

**EMERGENZWINKEL,
UNSTETIGKEITSFLÄCHEN, LAUFZEIT**

VON

J. WILIP

DORPAT 1924

C. Mattiesen, Dorpat.

Emergenzwinkel, Unstetigkeitsflächen, Laufzeit.

Von J. Wilip.

Die Erforschung des inneren Baues unserer Erdkugel gehört zu den wichtigsten Aufgaben der modernen Präzisionsseismometrie. Wegen ungenügender Ausstattung der seismischen Stationen mit entsprechenden Apparaten und überhaupt ihrer geringen Anzahl auf der ganzen Erdkugel hat bis heutzutage nur ein ziemlich dürftiges Material in dieser Richtung gesammelt werden können.

Die alte Hypothese eines inneren eisernen Kernes, der von einer steinernen Hülle umgeben sein sollte, musste bald aufgegeben werden, wo man nach der Aufzeichnung von Fernbeben sich genötigt sah im Inneren der Erde noch weitere Unstetigkeitsflächen anzunehmen, so dass an die Stelle einer einzigen, in der Tiefe von 1500 km, drei in 1200, 1700 und 2500 km traten.

Die neuere Seismometrie bietet nun ein mächtiges Hilfsmittel dar, auf dessen Grundlage man genauer den Gang der seismischen Strahlen verfolgen und hieraus auf den inneren Bau der Erde Schlüsse ziehen kann. Es ist dieses der Austrittswinkel der seismischen Strahlen an der Erdoberfläche mit dem Horizont oder der sogenannte scheinbare Emergenzwinkel, zu dessen Bestimmung auf der seismischen Station ausser den Horizontalpendeln noch ein Vertikalseismograph erforderlich ist.

Bei gleichmässiger Zunahme der Wellengeschwindigkeit mit der Tiefe würden die seismischen Strahlen bei ihrer Ausbreitung vom Herd glatte Bahnkurven bilden, wobei sie nach dem Brechungsgesetz dem Erdmittelpunkt ihre Krümmung zukehren würden.

Wenn aber ein zufälliger Sprung in der Geschwindigkeit oder eine sehr schnelle Zunahme oder Abnahme derselben unterwegs auftreten sollte, so sind auch in der Richtung der seismischen Strahlen Anomalien möglich.

Die Abhängigkeit des Austrittswinkels von der Epizentral-

entfernung lässt sich nicht mehr durch eine gleichmässige Kurve darstellen, sondern zeigt verschiedene Unregelmässigkeiten, so dass bisweilen für entfernte Beben der scheinbare Emergenzwinkel $\bar{\epsilon}$ bedeutend kleiner ausfällt, als man erwarten könnte.

Die seismischen Strahlen schneiden sich gewissermassen, bevor sie an die Oberfläche treten.

Dieses haben die langjährigen Beobachtungen in Pulkovo immer und immer wieder klargelegt, und noch viel mehr, dass nämlich einigen nach den üblichen Laufzeiten ermittelten Epizentralentfernungen bei einem und demselben Δ mehrere Emergenzwinkel $\bar{\epsilon}$ entsprechen können.

Fürst B. Galitzin¹⁾ hat auf Grundlage der Pulkovoer Beobachtungen aus den Jahren 1912 und 1913 in den obersten Schichten der Erdkugel mehrere Unstetigkeitsflächen konstatiert, von welchen diejenige in der Tiefe von 500 km meiner Erfahrung nach sehr scharf ausgeprägt ist.

Über die genauen Tiefen derselben ist noch schwer etwas feststehendes auszusagen, da über Emergenzwinkel für die Entfernungen von 0 bis 2000 km nur ein dürftiges Material vorliegt, und auch die Laufzeiten viel Unsicheres in sich schliessen²⁾. Ebenso kann die Geschwindigkeit der Longitudinalwellen in den obersten Schichten, die man noch kürzlich als ca. 7 km angenommen hatte, die aber inzwischen nach neueren Beobachtungen auf 5,6—5,9 km herabgesetzt werden musste, noch Veränderungen erfahren, wenn es gelingt, mit den empfindlichsten Apparaten das erste Eintreffen der schwächsten Longitudinalwellen einwandfrei zu konstatieren. Jedenfalls ist durch S. Mohorovičić³⁾ und neuerdings durch O. Hecker⁴⁾ wertvolles Material zu dieser Frage veröffentlicht worden.

