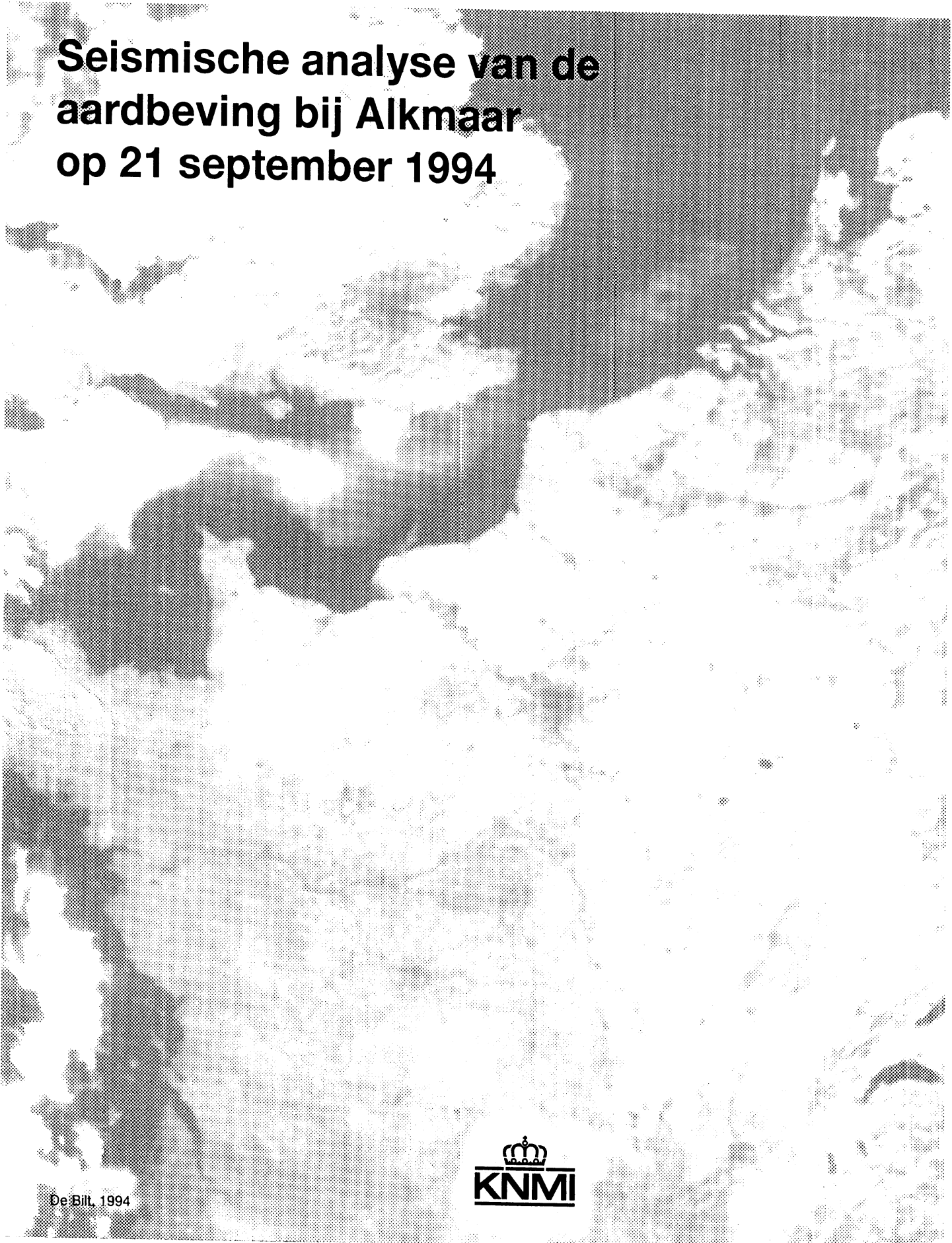


# Seismische analyse van de aardbeving bij Alkmaar op 21 september 1994



# Technisch rapport; TR-167

De Bilt, 1994

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

UDC: 550.34  
622.324  
(492.62)  
ISSN: 0169-1708  
ISBN: 90-369-2064-7

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

**SEISMISCHE ANALYSE**  
**VAN DE AARDBEVING BIJ**  
**ALKMAAR OP 21 SEPTEMBER 1994**

NOVEMBER 1994

KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT

## SEISMISCHE ANALYSE VAN DE AARDBEVING BIJ

ALKMAAR OP 21 SEPTEMBER 1994

### Samenvatting

Dit rapport behandelt de seismische analyses die naar aanleiding van de tweede beving bij Alkmaar door de Sectie Seismologie van het KNMI zijn uitgevoerd.

De schok bij Alkmaar, waarvan het epicentrum gelegen was tussen Alkmaar en Bergen, is de derde in een serie van aardbevingen in Noord-Holland waarbij mogelijk de aardgaswinning een rol speelt. De eerste vond plaats bij Purmerend op 1 december 1989, de tweede tussen Alkmaar en Bergen op 6 augustus 1994.

Dit rapport behandelt niet alleen de tweede aardbeving bij Alkmaar, maar gaat ook in op de relatie met de aardbeving bij Alkmaar op 6 augustus 1994.

Als resultaat van deze analyse zijn de volgende gegevens naar voren gekomen:

Epicentrum	4,708° OL 52,658° NB
Diepte	2,5 ± 0,5 km
Intensiteit	V
Magnitude	3,2
Moment	7 10 <sup>13</sup> Nm
Straal van breuk	400 m
Verschuiving	8 mm
Stress drop	5 Bar

De conclusie van dit rapport is dat door de sterke samenhang in tijd, kracht, plaats en haardmechanisme van de twee aardbevingen bij Alkmaar deze te beschouwen zijn als een tweeling. Doordat ook de relatieve ligging van de epicentra bepaald kon worden, is vastgesteld dat de aardbevingen aan dezelfde breuk plaatsvonden. Er is opnieuw lichte schade opgetreden bij deze beving in een gebied van ca. 20 km<sup>2</sup>. In uitzonderingsgevallen tot 5 km van het epicentrum. De meeste schademeldingen kwamen uit de zuidkant van Bergen, daar is de beving ook het sterkst gevoeld.

De Bilt, november 1994

## **I N H O U D**

<b>Inleiding</b> .....	<b>5</b>
<b>Instrumentele bepalingen aan de beving van 21 september 1994 bij Alkmaar</b> .....	<b>5</b>
<b>Bepaling relatieve epicentra</b> .....	<b>6</b>
<b>Haardparameters</b> .....	<b>7</b>
<b>Macroseismische bepalingen aan de beving van 21 september 1994 bij Alkmaar</b> .....	<b>9</b>
<b>Macroseismische kaart</b> .....	<b>10</b>
<b>Schade</b> .....	<b>10</b>
<b>Haardmechanisme</b> .....	<b>10</b>
<b>Conclusie</b> .....	<b>11</b>
<b>Referenties</b> .....	<b>12</b>
<b>Tabel 1</b> .....	<b>13</b>
<b>Figuren 1-7</b> .....	<b>15</b>

**Bijlage A: Enquête-formulier**

**Bijlage B: Overzicht schademeldingen**

# SEISMISCHE ANALYSE VAN DE AARDBEVING BIJ

ALKMAAR OP 21 SEPTEMBER 1994

## Inleiding

Dit rapport behandelt de seismische analyses van de tweede aardbeving bij Alkmaar en Bergen op 21 september 1994. Het is de tweede schok binnen twee maanden in hetzelfde gebied als de eerste beving op 6 augustus 1994.

Zowel het feit dat de periode van ca. 6 weken tussen de bevingen te lang is om de tweede schok als een enkele naschok te zien als het feit dat de tweede schok sterker was, doen vermoeden dat het hier om twee zelfstandige aardbevingen gaat. De aardbeving van 21 september is de krachtigste aardbeving (3,2 op de schaal van Richter) die tot nu toe in verband is gebracht met gaswinning.

In het eindrapport van de multidisciplinaire studie naar de relatie tussen gaswinning en aardbevingen is gesteld dat de maximale magnitude 3,3 op de schaal van Richter kan bedragen. Weliswaar is de maximaal ingeschatte kracht met de tweede beving bij Alkmaar nog niet overschreden toch zijn de Alkmaarse bevingen evenals die bij Middelstum op 30 juli 1994 voor het KNMI aanleiding de seismische risico-analyse, zoals opgenomen in het eindrapport van de multidisciplinaire studie, te herzien in het licht van de grotere dataset van 57 gas-gerelateerde aardbevingen die inmiddels voorhanden is. Deze risico-analyse zal apart gepubliceerd worden.

Na de tweede beving bij Alkmaar is besloten dat in een samenwerkingsverband tussen KNMI en AMOCO een drietal boorgatseismometers rondom Alkmaar en Bergen geplaatst zullen worden. Deze instrumenten zijn begin 1995 operationeel.

