

Grundwasseruntersuchungen mit Hilfe radioaktiver Isotope

Von JOSEF MAIRHOFER (Wien)

Wegen der zunehmenden Bedeutung des Rohstoffes Wasser zufolge des vermehrten Bedarfs durch Industrie, Landwirtschaft usw., finden auch die Methoden zur Feststellung der Vorräte an Grundwasser und deren Erschließungsmöglichkeiten zusehends Beachtung. Vielleicht ist der Hinweis, daß 25% der UNO-Fondsmittel für Grundwasseruntersuchungen aufgewendet werden, ein Beweis dafür, welchen Wert man dem Rohstoff Wasser beimißt. Insbesondere geht es um die Bestimmung vorhandener Lagerstätten, die Aufenthaltsdauer des Grundwassers im Grundwasserträger sowie die Entnahmemöglichkeiten. Dies läuft teilweise auf die Altersbestimmung des Wassers hinaus.

Die bisher üblichen konventionellen Methoden zur Feststellung des Wasserhaushalts, wie Abpumpversuche, chem. Untersuchungen, Bestimmung der gefallenen Regenmengen usw. können heute schon sinnvoll durch radioaktive Meßmethoden ergänzt werden. Sie liefern oft rasche oder sonst überhaupt nicht erhältliche Ergebnisse.

A. Altersbestimmung

Die durch die kosmische Strahlung produzierten radioaktiven Isotope (C_{14} — T_3 — Si_{32}) können in ihrer Konzentration festgestellt bzw. ihr Produktionszeitpunkt errechnet werden.

Wenn diese radioaktiven Isotope ohne Adsorption aus der Atmosphäre ins Grundwasser gelangen, kann man durch Messung der Radioaktivität des Grundwassers das Alter der Grundwässer bestimmen, da die Halbwertszeit, das ist jener Zeitraum, in dem die radioaktiven Isotope auf ihren halben Ursprungswert zerfallen, bekannt ist. Natürlich ist noch eine Reihe von Unsicherheitsfaktoren vorhanden, z. B. der Ionen-Austausch der Isotope in der Filtrationsschicht und im Grundwasserträger, die Menge des an der Erdoberfläche verdampften Wassers usw.

Bereits durchgeführte Untersuchungen ergaben z. B. in Libyen und in Deutschland für Grundwässer in Tiefen von über 700 m ein

Alter von 25.000 bzw. 10.000 Jahren. Diese Altersbestimmung erfolgte allerdings ohne etwa notwendige Korrekturen.

In Deutschland wurden auch Vergleiche bezüglich des C_{14} -Gehalts des Grundwassers für aus Bohrlöchern entnommenes Wasser angestellt, die sich auf die Jahre 1956 bis 1962 beziehen. Es konnte dabei kein Ansteigen des Gehaltes an C_{14} festgestellt werden. Dies würde bedeuten, daß die Zunahme des C_{14} in der Atmosphäre zufolge der Wasserstoffbombenexplosionen keine zusätzliche Verseuchung des Grundwassers bewirkt. Dieser Kohlenstoff scheint also in den obersten Erdbodenschichten ausgetauscht zu werden und dürfte vermutlich in die Pflanzen gelangen. Es wäre auch die Möglichkeit, daß der Austausch des Kohlenstoffes in den tieferen Bodenschichten erfolgt, wo organische Materie von beträchtlichem Alter vorhanden ist, deren C_{14} -Gehalt keinen nennenswerten Anstieg mehr verursacht.

Aber auch die Bestimmung von natürlichen radioaktiven Elementen, wie beispielsweise Uran-, Radium- und Thorium-Isotopen, scheint die Möglichkeit in sich zu bieten, die Altersbestimmung von Grundwässern vornehmen zu können.

Es muß aber erwähnt werden, daß selbst bei der richtigen Wahl des für die Altersbestimmung geeigneten Isotopes noch die Fragen der Probenahme bzw. wie oft sollen sie genommen werden und was muß man bei einer Probenahme über das Eindringen von in der Luft entstandenen radioaktiven Isotopen beachten, von großer Bedeutung sind. Außerdem spielt die hydrogeologische Form des Grundwasserträgers bei der Probenahme eine besondere Rolle.

Selbstverständlich muß man über die auf Grund der kosmischen Strahlung produzierte Radioaktivität vor den Atombombenexplosionen Bescheid wissen, was nicht für alle Teile der Erde der Fall ist. Extrapolationen sind aber möglich.

Aus all dem kann man entnehmen, daß die Messung der Radioaktivität von Grundwässern, die an sich beträchtliche Schwierigkeiten in meßtechnischer Hinsicht bietet, wertvolle Hinweise bezüglich des Alters des Grundwassers und für die Erneuerung der Grundwasservorräte liefern kann.

