

Herdmechanische Vorgänge bei einigen zirkumpazifischen Erdbeben¹

Von SIEGFRIED MÜHLHÄUSER, z. Zt. Uppsala, Meteorologiska institutionen,
Avdelning för seismologi

(Manuscript received July 31, 1956)

Abstract

Earthquake mechanisms can be determined by a method given by P. BYERLY and later developed by J. H. HODGSON and his collaborators. By a comparison with the tectonics of the earthquake region, it is possible in most cases to decide which of the two nodal planes represents the fault plane. As a certain arbitrariness cannot be avoided, also the strikes of the auxiliary planes have been given. If the arrows, indicating the direction of motion, have been drawn perpendicularly to the fault plane, this may mean that no auxiliary plane could be determined.

The mechanisms have been determined for 11 earthquakes in the years 1931—1950 in the Pacific area. It results that there is no general rule for the mechanisms, although the strikes of the fault planes in general coincide with the Circum-Pacific structural lines. The dip of the fault plane is as small as 31° in one case (earthquake no. 7), whereas the dip for the other cases is at least twice as large. Most of the earthquakes have a very large dip of the fault plane, in the range 70 — 88° . Dip values above 80° are especially frequent. The cases with smaller dip are localized to the north and northwest part of the Circum-Pacific belt.

The coastal earthquake belts of Central and South America exhibit a normal dip of the fault plane under the continent; this is also true for the northwest part of the Circum-Pacific belt. The conditions are similar at the southeast coast of Kamchatka, in Alaska, in western part of the Aleutians, and in the area between the Loyalty Islands and New Hebrides. In the other cases the fault plane dips toward the Pacific.

In northwestern Pacific belt the motions are often perpendicular to the strikes of the fault planes, whereas in the other areas the vertical motions are combined with horizontal displacements.

The number of observations for a single earthquake varies between 22 and 47. A few earthquakes in the Alpine belt have also been investigated, and comparisons with the results of other authors (A. R. RITSEMA, 1955; A. N. TANDON, 1955) showed good agreement in spite of the fact that these authors have used 4—5 times as many observations. In a particularly favourable case (HINDU KUSH, Jan. 9, 1933), 14 reliable observations of the initial motion of P waves gave the same result as 7 times as many observations, used by RITSEMA. Nevertheless, as many reliable observations as possible should be used for earthquake mechanism studies.

Allgemeines zur Rekonstruktion herdmchanischer Vorgänge bei Erdbeben

Mit plötzlichen Dislokationen verbundene geotektonische Vorgänge lassen sich rekonstruieren, wenn das Netz der Erdbebensta-

tionen eine genügende Anzahl von Beobachtungen über die Richtung der ersten Bodenbewegung an der Erdoberfläche liefert. Die Grundlage für die Rekonstruktion eines derartigen Vorganges besteht im gesetzmässigen Zusammenhang zwischen der räumlichen Orientierung und der Tiefenlage eines Scherungsbruches einerseits, und den Impulsrich-

¹ Nach einer, an der Württembergischen Hauptstation für Erdbebenforschung ausgeführten Dissertation der T. H. Stuttgart.

tungen der von ihm ausgehenden longitudinalen Raumwellen andererseits. Bei einem Beben werden in bestimmten Zonen Dilationsimpulse beobachtet, während die übrigen Gebiete von Compressionsimpulsen getroffen werden. Bei dem stetigen Übergang von Compression zu Dilatation im Erdkörper, bzw. bei jedem Vorzeichenwechsel der Impulsrichtung der direkten longitudinalen Raumwelle muss der Wert 0 durchlaufen werden. Dies ist in den Knotenflächen der Fall. Nach der allgemein herrschenden Vorstellung liegt eine Knotenfläche zwischen den beiden Bruchflächen eines Scherungsbruches.

Die Knotenflächen kann man in sehr grober Näherung mit Kugelschalen vergleichen, die ihre konkave Seite stets der Erdoberfläche zukehren. In Wirklichkeit weichen sie jedoch stark von dieser Form ab, da sie ja von Strahlen longitudinaler Wellen umschlossen, bzw. erfüllt sind. Die Kenntnis ihrer Lage im Erdkörper ist für ein Erdbeben zwangsläufig mit dem Wissen um die Orientierung der beiden Scherungskräftepaare im Hypozentrum, und damit ganz allgemein um den Herdvorgang identisch. Man nennt die beiden durch die Knotenflächen abgeschnittenen Kalotten zweckmässig »Nebenräume«. Ausserhalb dieser Nebenräume erstreckt sich der »Grossraum«, der die entgegengesetzte Impulsrichtung der ersten longitudinalen Raumwelle aufweist wie jene. Ist die Herdtiefe $h > 0$ so durchdringen sich die beiden Nebenräume, wobei ihre Knotenlinien auf der Erdoberfläche ein sphärisches Zweieck bilden. Der diesem Bereich anliegende Teil des Erdkörpers führt analog zum Grossraum die Bezeichnung »Kleinraum«. Für $h \rightarrow 0$ verschwindet er praktisch vollkommen. Die Existenz des durch Überschneidung beider Knotenlinien gebildeten sphärischen Zweiecks kann dann nur bei Vorhandensein sehr herdnaher Stationen nachgewiesen werden.

Die Analyse der Herdvorgänge der in dieser Veröffentlichung behandelten Erdbeben geschieht im Wesentlichen mit Hilfe der Byerlyschen Methode. Es muss jedoch schon eingangs erwähnt werden, dass der Idealzustand — zwei unmittelbar benachbarte Stationen weisen gegensätzliche erste Bodenbewegung auf — wie zu erwarten, selten zur genauen Festlegung einer, oder gar beider Knotenlinien dienen kann. Die Annahme der beiden Knotenlinien ist häufig in gewissen Grenzen variabel.

Tellus IX (1957), 1

Das Beobachtungsmaterial und seine Darstellung — (Methodik der Untersuchung herdmechanischer Vorgänge)

Aus einer, im Jahre 1952 an der Württembergischen Hauptstation für Erdbebenforschung in Stuttgart erfolgten Zusammenstellung von etwa 1500 Weltbeben der Jahre 1931—1951, die mit erkennbarem Richtungssinn der ersten Bodenbewegung aufgezeichnet worden waren, wurden 11 für herdmechanische Studien ausgewählt (MÜHLHÄUSER, 1953). Massgebend waren dabei vor allem Aufzeichnungen solcher Stationen, von denen auf Grund ihrer Instrumentierung mit Benioff-, Galitzin-, Grenet-, Hiller- oder Sprengnetherseismographen zuverlässige Angaben über die Richtung der ersten Bodenbewegung bei den betr. Erdbeben zu erwarten waren. Die Beobachtungsangaben solcher Stationen werden in den Figuren durch vollflächige Bewegungssymbole dargestellt, während die übrigen nur konturiert wiedergegeben sind.

In jeder Figur ist der Herdvorgang in einer kleinen Kartenskizze des Epizentralgebietes dargestellt.

