

KAISERL. AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN IN WIEN.

MITTEILUNGEN
DER
ERDBEBEN-KOMMISSION

DER KAISERLICHEN
AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN IN WIEN.

NEUE FOLGE.

N^o. XXIX.

**ÜBER DIE ART DER FORTPFLANZUNG DER ERDBEBEN-
WELLEN IM ERDINNERN**

(I. MITTEILUNG)

VON

DR. HANS BENNDORF.

MIT 3 TEXTFIGUREN.

WIEN, 1905.

AUS DER KAISERLICH-KÖNIGLICHEN HOF- UND STAATSDRUCKEREL.

Die »Mittellungen der Erdbeben-Kommission« erschienen bisher in den Sitzungsberichten der mathem.-naturw. Klasse, Abteilung I. Von nun an werden sie als besondere Ausgabe veröffentlicht werden.

Bisher sind folgende Nummern der »Mittellungen« ausgegeben worden:

- I. Bericht über die Organisation der Erdbeben-Beobachtung nebst Mitteilungen über während des Jahres 1896 erfolgte Erdbeben, zusammengestellt von Edmund v. Mojsisovics (Sitz. Ber., Bd. 100 [1897], Abt. I, Heft II) — K 60 h.
- II. Bericht über das Erdbeben von Brüx am 3. November 1896, von Friedrich Becke (Sitz. Ber., Bd. 106 [1897], Abt. I, Heft II) — K 50 h.
- III. Bericht über das Erdbeben vom 5. Jänner 1897 im südlichen Böhmerwalde, von Friedrich Becke (Sitz. Ber., Bd. 106 [1897], Abt. I, Heft III) — K 40 h.
- IV. Bericht über die im Triester Gebiete beobachteten Erdbeben am 15. Juli, 3. August und 21. September 1897, von Eduard Mazelle (Sitz. Ber., Bd. 106 [1897], Abt. I, Heft IX) — K 40 h.
- V. Allgemeiner Bericht und Chronik der im Jahre 1897 innerhalb des Beobachtungsgebietes erfolgten Erdbeben, zusammengestellt von Edmund v. Mojsisovics (Sitz. Ber., Bd. 107 [1898], Abt. I, Heft V) 3 K 40 h.
- VI. Die Erderschütterungen Laibachs in den Jahren 1851 bis 1886, vorwiegend nach den handschriftlichen Aufzeichnungen K. Deschmanns, von Ferdinand Seidl (Sitz. Ber., Bd. 107 [1898], Abt. I, Heft VI) — K 50 h.
- VII. Verhalten der Karlsbader Thermen während des volgtländisch-westböhmisches Erdbebens im Oktober—November 1897, von Josef Knett (Sitz. Ber., Bd. 107 [1898], Abt. I, Heft VI). 2 K 60 h.
- VIII. Bericht über das Graslitzer Erdbeben vom 24. Oktober bis 25. November 1897, von Friedrich Becke (Sitz. Ber., Bd. 107 [1898], Abt. I, Heft VII) 5 K 40 h.
- IX. Bericht über die unterirdische Detonation von Melnik in Böhmen vom 8. April 1898, von Johann N. Woldfich (Sitz. Ber., Bd. 107 [1898], Abt. I, Heft X) — K 90 h.
- X. Allgemeiner Bericht und Chronik der im Jahre 1898 innerhalb des Beobachtungsgebietes erfolgten Erdbeben, zusammengestellt von Edmund v. Mojsisovics (Sitz. Ber., Bd. 108 [1899], Abt. I, Heft IV) 3 K 20 h.
- XI. Die Einrichtung der seismischen Station in Triest und die vom Horizontalpendel aufgezeichneten Erdbebenstörungen von Ende August 1898 bis Ende Februar 1899, von Eduard Mazelle (Sitz. Ber., Bd. 108 [1899], Abt. I, Heft V) 1 K — h.
- XII. Übersicht der Laibacher Osterbebenperiode für die Zeit vom 16. April 1895 bis Ende Dezember 1898, von Ferdinand Seidl (Sitz. Ber., Bd. 108 [1899], Abt. I, Heft V) — K 70 h.
- XIII. Bericht über das obersteierische Beben vom 27. November 1898, von Rudolf Hoernes (Sitz. Ber., Bd. 108 [1899], Abt. I, Heft V) 1 K 10 h.
- XIV. Bericht über die obersteierischen Beben des ersten Halbjahres 1899 (zumal über die Erschütterungen vom 1., 7. und 29. April), von Rudolf Hoernes (Sitz. Ber., Bd. 108 [1899], Abt. I, Heft VIII) 2 K 10 h.
- XV. Bericht über Erdbebenbeobachtungen in Kremsmünster, von Josef Schwab (Sitz. Ber., Bd. 109 [1900], Abt. I, Heft II) 1 K 10 h.
- XVI. Bericht über das niederösterreichische Beben vom 11. Juni 1899, von F. Noë (Sitz. Ber., Bd. 109 [1900], Abt. I, Heft II) — K 60 h.
- XVII. Erdbebenstörungen zu Triest, beobachtet am Rebeur-Ehlerst'schen Horizontalpendel vom 1. März bis Ende Dezember 1899, von Eduard Mazelle (Sitz. Ber., Bd. 109 [1900], Abt. I, Heft II) — K 90 h.

- XVIII. Allgemeiner Bericht und Chronik der im Jahre 1899 innerhalb des Beobachtungsgebietes erfolgten Erdbeben, zusammengestellt von Edmund v. Mojsisovics (Sitz. Ber., Bd. 109 [1900], Abt. I, Heft III) 3 K 90 h.
- XIX. Die tägliche periodische Schwankung des Erdbodens nach den Aufzeichnungen eines dreifachen Horizontalpendels zu Triest, von Eduard Mazelle (Sitz. Ber., Bd. 109 [1900], Abt. I, Heft VII) 3 K 20 h.
- XX. Über die Beziehungen zwischen Erdbeben und Detonationen, von Josef Knett (Sitz. Ber., Bd. 109 [1900], Abt. I, Heft IX) — K 80 h.
- XXI. Bericht über das Detonationsphänomen im Duppauer Gebirge am 14. August 1899, von Josef Knett (Sitz. Ber., Bd. 109 [1900], Abt. I, Heft IX) . . 1 K — h.

Neue Folge.

