

Orthogonalisierung einiger Herdverschiebungslösungen (*)

H.-J. SCHÄFFNER

Ricevuto il 10 Agosto 1961

Bei der Fortsetzung der Arbeiten an einer tabellarischen Zusammenstellung aller aus der Literatur bekannten Verschiebungslösungen des Herdmechanismus (Teil 1 der Tabelle siehe Schäffner (6)) wurden auch die von Peronaci (4) und Di Filippo und Peronaci (1) ermittelten Lösungen einer ergänzenden Bearbeitung unterzogen, da das Orthogonalitätskriterium in der Originalbearbeitung bei der Aufstellung der Lösungen unbeachtet blieb. Mit Hilfe der für jedes Beben tabellarisch zusammengestellten Vorzeichen der verschiedenen Stationen bzw. ihrer graphischen Darstellung durch die sog. « extended positions » war es möglich, neue Lösungen aufzustellen, die dem Orthogonalitätskriterium genügen.

1. - DARSTELLUNG DES ORTHOGONALITÄTSKRITERIUMS BEIM VERFAHREN VON BYERLY.

Das Orthogonalitätskriterium wird in der Literatur mehrfach behandelt. Die ausführlichste Darstellung gibt Scheidegger (7), der in der angegebenen Studie die Äquivalenz der verschiedenen Projektionsmethoden nachweist und an einem Beispiel demonstriert. Eine Zusammenfassung, die durch Hinweise auf die Anwendung der einzelnen Methoden in der Literatur ergänzt wird, liefert Schäffner (8).

Im folgenden werden die für die Berichtigung der zur Diskussion stehenden Lösungen wichtigen Beziehungen kurz behandelt.

(*) Veröffentlichung Nr. 109 des Instituts für Angewandte Geophysik der Bergakademie Freiberg. Direktor: Prof. Dr. O. MEISSER.

Die Forderung, dass der Verschiebungsvektor (Normale der Hilfs-ebene) auf der Verschiebungsebene liegen muss, kann in verschiedener Form ausgedrückt werden, je nachdem, welche Parameter vorgegeben sind. Der einfachste und meistzitierte Zusammenhang, besteht zwischen dem Einfallen δ der Verschiebungsebene, dem Einfallen β des Verschiebungsvektors und dem Winkel φ zwischen der Streichrichtung der Verschiebungsebene und dem Azimut des Verschiebungsvektors (Abb. 1).

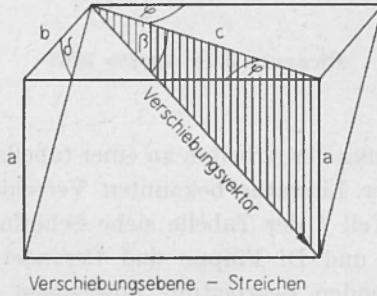


Bild 1. - Hilfsfigur zur Ableitung des Orthogonalitätskriteriums. Erläuterung im Text.

Man liest sofort ab:

$$\sin \varphi = \frac{b \cdot a}{c \cdot a} = \operatorname{ctg} \delta \cdot \operatorname{tg} \beta \quad [1]$$

Definitionsgemäss entspricht bei der stereographischen Projektion der «stripped earth» $2r_1 = \operatorname{tg} \delta$; $2r_2 = \operatorname{ctg} \beta$ (vergl. Abb. 2). Damit wird:

$$r_1 \cdot \sin \varphi = \frac{1}{4r_2} = K \quad [2]$$

Das ist in Polarkoordinaten die Gleichung einer Geraden, senkrecht zu der Achse, von der aus φ gezählt wird, im Abstand $K = \frac{1}{4r_2}$ vom Koordinatenursprung.

Wenn durch eine gegebene Vorzeichenverteilung Kreis II (I) festgelegt ist, dann muss das Zentrum von Kreis I (II) auf einer Geraden, die im Abstand K vom Ursprung parallel zur Tangente von Kreis II (I) läuft, liegen. Abb. 2 zeigt ein Beispiel mit zuerst festgelegten Kreis II. Die Orientierung der B -Achse wird aus dem Schnitt der beiden Knotenflächen gewonnen. Die $A(C)$ - und $C(A)$ -Achse liegen als Flächennormalen

von Hilfs- und Verschiebungsebene in Richtung der Verbindungsgeraden Kreismittelpunkt-Ursprung. Für die Bestimmung aller nötigen Parameter erweist sich das Wulfsche Netz als praktischer, so dass die ans graphischer Konstruktion und Rechnung gemischte Parameterbestimmung in den Byerly-Diagrammen nicht vollständig durchgeführt, sondern durch Kon-

