

Aus dem Lehrstuhl für Kulturtechnik der Agrarwissenschaftlichen
Universität Keszthely, Ungarische Volksrepublik
(Lehrstuhlleiter: Prof. Dr. sc. G. Jaranyi)
und aus der Sektion Pflanzenproduktion
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Wissenschaftsbereich Standortkunde
(Leiter des Wissenschaftsbereiches: Prof. Dr. sc. K. Dörter)

Bodenuntersuchungen mit der mikroseismischen Methode „in situ“

Von Gyula Szóka und Georg Müller

Mit 15 Abbildungen

(Eingegangen am 6. Februar 1986)

Die weitere Steigerung der Erträge und der Wirksamkeit von Intensivierungsmaßnahmen in der Pflanzenproduktion erfordert auch eine allseitige Nutzung und gezielte Beeinflussung der standörtlichen Gegebenheiten. Grundlage dafür sind umfangreiche und zu vertiefende standortkundliche Kenntnisse. Informationen zur Heterogenität des Bodens, die allgemein mit der Vergrößerung der Produktionsflächen zunimmt, sind unter anderem für die Art und den Umfang gezielter bodenbeeinflussender Maßnahmen bedeutend.

Eine bei Bodenuntersuchungen allgemein verwendete Methode ist die Entnahme und Analyse von Bodenproben. Die Qualität der dabei erhaltenen Informationen ist von Ort, Zeit und Anzahl der Probenahmen abhängig, und die Untersuchungen sind nur teilweise reproduzierbar, daneben zumeist zeit- und arbeitsaufwendig.

Es ist zu beachten, daß bei einer Analyse von 2×6 Bodenproben je Hektar und einer Tiefe bis zu 1 m ($\sim 1200 \text{ cm}^2$ Boden) nur ein $8,3 \times 10^6$ ter Teil des Bodens untersucht werden.

Untersuchungen zahlreicher Wissenschaftszweige, z. B. der Geophysik, Astronomie und Atomphysik, basieren auf dem allgemeingültigen Naturgesetz, daß alle Systeme entsprechend ihrer stofflichen Zusammensetzung auf eine Erregung charakteristisch reagieren (bzw. antworten).

Grundgedanke der am Lehrstuhl für Kulturtechnik der Agrarwissenschaftlichen Universität Keszthely (Ungarn) unter anderem durchgeführten Untersuchungen war, daß die für die landwirtschaftliche Produktion bedeutenden Bodenschichten auf eine mechanische Erregung (Schlag) immer in der gleichen Art und Weise reagieren, wenn gleiche stoffliche Zustände vorliegen. Wenn diese Annahme richtig ist, dann sollten seismische Reaktionen des Bodens auf mechanische Erregungen (Schlag) zur Kennzeichnung seiner stofflichen Zusammensetzung und seines Zustandes geeignet sein.

Im folgenden werden dazu Grundkenntnisse und erste Untersuchungsergebnisse mitgeteilt:

In einem theoretisch homogenen Boden breiten sich, wie in jedem homogenen System, durch seismische Erregung (z. B. Schlag) erzeugte Schwingungswellen zeitlich gleichmäßig aus. Die zur gleichen Zeit eintreffenden Wellen bilden eine Wellenfront in Form einer Halbkugel (Abb. 1). Der Querschnitt der Halbkugel besteht aus konzentrischen Kreisen (Meskó 1977). Der Boden stellt jedoch ein anisotropes und inhom-

genes Gebilde dar (Broms 1961, Dörter 1961, Eggelsmann 1973, Reynold 1970, Várallyay 1978). Allgemein wächst seine Dichte mit der Tiefe. In den dichteren Schichten ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit durch seismische Erregung erzeugter Wellen größer als in weniger dichten Schichten. Entsprechend der Huygensschen Lichtbrechungstheorie wird jedes einzelne Bodenteilchen als Wellenquelle eine Wellenfront erzeugen, und aus den dichteren Schichten werden die Wellen in Richtung der weniger dichten Schichten abgelenkt (Abb. 2).

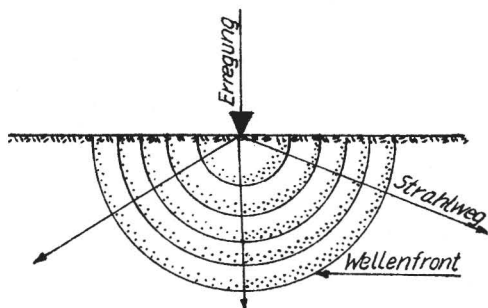


Abb. 1
Die Ausbreitung seismischer Wellen in homogenem Boden

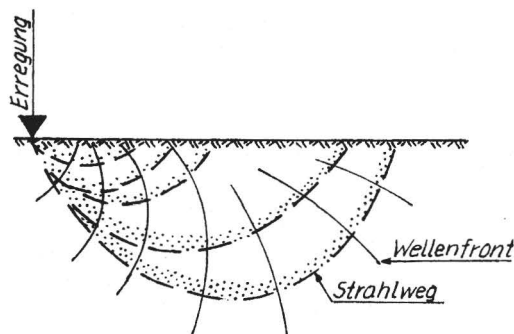


Abb. 2
Die Ausbreitung seismischer Wellen in inhomogenem Boden (die Dichte nimmt mit der Tiefe zu)