- I. Bericht über die Erdbebenbeobachtungen in Lemberg, von W. Láška 1 K 90 h.
- II. Allgemeiner Bericht und Chronik der im Jahre 1900 im Beobachtungsgebiete eingetretenen Erdbeben, von Edmund v. Mojsisovics 2 K 30 h.
- III. Bericht über die seismischen Ereignisse des Jahres 1900 in den deutschen Gebieten Böhmens, von V. Uhlig 2 K 50 h.
- IV. Bericht über die Erdbebenbeobachtungen in Kremsmünster im Jahre 1900, von P. Franz Schwab — K 60 h.
- V. Erdbebenstörungen zu Triest, beobachtet am Rebeur-Ehler'schen Horizontalpendel im Jahre 1900, von Eduard Mazelle 1 K — h.
- VI. Das nordostböhmisches Erdbeben vom 10. Jänner 1901, von J. N. WoldFich 1 K 60 h.
- VII. Erdbeben und Stoßlinien Steiermarks, von R. Hoernes 2 K 10 h.
- VIII. Die Erdbeben Polens. Des historischen Teiles I. Abteilung, von W. Láška — K 80 h.
- IX. Bericht über die Erdbeben-Beobachtungen in Lemberg während des Jahres 1901, von Prof. Dr. W. Láška 1 K 10 h.
- X. Allgemeiner Bericht und Chronik der im Jahre 1901 im Beobachtungsgebiete eingetretenen Erdbeben, von Edmund v. Mojsisovics 1 K 10 h.
- XI. Erdbebenstörungen zu Triest, beobachtet am Rebeur-Ehler'schen Horizontalpendel im Jahre 1901, nebst einem Anhang über die Aufstellung des Vicentini'schen Mikroseismographen, von Eduard Mazelle . . . 1 K 20 h.
- XII. Bericht über die Erdbebenbeobachtungen in Kremsmünster im Jahre 1901, von Prof. P. Franz Schwab — K 40 h.
- XIII. Das Erdbeben von Saloniki am 5. Juli 1902 und der Zusammenhang der makedonischen Beben mit den tektonischen Vorgängen in der Rhodopemasse, von R. Hoernes 2 K — h.
- XIV. Über die Berechnung der Fernbeben, von Prof. Dr. W. Láška . . . — K 30 h.
- XV. Die mikroseismische Pendelunruhe und ihr Zusammenhang mit Wind und Luftdruck, von Eduard Mazelle 2 K 60 h.
- XVI. Vorläufiger Bericht über das erzgebirgische Schwarmbeben vom 13. Februar bis 25. März 1903, mit einem Anhang über die Nacherschütterungen bis Anfang Mai, von J. Knett — K 80 h.
- XVII. Das Erdbeben von Sinj am 2. Juli 1898, von A. Faidiga 2 K 90 h.
- XVIII. Das Erdbeben am Böhmischem Pfahl am 26. November 1902, von J. Knett — K 80 h.
- XIX. Allgemeiner Bericht und Chronik der im Jahre 1902 im Beobachtungsgebiete eingetretenen Erdbeben, von Edmund v. Mojsisovics, (Mit einem Anhang: Bericht über die Aufstellung zweier Seismographen in Píbram, von Dr. Hans Benndorf.) 2 K 60 h.
- XX. Erdbebenstörungen zu Triest, beobachtet am Rebeur-Ehler'schen Horizontalpendel im Jahre 1902, von Eduard Mazelle 1 K 40 h.
- XXI. Bericht über die Erdbebenbeobachtungen in Kremsmünster im Jahre 1902, von F. Schwab — K 50 h.

- XXII. Bericht über die seismologischen Aufzeichnungen des Jahres 1902 in Lemberg, von Prof. Dr. W. Láska — K 70 h.**
- XXIII. Über die Verwendung der Erdbebenbeobachtungen zur Erforschung des Erdinnern, von Prof. Dr. W. Láska — K 40 h.**
- XXIV. Berichte über das makedonische Erdbeben vom 4. April 1904, von Prof. R. Hoernes 1 K — h.**
- XXV. Allgemeiner Bericht und Chronik der im Jahre 1903 im Beobachtungsgebiete eingetretenen Erdbeben, von Edmund v. Mojsisovics 3 K 40 h.**
- XXVI. Bericht über die Erdbebenbeobachtungen in Kremsmünster im Jahre 1903, von Prof. P. Franz Schwab — K 40 h.**
- XXVII. Bericht über das Erdbeben in Untersteiermark und Krain am 31. März 1904, von Prof. Dr. R. Hoernes und Prof. F. Seidl 1 K — h.**
- XXVIII. Jahresbericht des Geodynamischen Observatoriums zu Lemberg für das Jahr 1903, nebst Nachträgen zum Katalog der polnischen Erdbeben, von Prof. Dr. W. Láska — K 60 h.**

Über die Art der Fortpflanzung der Erdbebenwellen im Erdinnern

(I. Mitteilung)

von

Dr. Hans Benndorf.

Aus dem physikalischen Institut der Universität Graz.

(Mit 3 Textfiguren.)

(Vorgelegt in der Sitzung am 19. Oktober 1906.)

Je mehr man sich in die Probleme vertieft, die beim Studium der Eigenschaften des Erdinnern entgegnetreten, um so hoffnungsloser erscheint ein Versuch ihrer Lösung, wenn anders man sich nicht entschließt, radikale Vereinfachungen den Betrachtungen zu Grunde zu legen. Natürlich hat ein solches Vorgehen manches Bedenkliche an sich, zumal wenn man oft mehr aus Not als aus Überzeugung zu vereinfachenden Hypothesen greift.

Doch bin ich davon durchdrungen, daß ein Fortschritt in unseren Kenntnissen über das Erdinnere gegenwärtig nur durch zahlreiche Vorstöße zu erreichen ist, die, wenn sie sich später auch als Irrwege herausstellen sollten, doch das große unerforschte Gebiet in kleinen Teilen aufklären helfen.

Von diesem Gesichtspunkte möchte ich auch die unter obigem Titel erscheinenden Betrachtungen angesehen wissen; wengleich ich glaube, daß ein Teil der Arbeit manches zu Tage fördert, was innerhalb der Fehlergrenzen sich dauernd als richtig erweisen wird, so bin ich mir doch voll bewußt, daß anderes wieder, besonders in den folgenden Mitteilungen, ziemlich unsicher ist und seine Berechtigung nur als Versuch, überhaupt weiter zu kommen, finden kann.

Fußend auf dem vorliegenden Beobachtungsmaterial, wird versucht, mit besonderer Berücksichtigung der noch viel zu wenig beachteten Arbeit Schlüter's,¹ die man im engeren Kreise der Erdbebenuntersuchungen wohl als epochemachend bezeichnen muß, den Verlauf der Bebenwellen und die wirkliche Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Erdinnern näher zu untersuchen, woraus sich dann von selbst Schlüsse auf die Beschaffenheit, insbesondere die elastischen Eigenschaften des Erdinnern, ergeben.

