

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Palloks, Werner

Die Messung der Ausbreitung elastischer Wellen im Boden in der Umgebung einer sinusförmig arbeitenden Schwingungsquelle mit kreisförmiger Grundplatte

Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106055>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Palloks, Werner (1964): Die Messung der Ausbreitung elastischer Wellen im Boden in der Umgebung einer sinusförmig arbeitenden Schwingungsquelle mit kreisförmiger Grundplatte. In: Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau 12. Berlin: Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau. S. 195-218.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



7/

Dk 624.131.439.7

: 624.131.55

Einfluss dyn. Einwirkungen
auf die Bodenfestigkeit

: Bodenerschütterungen

Die Messung der Ausbreitung elastischer Wellen im Boden in
der Umgebung einer sinusförmig arbeitenden Schwingungsquelle
mit kreisförmiger Grundplatte

Dipl.-Geophys. W. Palloks

10 Qu.

I. Einleitung

Um über Erschütterungsgefährdung von Gebäuden, Fundamenten und anderer Bauwerke Aussagen machen zu können, ist die Klärung mehrerer grundsätzlicher Fragen unbedingt notwendig. Dazu gehören die Bewegung des dynamisch erregten Bauwerkes auf dem Baugrund und die Anregung des Bauwerkes durch die im Boden ankommenden Erschütterungen. Die Ausbreitung der elastischen Wellen in der nächsten Umgebung einer auf dem Boden stehenden Erregerquelle, das Problem der Einrüttelung des Bodens sowie die Wirkung von Erschütterungen auf das Baumaterial sind weitere grundlegende Fragen (4). Einige davon wurden in der Literatur eingehend behandelt (2) (10), andere sind in der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau bearbeitet worden (8). Dazu gehört auch das Problem der Ausbreitung elastischer Wellen in der unmittelbaren Umgebung eines dynamisch angeregten Körpers auf dem Erdboden.

Die theoretische Ableitung der Formeln zur Berechnung dieses Problems fußt auf den Arbeiten von REISSNER (7) und ARNOLD, BYCROFT und WARBURTON (1). In diesen Arbeiten wird, ausgehend von den elastischen Wellengleichungen, die Bewegung einer kreisförmigen Platte auf einem ideal elastischen, isotropen unendlichen Halbraum berechnet für den Fall, daß an die Platte eine periodische (sinusförmige) Kraft in vertikaler Richtung angreift. Die numerische Berechnung dieses Problems ist relativ einfach, solange man sich auf die Bewegung der Platte selbst beschränkt, sie wird aber außerordentlich umfangreich, wenn die Bodenbewegung in der Umgebung dieser Platte im Verhältnis zur Plattenbewegung erhalten werden soll. Die mathematische Behandlung dieses Problems ist in der Arbeit von HEIDRICH (3) dargestellt.

Die oben angeführten Idealisierungen und Vereinfachungen (kreisförmige starre Platte, ideal elastischer isotroper unendlicher Halbraum) sind nötig, um das Problem ohne übertrieben großen Aufwand mathematisch erfassen zu können. Es ist deshalb wichtig, die auf dieser Grundlage erhaltenen Ergebnisse mit Messungen auf bzw. im Boden zu vergleichen, um Aussagen für die Baupraxis machen zu können. Zu diesem Zweck wurden Untersuchungen des stationären Wellenfeldes, das von einem elektrodynamischen Schwinger erzeugt wurde, in einem als homogen und entsprechend der geringen Intensität der Anregung als unendlichen Halbraum anzusprechendem Gelände durchge-

führt. Die Durchführung der Messungen und die Ergebnisse werden im folgenden beschrieben.

II. Das Meßgelände

Für die Messungen wurde ein Boden gefordert, bei dem störende Einflüsse durch Schichtgrenzen oder Grundwasser nicht auftreten. Die Messungen wurden darum auf dem Heller bei Dresden durchgeführt. Es handelt sich hierbei um eine homogene Sandschicht von 45 - 50 m Mächtigkeit. Grundwasser tritt erst in großer Tiefe auf. Nach einem Gutachten des VEB Geologische Erkundung Süd, Freiberg/Sachsen (Az GA 66K) über eine im gleichen Gebiet niedergebrachte Kartierungsbohrung zeichnet sich der Sand bis ca. 46 m Tiefe durch gleichmäßige Körnung aus. "Bis ca. 43 m herrscht ein reiner Mittelsand mit einem 52,2 - 82,7%igen Gehalt der (Korngrößen-) Fraktion 0,2 - 0,63 mm vor... Petrographisch setzt sich der Sand durchschnittlich zu 70 - 80 % aus Quarz und zu 10 - 15 % aus Feldspat, davon der größte Teil Orthoklas ($KAlSi_3O_8$) zusammen." Die Messungen wurden innerhalb der Sandgrube durchgeführt, wo schon eine etwa 3 m starke Sandschicht abgebaut worden ist. Die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen durch impulsförmige Erregung ergab mit $v_l = 290 \text{ m s}^{-1}$ und $v_{tr} = 160 - 165 \text{ m s}^{-1}$ ($\sigma = 0,26 - 0,28$) für Sand relativ hohe Werte und deutet auf große Lagerungsdichte hin.

III. Apparatur

Die verwendete Apparatur bestand aus zwei Gruppen (Abbildung 1 zeigt das Blockschema).

a. Schwingungserzeugung

Als Schwingungserreger wurde ein elektrodynamischer Schwinger (S) benutzt, der nach dem Prinzip des elektrodynamischen Lautsprechers arbeitet. Die Speisung der Feldspule (F) des Schwingers erfolgte durch einen Gleichrichter (G). Die Schwingspule (Sp) wurde durch einen Verstärker (V) gespeist, der die von einem Tiefton-Dekadengenerator (TG) (Funkwerk Erfurt, Typ 2012) gelieferte Spannung der entsprechenden Frequenz auf eine Ausgangsleistung von maximal 300 W verstärkte (LV 300 von Verstärkertechnik Böhner KG Berlin).

b. Schwingungsaufnehmer

Von den in den Boden einzubauenden Schwingungsaufnehmern mußte verlangt werden, daß sie

1. mit ihrer Resonanzfrequenz weit außerhalb der benutzten Frequenzen lagen, um entsprechend sichere Phasen- und Amplitudenmessungen

- gen zu gewährleisten
2. möglichst klein sind
 3. dünne flexible Anschlußkabel besitzen, um die durch die Kabel hervorgerufenen Störungen des Gefüges klein zu halten
 4. entsprechend ihrer Größe und Masse eine möglichst geringe Rückwirkung gegenüber der Bodenbewegung besitzen (4), (6).

