

Über die Arbeiten der Forschungsstelle für Radiohydrometrie in München

Von H. MOSER und F. NEUMAIER (München)

Einführung

Im Herbst 1965 hielt die IAEA eine Arbeitstagung über die Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie ab, auf der folgende Programmpunkte behandelt wurden:

1. Abflußmessungen in Flüssen, Kanälen, Stollen und Rohrleitungen
2. Diffusion von Tracern in offenen Gewässern, insbesondere im Hinblick auf die Abwasserbeseitigung
3. Fluviatiler Sedimenttransport
4. Schneehydrologie, Glaziologie, Hagelforschung
5. Geschwindigkeit und Richtung des Grundwassers
6. Dichte und Feuchte des Grundwasserleiters
7. Sickerwasserströmungen in und unter Stauanlagen
8. Altersbestimmungen des Grundwassers
9. Messung des Wassers auf seinen Gehalt an stabilen Isotopen
10. Analytische Technik

Aus diesem umfangreichen Programm ersieht man, daß es heute kaum ein Gebiet der Oberflächen- und Grundwasserkunde gibt, in dem nicht Isotopenmethoden Eingang gefunden haben. In vielen Fällen sind sie zu einem Hilfsmittel geworden, das Ergebnisse liefert, die mit den klassischen Methoden gar nicht oder nur schwer erreicht werden.

Freilich setzt die Entwicklung und Anwendung isotopentechnischer Methoden in der Hydrologie eine Zusammenarbeit von Wissenschaftlern aus den verschiedensten Fachrichtungen voraus: Geologie und Hydrologie, Physik, Chemie und Ingenieurwissenschaften arbeiten im Speziellen nebeneinander und in der Gesamtbetrachtung miteinander in gegenseitiger geistiger Ergänzung. Erst ein solches Team ist in der Lage, je nach der Fragestellung die verschiedenen Methoden unter Einschluß der klassischen Hydrometrie einzusetzen und die Meßergebnisse sinnvoll zu deuten.

Auf diese Weise bemühen wir uns an der Forschungsstelle für Radiohydrometrie in München gewisse hydrologische und damit verwandte Probleme mit radiohydrometrischen Methoden zu lösen. Im folgenden soll ein Überblick gegeben werden, wie wir in der Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie vorgehen. Es soll dabei nicht verschwiegen werden, daß noch auf keinem der Teilgebiete vollausgereifte Methoden vorliegen. Wir möchten aber doch betonen, daß sich überall erfolgversprechende Einsichten eröffnen, die sehr wohl eine großzügige Förderung dieses Forschungsgebietes rechtfertigen.

Tracermessungen in offenen Gerinnen

In der Hydrometrie offener Gerinne treffen wir vornehmlich auf zwei Fragen. Erstens muß für die Aufstellung der Wasserbilanz der Abfluß (Wassermenge/Zeit) gemessen werden und zweitens interessiert für *Abwasserfragen*, wie sich das Wasser in der Strömung längs einer gewissen Strecke durchmischt. Beide Probleme können mit Hilfe radioaktiver Tracer behandelt werden.

Für Abflußmessungen interessieren vor allem jene Gerinne, welche durch die recht einfache Flügelradmessung nicht erfaßt werden können. Es sind dies z. B. die unregelmäßigen Fließquerschnitte (z. B. in Gebirgsbächen und in Gletscherabflüssen) und die Wassermengen großer Flüsse (Abfluß $> 500 \text{ m}^3/\text{sec}$).

Die Methodik für solche Messungen mit radioaktiven Isotopen wurde von uns erstmals 1954 angegeben und ist heute unter dem von HULL geprägten Namen „total-count-Verfahren“ allgemein bekannt und angewandt.

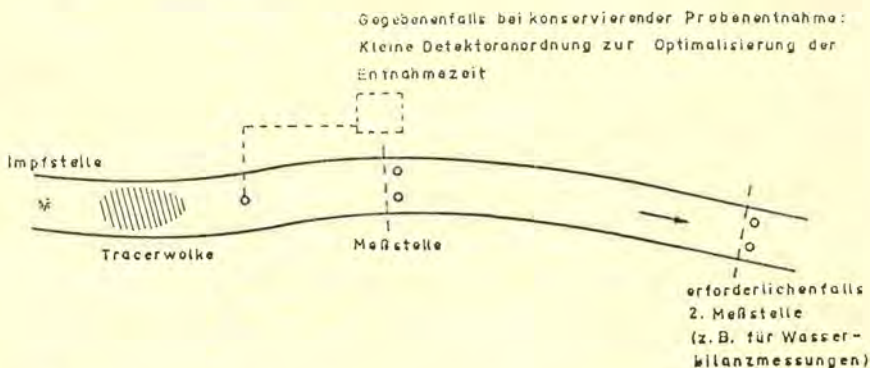


Abb. 1: Schema einer Abflußmessung in offenen Gerinnen nach dem total-count-Verfahren.

Abb. 1 zeigt, wie sich ein an einer „Impfstelle“ zugegebener Tracer (meist ^{131}J , ^{82}Br , ^{24}Na) längs einer „Meßstrecke“ mit dem Flußwasser vermischt und wie er an der Meßstelle nachgewiesen wird. Unter der entscheidenden Voraussetzung, daß an der Meßstelle jeder Stromfaden einen seiner Wasserführung proportionalen Anteil der Tracermenge mit sich führt und kein Tracer längs der Meßstrecke durch Adsorption oder ähnliche Vorgänge verlorengeht, läßt sich der Abfluß Q aus den Meßwerten berechnen:

$$Q = \frac{A \cdot E}{N}$$

A = Aktivitätsmenge des zugegebenen Tracers, E = Nachweisempfindlichkeit $\left(\frac{\text{Impulsrate}}{\text{Aktivitätskonzentration}} \right)$, N = Nettoimpulssumme = zeitliches Nettoimpulsintegral.

Bei einer solchen Messung ist also im Gegensatz zur Flügelradmethode die Kenntnis des Fließquerschnittes *n i c h t* erforderlich. Doch treten dafür andere Probleme auf: der Tracer muß am Ende der Meßstrecke mit dem Wasser genügend durchmischt sein, und wir müssen die notwendige Tracermenge kennen, die ihrerseits wiederum von der Nachweismethode abhängt.

