

# Bericht über die dynamischen Bodenuntersuchungen

Autor(en): **Hertwig, A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH  
Kongressbericht**

Band (Jahr): **2 (1936)**

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-2758>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## VIII 3

# Bericht über die dynamischen Bodenuntersuchungen.

## Rapport sur l'auscultation dynamique des terrains.

### Report on Dynamic Soil Tests.

Geh. Regierungsrat Dr. Ing. A. Hertwig,  
Professor an der Technischen Hochschule Berlin.

#### *Vorbemerkung.*

Die statischen Probelastungen des Bodens durch aufgebrauchte Gewichte oder durch Drücke mit hydraulischen Pressen haben bekanntlich verschiedene Mängel. Die Ergebnisse sind sehr stark von der Größe der belasteten Fläche abhängig. Schon *Engesser*<sup>1</sup> (1) hat gezeigt, daß bei gleicher Belastung je Flächeneinheit die Setzungen bei Probelastungen mit zunehmender belasteter Fläche wachsen. *Kögler* (2), (3), (4) und verschiedene andere haben diesen von *Engesser* behaupteten Satz durch Versuche bewiesen. Bei einer bestimmten Flächengröße hat die Setzung einen Kleinstwert und wächst sehr stark bei abnehmender Fläche und weniger schnell bei zunehmender Fläche. Die Versuche umfassen aber bisher nur Flächengrößen bis zu ungefähr 1 m<sup>2</sup>. Es ist daher außerordentlich schwer, aus solchen Versuchen durch Erweiterung auf belastete Flächengrößen, wie sie in der Wirklichkeit bei Bauwerken auftreten, Schlüsse zu ziehen. Ein weiterer Mangel der statischen Probelastung besteht in der geringen Tiefenwirkung der Belastung. Hier ist von *Kögler* und anderen gezeigt, daß die Tiefenwirkung ungefähr das fünf- bis sechsfache des Durchmessers der belasteten Fläche erreicht. Man kann daher bei Probelastungen dieser Art sehr häufig tiefere Schichten, die unter Umständen einen erheblichen Einfluß auf die Setzungen haben, gar nicht erfassen und kann sehr leicht falsche Schlüsse aus der Probelastung ziehen.

Mit dem Ziel, diese Mängel zu vermeiden, sind in der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Degebo) seit sieben Jahren dynamische Verfahren zur Bodenuntersuchung entwickelt worden.

#### *§ 1. Beschreibung der Apparatur.*

Auf den zu untersuchenden Boden wird eine Maschine aufgebracht, die sinusförmig verlaufende Kräfte wählbarer Richtung auf den Boden ausüben kann. Bei der einfachsten Ausführung einer solchen Maschine drehen sich Unwuchten auf zwei gegeneinander laufenden Wellen (siehe Fig. 1). Es können sinusförmige Kräfte senkrecht zur Grundfläche, ferner Kräfte beliebiger Richtung

---

<sup>1</sup> Die Zahlen bezeichnen die entsprechende Nummer des Schrifttumverzeichnisses.

und Drehmomente erzeugt werden. Solche Schwinger baut die Firma Losenhäuserwerk, Düsseldorfer Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft, Düsseldorf-Grafenberg. Die Masse der Maschine, die Größe der Zentrifugalkräfte und die Drehzahlen der Wellen können verändert werden.

Die im unendlich ausgedehnten, homogenen elastischen Halbraum entstehenden Wellen unter einer Streifenbelastung oder Punktbelastung sind von *Rayleigh* und *Lamb* (7), (8) untersucht worden. Es entstehen fortschreitende Schiebungs- wellen, Verdichtungs- wellen und Oberflächenwellen, deren Fortpflanzungs- Geschwindigkeiten sich angenähert verhalten wie 1,7 : 1 : 0,9. Diese Wellen werden in der Makroseismik fast ausschließlich beobachtet. Die durch die eben beschriebene Maschine mit gegebener Masse und endlicher Grundfläche unter Berücksichtigung der Maschinenmasse erzeugten Schwingungen sind jetzt streng

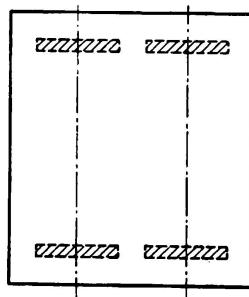
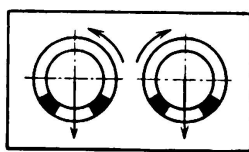


Fig. 1.

Anordnung der Schwingmassen bei Lotrechterregung.

von *H.* und *E. Reißner* mathematisch behandelt worden (36). Auf diese Arbeit wird später noch eingegangen. Für die praktische Anwendung der im Boden erzeugten Schwingungen zur Feststellung der Bodeneigenschaften werden vereinfachende Annahmen gemacht.

Bei einem Teil der Versuche wird die Maschine und ein gewisser Teil des Bodens als schwingender Massenpunkt betrachtet, der auf einer mehr oder weniger elastischen Unterlage steht, nämlich dem zu untersuchenden Boden. In der zweiten Gruppe von Versuchen beobachtet man die von der Maschine erzeugten fortlaufenden Wellen.

## § 2. Die Maschine auf elastischer Unterlage.

Erregt man den auf dem Boden stehenden Schwinger durch lotrechte periodische Kräfte, so kann man in erster Annäherung die Maschine als Massenpunkt mit einem Freiheitsgrad in lotrechter Richtung betrachten. Der Boden erzeugt eine lineare Rückstellkraft und besitzt eine Dämpfung, die man in erster Annäherung proportional der Geschwindigkeit ansetzen kann. Dann wird der ganze Bewegungsvorgang durch die lineare Differentialgleichung mit festen Beiwerten beherrscht:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = P \sin \omega t,$$

oder durch M dividiert:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2 \lambda \frac{dx}{dt} + \alpha^2 x = \beta \sin \omega t.$$

In dieser Gleichung ist M die schwingende Masse,

$b \frac{dx}{dt}$  die Dämpfungskraft, und

$cx$  die elastische Rückstellkraft,

$P \sin \omega t$  die periodische Erregerkraft mit der Kreisfrequenz  $\omega$ .

Beim Versuch läßt man nun die Kreisfrequenz alle möglichen Werte durchlaufen. Die Schwingungsausschläge  $x$  der Maschine werden durch einen Vibrographen, der auf der Maschine steht, aufgezeichnet. Ferner wird die Phasenverschiebung zwischen der Stellung der Unwucht und der schwingenden Maschine aufgenommen, indem in der Aufzeichnung des Vibrographen auch fortlaufend die Stellung der Unwuchten gekennzeichnet wird. Drittens wird die in die Maschine hineingeschickte Leistung gemessen.

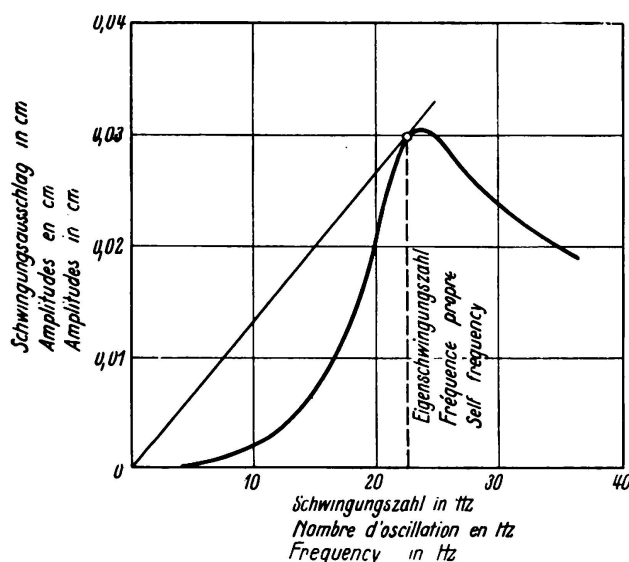


Fig. 2.  
Amplituden des Schwingers auf dem Boden in Abhängigkeit der Schwingungszahl.