Daarmee kan de seismische activiteit van de gasvelden Bergermeer, Bergen, Alkmaar, Groet, Heiloo en Schermer gevolgd worden.

Het KNMI gaat er vanuit dat wanneer volgende bevingen optreden de registratie van de boorgat seismometers het inzicht zullen vergroten in de processen die zich op grote diepte in de ondergrond afspelen.

## Instrumentele bepalingen aan de beving van 21 september 1994 bij Alkmaar

Magnitude $M_L$ :	3,2 (WTS, FIN);
	3,3 (BNS-Bensberg, Ahorner);
	3,2 (BGS-British Geological Survey)
Tijdstip van de beving:	01h 12m 58s UT
Epicentrum:	OL 4,695°
	NB 52,658°
Amersfoort-coördinaten	X 108 km $\pm$ 1 km
	Y 519 km $\pm$ 1 km
Diepte h	2 km $\pm$ 2 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 beving is op grond van deze instrumentele gegevens bepaald. De stations op grotere afstand zijn daarbij weggelaten omdat deze de nauwkeurigheid van de epicentumbepaling 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. Toch is de onzekerheid in het instrumentele epicentrum nog relatief groot. De meest nauwkeurige bepaling van het epicentrum volgt uit de macroseismische kaart. Daarom is het macroseismische epicentrum als de beste benadering van het "echte" epicentrum aangenomen.

### **Bepaling relatieve epicentra**

Naast de bepalingen aan de individuele bevingen is er een vergelijking gemaakt van de bevingen onderling. Door vergelijking van de registraties is gevonden dat de seismogrammen van de twee bevingen in grote mate identiek zijn, afgezien van verschillen in bodemruis en amplitude. De vergelijking is verricht door de kruiscorrelatie functies van de seismogrammen van de stations FIN, WIT, WTS, HGN en ENN te berekenen.

In figuur 2 wordt de gelijkheid van de seismogrammen geïllustreerd.

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 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 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 op een kaart, zie figuur 3. Het punt van de minimum afwijking is de plaats van het relatieve epicentrum. Deze aanpak is overigens wezenlijk eenvoudiger dan de analytische benadering. Bovendien is direct een schatting van de nauwkeurigheid  $\pm 100$  meter van de bepaling te geven. Het is opmerkelijk dat deze techniek, waarbij tijdsverschillen van slechts 0,02-0,06 sec. gemeten zijn, een goed resultaat geeft.

Uit berekeningen is gevonden dat de beving van 21 september binnen 500 meter ten noord-noordwesten van de beving op 6 augustus gelegen moet zijn langs dezelfde breuk. Dit komt goed overeen met de resultaten uit de macroseismische kaarten. De schokken zijn dus goed gelijkende "tweeling-bevingen" met betrekking tot plaats, diepte, kracht en haardmechanisme.

## Haardparameters

In vergelijking tot de 6 augustus beving was de signaal-ruis verhouding van de beving op 21 september groter. Dit maakt het mogelijk om voor de laatste beving de haardparameters te bepalen; de gemiddelde straal van de verschoven breukdelen ( $r_o$ ), de verschuiving zelf ( $d_o$ ), de schuifspanningsverandering, de zgn. stress drop ( $\Delta\sigma$ ) en het seismisch moment ( $M_o$ ). Deze procedure is eerder gevolgd bij de aardbevingen van Eleveld en Geelbroek (SO-rapport, 1991). De seismoloog Brune heeft hiervoor een model ontwikkeld (Brune, 1970). Het model van Brune 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 druk 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 koppelmodel van een aardbeving is de gangbare theorie 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 grensfrequentie  $f_o$ . 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  $f_o$  en het niveau voor de spectrale dichtheid voor lage frequenties ( $\Omega_o$ ) te bepalen.

Voor het seismisch moment  $M_o$ , de stressdrop  $\Delta\sigma$ , de gemiddelde straal van het breukvlak  $r_o$  en de verplaatsing van de breuk  $d_o$  zijn in het Brune model de volgende formules van kracht:

$$M_o = \frac{4 \pi v_\beta^3 \rho \Omega_o R}{0,85}$$

$$\Delta\sigma = \frac{106 \rho R \Omega_o f_o^3}{0,85}$$

$$r_o = \frac{2.34 v_\beta}{2 \pi f_o}$$



$$d_o = \frac{M_o}{\pi \rho v_\beta^2 r_o^2}$$

$$M_o = \mu d_o A = \mu d_o \pi r_o^2$$

$$M_L = \frac{\log M_o - 9,1}{1,5} \quad (M_o \text{ in Nm}) \quad (\text{Hanks en Kanamori, 1979})$$

- waarin:  $v_\beta$  = de snelheid van S-golven bij het hypocentrum  
 $\rho$  = de dichtheid van het gesteente bij het hypocentrum  
 $A$  = het oppervlak van de breuk  
 $\Omega_o$  = de spectrale dichtheid voor lage frequenties  
 $R$  = de afstand van de beving tot het seismisch station  
 $\mu$  = de elastische schuifspanningsconstante (18 GPa)  
0.85 = de correctiefactor voor het stralingspatroon  
 $f_o$  = de kantelfrequentie in de spectrale dichtheid van het seismogram  
 $M_L$  = de locale magnitude

Met deze formules kan ook voor kleine magnitudes een vrij complete beschrijving van de aardbeving worden gegeven.

Het seismisch moment van de beving is bepaald op:

$$M_o = 7,0 \cdot 10^{20} \text{ dyne cm} = 7,0 \cdot 10^{13} \text{ Nm}$$

$$({}^{10}\log M_o = 13,85); (M_L = 3,2)$$

Voor deze bepaling zijn voor de parameters de volgende waarden gebruikt:

$$\begin{aligned} \Omega_o &= 2,4 \cdot 10^{-7} \text{ m s} \\ \rho &= 2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3 \\ v_\beta &= 2,6 \cdot 10^3 \text{ m/s} \\ R &= 1,77 \cdot 10^5 \text{ m} \\ f_o &= 2,4 \text{ Hz} \end{aligned}$$

De gegevens  $\Omega_o$  en  $R$  zijn ontleend aan registraties van het station Finsterwolde.

De stress drop is bepaald op:

$$\Delta\sigma = 5 \text{ Bar} = 0,5 \text{ MPa}$$

De gemiddelde straal van het breukvlak was:

$$r_o = 4 \cdot 10^2 \text{ meter}$$

De verschuiving gedurende de beving bedroeg:

$$d_o = 8 \text{ mm.}$$

Voor de bepaling van  $M_0$  en  $\Omega_0$  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

$$a = a_0 e \exp\left(\frac{-\pi f R}{Q v_\beta}\right)$$

waarin  $a_0$  = de amplitude bij het epicentrum  
 $f$  = de frequentie  
 $R$  = de afstand tot het epicentrum  
 $v_\beta$  = de snelheid van de S-golven bij het hypocentrum  
 $Q$  = de kwaliteitsfactor ( $1/Q$  is een maat voor de absorptie,  $Q$  is dimensieloos)

Doorgaans ligt de waarde van  $Q$  tussen 100 en 1000. In Nederland is  $Q$  geschat op 500-250 voor S-golven in de diepere lagen, voor ondiepe lagen (kwartair) kan  $Q$  kleine waarden (50) bereiken. Hierdoor moet  $\Omega_0$  met een factor van 2,3 gecorrigeerd worden. Wanneer breedbandige signalen gebruikt worden (zoals bij intensiteitsbepalingen) kan volstaan worden met een vorm  $a = a_0 e^{-\alpha R}$  zoals in de Sponheuer methode. 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.

### Macroseismische bepalingen aan de beving van 21 september 1994 bij Alkmaar

Op grond van de meldingen uit het publiek werd een intensiteitenkaart samengesteld (zie figuur 4). Met behulp van deze kaart zijn de volgende bepalingen verricht:

Epicentrum	OL	4,708°	
	NB	52,658°	
Amersfoort-coördinaten	X	109 km	± 500 meter
	Y	519 km	± 500 meter
Maximale intensiteit $I_0$		5,4	(V)
Diepte $h$		2,5 km	± 0,5 km (zie figuur 5)
Macroseismische magnitude $M_L$		3,6	(uitgaande van de formule van Sponheuer: $h = 2,5$ km, $\alpha = 0,15$ km <sup>-1</sup> en $I_0 = 5,4$ ) (Sponheuer 1962) $M_L = 0,52 I_0 + 1,56 \log h + 0,7 \alpha h$

Zowel het epicentrum als de diepte van de tweede beving komen goed overeen met die van de eerste beving bij Alkmaar. Op grond van de macroseismische kaart en de instrumentele gegevens wordt duidelijk dat het epicentrum net ten zuiden van Bergen gelegen is op een diepte van ca. 2,5 km macroseismisch en 2 km instrumenteel.