I. Die Laufzeiten des ersten Vorbebens.

Daß die jedes Beben einleitenden ersten Erschütterungen longitudinalen Wellen, die das Erdinnere durchziehen, ihren Ursprung verdanken, kann man seit den Beobachtungen Schlüter's wohl auch als experimentell sichergestellt ansehen; sowohl die Tatsache, daß bei sehr fernen Beben die Bewegung in der Vertikalen meist um mehrere Minuten früher einsetzt als auch die Bestimmung des Emergenzwinkels können im Lichte der A. Schmidt'schen Theorie als Beweise dafür angesehen werden.

Ich habe mir nun die Aufgabe gestellt, den Weg und die wirkliche Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieser longitudinalen Wellen in verschiedenen Tiefen wenigstens annähernd zu bestimmen.

Dazu ist es nun zuerst nötig, die Laufzeit zu kennen, die ein Impuls braucht, um von dem punktförmig angenommenen Bebenherd einen bestimmten Punkt der Erdoberfläche zu erreichen.²

In der vorliegenden Literatur ist es leider üblich, nicht diese Laufzeiten direkt anzugeben, sondern Fortpflanzungsgeschwindigkeiten, die dadurch erhalten werden, daß die Entfernung zwischen zwei Stationen, von denen die eine allerdings

¹ W. Schlüter, Schwingungsart und Weg der Erdbebenwellen. Beiträge zur Geophysik, V. Bd., 1903, p. 314.

² Im folgenden sollen nur Entfernungen vom Epizentrum betrachtet werden, die größer als 1000 *km* sind, so daß sowohl die Herdlinien oder Flächen als nahe punktförmig angesehen werden können und auch die Herdtiefe vollkommen zu vernachlässigen ist.

oftmals nahe dem Epizentrum liegt, durch die Zeitdifferenz des Eintreffens des Vorbebens dividiert wird.

Nun ist aber leicht einzusehen, daß, wenn man selbst die Epizentralentfernung eines Ortes durch die Zeit dividiert, die ein Stoß vom Epizentrum bis zum Beobachtungsort gebraucht hat, ein Wert der Geschwindigkeit erhalten wird, der nur dazu angetan ist, die Vorstellungen zu verwirren, solange man den wirklichen Weg des Stoßstrahles nicht kennt.

Das direkt Gegebene, auf das man eventuell weitere Schlüsse bauen kann, ist allein die Laufzeit.

Eine Kurve für die Laufzeiten (Epizentraldistanz Abszisse, Zeit Ordinate) gibt Milne.¹ Bei näherer Diskussion des Beobachtungsmaterials erweisen sich diese Zeitwerte durchgängig als etwas zu hoch; und so hat denn auch Milne selbst im folgenden Jahresbericht² größere Werte für die Geschwindigkeit, d. h. niedrigere für die Laufzeiten angenommen. Da aber das diese Korrektur begründende Zitat durch einen Druckfehler entstellt³ ist, konnte ich nicht entnehmen, worauf sie sich stützt.

Ich war daher bemüht, aus dem vorliegenden Beobachtungsmaterial selbständig eine Zeitkurve für die ersten Vorläufer zu berechnen und bin nachträglich durch eine ziemlich nahe Übereinstimmung mit der korrigierten Milne'schen Kurve erfreut worden.

Was nun das Beobachtungsmaterial anlangt, wäre zunächst folgendes hervorzuheben: Da der Emergenzwinkel (Winkel, den der Stoßstrahl beim Eintreffen auf der Erdoberfläche mit der Horizontalen bildet) schon für relativ kleine Distanzen (2000 km) wahrscheinlich 60° beträgt, wäre es höchst vorteilhaft, wenn man die Eintrittszeiten der ersten Vorläufer aus Diagrammen von genügend empfindlichen Vertikal-seismographen entnehmen könnte. Da aber derartige Instrumente nur an sehr wenigen Orten aufgestellt sind, mit Dämpfung versehene meines Wissens erst kürzlich eines in Göttingen, muß man notgedrungen zu den Aufzeichnungen von Horizontalpendeln greifen.

¹ Brit. Ass. Rep., 1902, p. 65.

² Brit. Ass. Rep., 1903, p. 84.

³ Siehe Nachtrag.

Da ferner mit zunehmender Epizentralentfernung die Intensität der Wellen überhaupt abnimmt und überdies durch das Wachsen der Emergenzwinkel die Horizontalkomponenten der Null sich nähern, sind von den verschiedenen Aufzeichnungen in erster Linie die solcher Instrumente zu verwenden, die eine hohe Vergrößerung (V) rascher Schwingungen zeigen. Nach ihrer Brauchbarkeit in dieser Hinsicht geordnet, würde die Reihenfolge der gebräuchlichen Typen etwa die folgende sein:¹

Wiechert'sches Pendel, 17.000 <i>kg</i>	$V = 2000$
» » 1.000 <i>kg</i>	200
Vicentini'sches langes Pendel	160
Ehler'sches Pendel mit Dämpfung	100
Vicentini's kurzes Pendel	100
Omori's Horizontalpendel	10
Milne's »	7

Sieht man vom erstgenannten Instrument ab, das erst seit kurzem registriert, so sind die Zeitangaben auch der besten übrigen Instrumente höchstens bis zu Entfernungen von zirka 14.000 *km* brauchbar, weil oberhalb derselben infolge der begrenzten Auflösungsfähigkeit der Diagramme oftmals der erste Einsatz des Bebens nicht erkennbar und erst eine spätere Phase der Ablesung zu Grunde gelegt wird. So hat, wie oben erwähnt, auch Schlüter² gefunden, daß bei sehr fernen Beben die Bewegung der Horizontalkomponente oftmals um mehrere Minuten später einsetzte als die der Vertikalkomponente.

Da nun die Instrumente mit hoher Vergrößerungszahl fast ausschließlich in Europa aufgestellt sind, wird es sich empfehlen, der Berechnung der Zeitkurve in erster Linie Beobachtungen europäischer Stationen zu Grunde zu legen.

Die Quellen, aus denen ich geschöpft habe, sind die folgenden:

I. E. Rudolph, Über das Erdbeben von Ceram am 30. September 1899. Beiträge zur Geophysik, Bd. VI, 1903,

¹ Vergl. E. Wiechert, Prinzipien für die Beurteilung der Wirksamkeit von Seismographen. Phys. Zeitschr., Bd. II, 1901, p. 593.