Bei einem solchen Versuch zeigt sich nun, daß die Amplituden  $x$  des schwingenden Massenpunktes bei steigender Drehzahl von 0 an bis zu einem Größtwert anwachsen und bei weiter steigender Drehzahl wieder gegen einen bestimmten Wert asymptotisch abfallen. Die Amplitudenaufzeichnung besitzt also offenbar eine Resonanzstelle, wenn die Erregerfrequenz übereinstimmt mit der Eigenfrequenz  $\alpha$  der ungedämpften Schwingung des schwingenden Massenpunktes. Ebenso zeigt sich diese Resonanzstelle in der Aufzeichnung der Leistung und in der Aufzeichnung der Phasenverschiebung (siehe Fig. 2—5).

Die beim Versuch aufgenommenen Amplituden-, Leistungs- und Phasenkurven kann man unter Zugrundelegung der Differentialgleichung des schwingenden Massenpunktes zur Berechnung der Festwerte  $\alpha$  und  $\lambda$  der Differentialgleichung benutzen. Die Auswertung, die hier nicht ausführlich dargestellt werden kann, ist in der Veröffentlichung der Deutschen Forschungsgesellschaft

für Bodenmechanik, Heft 1 (14), beschrieben. Da die Amplituden, die Leistung und die Phase mit verschiedenen Instrumenten aufgenommen werden, kann man auch die Genauigkeit der Werte  $\alpha$  und  $\lambda$  bestimmen. Der mittlere Fehler der Zahlen  $\alpha$  schwankt zwischen 3 und 5 %, der der Dämpfungszahl  $\lambda$  dagegen ist erheblich größer. Auf den Grund dieser geringeren Genauigkeit kann hier auch nicht eingegangen werden.

Die Eigenschwingungszahl  $\alpha = \sqrt{\frac{c}{M}}$  hängt von den Eigenschaften des federnden Bodens ab. Die Ergebnisse einer großen Versuchsreihe auf den mannigfaltigsten Böden sind in der Zahlentafel Nr. 1 zusammengestellt und nach der steigenden Zahl  $\alpha$  geordnet. In der dritten Spalte der Tafel sind die aus der Erfahrung bekannten Belastungen auf die Flächeneinheit eingetragen. Es zeigt sich durch Vergleich der beiden Spalten, daß ein Zusammenhang zwischen der Zahl  $\alpha$  und der zulässigen Belastung vorhanden ist. Die Zahlen  $\alpha$  steigen entsprechend der zulässigen Belastung, so daß man die Zahl  $\alpha$  unmittel-

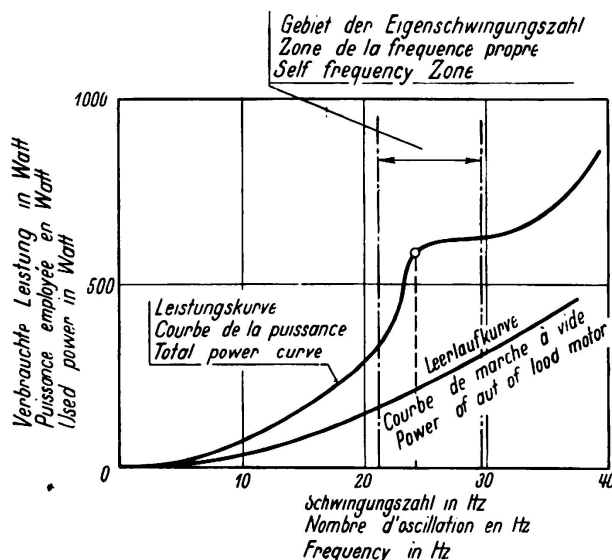


Fig. 3.

Leistung in Abhängigkeit der Schwingungszahl.

bar als Maßstab für die Bodenbelastung benutzen kann. Die Zahl  $\alpha$  zur Kennzeichnung der Bodentragfähigkeit bietet nun gegenüber der Bestimmung der zulässigen Beanspruchung auf Grund von statischen Probelastungen den Vorteil, daß bei der experimentellen Bestimmung der Zahl  $\alpha$  sehr viel größere Bodenbereiche erfaßt werden als beim statischen Versuch, so daß auch der Einfluß tieferer Schichten erscheint. Ferner spielt bei der Bestimmung die Größe der belasteten Fläche keine so ausschlaggebende Rolle wie beim statischen Versuch. Selbstverständlich sind auch bei dem dynamischen Versuch nur solche Zahlen  $\alpha$  unmittelbar miteinander vergleichbar, die mit einer Normalapparatur, d. h. einer Maschine mit bestimmtem Gewicht, bestimmter Grundfläche und bestimmter Zentrifugalkraft ermittelt sind. Es besteht aber die Möglichkeit, Ergebnisse mit Maschinen anderer Grundgrößen aufeinander zu beziehen.

Die Dämpfungszahl  $\lambda$  hängt zusammen einerseits mit der inneren Reibung des Bodens und andererseits mit der Formänderungsarbeit bei den nichtelasti-

schen dauernden Setzungen. Ist die innere Reibung und die Formänderungsarbeit der dauernden Setzungen groß, so ist auch die Dämpfung groß. Da aber diese beiden Umstände, die Reibung und die dauernden Setzungen, die Dämpfung beeinflussen, kann man natürlich nicht den Schluß ziehen, daß Böden großer Dämpfung große dauernde Setzungen haben müssen, weil auch ein Boden mit großer innerer Reibung ohne dauernde Setzungen große Dämpfung haben kann.

In Fig. 5 ist der Setzungsverlauf eines Versuches in Abhängigkeit von der Frequenz der Erregung aufgetragen. Bringt man diesen Setzungsverlauf in Beziehung zur Amplitudenkurve, so zeigt sich bei sehr vielen Böden, daß die Setzungen zunächst langsam ansteigen, im Resonanzbereich sehr stark anwachsen, jenseits des Resonanzbereichs wieder langsam zunehmen. Die dauernden Setzungen bei nichtbindigen Böden entstehen hauptsächlich durch den Zusammenbruch instabiler Kornlagerungen. Erregt man den Boden, so nimmt im Resonanzbereich die Reibung zwischen den schwingenden Kornteilchen so stark

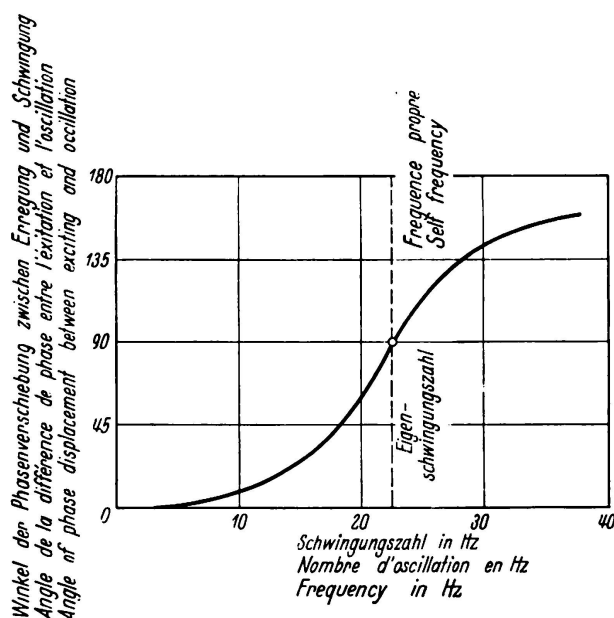


Fig. 4. Phasenverschiebung zwischen Erregung und Schwingung in Abhängigkeit der Schwingungszahl.

ab, daß die bei statischer Belastung in Selbstsperrung befindlichen Kornlagerungen zusammenbrechen, bis während des Schwingungsvorganges schließlich eine dichteste Packung der Körner erreicht wird.

