

Werk

Jahr: 1924

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:1

Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

Werk Id: PPN101433392X_0001

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0001

LOG Id: LOG_0046

LOG Titel: Bodenschütterungen durch fallende Gewichte

LOG Typ: article

Übergeordnetes Werk

Werk Id: PPN101433392X

PURL: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

OPAC: <http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X>

Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain these Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen
Georg-August-Universität Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen
Germany
Email: gdz@sub.uni-goettingen.de

Bodenerschütterungen durch fallende Gewichte*).

(Göttinger seismische Untersuchungen.)

Von **F. Hubert** in Göttingen. — (Mit fünf Abbildungen.)

Es werden Fallversuche beschrieben, die im Gebiet des Göttinger geophysikalischen Institutes vorgenommen wurden. Die Diagramme, sämtlich mit dem Wiechertschen Zweimillionenseismometer in 125 m Entfernung aufgenommen, zeigen neun verschiedene Einsätze und gestatten, die Abhängigkeit der Amplituden von der Fallhöhe und von der Beschaffenheit des Erdbodens an der Aufschlagstelle, und die Abhängigkeit der Periode des ersten Einsatzes von der Impulsfläche zu bestimmen. Die einzelnen Diagramme können nach Art der identischen Seismogramme bei Fernbeben Schwingung für Schwingung aufeinander bezogen werden.

a) Fallversuche mit größeren Fallgewichten und größeren Fallhöhen. Sämtliche Versuche wurden in der Weise ausgeführt, daß nach der Vorbereitung des Versuches der Lichtpunkt des Wiechertschen Seismographen beobachtet wurde; bei Abwesenheit von Störungen durch Wagenverkehr od. dgl. genügte die Schließung eines elektrischen Kontaktes, um das Gewicht zum Fallen zu bringen. Zu den in diesem Abschnitt beschriebenen Fallversuchen wurden Gewichte von 20, 50 und 117 kg benutzt, die Fallhöhen betragen 1 bis 11 m. Anfangs wurde jeder Versuch mit demselben Gewicht und gleicher Fallhöhe dreimal wiederholt, später erwies es sich als ausreichend, die Versuchsreihen in der Weise auszuführen, daß in einer Versuchsreihe dasselbe Gewicht und um je 1 m abnehmende Fallhöhen von 11 m bis herab zu 1 m benutzt wurden. Solche Versuchsreihen ließen sich an einem Nachmittag oder in einer Nacht durchführen. Bei jedem Diagramm wurde ausgemessen die Einsatzzeit der einzelnen Einsätze, ihre Periode, Amplitude und maximale Beschleunigung. Bei dem ersten Einsatz und zum Teil auch noch bei den folgenden Einsätzen waren die Schwingungen öfters so groß, daß der Lichtpunkt auf beiden Seiten das Papier verließ, so daß dann Amplitudenmessungen und manchmal sogar Periodenmessungen nicht mehr auszuführen waren.

Die Einsatzzeiten sind so gewonnen, daß die Zeit vom ersten Einsatz bis zum n -ten auf dem Diagramm ausgemessen und zu der so erhaltenen Zeit die Laufzeit der Wellen, die den ersten Einsatz hervorrufen, hinzuaddiert wurde. Diese Laufzeit hatte sich bei den Sprengversuchen zu 0.074 Sekunden ergeben, S. 141 dieser Zeitschrift. Das Ausmessen der Diagramme erfolgte mit großer Sorgfalt, eine Wiederholung der Messungen führte zu demselben Ergebnis. Betrachtet man einen Einsatz in den Diagrammen, anfangend mit kleinen Fallenergien und fortschreitend zu immer größeren, so findet man zunächst ein schwaches Auftauchen des Einsatzes, während die Kurve vor dem Einsatz noch

*) Eine Beschreibung der instrumentellen Einrichtungen habe ich in einer Arbeit gegeben, die in Heft 4 dieser Zeitschrift (S. 134—143) erschienen ist. Diese frühere Arbeit stellt den ersten Teil, die vorliegende Arbeit den zweiten Teil einer Göttinger Doktordissertation dar.

verhältnismaßig ruhig ist. Mit dem Größerwerden der Fallenergie wird der Einsatz dann scharfer und allmählich füllt sich auch die Kurve vor dem Einsatz mit Schwingungen an, sodaß bei ganz großer Fallenergie der Einsatz dem ungeübten Auge nur noch schwer zu erkennen ist, häufig nur daran, daß der Lichtpunkt sich auf dem Papier plötzlich sehr schnell bewegt und dann kaum einen Eindruck hinterlassen hat. Falls Zweifel auftauchten, welcher von verschiedenen, nahe beieinander gelegenen Punkten der Einsatz sein sollte, wurden sämtliche in Frage kommenden Punkte auf allen Diagrammen durchgemessen und derjenige Punkt als Einsatz gewählt, für welchen die Einsatzzeit auf allen Diagrammen innerhalb der Fehlergrenze konstant war. Auf diese Weise war es möglich, das Vorliegen eines Einsatzes mit großer Sicherheit zu bestimmen. Es wurden folgende Einsätze gefunden mit den Einsatzzeiten:

i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7	i_8	i_9
0.074	0.179	0.296	0.445	0.611	0.90	1.88	2.5	3.2 sec

Die späteren Einsätze, etwa von i_5 ab, fehlen auf den Diagrammen mit kleineren Fallhöhen, und von i_7 ab ist auch bei größeren Fallhöhen nur ein Auftauchen von Wellen zu bemerken. Doch ist die Existenz dieser Einsätze durch die dem Einsatz vorangehende ruhige Kurve ganz sichergestellt.

Die Einsatzzeiten erweisen sich als vollständig unabhängig von den benutzten verschiedenen Fallgewichten und Fallhöhen, sie sind auch bei dem Sprengversuch dieselben. Auch eine Störung durch Eigenschwingungen des Seismographen oder Teile desselben ist vollständig ausgeschlossen, da dieselben Einsatzzeiten bei ganz verschiedenartigen Einregulierungen des Seismographen gewonnen wurden: Bei weicher Einregulierung auf etwa $\frac{1}{5}$ Sekunde Eigenperiode haben wir dieselben Einsatzzeiten wie bei harter Einregulierung auf etwa $\frac{1}{25}$ Sekunde Eigenperiode.