B. Feststellung der Grundwasserströmungen

Bei verschiedenen Aufgaben des Grund- und Wasserbaues ist es oft von entscheidender Bedeutung, feststellen zu können, wohin und mit welcher Geschwindigkeit das Grundwasser fließt.

Dies kann z. B. bei Untersuchungen von Abwasserproblemen von

großer Bedeutung sein. Hier kann man sich mit der sogenannten Indikator-Aktivierungsanalyse helfen. Man gibt den Abwässern einen chemisch äquivalenten, radioaktiven Tracer bei (z. B. $\text{NH}_4 \text{ Br}$), der einen möglichst hohen Wirkungsquerschnitt für Neutronen besitzt. An den vermuteten Verunreinigungsstellen entnimmt man Wasserproben und aktiviert den Tracer durch Neutronenbeschuß. Auf diese Art und Weise kann man, ohne das Grundwasser radioaktiv zu verseuchen, feststellen, ob das Abwasser tatsächlich die angenommene Verunreinigung verursacht.

Ein Nachteil dieser Methode sind die manchmal relativ geringe Nachweisempfindlichkeit und die höheren Kosten wegen der notwendigen größeren Probenzahl.

In neuerer Zeit wurden auch Methoden entwickelt, die es ermöglichen, die Grundwassergeschwindigkeit und -richtung aus einem einzigen Bohrloch zu ermitteln. Diese Methode hat den Vorteil, daß zumindest für die Abschätzung von Grundwasserfeldern wichtige Feststellungen getroffen werden können. Sie beruht darauf, daß die Konzentrationsabnahme als Folge einer Strömung gemessen wird. Dem Grunde nach wurde diese Methode bereits im Jahre 1916 bzw. 1937 angewendet, allerdings nicht mit radioaktiven Isotopen, sondern durch Salzungsversuche und Messung der Änderung der elektrischen Leitfähigkeit im Bohrloch [1*].

Die Abnahme der Konzentration mit der Zeit im Bohrloch ist eine Exponentialfunktion, aus der die Grundwassergeschwindigkeit bei Beachtung gewisser Faktoren relativ einfach ermittelt werden kann.

Anstelle der Salzung kann man selbstverständlich auch radioaktive Isotope verwenden, deren Konzentration einfacher meßbar ist [2]; außerdem sind die erforderlichen Mengen wesentlich geringer. Um Fehlerquellen zu vermeiden, muß das für die Messung herangezogene Bohrloch möglichst mit einem Durchmesser gebohrt werden, der dem eingesetzten Filterrohr entspricht. Außerdem muß man auf die geeignete Perforierung des Filterrohres achten. Die übliche Verkiesung des Ringraumes um das Bohrloch nach dem Setzen des Filterrohres bringt eine Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit mit sich. Außerdem können sich durch das Bohrloch künstliche Vertikalströmungen einstellen, die bei ungestörten Bodenverhältnissen nicht vorhanden sind. Dies selbstverständlich nur dann, wenn verschiedene wasserführende Horizonte angebohrt werden. Auch das muß bei der Messung der Filtergeschwindigkeit beachtet werden.

* Siehe Literaturverzeichnis S. 73!

Die Messung mit radioaktiven Isotopen erfolgt in der Weise, daß eigens entwickelte Instrumente, die auch das wasserlösliche Isotop enthalten, an den Meßpunkt gebracht werden. Das Filterrohr wird ober- und unterhalb des Meßpunktes abgeschlossen, damit Vertikalströmungen, sofern sie nicht auch noch außerhalb des Filterrohres auftreten, ausgeschlossen werden und die gemessene Konzentrationsabnahme ausschließlich von der Horizontalströmung herrührt.

Aus der Gleichung [3, 4]

$$v_f = \frac{d}{\Delta t} \cdot \ln \frac{I_0}{I_t}$$

(d = Durchmesser des Filterrohres, Δt das Intervall zwischen den Konzentrations[Impuls]-messungen I_0 und I_t), kann auf einfache Weise die Filtergeschwindigkeit errechnet werden.

Aus der Kontinuitätsgleichung $v_f = \frac{Q}{F}$ kann dann die Menge des Grundwasserstromes bei bekanntem Querschnitt mit Hilfe der gemessenen Filtergeschwindigkeit errechnet werden. Selbstverständlich ist eine Reihe von Voraussetzungen zu beachten, um den Ergebnissen einen entsprechenden Aussagewert zuzuordnen. Doch bekommt man wertvolle Auskünfte, deren Genauigkeitsgrad durchaus mit den konventionellen Methoden Schritt hält, auf diese wirklich einfache Weise. Die Genauigkeit schwankt zwischen ± 2 und $\pm 35\%$.