Die erwähnte Durchmischungsbedingung verlangt, daß die gemessene Impulssumme N und damit das Konzentration-Zeit-Integral der Tracerpassage an der Meßstelle über den ganzen Flußquerschnitt konstant ist. Eine solche Durchmischung stellt sich nach einer bestimmten Fließstrecke im allgemeinen von selbst ein; sie muß jedoch bei jeder Messung an mehreren Meßpunkten im Querschnitt überprüft werden, weil alle bisher entwickelten theoretischen Voraussagen über die Länge der Durchmischungstrecke sich als ungenügend erwiesen haben.

Nach unseren Erfahrungen ist eine gute Durchmischung in kleinen Gerinnen, etwa in Gebirgsbächen oder Kanälen, längs einer nicht zu großen Meßstrecke durchaus möglich. An einem Kanal mit einer Wasserführung von $20 \text{ m}^3/\text{sec}$ ist die notwendige Durchmischungstrecke etwa 500 m lang. Bei großen Flüssen wissen wir heute noch nichts über die Länge der Durchmischungstrecke. Bei Messungen am Inn bei Oberaudorf (Wasserführung $200 \text{ m}^3/\text{sec}$) wurde gefunden, daß nach 8 km Fließstrecke in einem regelten Gerinne noch keine ausreichende Durchmischung erreicht war. Allzu lange Durchmischungstrecken sind in den meisten Fällen technisch untragbar, weil Zu- und Abflüsse innerhalb der Meßstrecke das Ergebnis verfälschen. Wir müssen also danach trachten, eine bessere Impftechnik zu finden, die von vornherein eine gute Durchmischung des Tracers mit dem Wasser gewährleistet oder die Gesetze der Verteilung des Tracers in der Strömung kennenzulernen, um daraus die Wasserführung zu bestimmen.

Über die Messung des Abflusses hinaus ist es in vielen Fällen aufschlußreich, die Durchmischung des Tracers im Wasser als solche für sich allein zu verfolgen, weil sie für viele Fragen der Beseitigung radioaktiver und sonstiger Abwässer in Vorflutern wichtig ist. Auch bei Untersuchungen des Strömungsverhaltens in Gerinnen, etwa im Zusammenhang mit Flußregulierungen und im Kanal- und Stollenbau, ist die Kenntnis der Durchmischungsvorgänge erforderlich.

Abb. 2 zeigt schematisch unsere Meßanordnungen zum quantitativen Nachweis eines Tracers. Der in die Strömung eintauchende Szintillationszähler besitzt zwar eine gute Nachweisempfindlichkeit, aber die komplizierte Meßgeometrie des Gerinnes erschwert deren genaue Bestimmung. Es sollte deshalb diese Anordnung nur in Fließquerschnitten eingesetzt werden, die meßgeometrisch ein infinites Volumen darstellen. Durchflußzähler, durch die eine dem Fluß entnommene Teilströmung hindurchgepumpt wird, lassen wegen der genauen Kenntnis ihrer Meßgeometrie eine exakte Eichung der meist geringeren Nachweisempfindlichkeit zu. Sie sind jedoch durch die notwendigen Installationen apparativ wesentlich aufwendiger.

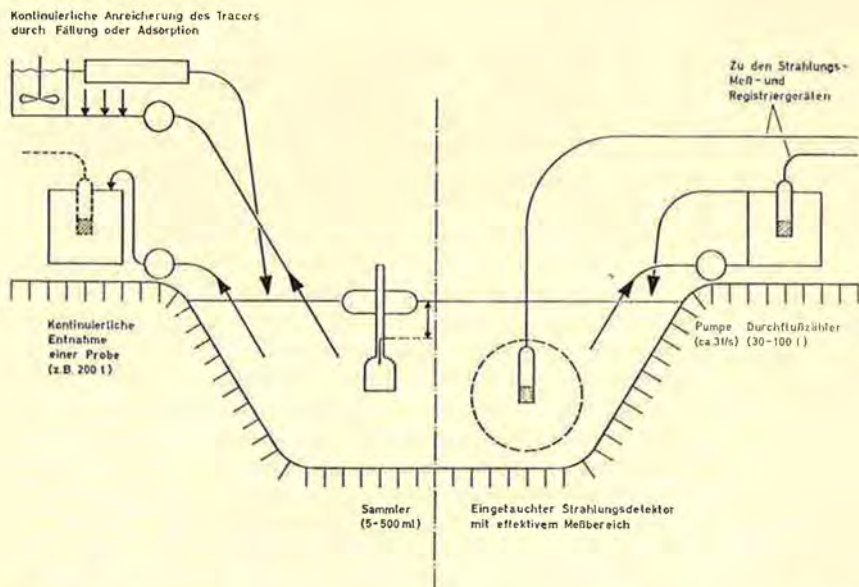


Abb. 2: Schema der Möglichkeiten zur Messung der Impulssumme bei der Tracerpassage an der Meßstelle.

Beide Methoden haben einen Nachteil: die Meßzeit und damit die Nachweisgrenze sind durch die Passage der Tracerwolke an der Meßstelle bestimmt und damit begrenzt. Um diesen Nachteil auszuschalten, wenden wir in vielen Fällen die sog. konservierende Probenahme an. Wir entnehmen entweder diskontinuierlich Wasserproben (0,5—5 l), oder wir arbeiten mit einer kontinuierlichen Entnahme, die 200—2000 l während des Tracerdurchganges erfaßt. Die spätere Ausmessung der Proben kann dann mit beliebig langer Meßzeit geschehen.

Kennt man die Nachweisempfindlichkeit, den Nullprobeneffekt und die Durchmischungslänge, so kann man für eine vorgegebene Genauigkeit der Abflußmessung die Mindesttracermenge abschätzen. Für große Wassermengen ergeben sich allerdings Traceraktivitäten, mit denen nur noch schwer im Gelände manipuliert werden kann. Der einzige Ausweg scheint uns hier, die Nachweisgrenze des Tracers durch Anreicherung aus dem zu untersuchenden Wasser zu erhöhen. Über unsere Bemühungen in dieser Sache wird im Beitrag „Zur Anreicherung von radioaktiven Indikatoren“ von H. BEHRENS berichtet werden.