² L. c., p. 445.

p. 238. Die Zeitwerte, die aus dieser sorgfältigen Zusammenstellung sich ergeben, sind alle im Mittel etwas größer als die aus andern Beobachtungen folgenden. Die Vermutung, daß die Eintrittszeit im Epizentrum von Rudolph etwas zu früh angenommen ist, drängt sich von selbst auf. Ich habe darum versucht, unter Zugrundelegung der von mir berechneten Laufzeitkurve das Eintreffen des Bebens im Epizentrum aus den Zeitangaben der vier benachbarten Stationen Batavia 2500 *km*, Tokyo II. 4500 *km*, Calcutta 5200 *km* und Bombay 6600 *km* durch Subtraktion der entsprechenden Laufzeiten zu berechnen und fand:

$$\begin{aligned} 17^h \ 7 \cdot 3^m - 4 \cdot 4 &= 17^h \ 2 \cdot 9^m \text{ für Batavia} \\ 17^h \ 11 \cdot 0^m - 7 \cdot 2 &= 17^h \ 3 \cdot 8^m \text{ » Tokyo II} \\ 17^h \ 11 \cdot 4^m - 8 \cdot 1 &= 17^h \ 3 \cdot 3^m \text{ » Calcutta} \\ 17^h \ 13 \cdot 6^m - 9 \cdot 8 &= 17^h \ 3 \cdot 8^m \text{ » Bombay} \\ \text{Im Mittel } 17^h \ 3 \cdot 5^m & \end{aligned}$$

Dieser Wert stimmt nun fast genau mit dem von anderer Seite¹ gefundenen $17^h \ 3 \cdot 4^m$ überein, so daß er dadurch noch größere Sicherheit bekommt. Die Ursache, daß Rudolph einen niedrigeren Wert findet, liegt darin, daß er seinen Berechnungen implizite eine geradlinige Laufzeitkurve zu Grunde legt.

Nimmt man obigen Wert $17^h \ 3 \cdot 5^m$ als richtig an, so fallen die Angaben des Cerambebens mit den übrigen sehr gut zusammen.

II. E. Rudolph, Seismometrische Beobachtungen über japanische Fernbeben in den Jahren 1893—1897. Beiträge zur Geophysik, Bd. VI, 1903, p. 377.

III. F. Omori, Results of the horizontal pendulum observations July 1898 to Dec. 1899 Tokyo. Publ. of the earthquake Investigation Committee No. 5 (1901).

Die hieraus verwendeten Beben I bis VII und X sind zum größten Teile schon unter II behandelt, die Berechnung der Laufzeit erfolgt jedoch etwas anders. Omori gibt die Zeitdifferenz Europa—Tokyo und die Entfernung Tokyos vom Epizentrum an; da diese klein ist, habe ich an den Omori'schen

¹ »Over den aanfangstijd der Cerám-aardbeving«. Natuurk. Tijdschrift voor Ned-Indië, 1900, Bd. LX, p. 196. Zitiert nach E. Rudolph.

Zahlen Korrekturen angebracht, und zwar für die Epizentraldistanz 400, 500, 900 *km* 1·0, 1·1, 1·9 Minuten.

IV. F. Omori, Horizontal pendulum observation of earthquake at Hitotsubashi 1900. Publ. of the earthquake Investigation Committee, No. 13 (1903).

Verwendet wurden die Beben 1 bis 5 und 7 bis 9 in Tabelle XLIII, p. 133.

Als Korrekturen wurden angebracht für die Epizentralentfernung 400, 600, 800, 900, 1300 *km* die Laufzeiten 1·0, 1·3, 1·7, 1·9, 2·4 Minuten.

V. A. Imamura, On Milne horizontal pendulum seismograms obtained at Hongo. Publ. of the earthquake Investigation committee, No. 16 (1904).

Verwendet wurden 13 Beben der Tabelle I, p. 105.

VI. A. Imamura, On the transit velocity of the earthquake Motion originating at a near distance. Publ. of the earthquake Investigation committee, Nr. 18, p. 117 (1904).

Verwendet wurden 23 Beben, p. 105, und die Erdbeben Nr. 2 und 3, p. 106, mit Korrekturen von 0·5, 1·4 Minuten für die Epizentraldistanzen 200 und 650 *km*.

Aus diesen Zusammenstellungen erhielt ich 252 Einzelwerte, die, nach den Quellen in Gruppen zusammengefaßt, in Tabelle I aufgeführt sind. Es bedeutet Δ die Entfernung längs des größten Kreises, gemessen in Megametern (1 Megameter = 1000 *km*), T_1 die Laufzeit der ersten Vorläufer in Minuten, n die Anzahl der Beobachtungen.

In Fig. 1, p. 9, sind diese Werte eingetragen, und zwar solche mit einem Gewicht über 10 mit einem Doppelring, über 4 mit einem einfachen Kreis, solche, welche auf weniger als vier Beobachtungen sich stützen, mit einem Kreuz bezeichnet, worden.

Für die weiteren Untersuchungen erschien es wünschenswert, die Abhängigkeit der T_1 von der Epizentralentfernung auch analytisch auszudrücken; es gelingt dies in befriedigender Weise, wie die Kurve für T_1 in Fig. 1 zeigt, wenn man die zweikonstantige Formel

$$T_1 = a + b\Delta \left(1 - \frac{1}{40} \Delta \right) = a + b\Delta - \frac{b}{40} \Delta^2 \quad 1)$$

verwendet.

Tabelle I.

Quelle	$\Delta = 0.5$		$\Delta = 0.6$		$\Delta = 0.7$		$\Delta = 0.8$		$\Delta = 1.0$		$\Delta = 2.5$		$\Delta = 3.0$	
	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n
I											3.8	1		
II														
III														
IV														
V											3.2	1	4.3	1
VI	1.1	15	1.4	2	1.5	10	1.7	10	1.9	8			5.4	2
Mittel	1.1	15	1.4	2	1.5	10	1.7	10	1.9	8	3.5	2	5.0	3
Quelle	$\Delta = 4.5$		$\Delta = 5.0$		$\Delta = 5.5$		$\Delta = 6.0$		$\Delta = 6.5$		$\Delta = 7.0$		$\Delta = 7.5$	
	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n
I	7.2	1	7.9	1					10.1	1				
II											9.4	1	10.6	8
III														
IV														
V	5.4	1	7.3	1	7.3	2	7.4	2						
VI					8.0	1	9.1	2	10.1	5			11.0	5
Mittel	6.3	2	7.6	2	7.5	3	8.3	4	10.1	6	9.4	1	10.8	13