Aus der Dämpfungszahl und dem Setzungsverlauf zusammen kann man also eine zuverlässige Voraussage über das Verhalten des Bodens bei dynamischen Beanspruchungen und Erschütterungen machen.

Bei stark bindigen Böden kann natürlich diese dynamische Belastung des Bodens allein noch keinen ausreichenden Aufschluß über den Einfluß der Zeit auf die Setzungen liefern. Hier sind selbstverständlich weitere Untersuchungen an ungestörten Proben der bindigen Böden im Laboratorium nach den bekannten Verfahren erforderlich. Auch bei nichtbindigen Böden empfiehlt es sich, zur Ergänzung der dynamischen Versuche ungestörte Proben zu entnehmen, um die Korngrößenverteilung, das Porenvolumen und die Verdichtungsfähigkeit zu bestimmen.

### § 3. Die Geschwindigkeit der fortschreitenden Wellen an der Oberfläche.

Der Charakter der durch die Maschine erzeugten Wellen ist noch nicht vollständig geklärt. Man kann aber folgende Messung durchführen: Durch einen Seismographen zeichnet man in genügend dichten Abständen in einer von der Erregermaschine ausgehenden Geraden die Amplituden eines kleinen Oberflächenstückes des Bodens, also ungefähr eines Oberflächenpunktes, auf, zugleich mit der Stellung der Unwucht in der Erregermaschine. Verfolgt man nun zugleich mit der Unwuchtstellung die Lage z. B. eines Wellenberges, den man bei genügend enger Entfernung der Meßstellen in den verschiedenen Aufzeichnungen leicht herausfinden kann, so sieht man, daß sich dieser Wellenberg mit einer gewissen Geschwindigkeit fortpflanzt. Man kann für diesen Wellenberg (Fig. 6) einen graphischen Fahrplan wie bei der Eisenbahn zeichnen. Im homogenen

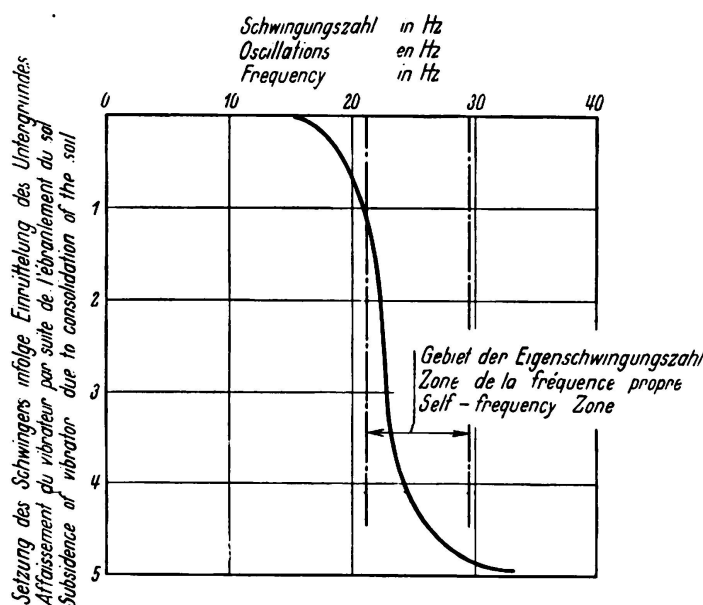


Fig. 5.

Die Setzung des Schwingers infolge der Einrüttelung des Bodens in Abhängigkeit der Schwingungszahl.

Boden zeigt dieser Plan eine gegen die Zeitachse geneigte gerade Linie (Fig. 6 b). Die Tangente ihres Neigungswinkels gibt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Wellenberges an. Tritt die Welle beim Fortschreiten in einen Boden anderer Dichtigkeit, dann zeigt diese Laufzeitkurve eine andere Geschwindigkeit; beim Übergang vom einen zum anderen Boden hat die Laufzeitkurve einen Knick (siehe Fig. 6 a).

Diese Versuche sind auf den mannigfaltigsten Bodenarten vorgenommen und die Ergebnisse in der obenstehenden Zahlentafel 1 in Spalte 1 eingetragen. Man sieht, daß in dieser Tafel die Geschwindigkeiten ebenfalls nach der Größe geordnet sind, von 80 m/sec bis 1100 m/sec ansteigend. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieser Wellen ist also ebenso wie die oben schon ermittelte Federkonstante des Bodens ein Maß für die Güte, d. h. die Tragfähigkeit des Bodens. Dieses Maß ist sogar empfindlicher als die oben gemessene Federkonstante  $\alpha$ .

Stellt man nun auf einem Gelände, dessen Bodeneigenschaften an der Oberfläche untersucht werden sollen, die Maschine an verschiedenen Stellen auf und

mißt nach den verschiedenen Richtungen hin die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten, so kann man eine Karte mit den Oberflächeneigenschaften des Bodens entwerfen (siehe Fig. 7).

Aus der Größe der Geschwindigkeiten kann man einen Schluß über die Art der erregten Wellen ziehen, wenn man zugleich noch die Wellen mißt, die in demselben Boden bei Stoßerregung durch Fallgewichte oder Explosionen erzeugt werden. Diese Wellen zeigen erheblich größere Geschwindigkeiten und werden

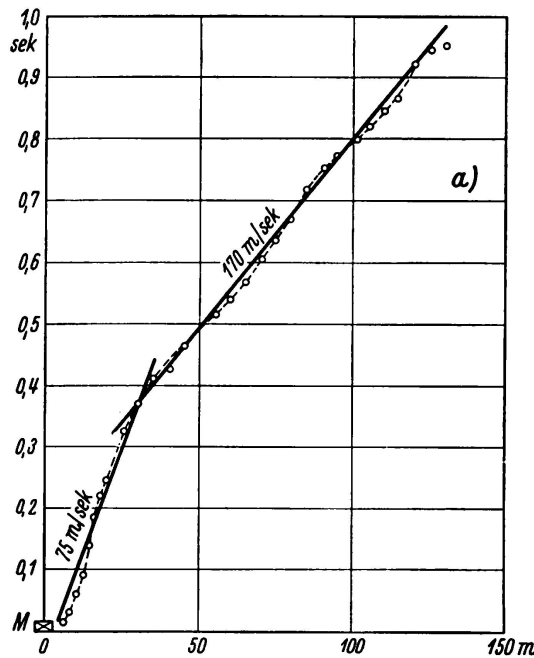
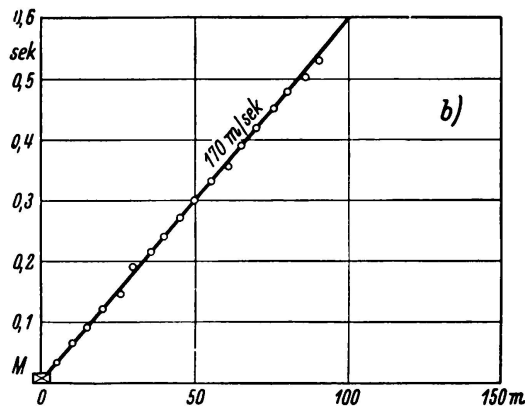


Fig. 6.  
Die Laufzeitkurve der vom Schwinger im Boden erregten elastischen Wellen.  
a) Im geschichteten Boden,  
b) im homogenen Boden.



im allgemeinen als reine Kompressionswellen angesprochen. Bei den durch die Maschine erregten und an der Oberfläche gemessenen Wellen sehr viel geringerer Fortpflanzungsgeschwindigkeit wird es sich daher im homogenen Halbraum im wesentlichen um Transversal- oder Rayleighwellen handeln. Es ist eine Aufgabe der weiteren Forschung, den Charakter dieser Wellen genau zu bestimmen.

