

# Die Amplituden von PP- und SS-Wellen in der Nähe von 40° und die Struktur des äusseren Erdmantels

J. VANEK

## 1. - EINFÜHRUNG.

Die anomale Zunahme von Amplituden der P- und S-Wellen in den Epizentralentfernungen um 20° wurde von mehreren Autoren beobachtet (<sup>1, 2, 3</sup>). Diese Erscheinung, die höchstwahrscheinlich mit den beobachteten Krümmungsänderungen der Laufzeitkurven der P- und S-Wellen in demselben Distanzbereich zusammenhängt, trat sehr deutlich bei der empirischen Ableitung der Eichfunktionen  $B(\Delta)$  für die Bestimmung von Magnituden aus Raumwellen auf Grund Prager Beobachtungen hervor (<sup>4</sup>). Eine ähnliche Zunahme von Amplituden der PP- und SS-Wellen wurde bei dieser Gelegenheit in der Nähe von 40° beobachtet. Von verschiedenen Autoren (<sup>5, 6</sup>) wurde die Notwendigkeit der systematischen Untersuchung von Amplituden der P- und S-Wellen in einem grösseren Distanzbereich für die Erklärung der 20° Diskontinuität mehrmals betont. Deshalb wurden in Prag die Untersuchungen in dieser Richtung auf Grund eines noch zahlreicheren Materials vorgenommen.

Die Untersuchung des Amplitudenverlaufs der P- und S-Wellen in dem Distanzintervall von 4° bis 30° hat Frau Ruprechtová (<sup>7</sup>) durchgeführt. Sie benutzte dazu einerseits Prager Beobachtungsmaterial und andererseits Beobachtungen europäischer und mittelasiatischer Stationen von 5 ausgewählten Erdbeben. Bei den Amplituden von P-Wellen stellte sie ein klares Minimum in der Epizentralentfernung von 11,5° und ein ausgeprägtes Maximum bei 19° fest. Bei den S-Wellen lag das Minimum bei 14° und das Maximum bei 21°.

In dieser Mitteilung wird über die Untersuchung der Amplituden von PP- und SS-Wellen in dem Distanzintervall von 25° bis 52° berichtet.

## 2. - AMPLITUDENKURVEN DER PP- UND SS-WELLEN.

Das Beobachtungsmaterial für diese Untersuchung wurde durch sorgfältige Ausmessung der maximalen Amplituden und der entsprechenden Perioden der PP- und SS-Wellen aus den Seismogrammen der Wiechertschen Seismographen von den Erdbebenstationen Prag und Jena gewonnen und zwar aus dem Zeitintervall 1927-1956 für Jena und 1935-1956 für Prag. Um jede Verwechslung mit anderen Wellentypen zu vermeiden, wurden die Ankunftszeiten der betreffenden Wellen sorgfältig kontrolliert. Die Anzahl der Beobachtungen war 90 für PPH, 45 für PPV und 66 für SSH. Die Epizentralentfernungen der benutzten Erdbeben wurden mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1^\circ$  meistens nach den ISS Parametern berechnet. Es handelte sich um asiatische Erdbeben mit normaler Herdtiefe; einige atlantische Erdbeben wurden getrennt untersucht. Die Tiefenangaben von ISS wurden durch Vergleich mit den Angaben von Gutenberg und Richter (\*) kontrolliert. Die Erdbeben waren natürlich von verschiedener Magnitude. Als Vergleichsgrösse wurde die Grösse

$$A^* = \log A/T - M$$

eingeführt, wobei die Magnitude  $M$  nur aus Raumwellen auf Grund der in (\*) abgeleiteten Eichfunktionen  $B(\Delta)$  bestimmt wurde und zwar als Mittelwert der zur Verfügung stehenden Magnitudenwerte der einzelnen Raumwellen (PH, PV, SH).

Die Abhängigkeit der  $A^*$  Werte als Funktion der Epizentralentfernung  $\Delta$  für PPH-Wellen kann man aus Fig. 1 ersehen. Schwarze Punkte in Fig. 1-4 sind Jenaer Werte, weisse Punkte Prager Werte; Kreuze sind Schwerpunkte der natürlichen  $\Delta$ -Intervalle, die mit Hilfe der Wendepunkte minimaler Häufigkeit der Summationskurve bestimmt wurden. Die Amplitudenkurve ist dann die mittlere durch diese Schwerpunkte hindurchgelegte Kurve. Der repräsentative Charakter dieser Kurve wurde durch die Häufigkeitskurve der Abweichungen  $\bar{A}^* - A^*$  kontrolliert. Für PPH-Wellen zeigt die Kurve ein ausgeprägtes Minimum bei der Epizentralentfernung von  $34^\circ$  und ein klares Maximum bei der Entfernung von  $41^\circ$ . Ein ähnliches Bild bekommen wir für die PPV-Wellen (Fig. 2); das Minimum der Kurve liegt wieder bei  $34^\circ$  und das Maximum bei  $40,5^\circ$ . Die Beobachtungen der SSH-Wellen haben natürlich eine grössere Streuung (Fig. 3), aber wir sehen eine Kurve vom gleichen Charakter wie bei den PP-Wellen mit einem Minimum um  $38^\circ$  und einem Maximum um  $44^\circ$ .