## Macroseismische kaart

Evenals bij de eerste beving is ook bij de tweede beving een enquête uitgevoerd. Een vragenformulier (zie bijlage A) dat op verzoek in het Noordhollands Dagblad geplaatst werd leverde ca. 3500 reacties op. Dit is 30% meer dan de reacties op de eerste beving.

Het samenstellen van de macroseismische kaart was beduidend lastiger dan voor de eerste beving omdat de aardbeving van 21 september 's nachts plaatsvond. Een verstoring in de nacht wordt namelijk veel sterker ervaren dan dezelfde verstoring overdag. Daarmee was ook het onderscheid minder duidelijk tussen de intensiteiten II en III en tussen III en IV.

Figuur 4 laat duidelijk zien dat de aardbeving binnen een straal van 10 km van het epicentrum gevoeld is, een groter gebied in vergelijking tot de eerste beving. De isoseisten zijn minder grillig getrokken omdat de gegevens geen nadere detaillering toelaten. Het kleine gebied waar intensiteit V is waargenomen, strekt zich uit van Bergen-Zuid naar Alkmaar-Oost. Uit dit gebied meldt 1 op de 10 inzenders van het enquête-formulier schade. Een aantal delen van de isoseisten zijn geschat; dit is in figuur 4 aangegeven. In deze gebieden was te weinig data voorhanden. Omdat bij deze beving geen telefonische enquête gehouden is, zijn deze onzekerheden blijven bestaan. Overigens zonder dat deze informatie een grote invloed op de eindresultaten zouden hebben gehad. De uitwerking van de enquête heeft deels geautomatiseerd plaatsgevonden, nadat alle formulieren in een 'database' ingevoerd waren. De plaatsbepaling van de meldingen gaat via de postcode-Amersfoort coördinaten conversie. Deze is op 500 meter nauwkeurig. Elk formulier is van een intensiteit voorzien door een seismisch analist. Pogingen om uit de antwoorden automatisch een intensiteit te berekenen zijn vooralsnog niet geslaagd, zie bijvoorbeeld Gasparini, 1993. Wel kon de middelingsprocedure tot een waarde per roosterpunt deels geautomatiseerd worden. De bepaling van de isoseisten blijft voorlopig ook mensenwerk (De Rubeis, 1993)

Door de verwerking van de enquête in een 'database' is het mogelijk selecties te maken. Zo is "paniek" vooral in Bergen-Zuid gemeld. In figuur 6 is het aantal meldingen van een knal weergegeven.

## Schade

Circa 120 mensen hebben aangegeven op het enquête-formulier dat ze in een of andere vorm schade hebben geleden (figuur 7). Dit is een ruime verdubbeling ten opzichte van de eerste aardbeving. Opnieuw is vastgesteld dat het gebied van de schademeldingen samenvalt met intensiteit IV. In bijlage B is een overzicht gegeven van het merendeel van de schademeldingen. De ernst van de schade is niet toegenomen ten opzichte van de eerste beving. De omvang van de schade wel.

## Haardmechanisme

Uit de richting van de eerste uitslagen op de (vertikale) seismogrammen kan worden bepaald in welke richting het gesteente langs de breuk verschoven is. Hoewel van de

beving veel seismogrammen beschikbaar waren, kon het teken van de eerste inzet slechts in een tiental gevallen bepaald worden. Een grote meerderheid van de registraties liet een compressie zien, zowel voor de Nederlandse, de Engelse, de Duitse als de Franse stations. Het haardmechanisme dat deze gegevens kan verklaren, kan omschreven worden als een inzakking langs een overhellende breuk. Omdat dit haardmechanisme niet past bij de noordoostelijke randbreuk van het Bergermeerveld en omdat het epicentrum van de tweede aardbeving ook te ver van deze breuk gelegen is, moet de conclusie zijn dat de twee aardbevingen bij Alkmaar zich hebben voorgedaan aan een breuk die ca. 1-2 km zuidwestelijk ligt van de noordoostelijke randbreuk. Deze breuk midden in het gasveld heeft inderdaad een sterke overhelling van ca.  $45^\circ$  en loopt door tot aan de basis van het Tertiair. Bovendien sluit de strekking van de breuk (de richting van de breuk in het horizontale vlak) heel goed aan bij de richting die uit de relatieve epicentrum bepaling berekend is.

Hiermee is dus een consistent beeld ontstaan voor de twee aardbevingen bij Alkmaar, dat kan worden samengevat in de volgende punten:

- . Het macroseismische epicentrum van de aardbeving bij Alkmaar van 21 september ligt op een doorlopende breuk midden in het Bergermeerveld.
- . Uit de relatieve epicentumbepaling komt naar voren dat ook de eerste aardbeving op deze breuk gelegen moet zijn. De onderlinge afstand van de twee bevingen was ca. 500 meter.
- . Het macroseismische epicentrum van de eerste beving was te noordoostelijk ingeschat.
- . De breuk midden in het Bergermeerveld heeft een sterke overhelling. Deze overhelling is consistent met de tekens van eerste inzetten op de seismogrammen.
- . Zowel de hoogte van de breuk als de gevonden afstand tussen de bevingen sluit aan bij de bepaling van  $r_0$ , de straal van de verschoven breukdelen (400 m).

## Conclusie

De aardbeving bij Alkmaar en Bergen van 21 september kan niet los gezien worden van de aardbeving op 6 augustus. Kracht, diepte, plaats en bewegingsrichting van de twee breukdelen van de beide aardbevingen zijn vrijwel gelijk. De epicentra verschillen niet meer dan 500 meter. De grote gelijkenis van de twee bevingen is van belang geweest voor de seismische analyse.

De gevolgen van de aardbeving met een kracht van 3,2 op de schaal van Richter zijn proportioneel met de kracht van de beving. De enquête onder de bevolking van Alkmaar en Bergen met ca. 3500 reacties heeft dat duidelijk aangetoond.

Uit de berekening van de haardparameters zoals het oppervlak van de verschoven breukdelen en de mate van verschuiving wordt duidelijk dat de aardbevingen maar een klein deel uitmaken van het totaal van de bewegingen zoals compactie in de

ondergrond als gevolg van gaswinning. In dit opzicht zijn dus volgende bevingen niet uitgesloten en zelfs waarschijnlijk.

De plaatsing van een drietal boorgatseismometers zal helpen de conclusies van dit rapport nader te preciseren. Uit het totaal van de waarnemingen en bepalingen komt naar voren dat de verbinding met de gaswinning vrijwel zeker is.

Het KNMI heeft de medewerking van AMOCO, het Noordhollands Dagblad en zijn lezers bijzonder op prijs gesteld.

### 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.

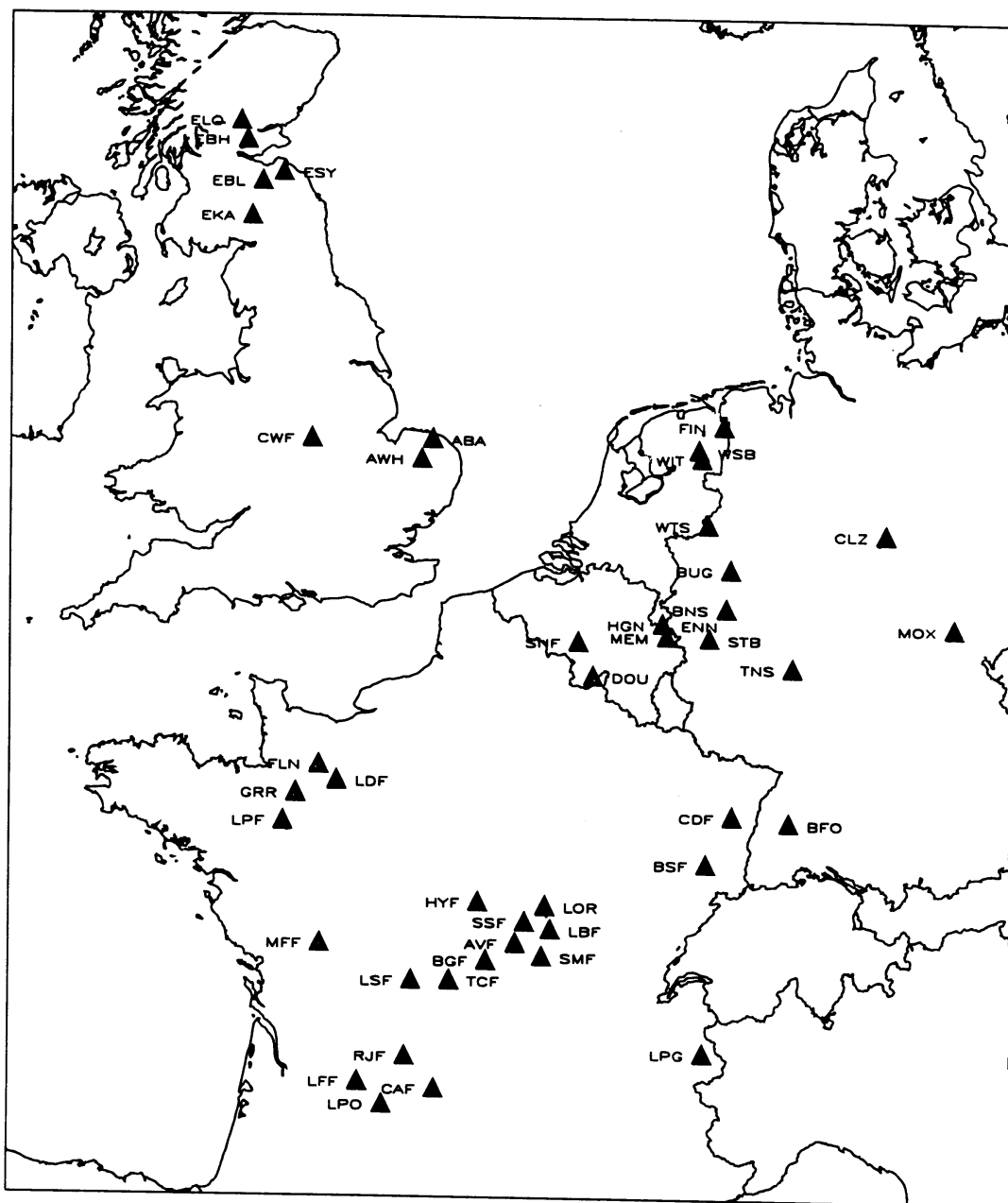
Seismische analyse van de aardbevingen bij Geelbroek op 25 april 1991, Eleveld op 8 augustus 1991 en Middelstum op 5 december 1991. Intern SO-rapport, 1991. [ongepubliceerd manuscript]