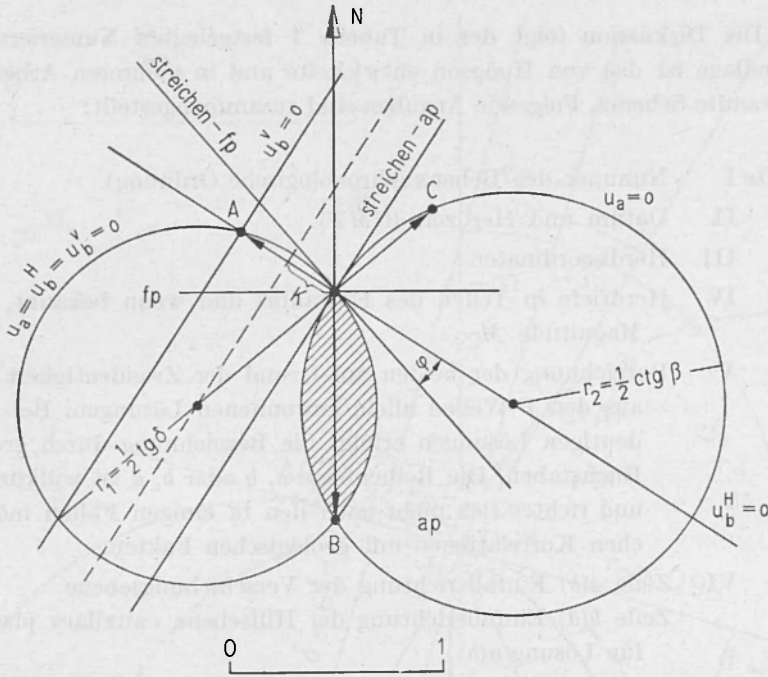


Bild 2. - Die Konstruktion der Knotenlinien nach dem Verfahren von Byerly

fp = Verschiebungsebenenkreis

ap = Hilfsebenenkreis

u_a = P-Verschiebung

u_b^H, u_b^V = Horizontal- und Vertikalkomponente der S-Verschiebung

schraffiert: Kleinraum

A, B, C Projektionspunkte des Quellachsendreibeins

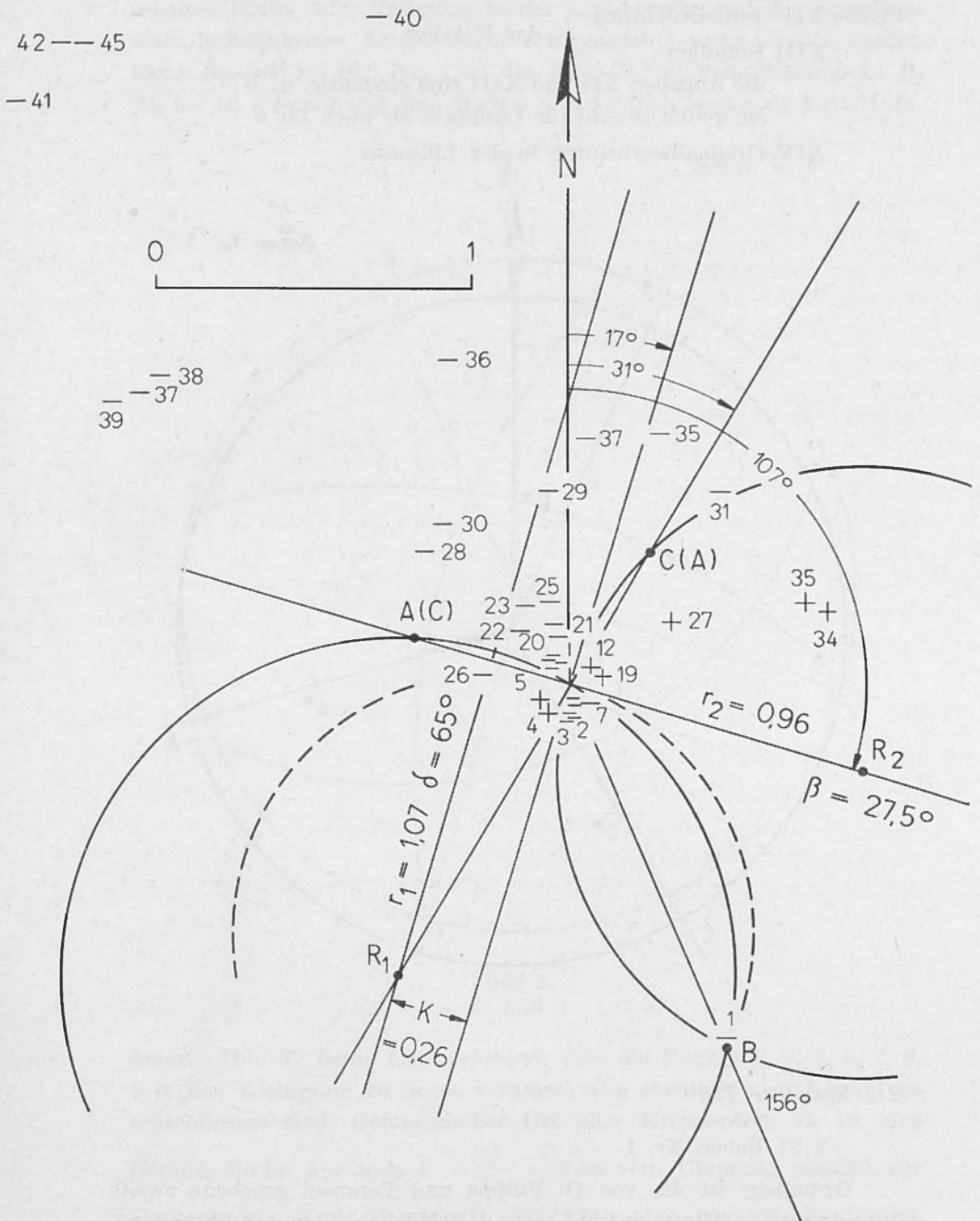
struktionen im Wulfschen Netz ergänzt und kontrolliert wird. Durch das Auftreten der tg-Beziehungen beim Byerly-Verfahren ergeben sich zusätzlich teilweise sehr ungünstige Massstabsverhältnisse, so dass aus diesem Grunde auf die Projektion mit zentral gelegenem Herd zurückgegriffen wird.

2. – DIE ÜBERARBEITUNG DER ZUR DISKUSSION STEHENDEN VERSCHIEBUNGSEBENENLÖSUNGEN.

2.1 *Tabellierung, Allgemeines.*

Die Diskussion folgt der in Tabelle 1 festgelegten Numerierung. Grundlage ist das von Hodgson entwickelte und in mehreren Arbeiten verwandte Schema. Folgende Angaben sind zusammengestellt:

| | |
|----------|--|
| Spalte I | Nummer des Bebens (chronologische Ordnung) |
| II | Datum und Herdzeit (<i>GMT</i>) |
| III | Herdkoordinaten |
| IV | Herdtiefe in Teilen des Erdradius und wenn bekannt, die Magnitude <i>M</i> |
| V | Bezeichnung der beiden auf Grund der Zweideutigkeit der aus den <i>P</i> -Wellen allein gewonnenen Lösungen. Bei eindeutigen Lösungen erfolgt die Bezeichnung durch grosse Buchstaben. Die Reihenfolge <i>a, b</i> oder <i>b, a</i> ist willkürlich und richtet sich nicht nach den in einigen Fällen möglichen Korrelationen mit geologischen Fakten. |
| VI | Zeile <i>a(b)</i> Einfallrichtung der Verschiebungsebene Zeile <i>b(a)</i> Einfallrichtung der Hilfsebene « auxiliary plane » für Lösung <i>a(b)</i> |
| VII | Zeile <i>a(b)</i> Einfallen der Verschiebungsebene für Lösung <i>a(b)</i> Zeile <i>b(a)</i> Einfallen der Hilfsebene; man beachte, dass der Verschiebungsvektor der Normalen der Hilfsebene entspricht. |
| VIII | Slipwinkel – Winkel zwischen dem Streichen der Verschiebungsebene und dem Verschiebungsvektor für Lösung <i>a</i> und <i>b</i> |
| IX | Charakterisierung des Bebentyps <i>dt</i> dextrale Verschiebung mit abschiebender Komponente <i>st</i> sinistrale Verschiebung mit abschiebender Komponente <i>dp</i> dextrale Verschiebung mit aufschiebender Komponente <i>sp</i> sinistrale Verschiebung mit aufschiebender Komponente |
| X | Relativer Betrag der Vertikalkomponente des Verschiebungsvektors auf die Einheit bezogen |
| XI | desgl. für die Horizontalkomponente |



13.4.1938

Bild 3.

- Spalte XII Einfallrichtung }
 XIII Einfallen } der B -Achse
 die Angaben XII und XIII sind eindeutig, d. h.
 sie gelten sowohl für Lösung a als auch für b
 XIV Originalbearbeitung in der Literatur.