Aber auch Vertikalströmungen in einem Bohrloch können mit Hilfe radioaktiver Isotope gemessen werden. Dies geschieht in der Weise, daß in verschiedenen Tiefen Geiger-Müller-Zählrohre angebracht werden. Etwa in der halben Tiefe des Bohrloches wird ein radioaktives, wasserlösliches Isotop eingebracht, das dann zufolge der Vertikalströmung entweder nach oben oder unten strömt. Es muß also von einem der Detektoren angezeigt werden. Aus der Zeit, die vom Zeitpunkt des Einbringens des Isotopes bis zum Durchgang des Aktivitäts-Maximums verstreicht, kann man auch die Geschwindigkeit der Vertikalströmung messen. Die Menge des in vertikaler Richtung transportierten Wassers kann ebenfalls ermittelt werden, indem man bei Kenntnis der Ausgangsaktivitäten bzw. Impulszahlen die Aktivität an den Meßpunkten mißt und so die Verdünnung berechnen kann. Dies läßt einen Rückschluß auf die transportierte Wassermenge zu. Außerdem kann man bei Kenntnis des Bohrprofils auch das Abströmen in die verschiedenen wasserführenden Schichten verfolgen [2].

In vielen Fällen ist es aber auch von Bedeutung, die Richtung des Grundwasserstromes zu kennen. Auch diese kann aus einem einzigen Bohrloch ermittelt werden. Die dabei angewandte Methode [5] benutzt die Tatsache, daß sich ein radioaktiver Tracer in der Strömungsrichtung fortbewegen und bei geeigneter Wahl in den Grundwasserträger gelangen und dort adsorbiert werden muß. Bei Benutzung eines drehbaren Kolimators ist es dadurch möglich, die Richtung des Grundwasserstromes auf etwa 10° genau festzustellen.

Man erhält beim Auftragen der gefundenen Meßwerte in Polarkoordinaten bei einer Drehung des Kolimators um 360° eine Ellipse oder herzähnliche Kurve, deren Minimum für die Feststellung der Richtung des Grundwasserstromes charakteristischer ist als deren Maximum. Aus dieser Kurve kann aber auch die Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden [4].

Diese Aussagemöglichkeit stellt eine Kontrolle für die Geschwindigkeitsmessung nach der Verdünnungsmethode dar. Selbstverständlich sind auch hier gewisse Voraussetzungen zu beachten, damit entsprechende Adsorptionseffekte entstehen, die für eine eindeutige Messung unumgänglich notwendig sind.

C. Ergiebigkeitsbestimmungen

Aber auch die Bestimmung der Tiefe einer wasserführenden Schicht bzw. deren Porosität kann mit radioaktiven Isotopen erfolgen.

Mit der (n. n.)-Methode kann man über die ganze Bohrlochtiefe ein Feuchtigkeitsdiagramm ermitteln, das mit einem Porositätsdiagramm und teilweise auch mit der Permeabilität identisch ist.

Zu diesem Zweck werden von einem geeigneten Gerät schnelle Neutronen ausgesandt, die von den Wasserstoffkernen des Grundwassers abgebremst werden. Verwendet man einen Detektor, der nur thermische Neutronen anzeigt, so hat man aus den Impulsmessungen ein Maß für den Wassergehalt des Bohrloches. Allerdings ist zu beachten, daß wegen der Inhomogenität eines Grundwasserfeldes die so ermittelten Werte lediglich lokale Gültigkeit haben.

Verwendet man aber zwei Bohrlöcher, die einige 100 m voneinander entfernt sind, kann man über das dazwischenliegende Gebiet eine eindeutige Aussage erhalten, wenn man in das eine Bohrloch eine bekannte Menge eines radioaktiven Tracers einbringt und aus dem zweiten Bohrloch laufend eine konstante Menge Wasser abpumpt. Die laufend oder in geeigneten Intervallen erfolgende Messung der Radioaktivität des abgepumpten Wassers

gestattet so, eine Konzentrations-Zeitkurve aufzunehmen. Bei diesen Versuchen kann man die natürliche Fließgeschwindigkeit gegenüber der durch das Abpumpen verursachten Strömung vernachlässigen und so aus der Ankunftszeit des radioaktiven Tracers im zweiten Bohrloch und aus der Menge des abgepumpten Wassers die Tiefe aus der das Wasser aus dem Grundwasserträger entnommen wird bzw. bei bekannter Porosität die Ausdehnung des Wasserträgers berechnen aus der Formel

$$R = \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot D}} \cdot \sqrt{t}$$

wobei

R = Abstand der Bohrlöcher,

Q = abgepumpte Menge,

t = Zeit von der Injektion bis zum Eintreffen des Peaks im zweiten Bohrloch und

D = Tiefe des Wassers im Grundwasserträger bedeuten.