Zur Erforschung des Emergenzwinkels eignen sich ganz besonders gut starke Beben, da sie eine grössere Genauigkeit zu erreichen gestatten.

Hier sollen die Emergenzwinkel reflektierter Wellen vielleicht zum erstenmal zur Sprache kommen. Gelegentliche An-

1) Извѣстія Постоянной Центральной Сейсмической Комиссіи, т. VII, в. 2. Sur l'angle d'émergence des rayons sismiques. 1917.

2) И. Вилипъ. О нѣкоторыхъ землетрясеніяхъ. Изв. Пост. Центр. Сейсмич. Комиссіи, т. VI, в. 1. Rumänisches Beben 25/V 1912, p. 53.

3) Gerland's Beiträge zur Geophysik, Bd. XIII, 1914.

4) O. Hecker. Die Explosionskatastrophe von Oppau. 1922.

gaben habe ich in den wöchentlichen Bulletins der Zentralstation in Pulkovo in den Kriegsjahren gemacht.

Von Hause aus möge bemerkt werden, dass die Aufsuchung von reflektierten Wellen einige Schwierigkeiten darbietet und eine grosse Übung voraussetzt. Noch mehr, um keinem Irrtum anheim zu fallen, muss man bereits über die innere Konstitution der Erdkugel einigermaßen orientiert sein, wozu ganz besonders gut dienlich ist ein Vergleich der Stärke der direkten Longitudinalwellen für kleinere Epizentralentfernungen mit der reflektierten für grosse Δ . Für Δ , bei denen infolge von Schichtungen starke Zerstreung der seismischen Energie auftritt, ist bereits teilweiser seismischer Schatten vorhanden.

Es steht zu erwarten, dass die reflektierten Strahlen, die ein vielfaches des Weges Δ zurücklegen, auch entsprechend schwächer auftreten, so dass oft die höheren Reflexionen fast ganz übersehen oder falsch angesprochen werden. Es gibt aber Epizentralentfernungen, für welche die höheren Reflexionen alle sehr deutlich erkennbar sind, wie z. B. für $\Delta = 8540$ km.

Die erste reflektierte Welle wird von einem ziemlich ungeübten Beobachter noch richtig angesprochen, es sei denn, dass sie im Vergleich zu der zweimal reflektierten verschwindend klein ausgefallen ist.

Was den Emergenzwinkel für reflektierte Wellen anbetrifft, so steht zu erwarten, dass derselbe ebenso gross ausfällt, wie derjenige für direkte Strahlen der der Reflexion entsprechenden Entfernung, d. h. für PR_1 , wie für eine Epizentralentfernung $\frac{\Delta}{2}$, für PR_2 , wie für $\frac{\Delta}{3}$ u. s. w.

In gewissen Fällen könnten nur innere Reflexionen an den Unstetigkeitsflächen störend mitwirken, wo dann gerade der Wert des Emergenzwinkels entscheidend ist.

Zur vorliegenden Untersuchung habe ich 2 starke Kamtschatka-Beben ausgewählt, bei denen die Epizentralentfernung eine solche war, die sehr gut ausgesprochene reflektierte Wellen zulässt.

Das erste dieser Beben ereignete sich am 31/VII 1915, und sein Epizentrum lag östlich von der Halbinsel im Stillen Ozean. Das zweite am 30/I 1917 spielte sich nach den Pulkovoer Seismographen fast 3 mal stärker ab, wurde nach Zeitungsnachrich-

ten auf der ganzen Halbinsel gefühlt und ergab nach den Bestimmungen der Zentralstation in Pulkovo ein Epizentrum im Gebiete zwischen Kljutschevskaja Sopka und Petropavlovsk.