1. Alaska — Pazifik, 17. 11. 1938 — 03h54m34s.

55,6° N—157,7° W

Beobachtungsstationen:

1 Manila	iP	C	12 Toledo	iP	D
2 Hongkong	P	C	13 Triest	iP	C
3 Vladivostok	iP	D	14 Kopenhagen	iP	C
4 Christchurch	iP	C	15 Hamburg	iP	C
5 Pasadena	iP	D	16 Stuttgart	iP	C
6 Tucson	iP	D	17 Zürich	eP	C
7 Weston	iP	C	18 Strassburg	iP	C
8 Helwan	iP	D	19 De Bilt	iP	C
9 Moskau	P	C	20 Uccle	iP	C
10 Pulkovo	P	C	21 Kew	iP	C
11 Rom	iP	C	22 Ksara	iP	C

a) Herdlage: Die hauptsächlich mesozoisch gefalteten Gebirgsketten der Kordilleren setzen sich im Norden im Hochland von Alaska in südwestlicher Richtung fort. Der Herd liegt am Ostrand des Aleuten-Grabens in normaler Tiefe. Die Entfernung des Epizentrums von der Küstenlinie beträgt etwa 65 km. Der Herd fügt sich nach Lage, Tiefe und Richtung der ersten Bodenbewegung in Pasadena (BÅTH, 1952) und Stuttgart (MÜHLHÄUSER, 1953) zwanglos in die für diese Region bekannte Regelmässigkeit ein.

b) Herdvorgang: Die Beobachtungsangaben

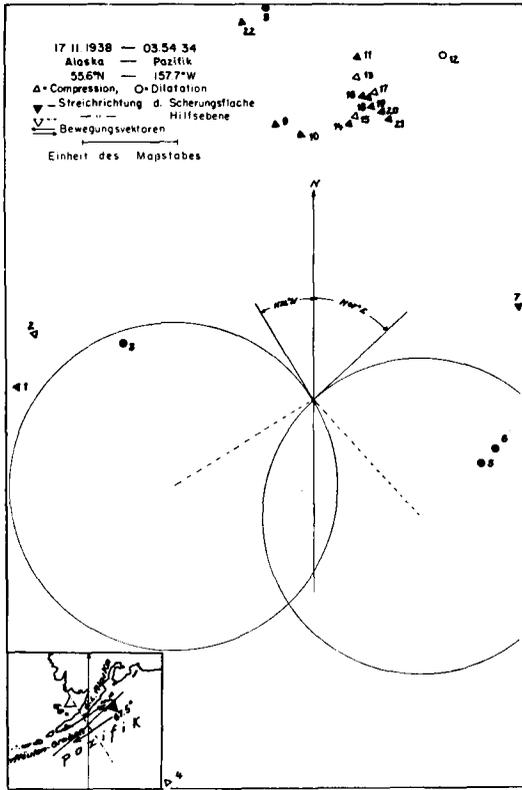


Fig. 1.

weisen besonders im Norden eine überdurchschnittliche Dichte auf. Hier liegen in einem Sektor von 33° ausser den europäischen Stationen noch Helwan und Ksara. Mit Ausnahme Toledos, Belgrads und Helwans liegt in diesem Sektor Compression vor.

Manila, Hongkong und Vladivostok legen einen westwärts gerichteten Sektor fest. Das herdnähere Vladivostok gibt Dilatation, die ferneren Stationen Manila und Hongkong Compression an.

In südwestlicher Richtung liegt Christchurch mit Compression.

Der nach Osten gerichtete amerikanische Sektor weist im Norden Compression auf (Weston), während die südlichen Stationen Tucson und Pasadena Dilatation angeben. Die zwischen beiden Bereichen liegenden Stationen Florissant und St. Louis sind nicht in der Lage, die Richtung der ersten Bodenbewegung anzugeben. Wahrscheinlich rührt dies von der Nähe der Knotenlinie her.

Die dem Epizentrum am nächsten liegenden Stationen sind im Westen Vladivostok, im Osten Pasadena und Tucson. Alle drei Stationen haben Dilatation beobachtet. Die Vermutung liegt daher nahe, dass die beiden Nebenräume Bereiche mit Dilatation sind. Im Widerspruch hierzu stehen die Angaben von Helwan (8) und Toledo (12). Diese beiden Stationen können ihrer Lage nach nicht auf der Oberfläche der beiden Nebenräume liegen, da sie vom Epizentrum eine Zone mit Compression trennt. Ein Vergleich der theoretischen Laufzeit mit der beobachteten zeigt für die Angabe von Helwan eine Verzögerung des P-Einsatzes von 7 Sekunden (H. JEFFREYS und K. E. BULLEN, 1940). Bei der Auswertung des Seismogrammes wurde wahrscheinlich erst die der Compression nachfolgende Dilatation als P-Einsatz angesprochen. Ähnliche Fehldeutungen liegen möglicherweise auch für Belgrad und Toledo vor.

Nach der Byerlyschen Formulierung steht die Hilfsebene (d. i. die dem sekundären Scherungskräftepaar zugehörige Knotenfläche) senkrecht auf dem, den Bruch bewirkenden primären Scherungskräftepaar. In Karte 1 streicht die nach Südosten einfallende Fläche unter einem Winkel von 47° E. Diese Richtung entspricht ungefähr dem integrierten Verlauf der Küstenlinie in diesem Bereich. Die Annahme, dass diese Fläche die Scherungsfläche ist, liegt daher nahe. Sie fällt unter einem Winkel von $\sigma_1 = 68^\circ$ ein. Der Ergänzungswinkel zu 90° ist 22° . Die Hilfsebene ist also so zu konstruieren, dass eine im Epizentrum auf der Streichrichtung der Scherungsfläche senkrecht stehende Gerade in sie zu liegen kommt, wenn sie unter einem Winkel von 22° nach Nordwesten eintaucht. Die so bedingte Ebene streicht $N 32^\circ W$ und fällt unter einem Winkel von $\sigma_2 = 68^\circ$ gegen Südwesten ein.

Der Herdvorhang vollzog sich unter der Annahme, die $N 47^\circ E$ streichende, und unter 68° nach Südosten einfallende Ebene sei die Bewegungsfläche, folgendermassen: Die pazifische Seite bewegte sich relativ zur kontinentalen unter einem Winkel von $(90 - \sigma_1) = 22^\circ$ nach oben und gleichzeitig in südwestlicher Richtung. Die Projektion dieser Bewegungsrichtung in die Kartenebene ist $S 58^\circ W$.

In Figur 1 ist das Ergebnis der Rekonstruktion der den Bruch bewirkenden Scherungs-

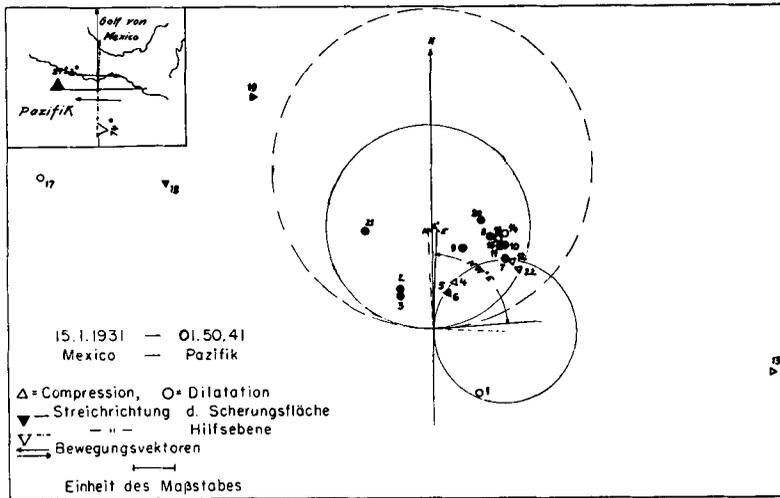


Fig. 2.

kräfte eingezeichnet. Die in der Randskizze mit einem vollflächigen Dreieck versehene Gerade stellt die Streichrichtung der wahrscheinlichen Verschiebungsfläche dar, entsprechend strich-punktiert die der Hilfsebene. Die bei den Dreiecken stehenden Gradzahlen geben die Neigung der betr. Ebene an. Die Dreiecke weisen in die Einfallsrichtung. Die beiden parallelen Pfeile symbolisieren das primäre Scherungskräftepaar. Zeigt ein Pfeil gegen die Streichrichtung auf der Einfallsseite, so ist damit der obere Vektor symbolisiert und umgekehrt.

