

## Die Bestimmung der Fließrichtung in einem einzigen Bohrloch mittels radioaktiver Isotope

Von J. MAIRHOFER (Wien)

Da bereits eine ausführliche Darstellung der Methoden zur Bestimmung der Fließrichtung und -geschwindigkeit des Grundwassers durch radioaktive Isotope gegeben wurde (1), können sich diese Ausführungen auf einige Ergänzungen beschränken.

Abb. 1 zeigt eine schematische Darstellung der von der Radiologengruppe der Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal in Wien verwendeten Meßsonde. Der Unterschied zu anderen ähnlichen Geräten liegt im wesentlichen darin, daß wir nicht eine Mischung des Isotops mit dem Grundwasser am Meßpunkt vornehmen, sondern das Gemisch mit unserem Meßgerät zunächst an den Meßpunkt bringen. Dies hat den Vorteil, daß auch Grundwasserströmungen von größeren Geschwindigkeiten gemessen werden können. Im allgemeinen erhalten wir bei solchen Messungen eine Kurvenform wie sie Abb. 2 zeigt.

Der erste Abfall rührt vom Öffnen der Sonde und dem Ausgleich des Meßvolumens mit dem Volumen im Bohrloch her. Der zweite Teil in der schematischen Darstellung stammt von der Zerstörung des hydrodynamischen Feldes, welches sich auf Grund der eingeführten Probe neu aufbauen muß. Erst der dritte Teil der Kurve gibt die tatsächliche Dekonzentration, wie sie von der Strömung am Meßpunkt verursacht wird, wieder. Der vierte Kurventeil rührt von einer teilweisen Absorption des Tracers an der Bohrlochwandung und im Bodenmaterial her und muß bei der Berechnung der tatsächlichen Filtergeschwindigkeit berücksichtigt werden.

Es sei noch der Hinweis auf andere Techniken zur Bestimmung der Filtergeschwindigkeit erlaubt. So hat W. J. KAUFMANN (2) in den USA eine Technik entwickelt, in der die Meßstrecke im Bohrloch abgeschlossen ist und das darin befindliche Wasservolumen mit dem Tracer versetzt und kontinuierlich umgepumpt wird. Die Konzentrationsmessung erfolgt daher über Tage.

Wir haben bei einem Geländeversuch in ein und derselben Meßstrecke folgende Vergleichsziffern erhalten: Wenn wir den  $k$ -Wert beim

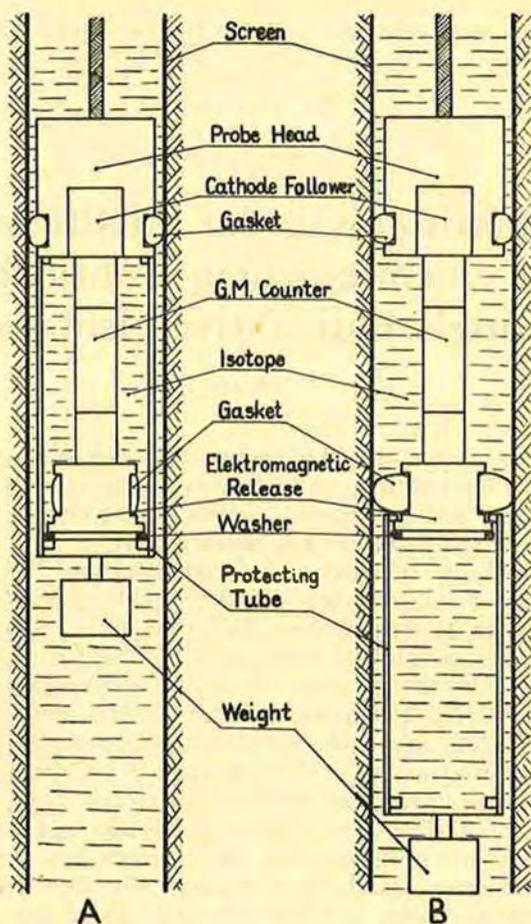


Abb. 1: Schematische Darstellung des Filtergeschwindigkeitsmeßgerätes:

A = in geschlossenem Zustand

B = in geöffnetem Zustand

(Screen = Filterrohr, Probe Head = Sondenkopf, Cathode Follower = Kathodenfolger, Gasket = aufblasbare Abdichtung, G. M. Counter = Geiger-Müller Rohr, Isotope = Isotopenlösung, Electromagnetic release = Relais, Washer = Reinigungsring, Protecting Tube = Verschlüßhülse, Weight = Gewicht.)