Die benutzten piezoelektrischen Beschleunigungsmesser (A), im folgenden "Geber" genannt, vom Typ KD 2 bzw. KD 2a (Metra Meß- und Frequenztechnik Radebeul) erfüllten diese Forderungen weitgehend. Ihre Eigenfrequenz wird mit > 15 kHz angegeben. Über Koaxialkabel werden die der Schwingbeschleunigung proportionalen Spannungen an Meßverstärker M 60 (von Metra Meß.) angelegt und definiert verstärkt. Die Aufzeichnung der vom Verstärker abgegebenen Spannungen erfolgte durch einen 8-Schleifoszillographen (SO) (50-1 vom MW Zwönitz RFT).

IV. Eichung der Apparatur

Im Labor wurde das ganze Aufnehmersystem am Rütteltisch geeicht. Die Kennlinien der einzelnen Oszillographenschleifen wurden noch für die bei der Messung verwendeten Frequenzen gesondert bestimmt. Die Untersuchungen am Rütteltisch galten besonders dem Phasenverhalten des Systems. Es ergab sich, daß innerhalb der Auswertegenauigkeit der Filme (ca. 10^0) keine Unterschiede in den Phasen der einzelnen Geber mit den dazugehörigen Verstärkern und Schleifen auftraten. Die im Labor bestehende Meßanordnung wurde dann auch im Gelände beibehalten. Vor Beginn der Messungen im Gelände wurden an die einzelnen Verstärker bekannte Wechselspannungen angelegt und bei verschiedenen Verstärkungen von der entsprechenden Oszillographenspur aufgezeichnet. Die Spannungen vor und nach der Verstärkung wurden mit Röhrenvoltmetern (MV 1 von Claman & Grahnert, Dresden) gemessen. Die Empfindlichkeit B der Geber ist durch Eichkurven des Herstellerwerkes bekannt. Außerdem wurden die Geber auf dem Rütteltisch miteinander verglichen, wobei sich gute Übereinstimmung (± 5 %) zwischen beiden Werten ergab. Unter Berücksichtigung des Frequenzganges der Empfindlichkeit der Geber, der Eingangskapazität des Meßverstärkers und der Empfindlichkeit der Oszillographenschleifen wurde für jeden Geber für jede verwendete Frequenz und jede benutzte Verstärkungsstufe ein Faktor berechnet, der die vom Geber gemessene Beschleunigung pro Amplitudeneinheit auf dem Oszillogra-

phenfilm ausdrückt. Die Multiplikation der aus dem Film entnommenen Amplitude mit dem der verwendeten Verstärkung entsprechenden Faktor ergibt dann die vom Geber gemessene Beschleunigung b in ms^{-2} . Da es sich hier praktisch um sinusförmige Schwingungen handelt, kann die Auslenkung A durch $A = \frac{b}{p^2}$ erhalten werden, für eine bestimmte Frequenz also durch Multiplikation der Beschleunigung mit dem konstanten Faktor $\frac{1}{p^2}$.

V. Einbau der Beschleunigungsmesser

In ein Bohrloch von etwa 15 cm Durchmesser und 3 m Tiefe wurden je ein Geber (KD 2a) horizontal (in der geplanten Profilrichtung) und vertikal eingebaut. Das geschah mit Hilfe eines Vinidurrohres, an dessen Ende die Geber befestigt waren (Abb. 2). Dann wurde feuchter Sand nachgeschüttet und festgestampft. Es wurde besonders darauf geachtet, daß die Zuleitungskabel nicht straff eingebettet werden. Ebenso sind in 2m, 1m, 0,5m und 0m weitere Geberpaare eingebaut worden. Beim Ausbau wurde bis 1 m tief gegraben, um die Lage der so eingebauten Geber zu kontrollieren. Es zeigte sich, daß die Lage der Geber den Erfordernissen vollkommen entsprach. Die vollständige Einbettung der Beschleunigungsmesser in den Boden ist unbedingt nötig, wenn man die tatsächliche Raumwelle erhalten will. Benutzt man offene Schächte o.ä., so sind die Oberflächenwellen bei stationärer Anregung phasen- und amplitudenbestimmend, wie Messungen von VIERING (TH Dresden 1958) gezeigt haben.

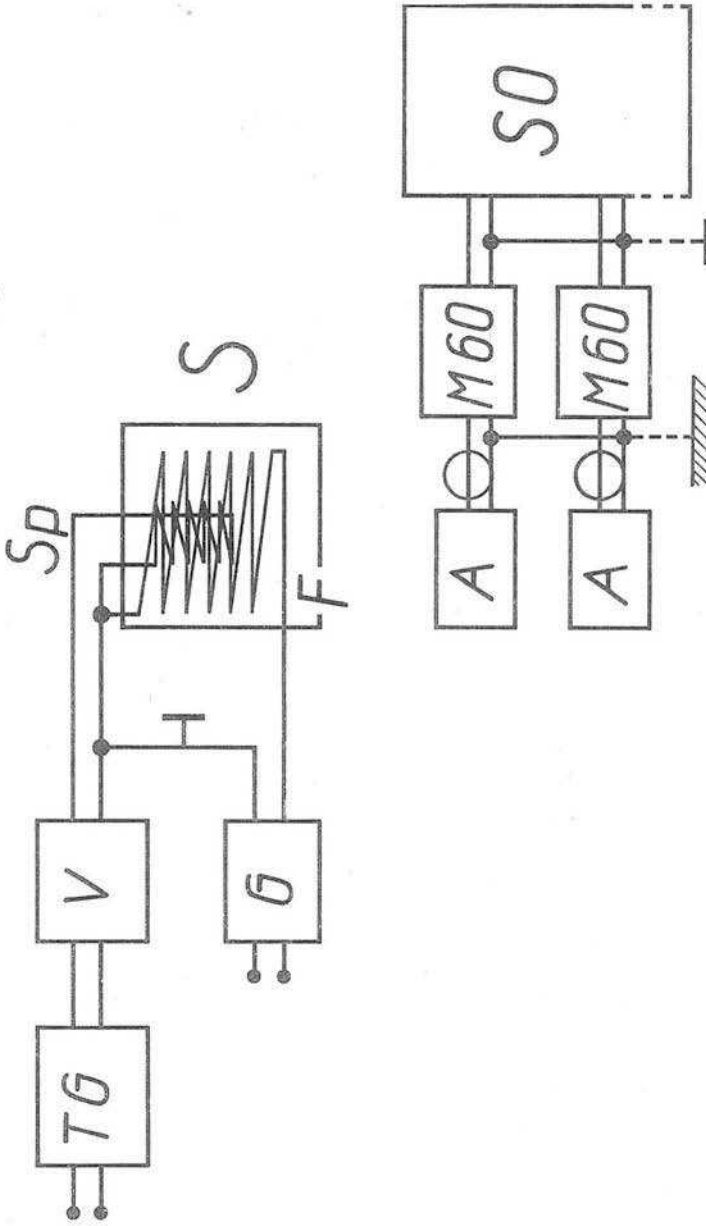


Abb. 1 Apparaturschema (Blockschema)