Wie in Abbildung 2 ersichtlich, können senkrecht zu den Wellenfronten entsprechend dem Gesetz von Snellius Strahlwege festgelegt werden (Meskó 1973). Aus Abbildung 2 ist weiterhin ersichtlich, daß die aus verschiedenen Tiefen eintreffenden Wellen die Bodenoberfläche zu unterschiedlichen Zeiten bzw. aus differenzierten Entfernungen erreichen. Nach Erreichen einer bestimmten (kritischen) Entfernung werden die aus tieferen Schichten reflektierten, schnelleren Wellen die sich in Oberflächennähe ausbreitenden Wellen überholen.

Die Energie der seismischen Erregung wird im umgekehrten Verhältnis zum Quadrat der Entfernung kompensiert. Daraus folgt, daß für die aus tieferen Schichten stammenden Informationen größere Energie benötigt wird, und in Abhängigkeit von Ort und Stärke der seismischen Erregung verändert sich das Verhältnis zwischen Oberflächen- und Tiefenwellen bzw. deren Intensität (Wahrnehmbarkeit).

Die Theorie und Methode der am Lehrstuhl für Kulturtechnik der Agrarwissenschaftlichen Universität Keszthely durchgeführten Untersuchungen unterscheiden sich von der in der seismischen Tiefenforschung verwendeten.

Die seismische Literatur bezeichnet die von uns untersuchte aktive Bodenzone als sogenannte „Störzone“ oder als Schicht mit geringen Geschwindigkeiten. In der Tiefenforschung werden die Methoden und Meßinstrumente so benutzt, daß Informationen aus der Störzone ausgeschlossen werden.

Am Lehrstuhl für Kulturtechnik der Agrarwissenschaftlichen Universität Keszthely wurden die Untersuchungen mit folgenden Geräten durchgeführt:

Zu Beginn der Versuche wurde als Erreger ein Holzhammer mit einem dynamischen Zeichengeber benutzt. Die Empfänger waren polnische Geophone des Typs X-2. Die Eigenresonanzfrequenz der Geophone betrug 24 Hz. Die Empfindlichkeit der Geophone wurde auf einem Brüel-Kjær-Vibrationstisch geprüft. Die Kontrollen wurden mit Meßgeräten des Meßtechnischen Dienstes der Ungarischen Akademie der Wissenschaften durchgeführt. Diese Institution hat auch die Zeichenaufnahme mit einem Meß-Cassetten-Recorder (Philips Minilog 4), die Spektralanalysen mit einem Brüel-Kjær-Spektralanalysegerät und die Berechnungen mit einem Hewlet-Packard-Kleincomputer durchgeführt.

Für die Anwendung in der Praxis ist ein am Lehrstuhl für Kulturtechnik der Agrarwissenschaftlichen Universität Keszthely entwickeltes mikroseismisches Meßgerät verfügbar, mit dem folgende Größen ermittelt werden können:

- die Schlaggröße (die abgegebene Energiemenge)
- das Amplitudenmaximum (die beim Empfänger ankommende Energiemenge)
- die Anzahl der Schwingungen (bzw. Zeichen)
- die Abklingdauer der Zeichen
- die Fortpflanzungszeit (von Erregung bis zum Geophon)

Das Gerät ist tragbar. Sein Gewicht mit Ladegerät beträgt 3 kg. Die Zeitmeßgenauigkeit liegt bei 10^{-5} s. Die Anzeige ist digital. Die Betriebsspannung 12 V Gleichstrom oder 220 V Wechselstrom. Das Gerät kann mit Magnetbandspeicher (Recorder) gekoppelt werden.

Die seismischen Bodenuntersuchungen haben zwei Seiten:

- die kinematische, welche sich mit der Wellengeometrie (z. B. Ausbreitungsgeschwindigkeit) befaßt, und
- die dynamische, welche sich mit der Zeichenform (Amplitude, Frequenz usw.) befaßt.

Bei der kinematischen Untersuchung besteht die Möglichkeit, entweder die Schlagentfernung oder die Entfernung des Empfängers zu verändern. Wenn man die erhaltenen Zeitwerte in Abhängigkeit vom Weg (Abstand) in ein Diagramm einträgt, erhält man Weg-Zeit-Funktionen (Abb. 3). Mit Hilfe des Weg-Zeit-Diagramms kann auf die Schichtenbildung des Bodens geschlossen werden, weil unterschiedliche Kurvenanstiege verschiedenen Geschwindigkeiten, also verschiedenen Bodenschichten entsprechen. Es ist hier zu bemerken, daß die erhaltenen Werte Scheingeschwindigkeiten darstellen, da der tatsächliche Wellenweg größer ist als der Abstand zwischen Erregungsort und Meßort.