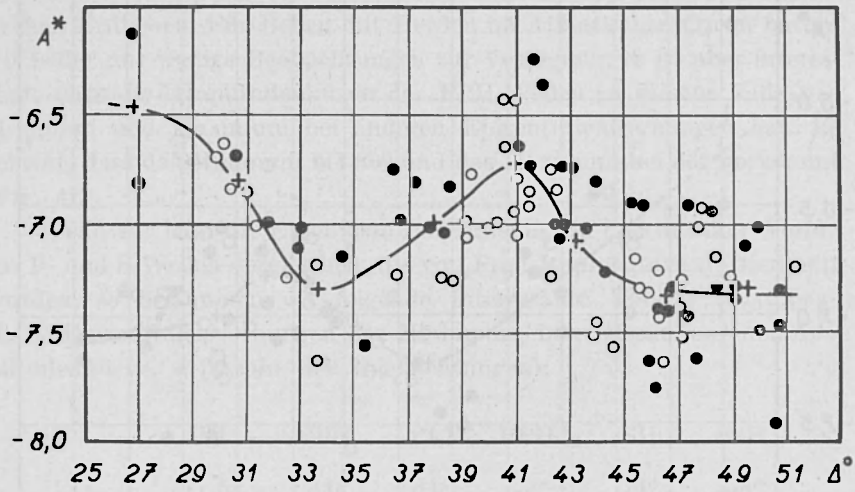


Fig. 1. - Amplitudenkurve der PPH-Wellen. ● Jena, ○ Prag; + Schwerpunkte der natürlichen  $\Delta$ -Intervalle.

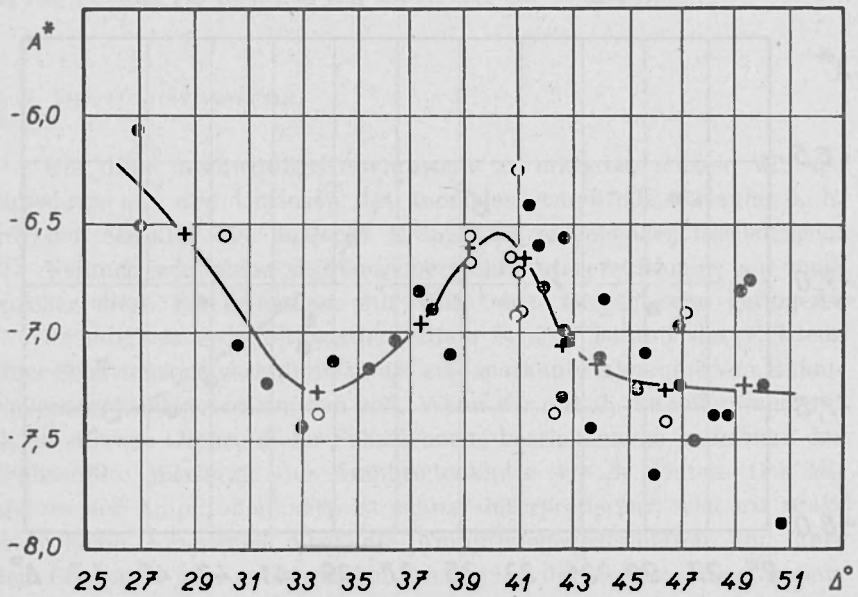


Fig. 2. - Amplitudenkurve der PPV-Wellen.