Pumpversuch mit 1 annehmen, betrug er beim Versuch mit der KAUFMANN-Methode je nach Umwälzgeschwindigkeit 3 bis 5. Mit unserer Sonde erhielten wir Werte zwischen 4 und 6, wobei aber zu erwähnen ist, daß bei der Messung mit unserer Sonde die Meßstrecke nach unten nicht abgeschlossen war. Der Pumpversuch hat zufolge mangelhafter

Anordnung zweifelsohne nicht den richtigen Wert ergeben. Die Resultate nach der KAUFMANN-Technik stimmen aber recht gut mit jenen, die mit unserem Gerät erhalten wurden, überein.

Eine weitere Methode ist die sogenannte Einloch-Methode, wie sie von S. MANDEL in Israel entwickelt wurde (3). Hier wird eine bestimmte Menge Wasser, welches mit einem Tracer vermischt wurde, in die Bohrung eingepumpt. Nach einer entsprechenden Wartezeit wird Wasser aus der Bohrung abgepumpt und die abgepumpte Menge sowie die wiedererhaltene Aktivität gemessen. Aus der Differenz der eingebrachten und wiederentdeckten Aktivität kann unter bestimmten Voraussetzungen ebenfalls die Filtergeschwindigkeit ermittelt werden. Diese Methode ist aber in ihrer Interpretation nicht einfach und benötigt auch einen größeren Geräteaufwand, liefert aber häufig zusätzliche Informationen, die mit der Verdünnungsmethode nicht erhalten werden können.

Es sei noch erwähnt, daß sich diese Einlochmethode auf eine Zweilochmethode erweitern läßt, womit auch die Abstandsgeschwindigkeit und die Permeabilität des Wasserträgers ermittelt werden kann.

Meines Erachtens hat die Verdünnungsmethode den Vorteil, daß sie rasch und mit geringem Aufwand brauchbare Ergebnisse liefert. Sie ist also besonders für Explorationen gut geeignet.

Eine wesentliche Einschränkung für die Anwendbarkeit der Verdünnungsmethode ist durch das Auftreten starker Vertikalströmungen in den Bohrungen gegeben. Gleichgültig, ob die Bohrung mit einem Filterkiesmantel bei der Errichtung versehen wurde oder nicht, konnten wir bei etwa 90% aller von uns untersuchten Bohrungen eine Vertikalströmung nachweisen. Die Anordnung zur Messung dieser Vertikalströmungen hat H. MOSER in seinem Referat bereits gegeben.

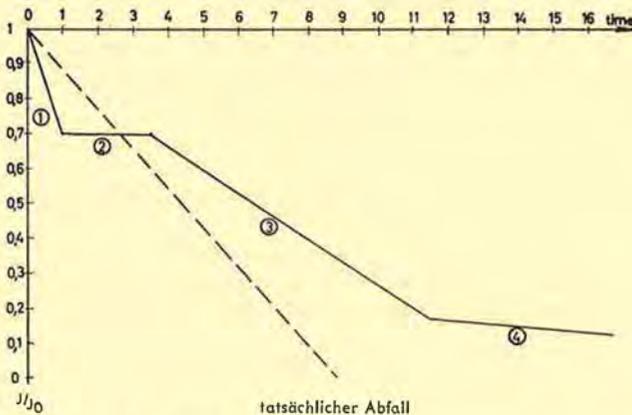


Abb. 2: Schematische Darstellung einer Dekonzentrationskurve.

Wir haben auf Grund von Laborversuchen das in Abb. 3 gezeigte Ergebnis erhalten. Daraus ist zu ersehen, daß das Verhältnis der Vertikalgeschwindigkeit zur Filtergeschwindigkeit nicht größer als 5 sein darf, wenn noch genaue Aussagen über die Filtergeschwindigkeit gemacht werden sollen. Dies stellt zweifelsohne eine Einschränkung in der Anwendbarkeit dieser Methode dar, zumal wir Vertikalströmungen bis zu Hunderten von Metern pro Stunde messen konnten.