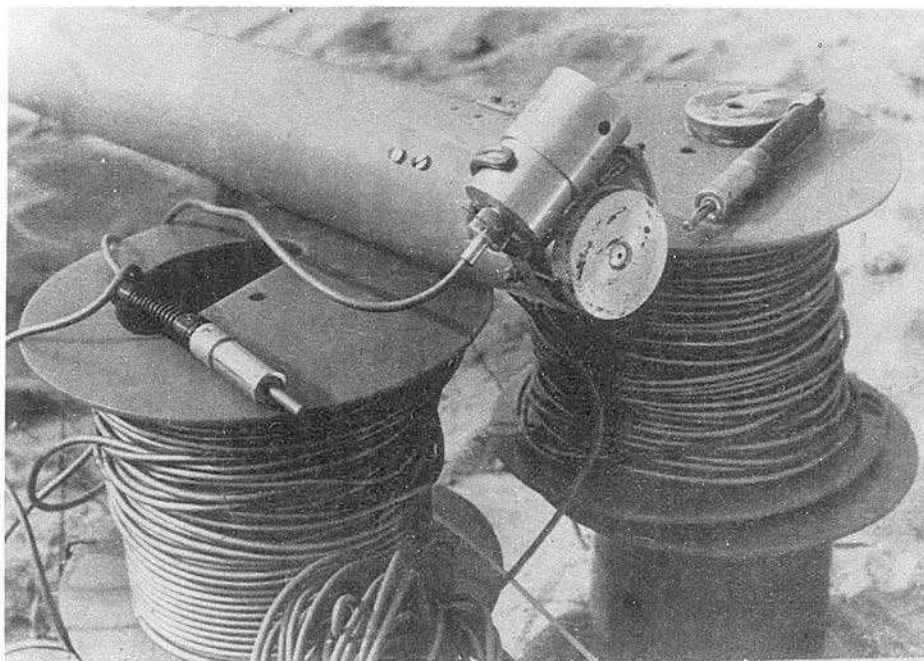


Abb. 2 Hilfsvorrichtung zum Einbau des vertikalen und horizontalen Gebers in den Boden

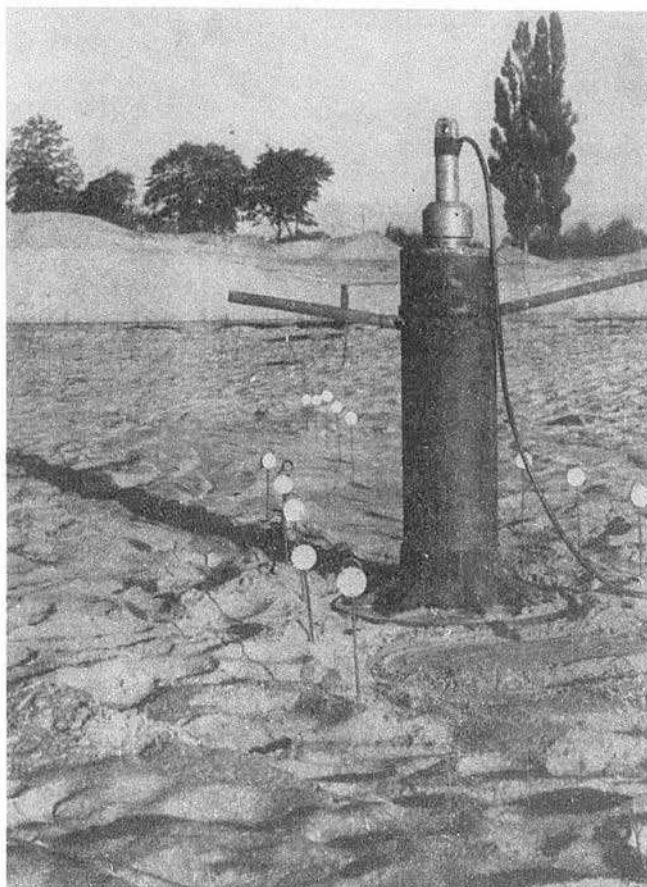


Abb. 3 Das Meßgelände mit dem elektrodynamischen Schwinger

VI. Durchführung der Messung

Im Fall einer auf der Oberfläche des Halbraumes harmonisch vertikal schwingenden kreisförmigen Platte herrscht bei Annahme von Isotropie Rotationssymmetrie um die vertikale Achse, die durch den Plattenmittelpunkt geht. Es genügt aus diesem Grunde bei Untersuchung der Wellenausbreitung unter einer solchen Platte die Messung in einer Ebene, die durch die Symmetrieachse und einen Radiusvektor (Profilrichtung) gebildet wird.

Um das Wellenfeld des Schwingers messen zu können, benötigte man mehrere solcher im Boden eingebauten vertikalen Geberanordnungen. Es standen aber nur 11 Geber zur Verfügung. Zwischen 6 m Entfernung zur Geberanordnung bis direkt darüber wurde deshalb der Schwinger nach jeder Messung jeweils um 0,5 m (= Durchmesser der Grundplatte) weiter gerückt. Somit wurden also Amplituden- und Phasenmessungen in 12 verschiedenen Entfernungen vom Schwinger durchgeführt. Unter der Voraussetzung gleicher Meßbedingungen und Bodenverhältnisse sowie Homogenität ergibt sich daraus das Bild des Wellenfeldes bei festgehalten gedachter Quelle.

Die Messung an den einzelnen Punkten wurde jeweils mit den hohen Frequenzen begonnen. Die Amplitude der Schwingerplatte hatte für jede Frequenz einen bestimmten Wert, der natürlich an allen Meßpunkten beibehalten werden mußte. Sie wurde durch einen direkt auf der Grundplattenmitte des Schwingers befestigten Geber bestimmt. Abbildung 3 zeigt den Schwinger auf dem Profil.

Eine Betrachtung der Leistungsfähigkeit der Apparatur ermöglicht es, die auftretenden Fehlergrenzen abzuschätzen. Dabei zeigt sich, daß von der Apparatur der größte (systematische) Fehler durch die nicht sehr große Richtungsempfindlichkeit (1:10 bis 1:15) der Beschleunigungsmesser in das Ergebnis eingeht. Andere störende Einflüsse wie die der eingebetteten Kabel und der Witterungseinfluß wegen des zeitlichen Abstandes der Messungen untereinander können aus den Meßergebnissen selbst abgeschätzt werden (Anschlußregistrierungen). Auf dieser Grundlage wurde ein Fehler zwischen den einzelnen Messungen von 15 % abgeschätzt, wobei der Fehler der absoluten Bestimmung der Beschleunigung durchaus höher liegen kann. An Hand der Anschlußregistrierungen wurde festgestellt, daß zwischen den einzelnen Messungen im Bereich 0-3,5 m Entfernung Schwinger - Geberanordnung die Abweichungen noch geringer sind, ebenfalls im Bereich 4-6 m, während

diese beiden Bereiche stärker voneinander abweichen (ca. 25 %). Dieser Sprung wurde durch eine grundlegende Änderung der Witterungsbedingungen verursacht. Allerdings ist der Bereich 4-6 m hier nur von geringem Interesse. Der interessanteste Bereich 0-1 m wurde unmittelbar hintereinander gemessen, so daß hier vollkommen gleiche äußere Bedingungen herrschten.