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

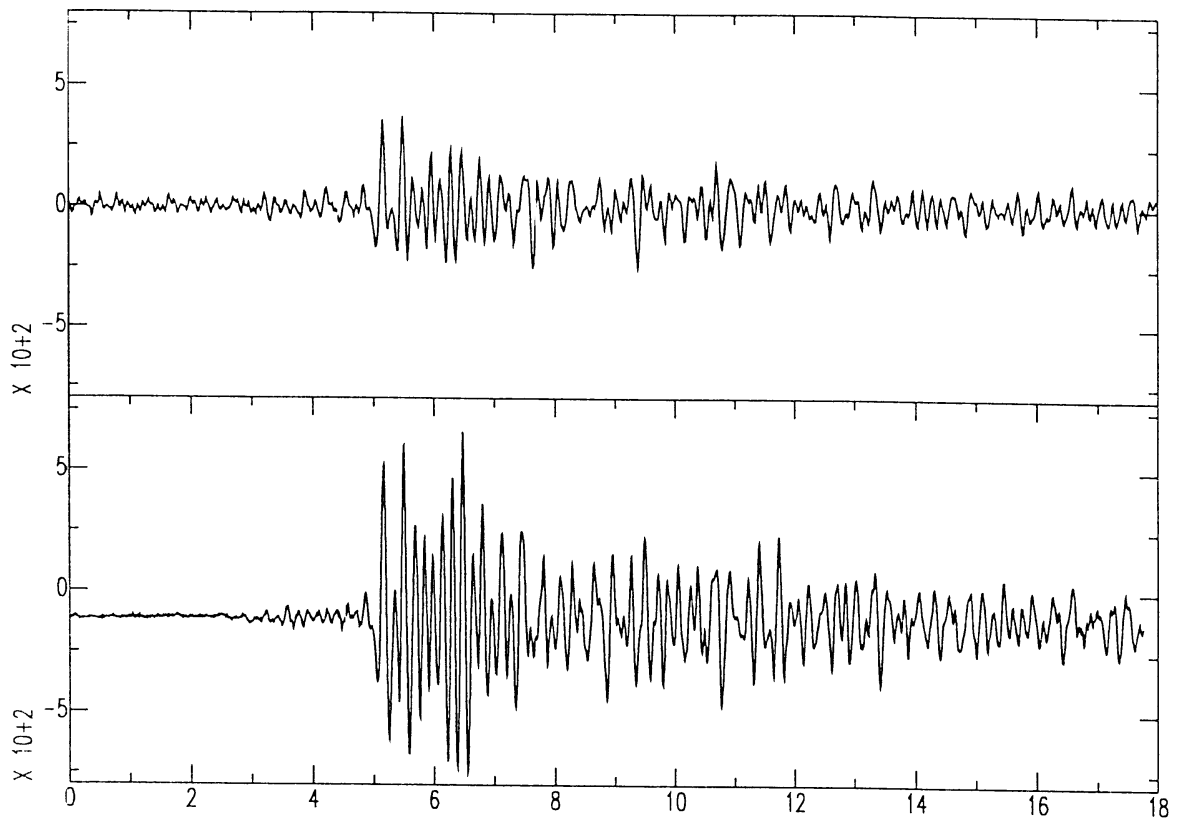
Station	Code	Fase	Aankomsttijd	Afstand
Finsterwolde (NL)	FIN	P <sub>n</sub>	01 13 25.63	177
		P <sub>g</sub>	27.64	
		S <sub>g</sub>	50.0	
Witteveen (NL)	WIT	P <sub>n</sub>	01 13 20.53	137
		P <sub>g</sub>	21.4	
Westerbork (NL)	WSB	P <sub>n</sub>	01 13 20.35	135
		P <sub>g</sub>	21.26	
		S <sub>g</sub>	38.0	
Winterswijk (NL)	WTS	P <sub>n</sub>	01 13 24.19	163
		P <sub>g</sub>	25.3	
		S <sub>g</sub>	46.0	
Epen (NL)	ENN	P <sub>n</sub> -	01 13 31.59	225
		P <sub>g</sub> +	35.59	
Heimansgroeve (NL)	HGN	P <sub>n</sub>	01 13 32.17	225
		P <sub>g</sub>	35.74	
		S <sub>g</sub>	14 03.0	
Bensberg (D)	BNS	(P <sub>n</sub> )	01 13 37.07	254
		P <sub>g</sub>	40.86	
		S <sub>g</sub>	14 11.87	
Steinbach (D)	STB	P <sub>n</sub>	01 13 37.2	272
		P <sub>g</sub>	43.4	
Bochum (D)	BUG	P <sub>n</sub>	01 13 32.2	222
		P <sub>g</sub>	35.0	
Moxa (D)	MOX	P <sub>n</sub>	01 14 09.9	529
Schiltach (D)	BFO	P <sub>n</sub>	01 14 10.1	544
Taunus (D)	TNS	P <sub>n</sub>	01 13 51.3	374
Clausthal-Zellerfeld (D)	CLZ	P <sub>n</sub>	01 13 52.7	399
Membach (B)	MEM	P <sub>n</sub>	01 13 34.47	243
Seneffe (B)	SNF	P <sub>n</sub>	01 13 33.9	238
Dourbes (B)	DOU	P <sub>n</sub>	01 13 39.1	282
Baconsthorpe (UK)	ABA	P <sub>n</sub>	01 13 34.03	240
		S <sub>n</sub>	14 02.31	
Whinburgh (UK)	AWH	P <sub>n</sub>	01 13 36.02	252
		S <sub>n</sub>	14 01.61	
Charnwood Fst (UK)	CWF	P <sub>n</sub>	01 13 54.4	406
		S <sub>n</sub>	14 36.7	
Eskdalemuir Array (UK)	EKA	P <sub>n</sub>	01 14 17.7	591
Stoneypath (UK)	ESY	P <sub>n</sub>	01 14 17.85	592
Broad Law (UK)	EBL	P <sub>n</sub>	01 14 18.97	607
Black Hill (UK)	EBH	P <sub>n</sub>	01 14 26.16	658
Logiealmond (UK)	ELO	P <sub>n</sub>	01 14 29.57	682