Zur Zeit sind Versuche an einer Tiefbohrung im Gange, deren Filterstrecken im Ringraum durch Lehmschlag voneinander getrennt sind. Dadurch ist es gelungen, die Vertikalströmung auf etwa ein Zehntel der ursprünglich vorhandenen Größe zu senken. Dieser Weg dürfte für die praktische Anwendung der Verdünnungsmethode von großer Bedeutung sein.

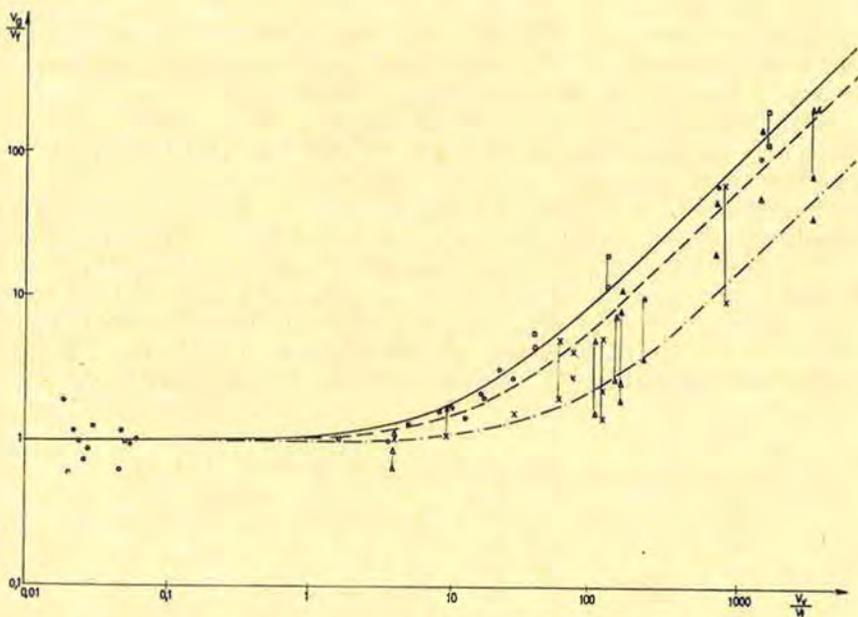


Abb. 3: Einfluß der Vertikalströmung auf die Filtergeschwindigkeit.

- |       |  |                   |
|-------|--|-------------------|
| —     | Theoretische Kurve der verwendeten Probe                 |                   |
| - -   | Theoretische Kurve der Probe für ungestörte Verhältnisse |                   |
| - · - | Experimentelle Werte des Modells ohne Gradient           |                   |
| ○     | Werte mit Gradient                                       | } grobes Material |
| △     | Werte ohne Gradient                                      |                   |
| □     | Werte mit Gradient                                       | } feines Material |
| ×     | Werte ohne Gradient                                      |                   |

Die Bestimmung der Fließrichtung in einem einzigen Bohrloch ist von mir bereits früher veröffentlicht worden (4) und bedarf daher keiner weiteren Darstellung. Als vorteilhaft hat sich in der Zwischenzeit erwiesen, die Impfung möglichst punktförmig durchzuführen. Aus diesem Grund haben wir ein Impfgerät entwickelt, das bei der Demonstration am 29. März 1966 vorgeführt wurde. Nach längeren Versuchen haben wir uns für Gold-198 als Tracer für Richtungsmessungen entschieden, da wir mit diesem Isotop die relativ beste Adsorption erhielten, wie dies auch durch Laborversuche der Münchner Arbeitsgruppe bewiesen wurde.

Im nachfolgenden werden noch einige Beispiele praktischer Erfahrungen aufgezeigt.

Beim Horizontalfilterbrunnen Moosbrunn I (Wiener Becken) wurden in zwei symmetrischen Halbkreisen Beobachtungspegel in 45 bzw. 60 m Entfernung von der Brunnenachse niedergebracht. In diesen Pegeln wurden Filtergeschwindigkeitsmessungen über die ganze Bohrlochtiefe gemacht, und zwar bei verschiedenen Pumpleistungen zwischen 0 und 320 l/s. Die Mittelwerte sämtlicher Pegel zeigt Abb. 4, wobei als Parameter die Pumpleistung aufgetragen ist. Daraus ist ersichtlich, daß in der Hauptsache die Schichten, in denen sich die Horizontalfilterrohre befinden (19 m Tiefe) zur Förderung herangezogen werden und lediglich bei höherer Pumpleistung auch obere Schichten