Die Konstanz der Einsatzzeiten und ihre Unabhängigkeit von allen äußeren Einflüssen ist ein wichtiges Ergebnis. Es zeigt, daß Reflexionen seismischer Wellen an mehr oder minder tief gelegenen Unstetigkeitsflächen auftreten, und daß Schichten in Schwingungen geraten. Die Übereinstimmung der Diagramme geht sogar so weit, daß die einzelnen Diagramme unabhängig von Fallhöhe, Fallgewicht und Seismometerregulierung Schwingung für Schwingung und Zacke für Zacke aufeinander bezogen werden können; nur die Amplituden wechseln in ihrer Größe, und die Übereinstimmung tritt daher besonders deutlich hervor, wenn man die Diagramme in der Reihenfolge allmählicher Zunahme der Fallenergien betrachtet.

Es wird hier angenommen, daß der erste Einsatz i_1 mit 0.074 Sekunden Laufzeit der direkt gelaufenen Longitudinalwelle entspricht. Es braucht dies nicht der Fall zu sein, da der Einsatz auch Wellen entsprechen kann, die in einer tieferen Schicht mit größerer Fortpflanzungsgeschwindigkeit gelaufen sind.

Der geologische Aufbau des Hainberges bei Göttingen, auf welchem die Versuche ausgeführt wurden, bietet genügend Anhaltspunkte zur Erklärung dieser Einsätze, sodaß die vermutlich zu erwartenden reflektierenden Unstetigkeitsflächen den einzelnen Einsätzen zugeordnet werden können. Die genaue Lagerung der Schichten des Hainberges an der Versuchs-

stelle ist leider nicht bekannt, doch haben wir folgendes zu erwarten: An der Oberfläche zutage tretend Muschelkalk, darunter Buntsandstein, dann in noch größeren Tiefen Zechstein mit Einlagerungen von jüngerem und älterem Stein-

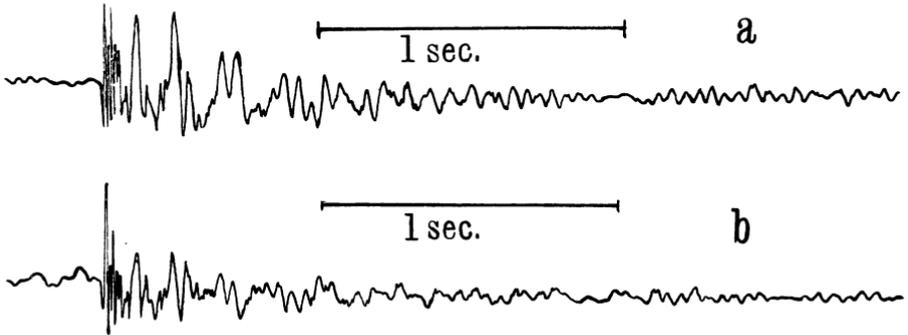


Fig. 1. Aus Versuchsreihe 1. Fallgewicht: 20 kg; Fallhöhe: a) 12 m; b) 3 m. Seismometer: Weiche Regulierung.

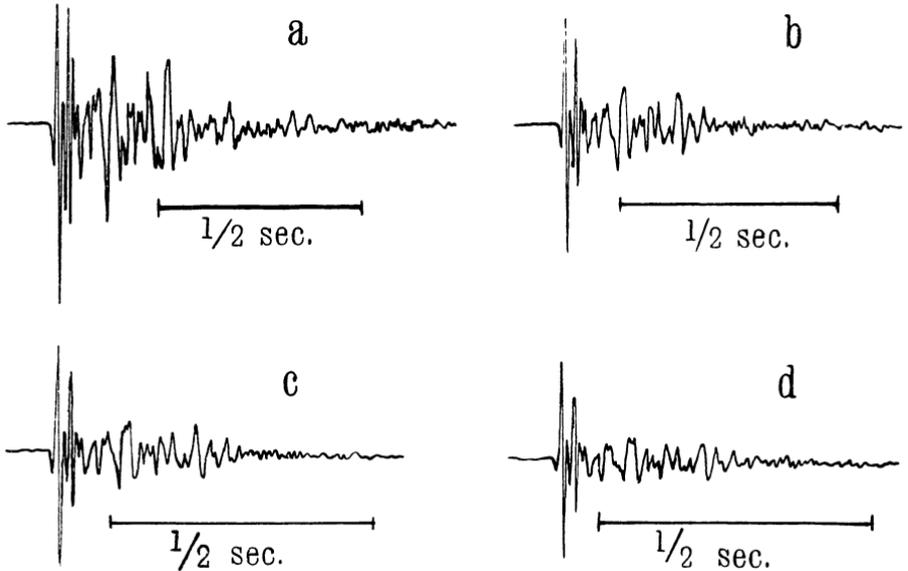


Fig. 2. Aus Versuchsreihe 4. Fallgewicht: 20 kg; Fallhöhe: a) $9\frac{1}{4}$ m; b) $3\frac{1}{4}$ m; c) $2\frac{1}{4}$ m; d) $1\frac{1}{4}$ m. Seismometer: Harte Regulierung.

salz. Diese Schichten liegen auf dem abgetragenen variscischen Grundgebirge auf. Die einzelnen Schichten sind noch weiter unterteilt, in dem mächtigen Muschelkalk können wir Schichten aus dem oberen, mittleren und unteren Muschelkalk erwarten und, je nach der Beschaffenheit der Schichten, auch reflektierende Unstetigkeitsflächen. Im Buntsandstein besteht die obere Schicht aus Röt, also

