

Anwendungsmöglichkeiten der Universal-Meßsonde zur Lösung einiger hydrogeologischer Probleme

Von M. BOROWCZYK und Cz. KROLIKOWSKI (Warschau)

Mit 6 Textabbildungen

1. Einleitung

Von großer Bedeutung für hydrogeologische und ingenieurgeologische Forschungen ist die Kenntnis der geologischen Verhältnisse sowie die Bestimmung der Wasserbewegung und der Filtrationsparameter der wasserführenden Schichten. Der Bedarf an immer genaueren Meßmethoden ergibt sich aus den bisherigen Untersuchungsergebnissen, die meistens auf Aufschlußbohrungen und Laborversuchen basierten und sehr teuer waren. Die Notwendigkeit einer rationellen Nutzung der natürlichen Wasservorräte hat zur Entwicklung von weniger kostspieligen geophysikalischen Methoden geführt. Es handelt sich dabei vor allem um elektrische und radiometrische Methoden. Abgesehen von der allgemeinen Erforschung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse, erlauben diese Methoden die Filtrationsparameter des Grundwassers zu bestimmen. Für die Festlegung der Fließrichtung wird ein Verfahren angewendet, durch das die Veränderung des elektrischen Feldes auf der Oberfläche nach erfolgter Ansalzung des Wassers in bestimmter Tiefe der Bohrung festgestellt werden kann [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Diese Methode wurde bis 30 m Tiefe ausprobiert. Sehr erfolgreich zeigte sich ein radiometrisches Verfahren für die Fließrichtungsbestimmung [6, 7], wobei bei diesem Verfahren keine Tiefenbegrenzung besteht.

Bei den hydrogeologischen Forschungen steigt ständig die Nachfrage nach Methoden, die die Filtergeschwindigkeit des Grundwassers bestimmen lassen. Erst die Kenntnis der Filtergeschwindigkeit, des Durchlässigkeitsbeiwertes (K-Wertes) und der Mächtigkeit der wasserführenden Schichten erlaubt die Berechnung der für die Versorgungswasserwirtschaft aus dem Grundwasserkörper erschotbaren Wassermengen. Für die Bestimmung der Filtergeschwindigkeit werden jetzt radiometrische und elektrische Methoden angewendet [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Ein neues Gerät, das die hydrogeologische und ingenieurgeologische Erkundung bis zu einer Tiefe von 15 m erlaubt, wurde durch die Autoren entwickelt [16]. Es handelt sich um eine Universal-Meßsonde, in der gleichzeitig verschiedene geophysikalische Verfahren zur Bestimmung der Eigenschaften des Bodens „in situ“ angewandt werden. Die besondere Konstruktion der Sonde ermöglicht es, ohne Herstellung einer Aufschlußbohrung, folgende Eigenschaften des Bodens zu ermitteln: 1. den Widerstand gegen das Einrammen der Sonde in den Boden; 2. den spezifischen elektrischen Widerstand des Bodens; 3. das Raumgewicht des Bodens; 4. die Feuchtigkeit des Bodens. Die Kenntnis dieser Parameter erlaubt vorwiegend die durchlässigen Schichten des Bodens von den nicht-durchlässigen zu unterscheiden. Die Auswertung der Korrelation zwischen dem spezifischen elektrischen Widerstand und der Durchlässigkeit des Bodens gibt noch die Möglichkeit zur Bestimmung des K-Wertes des Bodens direkt im Felde [17]. Die Kenntnis des Raumgewichts und der Feuchtigkeit des Bodens, gemessen ebenfalls „in situ“, ermöglicht außerdem das Porenvolumen zu bestimmen.

2. Sondenaufbau

Eine schematische Darstellung der Universal-Meßsonde zeigt Abb. 1. Der Stahlkegel (4), der gleichzeitig auch als Elektrode dient, ist elektrisch isoliert (3) an den Präzisionsrohren (ϕ 35/5mm) (2) befestigt. Zu dem Stahlkegel (4) wird ein einadriges Kabel (5) im Inneren der Schlagrohre zugeführt. Die Sonde wird mit Hilfe eines Vibrationshammers ZREMB-BC9 (Polimex, Warschau, Polen), durch den das einzurammende Rohr durchgeführt ist, in den Boden eingetrieben (Abb. 2, 3). Der Vibrationshammer ist so konstruiert, daß man ihn sehr schnell zum „Eintreiben“ oder aber zum „Hochziehen“ der Schlagrohre verwenden kann. Das Manipulieren des Gerätes beim „Eintreiben“ und „Hochziehen“ erleichtert ein Dreibein (Abb. 3).