Quelle	$\Delta = 8.0$		$\Delta = 8.5$		$\Delta = 9.0$		$\Delta = 9.5$		$\Delta = 10.0$		$\Delta = 11.0$		$\Delta = 11.5$	
	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n
I	10.3	14	11.8	8	12.5	11	13.3	18	13.0	14	12.9	1	15.0	2
II					12.8	1	12.8	17	13.3	9				
III					12.3	12	11.4	24	12.5	4				
IV	11.6	4	11.8	8	11.5	1	12.4	14	13.0	27	14.2	1	15.0	2
V					12.4	14					13.6	2		
VI	10.6	18	11.8	8	12.4	39	12.4	59	13.0	27	13.6	2	15.0	2
Mittel	10.6	18	11.8	8	12.4	39	12.4	59	13.0	27	13.6	2	15.0	2
Quelle	$\Delta = 12.0$		$\Delta = 12.5$		$\Delta = 13.0$		$\Delta = 16.0$		$\Delta = 16.5$		$\Delta = 18.0$			
	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n	T_1	n
I	14.7	3	14.7	3	16.4	1	18.3	1	17.8	1	17.7	1		
II														
III	18.9	1	14.7	3	16.6	2	17.8	3	17.8	1	17.7	1		
IV														
V	18.9	1	14.7	3	16.6	2	17.8	3	17.8	1	17.7	1		
VI	14.8	6	14.7	3	16.6	2	17.8	3	17.8	1	17.7	1		
Mittel	14.8	6	14.7	3	16.6	2	17.8	3	17.8	1	17.7	1		

Aus den Zahlenwerten für T_1 ergibt sich

$$T_1 = 0.4 + 1.7\Delta - 0.042\Delta^2, \quad (2)$$

wobei Minuten und Megameter als Einheiten zu Grunde gelegt sind.

Die Kurve hat, wie es die angenommene Art der Fortpflanzung der ersten Vorläufer bedingt, ein Maximum bei

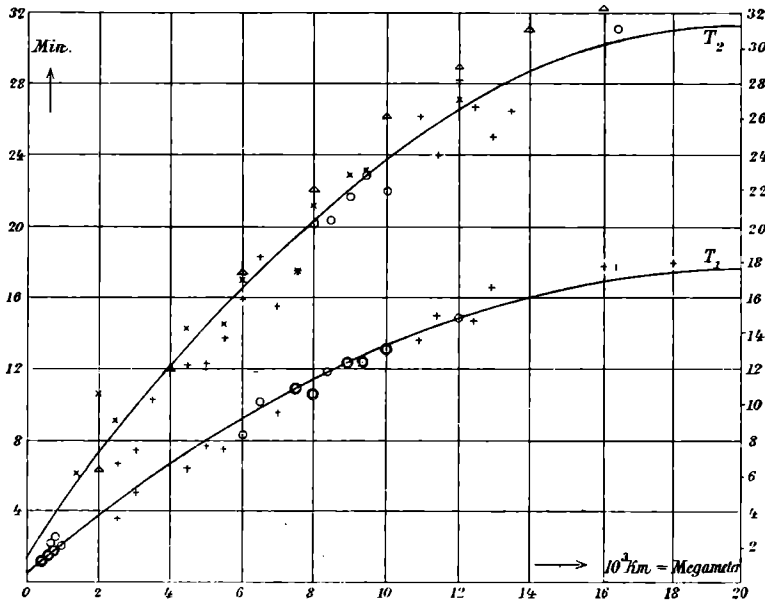


Fig. 1.

$\Delta = 20$ und berührt die Punkte, die durch die verhältnismäßig große Zahl der Beobachtungen recht sichergestellt zu sein scheinen. Für Entfernungen von 14.000 *km* und darüber liegen die Beobachtungspunkte alle oberhalb der Kurve, was durch die schon oben erwähnte zu geringe Empfindlichkeit der Horizontalpendel bedingt ist. Bedenklicher könnte erscheinen, daß zwischen $\Delta = 3$ und $\Delta = 6$ alle Punkte unterhalb der berechneten Kurve liegen, obgleich diesen Daten kein großes Gewicht zukommt; und es erscheint mir in der Tat möglich, daß ein

reichlicheres Beobachtungsmaterial im angegebenen Intervall eine Einsenkung der Kurve erfordern wird, ein Umstand, auf den ich in einem späteren Abschnitte noch einmal zurückkomme.

Vorläufig aber gibt Gleichung 2) die Beobachtungen genügend gut wieder, und ich glaube, daß die wahren Laufzeiten mit einer Fehlergrenze von höchstens 5% im allgemeinen und vielleicht 10% zwischen $\Delta = 3$ und $\Delta = 6$ durch die Formel wiedergegeben werden.

Die scheinbare Oberflächengeschwindigkeit der ersten Vorläufer erhält man durch Differentiation

$$\begin{aligned} v_1^{(s)} &= \frac{d\Delta}{dT_1} = \frac{1}{1.7 - 0.084 \Delta} \frac{\text{Megameter}}{\text{Minuten}} = \\ &= \frac{1}{1.7 - 0.084 \Delta} \cdot \frac{1000}{60} \frac{\text{km}}{\text{sec}} \quad 3) \end{aligned}$$

und die so beliebte, aber nichtssagende Geschwindigkeit

$$v_1^{(r)} = \frac{\Delta}{T_1} = \frac{\Delta}{0.4 + 1.7\Delta - 0.042\Delta^2} \frac{\text{Megameter}}{\text{Minuten}} \quad 4)$$

Zur allgemeinen Orientierung sind in Tabelle II die Werte für T_1 zusammengestellt, wie sie sich ergeben: 1. aus Formel 2), 2. nach Milne 1902, 3. nach Milne 1903, 4. nach Imamura (Quelle V) und die Größe von $v_1^{(s)}$ und $v_1^{(r)}$ für verschiedene Epizentralentfernungen.

Tabelle II.

Δ in Megametern =	1·0	2·0	4·0	6·0	8·0	10·0	12·0	14·0	16·0	18·0	20·0
T_1 nach Formel 2).....	2·1	3·6	6·5	9·1	11·3	13·2	14·8	16·0	16·9	17·4	17·6
T_1 nach Milne 1902	2·2	3·8	7·3	10·7	13·7	16·4	18·6	20·2	21·4	—	—
T_1 nach Milne 1903	2·2	3·2	6·2	9·0	11·3	13·1	14·7	15·9	16·8	—	—
T_1 nach Imamura	1·2	2·5	5·0	7·5	10·0	12·5	15·0	17·5	20·0	—	—
$v_1^{(s)} \frac{km}{sec}$	10·3	10·9	12·3	13·9	16·2	19·4	24·2	31·4	46·3	87·7	∞
$v_1^{(c)} \frac{km}{sec}$	7·9	9·3	10·2	11·0	11·8	12·6	13·6	14·6	15·8	17·2	18·8

2. Die Laufzeiten des zweiten Vorbebens.

Kann man es als recht sicher ansehen, daß die ersten Vorläufer durch den Erdkern gehende Longitudinalwellen sind, so ist man bei der Frage nach der Natur des zweiten Vorbebens auf das Gebiet der Vermutungen verwiesen.