Zur Ergänzung der Messungen mit radioaktiven Tracern und zum Vergleich ihres Anwendungsbereiches haben wir auch Fluoreszenzfarbtracer zu Abflußmessungen verwendet, über die im Beitrag „Die Direktmessung hydrologischer Farbtracer im Gelände“ von H. MOSER und H. SAGL referiert wird.

Tracermessungen im Grundwasser

Mit radioaktiven Tracern können die Ergiebigkeit und die Richtung eines Grundwasserstromes gemessen werden. Daneben kann man aus der Messung des Tritium- und ^{14}C -Gehaltes des Grundwassers sowie anderer (auch stabiler) Isotope die Zeit abschätzen, die das Wasser im Grundwasserleiter verbracht hat. Aus dieser Verweilzeit des Grundwassers können wir Schlüsse auf die Geschwindigkeit und Art des Wasserkreislaufes ziehen. Eine solche Datierung des Grundwassers wird in der Bundesrepublik Deutschland vor allem am II. Physikalischen Institut der Universität Heidelberg (K. O. MÜNNICH) durchgeführt. In nächster Zeit will auch unsere Forschungsstelle sich mit der Altersbestimmung der Grundwässer befassen.

Zur Messung der Grundwasserergiebigkeit wurde von uns die Verdünnungsmethode entwickelt. Es ist dies ein Verfahren, bei dem die Filtergeschwindigkeit, d. h. die Wasserführung, bezogen auf die Querschnittseinheit des Grundwasserleiters, von einem ausgebauten Filterpegel aus gemessen wird. Über das Darcysche Gesetz ($v_f = k \cdot J$) kann aus der Filtergeschwindigkeit v_f und dem Gefälle J der sog. Durchlässigkeitsbeiwert k bestimmt werden.

Die Methode beruht auf der Messung der zeitlichen Verdünnung eines in den Filterpegel eingebrachten Tracers (Abb. 3). Unter der Voraussetzung einer horizontalen Grundwasserströmung im Bereich des Filterrohres ergibt sich die Filtergeschwindigkeit v_f durch die Gleichung

$$v_f = \frac{V_0}{\alpha \cdot F \cdot t} \cdot \ln \frac{c}{c_0}$$

V_0 = Meßvolumen, F = Meßquerschnitt im Filterrohr, t = Zeit, $\frac{c}{c_0}$ = Verhältnis der Konzentration des Tracers zur Zeit t zur Anfangskonzentration, α = Faktor, der die Verzerrung der Stromlinien durch die Bohrung berücksichtigt.

Die Abbildung zeigt auch die meßtechnische Auswertung: trägt man c/c_0 logarithmisch gegen die Zeit t auf, so ergibt sich eine lineare Funktion, aus deren Steigung die Größe v_f ermittelt wird.

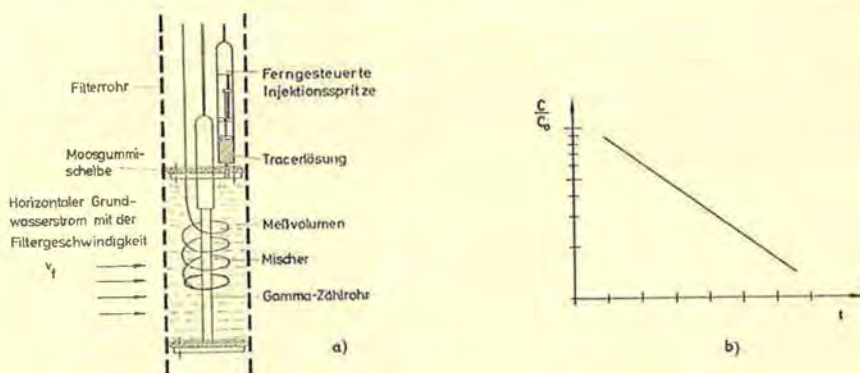


Abb. 3: Die Messung der Filtergeschwindigkeit v_f mit dem Verdünnungsverfahren

- a) Schema der Meßanordnung im Filterpegelrohr
- b) Auswertung

Diese Methode besitzt gegenüber den herkömmlichen Verfahren zur Bestimmung der Grundwasserergiebigkeit, insbesondere durch Pumpversuche, den Vorteil, daß die Messung im ungestörten Grundwasserleiter und an einem einzigen Bohrloch erfolgt und daß jede einzelne Bodenschicht des Vertikalprofils auf ihren v_f Wert ausgemessen werden kann. Der Aufwand an Zeit und Geräten ist bei diesem Verfahren verhältnismäßig gering. Die untere Grenze des Meßbereiches von v_f liegt bei 0,01 m/Tag. Im Vergleich zu Messungen der Grundwasser- geschwindigkeit zwischen zwei Bohrlöchern werden nur ganz geringe

Tracermengen benötigt, deren Verhalten im Boden, z. B. ihre Adsorbierbarkeit, von untergeordneter Bedeutung ist. Nachteilig ist zweifellos, daß die Messung nur die Strömungsverhältnisse in der Umgebung des Filterrohres erfaßt und daß ein sorgfältiger Filterrohrausbau (keine Kavernen um das Bohrloch, richtig dimensionierte Filterkiesschüttung) vorausgesetzt werden muß. Der Filterrohrausbau muß nämlich so gut bekannt sein, daß die Verzerrung des Strömungsfeldes in der Umgebung des Bohrloches über den Faktor α vorausberechnet werden kann (Abb. 4).

