

Aktivierungsanalytischer Nachweis von Markierungsstoffen zur Verfolgung unterirdischer Gewässer

Von K. BUCHELA (Wien)

Prinzip der Methode

Die Aktivierungsanalyse ermöglicht den Nachweis von Indikatorsubstanzen, die zur Markierung dem Wasser zugesetzt wurden. Ein nichtradioaktives Material wird in eine Schwinde eingespeist. Aus den zu beobachtenden Quellen werden Wasserproben entnommen, die später in einem Atomreaktor mit Neutronen bestrahlt werden. Die bei der Bestrahlung induzierte Radioaktivität des Indikatorelementes wird qualitativ und quantitativ nachgewiesen. Für manche chemische Elemente ist die Methode sehr empfindlich, außerdem können mehrere Indikatorsubstanzen gleichzeitig eingesetzt und bestimmt werden. Allerdings sind für die Analysenmethode sehr aufwendige Einrichtungen, wie Atomreaktor oder Neutronengenerator und die erforderlichen Meßgeräte für Radioaktivität, erforderlich.

Radioaktivität

Der Übersichtlichkeit halber sollen nur jene Tatsachen, die für die im folgenden zu diskutierenden Probleme wesentlich sind, zusammengefaßt werden:

Radioaktive Substanzen emittieren verschiedene Arten von Strahlung oder Teilchen. Als Beispiele seien α -Teilchen (Heliumkerne), β -Teilchen (Elektronen) und γ -Strahlen (sehr kurzwellige elektromagnetische Wellen) genannt. Teilchen und Strahlung können mittels geeigneter Detektoren (Geiger-Müller-Zählrohre, Szintillationszähler) nachgewiesen und unterschieden werden. Für die Aktivierungsanalyse ist die Messung von β - und γ -strahlenden Substanzen wesentlich.

Aber nicht nur die Art der ausgesandten Teilchen bzw. Strahlung, sondern auch deren Energie ist für bestimmte radioaktive Substanzen charakteristisch. Auch zur Messung der Energie bzw. der Energieverteilung gibt es geeignete Meßinstrumente (Einkanalspektrometer,

Vielkanalspektrometer). Die Energie wird in Megaelektronvolt (MeV) gemessen. Die Energiemessung spielt vor allem bei der Messung von γ -strahlenden Substanzen eine Rolle.

Die Geschwindigkeit, mit welcher der radioaktive Zerfall der Atome einer Substanz erfolgt, wird durch eine Konstante charakterisiert, die als Halbwertszeit bezeichnet wird. Man versteht darunter jene Zeit, innerhalb der die Hälfte der radioaktiven Substanz zerfallen ist. Nach dieser Zeit wird auch nur mehr die halbe ursprüngliche Strahlungsintensität mit dem Detektor nachgewiesen.

Art, Energie und Halbwertszeit einer Strahlung können zur Charakterisierung einer radioaktiven Atomart, eines Radionuklids, herangezogen werden, da diese drei Kenngrößen nie für zwei Radioelemente gleich sind. Von allen chemischen Elementen gibt es radioaktive Isotope, und fast jeder der bekannten chemischen Grundstoffe kann durch geeignete Kernreaktionen in diese radioaktiven Formen übergeführt werden.

Zur Produktion von radioaktiven Stoffen werden die Atomkerne eines Elements mit Teilchen, wie Neutronen, Protonen, Deuteronen etc., beschossen. Dieses Beschießen mit Teilchen wird in Atomreaktoren (Neutronen) und Beschleunigern (geladene Teilchen) durchgeführt. Die Atomkerne reagieren mit diesen Teilchen und ergeben neue, meist radioaktive Kernarten. Die erhaltenen radioaktiven Produkte senden nun Strahlen bzw. Teilchen aus und sind durch geeignete Meßverfahren leicht nachweisbar.

