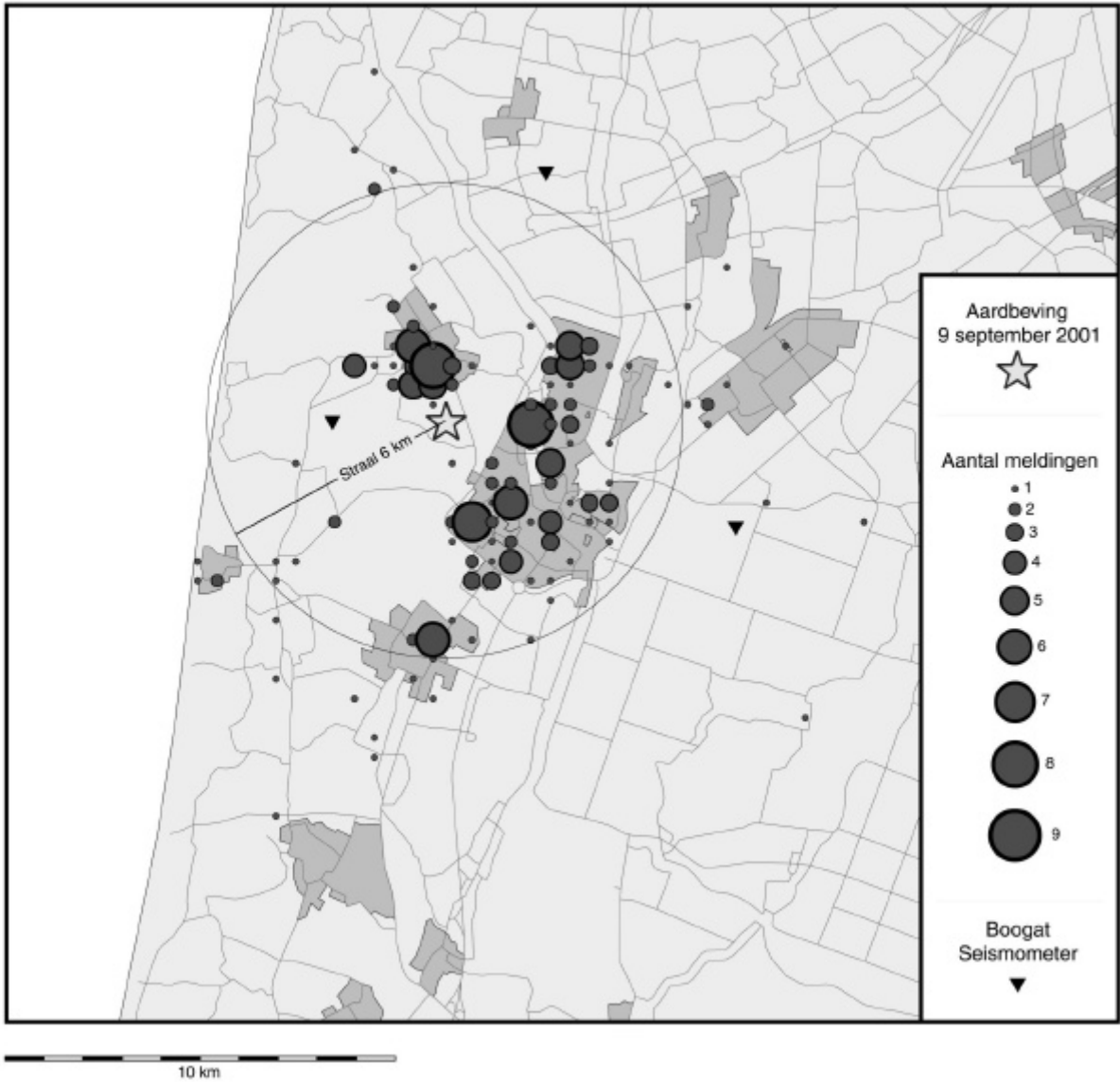
Figuur 4. Seismogrammen van de aardbevingen bij Alkmaar van 9 en 10 september 2001 van het station Philisteinse polder (PPB). Op het seismogram van 9 september is de kleine voorschok te zien.



Figuur 5. Haardoplossing van de twee bevingen bij Alkmaar op 9 en 10 september. De representatie is een stereografische projectie van het breukvlak(zie figuur B). Een vlak wordt in deze representatie als een cirkelboog weergegeven (zie figuur C). Het stralingspatroon van de P-golven heeft in verschillende richtingen een verschillend teken (zie figuur A). In de bovenste figuur is de lijn ACB de projectie van het breukvlak op de onderbol. C is de projectie van de slipvector in het breukvlak. P en T zijn de projecties van respectievelijk de druk- en de rek-as. Het + teken geeft compressie weer in het stralingspatroon van de P-golven, het – teken de dilatatie. Het mechanisme komt overeen met een overschuivende breuk met een hellingshoek van 66° en een strekking van 130° . Er is een kleine linkslaterale component zichtbaar.



Figuur 7. Overzichtskaart van de epicentra van de aardbevingen bij Alkmaar en Bergen aan Zee. De ligging van de gasvelden is in grijs weergegeven, de breuken in zwart.



Figuur 8. Overzicht van de schademeldingen naar aanleiding van de twee aardbevingen bij Alkmaar in 2001.