VII. Ergebnisse der Messungen

Die Oszillographenfilme wurden nach Phase und Amplitude ausgewertet. Die Phasenverschiebung eines Gebers gegenüber der Bewegung der Schwingerplatte wurde aus dem Film aus der Verschiebung der aufgezzeichneten Geberbewegung gegenüber der aufgezeichneten Plattenbewegung durch Vergleich von jeweils 5 aufeinanderfolgenden Extrema der Sinuskurven bestimmt. Wichen die Kurven der Geber von der Sinusform ab, so wurden diese durch sie bestannähernde Sinuskurven ersetzt und dann die Extrema verglichen. Die Amplitude wurde aus Mittelwerten über mehrere Perioden bestimmt.

Damit kann für jeden Meßpunkt die herrschende Schwingbeschleunigung in horizontaler und vertikaler Richtung und ihr Phasenunterschied zur Plattenschwingung für eine bestimmte Frequenz erhalten werden. Diese Messungen wurden mit den Frequenzen 60, 85, 100, 140, 180, 220 und 260 Hz ausgeführt. An den Punkten 0 - 2 kamen noch 250, 200 und 150 Hz hinzu. Die Wahl der Frequenzen war abhängig von der Transversalwellengeschwindigkeit des Bodens (60, 85 und 100 Hz). Um einen möglichst großen Frequenzbereich zu überstreichen, wurden noch die höheren Frequenzen zur Messung benutzt. Die Ergebnisse sollen an einer Frequenz diskutiert und dann die Änderungen mit der Frequenz behandelt werden. Für die gefundenen Verschiebungen ergeben sich im allgemeinen elliptische Bahnen. Betrachtet man die Phasenverschiebung der horizontalen und vertikalen Komponente eines Punktes in Abhängigkeit von der Entfernung, so zeigt sich, daß die Differenz der beiden Phasenverschiebungen annähernd linear von der Entfernung abhängt. Diese Abhängigkeit kann in dieser Form nicht auf störende Kabeleinflüsse oder ähnliches zurückgeführt werden.

Es ist sehr wahrscheinlich, daß damit tatsächlich die Ausbreitung der longitudinalen und transversalen Störung erfaßt wurde. Damit kann auch den elliptischen Verschiebungsbahnen eine Realität zugebilligt werden. Die Hauptbewegungsrichtung der Verschiebung an der

Oberfläche ändert sich laufend, es wechseln Punkte mit großer Horizontalkomponente ab mit solchen großer Vertikalkomponenten. In Abb. 4 sind Linien gleicher Horizontalkomponenten (ausgezogen) und gleicher Phasenverschiebung (gestrichelt) dargestellt. Wegen des Abstandes der einzelnen Punkte kann diese Darstellung nur angenähert gelten, da die Extrapolation auf die Punktzwischenräume große Fehler in sich bergen kann. Trotzdem zeichnen sich klar bestimmte Maxima der Horizontalkomponenten ab. Die Lage dieser Maxima ändert sich mit der Frequenz. Mit wachsender Frequenz werden die Abstände zwischen den einzelnen Maxima geringer. Linien gleicher vertikaler Komponenten für 85 Hz zeigt Abbildung 5.

Die Linien gleicher Gesamtbeschleunigungen für 85 Hz sind in Abbildung 6 dargestellt. Die durch eine schwingende Platte hervorgerufenen Störungen werden demnach vor allem an der Oberfläche weitergeleitet und unter der Platte etwa kegelförmig abgestrahlt. Bei höheren Frequenzen bildet sich dieser Kegel immer weiter aus. Das zeigt das Bild der Isolinien für 180 Hz (Abbildung 7) deutlich. Hierbei wird jedoch schon ein anderer Effekt sichtbar, der von Eigenschwingungen der benutzten Platte herrührt. Die Platte beginnt bei etwa 200 Hz in sich zu schwingen und hat bei 250 Hz eine Resonanzstelle, bei der die Amplituden am Plattenrand wesentlich größer als im Zentrum sind. Der schon in Abb. 7 sichtbare "Kegelmantel" wird dabei noch weiter ausgebildet, außerdem wird die Amplitude in 3 m und 2 m Tiefe direkt unter dem Schwinger wesentlich größer, was auf eine fokussierende Wirkung der Platte schließen läßt. Die Messungen sind darum nur bis zur Frequenz 180 Hz für diese Untersuchung zu benutzen. Die an der Oberfläche gemessenen Phasenverschiebungen der vertikalen Komponente lassen einen Schluß auf die Phasengeschwindigkeit der Wellen zu. Für die Punkte 0 bis 7 ergeben sich für die einzelnen Frequenzen durchschnittlich $v = 100 - 120 \text{ ms}^{-1}$, für die Punkte 8 - 12 $v = 140 - 160 \text{ ms}^{-1}$. Die in Abschnitt II angegebenen Geschwindigkeitswerte für impulsförmige Anregung ($v_1 = 290 \text{ ms}^{-1}$, $v_{tr.} = 160 - 165 \text{ ms}^{-1}$) sind vor den Messungen an den Punkten 8 bis 12 durch Hammerschlaganregung erhalten worden. Die Werte der Phasengeschwindigkeit liegen also hierfür in der Nähe der Transversalwellengeschwindigkeit. An einigen Punkten wurde zwischen den Messungen in einer bestimmten Entfernung von der Geberanordnung eine impulsförmige Erregung ausgelöst und die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Erregung gemessen.