Aktivierungsanalyse

Zur Aktivierung, d. h. Herstellung eines radioaktiven Isotopes mittels Kernreaktionen für Analysen, werden praktisch ausschließlich langsame (thermische) Neutronen verwendet. Neutronen stehen beim Betrieb eines Atomreaktors, wo sie bei der Spaltung des Urans frei werden, in genügender Menge zur Verfügung. Sie werden durch geeignete Moderatoren verlangsamt und können nun als thermische Neutronen mit zu diesem Zweck in den Reaktor eingebrachten Substanzen reagieren. Auf Abb. 1 sieht man eine schematische Darstellung eines Reaktors. Es handelt sich um den Reaktor des Atominstituts der Österreichischen Hochschulen (TRIGA MARK II). Man erkennt die Anordnung der Uranbrennstoffelemente, die Regelstäbe und Meßeinrichtungen sowie jene Vorrichtung, wo die Probenbehälter für die Bestrahlung eingebracht werden können. Sie werden durch ein Rohr in die Bestrahlungseinrichtung herabgelassen. Die Einrichtung ist um das „Core“, das Zentrum mit den Brennelementen, drehbar gelagert, so daß nach und nach alle 40 Positionen dieses Drehkranzes mit Proben beschickt werden können. Für kurze Bestrahlungszeiten und zur raschen Entnahme ist außerdem ein Rohrpostsystem eingebaut, das die Bestrahlungseinrichtung direkt mit einem Arbeitsplatz im Laboratorium verbindet. Der Reaktor wird bei einer Maximaldauerleistung von 250 kW

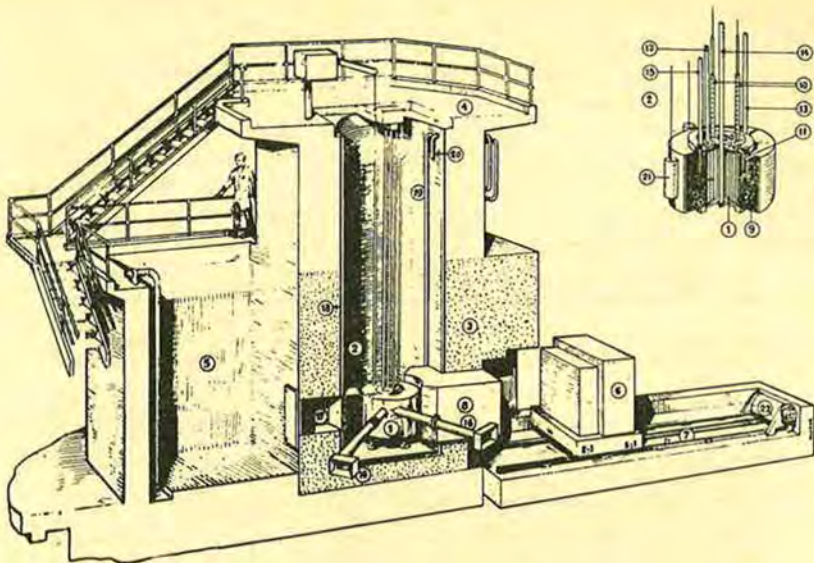


Abb. 1: Schematische Darstellung des Reaktors des Atominstutts der Österreichischen Hochschulen.

1 Reaktorcore; 2 Wasserbecken; 3 Beton-Abschirmung; 4 Bedienungs- und Bestrahlungsbecken; 5 Bestrahlungsbecken; 6 Betontor; 7 Schienen für Betontor; 8 Thermische Säule; 9 Graphit-Reflektor; 10 Regelstäbe; 11 drehbare Bestrahlungseinrichtung; 12 Rohrpost; 13 Beschickungsrohr; 14 zentrales Bestrahlungsrohr; 15 Antrieb zu 11; 16 waagrecht Strahlrohr; 17 Thermalisierungs-Säule; 18 Stahltank; 19 Kühlwasserzufuhr; 20 Kühlwasserabfluß; 21 Ionisationskammer; 22 Winde für 6.

betrieben. Der dabei in der erwähnten Bestrahlungseinrichtung herrschende Neutronenfluß kann mit $1,7 \cdot 10^{12}$ thermischen Neutronen $\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ angegeben werden. Weitere Einzelheiten des Reaktors sind für die hier zu diskutierenden Probleme ohne Bedeutung.