Im Falle des anisotropen Fließens des Grundwassers kann man unter Umständen mehrere Maxima in der Aktivitätszeitkurve erhalten. Diese Methode gestattet es auch, unter bestimmten Voraussetzungen die Mischprozesse im Boden zu studieren.

Wenn eine reversible Adsorption des Tracers im Boden stattfindet, wird der Peak mit einer Verspätung eintreffen. Bei irreversibler Adsorption kann nur mehr ein Teil des Tracers in der abgepumpten Wassermenge festgestellt werden [6, 7].

Falls in den verschiedenen Schichten des Grundwasserträgers verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten herrschen, kann natürlich im Entnahmebohrloch unter Umständen nur mehr ein Teil der injizierten Menge des radioaktiven Tracers wieder gefunden werden. Aber auch die Lage des Entnahmebohrloches im Hinblick auf die Strömungsrichtung des Grundwasserstromes ist für das Resultat der Messung von Bedeutung. Durch Zugabe des radioaktiven Tracers in regelmäßigen Intervallen kann man auch den gleichmäßigen Verlauf des Pumpversuches bzw. die Art der Wasserentnahme studieren.

D. Mengenummessung bei offenen Gerinnen

Die Verdünnungsmethode kann man auch zur Bestimmung der Wasserführung von Flüssen verwenden. Ebenso zur Bestimmung von Zu- oder Abflüssen, sollten sie nun ober- oder unterirdisch sein [8, 9, 10, 11]. Vergleiche mit konventionellen Methoden ergaben sehr gute Übereinstimmung [12].

Man kann dabei die Aktivität entweder direkt im Fluß durch Detektoren messen oder laufend Wasserproben entnehmen. Es stellte sich bei vergleichenden Versuchen heraus, daß die Entnahme von Wasserproben und deren nachträgliche Auswertung im Labor, wenn auch wesentlich zeitraubender, der direkten Messung an Genauigkeit überlegen ist.

Vielversprechend scheint auch die Methode zu sein, bei der eine direkte Messung der Radioaktivität des Wassers in einem Bypass erfolgt. Hier ist nur sicherzustellen, daß eine konstante Menge laufend abgepumpt wird.

Literaturnachweis

- [1] OGILWI, N. A.: Eine elektrolytische Methode zur Bestimmung der Filtergeschwindigkeit von unterirdischen Gewässern. Bulletin der wissenschaftlich-technischen Information Nr. 4 (16) des Min. für Wasserschutz und Geologie der UdSSR.
- [2] MOSER, H., NEUMAIER, F., & RAUERT, W.: Die Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie. „Atomkernenergie“, 1959, 1960, 1962.
- [3] KAUFMAN, W. J., & TODD, D. K.: Application of Tritium Tracer to Canal Seepage Measurements. Proceedings of the Symposium on the detection and use of tritium in the physical and geological science, IAEA, 1961.
- [4] TORRE, C.: Die Energieverteilung radioaktiver Isotope in der Grundwasserströmung. „Atomkernenergie“ 8, S. 226, 1963.
- [5] MAIRHOFER, J.: Bestimmung der Strömungsrichtung des Grundwassers in einem einzigen Bohrloch mit Hilfe radioaktiver Elemente. „Atompraxis“ 9, S. 1, 1963.
- [6] NIR, A., HALEVY, E. et al.: Research on the Use of Radioactive Isotopes in Hydrology. Report No. 1, Tahal Water Planning for Israel Ltd., P. N. 71, Sept. 1959.
- [7] HALEVY, E., & NIR, A.: Use of Radio-Isotopes in Studies of Groundwater Flow. Tahal Water Planning for Israel Ltd., P. N. 82, 1960.
- [8] HULL, D. E.: The Total-Count Technique: A New Principle in Flow Measurements, Int. J. appl. Rad. Isotopes 4, 1, 1958.
- [9] HULL, D. E.: Int. J. appl. Rad. Isotopes 7, 260, 1960.
- [10] HULL, D. E.: Dispersion and Persistence of Tracer in River Flow Measurements. Int. J. appl. Rad. Isotopes, 13, 63, 1962.
- [11] STRAUB, C. P., LUDZACK, F. J., HAGEE, G. R., & GOLDIN, A. S.: Time of Flow Studies, Ottawa River, Lima, Ohio. Trans. Am. Geoph. Union, 39, 420—426, 1958.
- [12] MOSER, H., & RAUERT, W.: Detection sensitivity and Detection Limits for Radioactive Isotopes used in Hydrology. Extract of publication No. 52 of the I. A. S. H. Commission of Subterrenean Waters, pp. 548—558.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. Dr. JOSEF MAIRHOFER, Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, WKS, Objekt 210, Wien III.