2. Mexiko — Pazifik, 15. I. 1931 — 01h50m41s.
16,4° N — 96,3° W

Beobachtungsstationen:

1 La Plata	iP	D	12 Toledo	iP	C
2 Berkeley	iP	D	13 Tananarivo	ePKP	C
3 Pasadena	iP	D	14 Wien	iP	D
4 Toronto	iP	C	15 Göttingen	iP	D
5 Florissant	iP	C	16 Hamburg	iP	D
6 St. Louis	iP	C	17 Batavia	iPKP	D
7 Kew	iP	D	18 Manila	iPKP	C
8 Kopenhagen	iP	D	19 Zi-Ka-Wei	ePKP	C
9 Scoresby-SundiP	iP	D	20 Pulkovo	?	D
10 Strassburg	iP	D	21 Vladivostok	?	D
11 Uccle	iP	D	22 Cartuja	iP	C

a) Herdlage: Der Herd liegt in der Küstenzone Pazifik-Cordillere, am Ostrand des Acapulco-Grabens. Im Gegensatz zu der im übrigen amerikanischen Küstenbereich vor-

herrschenden Nordwest-Südostrichtung der Faltengebirgsketten überwiegt im Herdbereich die Ost-Westrichtung, gleichsam als ob durch eine Bewegung der amerikanischen Kontinentalerschollen nach Süden hier eine Stauzone vorliegen würde, deren Streichrichtung senkrecht auf der Bewegungsrichtung steht.

b) Herdvorgang: Sämtliche beobachtenden Stationen verteilen sich auf eine, vom Epizentrum aus gesehen, nordöstliche Hemisphäre. Wegen der grossen Epizentraldistanzen von Tananarivo ($\Delta = 145,5^\circ$), 13, und Manila ($\Delta = 131,9^\circ$), 18, können die Nebenräume keine Bereiche mit Compression sein.

Ein Kreis ist genau festgelegt. Er umschliesst sämtliche Stationen mit Compression innerhalb einer Herdentfernung von $\Delta = 82,3^\circ$, ausserdem la Paz mit Dilatation und geht durch das Epizentrum. Weiterhin muss dieser Kreis zwischen Kew (Dilatation) und Toledo (Compression) verlaufen. Eine Fläche, die diesem Kreis entspricht, streicht im Epizentrum $N 2^\circ E$ und fällt unter einem Winkel von $\sigma_1 = 74^\circ 20'$ gegen Osten ein. Diese Werte legen den zweiten Kreis innerhalb gewisser Grenzen fest, auf Grund der Rechtwinkligkeitsbeziehung zwischen primärem Scherungskräftepaar und Hilfsebene. Der zweite Kreis muss sämtliche Stationen mit Dilatation, und ausserdem die im ersten liegenden mit Compression einschliessen. Da er darüberhinaus die Rechtwinkligkeitsbedingung erfüllen muss ergeben

sich für ihn folgende Lagewerte: Die kleinste mögliche Fläche streicht im Epizentrum N 87° E und fällt unter einem Winkel von 79° gegen Norden ein. Die Maximalfläche ist durch zwei Bedingungen festgelegt, denen sie genügen muss: 1. Die Radien der beiden Kreise können keinen kleineren Winkel als 90° miteinander bilden, da die Senkrechte auf der Streichrichtung einer Fläche im Epizentrum in der zweiten Fläche liegen muss. 2. Die Knotenlinie muss zwischen Epizentrum und Zi-Ka-Wei (19) verlaufen. Diese Forderungen erfüllt eine Fläche, die genau in Ost-Westrichtung streicht und unter einem Winkel von 83° gegen Norden einfällt.

Das Übereinstimmen der Streichrichtung dieser Fläche mit dem Küstenverlauf gibt dieser bei der Wahl der Bewegungsfläche den Vorzug vor der nach Osten einfallenden. Demnach streicht die Scherungsfläche etwa Ost—West $\pm 2^\circ$ und fällt unter einem Winkel von $\sigma_2 = 81 \pm 2^\circ$ nach Norden ein. In diesem Fall ist der mechanische Vorgang im Herd durch ein relatives Untertauchen der pazifischen Masse unter den Kontinentalrand, bei gleichzeitiger Ost-Westbewegung, zu erklären. Der Bewegungsvektor weist eine Neigung von $(90^\circ - \sigma_1) = 15^\circ 40'$, bei einer Streichrichtung von N 88° W (in der Horizontalprojektion) auf.

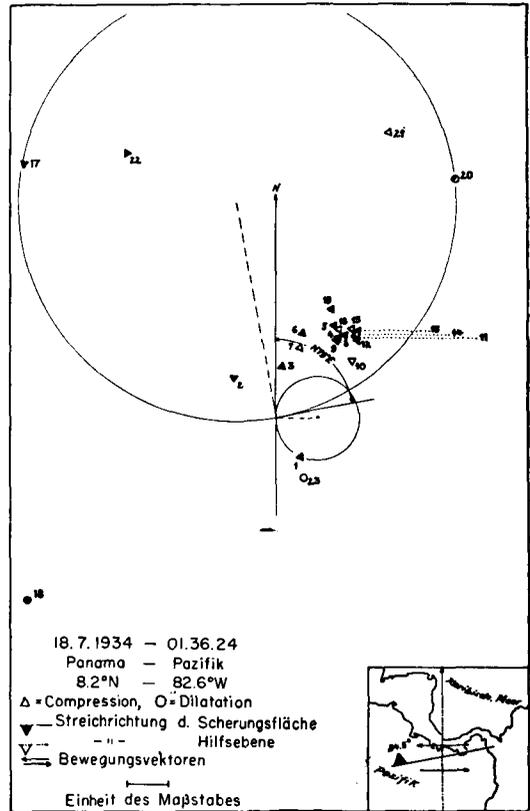


Fig. 3.

3. Panama — Pazifik, 18. 7. 1934 — 01h36m29s.
8,2° N — 82,6° W

Beobachtungsstationen:

1 La Paz	iP	C	13 Belgrad	iP	C
2 Pasadena	iP	C	14 Zagreb	eP	C
3 Washington	iP	C	15 Wien	iP	C
4 Kew	iP	C	16 Hamburg	iP	C
5 Kopenhagen	iP	C	17 Manila	iPKP	C
6 Scoresby-Sund	iP	C	18 Riverview	iP	D
7 Ivigtut	iP	C	19 Pulkovo	i	C
8 Strassburg	iP	C	20 Baku	eP	D
9 Uccle	iP	C	21 Tashkent	?	C
10 Cartuja	iP	C	22 Vladivostok	?	C
11 Triest	iP	C	23 La Plata	iP	D
12 Firenze	iP	C			

a) Herdlage: Der Herd liegt südöstlich Kap Burica in der pazifischen Grenzzone. Die von Osten kommenden tertiären Falten der mittelamerikanischen Cordilleren biegen im Hinterland des Herdgebietes nach Nordwesten um.

b) Herdvorgang: Der Lage der Beobachtungspunkte in Figur 3 zufolge müssen die Nebenräume Bereiche mit Compression sein, da es keine Knotenlinien gibt, welche die Sta-

tionspunkte mit Dilatation umschliessen und gleichzeitig sinngemäß gegen die Beobachtungsstationen mit Compression abgrenzen.

Für die beiden Kreise von Bewegungs- und Hilfebene bestehen folgende Konstruktionsbedingungen: Der erste muss alle Stationen mit Compression, ausgenommen La Paz (1), umschliessen und zwischen Tashkent (21) mit Compression und Baku (20) mit Dilatation verlaufen. Durch die letztgenannte Bedingung ist seine Größe in gewissen Grenzen festgelegt. Der zweite Kreis muss im Südosten zwischen La Paz (1) und La Plata (23) hindurchgehen. Die Möglichkeiten, die zur Konstruktion beider Kreise — jeden für sich betrachtet — bestehen, werden durch die Rechtwinkligkeitsbeziehung zwischen Bewegungsvektoren und Hilfebene auf eine einzige zurückgeführt. Sie genügt jedoch der theoretischen Gesetzmässigkeit insofern nicht, als die Streichrichtung des kleinen Kreises genau nach Norden weist, anstelle von 48° W.