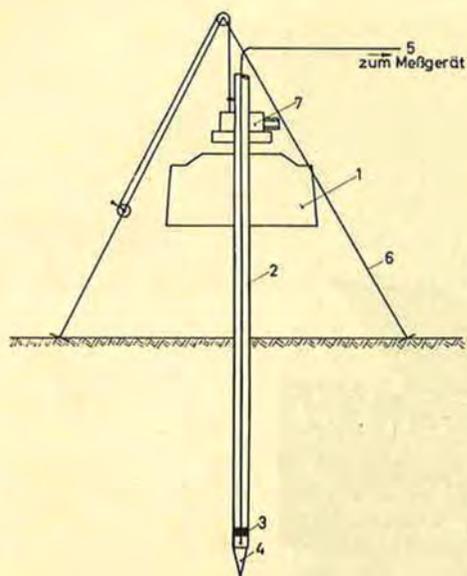


Abb. 1: Schematische Darstellung der Universalsonde.
 1 = Vibrationshammer ZREMB-BC9,
 2 = Stahlrohr, ϕ 35/5 mm,
 3 = Isolierung,
 4 = Stahlkegel,
 5 = Kabel,
 6 = Dreibein,
 7 = Klemmvorrichtung.

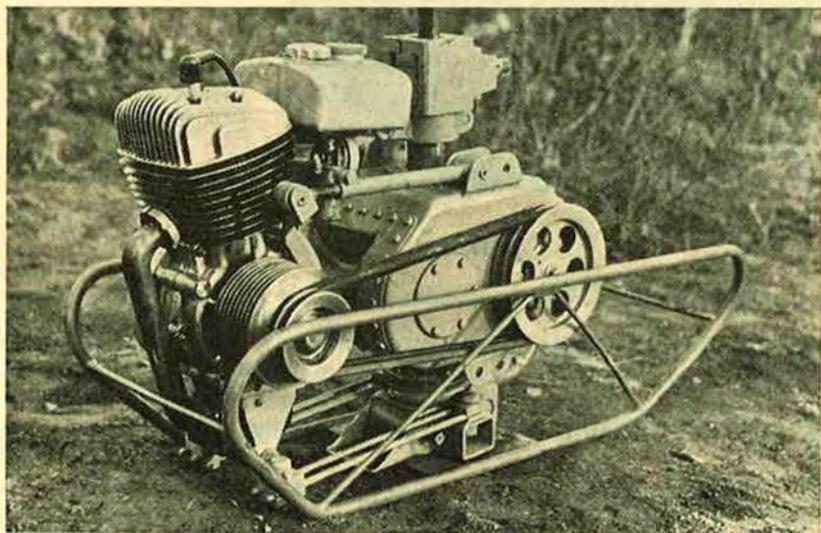


Abb. 2: Der Vibrationshammer ZREMB-BC 9.

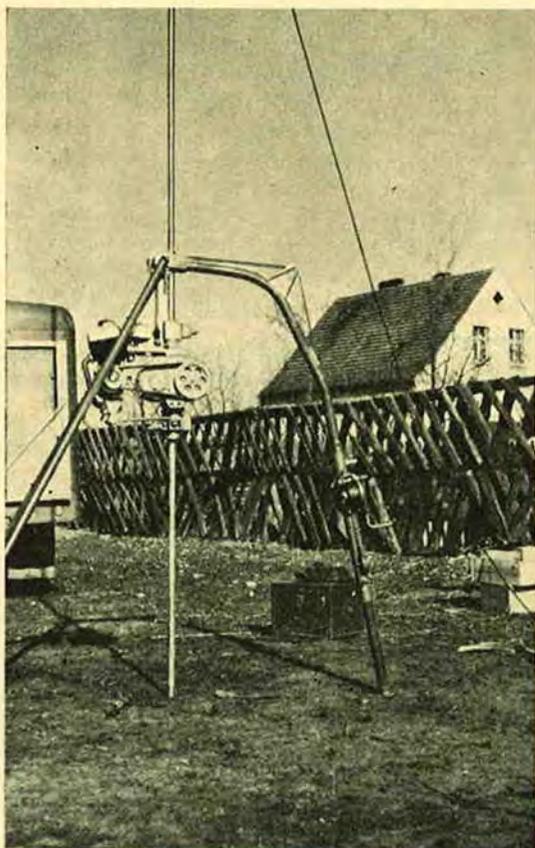


Abb.: 3: Die Sonde wird mit Hilfe des Vibrationshammers in den Boden gerammt.