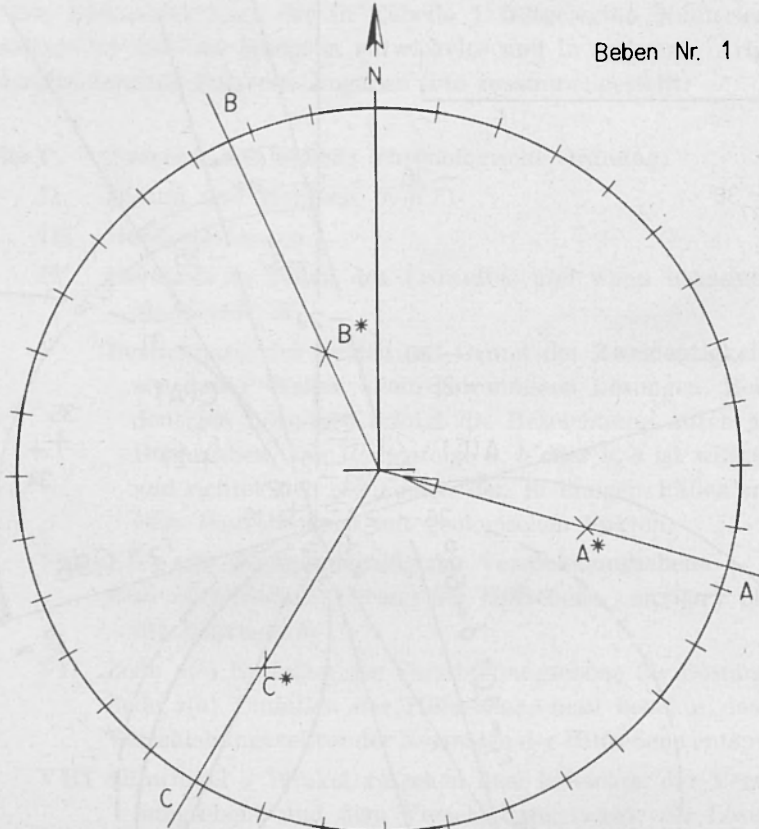


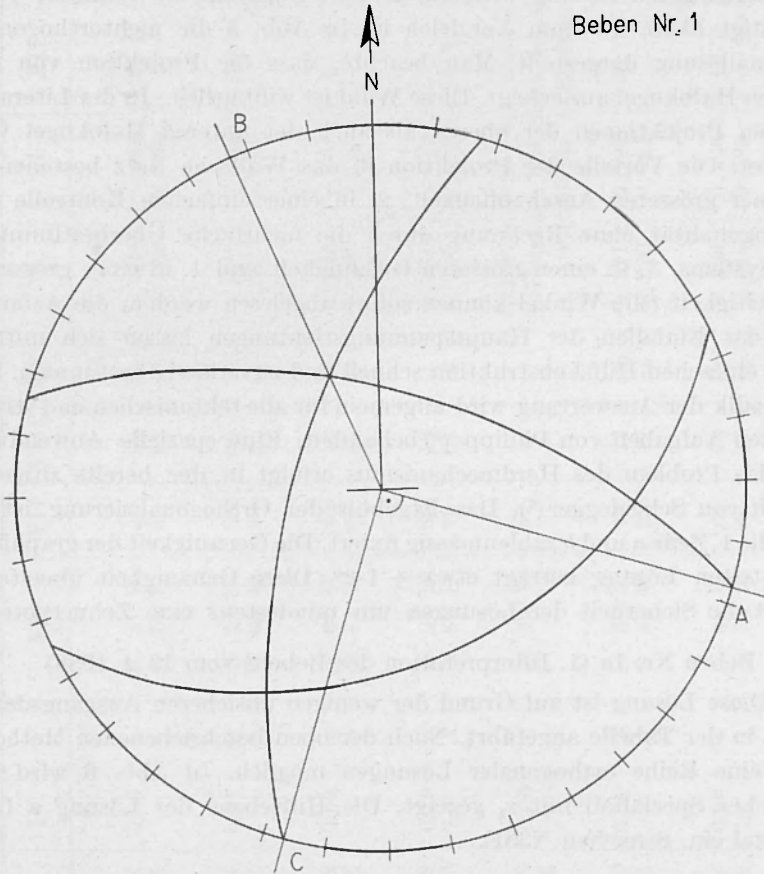
Bild 4.

2.2 Spezieller Teil

2.21 Beben Nr. 1

Grundlage ist die von Di Filippo und Peronaci gegebene zweite Interpretation. Allgemein sind stets drei Möglichkeiten zur Orthogonalisierung vorhanden; Neufestlegung von Kreis I (II) wenn Kreis II (I)

erhalten bleibt, oder Änderung beider Kreise, wenn auf der Grundlage eines beibehaltenen Kreises keine orthogonale Lösung erzielt werden kann. Speziell im Fall Nr. 1 ist der Kreis II mit dem Mittelpunkt R_2 (C_2 bei Di Filippo) und dem Radius r_2 wesentlich besser als Kreis I de-



finiert (Abb. 3). Seine Lage erfordert, dass die Punkte 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9 in den Kleinraum zu liegen kommen, also ebenfalls vom Kreis I zu umschlossen sind. Geometrischer Ort aller Kreiszentren K_1 ist eine Gerade, die im Abstand $K = \frac{1}{4r_2} = 0,26$ vom Ursprung parallel zur Tangente von Kreis II verläuft. Durch die oben genannte Forderung, dass Punkt I im Kleinraum liegen soll, wird ein Mindestradius r_1 fest-

gelegt. Man überzeugt sich leicht, dass es keine Möglichkeit gibt, Punkt 26 konsistent zu machen. Im Grenzfall $r_1 \rightarrow \infty$ wird die Gerade AOR_2 zur Knotenlinie I. Andererseits dürfte es schwer sein, bei Variation der Geraden AOR_2 eine andere Lage von Kreis II zu finden. Die Orthogonalität der berichtigten Lösung wird durch die Projektion ins Wulfsche Netz bestätigt (Abb. 4). Zum Vergleich ist in Abb. 5 die nichtorthogonale Originallösung dargestellt. Man beachte, dass die Projektion von der oberen Halbkugel aus erfolgt. Diese Wahl ist willkürlich. In der Literatur werden Projektionen der oberen als auch der unteren Halbkugel verwendet. Die Vorteile der Projektion in das Wulfsche Netz bestehen 1. in einer grösseren Anschaulichkeit, 2. in einer einfachen Kontrolle der Orthogonalität ohne Rechnung durch die mehrfache Überbestimmung des Systems, 3. in einer grösseren Genauigkeit und 4. in einer grösseren Vielseitigkeit (slip-Winkel können sofort abgelesen werden; die Azimute und das Einfallen der Hauptspannungsrichtungen lassen sich mittels einer einfachen Hilfskonstruktion schnell und zuverlässig bestimmen. Die Methodik der Auswertung wird allgemein für alle tektonischen und strukturellen Aufgaben von Philipps⁽⁶⁾ behandelt. Eine spezielle Anwendung auf das Problem des Herdmechanismus erfolgt in der bereits zitierten Arbeit von Scheidegger⁽⁷⁾. Das Ergebnis der Orthogonalisierung ist in Tabelle 1, Zeile *a* und *b* zahlenmassig fixiert. Die Genauigkeit der graphisch ermittelten Lösung beträgt etwa $\pm 1\text{-}2^\circ$. Diese Genauigkeit übersteigt damit die Sicherheit der Lösungen um mindestens eine Zehnerpotenz.

2.22 Beben Nr. 1a (1. Interpretation des Bebens vom 13.4.1938)

Diese Lösung ist auf Grund der wenigen unsicheren Ausgangsdaten nicht in der Tabelle angeführt. Nach der oben beschriebenen Methode sind eine Reihe orthogonaler Lösungen möglich. In Abb. 6 wird ein einfacher Spezialfall mit r_2 gezeigt. Die Hilfsebene der Lösung *a* fällt vertikal ein. Streichen N33E.