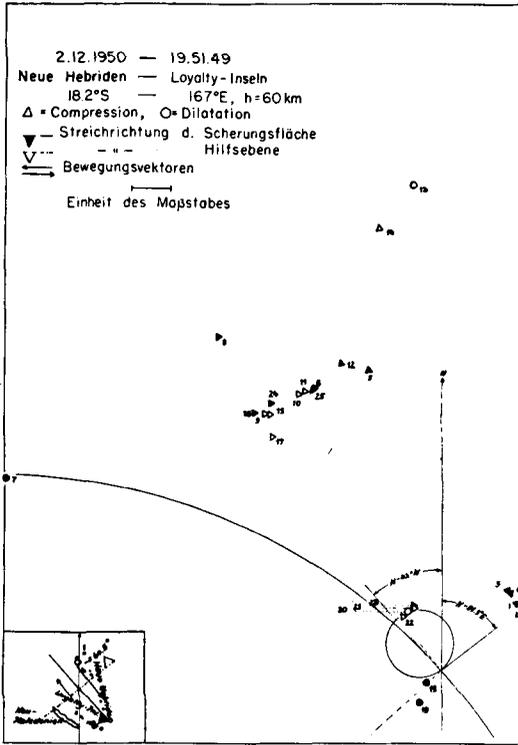


Fig. 5.

5. Neue Hebriden—Loyalty-Inseln, 2. 12. 1950 — 19h51m49s. — 18,2° S — 167° E. h = 60 km

Beobachtungsstationen:

1 Berkeley	iP	C	14 Lissabon	?PKP	C
2 Pasadena	iP	C	15 Triest	iPKP	C
3 Seattle	iP	C	16 Rom	iPKP	C
4 Victoria	iP	C	17 Belgrad	ePKP	C
5 Kew	iPKP	C	18 Riverview	iP	D
6 Strassburg	iPKP	C	19 Brisbane	iP	D
7 Tamanrasset	iPKP	D	20 Sumoto	?	D
8 Alger	iPKP	C	21 Sendai	?	C
9 Basel	ePKP	C	22 Nagasaki	?	C
10 Chur	ePKP	C	23 Morioka	?	C
11 Zürich	ePKP	C	24 Firenze	?	C
12 De Bilt	iPKP	C	25 Stuttgart	iPKP	C
13 Cartuja	iPKP	D			

a) Herdlage: Der Herd liegt in einem SO—NW gerichteten Senkungsfeld des pazifischen Untergrundes, zwischen den Neuen Hebriden und den Loyalty-Inseln. Dieses Senkungsfeld wird im Osten von dem in gleicher Richtung streichenden Hebriden-Rücken gegen die innerpazifische Tiefseeflur abgeschlossen.

b) Herdvorgang: Die Verteilung von Compression und Dilatation weist ähnliche Züge auf wie beim Kermadekbeben vom 10. 12. 1950, jedoch sind hier die beiden Einsatzsymbole vertauscht. Durch die Lage Sumotos (20), das mit Dilatation verzeichnet ist, scheidet die Möglichkeit aus, die dargestellten Beobachtungspunkte im Compressionsbereich mit einer Knotenlinie zu umschliessen. Es ergibt sich daher die Notwendigkeit, die Nebenräume als Dilatationsbereiche anzunehmen und beide Kreise so zu legen, dass sie die dargestellten Stationen mit Dilatationsangabe umfassen, und gegen die übrige Fläche des Gross-, sowie des Kleinraumes abgrenzen. Eine Knotenlinie ist durch die Lage Sumotos (20) zwischen Sendai (21) und Nagasaki (22) genau festgelegt. Die diesem Kreis zukommende Fläche streicht im Epizentrum N 51,5° E und fällt unter einem Winkel von $\sigma_1 = 60,5^\circ$ gegen Nordwesten ein. Die zweite Knotenlinie umschliesst Tamanrasset (7), Riverview (18) und Brisbane (19) mit Dilatation. Für die Streichrichtung der zweiten Fläche ergibt sich der Wert N 42° W und ein Einfallswinkel von $\sigma_2 = 88^\circ$ gegen SW.

Die auf Dilatation lautende Angabe über die Richtung der ersten Bodenbewegung in Cartuja (13) beruht offensichtlich auf einer Fehldeutung des ersten Einsatzes im Seismogramm. Bei einem Vergleich der theoretischen Laufzeit (H. JEFFREYS and K. E. BULLEN 1940) mit der beobachteten ergibt sich für die letztgenannte eine Verspätung der direkten longitudinalen Welle von 19,2 Sekunden. Die Beobachtungsangabe Cartujas beruht auf der Registrierung der E-Komponente, da eine Vertikalbewegung wohl nicht mit genügender Deutlichkeit aufgezeichnet wurde.

Die gute Übereinstimmung in der Streichrichtung der gegen SW einfallenden Ebene mit dem Verlauf der Inselkette der Neuen Hebriden bzw. Neu-Kaledoniens und der zwischen beiden sich erstreckenden Tiefzone weist dieser Fläche mit grosser Wahrscheinlichkeit die Funktion der Scherungsebene zu. Unter dieser Voraussetzung bewegt sich die innerpazifische Seite entlang einer unter 88° gegen SW einfallenden Ebene abwärts und gleichzeitig in Richtung S 38,5° E. Die Bewegungsrichtung schliesst im Epizentrum mit der Horizontalen einen Winkel von $(90^\circ - \sigma_1) = 29,5^\circ$ ein.

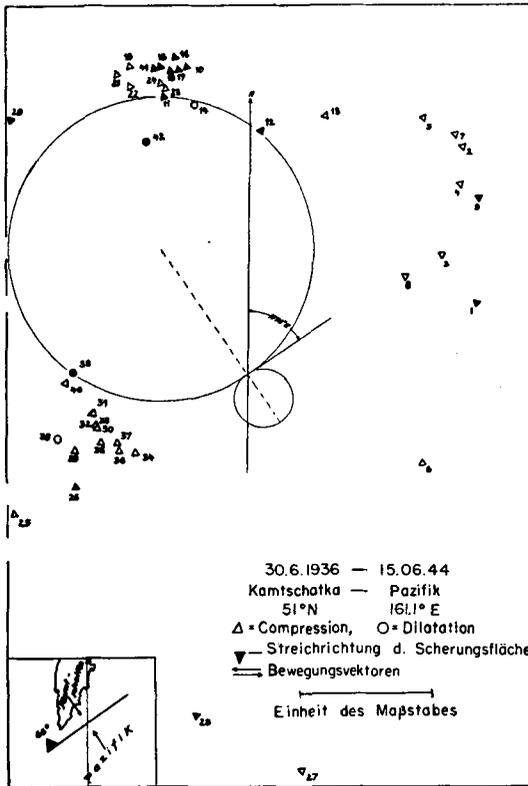


Fig. 6.

6. Kamtschatka — Pazifik, 30. 6. 1936 — 15h06m44s.
51° N — 161,1° E

Beobachtungsstationen:

1 Pasadena	iP	C	22 Wien	iP	C
2 Harvard	iP	C	23 Göttingen	iP	C
3 Bozeman	iP	C	24 Hamburg	iP	C
4 Chicago	iP	C	25 Batavia	iP	C
5 East Madias	?	C	26 Manila	iP	C
6 Honolulu	iP	C	27 Christchurch	iP	C
7 Philadelphia	iP	C	28 Riverview	iP	C
8 Sitka	iP	C	29 Taihoku	P	C
9 Florissant	iP	C	30 Husan	iP	C
10 Kew	iP	C	31 Keizyo	iP	C
11 Kopenhagen	iP	C	32 Zinsen	iP	C
12 Scoresby-Sund	iP	C	33 Taikyu	iP	C
13 Ivigtut	iP	C	34 Numadu	iP	C
14 Bergen	iP	D	35 Hukuoka	.P	C
15 Strassburg	iP	C	36 Kobe	iP	C
16 Paris	iP	C	37 Toyooka	P	C
17 Uccle	iP	C	38 Chiufeng	iP	D
18 De Bilt	iP	C	39 Hongkong	P	D
19 Triest	iP	C	40 Nangking	iP	C
20 Ksara	iP	C	41 Stuttgart	iP	C
21 Zagreb	iP	C	42 Moskau	iP	D

Tellus IX (1957), 1

a) Herdlage: Der Herd liegt im nördlichen Bereich der grossen nordwestpazifischen Störungszone, im Mittelteil des Kamtschatkagrabens. Das Hypozentrum ist das nördlichste der folgenden Reihe von Beben aus der nordwestpazifischen Zone.

b) Herdvorgang: Die auf Dilatation lautenden Angaben machen weniger als 10 % des reichhaltigen Beobachtungsmateriales aus. Dies ist der Grund, weshalb nur eine Knotenlinie durch Beobachtungsstationen belegt werden kann. Stationen, die als erste Beobachtung Compression angeben sind in fast sämtlichen Azimuten vorhanden. Der Grossraum stellt somit offensichtlich einen Bereich mit Compression dar.