3. 0. Meßprinzipien

3. 1. Bestimmung des Widerstandes gegen das Einrammen der Sonde

Beim Eintreiben der Sonde wird qualitativ der Widerstand des Bodens gegen das Eindringen der Sonde bestimmt. Man mißt die Eindringzeit pro 10 cm oder 20 cm Einrammung. In nichtbindigen Böden ist die Eindringzeit proportional der Dichte.

3. 2. Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstandes

Der spezifische elektrische Widerstand des Bodens wird ebenfalls beim Eintreiben pro 10 cm oder 20 cm (dies hängt von der

Inhomogenität des Bodens ab) bestimmt. Er wird in der Dreielek-troden-Anordnung und unter Zuführung von Gleichstrom gemessen. Das elektrische Schalt-schema zeigt Abb. 4. Als eine Stromelektrode (A) dient der Stahlkegel der Universal-Meßsonde, die zweite

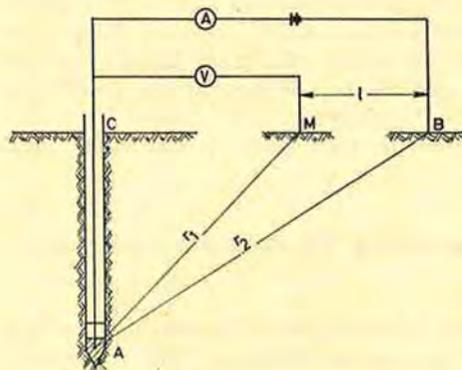


Abb. 4: Elektrisches Schema der Universalsonde. r_1 , r_2 , l = gegenseitige Entfernung der Elektroden A, M, B.

Stromelektrode (B), in der Form eines Stabes, wird in einer Entfernung von ca. 20 m von der Universal-Meßsonde an der Oberfläche ca. 50 cm tief in den Boden eingetrieben. Die Meßelektrode (M), ebenfalls in Form eines Stabes, befindet sich ungefähr in der Mitte der Entfernung C—B. In den Stromkreis der Sonde und der Stromelektrode B ist eine Batterie (Akkumulator) und ein Amperemeter geschaltet. Im Meßkreis befindet sich ein Voltmeter (mit hohem Innenwiderstand). Unter der Annahme, daß der Durchmesser der Elektrode A (Abb. 4) kleiner ist als seine Höhe, wird der spezifische elektrische Widerstand nach der Formel [16]

$$\rho = 2,73 \frac{h}{\log \frac{2h}{d}} \cdot \frac{U}{i}$$

berechnet, wobei

- h-Höhe der Elektrode A
- d-Durchmesser der Elektrode A
- U-gemessene Spannung im Meßkreis (in V)
- i-gemessener Strom im Stromkreis (in A)

bedeuten.

Der mit dieser Methode bestimmte spezifische elektrische Widerstand charakterisiert den Boden direkt an der Elektrode A der Universal-Meßsonde. Der spezifische elektrische Widerstand ρ ist hier proportional zu $\frac{U}{I}$, der Erdung der Elektrode A. Für eine Elektrode in der Form einer Kugel vom Radius R mißt man im homogenen Boden 90% des Erdungswiderstandes in einer Kugel von 10 R, dagegen 50% des Erdungswiderstandes in einer Kugel von 2 R. Daraus ist ersichtlich, daß die Sonde eine große Selektivität zur Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstandes des Bodens aufweist. Es besteht daher die Möglichkeit, sehr dünne Schichten, gekennzeichnet durch verschiedene spezifische Widerstände, festzulegen.

3. 3. Bestimmung des Raumgewichtes des Bodens mittels radioaktiver Verfahren

Die Methode basiert auf der Messung der Intensität der gestreuten Gamma-Quanten im zu messenden Medium. Die registrierte Impulszahl pro Zeiteinheit, welche proportional der Intensität der im gemessenen Medium gestreuten Gamma-Quanten ist, stellt eine Funktion des Raumgewichtes des Mediums. Die Auswertung erfolgt auf Grund einer Eichkurve, die für die Raumgewichts-Sonde im Modell oder direkt am Felde aufgenommen wird.