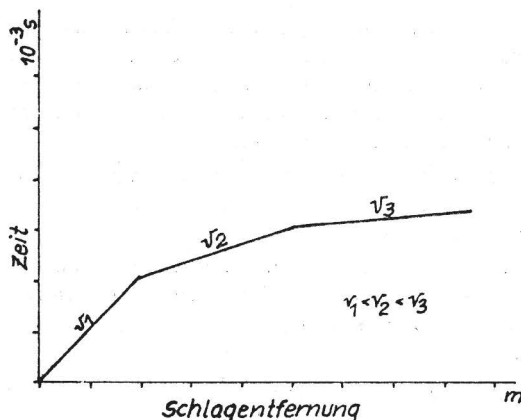


Abb. 3
Weg-Zeit-Funktion (Laufzeitkurve) für dreischichtigen Boden

Zuerst wurde bei den kinematischen Messungen die Geschwindigkeit der Schwingungen zwischen zwei Geophonen (Meßstellen) in Abhängigkeit von der Schlagentfernung untersucht (Abb. 4).

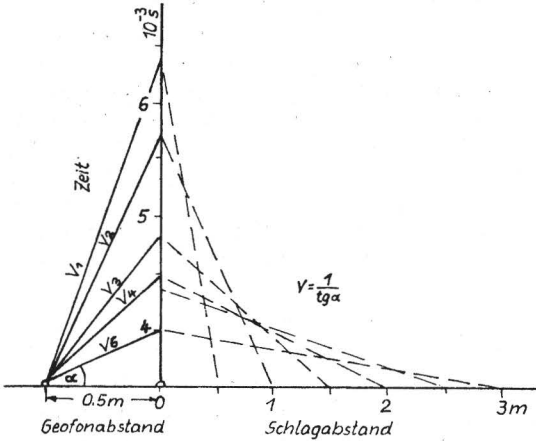


Abb. 4
Änderung der Geschwindigkeit der seismischen Welle mit Vergrößerung des Schlagabstandes

Der Abstand zwischen den Geophonen betrug 0,5 m, die Schlagentfernung jeweils in 0,5-m-Schritten bis zum Abstand von 3,0 m. Die im Weg-Zeit-Diagramm aufgezeichneten Werte wurden mit zunehmendem Schlagabstand kleiner.

Die Abnahme der Zeit mit Vergrößerung des Weges zeigt, daß die Wellengeschwindigkeit zwischen zwei Geophonen zunimmt. Das ist nur damit zu erklären, daß die von weiter entfernten Schlägen verursachten Wellen aus tieferen Schichten zu den Geophonen gelangen und die Dichte des Bodens (wie allgemein) mit der Tiefe zunimmt.

In gleichen Schichten ist natürlich die Geschwindigkeit gleich. Wie Abbildung 4 zeigt, unterscheiden sich die Geschwindigkeitswerte beim 3., 4. und 5. Schlagabstand (zwischen 1,5 und 2,5 m) kaum. Auf den vertikalen Aufbau des Bodens bezogen entspricht der 1. und 2. Wert einer Ebene (Schicht) A, der 3., 4. und 5. Wert einer Ebene B und der 6. Wert einer Ebene C.

Weiter wurde der Einfluß verschiedener Schlagenergien auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Welle bei 1,0 m, 1,5 m und 3,0 m Erregungsabstand untersucht. Aus Abbildung 5 ist ersichtlich, daß mit Erhöhung der Schlagenergie die Geschwindigkeit der seismischen Wellen bei allen drei Schlagabständen geringer und wiederum mit zunehmendem Schlagabstand die Geschwindigkeit der seismischen Wellen größer wird.

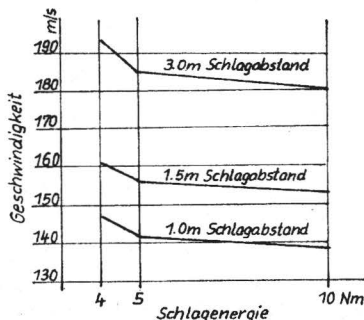


Abb. 5
Einfluß unterschiedlicher Schlagenergien auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen

Diese Erscheinung ist damit zu erklären, daß die Ausbreitungsgrenze von Oberflächenwellen geringerer Geschwindigkeit ebenso energieabhängig ist, wie die der Tiefenwellen. Bei Anwendung größerer Erregerenergien ist das Auftreten von Oberflächenwellen geringerer Geschwindigkeit bei größeren Abständen meßbar.