2.23 Beben Nr. 2

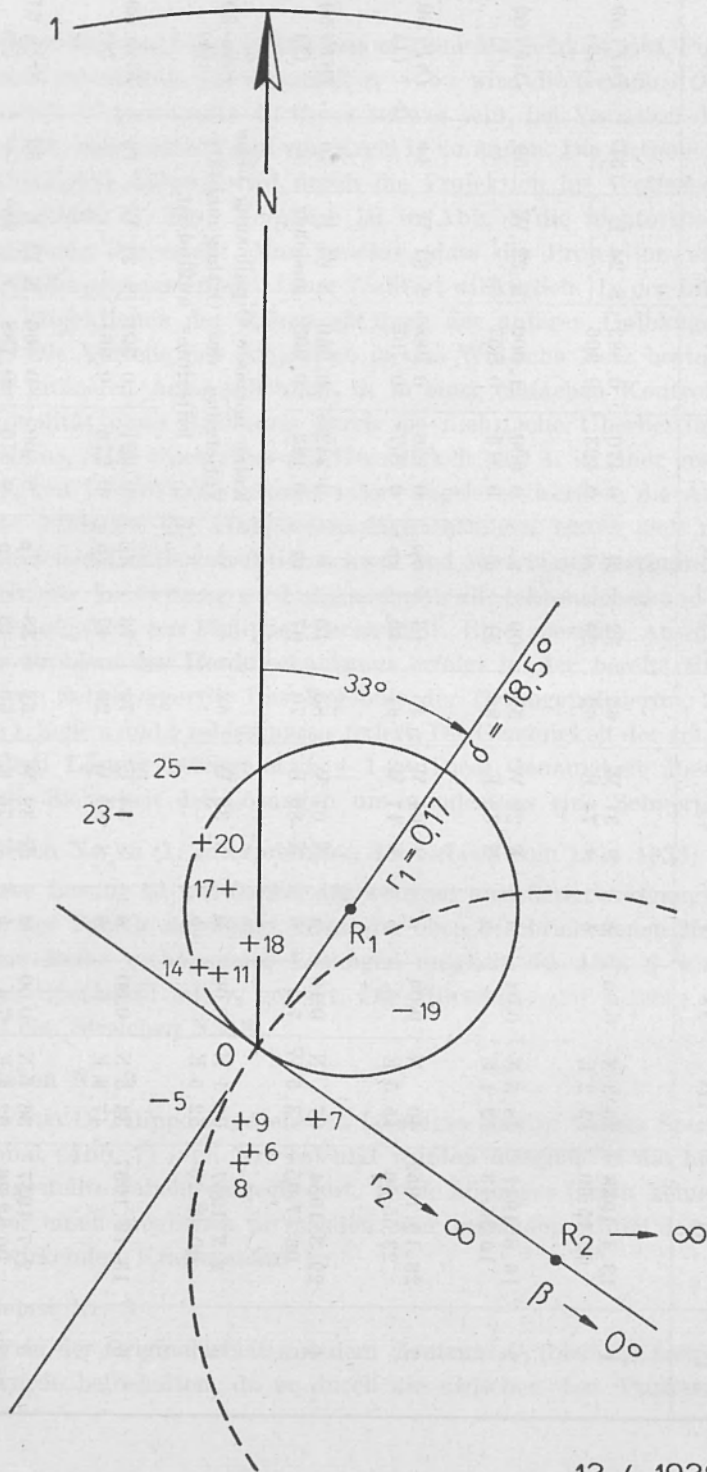
Die von Di Filippo angegebenen Lösungen sind in diesem Spezialfall orthogonal (Abb. 7) (vgl. Nr. 1a) und wurden lediglich in die hier zusammengestellte Tabelle eingegliedert. Beide Lösungen lassen keine Aussage über einen möglichen pressenden oder zerrenden Anteil des in der Quelle wirkenden Kraftsystems zu.

2.24 Beben Nr. 3

Der in der Originalarbeit mit dem Zentrum C_2 (hier R_1) festgelegte Kreis wurde beibehalten, da er durch die zwischen den Punkten 10,

Tabelle 1

| I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | XIII | XIV |
|-----------|------------------------|------------------|-------------|--------|------------------|----------|----------|----------|--|----------------|------------------------------------|---------|----------------|
| 1 | 13.4.1938 02:45:50 | 39,3 N 15,2 E | 0,05 — | a b | S 31 W S 74 E | 65 62 | 32 29 | dt st | 0,470 0,423 | 0,883 0,906 | S 24 E — | 51 — | DiFi 59 (1) |
| 2 | 16.6.1941 16:35:13 | 38,5 N 12,1 E | 0,01 — | a b | N 22 W N 68 E | 59 90 | 00 31 | s- d- | 0,000 0,515 | 1,000 0,857 | N 22 W — | 59 — | DiFi 59 (1) |
| 3 | 26.12.1952 23:55:56 | 40 N 15,5 E | 0,04 — | a b | S 64 W N 17 W | 45 81 | 13 46 | dp sp | 0,156 0,707 | 0,988 0,707 | S 81 W — | 44 — | DiFi 59 (1) |
| 4 | 29.3.1954 06:17:05 | 37 N 3,5 W | 0,10 7,2 | a b | N 07 W N 86 E | 83 70 | 19 07 | st dt | 0,342 0,122 | 0,940 0,993 | N 67 E unsicher | 70 — | DiFi 59 (1) |
| 5 | 2.7.1957 00:42:26 | 36,1 N 52,5 E | 0,00 — | a b | N 39 W — | 52 — | — — | — — | Keine normale Dipollösung ohne Verletzung des Orthogonalitätskriteriums auffindbar | | | | Pero 59 (4) |
| 6 | 13.12.1957 — | 34,5 N 47,8 E | 0,00 — | a b | S 54 E S 80 W | 74 23 | 73 47 | dp sp | 0,921 0,276 | 0,391 0,961 | S 31 W — | 16 — | Pero 59 (4) |
| 5 asym | 2.7.1957 00:42:26 | 36,1 N 52,5 E | 0,00 7,4 | a b | N 39 W N 76 E | 52 60 | 38 43 | dp sp | 0,500 0,616 | 0,866 0,788 | N 14 E $\varepsilon = 28^\circ$ | 39 — | Schä 61 (8) |



13.4.1938

Bild 6.

12 und 3, 11, 13, 17 sowie 6 und 5 stattfindenden Vorzeichenwechsel als auch durch Punkt 16 genügend sicher belegt erscheint (Abb. 8). R_2 muss auf einer Geraden parallel zur Tangente im Ursprung von Kreis I im Abstand $K = 0,48$ liegen. Die Fixierung erfolgt im wesentlichen nur