Zeichnet man den Amplitudenverlauf eines Oberflächenpunktes auf, so sieht man bei sinusförmiger Erregerkraft auch einen rein sinusförmigen Verlauf der Amplituden. Nur in der unmittelbaren Nähe der Maschine ist bisweilen der sinusförmige Verlauf gestört, weil noch andere periodische Kraftverläufe von ge-



ringerer Stärke als die periodisch verlaufende Unwucht einen Einfluß ausüben. Die Größe der Amplitude nimmt, wie Fig. 8 a zeigt, mit der Entfernung von der Maschine schnell ab, ungefähr nach einer Exponentialkurve. Diese Art der Abnahme ist auch schon von vielen anderen Seiten festgestellt worden (37), (38), (39).

Die verschiedenen Bodenarten zeigen eine verschiedene Absorption. Soweit bisher Messungen der Absorption vorliegen, scheint die Absorption von der Wellenlänge abhängig zu sein, und zwar ist sie für kurze Wellen stärker als für lange Wellen.

Auch bei der Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist an manchen Stellen eine Abhängigkeit von der Wellenlänge festzustellen (Dispersion), jedoch sind für eine vollständige Klärung der Absorption und Dispersion noch weitere Versuche erforderlich.

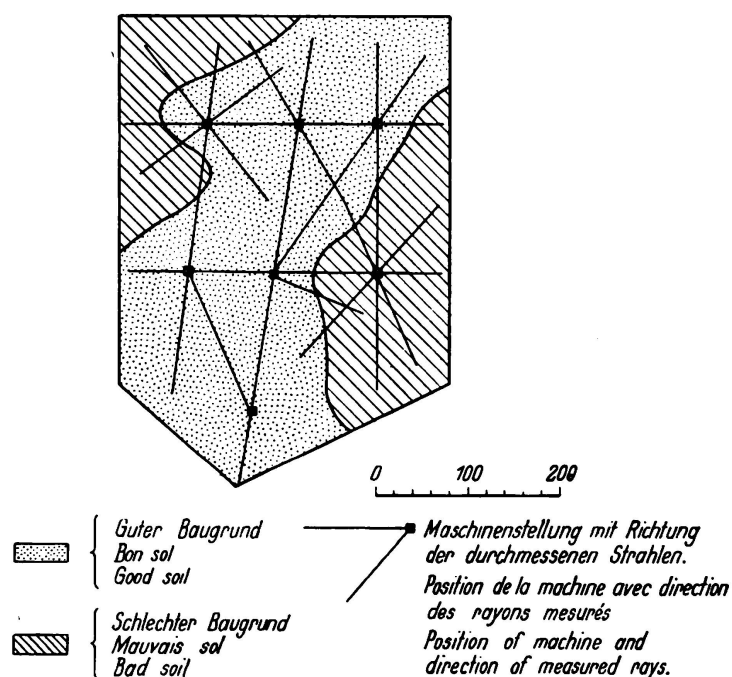


Fig. 7.

Ergebnis einer dynamischen Baugrunduntersuchung:  
 Feststellung der Grenzen zwischen gutem und schlechtem Baugrund.

#### § 4. Die Wellen im geschichteten Boden.

Befindet sich in einer bestimmten Tiefe unter der Oberfläche eine zur Oberfläche parallele Begrenzung gegen einen Boden anderer Eigenschaft und ist die Absorption der Wellen in der Oberfläche eine stärkere als in der darunter liegenden Schicht, dann zeigt die Laufzeitkurve ebenfalls einen Knick, und zwar erscheint in der Nähe der Maschine zunächst die Geschwindigkeit der Oberflächenschicht. In größerer Entfernung taucht die Geschwindigkeit der unteren Schicht auf. Hier ist die Oberflächenwelle bereits absorbiert und es erscheint an der Oberfläche die Schwingung der tieferen Schicht. Diese Deutung der Laufzeitkurve wird durch andere Untersuchungen der oberen und unteren Schichten bestätigt.

Die einzelnen Zweige der Laufzeitkurve sind keine geraden Linien mehr, sondern zeigen über die Geraden gelagerte schwach gekrümmte Sinuslinien. Ihre Bedeutung ist in der Veröffentlichung der Degebo, Heft 4, untersucht. In der Laufzeitkurve kann man bereits aus der Geschwindigkeit die Eigenschaften der tiefer liegenden Schicht erkennen.

Betrachtet man weiterhin die Amplituden der Punkte auf einer von der Erregermaschine ausgehenden Geraden, so nehmen sie im homogenen Boden, wie oben gesagt, von der Maschine aus ungefähr exponentiell ab. Im geschichteten Boden dagegen ist keine gleichmäßige Abnahme vorhanden, sondern an einzelnen Stellen treten wieder ausgesprochene Maxima der Amplituden auf. Solche Maxima können verschiedene Ursachen haben. Die Maxima sind bei vollständiger Homogenität der Schichten in sich nur durch Interferenz zwischen

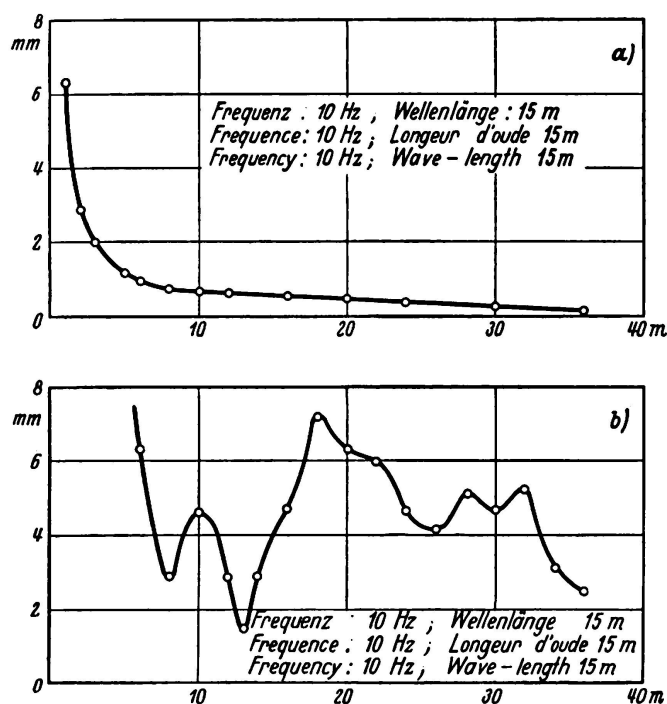


Fig. 8.  
Amplituden der Bodenschwingung in Abhängigkeit der Entfernung vom Erreger  
a) für lange Wellen,  
b) für kurze Wellen.

den Wellen der oberen und der unteren Schicht oder aus der Überlagerung mit Wellen, die an der Grenzfläche zurückgeworfen werden, zu erklären. Bestimmt man die Maxima auf allen möglichen von der Erregermaschine ausgehenden Geraden, so liegen sie auf konzentrischen Kreisen um die Erregermaschine, wenn der Boden homogen und die Grenzfläche der Oberfläche parallel ist. Macht man gewisse Annahmen über den Verlauf der Wellen, ähnlich wie in der Seismik bei Lagerstättenuntersuchungen, so kann man aus der Entfernung der Interferenzringe die Tiefe der Grenzfläche bestimmen. Ist die Grenzfläche nicht parallel der Oberfläche, so entstehen statt der konzentrischen Kreise ellipsenähnliche, konfokale Kurven. Verzerrte Kurven können auch entstehen, wenn der Boden um die Maschine herum nicht homogen ist. Welcher von diesen beiden Fällen vorliegt, ob Inhomogenität oder eine geneigte Grenzfläche, läßt sich ermitteln, wenn man auf einer Geraden von der Maschine aus weg und umgekehrt zur Maschine hin mißt.