Bei der kinematischen Messung beträgt die Entfernung zwischen Geophon und Erregungsort (Schlag) 10,0 m, die Messungen erfolgen aller 0,5 m, immer näher zum Ort der Erregung. Die Schlagenergie ist in jedem Fall gleich. Wir registrieren die zu der jeweiligen Entfernung gehörenden Zeitwerte. Die erhaltenen Werte werden in ein Koordinatensystem eingezeichnet. Auf der y -Achse ist die Zeit (10^{-3} s), auf der x -Achse der Schlagabstand aufgetragen. So erhält man die Laufzeitkurve. Eine Richtungsänderung der Laufzeitkurve verdeutlicht eine andere Geschwindigkeit, also eine andere Schicht im Boden. Zu jeder Erregerenergiegröße gehört eine kritische Entfernung, außerhalb dieser überholen die seismischen Tiefenwellen die langsameren Oberflächenwellen.

Bei Anwendung geringer Erregerenergien sind schneller Tiefen-Informationen, aber nur kleine Meßabstände möglich. Die Untersuchung der uns interessierenden Bodenschichten kann nur bei Anwendung geringer Erregerenergien zum Ziel führen.

Die Neigung und die Neigungsrichtung von Bodenschichten lassen sich ebenfalls bestimmen. In waagerechten Bodenschichten durchgeführte Messungen (entsprechend der Abb. 6) ergeben eine symmetrische Funktion. Im Falle einer Neigung der Bodenschichten schneiden sich die beiden Laufzeitkurven nicht in der Symmetrieachse (Abb. 6). Oberflächen- und Tiefenwellen können auch hier festgestellt werden. Bis zum ersten Punkt, in dem sich der Anstieg der Funktion ändert, finden wir die Oberflächenwellen, die allgemein dem A-Horizont oder der Ackerkrume entsprechen.

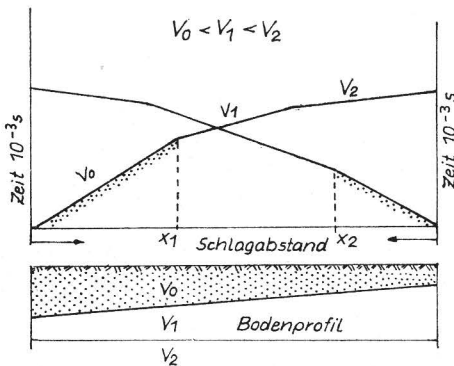


Abb. 6

Bestimmung der Neigung einer Bodenschicht durch Gegenmessung

Damit festgestellt werden kann, aus welchen Tiefen die seismischen Wellen kommen, wurde deren Ausbreitungsgeschwindigkeit näher untersucht. In der tiefenseismischen Forschung ist folgende Berechnung bekannt (vgl. mit Abb. 3):

$$D_1 = \frac{x_1}{2} \quad \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} \quad D_1 = \text{erste Schicht}$$

$$D_2 = 0,8 D_1 + \frac{v_3 - v_2}{v_3 + v_2} \quad D_2 = \text{zweite Schicht}$$

Diese Beziehungen lassen sich bei Böden mit begrenzter Inhomogenität anwenden und die Methode nennt man Refraktionsmessung (o. V. 1980).

Untersuchungen, die zu beiden Seiten eines 0,6 m breiten und 1,2 m tiefen Grabens erfolgten (Abb. 7), ergaben, daß Messungen mit Abständen von 8 bis 10 m Informationen aus einer Tiefe geben, die größer ist als die Mächtigkeit der aktiven Bodenzone.

Die Meßgrenze hängt von der Größe der Erregungsenergie und von der Empfindlichkeit des Meßgerätes ab.

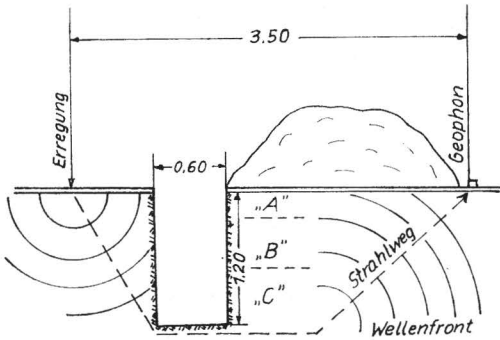


Abb. 7
Weg der seismischen Welle bei Vorhandensein eines Grabens

Bei den dynamischen Untersuchungen ist die Antwort des Bodens immer eine vielseitige (Abb. 8). Hier kann man die Größe der maximalen Amplitude, die Anzahl der Peaks und die Abklingzeit des Zeichens feststellen. Bei den in Abbildung 8 dargestellten Meßwerten wurde die seismische Erregung mit einem Holzhammer von 1 kg Gewicht verursacht. Nach zehnfacher Wiederholung ist der Hammer 10 cm tief in die Bodenoberfläche eingedrungen. Der Schlagabstand vom ersten Geophon betrug 1 m, der Abstand zwischen den beiden Geophonen war ebenfalls 1 m. Wie Abbildung 8 zeigt, behält das Zeichen bei Wiederholungen seine Form bei. Abweichungen sind technisch z. B. durch nicht genaue Wiederholbarkeit des Schlages mit dem Hammer bedingt.