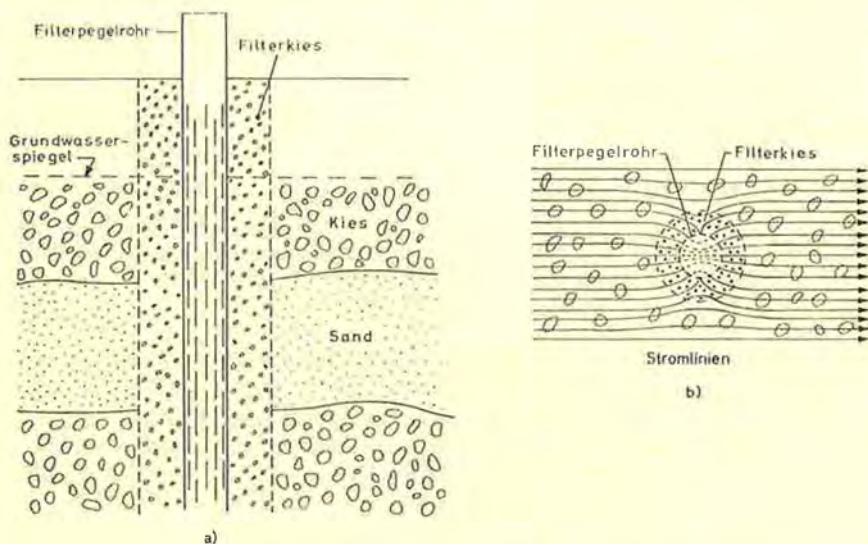


Abb. 4: a) Ausbau einer Bohrung mit Kiesfilter und Filterpegelrohr
b) Durchströmung einer ausgebauten Bohrung im Horizontalschnitt

Zur Prüfung dieser Methode haben wir in den letzten Jahren zahlreiche Modellversuche durchgeführt, die verschiedene Grundwasserströmungen simulieren. In einem 3 m langen, 1,5 m breiten und 1,2 m hohen Kasten wurde untersucht, wie das Meßergebnis durch die Perforierung des Filterrohres, den Kiesfilter, die notwendige künstliche Durchmischung des Tracers, seine Konzentration bzw. seine Dichte beeinflusst wird. Trotzdem es uns gelang, viele dieser Fragen zu klären, sind noch weitere Untersuchungen notwendig, um alle Parameter des Verfahrens zu beherrschen.

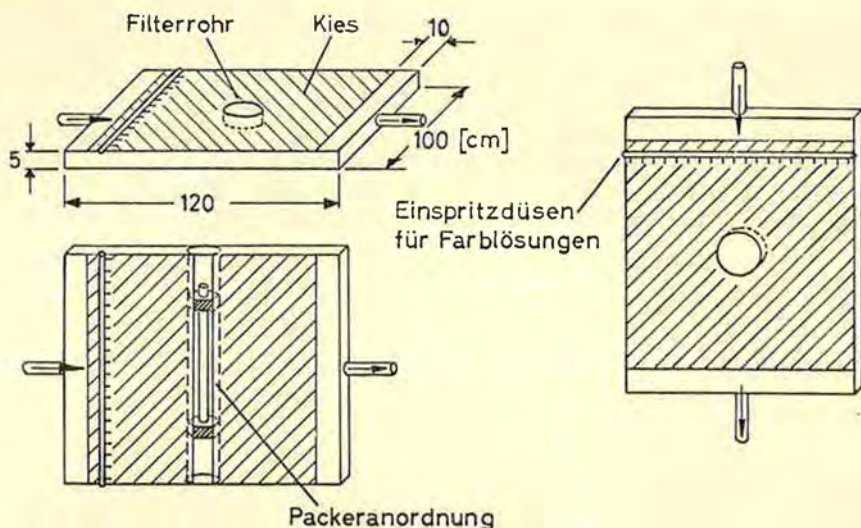
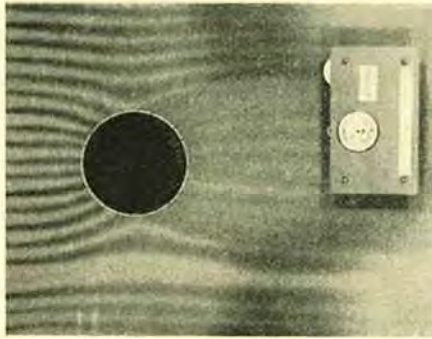


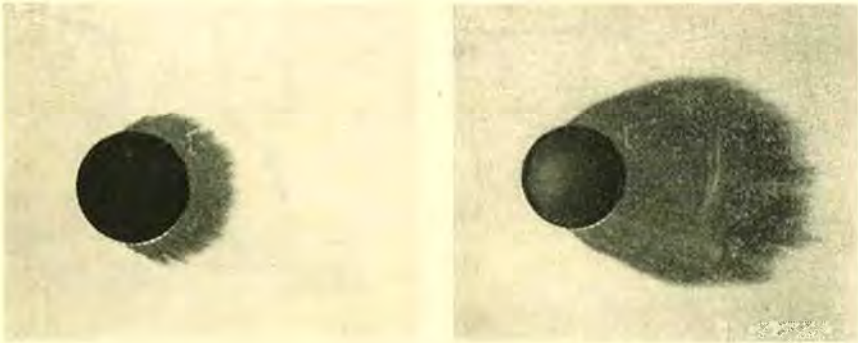
Abb. 5: Modell mit Plexiglaswänden für Strömungsversuche mit Farbtracern zur Simulation eines quasi-zweidimensionalen Schnittes des Grundwasserleiters mit Filterpegelrohr (halbschematisch; das Modell ist um zwei Achsen schwenkbar).

Eine anschauliche Darstellung der Strömungsvorgänge um ein Bohrloch herum gelingt durch ein zweidimensionales Modell unter Verwendung von Farbstofftracern, z. B. Kaliumpermanganat (Abb. 5). Je nach seiner Lage repräsentiert das Modell einen Horizontal- oder Vertikalschnitt des Grundwasserleiters. Man kann damit die Durchströmung von Filterrohren im homogenen und geschichteten Grundwasserleiter ohne und mit Kiesfilter und den Einfluß der Meßsonden studieren. Auch die Beziehung zwischen der Filtergeschwindigkeit und der Abstandsgeschwindigkeit, die zur Ermittlung des effektiven Porengehalts des Bodens benutzt werden kann, vermag an diesem Modell untersucht zu werden. Abb. 6 zeigt Aufnahmen von Strömungsbildern an diesem Modell.