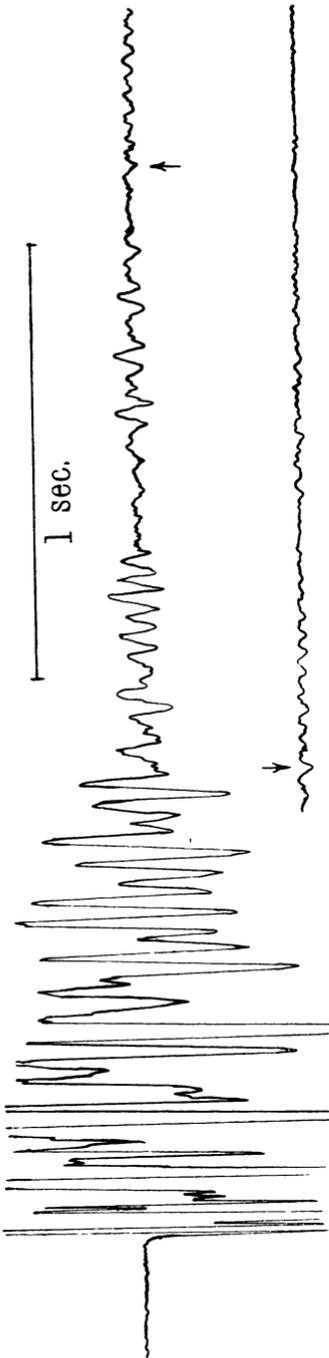


Fig. 3. Aus Versuchsreihe 6. Sprengung: Kanonenschlag mit 110 g Schwarzpulver 0.70 m tief im Sande. Seismometer: Harte Regulierung.

tonigem Material, welches an anderen, aufgeschlossenen Stellen eine Mächtigkeit von etwa 100 m aufweist. Darauf folgt weiter nach unten der Bausandstein.

Die reflektierende Salzschiicht können wir nach den geologischen Aufschlüssen der näheren und weiteren Umgebung in etwa 800 bis 900 m Tiefe erwarten. Sollte sie im Untergrund der Versuchsstelle fehlen, so würden an ihre Stelle andere Schichten des Zechsteins treten, die für die Seismik dieselbe Wirkung haben dürften. Die Salzschiicht würde durch die besondere elastische Beschaffenheit ihres Materials, d. h. Verschiedenheit der elastischen Konstanten der Salzschiicht und des darüberliegenden Deckgebirges, eine besonders starke Reflexion erwarten lassen. Nehmen wir an, daß der Einsatz i_5 , Laufzeit 0.611 Sekunden, der sich auf den Diagrammen mit 20 kg Fallgewicht besonders deutlich infolge der vorher schon wieder eingetretenen Ruhe hervorhebt, der Reflexion an der Salzschiicht entspricht, so erhalten wir für die seismischen Wellen eine Laufgeschwindigkeit von etwa 3 km/sec, ein Wert, der sehr wohl möglich ist. Unter Zugrundelegung dieses Wertes erhalten wir für die Tiefe der reflektierenden Schichten, welche die einzelnen Einsätze hervorrufen:

Einsatz	Tiefe der refl. Schicht in km
i_3	etwa 0.4
i_4	" 0.6
i_5	" 0.8—0.9
i_6	" 1.3
i_7	" 3
i_8	" 4
i_9	" 5

i_7 würde vielleicht der Oberfläche des variscischen Grundgebirges entsprechen, i_2 einer Schicht, die in den oberen Teilen des Muschelkalkes zu suchen wäre. Natürlich erheben diese Zahlen keinerlei Anspruch auf irgendwelche Genauigkeit, sie sollen nur eine Anschauung von der Art und Weise einer möglichen Verteilung geben.

Die Annahme, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen konstant etwa 3 km/sec sei, ist sicher nicht richtig, es muß Feststellung der Größenordnung genügen. Es ist auch nicht ausgeschlossen, daß der eine oder andere Einsatz von transversalen Wellen herrührt. Eine endgültige Entscheidung in dieser und allen anderen noch offen gelassenen, äußerst interessanten und wichtigen Fragen kann erst gegeben werden durch Veränderung der Entfernung vom Seismographen zur Aufschlagstelle der Fallgewichte und Aufstellung einer Laufzeitkurve. Doch kann schon jetzt gesagt werden, daß mit ganz geringen Hilfsmitteln, 110 g Schwarzpulver zu Sprengzwecken oder Fallgewichte von 117 kg bei Fallhöhen von 11 m, die nachweisbaren seismischen Wellen in Tiefen von mehreren Kilometern eingedrungen sind, also in Tiefen, die durch Bohrlöcher oder gar Schächte nicht im entferntesten erreicht sind.

Die folgenden Tabellen enthalten die Auswertungsergebnisse der einzelnen Versuche; sie sind nach den einzelnen Versuchsreihen zusammengestellt. Der erste Einsatz i_1 ist nicht mit aufgenommen, da bei fast sämtlichen Versuchen Perioden- und Amplitudenmessungen wegen der Größe der Ausschläge nicht möglich waren; im nächsten Abschnitt werden kleinere Versuche für den ersten Einsatz i_1 besprochen werden. Für die einzelnen Einsätze ist der Mittelwert der Einsatzzeiten und der Mittelwert der Periode der Bodenbewegung bei jeder Versuchsreihe gebildet worden, eine Abhängigkeit der Einzelwerte von der Fallhöhe war nicht zu erkennen.

Die Versuche der Versuchsreihen 1, 2 und 3 wurden bei weicher Regulierung des Seismographen in tiefer Nacht vorgenommen. Die Eigenperiode des Seismometers betrug ungefähr $\frac{1}{5}$ Sekunde, die Indikatorvergrößerung V dürfte zwischen 1.5 und 2 Millionen liegen, höchstwahrscheinlich näher bei 1.5 Millionen. Infolgedessen sind bei den Amplitudenmessungen nur die Ausschläge des Lichtpunktes auf dem Diagramm in Millimetern wiedergegeben; Amplitude bedeutet Ausschlag von der Ruhelinie aus.

Bei den Versuchsreihen 4 bis 6 besaß das Seismometer harte Regulierung. Angegeben ist bei jeder Versuchsreihe die Eigenperiode T_0 und die Indikatorvergrößerung V . Die weiteren Konstanten sind aus der Tabelle 2, S. 138, zu ersehen. Die angegebenen Amplituden bedeuten hier Bodenbewegung, gemessen in $\mu\mu$ (10^{-6} mm), die maximale Beschleunigung der Bodenbewegung ist in Milligal gemessen.