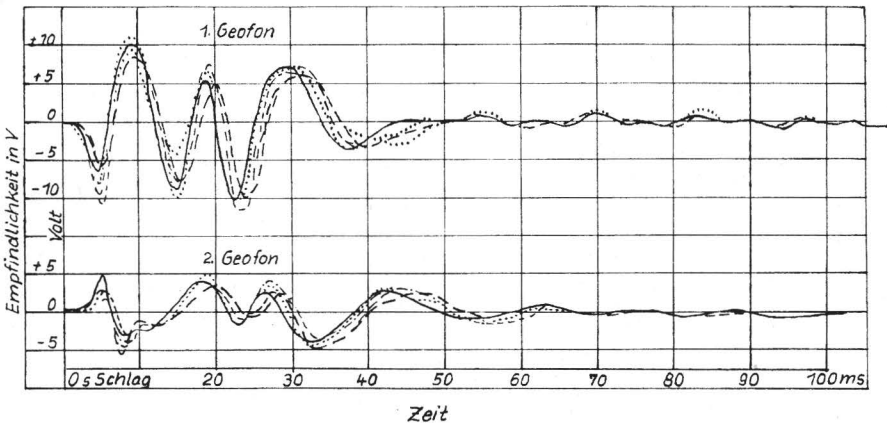


Abb. 8. Variation der seismischen Wellen bei 10 wiederholten Erregungen (Empfindlichkeit = 50 mV/mm; Zeitmaßstab = 1 mm = 0,5 ms)

Mittels der Fourier-Transformation läßt sich das Frequenz-Spektrum des in Abb. 8 dargestellten Zeichens herstellen (Abb. 9).

Aus dem Spektrum kann man den Bereich sowie die Verteilung der harmonischen Komponenten, die Grenzfrequenz des Übertragungssystems und die Resonanzfrequenz des Bodens ablesen. Das Zeichen und sein Spektrum ist immer für die Bodenzusammensetzung charakteristisch. Der Boden gibt (entsprechend seinem jeweiligen Zustand) auf eine bestimmte Erregung eine spezifische Antwort. Einzelne Frequenzen werden verschluckt, andere verstärkt. Im Verlauf der Messungen werden vom Meßgerät neben

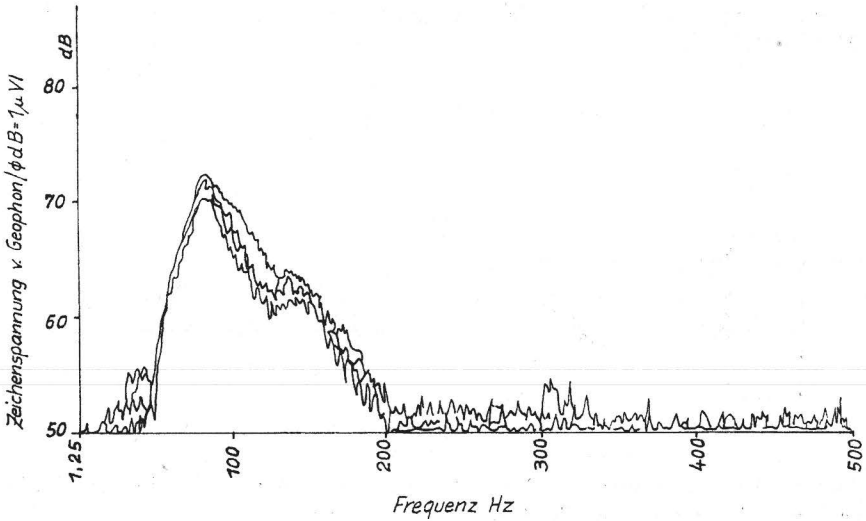


Abb. 9. Frequenz-Spektrum eines Rendsina-Bodens bei viermaliger Erregung

den Zeitwerten der Schwingungsgeschwindigkeiten die dynamischen Werte abgelesen und in Abhängigkeit vom Schlagabstand dargestellt. Entsprechend dem Amplitudenmaximum, der Anzahl der Peaks und den Abklingzeiten wurden mit einem geeigneten Computer exponentielle Regressionsberechnungen durchgeführt. Die Veränderung des Amplitudenmaximums in einem sandigen Lehm zeigt Abbildung 10.

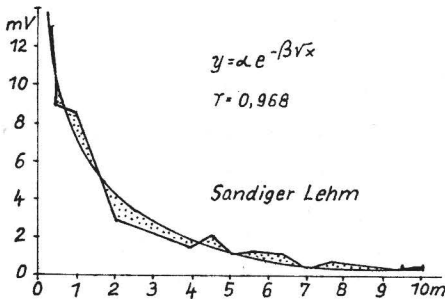


Abb. 10
Änderung des Amplitudenmaximums in Abhängigkeit vom Schlagabstand

Bei identischem Schlagenergieverbrauch ergeben sich für verschiedene Bodentypen je nach Bodenzustand differenzierte Amplitudenmaxima. Aus welcher Entfernung von der Erregungsstelle bei gleichem Schlagenergieverbrauch Zeichen erhalten werden, ist von der Bodenart und dem Zustand des Bodens abhängig.