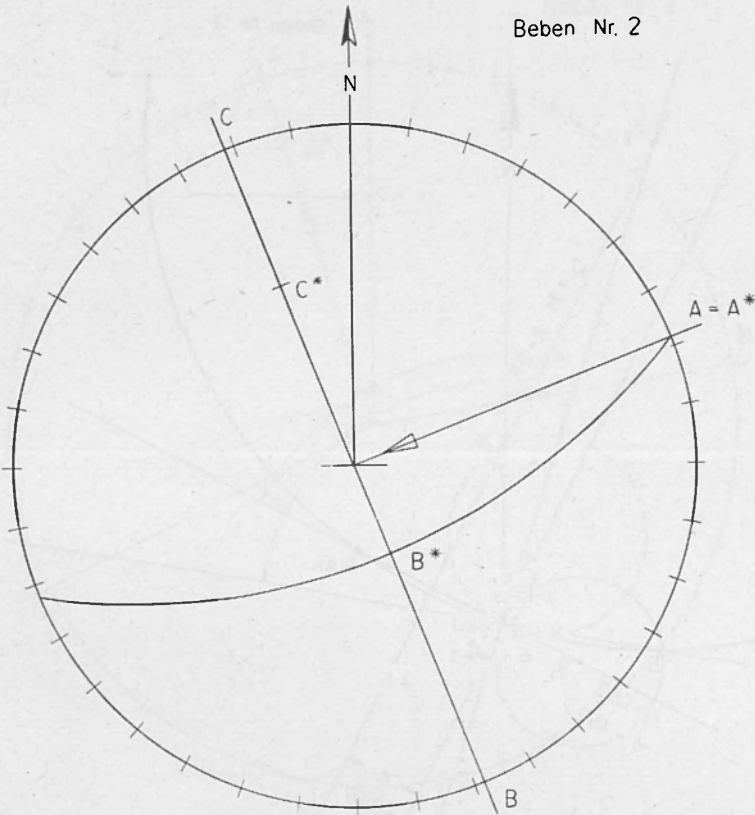


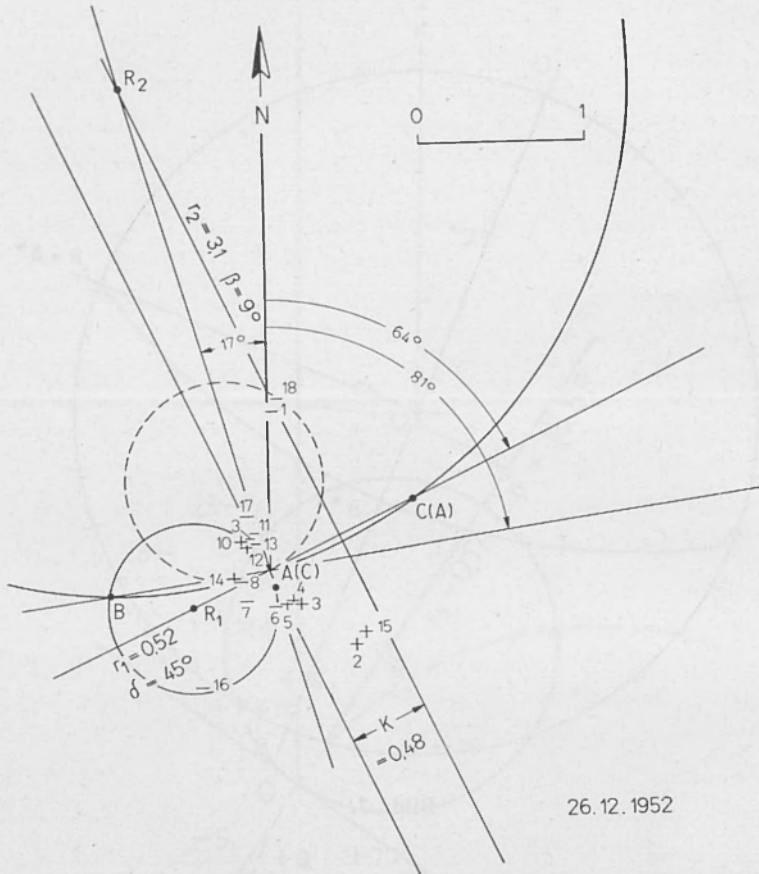
Bild 7.

durch die Punkte 8 und 14. Azimut und besonders das Einfallen sind damit sehr unsicher bestimmt, da die Unsicherheit der Einzelwerte in Nahe der Knotenlinien stark zunimmt. (Vgl. Hodgson u. Adams⁽²⁾). Das Beispiel lehrt, wie eine relativ geringe Änderung des Azimutes (9°) zu einer beträchtlichen Änderung im Einfallen (36°) führen kann. Die stereographische Projektion der orthogonalisierten Lösung liefert Abb. 9.

2.25 Beben Nr. 4

Die vorliegende Vorzeichenverteilung ist sehr homogen und lässt sich durch eine Gerade (Vertikalebene mit *N-S* Streichen in zwei Bereiche teilen (Abb. 10). Diese einfache Darstellung würde der Interpretation

Beben Nr 3



26.12.1952

Bild 8.

durch eine Einzelkraft entsprechen (Abb. 11). Di Filippo und Peronaci nehmen im Gegensatz dazu an, dass südlich der beiden Bereiche das Vorzeichen wechselt. Aus dieser Annahme heraus resultiert der Kreis I mit dem Zentrum $C_1(R_1)$. Freilich ist der Dipol mit Moment, nach der Erfahrung aller bisherigen Interpretationen zu urteilen, als wahrschein-

licheres Modell des Herdvorganges anzusehen. Die Zeichnung der Knotenlinie längs der Grenze des Bereichs bekannter Vorzeichen jedoch ist willkürlich. Die Orthogonalisierung erfolgte nach dem beschriebenen Ver-

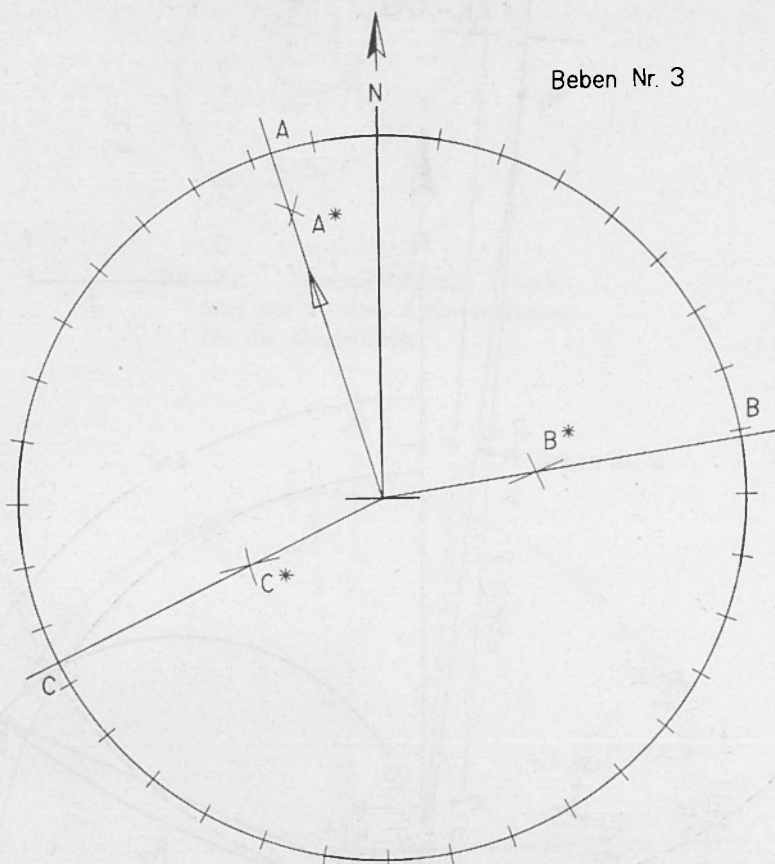


Bild 9.

fahren unter Beibehaltung von Kreis II (Abb. 12). Allerdings ist dieser Lösung nur wenig Bedeutung beizumessen.