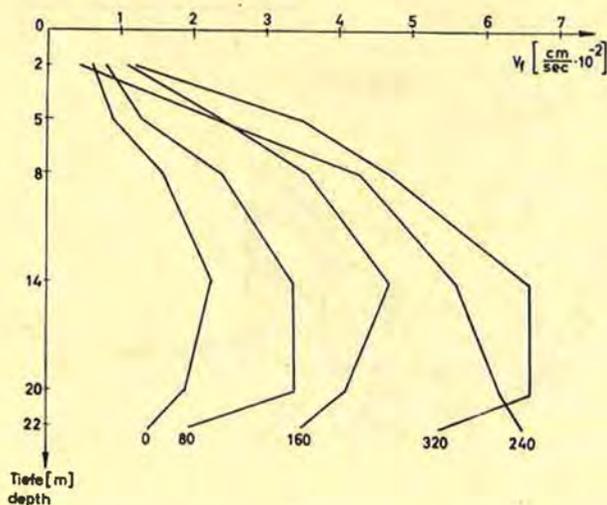


Abb. 4: Filtergeschwindigkeits-Mittelwerte aller Pegel über die gemessene Tiefe bei verschiedenen Pumpleistungen. Parameter = Pumpenleistung in l/s.

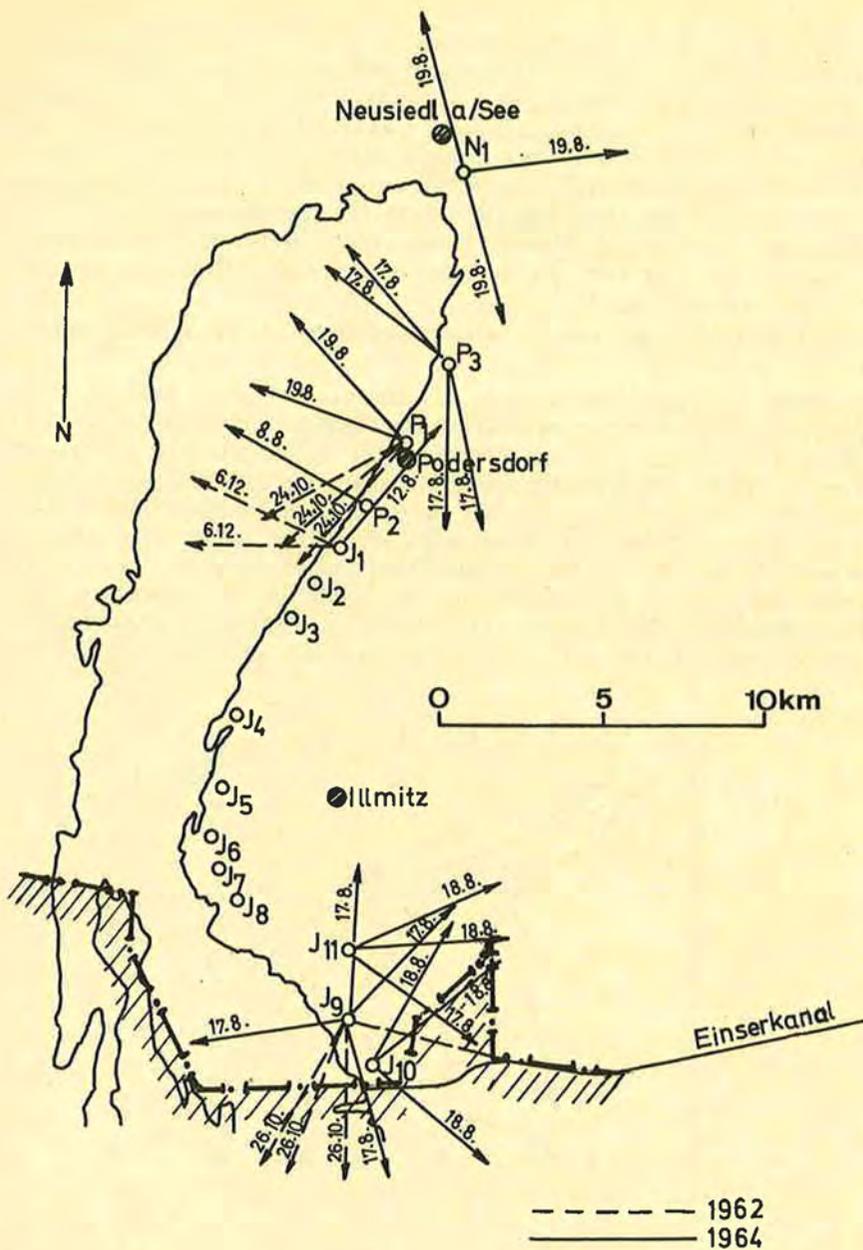


Abb. 5: Richtungen der Grundwasserströmungen am Ostufer des Neusiedler Sees.

beansprucht werden. Eine ausführliche Darstellung dieses umfangreichen Versuches ist im Druck (5). Obgleich in diesem Grundwasserleiter starke Vertikalströmungen herrschen, zeigt dieses Ergebnis, daß Relativmessungen mit der Verdünnungsmethode durchaus, auch unter diesen Umständen, möglich sind.

Über einen weiteren, umfangreichen Versuch gibt Abb. 5 Aufschluß. Es handelt sich hier um die Bestimmung der Grundwasserzuzüsse zum Neusiedler See, die für die Aufstellung einer Wasserbilanz von Bedeutung sind. Die Meßergebnisse lieferten einen unterirdischen Zufluß von etwa 36 Mio cbm/Jahr. Aus der Wasserbilanz, wie sie F. KOPF (7) erstellte, beträgt aber der unterirdische Zufluß lediglich 6 bis 8 Mio cbm/Jahr. Die Frage ist also zweifelsohne noch ungeklärt, und es ist anzunehmen, daß