Nach praktischen Erfahrungen können bei 1,1 Nm Erregungsenergie (dafür ist als Erregungsmittel ein 0,4 kg schwerer Gummihammer, der mit einem piezoelektrischen Empfänger ausgestattet ist, damit die von der Erregung bis zum Empfänger zurückgelegte Zeit der seismischen Welle gemessen werden kann, geeignet) in 8 bis 10 m Entfernung Messungen durchgeführt werden.

Bei gleicher Erregungsenergie ist der maximale Meßabstand ausgeprägt bodenfeuchteabhängig. Dies ist für Bodenfeuchtebestimmungen nutzbar. Da zu verschiedenen Erregungsenergien verschiedene maximale Amplituden gehören, besteht die Möglichkeit, die Energieverteilung im Boden zu untersuchen. Die energieleitende oder energie-mindernde Eigenschaft des Bodens ist von dessen Porenverhältnissen sowie dem Wasser-Luft-Verhältnis in den Bodenporen abhängig (Szóka 1984).

Ein Beispiel der kinematischen Untersuchungen ist in Abb. 11 dargestellt. Im unteren Teil der Abbildung 11 sind die Werte der Scheingeschwindigkeiten angegeben. Man erkennt, daß die Geschwindigkeit mit der Schlagentfernung wächst. Auf gekalktem Boden ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit kleiner, was auf eine lockerere Struktur hinweist. Die Ungleichmäßigkeit der Kalkung ist ebenfalls erkennbar.

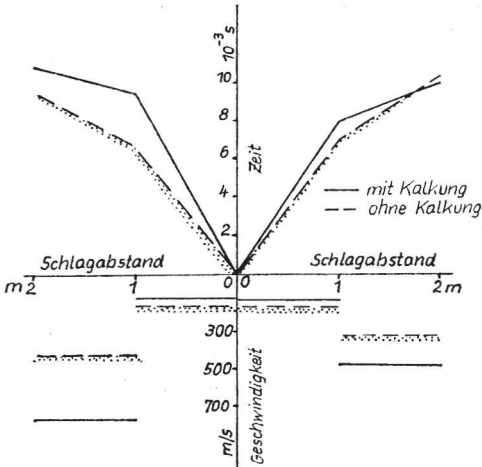


Abb. 11
Änderung der Laufzeitkurve bei einem Pseudogley-Ton-Boden durch Kalkung

Bei der dynamischen Untersuchung wurde ein Meßrecorder des Typs Brüel & Kjær 7005 für eine exakte Prüfung verwendet. Aus den bei 1 m Schlagabstand erhaltenen Zeichen wurden die Spektren dargestellt und analysiert (Abb. 12).

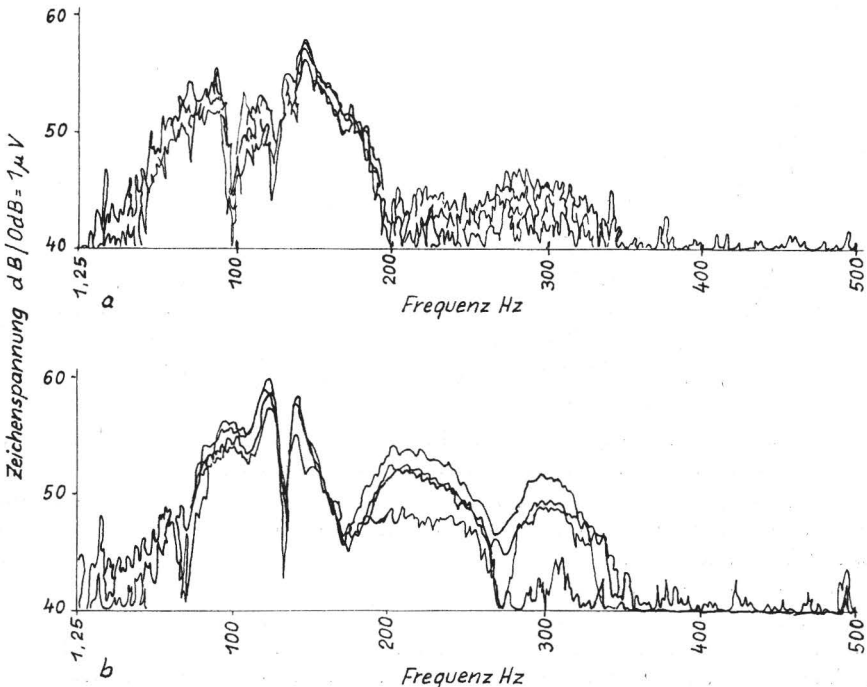


Abb. 12. Frequenzspektrum auf a) gekalktem Boden, b) ungekalktem Boden

Es ist zu erkennen, daß bei viermaliger Wiederholung die Zeichenform bzw. deren Spektren identische Informationen enthalten. Die Grenzfrequenz des ungekalkten Bodens beträgt 240 Hz. Die harmonischen Komponenten bestehen aus drei gut voneinander zu unterscheidenden Teilen. Die charakteristische Resonanzfrequenz liegt in einem Bereich um 100 Hz, die Resonanzschärfe bei 10 Hz.