Mir scheint es ziemlich wahrscheinlich, daß die zweiten Vorläufer Scherungswellen sind, die auch durch die Erde hindurchgehen, und werde weiter unten diese Ansicht zu begründen versuchen. Hier soll vorläufig in analoger Weise wie im ersten Abschnitt ihre Laufzeitkurve möglichst genau fixiert werden.

Das Material ist hier insofern etwas reichhaltiger, weil man auch Beben einbeziehen kann, bei denen zwar das Epizentrum, nicht aber die Eintrittszeit im Epizentrum bekannt sein muß. Ich habe hier dieselben Quellen I bis VI benützt wie in Abschnitt 1; außerdem liegt bereits eine Laufzeitkurve von Milne (Report, 1902) vor, die nach seiner Angabe mit einer von R. T. Oldham¹ identisch ist; schließlich habe ich aus den Bebenberichten der Stationen Leipzig, Potsdam, Göttingen eine Reihe von Zahlen entnommen; die Werte der letztgenannten Stationen müssen besonders bevorzugt werden, weil sie von Instrumenten stammen, die große Registriergeschwindigkeit mit starker Vergrößerung und Dämpfung vereinigen.

In Tabelle III sind diese Zahlen niedergelegt, in den ersten sechs Horizontalreihen nach den einzelnen Quellen im Mittel zusammengefaßt, dann die Mittelwerte dieser sechs Reihen mit Angabe der Gewichte (n), dann die Zahlen der Milne'schen Kurve und schließlich die Werte der gedämpften Pendel. Die Zeiten sind wieder in Minuten, die Entfernungen in Megametern gemessen.

Ein Bild der Streuung dieser Werte gibt Fig. 1 oben, wobei die Mittelwerte (I bis VI) vom Gewicht über 10 mit \circ , vom geringeren Gewichte mit $+$, die Milne'schen Zahlen mit \triangle und die gedämpften Werte mit \times bezeichnet sind.

¹ Milne zitiert R. T. Oldham Phil. Trans. Roy. Soc., p. 163 (1900?).

Tabelle III.

Quelle	$\Delta = 0.6$		$\Delta = 0.7$		$\Delta = 0.8$		$\Delta = 1.5$		$\Delta = 2.0$		$\Delta = 2.5$		$\Delta = 3.0$	
	T_2	n	T_2	n	T_2	n	T_2	n	T_2	n	T_2	n	T_2	n
I											7.1	1		
II														
III														
IV														
V											6.2	1	7.2	1
VI			2.1	10	2.4	10								
Mittel			2.1	10	2.4	10					6.6	2	7.2	1
Milne 1902									6.3					
Gedämpfte Pendel.....	1.5	1					5.9	3	10.7	1	8.9	1	7.3	1

Quelle	$\Delta = 3.5$		$\Delta = 4.0$		$\Delta = 4.5$		$\Delta = 5.0$		$\Delta = 5.5$		$\Delta = 6.0$		$\Delta = 6.5$	
	T_2	n	T_2	n	T_2	n	T_2	n	T_2	n	T_2	n	T_2	n
I					13.3	1							18.2	1
II														
III							12.4	1			16.6	3		
IV														
V	10.3	2	12.2	1	11.3	1	12.0	2	13.7	2	13.9	1		
VI														
Mittel	10.3	2	12.2	1	12.3	2	12.1	3	13.7	2	15.9	4	18.2	1
Milne 1902			12.2								17.4			
Gedämpfte Pendel					14.2	3			14.4	2	16.9	1		

Quelle	$\Delta = 7.0$		$\Delta = 7.5$		$\Delta = 8.0$		$\Delta = 8.5$		$\Delta = 9.0$		$\Delta = 9.5$		$\Delta = 10.0$	
	T_2	n	T_2	n	T_2	n	T_2	n	T_2	n	T_2	n	T_2	n
I					21.1	1							24.5	1
II			17.4	3	20.1	10	19.6	6	20.4	5	22.0	6	22.1	8
III									22.5	2	23.4	20		
IV							21.6	5	23.0	4	23.5	10	21.1	4
V	15.5	2					19.9	5	21.6	2				
VI														
Mittel	15.5	2	17.4	3	20.2	11	20.3	16	21.7	13	23.1	36	22.0	13
Milne 1902					22.3								26.2	
Gedämpfte Pendel.....			17.4	1	21.2	1			22.8	1	23.4	2		

Quelle	$\Delta = 15\cdot0$		$\Delta = 16\cdot0$		$\Delta = 16\cdot5$		$\Delta = 17\cdot0$		$\Delta = 18\cdot0$	
	T_2	n	T_2	n	T_2	n	T_2	n	T_2	n
I										
II										
III										
IV										
V			40·2	1	31·3	1	36·7	1	44·2	1
VI										
Mittel			40·2	1	31·3	1	36·7	1	44·2	1
Milne 1902	31·8		32·4							
Gedämpfte Pendel.....										

Auch hier habe ich eine Kurve zweiten Grades berechnet, die sich gut den Beobachtungen anschließt; es ergibt sich

$$T_2 = 1.3 + 3.0 \Delta \left(1 - \frac{\Delta}{40}\right) = 1.3 + 3.0 \Delta - 0.075 \Delta^2. \tag{5}$$

Tabelle IV gibt die Werte für verschiedene Epizentralentfernungen von $T_2, T_2 : T_1$, der scheinbaren Oberflächengeschwindigkeit

$$v_2^{(s)} = \frac{d\Delta}{dT_2} = \frac{1}{3.0 - 0.15 \Delta} \cdot \frac{1000 \text{ km}}{60 \text{ sec}} \tag{6}$$

und der fiktiven Geschwindigkeit $v_2^{(?) } = \frac{\Delta}{T_2} \cdot \frac{1000 \text{ km}}{60 \text{ sec}}$.

Tabelle IV.

Δ in Megametern	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
T_2 in Minuten nach Formel 5) ...	4.2	7.0	12.1	16.6	20.5	23.8	26.5	28.6	30.1	31.0	31.3
$T_2 : T_1$	2.0	1.94	1.86	1.82	1.81	1.80	1.79	1.78	1.78	1.78	1.78
$v_2^{(s)} \frac{km}{sec}$	5.9	6.2	6.9	7.9	9.3	11.1	13.9	18.5	27.8	55.6	∞
$v_2^{(?) } \frac{km}{sec}$	4.0	4.7	5.5	6.0	6.5	7.0	7.6	8.2	8.8	9.6	10.7

Was die Sicherheit der Kurve für die T_2 anlangt, so muß allerdings hervorgehoben werden, daß die Werte über $\Delta = 14$ wesentlich unsicherer sind als die entsprechenden Werte von T_1 ; ja es könnte sogar möglich sein, daß ausgedehnteres Beobachtungsmaterial einen geradlinigen Verlauf der Kurve bedingen würde; indes scheint mir dieser Fall nicht wahrscheinlich. Jedenfalls muß festgestellt werden, daß das Flachwerden der T_2 -Kurve, das übrigens auch Milne annimmt, nicht über jeden Zweifel erhaben ist. Stellt man sich freilich auf den Standpunkt, daß die zweiten Vorläufer, weiß Ursprungs sie immer seien, durch den Erdkern hindurchgehen, ist eine Abweichung der Kurve von der geraden Linie auf jeden Fall zu erwarten.