Neben der Verzerrung des Grundwasserströmungsbildes durch die Bohrung erschweren Vertikalströmungen im Filterrohr die Anwendung der Verdünnungsmethode. Solche Vertikalströmungen treten auf, wenn das Filterrohr Grundwasserleiter mit verschiedener Durchlässigkeit und verschiedenem piezometrischem Druck durchteuft, weil dann durch das Filterrohr ein sog. hydraulischer Kurzschluß verursacht wird. Die durch diese Vertikalströmung auftretende Tracerverdünnung stört die Messung der Horizontalströmung, so daß die Methode nur angewendet werden darf, wenn die Vertikalkomponente des Durchflusses im Filterrohr sehr klein ist gegenüber der Horizontalkomponente. Packer, die



a)



b)

Abb. 6: Beispiele für Versuche an dem in Abb. 5 dargestellten Modell

a) Stromlinienverlauf in der Nähe eines Filterpegelrohres

b) zwei zeitlich verschiedene Stadien des Ausfließens einer Tracerlösung aus einem Filterpegelrohr

das Meßvolumen im Filterrohr nach oben und unten abdichten, unterbinden in vielen Fällen die störende Vertikalströmung und werden heute in der Praxis durchwegs verwendet. Bei starken Vertikalströmungen wird jedoch der Packer außerhalb des Filterrohres im Bereich der Filterkiesschüttung von der Vertikalströmung umläufig umströmt. In solchen Fällen ist die Anwendung der Verdünnungsmethode unmöglich.

Allerdings können die Vertikalströmungen selbst zu hydrologischen Aussagen herangezogen werden. Impft man nämlich in einer bestimmten Tiefe des Filterrohres mit einem Tracer (Abb. 7) und mißt die Passage der vertikal von der Strömung mitgeführten Tracerwolke mit

Detektoren oberhalb und unterhalb der Impfstelle, so kann man aus der Geschwindigkeit v_v der Vertikalströmung und der Impulssumme N der vorbeifließenden Tracerwolke jeweils den vertikalen Durchfluß Q_v (Wassermenge/Zeit) durch das Filterrohr an der Meßstelle ermitteln:

$$Q_v = v_v \cdot F \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{(nach der Kontinuitätsgleichung im Querschnitt F)} \\ \text{(nach dem „total-count-Verfahren“ (s. Abschn. 2) mit} \\ \text{der geimpften Aktivität A und der Nachweisempfindlichkeit E)} \end{array} \right.$$

$$Q_v = \frac{A \cdot E}{N}$$

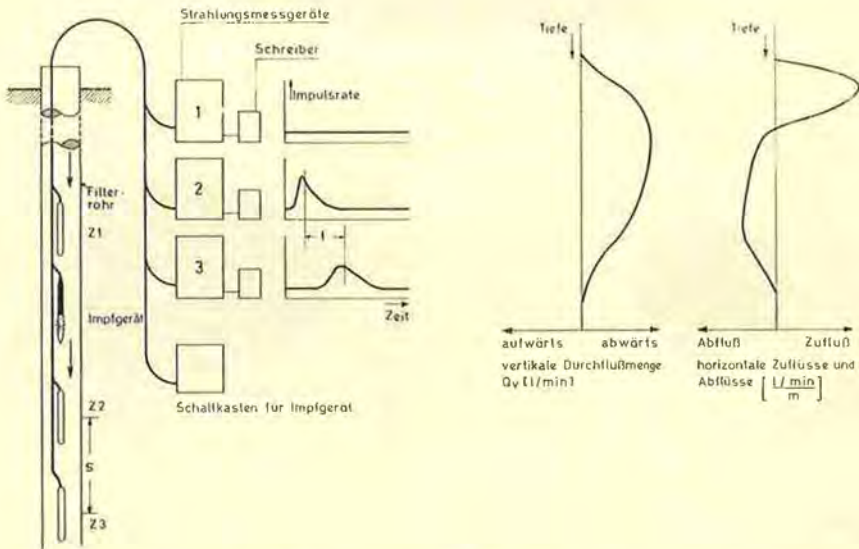


Abb. 7: Messung und Auswertung der Vertikalströmung in einem Filterpegelrohr.

Der rechte Teil der Abb. 7 zeigt ein Beispiel der gewonnenen Durchflußkurve im Vertikalprofil einer Bohrung. Die Änderung des Durchflusses, also die Ableitung der Durchflußkurve, gibt die Tiefen im Filterrohr an, an denen Wasser zu- und abfließt, wo also ein Wasseraustausch mit der Umgebung stattfindet. Wir bemühen uns zur Zeit, den Beziehungen zwischen diesen Zu- und Abflüssen und der Filtergeschwindigkeit im umgebenden Grundwasserleiter nachzugehen. Als Anwendungsbeispiel verweisen wir auf unsere Untersuchungen am Sylvensteinstaudamm, über die auf dem Kongreß der International Association of Scientific Hydrology in Hannover, September 1965, vorgetragen wurde.

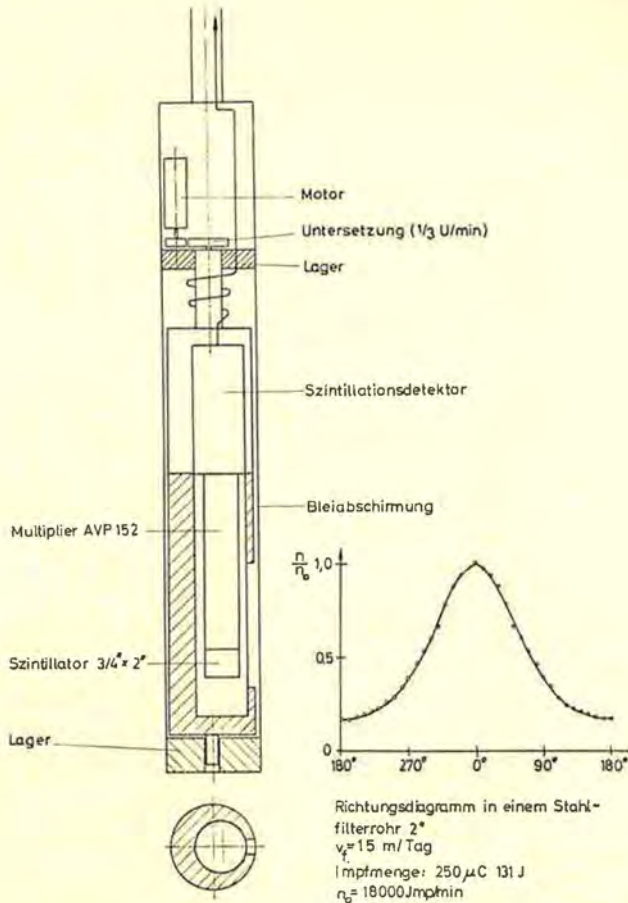


Abb. 8: Schema und Meßergebnis einer Sonde für das Verfahren zur Bestimmung der Fließrichtung des Grundwassers nach J. MAIRHOFER.