Tabelle 3.

Versuchsreihe 1. Fallgewicht 20 kg. Seismometer: Weiche Regulierung. Die für die verschiedenen Fallhöhen mitgeteilten Amplituden sind Mittelwerte aus je drei Versuchen.

Einsatz	i_2	i_3	i_4	i_5
Einsatzzeit in Sekunden	0.178	0.296	0.446	} 0.62
Periode der Bodenbewegung in Sekunden	± 0.0005	± 0.0006	± 0.0007	
	0.04	0.051	0.048	0.047
Fallhöhe in Metern	Amplituden des Lichtpunktes in Millimetern			
12	7.2	8.3	3.7	3.4
9	6.5	8.4	3.6	3.3
6	6.0	6.7	3.1	2.7
3	4.6	5.5	2.4	1.9

Versuchsreihe 2. Fallgewicht 50 kg. Seismometer: Weiche Regulierung.

Einsatz	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7	
Einsatzzeit in Sek.	$\left\{ \begin{array}{l} 0.179 \\ \pm 0.0006 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0.296 \\ \pm 0.0008 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0.445 \\ \pm 0.0005 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0.611 \\ \pm 0.001 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0.908 \\ \pm 0.0006 \end{array} \right.$	1.86	(auf-tauchen)
Periode d. Bodenbewegung in Sek.	0.04	0.053	0.047	0.045	0.051	0.044	
Fallhöhe in Metern	Amplituden des Lichtpunktes in Millimetern						
11	?	?	?	6.6	5.0	2.0	
10	?	?	11.6	6.9	5.2	2.0	
9	?	?	10.0	7.0	5.5	2.0	
8	?	?	?	6.2	5.0	1.8	
7	?	?	9.2	6.0	4.6	1.8	
6	?	?	8.5	6.3	4.0	1.7	
5	11.5	13.2	7.7	5.6	3.5	1.1	
4	?	?	?	5.0	3.5	1.4	
3	9.0	10.3	6.1	4.0	2.5	1.0	
2	7.5	9.0	4.6	3.5	2.2	1.0	
1	4.9	5.4	2.5	1.8	1.2	—	

Versuchsreihe 3. Fallgewicht: Walze 117 kg. Seismometer. Weiche Regulierung. Die für die verschiedenen Fallhöhen mitgeteilten Amplituden sind Mittelwerte aus je drei Versuchen.

Einsatz	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7	i_8	i_9
Einsatzzeit in Sek.	$\left\{ \begin{array}{l} 0.180 \\ \pm 0.0006 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0.297 \\ \pm 0.0005 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0.445 \\ \pm 0.001 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0.612 \\ \pm 0.0008 \end{array} \right.$	0.91	1.88	nicht zu erkennen	3.2
Periode d. Bodenbewegung in Sek.	?	0.05 [?]	0.046	0.043	0.053	0.046		0.046
Fallhöhe in Metern	Amplituden des Lichtpunktes in Millimetern							
10	?	?	?	8.6	6.8	2.6	—	0.5
4	?	?	?	7.0	5.0	1.9	—	—
2	?	?	9.0	5.2	3.0	1.4	—	—

Versuchsreihe 4. Fallgewicht 20 kg. Seismometer: Harte Regulierung. Seismometerkonstanten: Eigenperiode $T_0 = 0.0400$ sec, $V = 2.01 \cdot 10^6$.

Einsatz	i_2	i_3	i_4	i_5				
Einsatzzeit in Sek.	$\left\{ \begin{array}{l} 0.178 \\ \pm 0.0006 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0.296 \\ \pm 0.0008 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0.443 \\ \pm 0.0008 \end{array} \right.$	0.62				
Periode d. Bodenbewegung in Sek.	0.037	0.040	0.045	0.044				
Fallhöhe in Metern	Wahre Bodenbewegung							
Amplituden a in $\mu\mu$		Maximale Beschleunigung b in Milligal						
a	b	a	b	a	b	a	b	
11 ¹ / ₄	3.9 11.4	2.0 5.0	1.0 2.0	0.5 1.0				
10 ¹ / ₄	3.7 10.7	2.0 5.0	1.5 3.0	0.7 1.4				
9 ¹ / ₄	3.6 10.4	2.4 6.0	1.4 2.8	0.9 1.9				
8 ¹ / ₄	3.5 10.2	2.2 5.5	1.4 2.8	0.7 1.4				
7 ¹ / ₄	3.1 9.0	1.8 4.5	1.0 2.0	0.6 1.2				
6 ¹ / ₄	3.0 8.7	1.8 4.5	1.0 2.0	0.6 1.2				
5 ¹ / ₄	2.4 7.0	1.6 4.0	0.9 1.7	— —				
4 ¹ / ₄	2.3 6.7	1.4 3.4	0.7 1.3	— —				
3 ¹ / ₄	1.9 5.5	1.1 2.6	0.6 1.1	— —				
2 ¹ / ₄	1.5 4.4	0.9 2.1	0.4 0.7	— —				
1 ¹ / ₄	1.1 3.2	0.7 1.6	— —	— —				

Versuchsreihe 5. Fallgewicht 50 kg. Seismometer. Harte Regulierung. Seismometerkonstanten Eigenperiode $T_0 = 0.042$ sec; $V = 1.79 \cdot 10^6$. Für diese Versuchsreihe stand nur ein langsam laufender Lichtschreiber zur Verfügung. Infolgedessen sind nur Amplitudenmessungen möglich. Einsatzzeiten und Perioden der Bodenbewegung von derselben Größenordnung wie bei den übrigen Versuchen.