Will man den inneren Aufbau des Bodens mit Hilfe des dynamischen Verfahrens untersuchen, so spielt natürlicherweise die verwendete Wellenlänge eine erhebliche Rolle. Fig. 8a—b zeigen den Amplitudenverlauf für zwei Messungen an der gleichen Stelle, einerseits bei einer Wellenlänge von 15 m und andererseits bei einer Wellenlänge von 7,5 m. Die erste Kurve hat einen ziemlich glatten Verlauf, die zweite zeigt eine große Zahl von Maxima und Minima. Hier machen sich Beugungserscheinungen geltend; wenn die Wellenlängen nicht im richtigen Verhältnis zu den Abmessungen der im Boden enthaltenen Teile mit verschiedenen Eigenschaften stehen, so werden die Wellen um diese Unstetigkeiten herum gebeugt. Diese Tatsache spielt auch eine Rolle, wenn man Wellen im Boden abschirmen will.

### § 5. Anwendungen.

In den vorstehenden Paragraphen ist schon an einzelnen Stellen auf die Anwendung der Verfahren hingewiesen. Jetzt sollen einige Beispiele aus der Praxis kurz beschrieben werden.

#### 1. Bestimmung der $\alpha$ -Zahlen und Setzungen.

Auf einem Gelände, bei dem die Bohrungen und die äußerliche Betrachtung des Bodens auf eine große Gleichmäßigkeit des Untergrundes schließen ließen, sollten mit Rücksicht auf dynamische Einwirkungen die zu erwartenden Setzungen an den verschiedenen Fundamentstellen vorausgesagt werden, weil ungleichmäßige Setzungen der Einzelfundamente sich ungünstig auswirken konnten. Der Grundriß des geplanten Gebäudes und die Aufstellungsorte der Schwingungsmaschine sind in Fig. 9 dargestellt. Auf den verschiedenen Standorten wurden Leistungskurven, Amplitudenkurven und Setzungen gemessen. Die  $\alpha$ -Zahlen schwankten zwischen 21,7 und 24 Hz, die Setzungen zwischen 7 und 3 mm. Die Untersuchungen sind mit einer Normalapparatur von 1 m<sup>2</sup> Grundfläche, 2700 kg Gewicht und gleicher Exzentrizität ausgeführt. Die Setzungen beziehen sich alle auf die dynamische Beanspruchung innerhalb einer bestimmten Zeit. Die mit ungestörten Bodenproben im Laboratorium ausgeführten Verdichtungsversuche bestätigten die in den  $\alpha$ -Zahlen und in den Setzungen zum Ausdruck kommenden Ungleichmäßigkeiten. Auf Grund der so gewonnenen Unterlagen wurden für alle Pfeiler mit Rücksicht auf die Größe der Fundamentflächen diejenigen zulässigen Belastungen bestimmt, denen eine gleichmäßig zu erwartende Setzung zugeordnet werden konnte. Die festgestellten zulässigen Bodenpressungen lagen für eine Gruppe der Fundamente bei 2 kg/cm<sup>2</sup>, bei der anderen Gruppe bei 2,5 kg/cm<sup>2</sup>. Für Baustellen geringer Ausdehnung genügen Bestimmungen der  $\alpha$ -Zahlen und der Setzungen mit gleichzeitiger Beobachtung der Dämpfung, um einen Aufschluß über die Gleichmäßigkeit des Untergrundes zu gewinnen. Zur Vorausberechnung von Setzungen ist die Untersuchung ungestörter Bodenproben im Laboratorium bei bindigen Böden notwendig, bei nicht bindigen Böden erwünscht.

Bei der Gründung von Turbinenfundamenten pflegt man heute die Eigenschwingungszahlen der Maschine auf ihren elastischen Fundamenten aus räumlichen Rahmenkonstruktionen zu berechnen, unter der Voraussetzung, daß dieser ganze Körper mit seiner Grundplatte auf einem starren Boden steht. Dabei wird

angenommen, daß die Nachgiebigkeit des Bodens im Verhältnis zu den Formänderungen des Rahmenfundamentes vernachlässigt werden kann. Diese Annahme ist aber keineswegs immer erfüllt. Wenn also auch schon bei solchen Turbinenfundamenten unter Umständen bei der Schwingungsberechnung die Nachgiebigkeit des Bodens berücksichtigt werden muß, so kommt man bei Blockfundamenten ohne Kenntnis dieser Nachgiebigkeit überhaupt nicht aus. Hier stellt die Maschine zusammen mit dem Fundamentblock einen starren Körper dar, der auf dem Boden auf elastischer Unterlage gestützt ist. Hier hängen die Eigenfrequenzen der sechs Freiheitsgrade des starren Körpers von der Masseverteilung und den Federkonstanten des Bodens ab. Für solche Gründungen sind mehrfach nach dem oben beschriebenen Verfahren die  $\alpha$ -Zahlen, die mit-schwingende Masse des Bodens und schließlich die Federkonstanten bestimmt worden. Mit Rücksicht auf die meist vorhandene Symmetrie im Körper kann man das Problem als ein ebenes behandeln, sodaß nur eine elastisch gestützte Scheibe mit 2 oder drei Freiheitsgraden, je nach den weiteren Symmetrieeigenschaften, berechnet zu werden braucht (35).

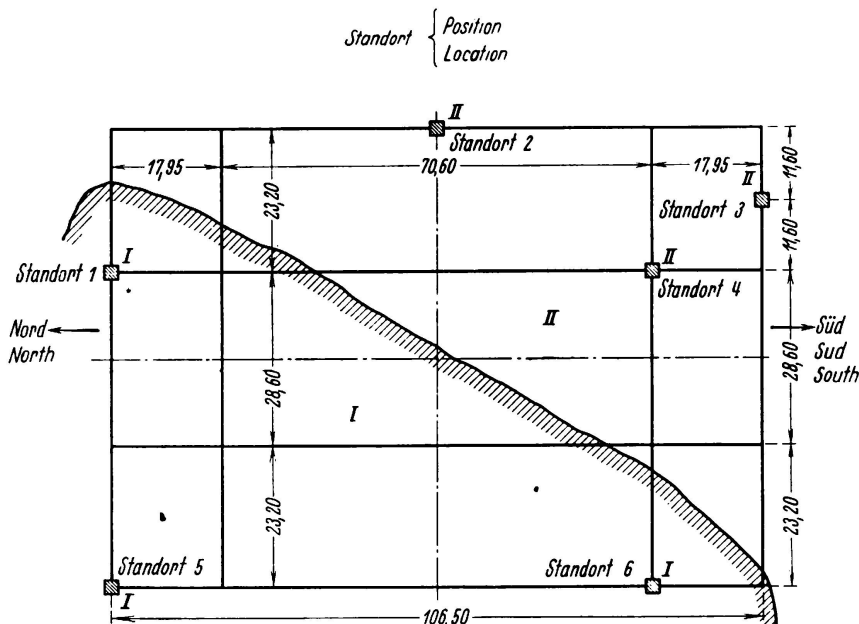


Fig. 9.