2.26 Beben Nr. 5

Ein sehr interessantes Beispiel. Kreis I ist bis auf wenige Grad fest gegeben. Die Fixierung kann durch die grosse Anzahl von Daten als sehr zuverlässig gelten, im Gegensatz zu Beispiel Nr. 3, wo der 2. Kreis zwar relativ fest, aber wenig zuverlässig fixiert war. Nach Bestim-

Beben Nr. 4

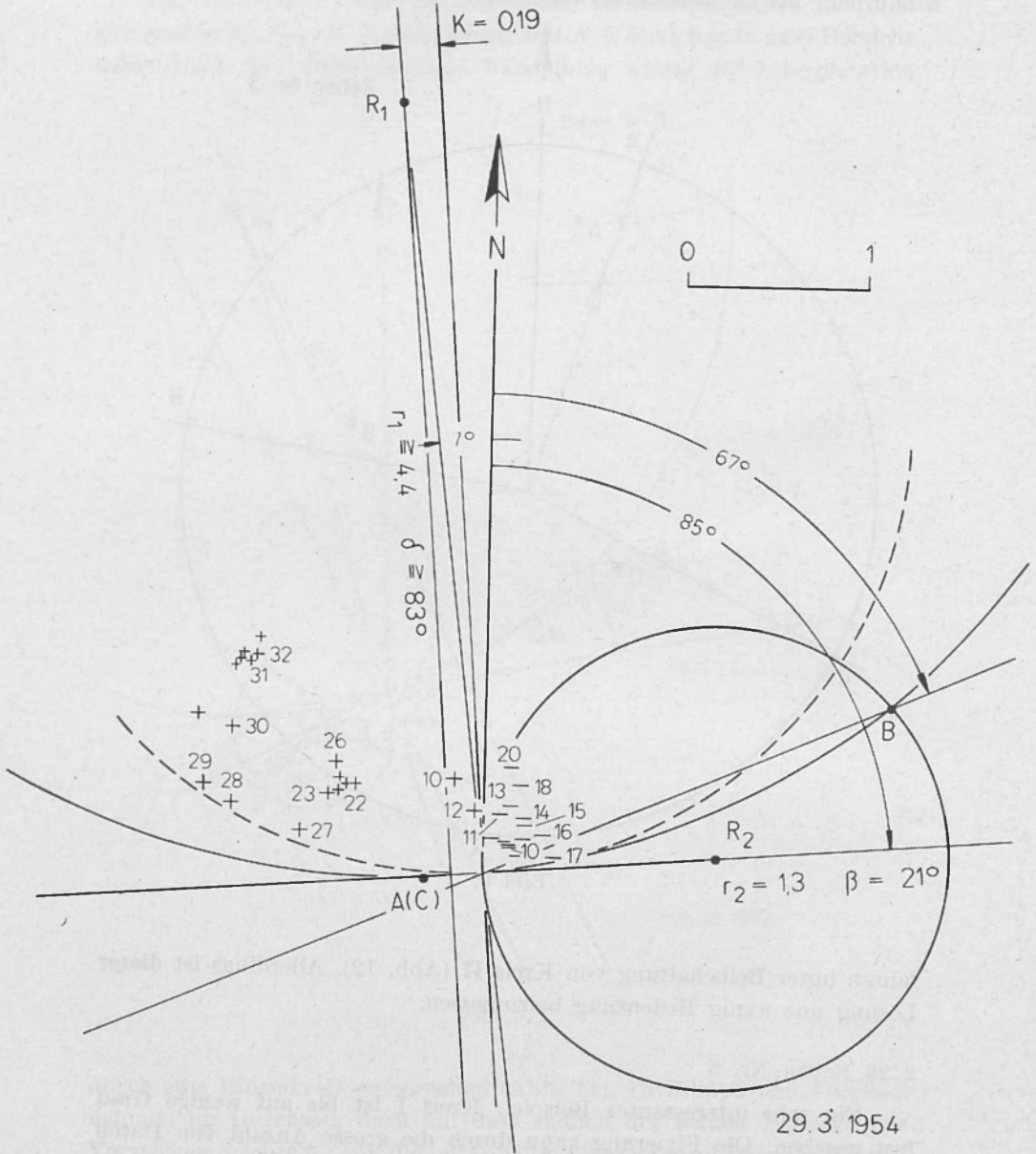


Bild 10.

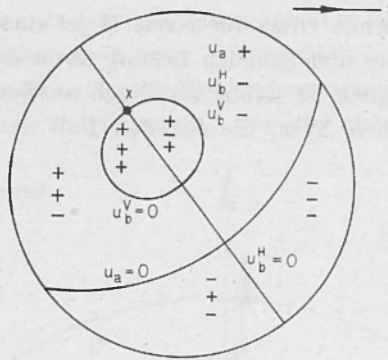


Bild 11. - Stereographische Projektion der P- und S-Knotenlinien für die Einzelkraft.

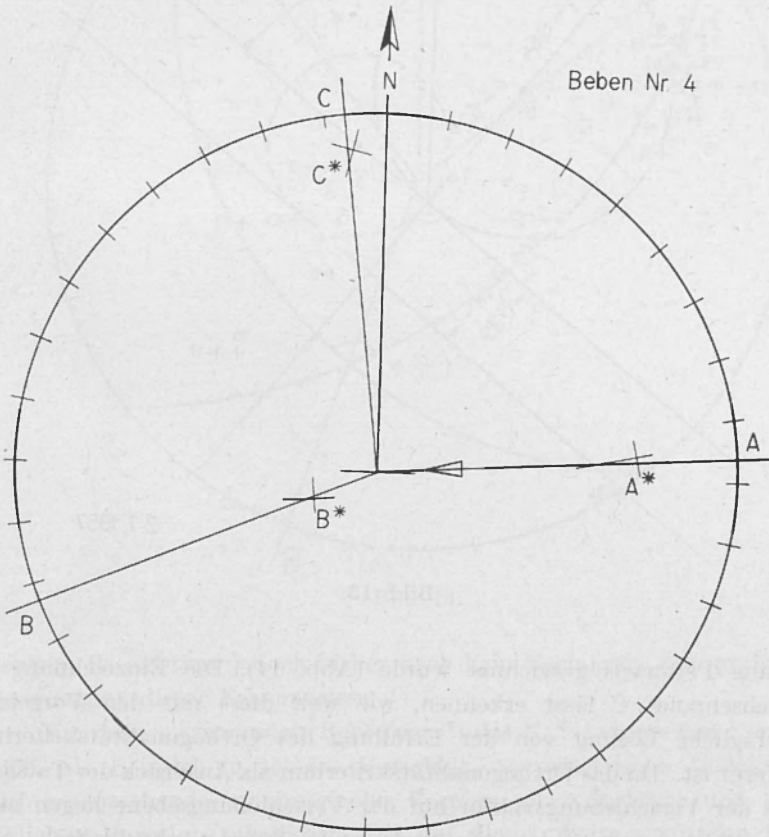


Bild 12.

mung des geometrischen Ortes für Kreis II ist unschwer zu erkennen, dass die Angabe einer orthogonalen Lösung unter den getroffenen Festsetzungen nicht möglich ist (Abb. 13). Noch anschaulicher ist die Darstellung im Wulfschen Netz, die für den Fall der nichtorthogonalen