Station	Code	Fase	Aankomsttijd	Afstand
Champ du Feu (F)	CDF	P <sub>n</sub>	01 14 05.0	504
Ballon de Servance (F)	BSF	P <sub>n</sub>	01 14 13.1	555
La Druitiere (F)	LDF	P <sub>n</sub>	01 14 12.4	564
		S <sub>n</sub>	15 06.8	
La Foliniere (F)	FLN	P <sub>n</sub>	01 14 12.5	565
		S <sub>n</sub>	15 09.0	
Lormes (F)	LOR	P <sub>n</sub>	01 14 17.8	599
		S <sub>n</sub>	15 16.4	
Gorron (F)	GRR	P <sub>n</sub>	01 14 18.9	615
		S <sub>n</sub>	15 19.1	
Humbligny (F)	HYF	P <sub>n</sub>	01 14 19.8	614
		S <sub>n</sub>	15 19.7	
Saint Saulge (F)	SSF	P <sub>n</sub>	01 14 20.9	625
		S <sub>n</sub>	15 20.7	
Les Buteaux (F)	LBF	P <sub>n</sub>	01 14 21.4	630
		S <sub>n</sub>	15 22.0	
		S <sub>g</sub>	15 54.6	
Le Pertre (F)	LPF	P <sub>n</sub>	01 14 23.5	654
		S <sub>n</sub>	15 27.6	
Avril sur Loire (F)	AVF	P <sub>n</sub>	01 14 24.5	656
		S <sub>n</sub>	15 28.3	
Signal de Mont (F)	SMF	P <sub>n</sub>	01 14 25.8	668
		S <sub>n</sub>	15 30.6	
Bois d'Agland (F)	BGF	P <sub>n</sub>	01 14 28.4	687
		S <sub>n</sub>	15 34.7	
Toulx Ste. Croix (F)	TCF	P <sub>n</sub>	01 14 33.3	727
		S <sub>n</sub>	15 40.5	
La Souterraine (F)	LSF	P <sub>n</sub>	01 14 36.2	744
		S <sub>n</sub>	15 46.7	
St. Martin du Fouillaux (F)	MMF	P <sub>n</sub>	01 14 35.6	754
		S <sub>n</sub>	15 48.4	
La Plagne (F)	LPG	P <sub>n</sub>	01 14 44.1	808
		S <sub>n</sub>	16 00.2	
Les Rejaudoux (F)	RJF	P <sub>n</sub>	01 14 47.5	845
		S <sub>n</sub>	16 08.6	
Calviac (F)	CAF	P <sub>n</sub>	01 14 50.8	876
		S <sub>n</sub>	16 15.1	
La Frestal (F)	LFF	P <sub>n</sub>	01 14 54.4	900
		S <sub>n</sub>	16 20.3	
Le Pouchau (F)	LPO	P <sub>n</sub>	01 14 57.3	918
		S <sub>n</sub>	16 23.7	



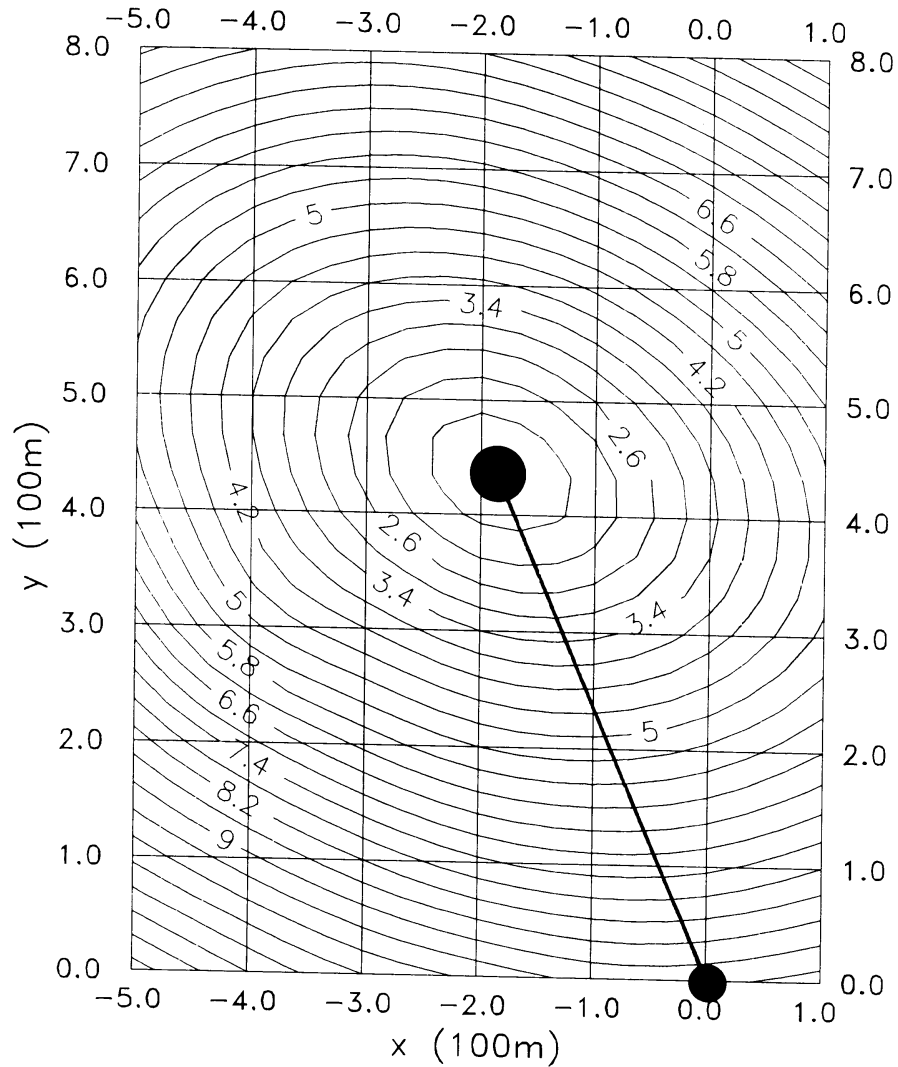
*Figuur 1. Overzicht van seismische stations die de aardbeving bij Alkmaar op 21 september 1994 geregistreerd hebben.*



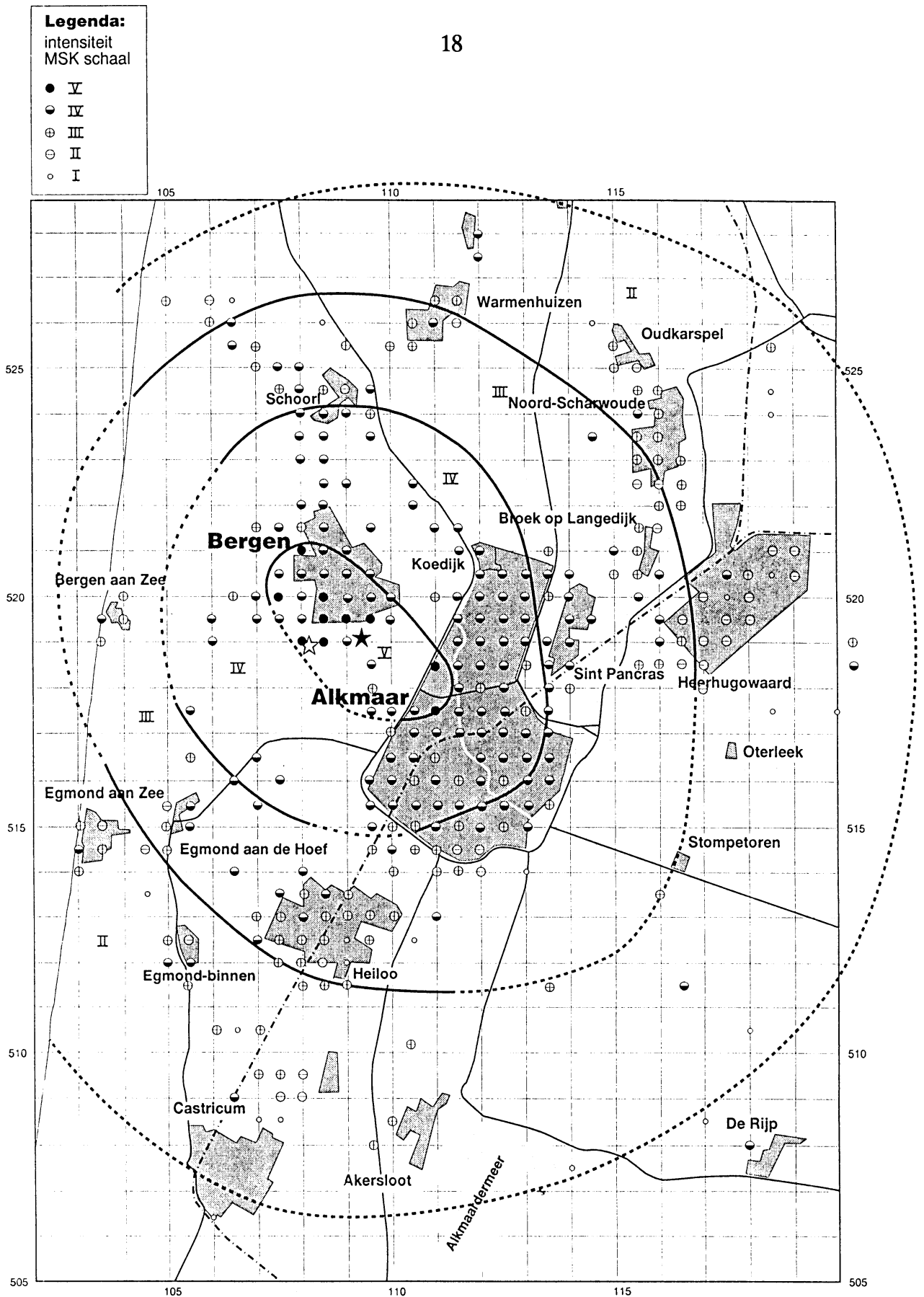


*Figuur 2. Seismogrammen van de aardbevingen bij Alkmaar op 6 augustus 1994 (boven) en 21 september 1994 (onder) van het station Finsterwolde. De seismogrammen geven de verticale bodembeweging weer op 300 meter diepte. De horizontale tijdschaal is in seconden.*