Zur Messung des Raumgewichtes in der Universal-Meßsonde dient eine Sonde von 20 mm Außendurchmesser. Als Gamma-Quelle werden 7 mc Cesium (Cs^{137}) verwendet. Zum Registrieren der Impulse dient ein tragbares Zählgerät.

3. 4. Bestimmung der Feuchtigkeit des Bodens mittels radioaktiver Verfahren

Diese Methode basiert auf der Messung der Intensität der langsamen und gestreuten Neutronen. Die Impulsrate pro Zeiteinheit ist eine Funktion des Wasserstoffgehalts pro Volumeneinheit des gemessenen Mediums. Die Auswertung erfolgt auf Grund einer Eichkurve, die für die Feuchte-Sonde in Modellen von verschiedenem Feuchtegehalt hergestellt wird.

Zur Feuchtemessung in der Universal-Meßsonde wird eine Sonde von 22 mm Außendurchmesser verwendet. Als Neutronenquelle dient ein 0,5 mc starkes Plutonium-Beryllium-Präparat. Das Registrieren der Impulse besorgt das in 3. 3. erwähnte Zählgerät.

4. Felduntersuchungen und die Auswertung der Resultate

Bei Erkundung der Eigenschaften des Bodens wird die Universal-Meßsonde in ausgewählten Punkten des zu untersuchenden Feldes eingerammt. Während des Einrammens wird die Eindringzeit pro 10 cm oder 20 cm Einrammung gemessen. Ebenfalls wird der spezifische elektrische Widerstand des Bodens beim Eintreiben pro 10 cm oder 20 cm bestimmt. Nach dem Eintreiben der Universal-Meßsonde bis zur geplanten Tiefe (10 bis 15 cm) wird in das Innere des Präzisionsrohres (Abb. 1) die Isotopsonde für die Raumgewichtsbestimmung eingebracht und das Raumgewicht entweder je 10 cm oder 20 cm gemessen. Analog wird die Feuchtigkeit des Bodens bestimmt, indem man die Raumgewichtssonde durch die Feuchte-Isotopsonde ersetzt.

In einem Zeitraum von ca. 8 Stunden können, abhängig vom geologischen Profil, zwei bis drei Sondierungen von je 15 m Tiefe durchgeführt werden. Der Meßtrupp besteht am günstigsten aus drei Personen.

Als Ergebnis der ausgeführten Untersuchungen erhält man ein klares Bild der Änderungen der Eindringgeschwindigkeit der Sonde, des spezifischen elektrischen Widerstandes, des Raumgewichtes und des Wassergehaltes des Bodens längs der untersuchten Tiefe. Ein Beispiel der Meßwerte zeigt die Abb. 5. Man kann eine gute Übereinstimmung der Resultate erkennen.

Die Kenntnis des spezifischen elektrischen Widerstandes erlaubt meistens, die nichtdurchlässigen Schichten von den wasserführenden Schichten zu unterscheiden, wenn das Wasser nicht einen zu großen Salzgehalt aufweist. In diesem Falle charakterisiert die nichtdurchlässigen Schichten ein spezifischer elektrischer Widerstand kleiner als 30 bis 40 Ohm · m, dagegen zeigen sandige, wasserführende Schichten einen spezifischen elektrischen Widerstand größer als 50 Ohm · m. Eindeutig kann man auch die nicht wassergesättigten Lockerböden unterscheiden, bei denen der spezifische elektrische Widerstand immer größer als 100 Ohm · m ist. Sehr nützlich bei der Interpretation des geologischen Profils mittels der Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes ist die Kenntnis der Größenordnung des Raumgewichtes und des Wassergehaltes der Böden, bekannt aus der Bodenmechanik. Bei gleichen Werten des spezifischen elektrischen Widerstandes erlauben sehr oft diese Daten und dazu noch das Eindringgeschwindigkeitsprofil eindeutig die Bodenart zu klassifizieren. Bei einem komplizierten geologischen Profil ist trotzdem eine Aufschlußbohrung nötig. Die Sondierungen mit