Beben Nr. 5

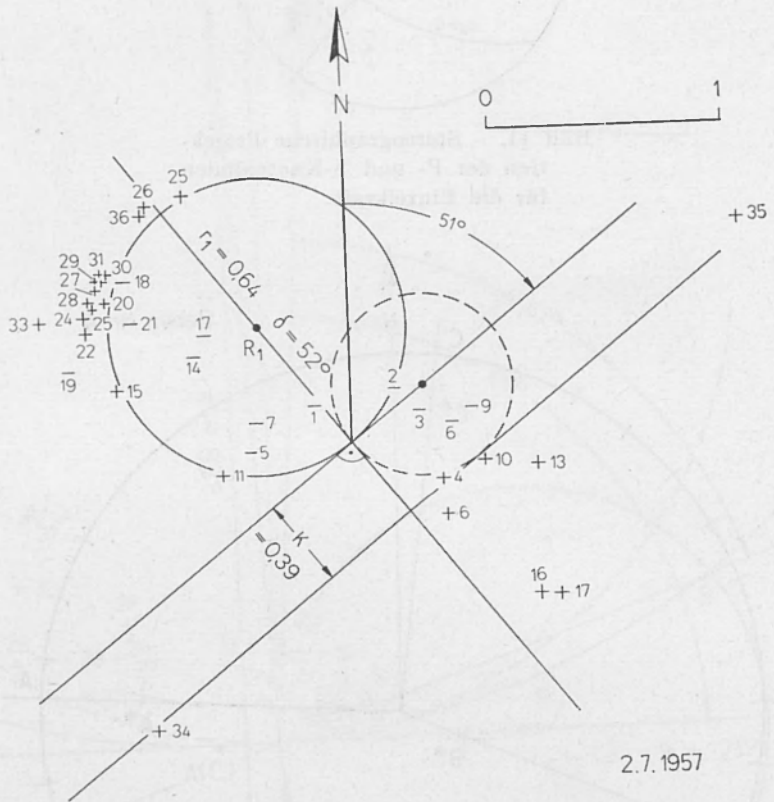


Bild 13.

Lösung Peronacis gezeichnet wurde (Abb. 14). Die Einzeichnung des C -Achsenpoles C lässt erkennen, wie weit diese mit den Vorzeichen vertragliche Lösung von der Erfüllung des Orthogonalitätskriteriums entfernt ist. Da das Orthogonalitätskriterium als Ausdruck der Tatsache, dass der Verschiebungsvektor auf der Verschiebungsebene liegen muss, gilt, ist zu ersehen, dass die vorliegende Lösung physikalisch nicht sinnvoll ist. Erkennt man die gegebene Vorzeichenverteilung als Abbild

des initialen Hervorganges an, dann muss notwendigerweise ein anderer Quellentyp angenommen werden. Grundsätzlich zeigte schon Keilis-Borok ⁽³⁾, dass Dipole mit zusätzlich aufgeprägten Einzelkräften in der Lage sind, Vorzeichenverteilungen, wie die oben besprochene zu er-

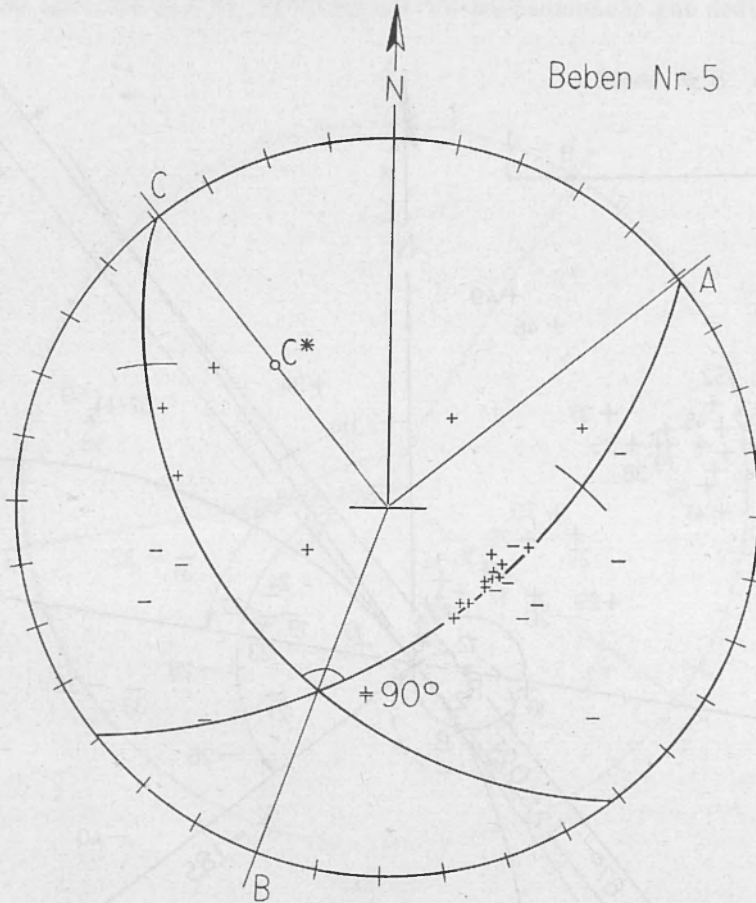


Bild 14.

zeugen. Es existiert jedoch bisher noch kein Verfahren zur praktischen Auswertung dieser Erkenntnisse.

Inzwischen verwendete Schöffner ⁽⁸⁾ das N. Teheranbeben vom 2.7. 1957 als Beispiel zu seinem Vorschlag, asymmetrische Dislokationen auf entsprechende symmetrische Formen zu reduzieren und in der üblichen Form zu tabellieren. Die auf dieses Weise ermittelte Lösung ist an den Schluss von Tabelle 1 gestellt worden.