Durch Neutroneneinfang, und zwar durch den sogenannten (n,γ) -Prozeß werden Isotope des bestrahlten chemischen Elementes erhalten, deren Atomkerne in den meisten Fällen instabil sind und unter Emmission eines Teilchens oder γ -Quants zerfallen, d. h. radioaktiv sind.

Die Art, Energie und Halbwertszeit der Strahlung kann zur qualitativen Bestimmung herangezogen werden, die Intensität der Strahlung, meist gemessen in Zerfallereignissen pro Zeiteinheit, gibt Aufschluß über die Menge des bestrahlten Materials. Diese Gewichtsmenge könnte theoretisch bei genau bekannten Versuchsdaten formelmäßig berechnet werden. Wesentlich einfacher und auch genauer erweist sich der Vergleich mit gleichzeitig bestrahlten Testsubstanzen von genau bekannten Gewichtsmengen. Nach der Bestrahlung wird die Aktivität der Testsubstanz mit jener der zu analysierenden Probe verglichen.

Nun kann zur Verfolgung eines Wasserlaufes ein Material zugesetzt werden, das sich leicht aktivieren läßt, d. h. bei Neutronenbestrahlung ein radioaktives Produkt in guter Ausbeute liefert.

In Abb. 2 wird ein Überblick über die Nachweisempfindlichkeiten gegeben. Es sind nun vor allem jene Elemente interessant, die in Mengen von 10^{-9} — 10^{-11} g bestimmt werden können. Bei der Bestrahlung von 10 ml Wasserprobe entspricht dies einem Gehalt von 10^{-8} bis 10^{-10} ‰ an Indikatorelement bzw. einer Verdünnung von 1 : 10^{10} bis

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II	III	IV	V	VI	VII	0		
H															He		
Li	Be									B	C	N	O	F	Ne		
Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															

Lanthaniden

Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Aktiniden

Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm							
----	----	---	----	----	----	----	--	--	--	--	--	--	--

Empfindlichkeit der Aktivierungsanalyse

Die Schraffierungen entsprechen folgenden Empfindlichkeiten:

//// — von 10^{-8} bis 10^{-100} ‰; ≡ — von 10^{-7} bis 10^{-80} ‰;

\\\\ — von 10^{-6} bis 10^{-70} ‰; :::: — von 10^{-5} bis 10^{-60} ‰

Abb. 2: Nachweisempfindlichkeit der Aktivierungsanalyse für die verschiedenen Elemente nach (3).

1 : 10^{12} . Diese Empfindlichkeit ist vorteilhaft, da man in so einem Fall für Markierungen nicht allzu große Substanzmengen einspeisen muß. Gut nachweisbar sind u. a. die Elemente Lanthan, Scandium, Mangan, Gold, Indium und eine Reihe Seltener Erden. Die in der Abb. 2 angeführten Daten beziehen sich auf Forschungsreaktoren mit einem Neutronenfluß von etwa 10^{12} n cm^{-2} sec^{-1} . Die Bestrahlungszeiten der 10 ml Wasserproben liegen in Größenordnungen der Halbwertszeiten der gebildeten Radionuklide. Bei den angeführten geringen Konzentrationen ist nach der Bestrahlung eine Aufarbeitung nötig. Durch Vergrößerung des bestrahlten Probenvolumens bzw. durch Konzentrierung oder Anreicherung vor der Bestrahlung können noch geringere Indikatormengen erfaßt werden, doch ist durch das natürliche Vorkommen des Indikatormaterials in dem Gewässer gegebenenfalls eine Grenze gesetzt.

Anforderungen an die Methode

Es sollen nun die Bedingungen für die Anwendbarkeit eines aktivierungs-analytisch nachzuweisenden Markierungstoffes für Wasserläufe aufgezählt und Vorschläge zur Erfüllung dieser Bedingungen angeführt werden.

1. Die Substanz muß auch in geringen Konzentrationen gut nachweisbar sein. Aus der oben erwähnten Tabelle können geeignete Elemente ausgewählt werden.

2. Die Markierungssubstanz darf im zu untersuchenden Wasser nicht schon von Natur aus in störender Menge vorhanden sein. Dies kann durch eine Aktivierungsanalyse der unmarkierten Wasserprobe unschwer festgestellt werden. Es ist auch zu untersuchen, ob der natürliche Gehalt an Indikatorelement zeitlichen Schwankungen unterworfen ist.