3. Die Regeln von Láska.

W. Láska¹ hat zwei höchst einfache empirische Regeln aufgestellt, um aus der Länge des ganzen Vorbebens und der des ersten Vorbebens die Epizentralentfernung zu bestimmen; geradezu verblüffend ist bei der Einfachheit der Formeln die Übereinstimmung, von der ich mich durch eine große Reihe von Proben überzeugt habe.

Mißt man die Zeiten in Minuten, die Entfernungen in Megametern, so lautet die erste Regel:

Die Länge des ersten Vorbebens, vermindert um eine Minute, ist gleich der Epizentralentfernung in Megametern;
die zweite:

Die Länge des ganzen Vorbebens in Minuten ist gleich der dreifachen Entfernung in Megametern.

Unter Verwendung unserer Bezeichnungsweise lauten sie:

$$T_2 - T_1 - 1 = \Delta \quad 7)$$

und

$$T - T_1 = 3 \Delta, \quad 8)$$

wobei mit T die Laufzeit gewisser Wellen des Hauptbebens bezeichnet ist.

¹ Über die Berechnung der Fernbeben. Mitteil. der Erdbeben-Kommission der kaiserl. Akademie der Wissensch. in Wien, Neue Folge, XIV, 1903.

Diese beiden Formeln können nach Láska auch in eine zusammengezogen werden, wenn die Beobachtungen von Instrumenten mit Dämpfung herrühren, weil sich dann $T-T_1$ mit ähnlicher Sicherheit bestimmen läßt wie T_2-T_1 . Man erhält so

$$\frac{T+T_2-2T_1-1}{4} = \Delta. \quad 9)$$

Bei Pendeln ohne Dämpfung ist die Bestimmung von $T-T_1$ bedeutend ungenauer als die von T_2-T_1 , weshalb die Einführung von Gewichten p und q empfehlenswert ist, wenn man mehrere Beben eines Epizentrums zur Verfügung hat; man erhält so:

$$\Delta = \frac{\frac{T-T_1}{3} \cdot p + (T_2-T_1-1) q}{p+q}. \quad 10)$$

Um nun einen Einblick in die Verhältnisse zu erlangen, die den Láska'schen Regeln zu Grunde liegen, habe ich folgenden Weg eingeschlagen:

Aus den Angaben¹ der Wiechert'schen Pendel der Stationen Leipzig, Potsdam und Göttingen wurde zunächst nach Formel 9) die Epizentralentfernung für die einzelnen Beben bestimmt und dann zu den so gefundenen Entfernungen als Abszissen zunächst die Werte von T_2-T_1-1 als Ordinaten aufgetragen. Man erhält auf diese Weise eine Gruppierung von Punkten, wie sie Fig. 2 zeigt.

Andrerseits wurden die Werte von T_2-T_1-1 aus den oben abgeleiteten Formeln 5) und 2) für T_2 und T_1 berechnet. Es ergibt sich

$$T_2-T_1-1 = -0.1 + 1.3 \Delta - 0.033 \Delta^2. \quad 11)$$

Trägt man nun die der Gleichung 11) entsprechende Kurve ein (siehe Fig. 2), so findet man in Anbetracht der großen Unsicherheit der Ablesungen eine sehr gute Übereinstimmung.

¹ Dabei wurden, um sicher zu gehen, nur solche Angaben der drei Stationen benützt, bei denen die Ablesungen der einzelnen Bebenphasen vermutlich noch nicht durch die Kenntnis der Láska'schen Regel beeinflusst sein konnten.

Diese Tatsache nun ist zunächst eine weitere Stütze für die Richtigkeit der in den ersten beiden Abschnitten abgeleiteten Laufzeitkurven; denn es muß besonders bemerkt werden, daß das hier verwendete Beobachtungsmaterial von Leipzig, Potsdam und Göttingen weder zur Bestimmung der T_1 -Kurve noch zu der von T_2 benützt worden ist. Weiters aber gibt sie uns Einblick in die systematischen Fehler der ersten Láska'schen Regel (Gleichung 7).

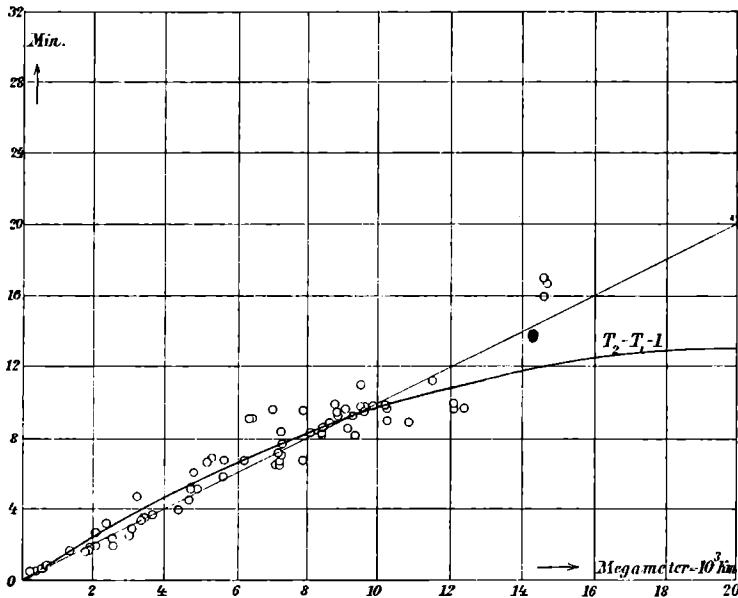


Fig. 2.

Aus Gleichung 11) ergibt sich

für $\Delta =$	0	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$T_2 - T_1 - 1 =$	-0.1	1.2	2.4	4.6	6.5	8.2	9.7	10.8	11.7	12.4	12.8	12.9

und aus der Umkehrung der Gleichung 11):

für $T_2 - T_1 - 1 =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12.9
$\Delta =$	0.9	1.7	2.5	3.4	4.4	5.4	6.5	7.7	9.0	10.5	12.5	14.8	20.0
Differenz =	0.1	0.3	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.3	0.0	-0.5	-1.5	-2.8	-7.1

Das Tausendfache der in der dritten Reihe gebildeten Differenzen gibt den Fehler in Kilometern an, den man begeht,

wenn die Entfernung nach Regel 1 berechnet wird. Umgekehrt kann man mit Berücksichtigung dieser Differenzen aus der Länge des ersten Vorbebens allein die Epizentralentfernung bestimmen.