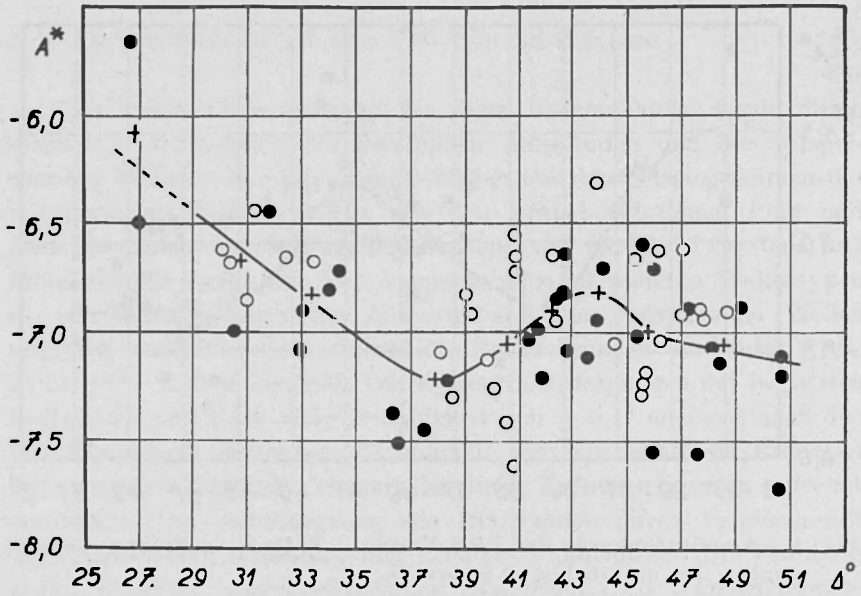


Fig. 3. - Amplitudenkurve der SSH-Wellen.

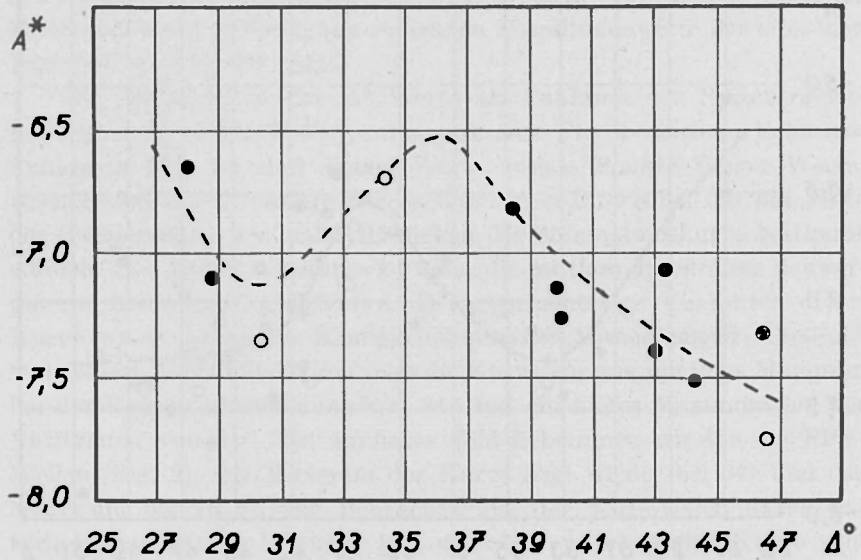


Fig. 4. - Amplitudenkurve der PPH-Wellen für atlantische Erdbeben.

Alle Beobachtungen in Fig. 1-3 betreffen ausschliesslich die asiatischen Erdbeben. Für Beben mit Herden im Atlantischen Ozean hatten wir leider nur wenige Beobachtungen zur Verfügung; es ist aber interessant, dass die Amplitudenkurve der PPH-Wellen in diesem Falle das Minimum und Maximum bei anderen Epizentralentfernungen hat. Es scheint, dass das Minimum bei  $30^\circ$  und das Maximum bei  $36^\circ$  vorkommt (Fig. 4).

Wenn wir jetzt die Ergebnisse zusammenfassen und mit den Werten für P- und S-Wellen vergleichen, die von Frau Ruprechtová (?) bestimmt wurden, so bekommen wir folgende interessante Tabelle ( $\Delta_{\min}$  bzw.  $\Delta_2$  — Epizentralentfernungen des Minimums, bzw. Maximums der Amplitudenkurve,  $n$ -Anzahl der Beobachtungen):

	PH	PPH	PPV	PPH <sub>Atl.</sub>	SH	SSH
$\Delta_{\min}$	11,5°	34°	34°	30°	14°	38°
$\Delta_2$	19	41	40,5	36	21	44
$n$	125	90	45	12	110	66

Das merkwürdigste in dieser Tabelle ist die Asymmetrie der Werte von  $\Delta$  für PP und SS in bezug auf die Werte für P und S.

### 3. — DEUTUNGSVERSUCHE.

Um diese merkwürdige Asymmetrie zu erklären, müssen wir uns unbedingt mit den Ursachen des anomalen Amplitudenverlaufs, d. h. mit der Struktur des äusseren Erdmantels eingehender beschäftigen.