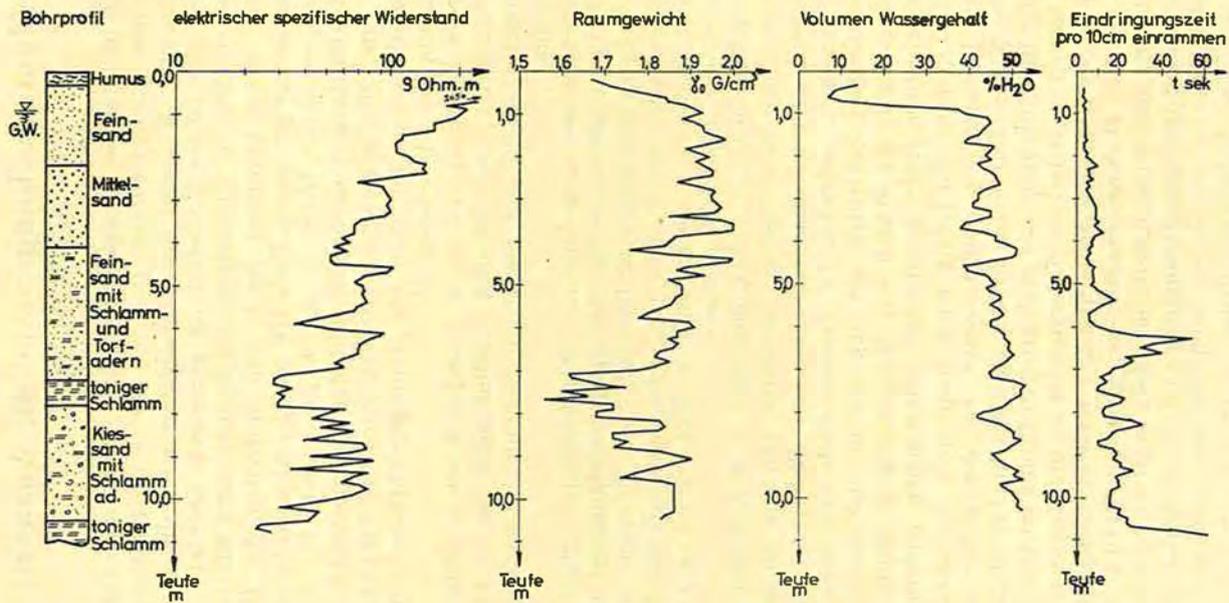


Abb. 5: Resultate der Messung mit der Universalsonde.

der Universal-Meßsonde ermöglichen dann, das durch die Aufschlußbohrung gewonnene Bild der geologischen Verhältnisse zu vervollständigen.

In der Abb. 5 sieht man, daß die wasserführenden Schichten in dem spezifischen elektrischen Widerstandsprofil (Widerstand 80 bis 500 Ohm · m) eindeutig zu unterscheiden sind, wobei der größere Widerstand immer auf ein gröberes Material hinweist. Auch die nichtdurchlässige Tonschichte mit einem spezifischen elektrischen Widerstand von ca. 20 Ohm · m ist aus diesem Profil sehr gut zu erkennen. Ähnliche Verhältnisse sieht man im Raumgewichts- und Feuchteprofil. Die Kenntnis des Raumgewichtes und des Feuchtegehaltes ermöglicht es, das Porenvolumen längs der untersuchten Tiefe nach den Formeln der Bodenmechanik zu berechnen. Die in Abb. 5 aufgezeichneten Werte geben zweifellos ein Beispiel sehr idealer, jedoch real gemessener Verhältnisse, wobei das geologische Profil sehr gut mit den gemessenen anderen Parametern übereinstimmt. Ein Beispiel einer komplizierteren geologischen Struktur gibt Abb. 6. Das beim Bohren (Trockenbohrung) erhaltene geologische Profil scheint sehr vereinfacht im Gegensatz zu den wirklichen Verhältnissen, die aus den Meßwerten der Sondierung zu sehen sind. Die große Fluktuation der Daten aller gemessenen Eigenschaften weist auf häufige geringe Beimengung hin, die beim Bohren selbst nicht festzustellen waren. Die tonige Schlammschichte von ca. 0,70 m, in der Tiefe 7,2 bis 7,9 m, ist eindeutig zu erkennen. Im Eindringgeschwindigkeitsprofil ist eine Verzögerung des Einrammens schon vor dieser Schichte eingetreten, was auf eine Dämpfungseigenschaft dieser Schlammschichte schließen läßt.