die mit der radioaktiven Methode erhaltenen Werte zu hoch liegen. Man kann aus diesem Beispiel ersehen, daß es schwierig ist, die punktförmigen Meßergebnisse der Verdünnungsmethode auf einen großen Raum zu übertragen, zumal auch die geologischen Verhältnisse, auf denen die Berechnungen basieren, nicht genau ermittelt sind.

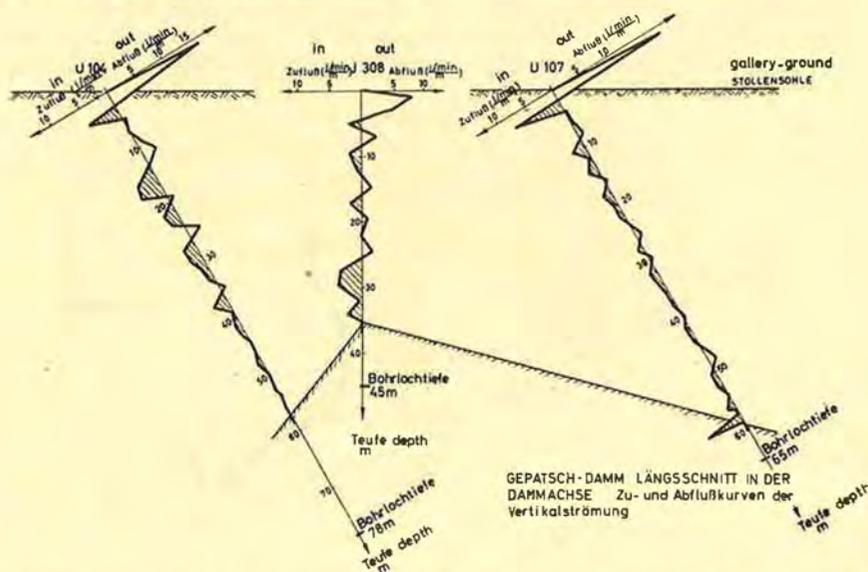


Abb. 6: Zu- und Abflußkurven an 3 Bohrungen, ermittelt aus den gemessenen Vertikalströmungen.

Auf Abb. 6 sind die Zu- und Abflußkurven an drei Bohrungen unter einem Staudamm zu sehen. Die Bohrungen wurden vom Stollen am Fuße des Dammes abgeteuft und sollten dazu dienen, festzustellen, ob die Abdichtung des Stauraumes gelungen ist. Die Talsohle wird

von einer schwer beherrschbaren Mylonithzone gebildet, und es war fraglich, ob durch die Injektionen tatsächlich eine vollständige Abdichtung erreicht worden war. Die von uns vorgenommenen Vertikalströmungsmessungen ergaben Geschwindigkeiten bis zu 800 m/h. Das Wasser steht in diesen Bohrungen unter einem Überdruck von 6 bis 8 atü. Die Strömungsrichtung verlief zum Stollen.