Für die Messung der Fließrichtung des Grundwassers hat J. MAIRHOFER ein elegantes Verfahren angegeben, das ebenfalls nur ein einziges Bohrloch benötigt. Im Prinzip wird die Fließrichtung aus der Form der aus einem Filterrohr austretenden Tracerwolke ermittelt. Die Vorteile des Verfahrens gegenüber einer Abstandsmessung an einem Meßkranz um einen Geberpegel liegen in der wesentlich kürzeren Meßzeit, in dem viel geringeren Aufwand an Tracermenge und darin, daß nur eine einzige Bohrung benötigt wird. Nachteilig ist wie beim Verdünnungsverfahren, daß nur in der Umgebung des Filterrohres gemessen wird. Wir haben dieses Verfahren aufgegriffen und

versuchen die damit verbundenen apparativen Probleme zu lösen. Abb. 8 zeigt eine von uns verwendete Richtungs-sonde. Ein Szintillationszähler wird mit einer Bleiabschirmung kollimiert, die sich durch einen programmgesteuerten Motor um die Filterrohrachse dreht. Schwierigkeiten bereitet das reproduzierbare Einordnen der Bleiabschirmung im Filter-

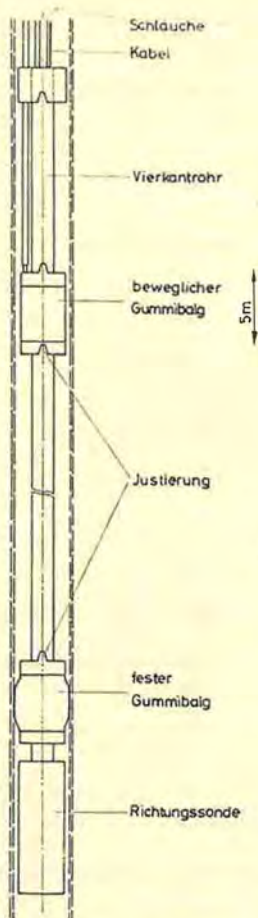


Abb. 9: *Vorrichtung zur richtungsbeständigen Einführung der in Abb. 8 dargestellten Richtungs-sonde in das Filterpegelrohr.*

rohr vor allem in großen Tiefen, bei denen eine Gestängeverbindung von der Bohrlochoberkante zur Sonde ausscheidet. Abb. 9 zeigt unsere einfache Vorrichtung, die richtungsbeständig ins Bohrloch eingeführt wird und die Sonde bis auf eine beliebige Tiefe mit vorgegebener Richtung transportiert. Dabei wird eine etwa 5 m lange Stange zunächst durch einen Packer im Bohrloch fixiert. Die Stange trägt einen Läufer, der relativ zur Stange in seiner Richtung festgelegt und ebenfalls als

Packer ausgebildet ist. Sobald dieser Packer im Bohrloch fixiert ist, wird der untere Packer gelöst und die Stange 5 m weiter nach unten gelassen. Dort wird ihr Packer fixiert und nun der Läufer abgelassen usw. Die ersten Versuche mit diesem Gerät bestätigen seine ausgezeichnete Richtungsstabilität; es wird nun mit der beschriebenen Richtungs-sonde verbunden und zu Messungen eingesetzt.

Bestimmung der Dichte und Feuchte des Bodens mit Gammastrahlen und Neutronen

Durch Messungen der Streuung von Gammastrahlen bzw. Neutronen kann die Dichte bzw. Feuchte eines Bodens in situ ohne Entnahme von Bodenproben ermittelt werden. Solche Untersuchungen ergänzen die aus Tracerversuchen gewonnenen Daten über den Aufbau des Grundwasserleiters. Auf diese Weise können auch Dichtebestimmungen von Sedimenten und Schwebstoffen in offenen Gerinnen durchgeführt und dadurch Fragen des Sedimenttransportes angegangen werden.

Bei geringen Meßtiefen ist es zweckmäßig, eigene, den heute erhältlichen Meßgeräten angepaßte Bohrungen niederzubringen, um eine maximale Meßeempfindlichkeit zu gewährleisten. Der uns interessierende Grundwasserleiter liegt jedoch oft in größeren Tiefen, so daß es wünschenswert ist, derartige Messungen an bereits vorhandenen, kostspielig ausgebauten Pegeln und Brunnen durchführen zu können. Wir haben deshalb in Ergänzung zu theoretischen Arbeiten aus dem Bundesamt für Bodenforschung, Hannover, in Laborversuchen untersucht, wieweit der Bohrlochausbau die Messung der Dichte und Feuchte beeinträchtigt und welche Grenzen dadurch für die Anwendung des Verfahrens gegeben sind.

Abb. 10 zeigt für die Gammastrahlung das wesentliche Ergebnis der Untersuchungen. Zunächst macht der linke Teil der Abbildung deutlich, daß für ein gegebenes Filterrohr der Logarithmus der Streustrahlungsrate linear vom Logarithmus des Bohrdurchmessers abhängt. Für verschiedene Bodendichten schneiden sich diese Geraden in einem Punkt. Diese empirische Tatsache erleichtert sehr die Aufstellung der Eichkurven, die sonst einen großen experimentellen Aufwand erfordern. Der rechte Teil der Abbildung zeigt Eichkurvenscharen für zwei verschiedene Sonden mit dem Bohrdurchmesser als Parameter. Aus einem Vergleich folgt, daß die Radiumsonde wegen ihrer härteren Gammastrahlung einen größeren Meßbereich und damit ein größeres Auflösungsvermögen für die Dichte des umgebenden Bodens besitzt als die Caesium-Sonde. Dagegen hängt die Streurrate der Caesium-Sonde stärker von der Dicke der Filterkiesschicht ab; diese Sonde eignet sich deshalb zur Kontrolle des Ausbaus, die ebenfalls für die im vorigen Abschnitt beschriebenen Tracermessungen von Bedeutung ist.