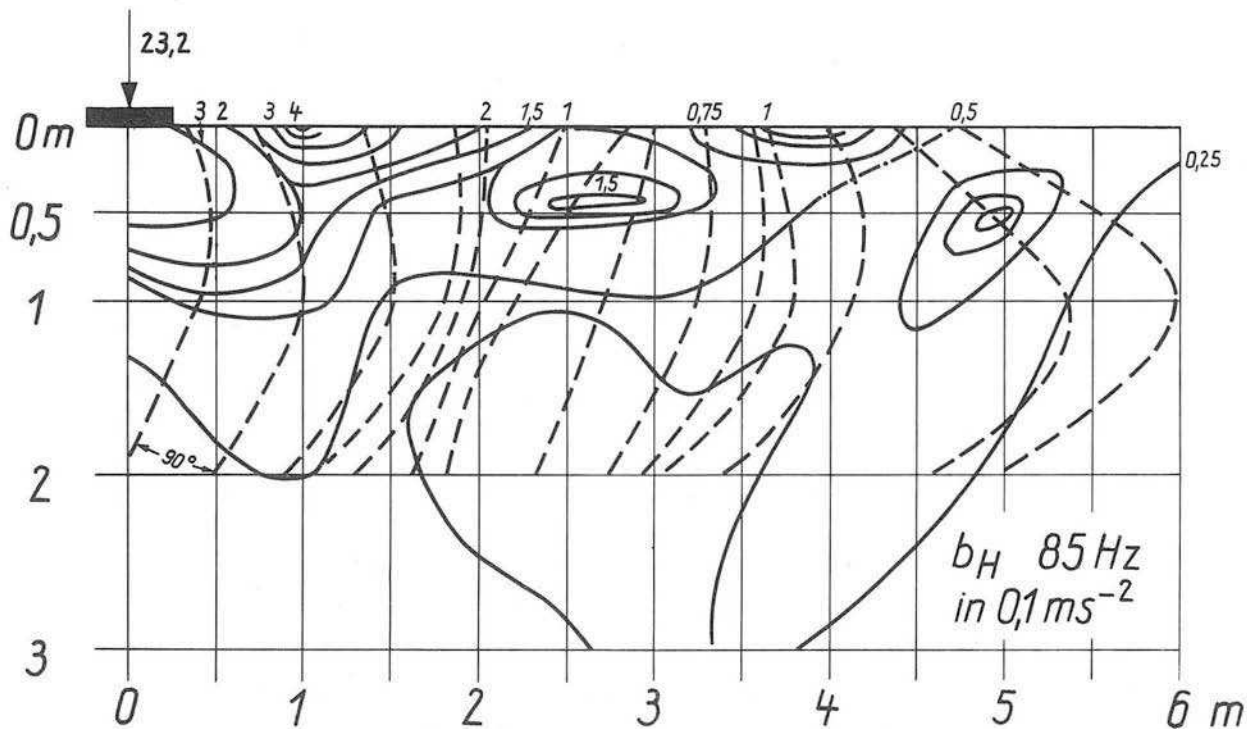


Abb. 4 Linien gleicher Horizontalbeschleunigung (ausgezogen) und Linien gleicher horizontaler Phasenverschiebungen (gestrichelt) gegenüber der Plattenbewegung für 85 Hz