Da durch diese Messungen keine eindeutige Antwort erhalten werden konnte, wurde in einer Bohrung mit Tritium markiert. Die Probenahmen an 13 Stellen ergaben bei 9 Stellen einen deutlichen Anstieg des Tritiumgehaltes des Wassers. Ein gleichzeitig eingesetzter Farbstoff konnte nur an 3 Stellen nachgewiesen werden. Aus der Verfolgung der Wasserwege mit Hilfe dieser Untersuchungen konnte gezeigt werden, daß es sich nicht um Wasser aus dem Stauraum handelt, sondern daß diese Wasserströmung eine Folge der Drainagewirkung des Stollens ist.

Schließlich sei noch auf eine Untersuchung hingewiesen, die beim Bau eines Stauwehres vorgenommen wurde. Auf Abb. 7 ist die Situation zu sehen. Am linken Ufer befindet sich eine Schotterterrasse, die zum Teil stark wasserwegig ist. An diesem linksseitigen Ufer wurden Kernbohrungen angelegt und in ihnen die Filtergeschwindigkeit und Richtung gemessen, um die Zonen stärkster Durchlässigkeit zu finden.

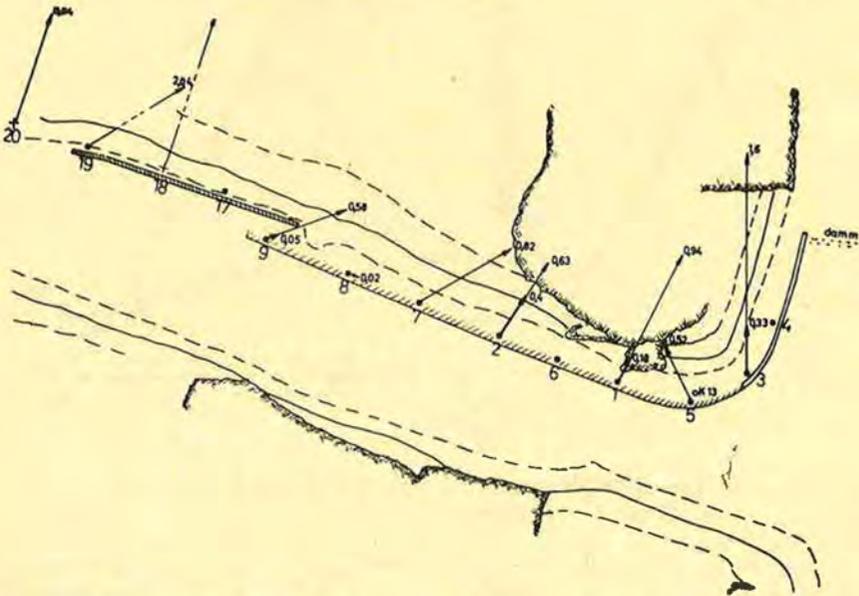


Abb. 7: Richtungen und Filtergeschwindigkeiten am Ennsufer bei Groß-Reifling.  $V_f$  in m/h.

Dies war auch zum größten Teile möglich. Daraufhin wurden an diesen Stellen Bentonit-Injektionen gemacht und hernach neuerlich im Zentrum der Injektionsstelle eine Bohrung angelegt. Die Ergebnisse der neuerlichen Filtergeschwindigkeitsmessungen in dieser Bohrung zeigten die Wirkung der Injektionen. Die Geschwindigkeit war auf etwa 80% der ursprünglichen zurückgegangen.

Die Brauchbarkeit des von uns gefertigten und patentierten Gerätes geht auch daraus hervor, daß die Internationale Atomenergie-Behörde in Wien mehrere derartige Geräte im Rahmen ihres technischen Hilfsprogrammes bestellte. Diese Geräte arbeiten in Rhodesien, Chile, Jugoslawien und Thailand nach Einschulung des Personals durch uns an Ort und Stelle zur vollsten Zufriedenheit und haben bereits wertvolle Beiträge zur Lösung von Grundwasserfragen geliefert. Selbst großräumige Untersuchungen, beispielsweise in der Pampa Tamarugal in Chile, wurden damit angestellt, wobei hydrologisch deutbare Ergebnisse erzielt wurden.