Unten sind Angaben über diese beiden Beben zusammengestellt, wie dieselben aus den Pulkovoer Aufzeichnungen gefolgert werden konnten. In der ersten Kolumne stehen die Bezeichnungen der Phasen, in der zweiten ihre Momente, dann in der dritten die Epizentralentfernungen, wobei für die reflektierten Wellen die der Reflexion entsprechende Teilentfernung gegeben ist, mit Abrundung der letzten Stelle, und in der vierten der scheinbare Emergenzwinkel \bar{e} der Phase.

Ausserdem sind für beide Beben die Phasendifferenzen zwischen den reflektierten und der direkten Longitudinalwelle gegeben, wie dieselben sich aus den direkten Messungen nach den Seismogrammen, dann nach den Wiechert-Zöppritschen und drittens nach den Laufzeiten von A. Mohorovičić¹⁾ folgern lassen.

Erdbeben am 31./VII. 1915.

Phasen.	Momente.	Δ	\bar{e}
<i>P</i>	1h 41m 34s	6750 km	50°
<i>PR</i> ₁	44 12	3380	52
<i>PR</i> ₂	45 28	2250	45
<i>PR</i> ₃	46 40	1690	48

	Abgelesen.	W-Z.	Moh.
<i>PR</i> ₁ - <i>P</i>	2m 38s	2m 50s	2m 36s
<i>PR</i> ₂ - <i>P</i>	3 54	3 56	3 45
<i>PR</i> ₃ - <i>P</i>	5 6	4 28	4 8

Erdbeben am 30./I. 1917.

Phasen.	Momente.	Δ	\bar{e}
<i>P</i>	2h 55m 35s	6540 km	62°
<i>PR</i> ₁	57 54	3270	52
<i>PR</i> ₂	59 18	2180	44
<i>PR</i> ₃	3 0 14	1640	55

1) A. Sieberg. Geologische, physikalische und angewandte Erdbebenkunde. 1923 p. 288.

	Abgelesen.	W-Z.	Moh.
PR_1-P	2m 19 ^s	2m 45 ^s	2m 32 ^s
PR_2-P	3 43	3 46	3 37
PR_3-P	4 39	4 18	4 2

Diese beiden Beben haben in jener Beziehung grosses Interesse, dass ungeachtet der geringen Differenz der Epizentralentfernungen die Emergenzwinkel der direkten longitudinalen Wellen von einander total verschieden sind. Ein Emergenzwinkel $\bar{e} = 50^\circ$ entspricht sonst der Epizentralentfernung von 2500 bis 3000 km.

Für die kleinere Entfernung tritt der Strahl beträchtlich steiler aus der Erdrinde heraus. Damit soll nicht gesagt sein, dass für diese Epizentralentfernung keine weniger geneigten Strahlen angekommen sind, dieselben müssen nur später eingetroffen sein als der steilere, und von diesem durch Superposition maskiert worden sein. Dieses kann auf solche Weise vor sich gegangen sein, dass der letztere durch eine Unstetigkeitsfläche hindurchgegangen sein mag, durch diese gebrochen wurde und auf diese Weise einen Teil des Weges mit grösserer Geschwindigkeit zurücklegte.

Der grössere Emergenzwinkel des longitudinalen Strahles entspricht nun durchaus dem gewöhnlichen Fall, während die kleineren \bar{e} zu den Ausnahmefällen zu zählen sind und darauf hindeuten, dass der weniger steile Strahl eine kürzere Laufzeit besessen hat, als der steilere, vorausgesetzt eine ganz bestimmte Epizentralentfernung, für welche der Strahl eben noch eine beträchtliche Strecke im Inneren fast geradlinig verlief.