Wie die in Abb. 6 dargestellten Meßwerte zeigen, weist die Universal-Meßsonde eine große Nachweisempfindlichkeit zur Bestimmung der Eigenschaften des Bodens auf. Es besteht die Möglichkeit, Einlagerungen von ca. 5 cm Schichtstärke zu unterscheiden.

Die in Abb. 5 und 6 angeführten Beispiele zeigen nur im geringen Maß die tatsächliche Verwendbarkeit der Universal-Meßsonde. Es soll hier nochmals betont werden, daß mittels dieser Meßsonde an ein und demselben Meßpunkt die Bodeneigenschaften an Hand verschiedener Methoden bestimmt werden können. Die Zusammenstellung dieser Meßergebnisse erleichtert die Auswertung und gibt einen besseren und genaueren Einblick in die Bodenverhältnisse als dies bei Einzelmessungen möglich wäre, die niemals am gleichen Punkte vorgenommen werden können. Außerdem soll noch unterstrichen werden, daß die Universal-Meßsonde die Bodeneigenschaften „in situ“ bestimmt. Dies hat besonders große Bedeutung bei

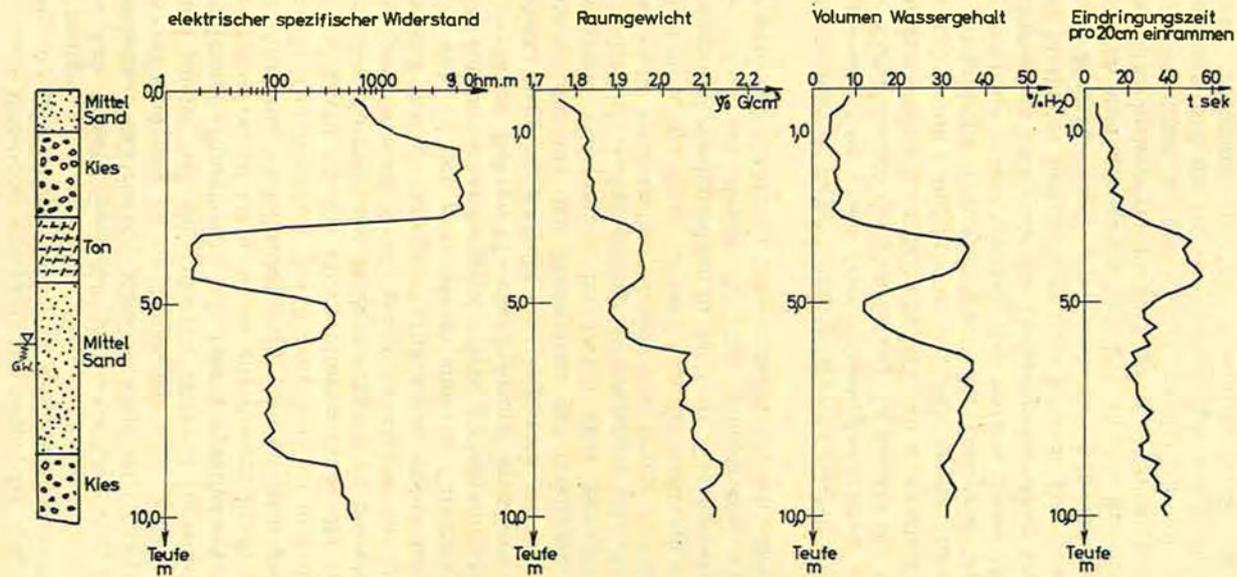


Abb. 6: Resultate der Messung mit der Universalsonde.

der Erkundung von nichtbindigen Lockerböden unter Wasser, da hier die Entnahme ungestörter Proben und die Bestimmung des Porenvolumens im allgemeinen nicht möglich ist.

5. Anwendungsmöglichkeiten der Universal-Meßsonde

Die Anwendung der Universal-Meßsonde zur Lösung hydrogeologischer Probleme kann die Anzahl der erforderlichen Aufschlußbohrungen wie auch der Laboruntersuchungen wesentlich einschränken, wobei die Zahl der Informationen über die Bodenverhältnisse durch die Vermehrung der Sondierungen noch vergrößert werden kann.

Mit Rücksicht auf die schnelle Durchführbarkeit der Sondierungen (2 bis 3 Sondierungen bis zu je 15 m pro Tag) besteht die Möglichkeit, den Erkundungszeitraum für das untersuchende Gelände zu verkürzen.