### Zusammenfassung

Zusammenfassend kann man sagen, daß die geschilderten Methoden den Vorteil aufweisen, rasche Ergebnisse bei geringem Aufwand zu liefern. Relative Werte für Vergleichsmessungen sind sicher zu erhalten, absolute Werte nur bei Vorliegen entsprechender Bedingungen. Als wesentlicher Nachteil stellt sich der starke Einfluß der Vertikalströmung dar, welche praktisch nicht vollkommen unterbunden werden kann. Eine richtige Anwendung der Methode bringt aber trotzdem für die Praxis brauchbare Ergebnisse. Für genaue Untersuchungen ist es aber zweckvoll, verschiedene Methoden zu kombinieren.

### Literatur

- (1) MOSER, H.: Über die Arbeiten der Forschungsstelle für Radiohydrometrie in München. In diesem Band.
- (2) KAUFMANN, W. J., D. K. TODD: Application of Tritium Tracer to Canal Seepage Measurements. Proceedings of the Symposium Tritium in the Physical and Biological Sciences, Vienna 1961, Vol. I, Page 83.
- (3) MANDEL, S.: Hydrological field work with radioactive tracers in Israel up to May 1960. Extract of publication No 52 of Commission of Subterranean Waters.
- (4) MAIRHOFER, J.: Bestimmung der Strömungsrichtung des Grundwassers in einem einzigen Bohrloch mit Hilfe radioaktiver Elemente. Atompraxis, 9, 1963, S. 1—3.
- (5) MAIRHOFER, J. & O. ZELLHOFER: Untersuchungen an einem Horizontalfilterbrunnen mittels radioaktiver Isotope. Die Wasserwirtschaft (im Druck).
- (6) PLATNIKOW, N. A.: Ocenka sapisow podsiemnych wod. Gosgeoltechnisdat — Moskau 1959.
- (7) KOPF, F.: Wasserwirtschaftliche Probleme des Neusiedler Sees und des Seewinkels. Österr. Wasserwirtschaft, 15, 1963, S. 190—203. — Die wahren Ausmaße des Neusiedler Sees. Österr. Wasserwirtschaft, 16, 1964, S. 255 bis 262.

## Summary

The possibility of determining the velocity as well as the direction of flow in a single drill-hole is important for practical purposes. In breaking new ground, it is often desirable that results should be obtained soon, and the more so, if the drilling expenses involved can be reduced by diminishing the number of the necessary borings.

In filter-velocity measurements the timing of the current-conditioned decrease of concentration in a radioactively marked boring is used to determine the velocity. An apparatus designed to serve this purpose is described; it makes it possible to do the marking at one point of the boring only; to shut off the measuring point itself from above and below and thus to prevent vertical currents in the boring. Furthermore, the theoretical prerequisites (which are not always fulfilled) and the usability for absolute and relative measurements are dealt with.

The measurement of the current direction in a bore-hole by means of radioactive indicators is described; the limitations of the method are explained. In spite of these limitations, the results obtainable are often useful for practical purposes.

The apparatuses and methods had been demonstrated in a field experiment.

## Résumé

La possibilité de déterminer la direction d'écoulement ainsi que la vitesse d'écoulement grâce à un seul trou de forage est importante dans la pratique. Au cours de travaux d'exploitation, très souvent, l'obtention de résultats rapides est désirable, de même que, l'abaissement sensible des frais importants de forage en réduisant le nombre des forages nécessaires.

Au cours des mesures de la vitesse de filtration effectuées en vue de déterminer la vitesse d'écoulement, on utilise la mesure de la diminution de concentration d'un forage marqué de façon radioactive. Un dispositif approprié sera décrit qui permet de faire le marquage en un seul point du forage, d'obturer vers le haut et vers le bas la section de mesure et de supprimer dans le forage les courants verticaux éventuels. Ce dispositif est utilisable pour n'importe quel diamètre. On étudiera, d'autre part, les conditions théoriques qui ne sont pas toujours réalisées, et on parlera de la méthode pratique pour réaliser des mesures absolues et relatives.