Lageplan für eine dynamische Bodenuntersuchung:

Standorte des Schwingers im Grundriß des geplanten Gebäudes. Die schraffierte Linie gibt die Grenze zwischen gutem und weniger gutem Baugrund an.

Die bisherigen praktischen Fälle haben eine außerordentlich gute Übereinstimmung zwischen der Vorausberechnung und den später gemessenen Eigenfrequenzen ergeben. Die Eigenfrequenzen werden auch mit Hilfe eines Schwingers und durch Aufzeichnen der Resonanzkurven in bekannter Weise ermittelt. Hat man genügend feine Meßinstrumente, so kann man selbst an Maschinen und Fundamenten von mehreren tausend Tonnen mit einem Schwinger von 2000 kg Fliehkraft die Resonanzkurven der Amplituden aufnehmen.

Die Wirkung künstlicher Verdichtungen kann man schon durch Messungen der  $\alpha$ -Zahlen und der Setzungen allein nachprüfen. In Fig. 10a—b sind

Amplitudenkurven und Setzungskurven wiedergegeben, die auf einem künstlich verdichteten Damm vor und nach der Verdichtung aufgenommen worden sind. Durch die Verdichtung ist die  $\alpha$ -Zahl von 22,6 auf 23,0 gestiegen (Fig. 10a), also nicht sehr erheblich. Die Setzungen dagegen sind zurückgegangen von 28 mm auf 8 mm (Fig. 10b). Die Setzungskurven zeigen den oben schon erwähnten Verlauf. Die Setzung spielt sich hauptsächlich innerhalb des Reso-

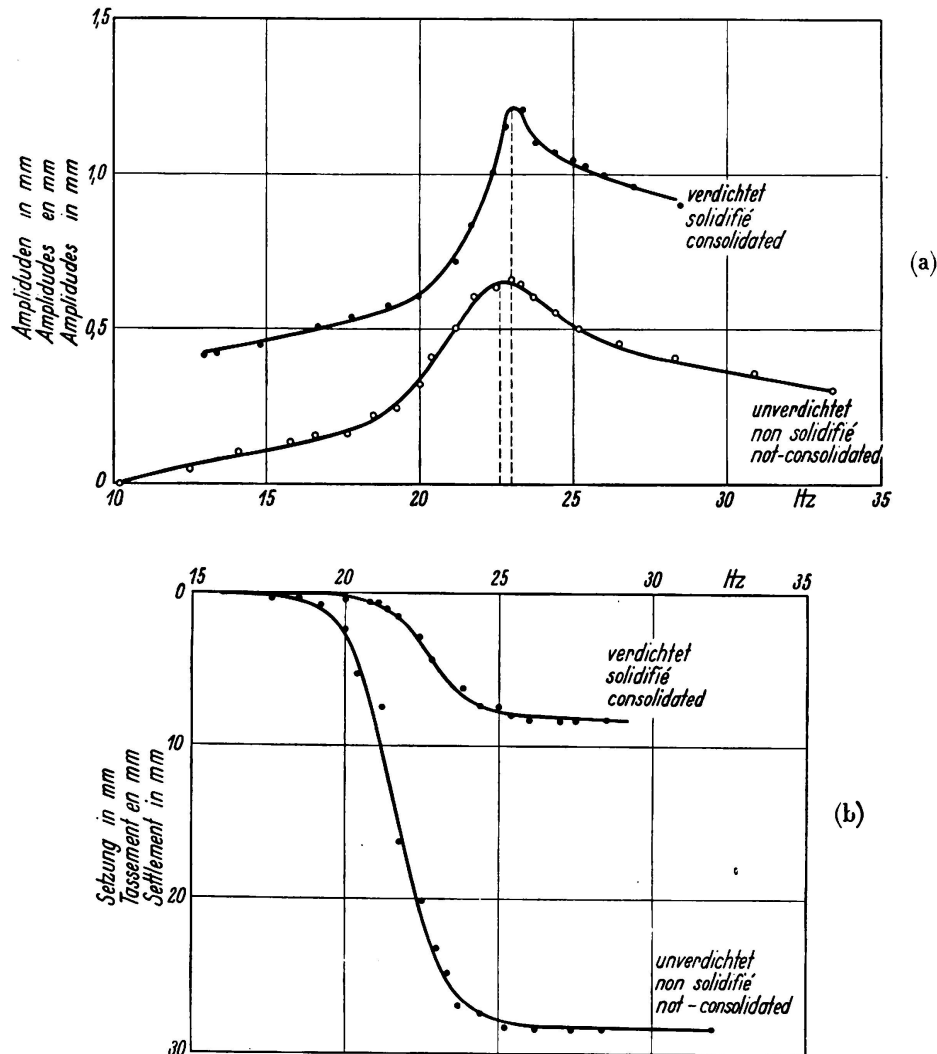


Fig. 10.

- a) Amplituden und  
 b) Setzung des Schwingers in Abhängigkeit der Schwingungszahl vor und nach der Verdichtung.

nanzbereiches ab. Die Amplitudenkurve des unverdichteten Bodens zeigt gegenüber dem verdichteten Boden einen bemerkenswerten Unterschied. Das Resonanzmaximum im verdichteten Boden wird wesentlich spitzer, ein Zeichen, daß die innere Dämpfung abgenommen hat. In dem lockerer gelagerten Boden wird während der Schwingung ein größerer Teil der Energie verzehrt als in dem dichteren, elastischer gewordenen.

## 2. Bestimmung der Geschwindigkeiten.

Handelt es sich um die Aufgabe, auf einem größeren Gelände den Baugrund zu prüfen, so wird man mit Erfolg durch Geschwindigkeitsmessungen die verschiedenen Eigenschaften feststellen können, indem man von verschiedenen Stellen aus nach den verschiedenen Richtungen auf geraden Linien die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten ermittelt (siehe Fig. 7). Ist der Boden vollständig gleichmäßig und unverdichtet, so wird man von allen Stellen aus und nach allen Richtungen hin die gleiche Geschwindigkeit finden. Ist der Boden aber nicht einheitlich, so zeigen die Laufzeitkurven Knicke (siehe Fig. 6b). In der Fig. 7 ist auf Grund dieser Messungen ein Lageplan für die verschiedenen Bodenarten aufgezeichnet. Oben ist schon darauf hingewiesen, daß der Knick in einer Laufzeitkurve auch bei geschichtetem Boden entsteht. Ob der eine oder der andere Fall vorliegt, kann durch Vergleich der Messungen von den verschiedenen Standpunkten in der Fig. 7 entschieden werden.

Die Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten kann aber noch bei zahlreichen anderen Aufgaben der Praxis mit Erfolg verwendet werden. Eine heute wichtige Frage ist die Verdichtung geschütteter Dämme für Straßen oder Staudämme. In einem Fall handelte es sich um zwei vor ca. 12 Jahren aus märkischem Sand geschüttete Eisenbahndämme, von denen der eine ohne darüber laufenden Verkehr 12 Jahre lang nur den atmosphärischen Einflüssen unterworfen war, während über den anderen ein regelmäßiger Eisenbahnverkehr läuft. Messungen der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten an der Entnahmestelle des Bodens, auf dem nicht befahrenen Damm und dem befahrenen Damm zeigten aufschlußreiche Unterschiede. Der nicht befahrene Damm hat mit 180 m/sec noch nicht die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des gewachsenen Bodens, die an der Entnahmestelle 230 m/sec betrug, erreicht. Im befahrenen Damm ist sie durch die Zusammenrüttelung auf 340 m/sec gestiegen. Leider ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im frisch geschütteten Damm nicht bekannt. Man kann sie aber im ungünstigsten Fall auf Grund anderer Messungen auf die Hälfte der Geschwindigkeit im gewachsenen Boden schätzen. Die vorstehenden Ergebnisse zeigen, daß beim einfachen Liegenlassen eines geschütteten Damms die Wirkung der atmosphärischen Einflüsse auf die Verdichtung nur sehr langsam erfolgt und niemals die Dichtigkeiten entstehen, die durch Erschütterungen erreicht werden.