Ein genaueres Studium einer ganzen Gruppe der ersten eintreffenden Longitudinalwellen lehrt, dass gewöhnlich die dem ersten Stoss folgenden Strahlen noch bedeutend steiler austreten. Die Phase eP besitzt also einen viel kleineren Emergenzwinkel, als iP , und somit auch eine kürzere Laufzeit. Hierdurch erklärt es sich, warum die Bestimmungen des Emergenzwinkels nach verschiedenen Beobachtern weit auseinandergelien können, da in dieser Frage die Empfindlichkeit der Apparate mit eine wichtige Rolle spielt. Die weniger empfindlichen Seismographen lassen oft die ersten eintreffenden Wellen als verschwindend klein erscheinen, und die späteren werden vom Beobachter für den Win-

kel \bar{e} als massgebend angesehen, wodurch ein grösserer Emergenzwinkel gefunden wird.

Bei diesen beiden Beben sind nun die Winkel nach der ersten halben und der folgenden ganzen Amplitude für P bestimmt worden.

Aus den Pulkovoer Beobachtungen vom Jahre 1912 und 1913 folgt als Mittel für einige Beben in diesem Epizentralbereich:

$$\begin{aligned} \Delta &= 6330 \text{ km} & \bar{e} &= 61^\circ \\ \Delta &= 6730 \text{ „} & \bar{e} &= 53^\circ, \end{aligned}$$

was mit den hier betrachteten Fällen übereinstimmt, wobei im letzteren Fall das Minimum in \bar{e} noch ausgeprägter ist.

Wenden wir nun unsere Aufmerksamkeit den reflektierten Wellen zu, so erkennen wir, dass dieselben für PR_1 und PR_2 bei beiden Beben fast identisch ausgefallen sind.

Vergleicht man diese Werte mit denjenigen, die aus den früheren Beobachtungen für die direkten Longitudinalwellen erhalten wurden, so findet man für PR_1 und PR_2 ganz gute Übereinstimmung.

So war für $\Delta = 3130 \text{ km}$ $\bar{e} = 55^\circ$.

Hier haben wir für PR_1 ($\Delta = 3380$ und 3270 km) $\bar{e} = 52^\circ$. Da die Entfernungen nicht identisch sind, so ist hier eine Abweichung zulässig.

Aus den Beobachtungen der Jahre 1912 und 1913 folgt für

$$\begin{aligned} \Delta &= 2100 \text{ km} & \bar{e} &= 48^\circ \\ \Delta &= 2270 \text{ „} & \bar{e} &= 41 \end{aligned}$$

Auch hier muss man die Übereinstimmung als befriedigend gelten lassen, da die beiden $\frac{\Delta}{3}$ und \bar{e} in diesen Intervallen enthalten sind.

Dieses Resultat erscheint als äusserst wichtig, da es klar zeigt, dass man zur Bereicherung des Beobachtungsmaterials über den Emergenzwinkel sich auch der reflektierten Wellen bedienen kann, was ganz besonders aus jenem Grunde zur Geltung kommt, dass die Anzahl der seismischen Stationen auf der Erdkugel sehr gering ist, und man nicht auf einer und derselben Station beliebige Epizentralentfernungen zur Verfügung haben kann.

Ausserdem wird bisweilen für die P-Wellen die lokale

1) L. c.

Erschütterung mit der Periode $T = 1^s,5$ die Hauptwelle dermassen überdecken, dass eine Bestimmung von \bar{v} erschwert ist, wobei aber die reflektierten Wellen für grössere Epizentraldistanzen eine zuverlässige Ausmessung des Winkels sehr wohl gestatten. Ganz besonders charakteristisch ist aber bei diesen beiden Beben der Emergenzwinkel für die PR_3 -Wellen. Im allgemeinen besitzt derselbe für beide Beben einen zu hohen Wert, ganz besonders aber für die kürzere Epizentralentfernung.

In einem Vortrag in der Russischen Seismologischen Kommission im Jahre 1917 habe ich bereits auf diesen Umstand hingewiesen und daraus auf eine Unstetigkeitsfläche in den obersten Schichten der Erdkugel geschlossen, deren Tiefe ich zuerst auf 220 km schätzte, später aber auf ca. 380 km berechnete.

Beim ersten Beben lässt sich der steile Austritt der PR_3 -Wellen durch eine ungewöhnlich erhöhte Geschwindigkeitszunahme in einer Tiefe von 380 km erklären, beim zweiten muss der Strahl an einer Unstetigkeitsfläche 4 mal total reflektiert worden sein, die sehr ausgeprägt ist und vom Fürsten B. Galitzin¹⁾ auf eine Tiefe von ca. 500 km berechnet wurde.

