

6.2 Isotope im Wasserkreislauf

Einleitung

Die meisten chemischen Elemente bestehen aus einem Gemisch stabiler und radioaktiver Isotope, die sich durch die Anzahl der im Atomkern vorhandenen Neutronen voneinander unterscheiden. Dieser Massenunterschied bewirkt eine sogenannte Isotopenfraktionierung während physikalisch-chemischer Prozesse, wobei die leichten Isotope generell besser mobilisiert werden. Die Isotopenverhältnisse zwischen Sauerstoff-18 und Sauerstoff-16 einerseits ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, Sauerstoff mit 10 resp. 8 Neutronen) sowie zwischen Deuterium und Wasserstoff ($^2\text{H}/^1\text{H}$, Wasserstoff mit 1 resp. 0 Neutron) andererseits, sind von besonderer Bedeutung für die Untersuchung von Isotopenfraktionierungs-Prozessen im Wasserkreislauf. Das Isotopenverhältnis zwischen Tritium und Wasserstoff ($^3\text{H}/^1\text{H}$, Wasserstoff mit 2 resp. 0 Neutronen) gibt Informationen über die Grundwasser-Verweilzeit. Diese Isotope sind in allen Wässern vorhanden und eignen sich deshalb als natürliche Tracer besonders gut für die Untersuchung hydrologischer Phänomene.

Die stabilen Isotope des Wassermoleküls

Auf eine Million Wassermoleküle (das sind ebenso viele Sauerstoffatome und doppelt so viele Wasserstoffatome) beobachtet man im Mittel 2000 Sauerstoff-18-Atome und 300 Deuterium-Atome. Diese mittlere Zusammensetzung ändert sich jedoch durch die Isotopenfraktionierung bei Phasenübergängen. So gehen während der Verdunstung bevorzugt Wassermoleküle mit leichten Isotopen in die Gasphase über. Das übrigbleibende Wasser wird mit schweren Isotopen angereichert. Im gegenteiligen Fall, bei der Kondensation von Wasserdampf, reichern sich die schweren Moleküle bevorzugt im Kondensat an: Die Dampfphase verarmt an schweren Isotopen. Zwischen den relativen Isotopengehalten des Sauerstoff- und Wasserstoffisotops besteht eine lineare Korrelation (Fig. 7). Die Punkte ordnen sich entlang einer für die untersuchte Region charakteristischen Geraden an, der sogenannten Niederschlagsgeraden. Abweichungen von dieser Niederschlagsgeraden können auf verschiedene Prozesse hinweisen, wie etwa Verdunstung vor der Infiltration oder Austauschprozesse zwischen Wasser und Gestein (z.B. von Thermalwässern).

Die sehr geringen Variationen des Gehaltes an stabilen Isotopen werden mittels Massenspektrometrie gemessen. Die Isotopenverhältnisse werden als Deltawert (δ) ausgedrückt, welcher die relativen Abweichungen in Promille einer Wasserprobe vom internationalen, auf das Ozeanwasser bezogenen Standard beschreibt (VSMOW, s. Kartenlegende). Die Mehrzahl der an der Erdoberfläche vorhandenen Wässer ist durch Verdunstung aus diesem ozeanischen Reservoir entstanden und deshalb verglichen mit dem Standard an schweren Isotopen abgereichert (negativer δ -Wert).