Einsatz	i_2	i_3	Wahre Bodenbewegung							
			Amplituden a in $\mu\mu$.				Beschleunigung b in Milligal			
			a	b	a	b	a	b	a	b
Fallhöhe in Metern										
11	?	?	?	?	4.6	8.3	2.9	6.6	1.2	2.7
10	?	?	?	?	4.6	8.3	2.9	6.6	1.4	3.2
9	?	?	?	?	4.5	8.2	2.9	6.6	1.1	2.5
8	?	?	?	?	3.9	7.1	2.5	5.7	1.0	2.3
7	?	?	7.1	18.0	3.8	6.9	2.3	5.2	0.9	2.1
6	?	?	?	?	2.6	4.7	2.0	4.5	—	—
5	Das Seismogramm kann wegen Störung nicht ausgewertet werden									
4	6.4	18.7	5.2	14.3	2.2	4.0	1.2	2.7	—	—
3	5.9	17.2	4.6	11.5	1.7	3.1	0.9	2.1	—	—
2	5.8	17.0	4.2	10.5	1.6	2.9	0.9	2.1	—	—
1	3.7	10.8	3.0	7.5	—	—	—	—	—	—

Versuchsreihe 6. Fallgewicht: Walze 117 kg. Sprengung: 110 g Schwarzpulver, 0.70 m tief eingegraben. Seismometer Harte Regulierung. Seismometerkonstanten:

Fallversuch. Eigenperiode $T_0 = 0.0400$ sec; $V = 2.01 \cdot 10^6$

Sprengung. " $T_0 = 0.0410$ " ; $V = 1.91 \cdot 10^6$

Mit der Walze wurden drei Fallversuche bei 10.65 m Fallhöhe vorgenommen. Die Zahlen bedeuten Mittelwerte der drei Versuche

Einsatz	Fallversuche				Sprengung			
	Ein-satzzeit sec	Wahre Bodenbewegung			Ein-satzzeit sec	Wahre Bodenbewegung		
		Periode sec	Ampli-tude $\mu\mu$	Beschleuni-gung Milligal		Periode sec	Ampli-tude $\mu\mu$	Beschleuni-gung Milligal
i_2	0.179	?	?	?	0.179	?	?	?
i_3	0.296	0.047	?	?	0.297	0.056	?	?
i_4	0.446	0.047	?	?	0.446	0.052	?	?
15	0.609	0.043	6.4	13.8	?	0.052	9.6	14.2
16	0.903	0.046	4.3	8.1	?	0.049	6.7	11.2
17	1.89	0.047	0.5	0.9	1.89	0.052	1.4	2.1
18	2.6	0.045	0.2	0.4	2.6	0.042	0.4	0.9
9	—	—	—	—	3.2	0.05	0.2	0.3

Der erste Einsatz i_1 konnte, wie schon erwähnt, wegen der Größe der Ausschläge nicht ausgemessen werden. Es sei hier nur schätzungsweise die Bodenbewegung des ersten Einsatzes beim Sprengversuch angegeben. Der Lichtpunkt bewegte sich nach Schätzung etwa 100 mm von der Ruhelage fort, bei einer Periode von etwa $1/50$ Sekunde. Dies bedeutet für die wahre Bodenbewegung eine Amplitude von $50 \mu\mu$ und eine maximale Beschleunigung von 500 Milligal.

Für die Abhängigkeit der Amplituden von der Fallhöhe zeigen die Tabellen, daß die Amplituden proportional der Wurzel aus der Fallhöhe zunehmen, und zwar ist der Proportionalitätsfaktor etwas kleiner als 1. Die Amplituden der verschiedenen Versuchsreihen sind nicht ohne weiteres miteinander vergleichbar, wie im nächsten Abschnitt gezeigt werden wird.

b) Fünf Versuchsreihen mit kleinen Fallgewichten und kleinen Fallhöhen. Bei diesen Versuchen wurden die Fallgewichte und Fallhöhen so klein gewählt, daß sämtliche Amplituden, auch die des ersten Einsatzes, so klein sind, daß sie nicht über das photographische Papier hinausgehen. Außerdem wurde versucht, eine untere Grenze für die Empfindlichkeit des Seismometers festzustellen. Das Seismometer besaß harte Regulierung. Die benutzten Fallgewichte betragen 0,5, 1, 2, 5, 10 und 20 kg. Mit jedem dieser Gewichte wurde ein Fallversuch gemacht, zunächst am ersten Tage mit einer Fallhöhe von 0,25 und 0,50 m, sodann zwei Tage später mit den Fallhöhen 0,75, 1 und 1,25 m. Der Sand, mit dem der Trichter an der Fallstelle gefüllt ist, war bei

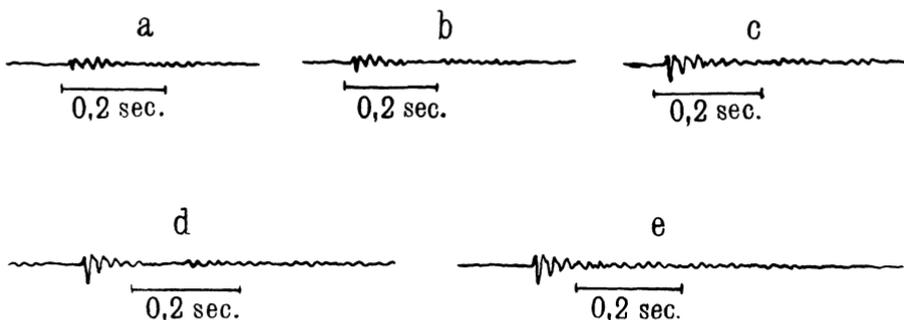


Fig. 4. Aus Versuchsreihe 7 bis 11. Fallgewicht: 2 kg, Fallhöhe a) 0,25 m; b) 0,50 m; c) 0,75 m; d) 1,00 m; e) 1,25 m. Seismometer: Harte Regulierung.

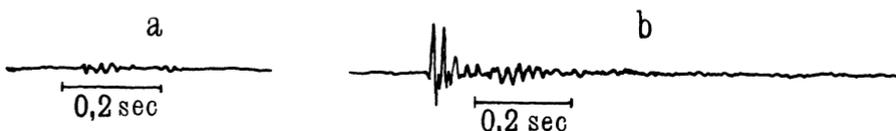


Fig. 5. Aus Versuchsreihe 11. Fallhöhe. 1,25 m; Fallgewicht: a) 0,5 kg; b) 20 kg. Seismometer. Harte Regulierung.

diesen Versuchsreihen schon ziemlich fest geworden infolge der langen Lagerung. Die Aufschlagfläche wurde bei jedem Versuch geebnet und dann leicht festgeklopft, so daß für sämtliche Versuche die gleiche Bodenbeschaffenheit erreicht wurde.