Die Ergebnisse der Sondierungen erlauben es, durch Auswertung der vorhererwähnten physikalischen Bodenparameter ein räumliches Profil des Baugrundes aufzustellen. Auch zeitliche Veränderungen dieser Eigenschaften infolge äußerer Eingriffe (Bauwerke, Fabriken, Staudämme usw.) können mit dieser Sonde erfaßt werden.

Den Erkundungsbereich der Universal-Meßsonde kann man sehr einfach erweitern, indem man den Vibrationshammer zum Eintreiben von fertigen Filterpegeln benützt. In letzteren kann dann auch die Filtergeschwindigkeit und die Fließrichtung des Grundwassers mittels elektrischer und radiometrischer Verfahren bestimmt werden.

Literatur

- [1] MATVIEJEV, B. K.: Bestimmung der Fließgeschwindigkeit und der Fließrichtung des Grundwassers in einem einzigen Bohrloch. Razviedka und Ochrona Niedr. 12, Moskau 1958 (in russischer Sprache).
- [2] MATVIEJEV, B. K.: Geophysikalische Methoden zur Erkundung der Grundwasserbewegung. Moskau 1963 (in russischer Sprache).
- [3] OGILVI, N. A.: Geophysikalische Methoden der Erkundung. Moskau 1962 (in russischer Sprache).
- [4] OGILVI, N. A.: Geophysikalische Methoden der Erkundung im Karst. Moskau 1957 (in russischer Sprache).
- [5] PACZYNSKI, B.: Über einige geophysikalische Methoden in der Hydrogeologie. Geologische Übersicht, 4, Warschau 1958 (in polnischer Sprache).

- [6] BOROWCZYK, M. & Cz. KROLIKOWSKI: Bestimmung der Fließrichtung in einem einzigen Bohrloch mittels elektrischer und radiometrischer Verfahren. Geologische Übersicht, 2, Warschau 1964 (in polnischer Sprache).
- [7] MAIRHOFER, H.: Bestimmung der Strömungsrichtung des Grundwassers in einem einzigen Bohrloch mit Hilfe radioaktiver Isotopen. Atompraxis, 9, Karlsruhe 1963.
- [8] MOSER, H., F. NEUMAIER & W. RAUERT: Die Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie. Atomkernenergie, 2, 26, München 1957.
- [9] BOROWCZYK, M., J. MAIRHOFER & A. ZUBER: Laboratory investigation on the determination of filtration velocity by means of radioisotopes. Atomkernenergie 1965/1, 2, München 1965.
- [10] HALEVY, E., & A. NIR: Use of radio-isotopes in studies of ground water flow. Tahal Water Planning for Israel, Tel-Aviv 1960.
- [11] BOROWCZYK, M.: Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens mit Hilfe radioaktiver Isotope. Bulletin des Geologischen Instituts Warschau, 182, Warschau 1963 (in polnischer Sprache).
- [12] OGILVI, N. A.: Elektrische Methoden für die Bestimmung der Filtergeschwindigkeit des Grundwassers. Wissenschaftl. und technisches Informationsbulletin, 4, Moskau 1958 (in russischer Sprache).
- [13] MATVIEJEV, B. K.: Über die Methode der Bestimmung der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers in einem einzigen Bohrloch. Izv. A. N. UdSSR, 9, Moskau 1958 (in russischer Sprache).
- [14] KROLIKOWSKI, Cz.: Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens mit Hilfe elektrischer Methoden. Bulletin des Geologischen Instituts Warschau, 182, Warschau 1963 (in polnischer Sprache).
- [15] KROLIKOWSKI, Cz.: The influence of measuring probes on the examination of the filtration rate of underground waters in bore holes and piezometers. Atomkernenergie 1965/1, 2, München 1965.
- [16] BOROWCZYK, M. & Cz. KROLIKOWSKI: Universal probe for determination of physical properties of soils. Proc. of Semin. of Soil Mechanics and Found Engineer. Lodz 1964.
- [17] FRITSCH, V.: Zur geoelektrischen Bestimmung des K-Wertes. Vortrag auf der XI. Jahres-Tagung der Società Italiana di Geofisica e Meteorologia, Genf 1963.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. M. BOROWCZYK und Dipl.-Ing. Cz. KROLIKOWSKI, Geologisches Institut Warschau, Ul. Rakowiecka 4, Polen (derzeit Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, Grundlageninstitut, Wien III, Arsenal, Obj. 222).