Klimatische Variationen

Die Isotopenfraktionierung während Phasenübergängen ist stark temperaturabhängig, was einen Jahresgang der Isotopenverhältnisse in den Niederschlägen zur Folge hat (Fig. 3): Im Sommer sind die Niederschläge an Sauerstoff-18 angereichert, während sie im Winter bei allgemein tieferen Temperaturen abgereichert sind. Diese Saisonalität ist in Oberflächengewässern und Grundwässern wegen der Durchmischung weniger ausgeprägt (s. Karte). Die jährliche Verteilung der Isotopenverhältnisse während der letzten drei Jahrzehnte variiert zwar stark von Jahr zu Jahr (Fig. 2); sie zeigt aber einen generellen Trend zu einer Anreicherung schwerer Isotope (Fig. 1). Dies könnte entweder mit einer globalen Erwärmung oder mit einer veränderten Herkunft des Niederschlagswassers in Zusammenhang stehen. Eine Variation der Isotopenverhältnisse zeigt sich auch während eines einzelnen Niederschlagsereignisses (Fig. 6), was in diesem Fall mit der fortschreitenden Abreicherung der Wolkenmassen an schweren Isotopen während der Fortbewegung der Kalt- oder Warmfront zusammenhängt. Die Niederschläge aus den zentralen Bereichen der Wolkenmassen auf der Rückseite einer Front sind typischerweise an schweren

Isotopen abgereichert. Die mittleren Isotopenverhältnisse der Messstation Locarno-Monti zeigen ebenfalls eine Beeinflussung durch regionale Verhältnisse (Fig. 1); die Deltawerte nahe bei Null spiegeln die mediterrane Herkunft des Niederschlagswassers und das milde Klima wider.

Höheneffekte

Steigt eine Wolkenmasse entlang eines Gebirgsreliefs auf, so nimmt der Gehalt an schweren Isotopen im kondensierenden Wasser mit der Höhe allmählich ab (Profil Meiringen – Guttannen – Grimsel, Fig. 1). Dies hängt mit dem Rückgang der Kondensationstemperatur bei abnehmendem Luftdruck zusammen sowie mit anderen weniger wichtigen Phänomenen wie zum Beispiel der Verdunstung der Regentropfen während des Fallens. Trotz der Vielfältigkeit der beeinflussenden Faktoren weisen die stabilen Isotope eine mehr oder weniger lineare Höhenabhängigkeit auf (Fig. 4). Sie eignen sich deshalb gut zur Bestimmung der mittleren Infiltrationshöhe bei Einzugsgebieten im Gebirge (Fig. 12). Dabei müssen allerdings auch die saisonale Abhängigkeit der Isotopenverhältnisse in den Niederschlägen sowie die räumlichen und zeitlichen Variationen der Höhenabhängigkeit mitberücksichtigt werden (Fig. 4,5). Im allgemeinen genügen Isotopenanalysen an monatlichen Sammelproben; die Beprobungsfrequenz und die Messstandorte sollten jedoch der zu lösenden Fragestellung und dem dafür vorhandenen Budget angepasst werden. Unterschiede in den Isotopenverhältnissen können zur Komponententrennung bei Hochwasser beigezogen werden. So ist Flusswasser wegen des meist höher gelegenen Einzugsgebietes gegenüber den lokalen Niederschlägen oder gegenüber dem Grundwasser häufig an schweren Isotopen abgereichert (Fig. 11).

Das radioaktive Isotop des Wassermoleküls

Tritium ist das einzige radioaktive Wasserstoffisotop. Es ist instabil und zerfällt unter Abgabe eines Elektrons mit einer Halbwertszeit von 12.43 Jahren. Diese β -Strahlung erlaubt die Messung der in natürlichen Wässern sehr kleinen Tritiummengen mittels eines Szintillationszählers. Die Tritiumkonzentration wird in Tritium-Einheiten angegeben (TU, s. Kartenlegende).

In der Atmosphäre wird natürliches Tritium durch die Einwirkung kosmischer Strahlung auf Stickstoffatome gebildet. Der grösste Anteil des gegenwärtig vorhandenen Tritiums ist jedoch anthropogenen Ursprungs. Zwischen 1952 und 1963 wurde die Tritiumradioaktivität der Niederschläge durch Kernwaffenversuche in der Atmosphäre um einen Faktor 1000 erhöht. Seit 1963, dem Jahr der Unterzeichnung eines Verbots für atmosphärische Atomwaffentests, nimmt die Tritiumkonzentration stetig ab (Fig. 8).