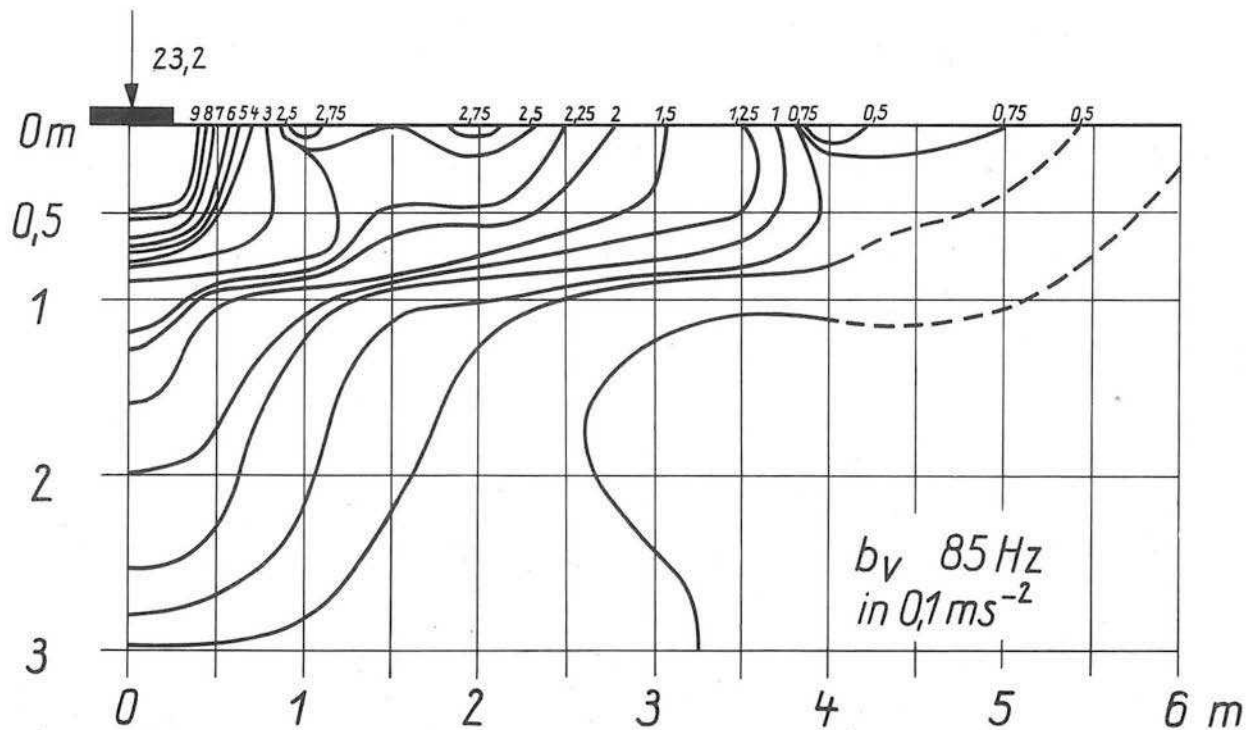


Abb. 5 Linien gleicher Vertikalbeschleunigung für 85 Hz

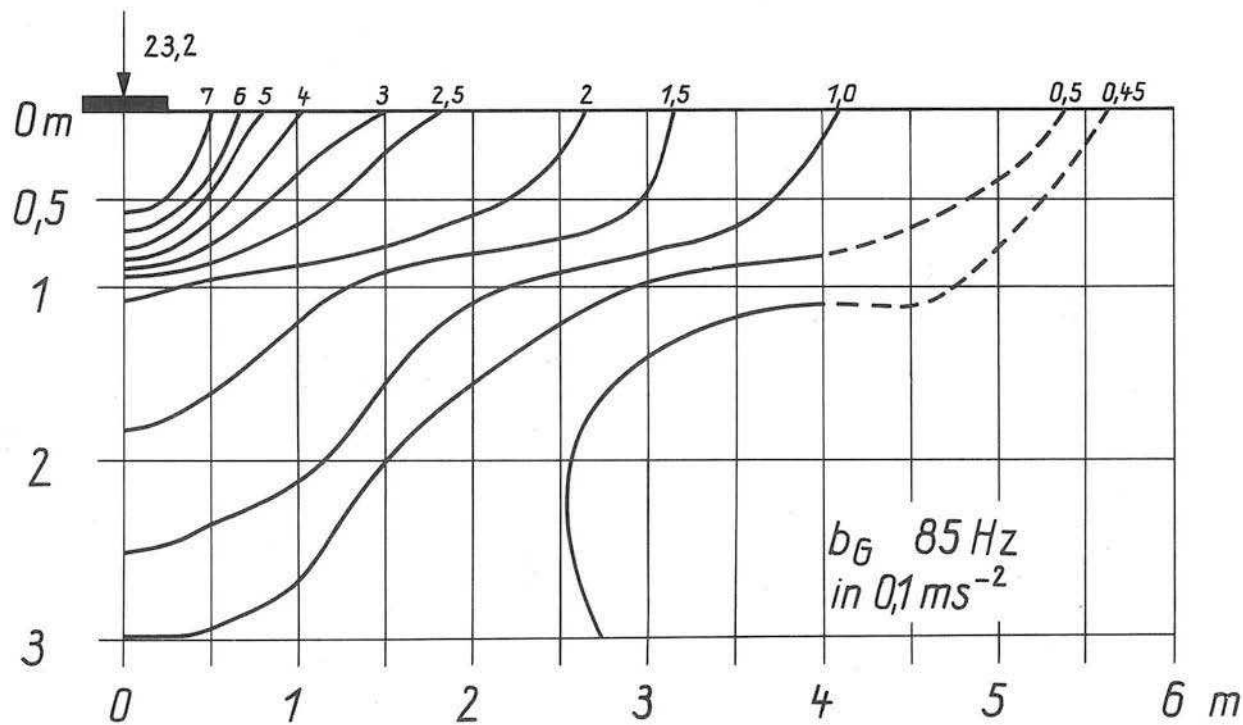


Abb. 6 Linien gleicher Gesamtbeschleunigung für 85 Hz

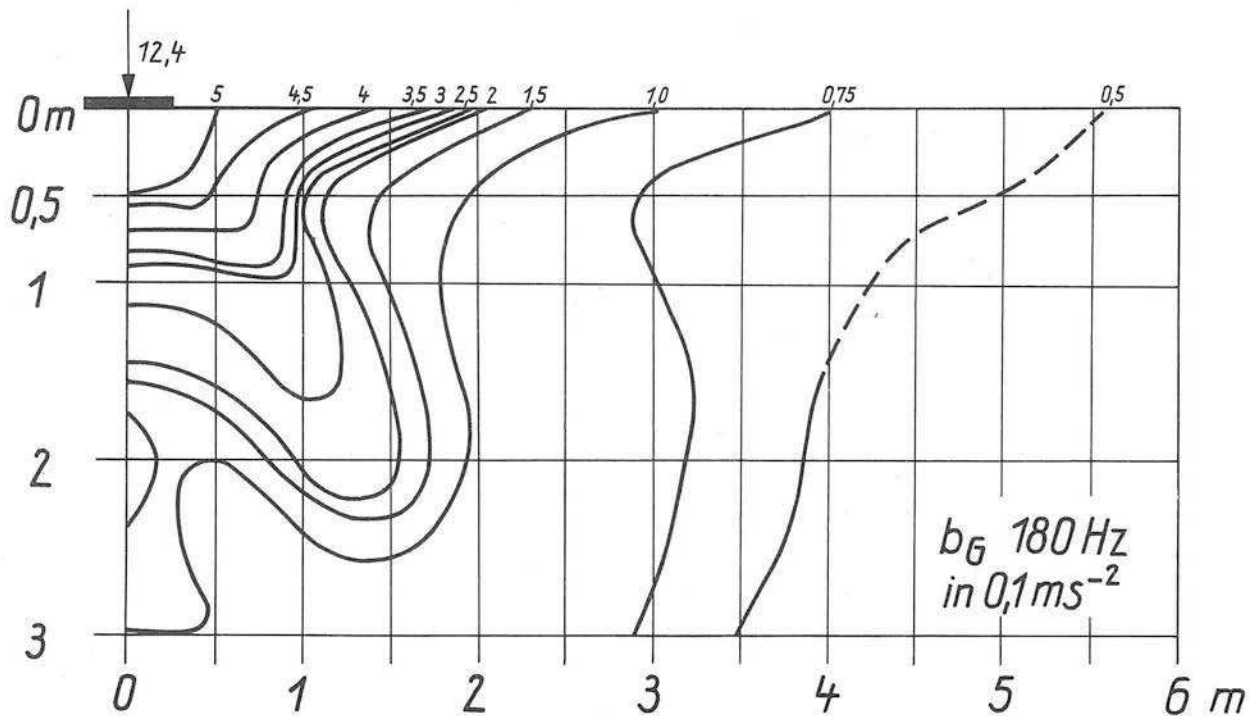


Abb. 7 Linien gleicher Gesamtbeschleunigung für 180 Hz

Die erhaltenen Werte können allerdings nur Richtwerte darstellen, da nur die Laufzeitdifferenz zwischen zwei Punkten bestimmt werden konnte. Für die Punkte 0 bis 7 ergaben sich danach $v_1 = 220 - 240 \text{ ms}^{-1}$ und $v_{tr} = 90 - 130 \text{ ms}^{-1}$. Auch hier liegen die Phasengeschwindigkeiten in der Nähe der Transversalwellengeschwindigkeit. Das stimmt gut mit den Ergebnissen überein, die KARUS UND PASEČNIK (5) bei Messungen auf kristallinem Gestein erhalten haben.

Die gemessene Phasenverschiebung von 0 - 3 m Tiefe direkt unter dem Schwinger ($r=0$) und für $r=0,5 \text{ m}$ und $z=0 \text{ m}$ ist in Abbildung 8 dargestellt. Diese Werte waren für 2 und 3 m Tiefe nur ungenau zu ermitteln, da die Kurvenform dort besonders bei den niedrigen Frequenzen von der Sinusform abwich. Die sich daraus ergebenden Phasengeschwindigkeiten weisen dementsprechende Unterschiede auf. Tabelle I gibt die Phasenverschiebungen der vertikalen Komponente gegenüber der Platte und die sich zwischen den einzelnen Punkten ergebenden Phasengeschwindigkeiten v sowie die Verhältnisse der vertikalen Verschiebungskomponente w zur Plattenamplitude w_0 an.

Die Abnahme der Beschleunigung mit der Tiefe zeigt für $r=0 \text{ m}$ (direkt unter dem Schwinger) Abbildung 9.