## Alkmaar relatief epicentrum

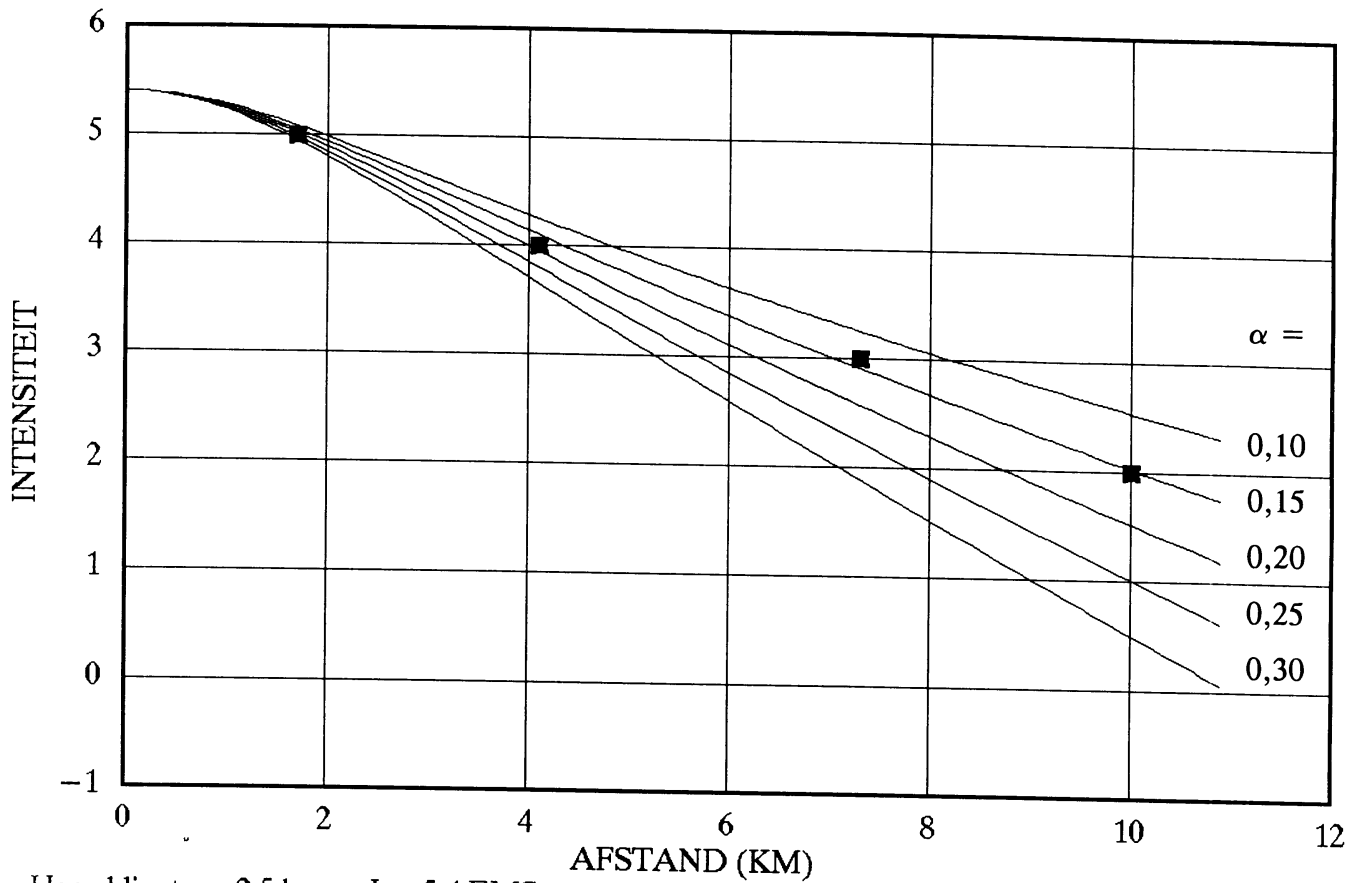


*Figuur 3. Relatieve locatie van de twee aardbevingen bij Alkmaar op 6 augustus 1994 en 21 september 1994. De verdeling van de X- en Y-as is in eenheden van 100 m. De getallen in de contouren geven RMS-verschillen in honderdsten seconden weer.*

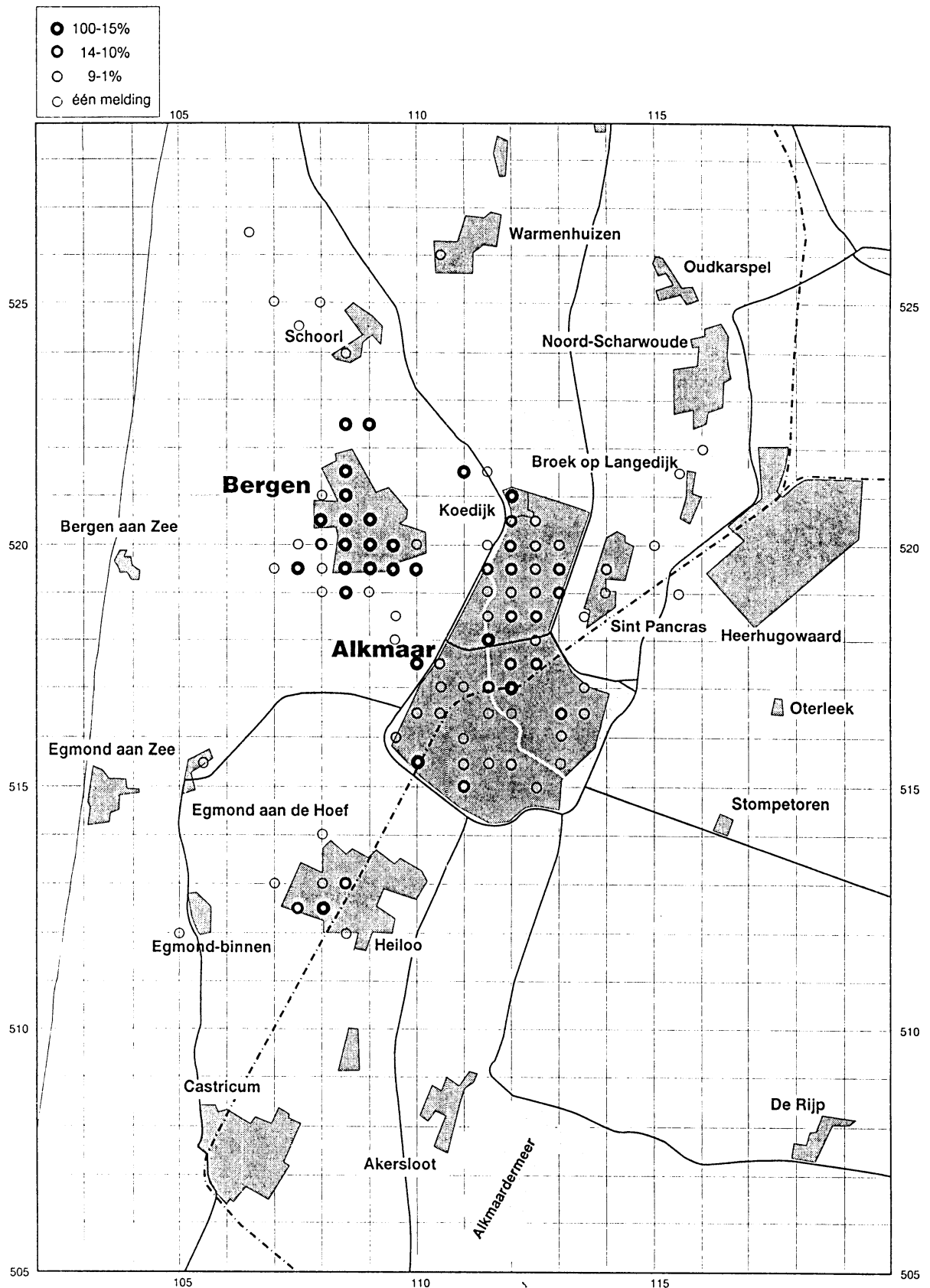


*Figuur 4. Isosistenkaart van de aardbeving bij Alkmaar, 21-09-94, op basis van de schriftelijke enquête. De cirkeltjes geven de gemiddelde waarden aan van de waargenomen intensiteit. De gestreepte lijnen zijn interpolaties. De open ster is het instrumentele epicentrum, de dichte ster is het macroseismisch bepaalde epicentrum.*