Nehmen wir zuerst die Gutenbergsche Interpretation (2) an, nach welcher diese Erscheinungen mit Hilfe einer Schicht von geringerer Geschwindigkeit gedeutet werden. Diese Schicht ist mit der Existenz einer Schattenzone verknüpft, in der eine markante Abnahme von Raumwellenamplituden vorkommen soll. Wenn wir mit  $\Delta_1$  die innere und mit  $\Delta_2$  die äussere Grenze dieser Schattenzone bezeichnen, so kann man das beobachtete Maximum der Amplitudenkurve wie  $\Delta_2$  deuten. Das Minimum der Amplitudenkurve ist schwer interpretierbar, weil wir praktisch keine Kenntnisse über die Amplitudeneigenschaften und über den Charakter der existierenden Wellen in der Schattenzone haben.

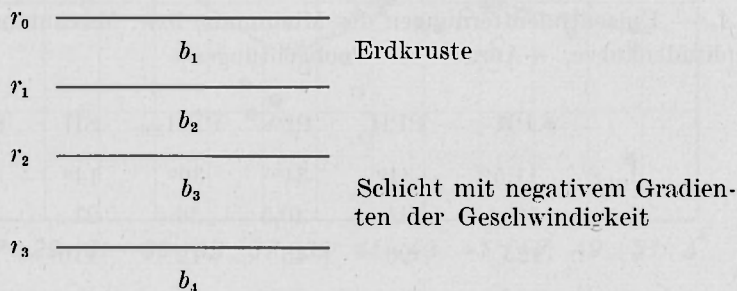
Die Entfernungen  $\Delta_1$  und  $\Delta_2$  können wir für verschiedene Modelle des Erdmantels berechnen. Es handelt sich nur um die Berechnung

von Epizentralentfernungen und deshalb ist die Anwendung der normalen Strahlentheorie sicher berechtigt.

Wenn wir für die Variation der Wellengeschwindigkeit mit der Tiefe das einfache Gesetz

$$v_k = v_0 (r_0/r_k)^b k$$

und für die Struktur des äusseren Erdmantels prinzipiell folgendes einfaches Modell annehmen,



dann ist allgemein die innere Grenze der Schattenzone

$$\Delta_1 = f(b_1, b_2, r_1, r_2)$$

und die äussere Grenze

$$\Delta_2 = f(b_1, b_2, b_3, b_4, r_1, r_2, r_3).$$

Weil der Einfluss der Variation von verschiedenen Parametern  $b_k, r_k$  allgemein schwer zu übersehen ist, wurden alle einparametrischen Abhängigkeiten für  $\Delta_2$  berechnet. Als allgemeines Ergebnis dieser Untersuchung kann man angeben, dass die Variation der Tiefe viel grösseren Einfluss auf  $\Delta_2$  als die Variation der Gradienten  $b_k$  hat. Der Einfluss der regionalen Verschiedenheiten im Aufbau der Erdkruste auf die äussere Grenze  $\Delta_2$  kann in keinem Falle den Wert  $0,5^\circ$  überschreiten. Dasselbe gilt auch für den Einfluss der Herdtiefe, die bei normalen Erdbeben gewöhnlich nicht grösser als 50 km ist.

Um die Asymmetrie der Werte von  $\Delta_2$  bei PP- und SS-Wellen erklären zu können, müssen wir eine regionale Variation der Schicht mit niedrigerer Geschwindigkeit, d. h. eine regionale Variation der Struktur des äusseren Erdmantels voraussetzen. Als wahrscheinliches Modell

können wir folgende Verteilung der Geschwindigkeit von P-Wellen mit der Tiefe  $h$  annehmen:

$k$	$h_k$ (km)	$b_k$	$v_k$ (km/s)
0	0	—————	6,2
		26,4	
1	30	—————	7,0
		2,0	8,0
2	100	—————	8,2
		— 4,0	
3	150	—————	7,95
		2,5	

Für dieses Modell ist  $\Delta_2 = 19^\circ$  (Europa). Für  $\Delta_1 = 22^\circ$  (Asien) bekommen wir dann bei einer Schicht mit konstanter Mächtigkeit ( $h_3 - h_2 = \text{konst}$ ) für das Minimum der Geschwindigkeit die Tiefe  $h_3 = 250$  km und für  $\Delta_2 = 17^\circ$  (Atlantik) die Tiefe  $h_3 = 120$  km. Für eine Schicht von veränderlicher Mächtigkeit mit  $h_2 - \text{konst}$ , haben wir dann für Asien  $h_3 = 200$  km und für den Atlantik  $h_3 = 130$  km erhalten. Eine grosse Unsicherheit ist in der Bestimmung der oberen Grenze  $h_2$  der Schicht mit negativem Geschwindigkeitsgradienten, da die innere Grenze  $\Delta_1$  der Schattenzone aus dem Verlauf der Amplitudenkurve nicht ohne weiteres bestimmt werden kann. Diese obere Grenze müsste mit einer anderen Methode untersucht werden, z. B. mit der Methode von Shebalin<sup>(9)</sup>, mit welcher die obere Grenze dieser Schicht in Europa in einer Tiefe von 100 km festgestellt wurde.