3. Die verwendete Substanz soll nicht durch Ionenaustauschvorgänge aus der Lösung entfernt werden können. Hier kann man bei Kationen durch Anwendung geeigneter Komplexbildner den Kationenaustausch erschweren. Vielfach wird man Äthylendiaminotetraessigsäure bzw. deren Natriumsalz (Komplexon-III) anwenden. So konnte T. PAPADIMITROPOULOS (1) mit einem äthylendiaminotetraessigsäuren Komplex des Indiums Untersuchungen über Grundwasserströmungen durchführen. Auch die Verwendung von anionisch vorliegenden Markierungstoffen wie z. B. Bromid in Form von Ammoniumbromid brachte bei früheren Versuchen im Grazer Buchkogelgebiet gute Ergebnisse (2).

4. Das angewendete Element soll nicht toxisch sein. Dieser Gefahr wird man wohl kaum begegnen, da die Markierungsstoffe üblicherweise in sehr geringen Konzentrationen auftreten werden.

5. Das Material soll für den Versuch nicht zu kostspielig sein. Dies kann für eine Reihe von Seltenen Erden zutreffen, so daß diese für Großversuche, wo Mengen von über 100 g benötigt werden, bis auf über öS 10.000.— zu stehen kommen. Ammoniumbromid oder Mangansulfat kosten hingegen unter öS 10.— pro 100 g.

6. Der volums- und gewichtsmäßige Aufwand bei der Einspeisung soll gering sein. Dies kann durch Wahl eines geeigneten leicht aktivierbaren Elements erreicht werden. Es ist günstig, die Substanz bereits in Lösung einzuspeisen.

7. Die Probenahme soll wenig Aufwand erfordern. Wie schon erwähnt, genügen 10 ml zur Aktivierungsanalyse. Man kann also zahlreiche Proben ziehen, ohne anschließend schwere Lasten transportieren zu müssen.

8. Die Analyse der Proben schließlich soll rasch und genau mit geringem Aufwand möglich sein. Alle diese Bedingungen kann die Aktivierungsanalyse nicht erfüllen. Zur Analyse ist ein Radiochemielabor und ein Atomreaktor nötig. Dies bedeutet einen sehr großen Aufwand. Die Bestimmungen können wohl empfindlich und ziemlich genau durchgeführt werden, aber die Resultate können keinesfalls schon während der Feldarbeit erhalten werden.

Praktische Durchführung der Versuche

Der aktivierte Markierungsstoff kann nicht immer ohne weiteres sofort nach der Bestrahlung quantitativ bestimmt werden. Dies ist verständlich, da ja bei der Neutronenbestrahlung im Reaktor praktisch von allen im Wasser vorliegenden Ionen radioaktive Isotope gebildet werden. Die aktivierte indizierte Probe zeigt eine höhere Radioaktivität als eine entsprechende nicht indizierte aktive Probe. Die Differenz der Aktivitäten erlaubt Rückschlüsse auf die Menge des Indikators. Allerdings ist die Aktivität der nicht indizierten Probe bereits beträchtlich, so daß geringe Mengen des Indikators wegen der kleinen Aktivitätsunterschiede schlecht nachgewiesen werden können. Außerdem können Schwankungen in der Zusammensetzung der Grundkomponenten der Probe zu ungenauen, unbrauchbaren Resultaten und somit zu Fehlschlüssen führen. Der radioaktive Markierungsstoff muß neben einer Vielzahl von anderen strahlenden Materialien spezifisch bestimmt werden. Dazu ist oft eine Aufarbeitung der bestrahlten Wasserproben bzw. ein geeignetes Meßverfahren nötig.