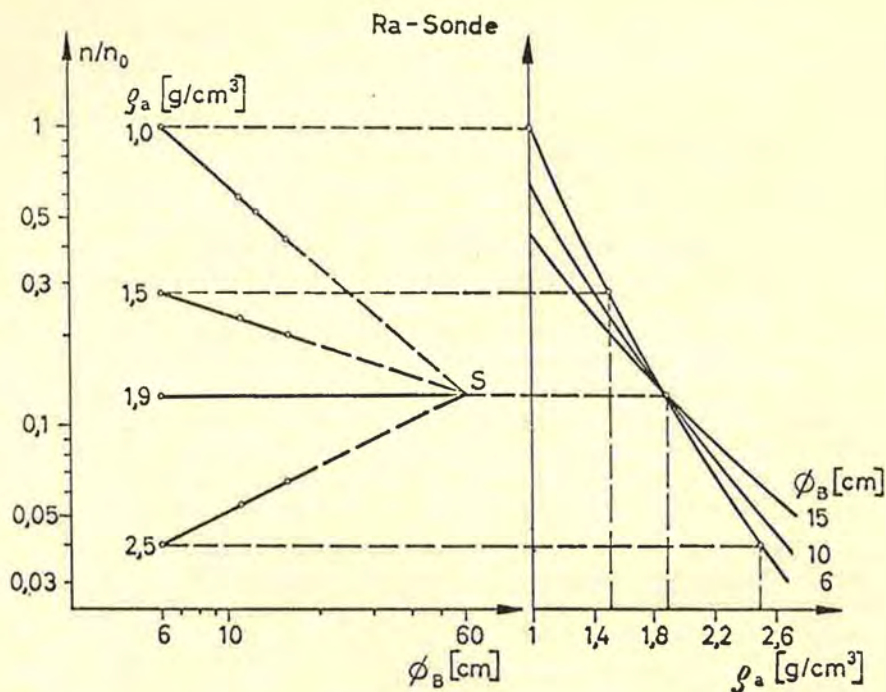


Abb. 10: Zur Dichtemessung nach dem ($\gamma\gamma$)-Verfahren:

Vergleich einer Ra-Sonde mit einer ^{137}Cs -Sonde

links: Abhängigkeit der normierten Gammastrahlungs-Rate n/n_0 vom Durchmesser ϕ_B des Kiesfilters mit der Dichte des Bodens ρ_a als Parameter

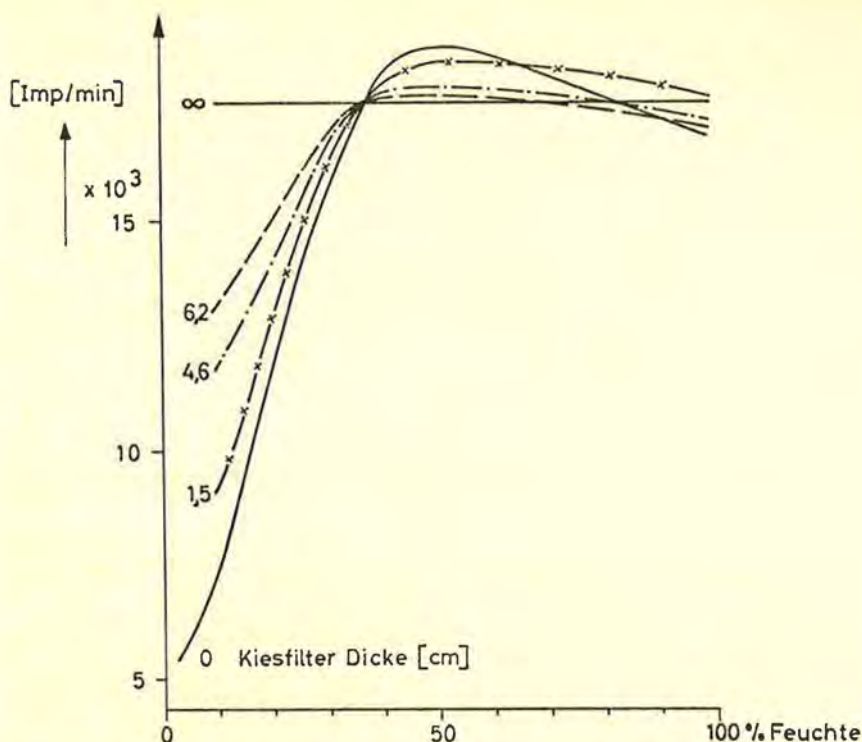


Abb. 11: Feuchte-Eichkurve für verschiedene Kiesfilterdicken gemessen mit der Feuchtesonde der Fa. Berthold, Wildbad.

Abb. 11 zeigt Eichkurven für die Feuchtemeßsonde der Firma Berthold, Wildbad, bei verschiedenen Kiesfilterdicken. Man erkennt, daß bei dieser Sonde im Feuchtebereich zwischen 0 und 37% bis zu 6,2 cm Kiesfilterdicke noch eine brauchbare Feuchtemessung möglich ist. Für einen gesättigten Grundwasserleiter eignet sich jedoch demnach diese Sonde nicht. Die von uns derzeit durchgeführten Untersuchungen haben deshalb zum Ziel, eine optimale Meßanordnung für den Feuchtigkeitsbereich zwischen 30 und 60% zu entwickeln.

rechts: Eichkurven für die Messung der Bodendichte ρ_a mit dem Parameter Φ_B

Eisenrohr: Außendurchmesser = 60 mm, Wandstärke = 3,3 mm
Dichte des Filterkieses = 1,9 g/cm³

Impulsrate $n_0 = 1 \cdot 10^5$ Imp/min für die Ra-Sonde (10 mCi; Abstand Quelle-Detektor 55 cm)

Impulsrate $n_0 = 2 \cdot 10^5$ Imp/min für die ¹³⁷Cs-Sonde (5 mCi; Abstand Quelle-Detektor 20 cm).