Heute hat der zivile industrielle Gebrauch von Tritium die militärische Verwendung abgelöst (Fig. 8). Gewisse Industrieregionen der Schweiz weisen deshalb erhöhte Emissionen auf, so der Jura (Uhrenindustrie) sowie die Regionen von Bern und Teufen im Kanton Appenzell (Fabrikation von Tritiumgas-Leuchtquellen). Die Atomkraftwerke Gösgen, Leibstadt, Beznau und Mühleberg sowie das Paul Scherrer Institut (PSI, Villigen, Kanton Aargau) produzieren ebenfalls grössere Mengen an anthropogenem Tritium. Diese industriellen Quellen führen zu erhöhten Tritiumkonzentrationen im Wasserkreislauf vor allem in unmittelbarer Nähe der erwähnten Anlagen [14]. Im Abstrom von älteren Deponien mit Haushalt- und Industrieabfällen können die oft erhöhten Tritiumkonzentrationen (aus der Zeit vor der Strahlenschutzverordnung StSV vom 22. Juni 1994 stammend) als Tracer für die Verschmutzung des Grundwassers verwendet werden (Fig. 10).

Bestimmung der Grundwasser-Verweilzeit

Für eine nachhaltige Nutzung der Grundwasserreserven sind auch Kenntnisse zum Alter der Grundwasservorkommen notwendig. Die Tritiumkonzentration eignet sich besonders gut zur Datierung von Grundwässern, die maximal einige Jahrzehnte alt sind. Dabei wird die Veränderung der Tritiumkonzentrationen im Grundwasser mit Mischungsmodellen simuliert. Figur 9 gibt eine Übersicht über die dazu notwendigen Arbeitsschritte.

Das eidg. Isotopen-Beobachtungsnetz

Die Landeshydrologie und -geologie (LHG) betreibt seit 1992 in Zusammenarbeit mit der Universität Bern (Physikalisches Institut) und der Universität Lausanne (Institut für Mineralogie und Petrographie) ein Isotopen-Beobachtungsnetz, das der Praxis Messdaten zugänglich macht, welche als Referenz für die Interpretation von Isotopendaten dienen [10,11]. Die Isotopenmessungen werden in den zwei erwähnten Universitätsinstituten durchgeführt. Im Messnetz sind auch die Stationen integriert, die für das weltweite Messnetz der Internationalen Atomenergie-Agentur (IAEA) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) verwendet werden (teilweise in Betrieb seit 1966). Das eidg. Isotopen-Beobachtungsnetz umfasst zur Zeit 18 Messstationen, davon 11 für die Beobachtung der Niederschläge, 6 für die Beobachtung der Fließgewässer und eine neu integrierte Station für die Beobachtung des Grundwassers (Quelle Lutry in der Oberen Meeresmolasse / Burdigalien des Jorat, Station des GEOLEP). Alle Daten werden in der LHG zentral verwaltet und den interessierten Kreisen zur Verfügung gestellt. Eine Expertengruppe («Isotope und Umwelt») unter der Leitung der LHG begleitet den Betrieb des Messnetzes. Die Landeshydrologie und -geologie hat zudem in Zusammenarbeit mit der Eidg. Technischen Hochschule Lausanne (GEOLEP) ein Inventar der wichtigsten Stationen zur Beobachtung der Isotope für den Zeitraum von 1986–1998 erstellt (s. Karten, Tabelle). Dieses Inventar kann bei der LHG konsultiert werden (CDS, Catalogue of Data Sources).

Schlussbemerkungen

Die Isotope von Wasserstoff und Sauerstoff sind nicht die einzigen, mit denen in der Hydrologie gearbeitet wird, so werden auch Isotope von Kohlenstoff, Schwefel, Stickstoff, Blei, Uran, Thorium, Strontium, Argon, Radon und Krypton verwendet. Erstere sind jedoch ein integraler Teil des Wassermoleküls und somit die einzigen wirklich konservativen Tracer im Wasser. Die Hydrogeologie und die Hydrologie verfügen mit den Isotopenmethoden über ein sehr leistungsfähiges und vielseitiges Arbeitsinstrument, dessen Anwendungsmöglichkeiten weit über die oben erwähnten Beispiele hinausgehen [1,2]. Die vorliegende Arbeit wurde im Auftrag und mit Unterstützung der LHG (J.-P. Tripet, P. Buttet, D.A. Grasso, T. Herold und R. Kozel) realisiert. Die Expertengruppe «Isotope und Umwelt» trug mit ihrer kritischen Durchsicht und mit zahlreichen Vorschlägen zur Verbesserung der Tafel bei.