Abtrennung des aktiven Indikators

Eine rasche und einfache Abtrennung kann durch Extraktion erfolgen. Auch spezifische Fällungen können rasch zum Ziel führen. Vor der Abtrennung wird man immer unbestrahlten inaktiven Markierungsstoff als sogenannten Träger zusetzen, um das in geringster Konzentration vorliegende aktive Material bequem und weitgehend verlustlos handhaben zu können. Vorschriften für die spezifische Abtrennung der verschiedensten Elemente aus neutronenbestrahlten Proben finden sich in der entsprechenden chemischen Fachliteratur (vgl. 3). Die Verfahren sind in den Einzelheiten von Element zu Element verschieden und praktisch immer auf geringen Aufwand an Zeit und Arbeit zugeschnitten. Eine Abtrennung kann in vielen Fällen in einigen Minuten durchgeführt werden, falls auf extreme Reinigungsoperationen verzichtet werden kann.

Gammaskopmetrischer Nachweis des Indikators in der Wasserprobe

Eine weitere Möglichkeit, die Störungen bei der Messung des Indikators weitgehend auszuschalten, ist durch die Spektrometrie der vom radioaktiven Material ausgesandten γ -Strahlung gegeben. Dazu werden die Strahlungsintensitäten bei den verschiedensten Strahlungsenergien registriert; die im gemessenen γ -Spektrum erhaltenen Maxima sind für die verschiedenen Radionuklide charakteristisch. Dies soll am Bei-

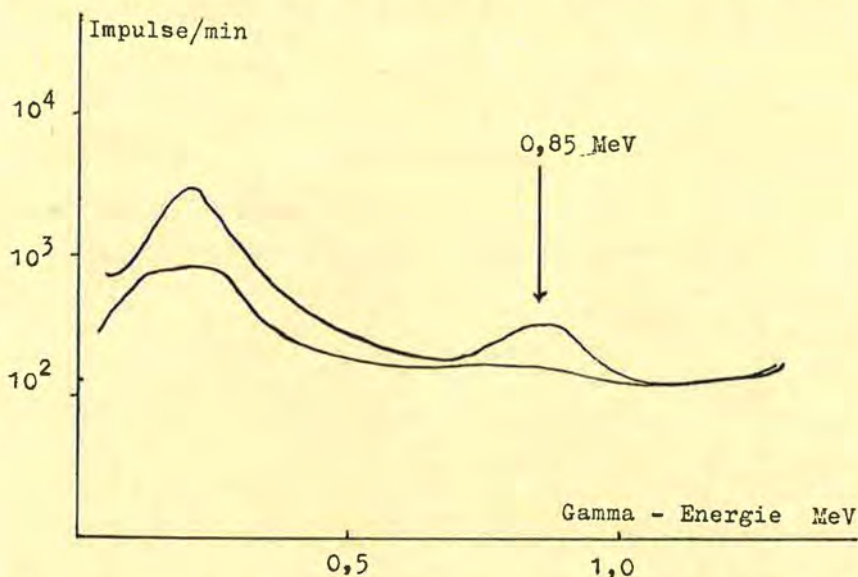


Abb. 3: Neutronenbestrahlte Hammerbachproben ohne (A) und mit (B) Mangan als Indikator im Bereich von 0—1 MeV. Das Maximum bei 0,35 MeV in Kurve B ist auf die γ -Strahlung des Mangan-56 zurückzuführen.

spiel von Mangan und Brom als Indikatoren erläutert werden. Abb. 3 zeigt ein γ -Spektrum einer neutronenbestrahlten Wasserprobe aus dem Hammerbach. Hierzu wurden 10 ml der Probe 3 Stunden im Reaktor bestrahlt und nach einer Abklingzeit von 2 Stunden 1 Minute lang gemessen (A). Das gleichzeitig abgebildete Spektrum B wurde durch Aktivierung einer Wasserprobe erhalten, die mit Mangan markiert war. Die 10 ml dieser Probe enthalten $0,1 \mu\text{g}$ Mangan. Der Unterschied in den Spektren ist deutlich erkennbar. Bei den Registriervorgängen