Veröffentlichungen der Forschungsstelle für Radiohydrometrie:

- MOSER, H. & F. NEUMAIER: Die Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie. — I. Ein Verfahren zur Ermittlung von Zu- und Abflüssen von Wasserläufen. — *Atomkernenergie*, 2, 1957, pp. 26—28.
- MOSER, H., F. NEUMAIER & W. RAUERT: Die Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie. — II. Ein Verfahren zur Ermittlung der Ergiebigkeit von Grundwasserströmungen. — *Atomkernenergie*, 2, 1957, pp. 225—231.
- MOSER H. & F. NEUMAIER: Die Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie. — Autorreferat. — *Gas- und Wasserfach*, 99, 1958, pp. 324—325.
- MOSER, H. & F. NEUMAIER: Die Bestimmung der Sickerwasserströmung unter dem Staudamm Roßhaupten mittels radioaktiver Isotope. — *Wasserwirtschaft*, 48, 1958, pp. 290—294.
- MOSER, H. & F. NEUMAIER: Determination of Seepage Flow under Rosshaupten Dam by Means of Radioactive Isotopes. — *Sixth Congress on Large Dams*, New York, Sept. 1958.
- MOSER, H., F. NEUMAIER & W. RAUERT: Die Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie. — III. Zur Strahlengefährdung bei der Anwendung von radioaktivem Jod in der Hydrometrie. — *Atomkernenergie*, 3, 1958, pp. 401—403.
- MOSER, H. & F. NEUMAIER: Die Anwendung der Radiohydrometrie in der Hydrologie und im Wasserbau. — Beispiele angewandter Forschung, Fraunhofer-Gesellschaft e. V., München, 1959.
- MOSER, H. & F. NEUMAIER: Über eine Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie. — *Gas- und Wasserfach*, 100, 1959, pp. 657—659.
- MOSER, H. & W. RAUERT: Detection Sensitivity and Detection Limits for Radioactive Isotopes Used in Hydrology. — *Int. Assoc. Scient. Hydrology 1960*, no. 52, Commission of Subterranean Waters, pp. 548—558.
- NEUMAIER, F.: Experiences Concerning the Use of Radioactive Isotopes in Hydrology. — *Int. Assoc. Scient. Hydrology 1960*, no. 52, Commission of Subterranean Waters, pp. 542—547.
- MOSER, H. & W. RAUERT: Die Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie. — IV. Über Dosierung und Nachweis des radioaktiven Indikators J 131. — *Atomkernenergie*, 5, 1960, pp. 419—425, 462—471.
- MOSER, H. & F. NEUMAIER: Über die Anwendung von radioaktiven Indikatoren in der Hydrologie. — *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 5, 1961, pp. 25—30.
- MOSER, H., F. NEUMAIER & W. RAUERT: Die Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie. — V. Messung der Wasserführung in offenen Gerinnen mittels radioaktiver Indikatoren. — *Atomkernenergie*, 7, 1962, pp. 321—324.
- MOSER, H. & F. NEUMAIER: Anwendung radioaktiver Indikatoren in der Grundwasserkunde, Beitrag im Handbuch des Brunnenbaus, Bd. II, München 1963.
- MOSER, H., F. NEUMAIER und Mitarbeiter: Jahresbericht 1962 der Forschungsstelle für Radiohydrometrie. München 1963 (als Manuskript gedruckt).
- MOSER, H., F. NEUMAIER & W. RAUERT: New Experiences with the Use of Radioactive Isotopes in Hydrology, in: *Radioisotopes in Hydrology*, IAEA Report STI/PUB/71, pp. 283—295, Vienna 1963.
- MOSER, H., F. NEUMAIER & W. RAUERT: Strömungsmessungen in offenen Gerinnen mit Hilfe radioaktiver Isotope. — *Die Wasserwirtschaft*, 54, 1964, pp. 42—45.
- MOSER, H., F. NEUMAIER und Mitarbeiter: Jahresbericht 1963 der Forschungsstelle für Radiohydrometrie, München 1964 (als Manuskript gedruckt).

- DROST, W., H. MOSER, F. NEUMAIER & W. RAUERT: Über Anwendungen radioaktiver Isotope in der Hydrologie. — Gas- und Wasserfach, **106**, 1965, pp. 85—92.
- MOSER, H., F. NEUMAIER und Mitarbeiter: Jahresbericht 1964 der Forschungsstelle für Radiohydrometrie. München 1965 (als Manuskript gedruckt).
- MOSER, H., F. NEUMAIER & W. RAUERT: Hydrologische Verwendungen radioaktiver Isotope in der Bundesrepublik Deutschland, Informationsheft des Büro Eurisotop, Euratom 1966.
- BATSCHKE, H., W. DROST, H. MOSER, F. NEUMAIER: Die Messung der Wasserströmung unter dem Sylvensteinstaudamm (Bayerische Alpen). — Vortrag auf dem Kongreß der Internat. Assoc. der Hydrogeologen in Hannover, 1965 (im Druck).
- DIETL, H., R. KEHRER, H. MOSER, F. NEUMAIER & W. RAUERT: Observations on the Utilization of the Scattering of Gamma Rays and Neutrons to Investigate Underground Aquifers, in: Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics, Vol. II, IAEA, pp. 435—447, Vienna 1966.

Summary

The institute is engaged in the study of the use of radioactive isotopes in hydrography, hydrology and hydraulics. A report is given on the following methods:

1. Tracer measurements in open flows: Procedure, apparatus and results relating to flow-rate measurements with the aid of the total-count method in rivers with a flow of up to 200 m³/sec.
2. Tracer measurements in ground-water: Determination of the filtration velocity using the point-dilution method, measurement of the flow direction with a collimated borehole probe, measurement of vertical currents in filter gauges.
3. Determination of density and moisture of the aquifer using gamma- and neutron-scattering measurements in boreholes with gravel pack.

Résumé

Le susdit institut effectue des recherches sur l'emploi des isotopes radioactifs dans le domaine de l'hydrographie, de l'hydrologie et de l'hydraulique. Le rapport donne des détails sur les méthodes suivantes:

1. Mesures au moyen de traceurs dans des courses d'eau ouvertes: Procédés et appareils utilisés et résultats obtenus dans la mesure des débits de rivières jusqu'à 200 m³/s employant la méthode du comptage total.
2. Mesures au moyen de traceurs des eaux souterraines: Détermination de la vitesse des infiltrations utilisant la méthode de dilution, mesure de la direction des courants au moyen d'une sonde collimatrice introduite dans les trous de forage, mesure des courants verticaux au moyen de tubes perforés.
3. Détermination de la densité et de l'humidité des aquifères sur la base de la mesure de la diffusion gamma et de neutrons au moyen d'une tube introduite dans de trous de forage et enveloppée de gravier.