Von sämtlichen Fallversuchen wurden Seismogramme erhalten, auch von dem kleinsten Fallversuch von 0,5 kg Fallgewicht und 0,25 m Fallhöhe. Da dieser Versuch, wie alle anderen, in 125 m Entfernung vom Seismometer vorgenommen wurde, so ist dies ein Beweis einerseits für die außerordentliche Empfindlichkeit des Seismometers und andererseits für die große Ruhe des Bodens. Allerdings hebt sich das Seismogramm nur wenig aus der Bodenunruhe heraus und ist nur dem geübten Auge zu erkennen. Die Bodenunruhe besaß an diesem Tage Amplituden von $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{5}$ mm.

Bei den kleinsten Gewichten und Fallhöhen besteht das Seismogramm aus einem ersten Einsatz und ein paar Wellen, bei den größeren Versuchen sind

noch einige weitere Einsätze angedeutet. Die erste Bodenbewegung des ersten Einsatzes ist ein Stoß von unten nach oben. Die Bodenbewegung ist hierbei noch verhältnismäßig langsam. Bei den Versuchsreihen mit kleinen Fallgewichten und kleinen Fallhöhen ist diese Phase nur schwach angedeutet und bei den ganz kleinen Versuchen nicht zu erkennen. Bei den im vorigen Abschnitt besprochenen größeren Versuchen erfolgt die Bewegung des Lichtpunktes zwar fast senkrecht zur Ruhelinie, doch ist die Bewegung noch so langsam, daß bei allen Versuchen noch ein deutlicher Eindruck auf dem photographischen Papier hinterlassen wurde. Nur bei den Fallversuchen mit der Walze von 117 kg aus 10.65 m Höhe und bei dem Sprengversuch hat der Lichtpunkt dabei das photographische Papier verlassen. Diese Bewegung des Erdbodens von unten nach oben wird dann plötzlich abgelöst durch die entgegengesetzte Bewegung von oben nach unten. Hierbei erfolgt die Bewegung sehr viel schneller, der Lichtpunkt hinterläßt bei den großen Versuchen des vorigen Abschnittes fast gar keinen Eindruck, außerdem verläßt er auf beiden Seiten das Papier.

Der außerordentlich große Einfluß der Bodenbeschaffenheit auf das Ergebnis der Versuche ergibt sich aus folgendem Vergleich. Der eine Versuch gehört zu der Versuchsreihe 4 des vorigen Abschnittes und war dort einer der kleinsten Fallversuche, der andere gehörte zu der Versuchsreihe 11 dieses Abschnittes und war hier der größte Fallversuch. Die Diagramme sind in Fig. 2 d bzw. Fig. 5 b dargestellt. Beide Versuche erfolgten mit dem Fallgewicht von 20 kg und derselben Fallhöhe von 1.25 m; in beiden Fällen besaß das Seismometer harte Regulierung. Die Versuche liegen zeitlich etwa fünf Wochen auseinander, der zeitlich erste Versuch gehört zu den Versuchen des vorigen Abschnittes. Der Sand an der Aufschlagstelle hatte bei dem ersten Versuch noch eine lockerere Beschaffenheit als bei dem zweiten Versuch. Die Auswertung des ersten Einsatzes ergibt folgendes:

	1. Versuch	2. Versuch
Perioden in Sekunden	0.018	0.018
Wahre Boden- bewegung {	Amplituden in $\mu\mu$	6.0
	Maximale Beschleunigung in Milligal	74
		2.4
		30

Dieses Ergebnis zeigt, daß die einzelnen Versuchsreihen nicht ohne weiteres miteinander zu vergleichen sind.

Umstehende Tabelle 4 enthält die Auswertungsergebnisse des ersten Einsatzes i_1 .

Die Periodenmessungen für den ersten Einsatz lehren folgendes: Die Perioden steigen bei jeder Versuchsreihe, also bei konstanter Fallhöhe, mit der Größe der benutzten Gewichte, und zwar um etwa 40 Proz. Andererseits aber bleiben die Perioden nahezu konstant, wenn man dasselbe Gewicht, aber verschiedene Fallhöhen betrachtet. Um die Abhängigkeit der Perioden von den benutzten Fallgewichten zu erhalten, sind die Mittelwerte der Perioden für dasselbe Gewicht, aber verschiedene Fallhöhen berechnet. Dieses ergibt:

Gewicht in Kilogramm	0.5	1	2	5	10	20
Perioden in Sekunden	0.0124	0.0132	0.0144	0.0154	0.0174	0.0174

Tabelle 4.

Versuchsreihe 7 und 8.

Seismometerkonstanten: Eigenperiode $T_0 = 0.0367$ sec; $V = 2.37 \cdot 10^6$.

Fallhöhe m	Fallgewicht kg	Wahre Bodenbewegung			Versuchs- reihe
		Periode sec	Amplitude $\mu\mu$	Maximale Beschleunigung Milligal	
0.25	0.5	0.013	0.16	3.8	7
	1	0.013	0.25	5.9	
	2	0.014	0.33	6.7	
	5	0.015	0.44	7.8	
	10	0.016	0.56	8.8	
	20	0.017	0.49	6.8	
0.50	0.5	0.012	0.21	5.8	8
	1	0.012	0.39	10.8	
	2	0.015	0.57	11.1	
	5	0.016	0.78	12.2	
	10	0.018	0.93	11.5	
	20	0.018	0.93	11.5	

Versuchsreihe 9, 10 und 11.

Seismometerkonstanten. Eigenperiode $T_0 = 0.0382$ sec; $V = 2.25 \cdot 10^6$.