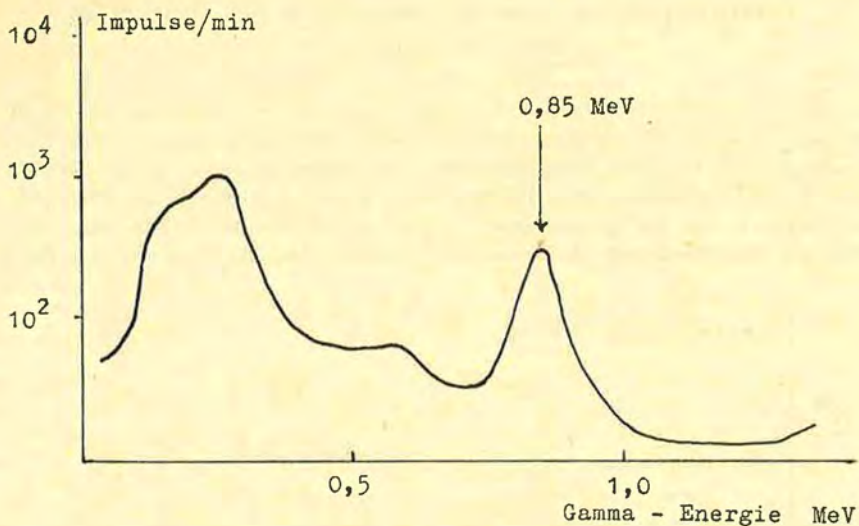


Abb. 4: *Gammastrahlungsspektrum von Mangan-56 im Energiebereich 0—1 MeV.*

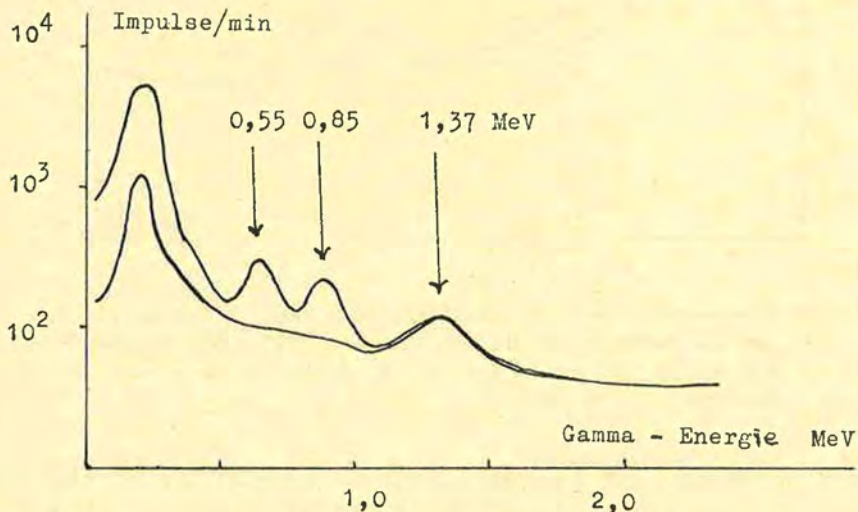


Abb. 5: *Neutronenbestrahlte Hammerbachproben mit Zusatz von Brom und Mangan. Zuordnung der Maxima: 0,55 MeV . . . Brom-82
0,85 MeV . . . Mangan-56
1,37 MeV . . . Natrium-24
Natrium-24 entsteht aus dem in Quellwässern immer enthaltenen natürlichen Natrium-23.*

des Meßgerätes können aufeinanderfolgende Messungen addiert oder subtrahiert werden. Führt man zuerst die Messung der indizierten Probe durch und speichert anschließend eine Messung der nicht indizierten aktiven Mischung mit negativem Vorzeichen ins Gedächtnis des Gerätes, so erhält man als Differenz das Spektrum des reinen Indikators, welches in Abb. 4 dargestellt ist. Es können auch mehrere Indikatorsubstanzen nebeneinander nachgewiesen werden. Abb. 5 zeigt die Spektren einer im Laboratoriumsversuch mit Brom und Mangan markierten Probe des Hammerbachs im Vergleich zur nicht indizierten Probe. Man erkennt die dem Brom und dem Mangan zuzuordnenden Maxima (3).

Eine quantitative Auswertung wird bei der γ -Spektrometrie durch Bestimmung der Fläche unter dem Energiemaxima vorgenommen. Ein Vergleich mit Testproben bekannten Indikatorgehaltes ist erforderlich.