Eine Knotenfläche ist, wie Figur 6 zeigt, mit grosser Genauigkeit festgelegt. Ihre kreisförmige Begrenzung muss die Stationen, Bergen (14), Moskau (42) und Chiufeng (38) mit Dilatation einschliessen. Kopenhagen (11) liegt mit Compression in unmittelbarer Nähe dieses Kreises, sodass dieser sowohl nach Durchmesser als auch nach Lage bestimmt ist. Der Einfallswinkel dieser Knotenfläche ist $\sigma_1 = 66^\circ 20'$, ihre Streichrichtung beträgt N $55,5^\circ$ E.

Für die Definition der zweiten Knotenebene besteht nur die Möglichkeit, die Neigung dieser Fläche der Forderung nach zu bestimmen, dass primäres Scherungskräftepaar und Hilfeebene aufeinander senkrecht stehen. Von den zahlreichen Möglichkeiten, die es für die Lage der zweiten Knotenfläche gibt, stellt die in Figur 6 gewählte die einfachste Lösung dar. Bei gleicher Streichrichtung wie Knotenebene 1 kommt ihr ein Einfallswinkel von $(90^\circ - \sigma_1) = 23^\circ 40'$ zu.

Die Streichrichtung der gegen Nordwesten einfallenden Knotenebene entspricht ungefähr dem integrierten Verlauf des Kamtschatkagrabens, sodass sie wohl als Scherungsfläche angesehen werden darf. Wird die Hilfeebene so gewählt wie es auf Figur 6 der Fall ist, vollzog sich der Herdvorgang folgendermassen: Entlang einer unter $66^\circ 20'$ nach NW einfallenden, N 55° E streichenden Bewegungsebene, schiebt sich die pazifische Masse relativ unter die eurasische Randzone hinab.

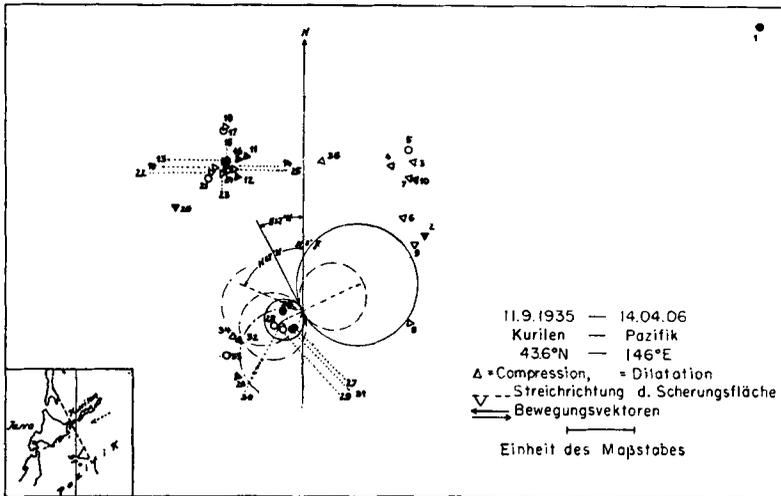


Fig. 7.

7. Kurilen — Pazifik, 11. 9. 1935 — 14.04.06.
43,6° N — 146° E

Beobachtungsstationen:

1 La Paz	iPKP	D	19 Triest	iP	C
2 Pasadena	iP	C	20 Ksara	iP	C
3 Harvard	iP	C	21 Belgrad	iP	D
4 Toronto	iP	C	22 Zagreb	eP	C
5 Charlottesville	iP	D	23 Wien	iP	C
6 Bozeman	?	C	24 Leipzig	iP	C
7 Chikago	?	C	25 Göttingen	iP	C
8 Honolulu	?	C	26 Manila	iP	C
9 Ukiah	?	C	27 Tyosen	iP	D
10 Florissant	?	C	28 Husan	iP	D
11 Kew	iP	C	29 Kobe	iP	D
12 Kopenhagen	iP	C	30 Toyooka	eP	D
13 Zürich	eP	C	31 Tokyo	?	D
14 Strassburg	i	D	32 Zi-Ka-Wei	iP	C
15 Stuttgart	iP	C	33 Hongkong	P	D
16 Uccle	iP	C	34 Nanking	iP	C
17 Cartuja	iP	D	35 Vladivostok	iP	D
18 San Fernando	P	C			

a) Herdlage: Der Herd liegt 50 km östlich des Ostkaps der japanischen Nordinsel Jesso, in unmittelbarer Nähe des Bereiches in welchem die Inselkette der Kurilen gegen den japanischen Inselbogen stösst. Das Herdgebiet ist ausserdem durch die Nähe des Japangrabens ausgezeichnet, in den der Schelfbereich auf der Höhe des Epizentrums abbricht.

b) Herdvorgang: In den mit Beobachtungsstationen besetzten Kreisabschnitten lassen sich angesichts Figur 7 mehrere widerspruchsvolle Angaben über die Richtung der ersten Bodenbewegung feststellen. Hierher gehören im

europäischen Sektor diejenigen von Belgrad und Strassburg. Beide Stationen liegen in einem mehrfach belegten Bereich mit Compression, geben aber als Richtung der ersten Bodenbewegung Dilatation an. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei Charlottesville und Hongkong.

Wenn man annimmt, dass die Nebenräume Bereiche mit Dilatation darstellen, muss eine Knotenlinie die südwestlichen Stationen mit Dilatation umschliessen und zwischen Husan (28) und Zi-Ka-Wei (32) verlaufen. Es gibt für die Lage dieses Kreises zahlreiche Möglichkeiten. Den einfachsten Fall stellt der kleine ausgezogene Kreis dar. Er, sowie der einem Grenzfall entsprechende gestrichelte kommen Ebenen zu, die im Epizentrum N 27° W streichen. Als zweite Fläche ergänzt die dem grossen, nordwestlich liegenden Kreis angehörende Ebene mit ihrem Einfallswinkel die Neigung des kleinen südwestlichen Kreises, die 31° beträgt, zu 90°. Entsprechendes gilt für die beiden gestrichelten Kreise.

Die nördliche, bzw. südliche Grenzlage der westlichen Knotenfläche ist durch zwei fragmentarische, strich-punktierte Kreise symbolisiert. Die Streichrichtung der dem nördlichen Kreis entsprechenden Fläche ist N 8,5° E, ihr Einfallswinkel 50° gegen Westen. Die Werte für die südliche Grenzlage sind analog N 67° W und 54° SW.

Die pazifische Seite tauchte demnach beim Herdvorgang unter den Kontinentalrand hinab,

und zwar entlang einer Fläche deren wahrscheinlichste Streichrichtung (s. oben) etwa $N 27^{\circ} W$ beträgt und die unter einem Winkel von etwa $31-45^{\circ}$ gegen Südwesten einfällt. Da die Hilfsebene nicht bestimmbar ist, kann über die Neigung der Bewegungsvektoren innerhalb der Scherungsfläche nichts ausgesagt werden.