Fallhöhe m	Fallgewicht kg	Wahre Bodenbewegung			Versuchs- reihe
		Periode sec	Amplitude $\mu\mu$	Maximale Beschleunigung Milligal	
0.75	0.5	0.012	0.23	6.5	9
	1	0.013	0.41	10	
	2	0.014	0.8	16	
	5	0.015	1.4	25	
	10	0.017	1.7	24	
	20	0.017	1.8	25	
1.00	0.5	0.012	0.28	7.8	10
	1	0.014	0.56	11.5	
	2	0.015	0.9	16	
	5	0.015	1.6	28	
	10	0.019?	1.7	18?	
	20	0.017	2.2	31	
1.25	0.5	0.013	0.27	6.5	11
	1	0.014	0.65	13	
	2	0.014	1.1	21	
	5	0.016	1.7	27	
	10	0.017	2.3	31	
	20	0.018	2.4	30	

Dann sind berechnet worden die Mittelwerte der Perioden für dieselbe Fallhöhe, aber verschiedene Gewichte. Dieses ergibt die Abhängigkeit der Perioden von der Fallhöhe:

Fallhöhe in Metern	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
Perioden in Sekunden	0.0147	0.0152	0.0147	0.0153	0.0153

Während im ersten Falle die Perioden mit den benutzten Fallgewichten ansteigen, bleiben sie im zweiten Falle trotz Ansteigens der Fallhöhe nahezu konstant. Es kann also die Periode des ersten Einsatzes nicht oder nur sehr wenig

von der durch das Fallgewicht entwickelten Energie abhängen. Denn sonst müßte auch bei Benutzung desselben Gewichtes die Periode mit der Fallhöhe steigen. Dieses Ansteigen der Periode ist allein von dem Größerwerden der Aufschlagfläche des Fallgewichtes abhängig. Es ist deshalb der Inhalt dieser kreisrunden ebenen Aufschlagfläche berechnet und die Abhängigkeit der Periode von der Größe dieser Fläche dargestellt:

Fallgewicht in Kilogramm . . .	0.5	1	2	5	10	20
Inhalt der Aufschlagfläche in Quadratcentimetern . . .	15.2	22.9	39.6	72.2	100	176
Perioden in Sekunden . . .	0.0124	0.0132	0.0144	0.0154	0.0174	0.0174

Bei der Betrachtung der Abhängigkeiten der Perioden des ersten Einsatzes von Fallhöhe einerseits und Fallgewicht bzw. Aufschlagsfläche andererseits ist jedoch zu berücksichtigen, daß die Fallhöhen nur von 0.25 m auf 1.25 m, also auf das 5 fache, die Fallgewichte dagegen von 0.5 kg auf 20 kg, also auf das 40 fache, und die Aufschlagflächen von 15.2 cm² auf 176 cm², also auf das 11- bis 12 fache steigen. Es war zwar ursprünglich beabsichtigt, auch bei diesen kleinen Fallgewichten die Fallhöhen weiter zu steigern, jedoch mußte der benutzte Lichtschreiber plötzlich an die Firma „Seismos“ zurückgegeben werden, da sie ihn selbst dringend brauchte. Da bis zum Abschluß der Arbeit ein guter, schnell laufender Lichtschreiber nicht wieder zur Verfügung gestellt werden konnte, mußte eine Wiederaufnahme der Versuche bisher unterbleiben. Die Tabellen zeigen jedoch, daß auch bei Erhöhung des Fallgewichtes bzw. der Aufschlagfläche auf nur das 5 fache die Perioden im Mittel schon um 0.0025 bis 0.003 Sekunden zunehmen, während bei Änderung der Fallhöhe auf das 5 fache sich im Mittel die Perioden nur insgesamt um 0.0006 Sekunden ändern. Die angedeutete Gesetzmäßigkeit darf also doch als reell betrachtet werden.

Die Amplituden und Beschleunigungen zeigen ein zunächst schnelles, dann langsames Anwachsen, sowohl in ihrer Abhängigkeit von der Größe des Fallgewichtes als auch von der Fallhöhe, in derselben Weise wie bei den Versuchen des vorigen Abschnittes.

Zusammenfassung der Ergebnisse. Das Hauptresultat dieser Arbeit besteht in dem Auftreten von neun scharf definierten Einsätzen, die sich auf den Zeitraum von etwas mehr als drei Sekunden nach dem Aufprallen des Fallgewichtes auf den Boden verteilen. Die Einsatzzeiten der einzelnen Einsätze zeigen innerhalb der Fehlergrenzen eine vollständige Unabhängigkeit von allen äußeren Einflüssen, nämlich Größe der Fallhöhe und des Fallgewichtes, d. h. also der Fallenergie und von der Einregulierung des Seismographen auf kurze oder lange Eigenperiode. Die Deutung der einzelnen Einsätze ist in der Reflexion seismischer Wellen an verschiedenen mehr oder minder tief gelegenen Unstetigkeitsflächen zu suchen, die seismischen Wellen sind dabei in Tiefen von mehreren Kilometern eingedrungen, die Reflexion an der zu erwartenden Salzschieht hebt sich besonders deutlich heraus. Die genaue Tiefe der Reflexionsflächen wird sich nach Aufstellung einer Laufzeitkurve berechnen lassen.

Die Amplituden des ersten Einsatzes sowie auch der späteren zeigen deutlich die Abhängigkeit von Fallhöhe und Fallgewicht, sie sind proportional der

Wurzel aus der Fallenergie. Eine bedeutende Abhängigkeit der Amplituden von der Bodenbeschaffenheit ergibt sich aus zwei Fallversuchen, die mit gleichem Fallgewicht und bei gleicher Fallhöhe ausgeführt, zeitlich etwa fünf Wochen auseinander liegen. Bei lockerer Beschaffenheit des Sandes an der Aufschlagstelle des Fallgewichtes sind die Amplituden etwa $2\frac{1}{2}$ mal größer als bei fester Beschaffenheit.

Die Perioden des ersten Einsatzes zeigen eine fast vollkommene Unabhängigkeit von der Fallhöhe. Das Zunehmen der Perioden des ersten Einsatzes bei den Versuchsreihen mit kleinen Fallgewichten und kleinen Fallhöhen um etwa 40 Proz. scheint seinen Grund allein in dem Größerwerden der „Impulsfläche“ zu haben; die Perioden wachsen dabei von etwa $\frac{1}{80}$ Sekunde bis auf etwa $\frac{1}{56}$ Sekunde. Die Perioden der späteren Einsätze sind wesentlich größer; sie schwanken zwar etwas, doch haben sie sämtlich eine Größenordnung von etwa $\frac{1}{20}$ Sekunde, anscheinend unabhängig von Fallenergie und Tiefe der Reflexionsfläche. Sämtliche Perioden erweisen sich als unabhängig von der Einregulierung des Seismographen, können also nicht auf Eigenschwingungen des Seismographen zurückgeführt werden.