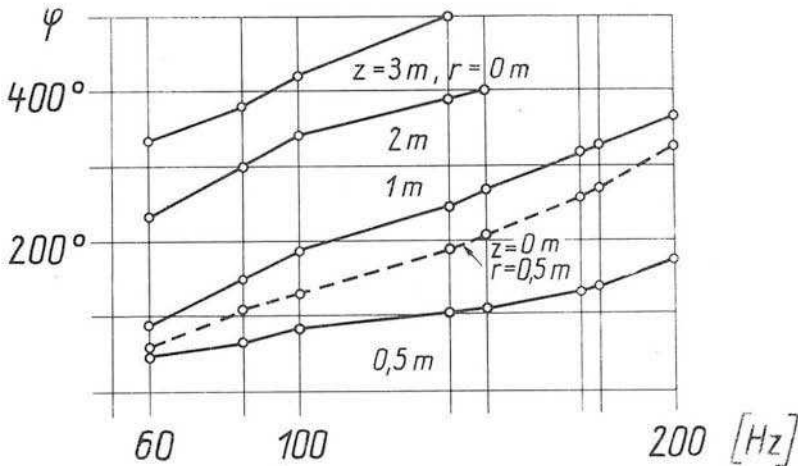


Abb. 8 Abhängigkeit der Phasenverschiebung der vertikalen Komponente der Bodenbewegung gegenüber der Plattenbewegung für $r = 0, z = 0,5, 1, 2, 3 \text{ m}$ und $z = 0, r = 0,5 \text{ m}$ von der Frequenz

Tabelle I:

Zusammenstellung einiger Ergebnisse

f Hz	r = 0 m												z=0 m		z=0,5 m		
	z=0,5 m		z=1 m		z=2 m		z=3 m		Phasengeschw. v ms ⁻¹					r=0,5 m		r=0,5 m	
	φ°	$\frac{w}{w_0}$	φ°	$\frac{w}{w_0}$	φ°	$\frac{w}{w_0}$	φ°	$\frac{w}{w_0}$	0-0,5	0-1	0-2	0,5-1	0,5-2	φ°	$\frac{w}{w_0}$	φ°	$\frac{w}{w_0}$
60	45	0,57	90	0,11	210	0,04	340	0,02	240	240	190	240	190	60	0,22	100	0,25
85	65	0,42	150	0,10	300	0,05	380	0,02	235	205	205	180	195	110	0,30	140	0,18
100	80	0,36	190	0,09	340	0,05	420	0,015	215	195	210	180	215	130	0,36	180	0,18
140	110	0,40	240	0,15	390	0,065	500	0,030	240	210	260	180	270	190	0,42	230	0,13
150	110	0,39	270	0,17	400	0,045			250	200	270	170	285	210	0,45	250	0,13
175	140	0,40	320	0,18					240	210		180		260	0,39	300	0,12
180	140	0,40	330	0,18					240	200		180		270	0,39	300	0,14

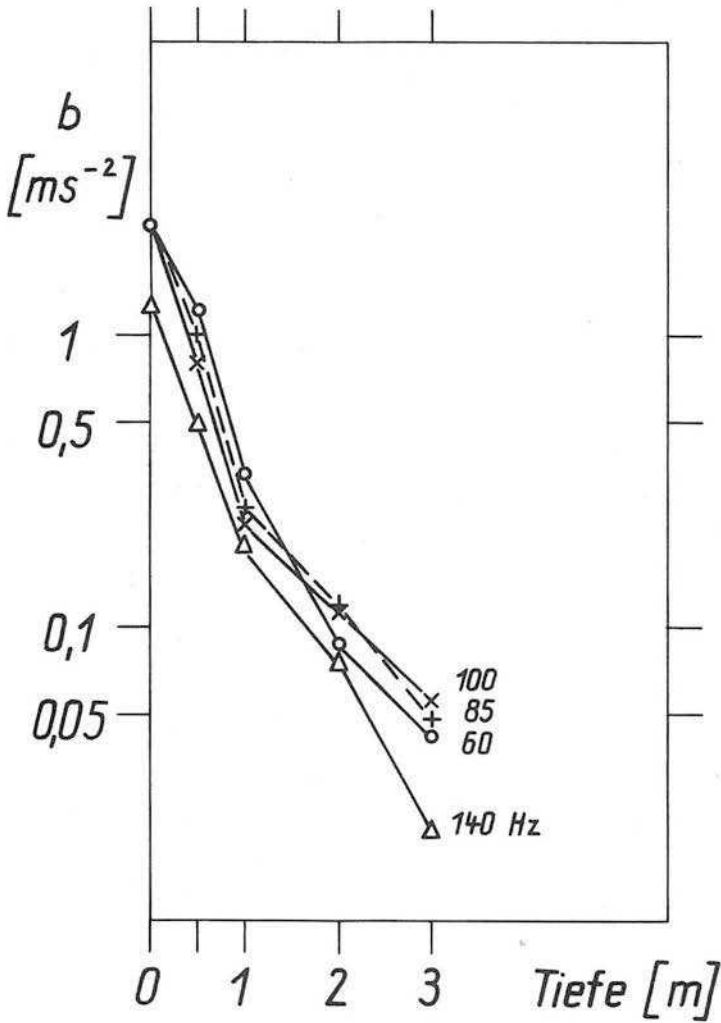


Abb. 9 Verlauf der Vertikalkomponente der Beschleunigung mit der Tiefe für $r = 0$ m

VIII. Vergleich der gemessenen mit den errechneten Amplituden-
und Phasenwerten

Für die Berechnung wurden folgende dimensionslosen Parameter eingeführt (3)

$$\begin{array}{ll} a = kr & r = \text{radiale Entfernung vom Plattenmittelpunkt} \\ a_0 = kr_0 & r_0 = \text{Plattenradius} \\ l = kz & z = \text{Tiefe} \end{array}$$

$$k = \frac{2\pi f}{v_{tr.}} \quad \begin{array}{l} f = \text{Frequenz der Plattenschwingung} \\ v_{tr.} = \text{Transversalwellengeschwindigkeit des Bodens} \end{array}$$

Der Radius der Schwingerplatte betrug $r_0 = 0,25$ m. Für die berechneten Werte ($a_0 = 1$) ergeben sich die in den Spalten "r" und "z" von Tabelle II angeführten vergleichbaren Tiefen und Horizontalentfernungen der experimentellen Untersuchungen.

Aus den Ergebnissen wird zunächst ersichtlich, daß die berechneten Verschiebungen nicht auf der ganzen Platte gleich sind. Infolge der von REISSNER (7) für die Rechnung angenommenen Spannungsverteilung unter der Platte ergeben sich rechnerisch Amplitudenwerte, die von der Plattenmitte ($r = 0$) zum Plattenrand ($r = r_0$) hin um etwa 50 % abnehmen. Diese Abnahme der Amplitude ist verbunden mit einem Nachlaufen der Schwingungsphase am Plattenrand von 23° gegenüber der Plattenmitte. Zum Vergleich mit den Meßergebnissen erscheint es sinnvoll, als Bewegung der Platte den Mittelwert aus den beiden Werten anzusetzen, wie es ŠECHTER (9) vorgeschlagen hat. In Tabelle II werden die in den Spalten w/w_0 und φ_0 angeführten Werte auf den Plattenmittelpunkt bezogen, in den Spalten w/w_m und φ_m auf den Mittelwert. Auf Grund der Transversalwellengeschwindigkeit des Bodens sind die Werte für 85 Hz mit den berechneten vergleichbar.

