

Untersuchung hydrodynamischer Prozesse eines Karstsystems unter Verwendung natürlicher und künstlicher Tracer

F. Einsiedl, W. Stichler, P. Maloszewski

GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH, Institut für Hydrologie – IfH, Ingolstädter Landstraße 1, D-85764 Neuherberg; E-mail: einsiedl@gsf.de

Einleitung und Zielsetzung

In weiten Teilen der Welt dienen Karstaquifere der Trinkwasserversorgung. Annähernd 25 % der Weltbevölkerung beziehen ihr Trinkwasser aus Karstaquiferen (FORD & WILLIAMS, 1989).

Auf Grund der hydraulischen Eigenschaften derartiger Grundwasserleiter entsteht aber ein weitreichender Nutzungskonflikt zwischen der Trinkwassergewinnung und der Landnutzung. Bei intensiver Verkarstung ist das Karstsystem geprägt durch Dolinen, Schwinden oder offene Karstspalten. Im Untergrund prägen linear angelegte Lösungshohlräume, geringfügig korrosiv erweiterte Klüfte aber auch eine Eigenporosität des Gesteins die Grundwasserbewegung. Diese Karstformen begünstigen eine rasche Infiltration von Niederschlag und führen zum Teil zu hohen Fließgeschwindigkeiten im Untergrund. Daraus ergibt sich für Karstaquifere ein hohes Gefährdungspotential gegenüber Kontaminationen.

Markierungen mit natürlichen und künstlichen Tracern können Aufschluss über die hydrodynamischen Prozesse des unterirdischen Abflusssystems geben. Bei einer Interpretation von Tracer-durchgangskurven im Karst sind auch bei monomodalen Durchgangskurven mehrere individuelle Fließpfade in der vadosen und gesättigten Zone in Betracht zu ziehen (BEHRENS et al., 1997) sowie Austauschprozesse zwischen Matrix- und Kluftwasser (MALOSZEWSKI & ZUBER, 1993) in die Auswertung einzubeziehen. Letztere legen Ergebnisse von am IfH laufenden Untersuchungen zu direkten Abflusskomponenten im Karst der Frankenalb und ihrem Anteil am Gesamtabfluss während Niederschlagsereignissen nahe. Dieser komplexe Sachverhalt – eine Überlagerung von Fließwegen in der Schicht-

und Massenfazies sowie diffusive Prozesse zwischen mobilem Kluftwasser und immobilem Wasser der Matrix - soll in einem Multitracerexperiment erfasst werden. Der zuletzt genannte Prozess ist mit einem einzigen Tracer nicht zu lösen, wohl aber mit einer Kombination von Tracern, die sich in ihrem Diffusions- und Sorptionsverhalten unterscheiden, wie beispielsweise Uranin, Bromid und Lithium. Lithium ist nach Einschätzung von BEHRENS et al. (2001) als sorptiv einzuschätzen. Die Diffusionskoeffizienten D_m der Tracer Uranin (Ur), Bromid (Br⁻), Chlorid (Cl⁻) und Lithium (Li⁺) ($D_m\ Ur= 0,5*10^{-9}$ [m²/s], $D_m\ Br,Cl= 2*10^{-9}$ [m²/s], $D_m\ Li=0,7-1*10^{-9}$ [m²/s]) (FRICK, 1993) unterscheiden sich nur geringfügig voneinander. Die sorptiven Eigenschaften von Lithium sollen deshalb genutzt werden, den Effekt der Matrixdiffusion durch reversible Sorption des Tracers in der Matrix besser herausarbeiten zu können und unter Umständen auch die Grundwasserbewegung in Lösungshohlräumen von der im sekundär geweiteten Kluftnetz zu trennen.

Die Klärung der hydrodynamischen Prozesse dient vor allem dazu, biogeochemische Prozesse (NAUMANN, 1998; MÜLLER et al., 1999) den unterschiedlichen geologischen Fazieseinheiten (Schichtfazies, Massenfazies) und Karstformen zuzuordnen und Konsequenzen für einen nachhaltigen Trinkwasserschutz aufzuzeigen.

Geologie

Zahlreiche Publikationen geben einen Überblick über die Geologie der Frankenalb und das Arbeitsgebiet selbst (SCHMIDT-KALER, 1989, SEILER et al., 1989, SEILER & HEINRICH, 2000). Deshalb werden nur die für das Verständnis