Literatur

- [1] **Clark, I., Fritz, P. (1997):** Environmental isotopes in hydrogeology. New York.
- [2] **Etcheverry, D. (1997):** Valorisation des méthodes isotopiques dans la pratique de l'hydrogéologie (oxygène-18, deutérium, tritium). Rapport interne du GEOLEP (EPF de Lausanne) pour le Service hydrologique et géologique national, Berne.
- [3] **Etcheverry, D., Parriaux, A. (1998):** Les méthodes isotopiques dans la pratique de l'hydrogéologie. In: Gas–Wasser–Abwasser 1/98:10–17, Zürich.
- [4] **Etcheverry, D., Perrochet, P. (1999):** Reservoir theory groundwater transit-time distributions and lumped parameter models. In: International Atomic Energy Agency (Ed.): Proc. Int. Symp. Isotope Techniques in Water Resources Development and Management, 10–14 May, Vienna (CD-ROM), Wien.
- [5] **Etcheverry, D., Perrochet, P. (2000):** Direct simulation of transit-time distributions using the reservoir theory. In: Hydrogeology Journal 8:200–208, Berlin, Heidelberg.
- [6] **Iorgulescu, I. (1997):** Analyse du comportement hydrologique par une approche intégrée à l'échelle du bassin versant. Application au bassin versant de la Haute-Mentue, Thèse no. 1613 de l'EPFL, Lausanne.

- [7] **Kissling, O. (1998):** Anwendung und Evaluation verschiedener Methoden im Rahmen der Voruntersuchungen belasteter Standorte am Beispiel zweier ehemaliger Deponien im Aaregäu (SO). Dissertation Nr. 12754 der ETHZ, Zürich.
- [8] **Maréchal, J.-C. (1998):** Les circulations d'eau dans les massifs cristallins alpins et leurs relations avec les ouvrages souterrains. Thèse no. 1769 de l'EPFL, Lausanne.
- [9] **Rozanski, K., Araguas-Araguas, L., Gonfiantini, R. (1993):** Isotopic patterns in modern global precipitation. In: Swart, P.K. et al. (Eds.): Climate Change in Continental Isotopic Records, Geophysical Monograph Series 78/1993:1–36, Washington.
- [10] **Schotterer, U. et al. (1995):** Isotope im Wasserkreislauf. Ein neues eidgenössisches Messnetz. In: Gas–Wasser–Abwasser 9/95:714–720, Zürich.
- [11] **Schotterer, U. et al. (2000):** Das Schweizer Isotopen-Messnetz: Trends 1992–1999. In: Gas–Wasser–Abwasser 10/2000:733–741, Zürich.
- [12] **Stichler, W., Schotterer, U. (2000):** From accumulation to discharge: modification of stable isotopes during glacial and post-glacial processes. In: Gibson, J.J., Prowse, T.D. (Eds.): Hydrological Processes Special Issue: Isobalance, Vol. 14/8:1423–1438, New York.
- [13] **Vitvar, T. (1998):** Water residence times and runoff generation in a small prealpine catchment (Rietholzbach, Northeastern Switzerland). Dissertation Nr. 12298 der ETHZ, Zürich.
- [14] **Völkle, H., Neu, A., Weimer, S. (1995):** Altlast Tritium? Tritium aus industriellen Anwendungen in der Umwelt: Messungen in Süddeutschland und in der Schweiz. In: Strahlenschutzpraxis 3/95:30–35, Köln.