Die auf den Plattenmittelpunkt bezogenen Ergebnisse (Amplitudeneinheiten) stimmen für $r=0m$, $z=0,5m$ und $r=0,5m$, $z=0m$ mit den bei 85 Hz gemessenen Werten genau überein (Unterschied weniger als 2,5 %), während die gemessenen Phasenverschiebungen für diese Punkte etwas kleiner sind als die berechneten. Da in der Rechnung keinerlei Absorption der Energie berücksichtigt ist, kann diese Übereinstimmung nur als Bestätigung der Feststellung ŠECHTER's (9) gewertet werden, daß der aus dem Mittelwert der Amplitude der Plattenmitte und des Randes gebildete Wert den tatsächlichen Verhältnissen wesentlich

Tabelle II: Einige Ergebnisse der Rechnung

	Berechnet für $a_0 = 1$ und $\sigma = 0,25$						Gemessen 85 Hz			
a_0	a	l	$\frac{w}{w_0}$	φ_0	$\frac{w}{w_m}$	φ_m	$\frac{w}{w_0}$	φ	r	z
1	0	0	1,000	0°	--	--	1,00	0°	0 m	0 m
1	0	2	0,410	-94°	0,544	-83°	0,42	-65°	0 m	0,5 m
1	0	4	0,151	-145°	0,201	-134°	0,10	-150°	0 m	1 m
1	1	0	0,508	-23°	--	--	1,00	0°	0,25 m	0 m
1	2	0	0,303	-117°	0,403	-105°	0,30	-110°	0,5 m	0 m
1	2	2	0,168	-125°	0,224	-113°	0,18	-140°	0,5 m	0,5 m
1	0 - 1	0	--	--	1,000	0°	1,00	0°	0-0,25 m	0 m

besser entspricht. Für diesen Fall ergibt sich folgendes Bild (Spalte w/w_m):

Die Phasenwerte weichen für die Punkte $r = 0 \text{ m}$, $z = 1 \text{ m}$ und $r = 0,5 \text{ m}$, $z = 0 \text{ m}$ sowie $r = 0,5 \text{ m}$, $z = 0,5 \text{ m}$ um 20 % oder weniger voneinander ab, während der Punkt $r = 0 \text{ m}$, $z = 0,5 \text{ m}$ stärker herausfällt.

Das Verhältnis der gemessenen zur berechneten Amplitudeneinheit hat für $r = 0 \text{ m}$, $z = 0,5 \text{ m}$ den Wert 0,78, das Verhältnis der gemessenen Werte nimmt also auf der Entfernung 0,5 m um 22 % gegenüber den berechneten ab. Von 0 - 1 m Tiefe nimmt dieses Verhältnis um 50 % ab, auf dem Weg 0,5 m - 1 m um 36 %. Für den Punkt $r = 0,5 \text{ m}$, $z = 0,5 \text{ m}$ liegt diese Abnahme bei 20 %, für $z = 0 \text{ m}$, $r = 0,5 \text{ m}$ bei 30 %.

In diesen Abweichungen sind sowohl die Ungenauigkeiten der Rechnung als auch der Messung enthalten, sowie die Unterschiede, die sich auf Grund der Annahme eines ideal elastischen Körpers in der Rechnung ergeben. Ein Teil der Abnahme der gemessenen Amplitudeneinheit gegenüber der berechneten kann der Umwandlung der elastischen Energie im realen Boden (innere Reibung, Einrüttelung) zugeordnet werden.

Auf Grund der Fehlergrenze der Rechnungen und der Messungen sowie der kleinen Zahl der vergleichbaren Punkte ist eine spezielle Deutung der Abweichungen nicht möglich. Es können aber einige wichtige Schlussfolgerungen bezüglich der eingangs dargestellten Fragen gezogen werden. Aus der guten prinzipiellen Übereinstimmung kann die Gültigkeit des durch den Parameter a_0 ausgedrückten Modellgesetzes abgeleitet werden. Danach muß sich bei der modellmäßigen Untersuchung von Fundamentalschwingungen auf dem realen Boden mit der Transversalwellengeschwindigkeit v_{tr} die Abmessung umgekehrt proportional zur verwendeten Frequenz verhalten. Unter Berücksichtigung der Druckabhängigkeit der Transversalwellengeschwindigkeit des Bodens ergibt sich die Amplitudenabnahme unter dem Fundament, die für die Berechnung der durch die dynamische Anregung zu erwartenden Setzungen durch Einrüttelung des Sandbodens wichtig ist.

Literaturverzeichnis

- (1) ARNOLD, BYCROFT u. WARBURTON: Forced vibrations of a body on an infinite elastic solid. J. of Applied Mechanics 1955
- (2) CIESIELSKI: Barèmes pour la taxation de l'influence des vibrations et des chocs dus aux causes extérieures sur les constructions de brique. Vortrag, gehalten auf der RILEM-Tagung 1963 in Budapest
- (3) HEIDRICH, W: Die Berechnung der Vertikalamplituden elastischer Wellen in der Nähe einer kreisförmigen Schwingungsquelle im ideal elastischen Medium. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin - Schriftenreihe Wasser- und Grundbau, Heft 12 Berlin 1964
- (4) HEIDRICH, JUST: Die Rückwirkung von Schwingungsmeßgeräten auf das Meßergebnis in der Bodendynamik. Freiburger Forschungshefte C 81, Berlin 1960
- (5) KARUS, PASEČNIK: Über die Natur der elastischen Wellen, die in realen Medien durch eine harmonische Quelle erzeugt werden. Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. geofiz. (1955) 2
- (6) MAAZ: Die Wechselwirkung zwischen mechanischem Empfänger und einer harmonischen longitudinalen Welle im Vollraum. Dissertation Bergakademie Freiberg 1962
- (7) REISSNER: Stationäre, axialsymmetrische, durch eine schüttelnde Masse erregte Schwingungen eines homogenen elastischen Halbraumes, Ingenieur - Archiv 7, 1936
- (8) SCHÄPFNER: Ein Verfahren zur Berechnung dynamisch erzeugter Setzungen in Kornhaufwerken. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau Berlin, Schriftenreihe Wasser- und Grundbau Heft 12 1964
- (9) SECHTER: Ob učete inercionnych svojstv grunta pri rascete vertikal'nych vynuždennych kolebanij massivnych fundamentov - Sbornik trudov "Vibracii sooruženij i fundamentov" No 12, Strojvoenmorizdat 1948
- (10) SOLIMAN: Criteria for permissible levels of industrial vibrations with regard to their effect on human beings and buildings. Vortrag, gehalten auf der RILEM-Tagung 1963 in Budapest.