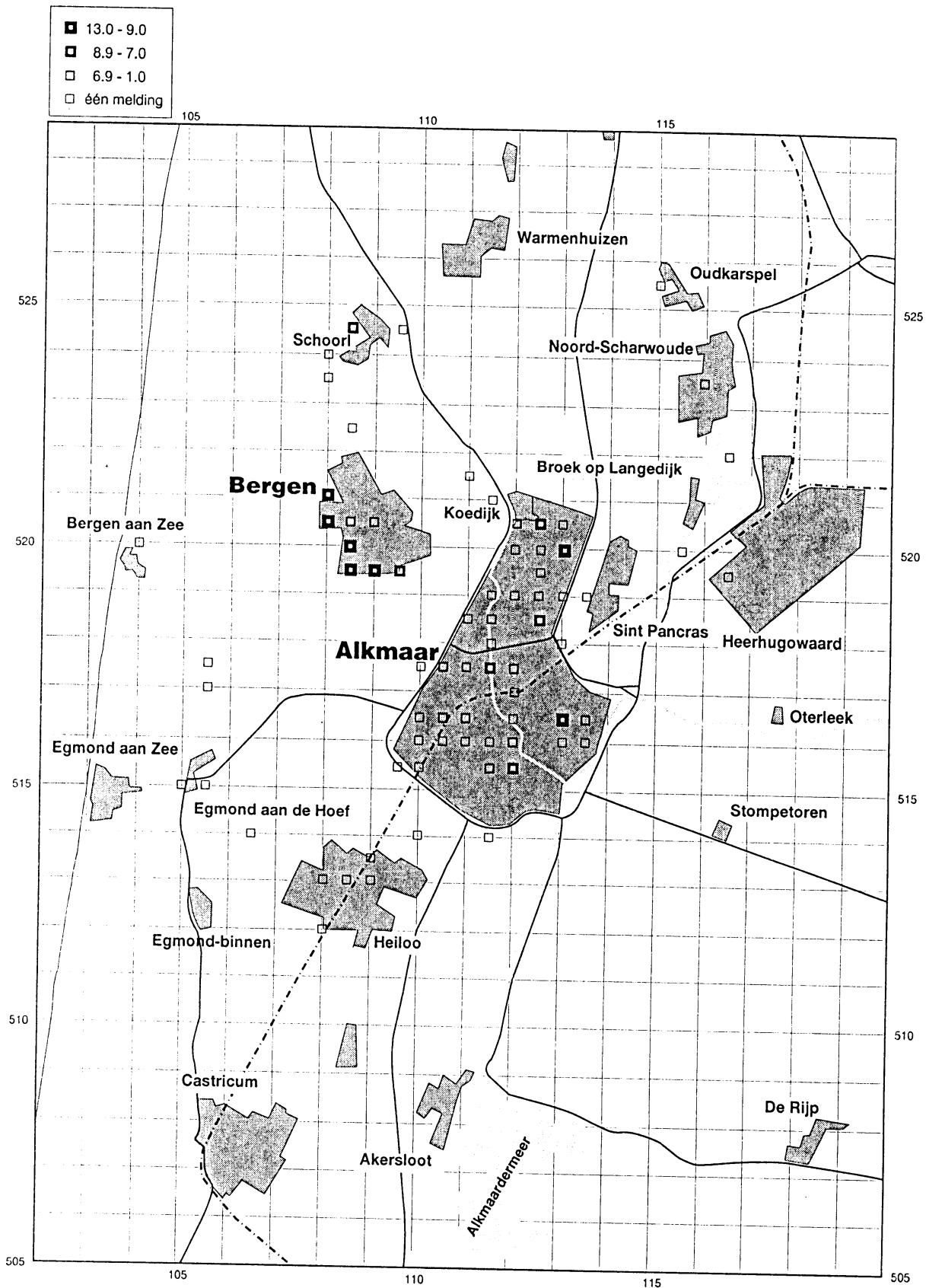
# ALKMAAR 940921



*Figuur 5. Afname van de intensiteit met de afstand tot het epicentrum voor de beving bij Alkmaar, 21-09-94, voor verschillende waarden van dempingsparameter  $\alpha$ . De ingetekende waarden zijn de berekende gemiddelde stralen van de isoseisten II, III, IV en V.*



*Figuur 6. Overzicht van gemelde knallen naar aanleiding van de aardbeving bij Alkmaar, 21-09-94.*



Figuur 7. Overzicht van de schademeldingen naar aanleiding van de aardbeving bij Alkmaar, 21-09-94. In de legenda staat aangegeven welk percentage van de ingezonden enquête-formulieren de vermelding "schade" had.

A1. *Cijfers omcirkelen.*

0. Niets gemerkt.  
1. Wel, doorgaan svp.

Plaats: \_\_\_\_\_  
Straat: \_\_\_\_\_  
Huisnummer: \_\_\_\_\_ Postcode: \_\_\_\_\_



B1. Beweging.

Eventueel aantal schokken,  
i dreunen of knallen:

0. Nee.  
1. Trillen.  
2. Schudden.  
3. Schok.  
4. Anders: \_\_\_\_\_
1. Zwak.  
2. Duidelijk.  
3. Sterk.  
4. Zeer sterk.

B2. Geluid.

0. Nee.  
1. Gerommel.  
2. Dreun.  
3. Knal.  
4. Anders: \_\_\_\_\_
1. Zwak  
2. Duidelijk  
3. Sterk  
4. Zeer sterk.

B3. Beweging met geluid.

0. N.v.t.  
1. Beweging gelijk met geluid.  
2. Beweging eerder dan geluid.  
3. Geluid eerder dan beweging.

C1. Voorwerpen  
bewogen of  
maakten geluid.

0. Nee.  
1. Serviesgoed, planten, staande kleine voorwerpen.  
2. Hangend voorwerp zoals lamp, klokgewicht, lamellen enz.  
3. Stoel, bank, kast, bed.  
4. Anders: \_\_\_\_\_

C2. Voorwerpen aan  
huis bewogen  
of maakten geluid.

0. Nee.  
1. Huis, dak, muur, vloer.  
3. Radiatoren, deuren, ramen.  
4. Deuren of ramen openen of sloten zich.  
5. Anders: \_\_\_\_\_

C3.\* Voorwerpen  
werden verplaatst  
of vielen

0. Nee.  
1. Serviesgoed, planten, staande kleine voorwerpen.  
2. Vloestof uit kopje of glas.  
3. Stoel, bank, kast, bed.  
4. Anders: \_\_\_\_\_

D1. Persoonlijke reacties.

i Aantal personen op dit adres met hun reacties.

0. Niets gemerkt: \_\_\_\_\_  
1. Kalm gebleven: \_\_\_\_\_  
2. Geschrokken: \_\_\_\_\_  
3. Paniek: \_\_\_\_\_

D2. Andere reacties.

0. Nee.  
1. Uzelf of de bureu zijn naar buiten gelopen.  
2. Anders: \_\_\_\_\_

D3. Opvallend gedrag  
van dieren.

0. Nee.  
1. Ja, welk: \_\_\_\_\_

*Cijfers omcirkelen.*

E1. Waar bevond U zich. 1. Binnen. Welke etage: \_\_\_\_\_ Welke kamer: \_\_\_\_\_  
2. Buiten. Waar: \_\_\_\_\_

E2. Positie. 1. Staand.  
2. Zittend.  
3. Liggend.

E3. Toestand. 1. Wakker.  
2. Wakker geworden door gebeurtenis.

F1. Ervaring als.

0. N.v.t.  
1. Donder van onweer. 5. (Vracht)auto tegen huis.  
2. Explosie. 6. Vliegtuig door geluidsbarrière.  
3. Vallend voorwerp. 7. Aardbeving.  
4. Voorbijrijdende vrachtauto. 8. Anders: \_\_\_\_\_

G1. Eventueel de richting.

0. Niet bekend.  
1. Richting: \_\_\_\_\_

Waar leidt u de  
richting uit af.

H1. Type huis.

- Bouwjaar: \_\_\_\_\_  
1. Eengezinswoning. 4. Boerderij.  
2. Bungalow. 5. Flat.  
3. Vrijstaand, 2/1 kap. 6. Anders: \_\_\_\_\_

I1. Schade.