Unterschiede zwischen Bodenarten sind erkennbar, wenn man die Veränderung der Spitzenzahlen (Abb. 13) oder der Abklingzeiten (Abb. 14) in Abhängigkeit vom Schlagabstand dargestellt.

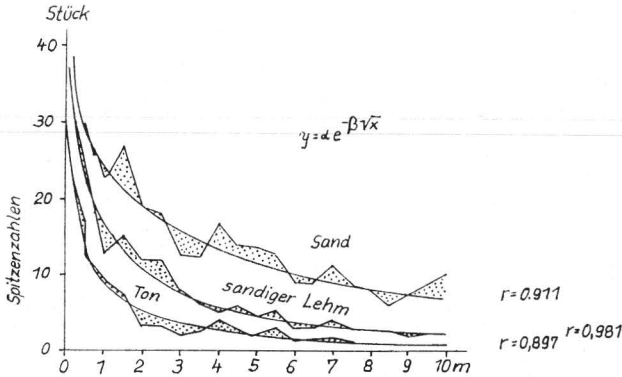


Abb. 13
Änderung der Spitzenzahlen in Abhängigkeit vom Schlagabstand und Boden

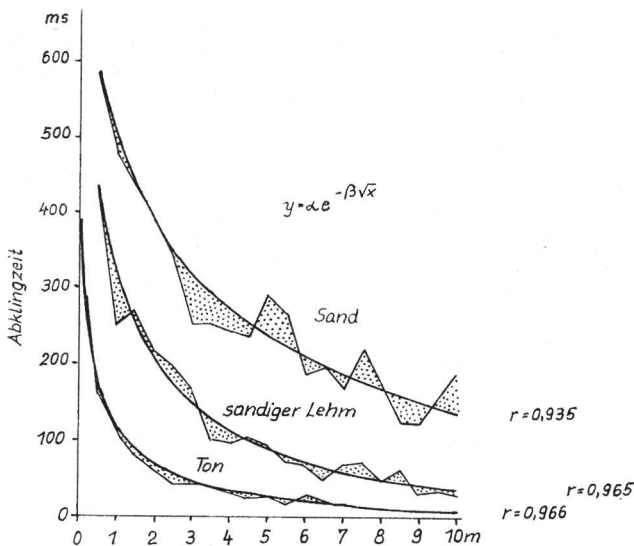
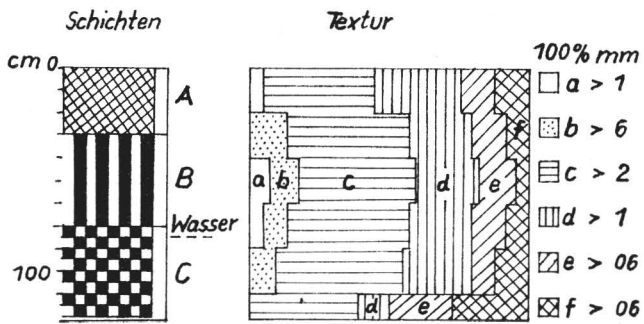
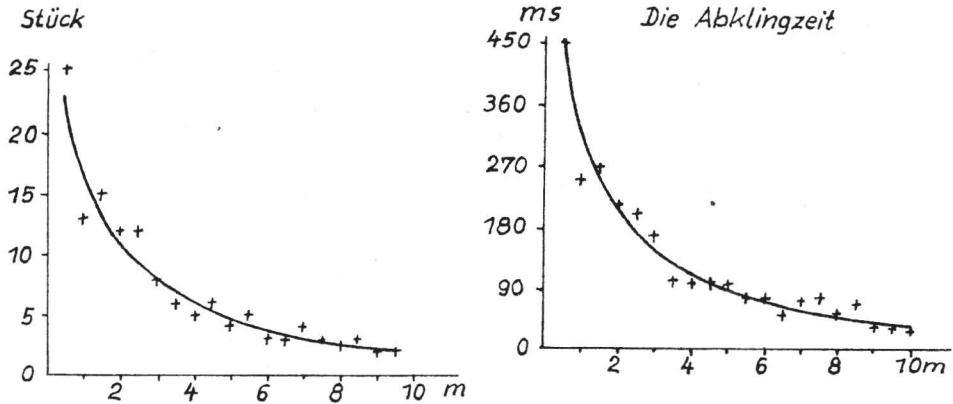