Noch auf folgendes möge hier hingewiesen werden. Wenn man die Laufzeitdifferenzen zwischen den reflektierten Wellen und der direkten etwas näher ins Auge fasst, so erkennt man im zweiten Fall für PR_1-P und in beiden Fällen für PR_3-P enorm grosse Abweichungen. Nimmt man die Laufzeit der PR_1 -Wellen als massgebend an, so hat sich der direkte Strahl beim zweiten Beben beträchtlich verspätet. Wir haben also für den weniger steilen Strahl kürzere Laufzeit, als für den steileren. Dieser Umstand lässt wohl darauf schliessen, dass die Laufzeitkurve keine gleichmässige ist, sondern an bestimmten Stellen Knicke aufweisen muss.

Die gemessene PR_3 -Welle ist mit beträchtlicher Verspätung eingetroffen. Hiermit soll nicht gesagt sein, dass diese die einzige und erste PR_3 -Welle war, sondern nur, dass sie die stärkste und auffallendste gewesen, wobei die früheren schwächeren maskiert waren.

Um dieses zu entscheiden, kann man Aufzeichnungen für andere Epizentralentfernungen heranziehen, auf denen die vor-
ausgehenden Wellen sich leicht finden lassen.

1) L. c.

Am massgebendsten sind solche Beben, wo im Herd ein einziger Stoss stattgefunden hat, wie man sie bisweilen aus der Gegend von Buchara registriert. Die Reproduktion des Anfanges eines solchen Bebens findet sich in einer früheren Mitteilung¹⁾.

Die Z -Komponente lässt dort sehr schön die reflektierten Stösse herauslesen, nämlich die Differenzen:

$$P'R_1 - P = 41^s$$

$$PR_1 - P = 62$$

$$PR_2 - P = 78$$

Die beiden letzten Differenzen entsprechen sehr gut den Laufzeiten von Mohorovičić, für die erste gibt es aber keine Laufzeitbestimmungen, weil die Welle schwach ist und übersehen wird. Die schwache Welle entspricht einem weniger gebogenen Strahl, die stärkere dem in einer Tiefe von 500 km 2 mal total reflektierten. Dieses bestätigt auch eine genauere Analyse des Emergenzwinkels, wo $P'R_1$ ein $\bar{e} = \text{ca. } 45^\circ$, PR_1 dagegen $\bar{e} = 54^\circ,5$ ergibt.

Der zweite Strahl hat sich hier um 21^s verspätet. Ein dieser Reflexionsentfernung entsprechendes direktes Wellenpaar würde auf der Registrierung also ca. 10^s von einander entfernt auftreten. Leider ist Pulkovo arm an Epizentralentfernungen zwischen 1500 und 1800 km. Es ist mir nur soviel gelungen festzustellen, dass bei $\Delta = 1810$ km $\bar{e} = \text{ca. } 35^\circ$, bei $\Delta = 1910$ km $\bar{e} = \text{ca. } 53^\circ$ beträgt, d. h. der steilere Strahl hat einen anderen bei 1910 km überholt. Bei dieser letzten Entfernung nimmt auch in der Tat der Emergenzwinkel allmählich ab, während in den gewöhnlichen Fällen ein Ansteigen sich erkennen lässt.

Dieses Beben wurde im Kaukasus gefühlt und zeigte eine ungewöhnliche Abweichung von den Laufzeiten, insofern Δ um einige hundert Kilometer kürzer ausfiel. Es hat den Anschein, wie wenn die ersten P -Wellen in einem totalen seismischen Schatten vollständig verloren gegangen wären.