8. Japanisches Meer, 13. 11. 1932 — 04h46m45s.
 $43.4^{\circ} N - 137^{\circ} E$. $h = 330$ km

Beobachtungsstationen:

1 La Paz	iP	C	17 Sapporo	?	D
2 Berkeley	iP	C	18 Akita	?	D
3 Pasadena	iP	C	19 Morioka	?	D
4 Kew	iP	D	20 Nemuro	?	D
5 Strassburg	iP	D	21 Sendai	?	D
6 Uccle	iP	D	22 Nagano	?	D
7 Cartuja	iP	D	23 Mito	?	D
8 Belgrad	iP	D	24 Toyooka	?	D
9 Göttingen	iP	D	25 Hatidyozima	?	D
10 Hamburg	iP	D	26 Nagasaki	?	D
11 Batavia	iP	C	27 Miyazaki	?	D
12 Riverview	iP	C	28 Zi-Ka-Wei	iP	C
13 Taihoku	P	D	29 Chiufeng	iP	D
14 Zinsen	iP	C	30 Sverdlorsk	?	D
15 Hukuoka	iP	D	31 Stuttgart	iP	D
16 Kobe	iP	D			

a) Herdlage: Das Mandchurisch-Ochotskische Staffelland und der Westteil der Muldenzone, im vorliegenden Fall des japanischen Beckens, zeichnen sich durch tiefliegende Erdbebenherde aus. Frühere Bearbeitungen haben gezeigt u. a. (MÜHLHÄUSER, 1955), dass hierbei die Herdtiefen von Südosten in nordwestlicher Richtung zunehmen.

b) Herdvorgang: Figur 8 zeigt sehr deutlich, dass die Nebenräume Bereiche mit Dilatation sind, und die beiden Knotenlinien, ohne Widerspruch in der Impulsverteilung konstruiert werden können. Der erste Kreis muss die Dilatationspunkte der japanischen Stationen 15, 25, 26, 27 und 13 umschliessen. Dies ist nur möglich, wenn auch Zi-Ka-Wei mit Compression in diese Fläche einbezogen wird. Durch diese Bedingungen, sowie durch die Lage von Nemuro (20) ist diese Knotenlinie eindeutig festgelegt. Sie gehört einer Ebene an, die unter einem Winkel von $\sigma_1 = 43^{\circ} 10'$ gegen Süden einfällt und $N 82^{\circ} W$ streicht. Die zweite Knotenlinie verbindet die übrigen japanischen Stationen mit den europäischen in einen zweiten Bereich mit Dilatation ein, und

Fellus IX (1957), 1

8-609751

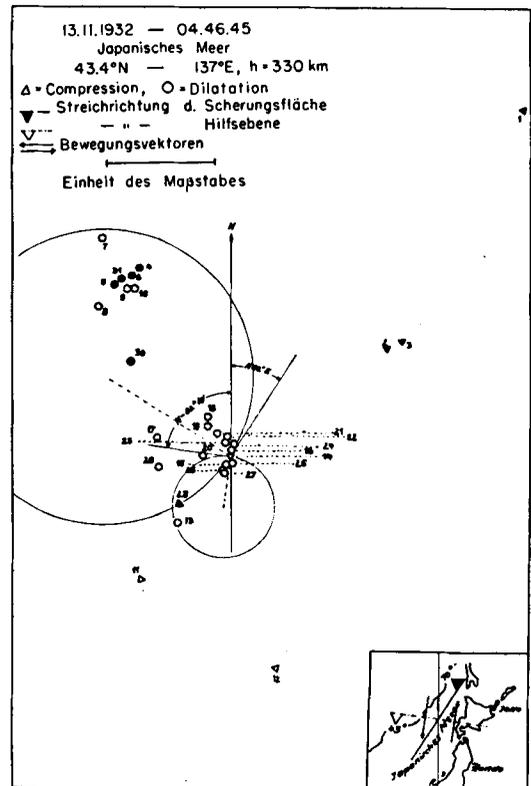


Fig. 8.

schneidet aus der ersten Kreisfläche ein Zweieck aus, in dem Zi-Ka-Wei (28) mit Compression liegt.

Die Streichrichtung der Ebene, die diesem Kreis entspricht, stimmt sehr gut mit der allgemeinen, NE—SW verlaufenden Richtung des Ostabbruches des Mandchurisch-Ochotskischen Staffellandes überein. Diese Tatsache weist dieser Fläche mit grosser Wahrscheinlichkeit die Funktion der Scherungsfläche zu. Unter dieser Annahme ist der mechanische Vorgang im Herd auf ein Untertauchen der südöstlichen, dem Pazifik zugewandten Seite unter den eurasischen Kontinent zurückzuführen. Gleichzeitig mit dieser relativen Abwärtsbewegung findet eine Verschiebung der pazifischen Seite in Richtung $N 8^{\circ} E$ statt. Die Bewegungsrichtung ist gegen die Horizontale um $90^{\circ} - \sigma_1 = 46^{\circ} 50'$ geneigt und liegt in einer Ebene, die $N 32^{\circ} E$ streicht und unter einem Winkel von $\sigma_2 = 70^{\circ}$ gegen NW einfällt.

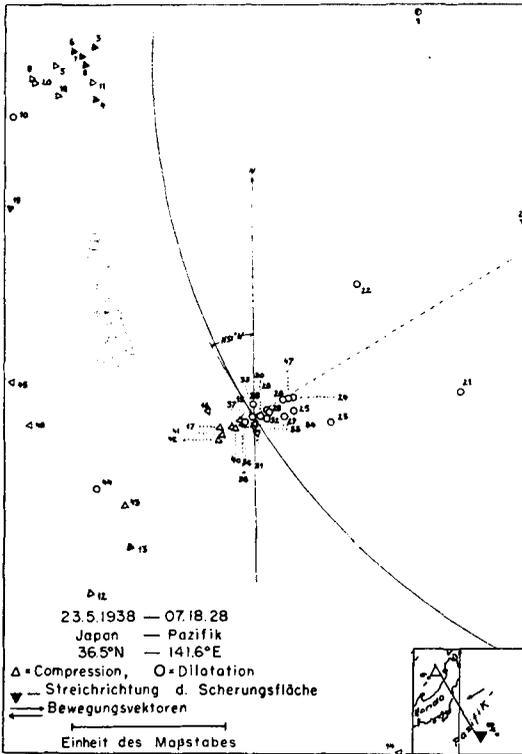


Fig. 9.

9. Japan — Pazifik, 23. 5. 1938 — 07h18m28s.
36,5° N — 141,6° E

Beobachtungsstationen:

1 Weston	eP	D	25 Kumagaya	?	D
2 Tucson	eP	C	26 Yokohama	?	D
3 Kew	iP	C	27 Maebasi	?	D
4 Kopenhagen	iP	C	28 Funatu	?	D
5 Zürich	eP	C	29 Misima	?	D
6 Paris	iP	C	30 Kofu	?	D
7 Uccle	iP	C	31 Mizusawa	?	C
8 De Bilt	iP	C	32 Nagano	?	D
9 Padua	iP	C	33 Miyako	?	C
10 Belgrad	iP	D	34 Morioka	?	D
11 Hamburg	iP	C	35 Wazima	?	D
12 Batavia	iP	C	36 Kyoto	?	C
13 Manila	iP	C	37 Toyooka	?	C
14 Christchurch	iP	C	38 Osaka	?	D
15 Koti	?P	C	39 Mori	?	C
16 Zinsen	?P	C	40 Muroto	?	C
17 Hukuoka	iP	C	41 Miyazaki	?	C
18 Prag	?	C	42 Yakusima	?	C
19 Ksara	?	C	43 Kosyun	?	C
20 Triest	?	C	44 Hongkong	?	D
21 Mito	?	D	45 Agra	?P	C
22 Tyosi	?	D	46 Calcutta	?	C
23 Utsunomyia	?	D	47 Komaba	?	D
24 Tokyo	?	D			

a) Herdlage: Der Herd liegt im Schelfbereich der pazifischen Randzone, zwischen der Ostküste Hondos und dem Westrand des Japangrabens.

b) Herdvorgang: Für dieses Beben liegen neben Beobachtungsangaben ferner Stationen vor allem sehr zahlreiche Aufzeichnungen der ersten Bodenbewegung an Nahstationen vor. Die auf Dilatation lautenden Beobachtungsangaben von Hongkong und Belgrad beruhen sehr wahrscheinlich auf Fehldeutung des ersten Einsatzes im Seismogramm, da beide Stationen in einem Bereich mit Compression liegen.