Um die Wirkung der verschiedenen künstlichen Verdichtungen von Dämmen durch Schlämmen, Walzen, Stampfen, Schütteln zu prüfen, hat sich die Geschwindigkeitsmessung ebenfalls bewährt. Über solche Versuche ist in der Zeitschrift „Die Straße“ Nr. 18, 1935, berichtet worden.

Auch für die Untersuchung von Straßendämmen aus Dammschüttung und Straßendecke kann die Geschwindigkeitsmessung verwertet werden. Im allgemeinen wird die Wirkung z. B. einer Betondecke auf einem Damm in der Erhöhung einer mittleren Fortpflanzungsgeschwindigkeit aus Decke und Untergrund bestehen. In einem einzigen Fall konnte bisher festgestellt werden, daß Decke und Untergrund als einheitlicher Körper schwingen. Hier handelte es sich um einen Damm aus Kies außerordentlich günstiger Kornverteilung, der in Schichten von ca. 30 cm aufgebracht und durch Walzen und Stampfen ver-

dichtet war. Die elastischen Wellen im Kies hatten an der Entnahmestelle eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 420 m/sec, in dem in der beschriebenen Weise behandelten Damm eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 560 m/sec. Als eine Betondecke von 25 cm Stärke aufgebracht war, zeigte der ganze Damm bei einer Länge der benutzten Wellen von 22 m keine Änderung in der Fortpflanzungsgeschwindigkeit. An anderen Stellen besaßen die Wellen im geschützten Boden eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 125 m/sec, im Damm mit einer Decke von 25 cm Stärke eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 270 m/sec. Aus diesen Beobachtungen muß man den Schluß ziehen, daß im ersten Fall Damm und Betondecke als einheitliches Ganzes schwingen, im zweiten Fall die Betondecke auf einer mehr oder weniger elastischen Unterlage Biegungsschwingungen ausführt. Schließlich sind Messungen ausgeführt worden, um die Wirkung der Deckenstärke bei gleicher Unterlage zu prüfen. Die Fig. 11 zeigt die Zunahme der Fortpflanzungsgeschwindigkeit mit zunehmender Deckenstärke auf gleicher Unterlage. Würden genügend Erfahrungen und Meßergebnisse vorliegen, so könnte man es wohl erreichen, bei bestimmter Geschwindigkeit im Damm allein die erforderliche Mindeststärke der Decke zu ermitteln. Natürlich übt der Untergrund des Dammes auf das Gesamtergebnis auch noch einen Einfluß aus, der bei der obigen Betrachtung der Einfachheit halber außer acht gelassen wurde.

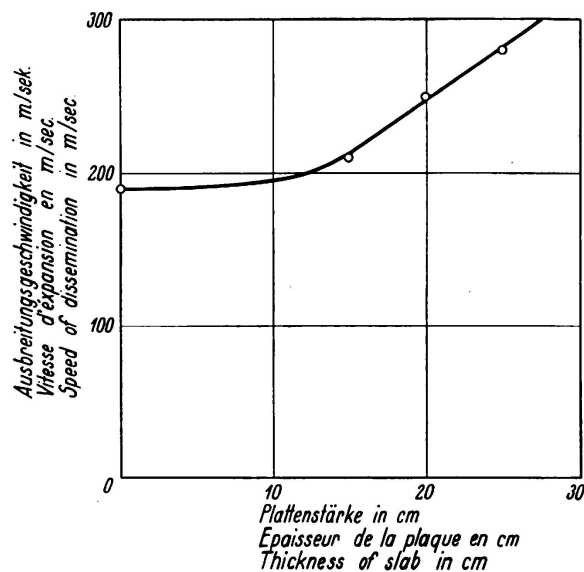


Fig. 11.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen in einem mit Betonplatten belegten Straßendamm in Abhängigkeit der Plattenstärke.

### 3. Die Untersuchung geschichteter Böden.

Will man die bei geschichteten Böden auftretenden Interferenzen zuverlässig zur Errechnung der Schichtdicken benutzen, so hat man bisher verschiedene, ziemlich willkürliche, Annahmen über die Entstehung solcher Interferenzen gemacht. In einzelnen Fällen führt die eine oder andere Theorie zu richtigen Ergebnissen. In anderen Fällen, namentlich bei mehr als zwei Schichten, sind die Ergebnisse der Rechnungen noch sehr unsicher. Hier kommt man erst weiter, wenn eine größere Klarheit über die verschiedenen Arten der erzeugten Wellen vorhanden ist. Die erforderlichen Arbeiten werden jetzt in Angriff genommen. Über die Ergebnisse und ihre praktischen Anwendungen soll später berichtet werden.

*Schlußbemerkung.*

Nach der jetzt vorliegenden sechsjährigen Versuchsarbeit, nach den zahlreichen Erprobungen in der Praxis glauben wir, daß die dynamische Bodenuntersuchung ein für die Praxis wertvolles Verfahren ist. Natürlich ist es nicht ein Verfahren, das über alle Eigenschaften des Bodens allein Aufschluß geben kann. Wie oben schon gesagt, sind vor allem bei bindigen Böden die weiteren bekannten Verfahren, wie sie namentlich von *Terzaghi* (20), (40) und seinen Schülern ausgearbeitet sind, erforderlich, um den Einfluß der Zeit auf die Setzung bindiger Böden zu ermitteln.<sup>2</sup>

Die bisherigen Messungen der Amplituden-, Leistungskurven usw. und die außerordentlich vereinfachte Theorie des schwingenden Massenpunktes mit einem Freiheitsgrad haben eine befriedigende Übereinstimmung und Deutung vieler Erscheinungen ermöglicht. Die Arbeit von *Erich Reißner* (36) über „die stationäre, achsialsymmetrische, durch eine schüttelnde Masse erregte Schwingung eines homogenen elastischen Halbraumes, insbesondere in Beziehung zu dynamischen Bodenuntersuchungen“, die demnächst im Heft 5 der Veröffentlichungen der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik erscheinen wird, hat die Berechtigung der einfachen Theorie weiterhin bewiesen.