Die Bodenbewegung des ersten Einsatzes besteht in einem Stoß, einer Bodenbewegung von unten nach oben, die dann durch eine bedeutend schnellere Bodenbewegung von oben nach unten abgelöst wird. Bei ganz kleinen Fallenergien ist die erste Phase dieser Bewegung, der Stoß von unten nach oben, nicht mehr zu erkennen.

Die Bodenunruhe macht sich bei weicher Regulierung des Seismometers auf etwa $\frac{1}{5}$ Sekunde Eigenperiode stets bemerkbar, nachts ist sie kleiner als am Tage. Die hohe Vergrößerung des Wiechertschen Seismometers kann demnach bei dieser weichen Regulierung nicht voll ausgenutzt werden. Bei Einregulierung des Seismometers auf kurze Eigenperioden von etwa $\frac{1}{25}$ Sekunde, harte Regulierung, schreibt der Lichtpunkt unter günstigen Umständen eine gerade Linie auf, so daß die Indikatorvergrößerung von 2 Millionen zur Erreichung größerer Empfindlichkeit noch weiter erhöht werden kann. Die günstige harte Regulierung konnte bei den Fall- und Sprengversuchen benutzt werden, da bei diesen künstlichen Erdbeben nur kleine Perioden von $\frac{1}{80}$ bis $\frac{1}{20}$ Sekunde ausgelöst wurden.

Die kleinste, noch meßbare Bodenbewegung des ersten Einsatzes hatte eine Amplitude von $0.16 \mu\mu$ bei 0.013 Sekunden Periode und eine maximale Beschleunigung von ungefähr 4 Milligal. Hervorgerufen wurde sie durch den Fall von 0.5 kg aus 0.25 m Höhe in 125 m Entfernung vom Seismographen. Die Amplitude der Bodenbewegung ist hierbei von der Größenordnung eines Atomdurchmessers.

Bei den Sprengversuchen konnte zweimal eine genaue Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der longitudinalen Wellen in den obersten Muschelkalkschichten des Göttinger Hainberges durchgeführt werden. Beide Versuche ergaben übereinstimmend eine Laufgeschwindigkeit von annähernd 1700 m/sec .

Ferner zeigte sich bei den Sprengversuchen ein überaus großer Einfluß der Lage des Sprengstoffes: Ein im Sande eingegrabener Sprengkörper ergab eine

etwa 50- bis 100 mal stärkere Wirkung auf den Seismographen als ein nur oberflächlich gelagerter Sprengkörper.

Die bei jeder Versuchsreihe durchgeführten Konstantenbestimmungen zeigen, daß die Indikatorvergrößerung von der Eigenperiode des Seismographen abhängt. Mit wachsender Periode sinkt die Indikatorvergrößerung zunächst ziemlich stark; wie eine längere Zeit nach Beendigung der Versuche gelegentlich einer Umregulierung des Seismographen auf etwas längere Eigenperiode vorgenommene Konstantenbestimmung zeigt, scheint sich die Indikatorvergrößerung dabei einem Grenzwert anzunähern.

Anmerkung zu den Figuren: Die Abbildungen sind unter Zwischenschaltung einer Handpause hergestellt, die Wiedergabe kann also nicht in allen Einzelheiten getreu sein. Insbesondere konnte die wechselnde Intensität der Originalkurve, hervorgerufen durch verschiedene schnelle Bewegung des Lichtpunktes, nicht nachgeahmt werden. So sind z. B. in Fig. 3 die ersten Schwingungen im Original nur ganz schwach angedeutet, kaum erkennbar. Die Abbildungen zeigen die Diagramme in natürlicher Größe. Ein Ausschlag auf den Diagrammen nach unten bedeutet eine Bodenbewegung von unten nach oben.

Elektrische Erscheinungen im Zusammenhang mit vulkanischen Ausbrüchen.

Von Dr. A. Stäger, Bern.

Die elektrischen Erscheinungen bei vulkanischen Ausbrüchen werden, von Ausnahmen abgesehen, auf Elektrisierung der Aschen, speziell nach Art des Rudge-, Gitter- und Zerreißeffectes zurückgeführt. Der Rudgeeffect ist von der Temperatur abhängig. Es können infolge Rudgeeffect bis 10 E. S. E. der Menge pro Gramm Vulkanasche erzeugt werden und infolge Gittereffect bis 333 E. S. E. Magnetische Störungen lassen sich durch Bewegung der elektrischen Aschen, also durch Konvektionsströme erklären.

Bekanntlich treten bei Vulkaneruptionen nicht selten an die Örtlichkeit des Ausbruchs gebundene Gewitter auf, die sich oft durch große Heftigkeit auszeichnen. In Ausnahmefällen können sich diese Gewitter mit der Eruptionswolke vom Krater entfernen. Ausführliche Beschreibungen solcher Vulkanengewitter finden sich bei Lacroix*), Anderson und Flett**) und vielen anderen; auch aus neuester Zeit werden Vulkangewitter gemeldet; so sind am Ätna beim Ausbruch 1924 (?) Blitze beobachtet worden.

L. Palmieri***), der eifrig die vulkanisch-elektrischen Vorgänge verfolgte und auch Versuche anstellte, beobachtete, daß die Gewitter stets an das Vor-

*) Lacroix: *La Montagne Pelée et ses Eruptions*. S. 471 ff. Paris 1904.

**) Anderson and Flett: *Lond. Roy. Soc., Phil. Trans., Ser. A., 200, 1903.*

***) Palmieri. *Cronaca del Vesuvio, Sommario della sforza . . del Vesuvio seguita da estessa relazione del ultimo incendio del 1872.* Ann. R. Osservatorio meteorol Vesuviano **1**, 77 (1874)