Die Nebenräume sind durch das Auftreten von Dilatation charakterisiert, da keine Bereiche mit Compression bestehen, deren Umgrenzung mit Knotenlinien den Bedingungen genügt, die an diese gestellt werden müssen. In Figur 9 muss der erste Kreis die nordöstlich vom Epizentrum liegenden Stationen umschliessen. Sein Verlauf ist durch die Lage von Wazima (35), Morioka (34) und Mori (39) festgelegt. Die diesem Kreis entsprechende Ebene streicht N 31° W und fällt unter einem Winkel von $\sigma_1 = 84^\circ$ gegen NE ein. Dabei wird allerdings Tucson (Compression) in einen Bereich mit Dilatation gelegt. Da es sich jedoch sowohl bei Weston (1) als auch bei Tucson (2) um e-Einsätze handelt, sind die Angaben beider Stationen nur bedingt zu werten.

Der zweite Kreis umschliesst einen sehr kleinen Bereich mit Dilatation in unmittelbarer Herdnähe, in dem die Stationen Wazima (35) und Kyoto (36) liegen. Seine zugehörige Fläche hat annähernd dieselbe Streichrichtung wie die oben erwähnte, und ihr Einfallswinkel ergibt sich zu $(90 - \sigma_1) = 6^\circ$. Dieser Wert entspricht dem graphisch bestimmbaren Einfallswinkel sehr genau.

Die Streichrichtung der beiden Ebenen stimmt gut mit dem Verlauf der Ostküste Hondos südlich der Epizentrumsbreite überein. Da nach den Erfahrungen, die bei anderen randpazifischen Beben gemacht wurden, die Bewegungsfläche meist eine Neigung $> 60^\circ$ aufweist, ist wahrscheinlich die unter 84° gegen Nordosten einfallende Ebene als Scherungsfläche anzusehen. Dies bedeutet, dass sich beim Herdvorgang die pazifische Seite an einer unter 84° gegen Nordosten einfallenden Fläche, relativ zum Festland, gehoben hat.

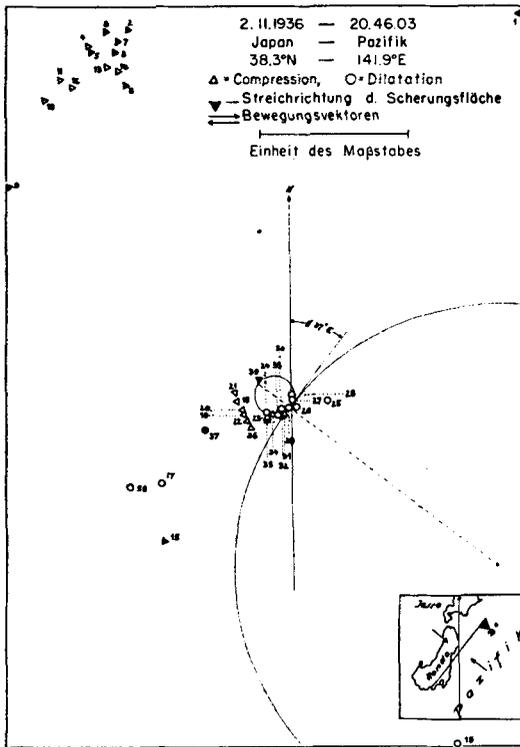


Fig. 10.

10. Japan — Pazifik, 2. 11. 1936 — 20h45m56s.
38,3° N — 141,9° E

Beobachtungsstationen:

1 Harvard	iP	C	21 Heizyo	iP	C
2 Kew	iP	C	22 Hukuoka	iP	C
3 Kopenhagen	iP	C	23 Kobe	?P	C
4 Zürich	eP	C	24 Toyooka	?P	D
5 Strassburg	iP	C	25 Sendai	?	D
6 Paris	iP	C	26 Mizusawa	?	D
7 Uccle	iP	C	27 Morioka	?	D
8 De Bilt	iP	C	28 Hatinohe	?	D
9 Ksara	iP	C	29 Tukubasan	?	D
10 Belgrad	iP	C	30 Yokohama	?	D
11 Zagreb	?P	C	31 Hunatu	?	C
12 Wien	iP	C	32 Misima	?	C
13 Göttingen	iP	C	33 Hamamatu	?	D
14 Hamburg	iP	C	34 Hikone	?	C
15 Manila	iP	C	35 Sumoto	?	C
16 Christchurch	eP	D	36 Miyazaki	?	C
17 Taihoku	?P	D	37 Zi-Ka-Wei	iP	D
18 Husan	iP	C	38 Hongkong	?P	D
19 Taikyu	iP	C	39 Vladivostok	iP	C
20 Keizyo	iP	C	40 Bergen	iP	D

a) Herdlage: Die Herdlage dieses Bebens stimmt hinsichtlich der Breite annähernd mit der vom 18. 6. 1933 überein. Die Entfernung

Tellus IX (1957), 1

des Epizentrums von der Nordostküste Hondos ist etwa 100 km kleiner als am 18. 6. 1933.

b) Herdvorgang: Gegen die Richtigkeit der auf Dilatation lautenden Beobachtungsangaben von Zi-Ka-Wei, Hongkong und Taihoku sprechen vor allem die zwischen Herd und diesen Stationen liegenden Punkte mit Compressionsbeobachtungen von Heizyo (21), Taikuy (19), Keizyo (20), Husan (18), Hukuoka (22) und Miyazaki (36).

Wie beim vorigen Beben sind die Nebenräume offensichtlich wieder Bereiche mit Dilatation. Für die Konstruktion der Kreise, die Bereiche mit Dilatation umschliessen, gibt es jeweils nur eine Möglichkeit. Der erste muss die Stationen Toyooka (24), Yokohama (30), Tukubasan (29), Morioka (27) und Hatinohe (28) gegen die Beobachtungspunkte Hunatu (31), Misima (32) und Hikone (34) abgrenzen. Hierdurch ist sein Verlauf genau festgelegt. Die Ebene die diesem Kreis zuzuordnen ist streicht im Epizentrum N 37° E und fällt unter einem Winkel von $\sigma_1 = 15^\circ$ gegen Nordwesten ein. Der zweite Kreis ist einerseits durch die Lage von Hunatu (31) und Misima (32) mit Compression und andererseits durch die Lage von Morioka (27) und Tukubasan (29) mit Dilatation bestimmt. Die Streichrichtung der zugehörigen Ebene ist mit der der ersten Fläche identisch. Deshalb ergibt sich ihre Neigung zu $(90^\circ - \sigma_1) = 75^\circ$ gegen Südosten. Dieses verhältnismässig steile Einfallen gibt der nach Südosten geneigten Fläche bei der Wahl der Bewegungsebene den Vorzug vor der unter einem Winkel von 15° gegen Nordwesten einfallenden.

Bei diesem Beben hob sich die Randzone der pazifischen Masse relativ zur eurasischen, entlang einer unter 75° gegen Südosten einfallenden Bewegungsebene. Eine Verschiebung in horizontaler Richtung trat hierbei nicht auf.