Beben Nr. 6

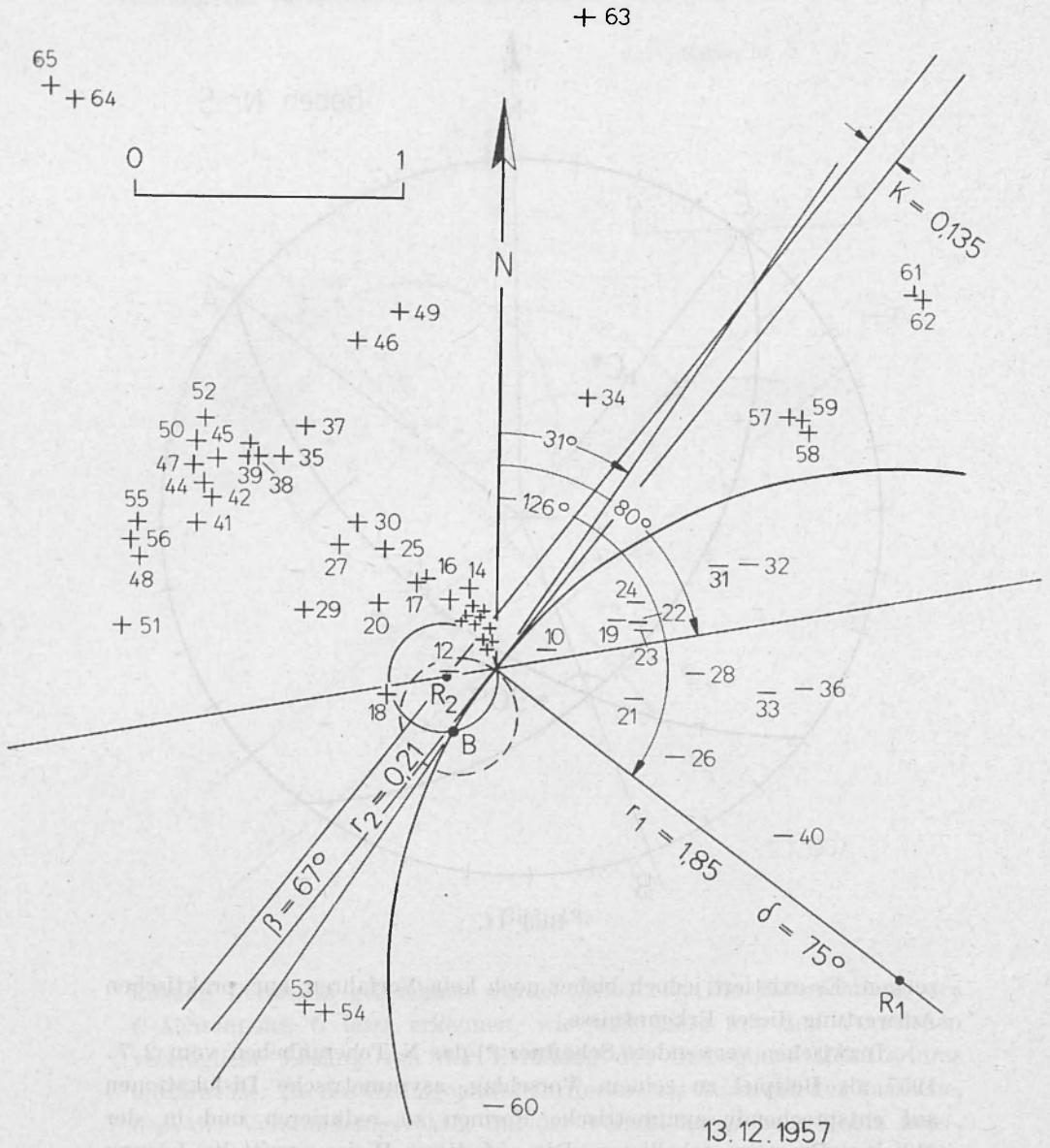


Bild 15.

2.27 Beben Nr. 6

Der von Peronaci gegebenen Lösung liegt ein umfangreiches Beobachtungsmaterial zugrunde, so dass eine gut definierte Lösung angebar ist. Kreis I wird durch die zwischen den Punkten 24, 31, 32 und 57, 58, 59 sowie 60 und 53, 54 erfolgende Vorzeichenumkehr gut definiert.

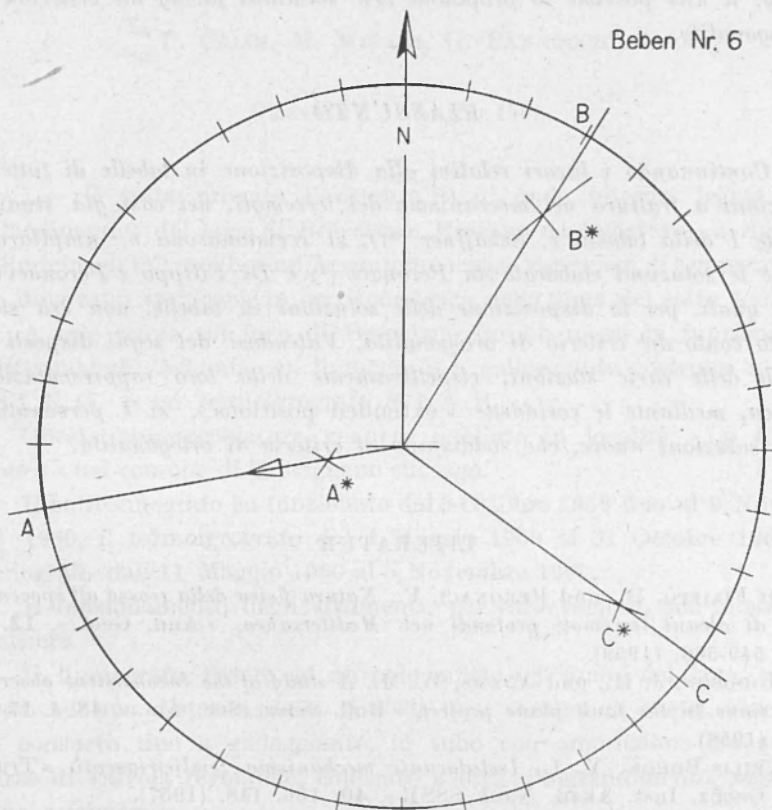


Bild 16.

K ergibt sich zu 0,135. Kreis II wird durch die Haufung der positiven Einsätze im NW -Quadranten sowie Punkt 18 sicher begrenzt, so dass die orthogonalisierte Lösung lediglich eine grössere Azimutabweichung der Ebene II bedingt (Abb. 15, 16).

SUMMARY

In continuation of the work connected with a compilation in tabular form of all fault plane solutions of the earthquake mechanism (part I of the table v. Schöffner (6)) as known from literature, the solutions obtai-

ned by Peronaci ⁽¹⁾ and Di Filippo and Peronaci ⁽¹⁾ have been supplemented and revised, since the criterion of orthogonality had been neglected in the original tabulation of the solutions. By having recourse to the signs of the various stations tabulated for each earthquake, and their graphic representation by the so-called « extended positions », respectively, it was possible to propound new solutions fitting the criterion of orthogonality.

RIASSUNTO

Continuando i lavori relativi alla disposizione in tabelle di tutte le soluzioni a frattura nel meccanismo dei terremoti, nei casi già studiati (parte I della tabella v. Schaffner ⁽⁶⁾), si revisionarono e ampliarono anche le soluzioni elaborate da Peronaci ⁽¹⁾ e Di Filippo e Peronaci ⁽¹⁾, nelle quali, per la disposizione delle soluzioni in tabelle, non era stato tenuto conto del criterio di ortogonalità. Valendosi dei segni disposti in tabelle delle varie stazioni, rispettivamente della loro rappresentazione grafica, mediante le cosiddette « extended positions », si è pervenuti a delle soluzioni nuove, che soddisfano al criterio di ortogonalità.

LITERATUR

- (1) DI FILIPPO, D., und PERONACI, F., *Natura fisica della scossa all'ipocentro di alcuni terremoti profondi nel Mediterraneo*, « Ann. Geof. », **12**, 4, 549-566, (1959).
- (2) HODGSON, J. H., und ADAMS, W. M., *A study of the inconsistent observations in the fault plane project*, « Bull. Seism. Soc. Am. », **48**, 1, 17-31, (1958).
- (3) KEILIS-BOROK, V. I., *Issledovanie mechnizma zemljetrjasenii*, « Trudy Geofiz. Inst. Akad. Nauk SSSR », **40**, 166, 148, (1957).
- (4) PERONACI, F., *Contributo alla conoscenza delle caratteristiche sismiche dell'Iran settentrionale*, « Ann. Geog. », **12**, 4, 523-534, (1959).
- (5) PHILIPPS, M. A., *The use of stereographic projection in structural geology*, London, 86, (1955).
- (6) SCHÄFFNER, H.-J., *Die Grundlagen und Auswerteverfahren zur seismischen Bestimmung von Erdbebenmechanismen*, « Freib. Forsch.-II. 63 », C 183, (1959).
- (7) SCHEIDEGGER, A. E., *The geometrical representation of fault plane solution of earthquakes*, « Bull. Seism. Soc. Am. », **47**, 2, 89-110, (1957).
- (8) SCHÄFFNER, H.-J., *Zur Interpretation von Herdmechanismen durch asymmetrische Dislokationen*. Zeitschrift für Geophysik (im Druck).