Notwendige Vorarbeiten für die Anwendung der aktivierungsanalytischen Methode

Soll ein Wasserlauf aktivierungsanalytisch untersucht werden, empfiehlt es sich, zuerst eine nicht indizierte Wasserprobe zu aktivieren, um aus den Eigenschaften dieser Probe die nötigen Werte für die Wahl eines geeigneten Indikators zu erhalten. Man wird eine Indikatorsubstanz wählen, die in der ursprünglichen Wasserprobe nicht oder nur in geringster konstanter Menge enthalten ist und deren charakteristische Strahlungsenergien sich nicht mit jenen der aktivierten Wasserprobe decken. Dann wird man die geringste nachweisbare Menge aus einer Verdünnungsreihe ermitteln, um Aussagen über den Versuchsfehler und die Empfindlichkeit machen zu können und auch eine Abschätzung der nötigen Einspeismenge zu ermöglichen. Werden mehrere Substanzen angewendet, soll ein einwandfreier Nachweis nebeneinander möglich sein. Wenn nötig und möglich, soll durch einen Laborversuch bewiesen werden, daß bei den gewählten Bedingungen kein Adsorptionsfehler auftritt. T. PAPADIMITROPOULOS (1) läßt dafür eine Probe des Indikatormaterials über eine Säule fließen, die mit Bodenmaterial aus dem zu untersuchenden System gefüllt ist.

Grenzen der aktivierungsanalytischen Methode

Wie schon erwähnt, ist durch die Auswertung die Methode an die Mitarbeit besonders eingerichteter Institute gebunden. Außerdem wird sie nur dann angewendet werden können, wenn die Ergebnisse nicht schon während des Versuches erhalten werden müssen bzw. die Resultate nicht an Ort und Stelle ermittelt zu werden brauchen.

Vorteile gegenüber anderen spurenanalytischen Verfahren

Gegenüber allen anderen chemischen Analysenverfahren hat die beschriebene Methode den Vorteil, daß nach der Neutronenbestrahlung beim Hantieren im Laboratorium, bei der Zugabe von Reagentien usw. eingebrachte Verunreinigungen nicht mit erfaßt werden, da nur radioaktives Material bestimmt wird. Nur bei der Probennahme und beim Umfüllen in die Bestrahlungsgefäße besteht die Gefahr des Einschleppens unerwünschter Materialien, die anschließend aktiviert werden.

Strahlenschutz

Ein Hantieren mit radioaktivem Material und somit jegliche Strahlengefährdung bei der Feldarbeit fällt weg. Für die Analyse muß ein entsprechend eingerichtetes Labor zur Verfügung stehen.

Literatur

- (1) PAPADIMITROPOULOS, T.: Persönliche Mitteilung.
- (2) BUCHELA, K., J. MAIRHOFER, V. MAURIN, T. PAPADIMITROPOULOS & J. ZÖTL: Vergleichende Untersuchungen an neueren Methoden zur Verfolgung unterirdischer Wässer. Die Wasserwirtschaft, **54**, 9, Stuttgart 1964.
- (3) Unterlagen für die Aktivierungsanalyse:
NICHEJEW, L. M. & N. B. MICHEJEW: Radioaktive Isotope in der analytischen Chemie. Akademie-Verlag, Berlin 1962.
SCHULZE, W.: Neutronenaktivierung als analytisches Hilfsmittel. F.-Enke-Verlag, Stuttgart 1962.
Rapid chemical repartitions. NAS-NS 3104.
RAKOW, A.: Tabelle zur Identifizierung unbekannter Gammastreuen. K.-Thimig-Verlag, München 1962.
HEATH, R. L.: Scintillation Spectrometry. Philips Petroleum Company 1964.

Summary

By irradiation with thermic neutrons in the atomic reactor, radioactive isotopes can be generated of most elements by (n, γ) reaction. Radionuclides differ in kind, energy, and half-life of radiation emitted. Thus, given certain prerequisites, qualitative as well as quantitative analysis is possible. By means of this analysis, many elements can be determined even when present in minimum quantities.

An element used as indicator for the tracing of subterranean waters should fulfil the following requirements for activation-analytical demonstration:

The material used should be easy to activate; i. e. it should be determinable even in lowest concentration (under $10^{-10}\%$).

The indicator should not of nature be present in disturbing concentrations in the water investigated.