11. Japan — Pazifik, 17. 4. 1948 — 16h11m28s.
33° N — 135,5° E

Beobachtungsstationen:

1 Berkeley	iP	C	10 Lissabon	iP	C
2 Pasadena	iP	C	11 Helwan	iP	D
3 Kew	iP	C	12 Triest	iP	C
4 Uppsala	iP	C	13 Rom	iP	C
5 Helsinki	iP	C	14 Ksara	iP	C
6 Zürich	eP	C	15 Belgrad	iP	C
7 Strassburg	iP	C	16 Prag	iP	C
8 De Bilt	iP	C	17 Riverview	iP	D
9 Cartuja	iP	D	18 Wellington	?	C

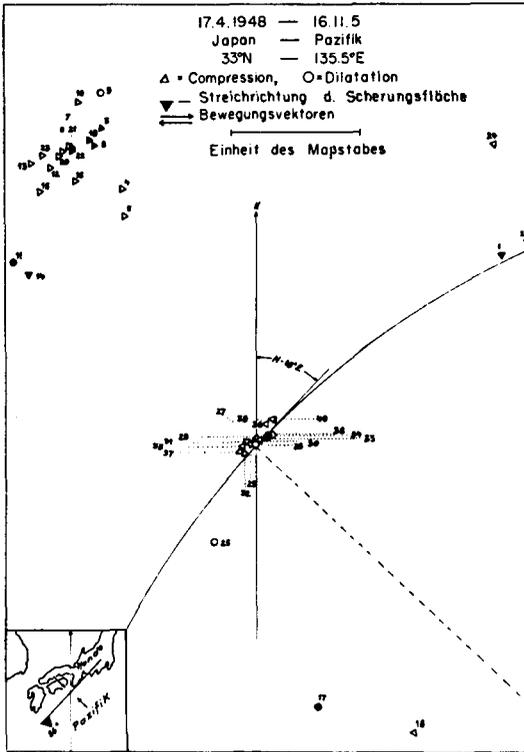


Fig. 11.

19 Uccle	?	C	30 Gifu	?	C
20 Chur	?	C	31 Hiroshima	?	C
21 Basel	?	C	32 Miyazaki	?	C
22 Stuttgart	iP	C	33 Yokohama	?	D
23 Firenze	?	C	34 Tokyo	?	D
24 Cleveland	?	C	35 Kumamoto	?	C
25 Shionomisaki	?	D	36 Kumagaya	?	C
26 Sumoto	?	D	37 Kagoshima	?	C
27 Kobe	?	C	38 Mito	?	D
28 Kyote	?	C	39 Morioka	?	C
29 Kochi	?	C	40 Miyako	?	C

a) Herdlage: Der Herd liegt vor dem Südkap Hondos in der Linschoten-Strasse, nordöstlich des Liu-Kiu-Grabens.

b) Herdvorgang: Die in Figur 11 in ihren Bewegungssymbolen dargestellten Beobachtungsstationen gestatten durch ihre dichte Lage in Herdnähe eine sehr genaue Festlegung von Scherungs- und Hilfsebene. Gleichzeitig treten die Fehlbeobachtungen von Helwan (11), Cartuja (9) und Wellington (18) deutlich als solche in Erscheinung. Für die Laufzeit der P-Welle ergibt sich für Helwan nach Jeffreys-Bullen (H. JEFFREYS and K. E. BULLEN, 1940) der Wert

743 Sekunden. Dieser weicht vom beobachteten von 757 Sekunden um 14 Sekunden ab. Diese Verspätung der P-Welle ist ein Hinweis dafür, dass die fragliche Bodenbewegung auf einen späteren Welleneinsatz zurückzuführen ist.

Die herdnahen Stationen scheidet die Möglichkeit der Existenz von Nebenräumen mit Compression aus. Die Knotenlinien müssen vielmehr Bereiche mit Dilatation umfassen. Der erste Kreis ist durch die Lage von Miyazaki (32), Sumoto (26), Gifu (30) und von Yokohama (33), ausserdem durch Tokyo (34) und Mito (38) festgelegt. Ein Kreisbogen der diesen Bedingungen genügt belässt die Stationen Berkeley (1) und Pasadena (2), wie erforderlich, im Compressionsbereich. Die diesem Kreis zukommende Ebene streicht N 43° E und fällt unter einem Winkel von $\sigma_1 = 86^\circ$ gegen Südosten ein. Unter der Annahme, dass es sich bei dieser Fläche um die Scherungsebene handelt, fällt die Hilfsebene unter einem Winkel von $(90^\circ - \sigma_1) = 4^\circ$ gegen Nordwesten ein.

Der mechanische Vorgang im Herd bestand aus einer relativen Aufwärtsbewegung des südöstlichen Teils im Hypozentrum, entlang einer unter 86° nach Südosten einfallenden Fläche.

Nachwort

Herrn Professor Dr. Wilhelm Hiller, dem Leiter des Landeserdbebendienstes Baden-Württemberg, danke ich herzlich für die Ermöglichung der vorliegenden Arbeit, sowie für wertvolle Anregungen und Literaturhinweise. In gleicher Weise möchte ich Herrn Dozenten Dr. Markus Bâth, dem Leiter des Schwedischen Erdbebendienstes, für anregende Diskussionen und freundliche Unterstützung bei der Umarbeitung für die Drucklegung herzlich danken. Die letztgenannte Arbeit wurde am Seismologischen Laboratorium des Meteorologischen Instituts der Universität Uppsala ausgeführt.

LITERATURVERZEICHNIS

BÂTH, M., 1952: Initial motion of the first longitudinal earthquake wave, recorded at Pasadena and Huancayo. *Bull. of the Seis. Soc. of America*, 42, pp. 174—195.
 BYERLY, P., 1942: *Seismology*. Prentice Hall Inc. New York, pp. 233—239.
 GUTENBERG, B. and RICHTER, C. F., 1954: *Seismicity of* Tellus IX (1957), 1

- the earth and associated phenomena*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- HODGSON, I. H. and ALLEN, I. F. I., 1954: *Tables of extended distances for PKP and PcP*. Edmond Cloutier, C.M.G.O.A., D.S.P. Queen's Printer and Controller of Stationery Ottawa.
- HODGSON, I. H. and BREMNER, P. C., 1952: Direction of faulting in the Ancash, Peru, earthquake of November 10, 1946, from teleseismic evidence. *Bull. of the Seis. Soc. of America*, **43**, pp. 121—125.
- HODGSON, I. H. and MILNE, W. G., 1951: Direction of faulting in certain earthquakes of the North Pacific. *Bull. of the Seis. Soc. of America*, **41**, pp. 221—242.
- HODGSON, I. H. and MILNE, W. G., 1953: Tables extending Byerly's fault-plane techniques to earthquakes of any focal depth. *Bull. of the Seis. Soc. of America*, **43**, pp. 49—61.
- HODGSON, I. H. and STOREY, R. S., 1954: Direction of faulting in some larger earthquakes of the 1949. *Bull. of the Seis. Soc. of America*, **44**, pp. 57—83.
- JEFFREYS, H. and BULLEN, K. E., 1940: *Seismological tables*. London office of the British Association, Burlington House, W. 1.
- MÜHLHÄUSER, S., 1953: Die Richtung der ersten Bodenbewegung in Stuttgart für die Hauptbebengebiete der Erde, als Grundlage für grosstektonische Betrachtungen. *Zeitschrift für Geophysik*. Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Sonderband 1953, Seite 78—91.
- MÜHLHÄUSER, S., 1953: *Betrachtungen über den mechanischen Vorgang im Herd bei einigen Grossbeben*. Dissertation der T. H. Stuttgart 1955.
- RITSEMA, A. R., 1955: The fault-plane technique and the mechanism in the focus of the Hindu Kush earthquakes. *Indian Journal of Meteorology and Geophysics*, **6**, pp. 41—50.
- TANDON, A. N., 1955: Direction of faulting in the Great Assam Earthquake of 15 August 1950. *Indian Journal of Meteorology and Geophysics*, **6**, pp. 61—64.