0. Nee.  
1. Ja.

Veroorzaakte schade:

J1. Heeft U een vergelijkbare

- ervaring op dit adres  
meegemaakt: \_\_\_\_\_  
Eventueel de datum en  
de sterkte in verhouding  
met deze beving. \_\_\_\_\_
0. Nee.  
1. Ja.

K1. Andere verschijnselen

- en opmerkingen.  
0. Geen.  
1. Ja.

C3.\* Svp verder omschrijven indien er voorwerpen zijn verplaatst of gevallen.

U wordt verzocht dit enquête-formulier (als U niets heeft  
gemerkt alleen deel A1) zo volledig mogelijk in te vullen  
en (zonder postzegel) te sturen naar:

KNMI  
Sectie Seismologie  
Antwoordnummer 4302  
3720 ZB De Bilt

SCHADEMELDINGEN 940921 BEVING ALKMAAR/BERGEN

XAMF	YAMF	
103.0	514.5	Lichte scheuren in muur wc
104.0	520.0	Oude scheur in wand is kleiner geworden
105.0	515.0	Scheur in muur
105.5	517.5	Twee kleine scheurtjes in buitenmuur 5cm, in gestuct plafond 7cm
106.5	514.0	Scheuren in stucwerk met los stucwerk welke daarvoor beslist niet aanwezig waren
107.0	519.5	Haarscheuren in muur
108.0	512.0	Scheurtjes van 1 meter door de badkamertegels 1e etage
108.0	513.0	Scheuren in muur buiten
108.0	519.0	Kleine scheurtjes in stucwerk plafond woonkamer
108.0	520.5	Scheur tussen aanbouw
108.0	520.5	Scheuren in muur welput
108.0	521.0	Flessen stukgevallen (gestapeld in koelkast)
108.0	521.0	Grote scheuren in buitengevel en plavuizenvloer in woonkamer
108.0	521.0	Lichte scheur hal
108.0	523.5	Haarscheurtjes verdergegaan
108.0	524.0	Scheur in muur buiten, scheurnaden in hal boven, in tegel muur badkamer boven
108.5	513.0	Kalksnippers uit het plafond
108.5	519.0	Wat scheuren
108.5	519.5	Keuken tl-buis stuk, verschillende spotjes stuk
108.5	519.5	Scheur in pleisterwerk onder een raam
108.5	519.5	Scheuren in stucwerk woonkamer
108.5	520.0	Horizontale scheur in kamer, lengte ongev. 3 m, breedte van scheur 1,5 mm
108.5	520.0	Scheuren in muren (zojuist geschilderd en nu dus duidelijk zichtbaar)
108.5	520.0	Scheur in muur in gang (pleisterwerk)
108.5	520.0	Scheuren in stucwerk plafonds en badkamertegels
108.5	520.5	Er zitten wat scheuren in de muur
108.5	520.5	Scheuren in muur
108.5	522.5	Scheurtjes
108.5	524.5	Vergroting haarscheuren in muren, cv-leidingen verschoven
108.5	524.5	Scheurtjes muren bij aanrecht van achterkeuken
109.0	513.0	Kopmuurtjes bij voortuin door schok bovenkant losgelaten
109.0	513.5	Wat pleisterwerkstukjes niet noemenswaardig
109.0	519.5	Scheuren in zijmuur, barsten in stucwerk
109.0	519.5	Schilderijen stuk, scheuren in muur buiten
109.0	519.5	Scheuren boven kozijnen aan de buitenkant en binnen in de keuken, waren er niet!
109.0	519.5	2 lampen 75 watt
109.0	519.5	Scheurtjes in structuur van plafond
109.0	520.5	Scheuren in pleisterwerk hal bovenverdieping
109.0	520.5	Muren zijn gespleten, boven en beneden
109.5	515.5	Scheur in slaapkamer
109.5	519.5	Paar oude scheurtjes terug in pleisterwerk
109.5	519.5	Scheuren in huis en stallen
109.5	520.0	Scheur in de muur van de gang, tegeltjes in tweeën in badkamer
109.5	524.5	Scheuren muur
110.0	514.0	Diepe scheur in buitenmuur
110.0	515.5	Asfaltwegdek voor huis reeds aanwezige scheuren verder gescheurd
110.0	516.0	Scheur in muur
110.0	516.5	Enkele grote stukken v.e.betonnen rand naar beneden gevallen
110.0	517.5	Pleisterwerk van muur
110.5	516.0	Plekken aan plafond iets verder slecht
110.5	516.5	Haarscheurtjes buitenmuur
110.5	516.5	Kalk uit de voegen
110.5	517.5	Scheurtjes in badkamer dieper geworden
110.5	517.5	Scheur in tegels van wc en badkamer
111.0	516.0	Schemerlamp omgevallen, glas stuk
111.0	516.5	Raam gescheurd in de voorgevel, kleine scheuren in hoeken v.h. stucwerk
111.0	516.5	Deuren klemmen
111.0	517.5	Gescheurde vloertegels in bijkeuken en bak badkamer
111.0	518.5	Afvoerpijp fontein wc losgeraakt op de begane grond
111.0	521.5	Vensterbank buiten losgeraakt, scheuren in muur erger geworden
111.5	514.0	Beugel van boekenkast op hoogte 210 uit muur losgetrokken
111.5	515.5	Eieren gebroken
111.5	515.5	Scheuren door de voegen van de voorgevel naast de voordeur
111.5	515.5	Scheur in tegel in badkamer op gevelkant
111.5	516.0	Scheur in muur
111.5	517.5	Watertoevoer naar de wc is losgetrild, lek.w.op de grond, deuren/ramen sluiten slecht
111.5	517.5	Scheur in de muur groter geworden kalk lag op de grond
111.5	517.5	Scheur in muur tot aan plafond
111.5	518.0	Scheurtjes en kiernaden in muren
111.5	518.5	Condensvocht tussen de dubbele beglazing beneden-etage westkant
111.5	518.5	Schroeven uit houten vloer gebroken, schade aan houten vloer
111.5	518.5	Verschoven dakpannen
111.5	521.0	Scheuren in buitenmuur en stucwerk aan binnenzijde
112.0	515.5	Scheur in tegels van badkamer
112.0	515.5	Verschillende dakpannen verschoven



XAMF YAMF

112.0 516.0 Brokjes pleisterwerk lagen op de vloer  
112.0 516.0 Niet meer sluitende deuren en ramen, lekkages  
112.0 516.5 Glazen schutting zitten barsten in  
112.0 517.0 Dakpannen  
112.0 517.5 Scheur plafond over lengte v/h huis doorlopend in kamermuur  
112.0 519.0 Voordeur klemde licht  
112.0 520.0 Verwarming is na de beving op hol geslagen  
112.0 520.5 Scheur in de binnenmuur  
112.0 520.5 Scheuren in muur en plafond/pleisterwerk  
112.5 518.5 Lichte krimpscheuren in de keuken  
112.5 518.5 Scheuren in muren, weet niet zeker of deze wel of niet aanwezig waren  
112.5 518.5 Scheur in de muur v.e. slaapkamer, scheur in het plafond slaapkamer  
112.5 518.5 Scheuren naast de schoorsteen op zolder  
112.5 519.0 Scheur in pleisterwerk keukenmuur  
112.5 519.5 Scheuren in muur en vloer.  
112.5 520.0 Krimpscheuren zijn erger geworden  
112.5 520.5 Scheuren zichtbaar in de woning  
112.5 520.5 Kleine scheurtjes in buitenmuur  
112.5 520.5 Spiegel viel uit omlijsting  
113.0 516.0 Scheur in binnenmuur op zolder en in garage, scheurtjes buitenmuur garage  
113.0 516.5 Scheurtjes in plafond huiskamer  
113.0 520.0 Scheur in muur bijkeuken  
113.0 520.0 Scheuren in voegen van achterzijde woning  
113.0 520.0 Schade door katten ze vlogen door m'n huis zodoende 2 keulse potten stuk  
113.0 520.0 Scheuren in vloeren  
113.0 520.5 Zetting scheur verbreed  
113.5 516.0 Vermoedelijk haarscheur in pleisterwerk in de keuken  
113.5 516.5 Voordeur gaat slecht open  
113.5 516.5 Diverse losse stenen, scheur en losse voegen in voor en achtergevel  
113.5 517.0 Scheur in muur bij slaapkamer  
113.5 518.0 Scheurtje in stucwerk boven deur  
113.5 519.0 Scheur in tegelvloer  
114.0 519.0 Haarscheuren in pleisterwerk huiskamer  
115.0 525.5 In voorgevel zitten twee scheuren waarvan er een reeds bekend was voor de beving  
115.5 520.0 Scheur in muur groter  
116.0 523.5 Scheuren in muur, dakpannen uit de nok los  
116.5 519.5 Voorgevel gescheurd  
116.5 522.0 Scheur in pleisterwerk