Es liess sich dieses Strahlenpaar auch an den höheren Reflexionen eines anderen Fernbebens sehr deutlich nachweisen: es ist dieses das Beben vom 15/VIII 1913, dessen Kopie seinerzeit an verschiedene seismische Stationen und Fachgelehrte versandt

1) Известия Пост. Центр. Сейсм. Комиссии, т. VI, в. 2. J. Wilip. Über ein in Pulkovo registriertes künstliches Erdbeben, p. 177 1914.

wurde. Es mögen hier einige Angaben über die Untersuchung des Emergenzwinkels für dieses Beben mitgeteilt werden.

Phasen.	Momente.	Δ	\bar{e}
<i>P</i>	19h 15m 0s	8540 km	67°
	15 32	—	73
<i>PR</i> ₁	17 56	4270	55
<i>PR</i> ₂	19 44	2850	52
<i>PR</i> ₃	20 29	2135	54
<i>P'R</i> ₄	20 59	1710	45
<i>PR</i> ₄ ¹⁾	21 49	1710	57

Auch für diese Entfernung haben wir bei *P* 2 Strahlen, wobei der steilere mit $\bar{e} = 73^\circ$ sich um 32^s verspätet hat. Man erkennt hier in der Gruppe der *PR*₄-Wellen die oben untersuchten Strahlen wieder. Die Verspätung des steileren ($\bar{e} = 57^\circ$) Strahles, der in der Tiefe von 500 km 5 mal total reflektiert worden sein muss, beträgt hier auch in der Tat 50^s , wie es sein muss, da die Strecke 1710 km in Δ 5 mal enthalten ist.

Ein Strahl mit dem kleineren Emergenzwinkel wird für gewisse Epizentralentfernungen von den gebrochenen steileren Strahlen überholt, die in einem besser leitenden Medium einen Teil des Weges zurücklegen, und so entsteht die Anomalie in den Emergenzwinkeln für gewisse Entfernungen. Jedenfalls könnte die Laufzeitkurve infolgedessen bisweilen eine zweifelhafte Gestalt haben.

Es können z. B. Fälle vorkommen, wo 2 verschiedene Epizentralentfernungen dieselbe Laufzeit besitzen.

Nach diesen beiden Kamtschatka-Beben bestätigt sich die Tatsache des Vorhandenseins einer Unstetigkeitsfläche in grösserer Tiefe aus dem Emergenzwinkel der direkten Longitudinalwellen.

Zugleich kann aus dem Emergenzwinkel von reflektierten Wellen auf eine weniger ausgeprägte Unstetigkeitsfläche in den oberen Schichten der Erdkugel geschlossen werden. Die Unstetigkeitsfläche in einer Tiefe von 500 km muss ganz besonders scharf sein, worauf der grosse Wert des Emergenzwinkels für reflektierte Wellen ($\bar{e} = 55^\circ$) hinweist. Der Emergenzwinkel für

1) Diese Stelle hat G. Walker bei einer genaueren Untersuchung meines Seismogramms mit einem Pfeil gekennzeichnet. Siehe: Phil. Trans. Roy. Soc. London. S. A. Vol. 218, 1919, p. 373, Fig. 5.

reflektierte Strahlen stimmt mit dem für entsprechende Entfernungen direkt gemessenen im allgemeinen überein.

Es kommen infolge von Richtungsänderungen des Strahles durch Schichtungen auffallende Differenzen in den Laufzeiten vor.

Aus diesen kurzen Bemerkungen geht jedenfalls deutlich hervor, welche eine grosse Bedeutung für die Seismometrie ein Vertikalseismograph besitzt. Derselbe gibt ein mächtiges Mittel in die Hand, den inneren Bau unserer Erdkugel näher zu studieren. Jedenfalls ist die Anzahl der seismischen Stationen viel zu gering, um ein einwandfreies einheitliches Beobachtungsmaterial zu sammeln. Würde man auf einem Erdquadranten 100 Stationen in je 100 km Entfernung von einander mit genau gleichartigen Seismographen ausgestattet zur Verfügung haben, so wäre die Analyse des Erdinneren eine leichte Sache. Fürs erste begnügt man sich immer nur mit gelegentlichen Epizentralentfernungen, die jeder seismischen Station eigen sind und nur stückweise dieses oder jenes zu liefern imstande sind.