It must be possible to establish unambiguously its presence besides the substances contained and activated in the water by the irradiation. Where necessary, clean and quick separation should be possible.

The substance used should not be too expensive.

It must not be poisonous.

The element that is to be activated must not be absorbed by the soil. Therefore anions are used or complex compositions that are not kept to the soil by ion-exchange.

Several indicators can be used simultaneously. The demonstration can be conducted γ -spectrometrically or on separation.

As radioactive material is generated in the reactor only after the collection of the samples, field work involves no handling of active material.

Problems of half-life can be disregarded. The disadvantage is that expensive apparatuses are needed for the exploitation.

Résumé

On peut former des isotopes radio-actifs de la plupart des éléments par une réaction n, γ en les exposant dans le réacteur à des radiations de neutrons thermiques. Les radio-nuclides se distinguent entre eux par l'énergie et la période de la radiation qu'ils émettent. Ainsi, dans certaines conditions, une analyse qualitative et quantitative est possible. De nombreux éléments peuvent être déterminés grâce à cette analyse par activation même lorsqu'ils ne se présentent qu'en quantités minimes.

Un élément employé comme indicateur destiné à suivre des courants d'eau souterraines devrait satisfaire aux conditions suivantes si l'on envisage une analyse par activation:

La substance employée doit être facilement activable, c'est-à-dire qu'elle doit se prêter à la détection, même à des concentrations très faibles (au-dessous de 10^{-10}).

Il faut que, dans l'eau examinée, l'indicateur ne soit pas présent à des concentrations trop élevées.

Il faut qu'une détermination précise soit possible, indépendamment des substances se trouvant dans l'eau qui, à la suite de l'irradiation ont été rendues actives. Le cas échéant, une séparation totale et rapide doit être possible.

Le prix de la substance utilisée ne doit pas être trop élevé.

Elle ne doit pas être toxique.

L'élément à rendre actif ne doit pas être adsorbé dans le sol. C'est pourquoi on se sert d'anions ou de composés complexes qui ne sont pas retenus dans le sol par l'échange d'ions.

Il est possible d'utiliser plusieurs indicateurs simultanément. La détection peut être effectuée par spectrométrie — γ ou après séparation.

Comme la production de la matière radio-active ne se fait dans le réacteur qu'après l'échantillonnage, et comme celle-ci est élaborée au laboratoire on n'opère pas sur le terrain avec de la matière active. Chaque fois que l'emploi de matières radioactives s'interdit en raison des risques d'irradiations, il n'y a pas d'inconvénient à utiliser la méthode d'analyse par activation.

Puisqu'on n'utilise pas des matières radio-actives les problèmes de la période de radioactivité sont sans importance. L'inconvénient est que pour l'exploitation il faut des appareils coûteux et que les résultats ne peuvent être obtenus que longtemps après la fin de l'expérience.

Diskussion

H. MOSER: Können Sie uns sagen, wie Sie die Arbeiten mit der Aktivierungsanalyse in offenen Gerinnen beurteilen?

K. BUCHTELA: Die Aktivierungsanalyse hat für offene Gerinne keinen Sinn, wenn eine große Durchflußmenge vorhanden ist. Sie wird mit der Indizierung der radioaktiven Materialien nicht Schritt halten können. Allerdings wird durch die Verunreinigung Möglichkeit gegeben, aktivierungsanalytisch zu arbeiten, wenn man eine schon im Wasser vorhandene Verunreinigung als aktivierungsanalytischen Tracer nehmen kann. Vielleicht wäre es sogar möglich, eine aktivierungsanalytische Verfolgung ohne Indikator zu machen.

J. ZÖTL: Es wäre noch eine Möglichkeit zu erwähnen, die Verfolgung des Austausches von Grundwasser und Flußwasser. Diese Frage ist bei Kraftwerksbauten und beim Aufstau von Flußwässern allgemein von eminenter Bedeutung. Es wäre daran zu denken, daß bei der aktivierungsanalytischen Methode Materialien, die sich schon im Fluß befinden, in so geringen Mengen festgestellt werden können, daß der Nachweis des Eintretens von Flußwasser in das Grundwasser mit großer Genauigkeit möglich sein müßte.