## Schrifttum.

- (1) *Engesser*: Theorie des Baugrundes, Zentrabl. d. Bauverw. 1893, S. 306.
- (2) *Kögler*: Über Baugrund-Probebelastungen. Bautechnik 1931, H. 24.
- (3) *Preß*: Baugrundbelastungsversuche. Bautechnik 1930, H. 42, 1931, H. 50, 1932, H. 30.
- (4) *Görner*: Über den Einfluß der Flächengröße auf die Einsenkung von Gründungskörpern. Zeitschr. f. Geologie und Bauwesen 1932, H. 2.
- (5) *Aichhorn*: Über die Zusammendrückung des Bodens infolge örtlicher Belastung. Geologie und Bauwesen 1932, H. 1.
- (6) *Kögler* und *Scheidung*: Druckverteilung im Baugrunde. Bautechnik 1928, H. 15, 17; Bautechnik 1929, H. 18, 52.
- (7) *Lord Rayleigh*: The theory of sound. London 1894/6.
- (8) *H. Lamb*: Phil. Trans. (A) Bd. 203, 1904. Proc. Roy. Soc. A 93, London 1917.
- (9) *E. Pfeiffer*: Handbuch der Physik IV, Kap. 4, Elastokinetik.
- (10) *G. Angenheister*, Handbuch der Physik IV, Kap. 8, Seismik.
- (11) *H. Martin*: Handbuch der Experimentalphysik XVII, 1, Schwingungslehre.
- (12) *A. E. H. Love*: Probl. of Geodynamics. Cambridge 1911.
- (13) *O. Fröhlich*: Druckverteilung im Baugrund. Jul. Springer, Wien 1934.
- (14) Veröffentlichung der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik, Heft 1. Jul. Springer, 1933.
- (15) Veröffentlichung der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik, Hef 4. Jul. Springer, 1936.
- (16) *A. Hertwig*: die dynamische Bodenuntersuchung. Bauing. 12, 1931.
- (17) *A. Hertwig*: Baugrundforschung. Zeitschr. d. V.D.I. 77, 1933.
- (18) *A. Hertwig* und *H. Lorenz*: Das dynamische Bodenuntersuchungsverfahren. Bauingenieur 16, 1935.
- (19) *H. Lorenz*: Neue Ergebnisse der dynamischen Baugrunduntersuchung. Zeitschr. d. V.D.I. 78, 1934.
- (20) *W. Loos*: Praktische Anwendung der Baugrunduntersuchungen. Jul. Springer 1935.
- (21) *P. Müller*: Druckverteilung und Einsenkungen im Erdreich. Bautechnik 12, 1934.

<sup>2</sup> Anmerkung: Die dynamischen Bodenuntersuchungen werden zur Zeit besonders von der Gesellschaft Seismos in Hannover für Bodenuntersuchungen angewendet. Diese Gesellschaft besitzt Instrumente und Meßerfahrungen aus ihren Lagerstättenuntersuchungen nach dem Mintropschen Verfahren, die bei den dynamischen Bodenuntersuchungen brauchbar sind.



- (22) P. Müller, Tragfähigkeit und Formänderungswiderstand des Bodens. Bautechnik 13, 1935.  
 (23) R. Köhler: Zeitschr. f. Geophysik 10, 1934.  
 (24) R. Köhler: Nachr. Geo. Wiss. II. Göttingen 1934, Nr. 2.  
 (25) R. Köhler: Zeitschr. techn. Phys. 16, 1935.  
 (26) R. Köhler und A. Ramspeck: Zeitschr. techn. Phys. 14, 1933.  
 (27) A. Ramspeck: Zeitschr. Geophys. 10, 1934.  
 (28) G. A. Schulze: Zeitschr. Geophys. 11, 1935.  
 (29) A. Ramspeck: Dynamische Bodenuntersuchungen an der Reichsautobahn Stuttgart-Ulm. Die Straße 18, 1935.  
 (30) A. Ramspeck: Dynamische Untersuchung von Straßendecken. Die Betonstraße 11, 1936, Nr. 2.  
 (31) R. Müller und A. Ramspeck, Verdichtung geschütteter Dämme, Die Straße 18, 1935.  
 (32) F. Meister: Die dynamischen Eigenschaften von Straßen. Diss. Stuttgart, Verl. M. Boerner, Halle 1935.  
 (33) K. Schwien: Über die Ausbreitung von Erschütterungen. Diss. Hannover 1932.  
 (34) Hort, Martin, Geiger: Zur Frage der Schutzwirkung eines Grabens gegen Erschütterungen. Schalltechnik 2, 1932.  
 (35) R. Rausch: Berechnung von Maschinenfundamenten als elastisch gestützte schwingende Scheiben. Bauingenieur 11, 1930, H. 13—14. Z. d. V.D.I. 75, 1931.  
 (36) E. Reißner: Über die stationäre, achsialsymmetrische, durch eine schüttelnde Masse erregte Schwingung eines homogenen elastischen Halbraumes, insbesondere in Beziehung zu dynamischen Bodenuntersuchungen. Dissertation, Charlottenburg. (Erscheint demnächst.)  
 (37) L. Mintrop: Über die Ausbreitung der von den Massendruckern einer Großgasmaschine erzeugten Bodenschwingungen. Dissertation, Göttingen 1911.  
 (38) A. Heinrich: Über die Ausbreitung von Bodenschwingungen in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Untergrundes. Dissertation, Breslau 1930.  
 (39) G. Bornitz: Über die Ausbreitung der von Großkolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe. Jul. Springer, Berlin 1931.  
 (40) v. Terzaghi: Erdbaumechanik, Leipzig 1925.

Seism. Veröffentl. d.  
Geophys. Inst. d.  
Universität Göttingen.

### Zahlentafel 1.

Nr.	Bodenart	Ausbreitungsgeschwindigkeit	Eigen-schwingungszahl $\alpha$	Zulässige Bodenpressung $\text{kg/cm}^2$
1	3 m Moor über Sand . . . . .	80 m/sec	4,0 Hz	—
2	Mehlsand . . . . .	110 „	19,3 „	1,0
3	Tertiärer Ton, feucht . . . . .	130 „	21,8 „	—
4	Lehmiger Feinsand . . . . .	140 „	20,7 „	—
5	Feuchter Mittelsand . . . . .	140 „	21,8 „	2,0
6	Juraton, feucht . . . . .	150 „	—	—
7	Alte Anschüttung aus Sand und Schlacke . . . . .	160 „	—	—
8	Mittelsand und Grundwasser . . . . .	160 „	—	2,0
9	Mittelsand, trocken . . . . .	160 „	22,0 „	2,0
10	Lehmiger Sand über Geschiebemergel . . . . .	170 „	22,6 „	2,5
11	Kies mit Steinen . . . . .	180 „	23,5 „	2,5
12	Lehm, feucht . . . . .	190 „	23,5 „	—
13	Geschiebemergel . . . . .	190 „	23,8 „	3,0
14	Feinsand mit 30 % Mittelsand . . . . .	190 „	24,2 „	3,0
15	Lehm, trocken, mit Kalkbrocken . . . . .	200 „	25,3 „	—
16	Mittelsand in ungestörter Lage . . . . .	220 „	—	4,0
17	Mergel . . . . .	220 „	25,7 „	4,0
18	Diluvialer Löß, trocken . . . . .	260 „	—	—
19	Kies unter 4 m Sand . . . . .	330 „	—	4,5
20	Grobkies, dicht gelagert . . . . .	420 „	30,0 „	4,5
21	Buntsandstein (verwittert) . . . . .	500 „	32,0 „	} $\frac{2}{3}$ der zulässigen Druckspannung
22	Mittelharter Keupersandstein . . . . .	650 „	—	
23	Buntsandstein (unverwittert) . . . . .	1100 „	—	

### Zusammenfassung.

Die dynamische Bodenuntersuchung ist nach zwei Richtungen hin entwickelt. Einmal wird eine gewisse Federkonstante des Bodens bestimmt, deren Größe in den verschiedenen Bodenarten ungefähr ebenso wächst wie die auf Grund der Erfahrung zulässige Bodenbelastung. Bei einem zweiten Verfahren wird die Fortpflanzungsgeschwindigkeit erzwungener elastischer Wellen gemessen, die ebenfalls als Maßstab für die Tragfähigkeit des Bodens benutzt werden kann. Bei diesen Messungen wird zugleich der Setzungsverlauf als Funktion der Erregerfrequenz bestimmt, der eine Voraussage über den Setzungsverlauf bei statischer und dynamischer Belastung gestattet. Diese dynamische Untersuchung besitzt nicht die Mängel der rein statischen Probelastung.

Leere Seite  
Blank page  
Page vide