Einer ähnlichen Betrachtung könnten wir die zweite Láska'sche Regel unterwerfen, wenn wir eine genügend sichere Laufzeitkurve für die in Betracht kommende Partie des Hauptbebens besäßen.

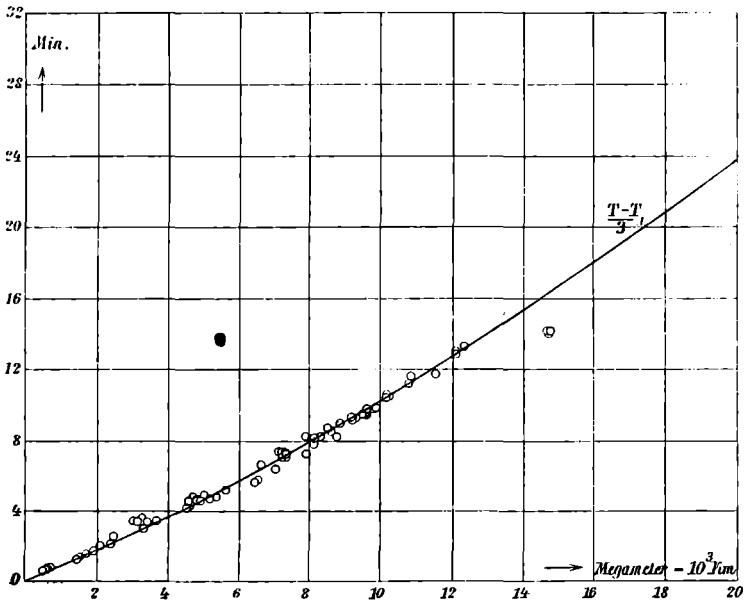


Fig. 3.

Da aber fast das gesamte Beobachtungsmaterial von ungedämpften Pendeln herrührt, sind die Angaben über die Abhängigkeit des T von Δ nur mit großer Vorsicht aufzunehmen.

Ich habe es daher für besser gehalten, den umgekehrten Weg einzuschlagen.

Aus den Beobachtungen der drei Stationen mit gedämpften Instrumenten wurden wieder als Abszissen $\frac{T + T_2 - 2T_1 - 1}{4}$ und $\frac{T - T_1}{3}$ als Ordinaten aufgetragen; man erhält so die

Punkte in Fig. 3. Wie man sieht, läßt sich mit großer Sicherheit eine Kurve durch diese Punkte legen.

Die Gleichung dieser Kurve lautet:

$$\frac{T-T_1}{3} = -0.1 + 0.9 \Delta + 0.014 \Delta^2 \tag{12}$$

oder

$$T - T_1 = -0.3 + 2.7 \Delta + 0.042 \Delta^2.$$

Addiert man nun beiderseits den Wert $T_1 = 0.4 + 1.7 \Delta - 0.042 \Delta^2$, so ergibt sich $T = 0.1 + 4.4 \Delta$ oder genügend genau

$$T = 4.4 \Delta. \tag{13}$$

Wir hätten also auf diese Weise eine Laufzeitkurve für das Maximum oder eventuell die langen Wellen des Hauptbebens erhalten.

Da sie eine gerade Linie darstellt, ist anzunehmen, daß die Wellen längs der Erdoberfläche fortschreiten, wie man dies ja auch allgemein für das Hauptbeben annimmt.

Die Geschwindigkeit v dieser Wellen ergibt sich

$$v = \frac{\Delta}{T} = \frac{1}{4.4} \frac{\text{Megameter}}{\text{Minuten}} = \frac{1000}{4.4 \times 60} \frac{\text{km}}{\text{sec}} = 3.8 \frac{\text{km}}{\text{sec}}. \tag{14}$$

Dieser Wert ist etwas größer als der gewöhnlich angenommene von $3.3 \frac{\text{km}}{\text{sec}}$, worauf ich im folgenden Abschnitte noch zurückkommen werde.

Für die Láska'sche Regel Nr. 2 ergibt sich aber folgendes: aus Gleichung 12) folgt

für $\Delta =$	0	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\frac{T-T_1}{3} =$	-0.1	0.8	1.8	3.7	5.8	8.0	10.3	12.7	15.2	17.9	20.6	23.5

und umgekehrt für

$\frac{T-T_1}{3} =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	23
$\Delta =$	1.2	2.2	3.3	4.3	5.3	6.2	7.1	8.0	8.9	9.7	11.5	13.1	14.6	16.0	17.6	19.6
Differenz	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.9	1.4	2.0	2.4	3.4

Aus diesen Zahlen ergibt sich zunächst, daß die systematischen Abweichungen der Regel 2 durchwegs kleiner sind als die der Regel 1, auch bei Distanzen größer als $\Delta = 10$; dadurch rechtfertigt es sich auch, daß in die kombinierte Regel Gleichung 9) die Regel Nr. 2 mit größerem Gewicht eingeht.

Betrachten wir nun zum Schlusse die kombinierte Hauptregel Láska's, $\Delta^{(b)} = \frac{T + T_2 - 2T_1 - 1}{4}$, so erhalten wir durch Einsetzen der Gleichungen 2), 5), 13)

$$\Delta^{(b)} = -0.1 + 1.0 \Delta - 0.002 \Delta^2. \quad 15)$$

Wie man sieht, ist sowohl das konstante, wie das quadratische Glied sehr klein, der Koeffizient von Δ rechts aber gleich 1. Man erhält für

$\Delta = 0$	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta^{(b)} = -0.1$	0.9	1.9	3.9	6.0	8.0	10.1	12.2	14.3	16.4	18.5	20.7
$\Delta - \Delta^{(b)} = 0.1$	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.7

Der systematische Fehler ist also in der Hauptregel Láska's, wie man aus obigen Differenzen entnimmt, praktisch gleich Null und somit auch auf anderem Weg erwiesen, daß diese einfache Regel von Láska bezüglich Genauigkeit kaum wird übertroffen werden können.

Nachtrag während der Korrektur:

Einer brieflichen Mitteilung J. Milne's verdanke ich die Richtigstellung des Druckfehlers (statt p. 5 und 6 soll es heißen p. 81 und 82). Die Korrektur der Laufzeiten ist dadurch bedingt, daß von den Aufzeichnungen verschiedener Instrumente derselben Station immer der früheste Einsatz als der richtige angenommen wird.