Im Falle der Jeffreysschen Hypothese<sup>(10)</sup> über die Ursache der Erscheinungen, die mit der  $20^\circ$  Diskontinuität verknüpft sind, ist die Berechnung von  $\Delta_2$  wesentlich einfacher. Auch in diesem Falle kann man nicht die Asymmetrie der  $\Delta_2$  Werte für PP und SS anders als durch die regionale Variation der Diskontinuität erklären. Wenn wir die Jeffreyssche Verteilung der Geschwindigkeit mit der Tiefe<sup>(11)</sup> annehmen, so bekommen wir aus PP-Wellen für den Atlantik die Tiefe der Diskontinuität zu 250 km, für Europa zu 300 km und für Asien zu 400 bis 450 km.

Ein ähnlicher Deutungsversuch für SS-Wellen wurde noch nicht vorgenommen.

## 4. - SCHLUSSBETRACHTUNG.

Als allgemeines Ergebnis unserer Untersuchung folgt, dass die Ursache des anomalen Verlaufs von Amplituden der P- und S-Wellen in der Umgebung von  $20^\circ$  sowohl bei Erklärung nach der Hypothese von Gutenberg als auch nach der Hypothese von Jeffreys einen ausgeprägt regionalen Charakter hat, d. h. dass der aussere Erdmantel eine klare regionale Struktur haben muss. Es ist wahrscheinlich, dass die Variationen mehr durch regionale Veränderungen der Tiefe der betreffenden Schicht oder Diskontinuität als durch regionale Veränderungen der Geschwindigkeitsgradienten verursacht werden.

## ABSTRACT

*On the basis of observations of seismological stations Jena and Prague the amplitude variation of PPH-, PPV- and SSH-waves with epicentral distance in the range between  $25^\circ$  and  $52^\circ$  was investigated. A clear minimum (at the distance  $\Delta_{min}$ ) and maximum (at the distance  $\Delta_2$ ) was found for both PP and SS-waves. The results of this investigation together with the results of Mrs. Ruprechtová (?) for PH- and SH-waves are given in the table on pg. 5. The observed asymmetry in  $\Delta_2$  for PP and SS can be explained by regional variations in the structure of the Earth's upper mantle.*

## RIASSUNTO

*È stata studiata la variazione dell'ampiezza delle onde PPH, PPV ed SSH con la distanza epicentrale, in un raggio compreso fra  $25^\circ$  e  $52^\circ$ , sulla base delle osservazioni ottenute presso le stazioni sismiche di Jena e Praga.*

*I risultati di questa ricerca, unitamente a quelli ottenuti da Mrs. Ruprechtová (?), per le onde PH ed SH, sono riportati nella tabella di pag. 5. L'asimmetria osservata in  $\Delta_2$  per le onde PP ed SS può essere spiegata dalle variazioni regionali nella struttura della Terra sopra il mantello.*



## LITERATUR

- (1) GUTENBERG B., *Zeitschr. f. Geophys.*, **2**, 24, (1926).
- (2) — *Bull. Seism. Soc. Am.*, **38**, 121, (1948).
- (3) BATH M., *Annali di Geofisica*, **9**, 411, (1956).
- (4) VANEK J., ZÁTOPEK A., *Travaux de l'Inst. Géophys. de l'Acad. Tchécosl. Sc.*, n. 26, Geofysikalni sborník, 91, (1955).
- (5) JEFFREYS H., *MNRAS*, « Geophys. Suppl. », **6**, 348, (1951).
- (6) LEHMANN I., *Trans. Amer. Geophys. Union*, **34**, 477, (1953).
- (7) RUPRECHTOVÁ L., *Studia geophys. geodaet.*, **2**, 397, (1958).
- (8) GUTENBERG B., RICHTER C. F., *Seismicity of the Earth*, Princeton Univ. Press 1949.
- (9) SHEBALIN N. V., *Studia geophys. geodaet.*, **2**, 86, (1958).
- (10) JEFFREYS H., *MNRAS*, « Geophys. Suppl. », **3**, 401, (1936).
- (11) — *MNRAS*, « Geophys. Suppl. », **4**, 498, (1939).