Abb. 14
Veränderung der Abklingzeit in Abhängigkeit vom Schlagabstand und Boden

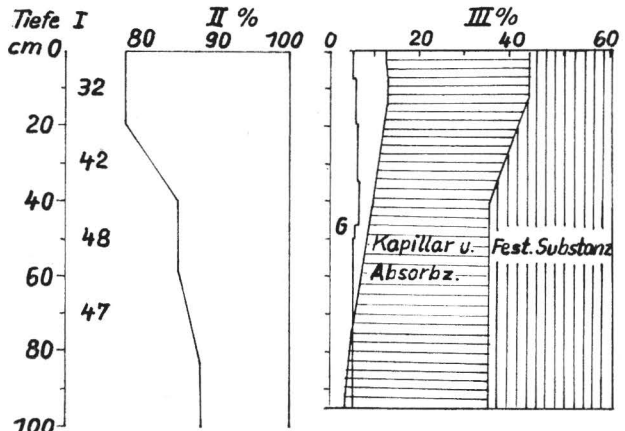
Diese Ergebnisse können mit den Porenverhältnissen der Böden in Zusammenhang gebracht und unbekannte Böden danach bestimmt werden.

Die Meßwerte wurden unter Verwendung des Computers „ZX Spektrum“ aufgearbeitet und die Ergebnisse der exponentiellen Regressionsberechnungen dargestellt. Die Abbildungen 13 und 14 zeigen den Unterschied zwischen den berechneten Korrelations- und gemessenen Werten.

Zur Deutung seismischer Messungen könnte eine Datenbank eingerichtet und genutzt werden. Es besteht die Möglichkeit, daß durch Computer aus Meßwerten berechnete bekannten Kurven angepaßt werden und so Aussagen zum Bodenzustand erhalten werden. Beispiele dazu sind in der Abbildung 15 a, b, c dargestellt.



- A Lehm,- Sand
- B rötlichgrauer, schlammhaltiger Lehm
- C grülicher, kalkiger, toniger Lehm



- I Bindigkeit
- II Verdichtung
- III Porenverhältnisse
- ≡ Wasserformen

Abb. 15. Computerauswertung der Meßdaten von sandigem Lehmboden. a) Die Spitzenzahlen; $N = 19$; $\beta = 1,0190888$; $\alpha = 46,690549$; $R = 0,97444109$ (mit ZX Spektrum 48 K Personalcomputer); b) die Abklingzeiten; $N = 20$; $\beta = 1,0467428$; $\alpha = 910,78974$; $R = -0,96544374$; c) zu den Kurven (Abb. 15 a und b) gehörende bodenphysikalische Daten

Z u s a m m e n f a s s u n g

Es werden erste Ergebnisse mikroseismischer Bodenuntersuchungen vorgestellt. Das seismische Zeichen ist zur Bestimmung charakteristischer Bodenmerkmale geeignet. Die vorgestellte Methode ist auf vielen Gebieten anwendbar. So kann z. B. die Heterogenität von Anbauflächen, die Korngrößenzusammensetzung des Bodens, der Grundwasserstand, die Qualität der Bodenbearbeitung, die Tropfenenergie von Bewässerungseinrichtungen, die Bodendichte und die Bodenfeuchte nach entsprechender Eichung bestimmt werden. Auch ein Einsatz für archäologische Untersuchungen und im Bauwesen ist denkbar.

S c h r i f t t u m

- Adam, O.: Szeizmikus kutatás I. Budapest: Tankönyvkiadó 1972.
- Broms, B. B.: Soil Sampling in Europe: State of the Art. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. J. Geotechnical Eng. Dev. (1961) 65–98.
- Dörter, K.: Die Hygroskopizität als Hilfsmittel zur Bodenbeurteilung. Z. Landeskultur 2 (1961) 91–108.
- Eggelsmann, R.: Dränanleitung. Hamburg: Verlag Wasser und Boden 1973.
- Meskó, A.: Szeizmika I. Kézirat. Budapest: Tankönyvkiadó 1977, 89–92.
- Nimbus Instruments. A Division of Geometrics, Signal Enhancement Exploration Seismograph (Prospekt) 1980.
- Reynolds, S. G.: The gravimetric method of soil moisture determination. Part I. A Study of equipment, and methodological problems 11 (1970) 258–273.
- Szóka, Gy.: Die Bodenuntersuchungen mit mikroseismischer Methode. Georgikon-Tagung 1984, Keszthely.
- Várallyay, Gy.: A talajfizika helyzete és jövőbeni feladatai. Agrokémiai es Talajtan 27 (1978).

Dr. Gyula Szóka
Agrarwiss. Universität Keszthely
Institut für Kulturtechnik
H - 8360 K e s z t h e l y
Vak Bottyan u. 3

Doz. Dr. sc. Georg Müller
Wissenschaftsbereich Standortkunde
Sektion Pflanzenproduktion
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
DDR - 4020 H a l l e (Saale)
Gr. Steinstraße 81