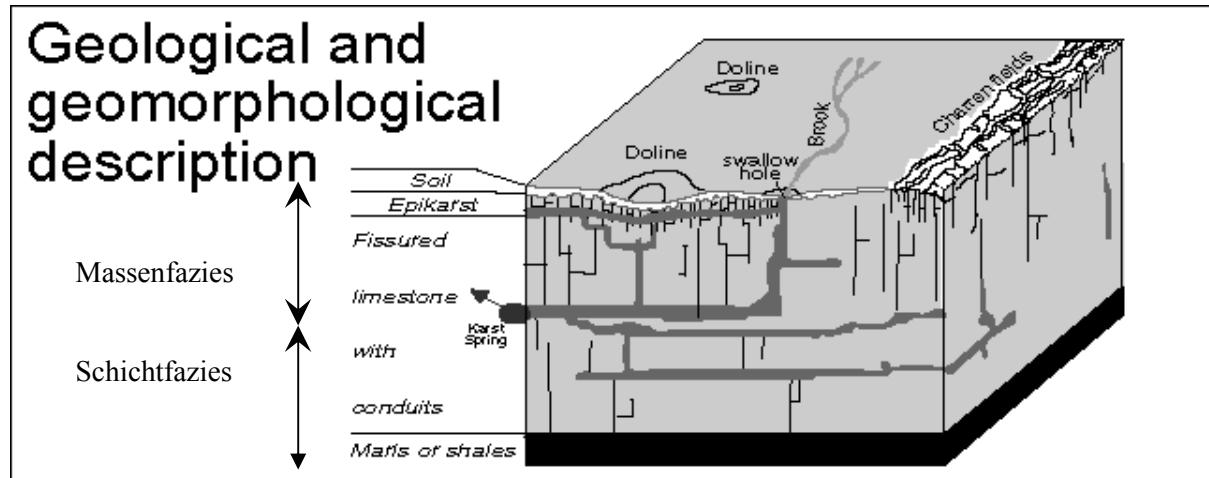


Abb. 1: Konzeptionelles Modell eines Karstaquifers

wichtigsten geologischen Einheiten des Arbeitsgebietes kurz beschrieben.

Die Karbonatgesteine des Malms, die in zwei Sedimentationszyklen entstanden, bilden den Grundwasserleiter. Im Gegensatz zum ersten Zyklus, der vornehmlich von schichtig ausgebildeten Kalken gebildet wird, treten im zweiten Zyklus verbreitet Riffgesteine auf, die nach ihrer Entstehung zum Teil zu Dolomitgesteinen umgewandelt wurden. Sie bilden heute die im Gegensatz zur Schichtfazies klüftig porösen Gesteine der Riff- oder Massenfazies mit Matrixporositäten von 6 Vol. % bis über 30 Vol. % (MICHEL, 1999).

Sinnvoll erscheint es, das Karstsystem in unterschiedliche Reservoirs zu unterteilen. Ein konzeptionelles Modell für einen Karstaquifer mit folgenden Speicher- und Umsatzräumen gibt TRIPET et al 1999 (Abb. 1):

- Bodenzone
- Epikarst
- ungesättigte und gesättigte Zone

Im Bereich des untersuchten Grundwasserleiters liegt eine sogenannte Mischfazies vor. Die gesättigte Zone wird von Gesteinen der Schichtfazies aufgebaut. Darüber folgt eine knapp 130 m mächtige vadose Zone die aus einer ca. 4 m mächtigen Bodenzone und Gesteinen der Massenfazies aufgebaut wird.

Traceruntersuchungen

Im Bereich der Massenfazies konnten die injizierten Tracer nur äußerst selten und dann nur über Entfernung von < 3 km nachgewiesen werden (SEILER et al., 1989; GLASER, 1994).

Fließgeschwindigkeiten von 300 bis maximal 1000 m/d (SEILER et al., 1995) waren dabei festzustellen. In Schichtfaziesgebieten mit einem teilweise sekundär geweiteten Kluftnetz lagen die Fließgeschwindigkeiten um 1500 m/d. Linear angelegte Lösungsholräume, die in der Bankfazies häufig und in der Massenfazies selten auftreten zeigten dagegen Fließgeschwindigkeiten von über 2000 m/d.

Die Auswertung von Umwelttracer (H³, He³, Kr⁸⁵, F11, F12, F113) im Bereich der Mischfaziesgebiete gab Hinweise, dass die mittlere Verweilzeit des Wassers im Untergrund nicht alleine auf die Wasserspeicherung in der gesättigten Zone zurückzuführen ist. Offenbar erfolgt in den porösen Massenfaziesgesteinen oberhalb des regionalen Grundwasserspiegels eine bedeutende Zwischenspeicherung (GLASER 1998) mit mittleren Verweilzeiten von mehreren zehner Jahren (RAU, 1998). Dieser Speicherraum kann beispielweise durch den Epikarst gegeben sein und einen entscheidenden Umsatzraum für mikrobiologische Prozesse darstellen.

Abflusskomponenten

Die Auswertung der Ergebnisse der Abflusskomponentenseparierung wird hier nur kurz diskutiert und an anderer Stelle publiziert (EINSIEDL & STICHLER, 2002). Für die quantitative Bestimmung einzelner Abflusskomponenten während einer Hochwasserspitze wurde neben den im Grundwasser vorhandenen Tracern Cl⁻ und Sr²⁺ das stabile Isotop ¹⁸O herangezogen. Das Mischungsmodell mit den zwei Komponenten ergab für die direkte Komponente Abflussanteile zwischen 10 % ± 3 % (Sr, Cl) und 16 % ± 3 % (¹⁸O) am Gesamtabfluss (Abb. 2). Die Konzent-

rationen der beobachteten Wasserinhaltsstoffe waren in Schichtfaziesquellen 12 Stunden nach Erreichen der maximalen Verdünnung wieder auf ihre Ausgangskonzentration zurückgegangen. Die mit den Tracern Strontium, Chlorid und ^{18}O bestimmten Anteile an Ereigniswasser sind unter Berücksichtigung des analytischen Messfehlers identisch. Es ist bei der Fehlerbetrachtung auch beispielsweise anzumerken, dass Strontium kei-

ner homogenen Verteilung im Arbeitsgebiet unterliegt und als nicht konservativer Tracer zu betrachten ist. Deshalb sind nicht alle räumlichen und zeitlichen Variationen der Tracergehalte berücksichtigt und führen eventuell zu einer Unterschätzung der direkten Komponente.

Abbildung 2 stellt die Tracerdurchgangskurven von $\delta^{18}\text{O}$ und Sr^{2+} u.a. für das Quelleinzugsgebiet dar, in dem auch der Tracerversuch mit Uranin

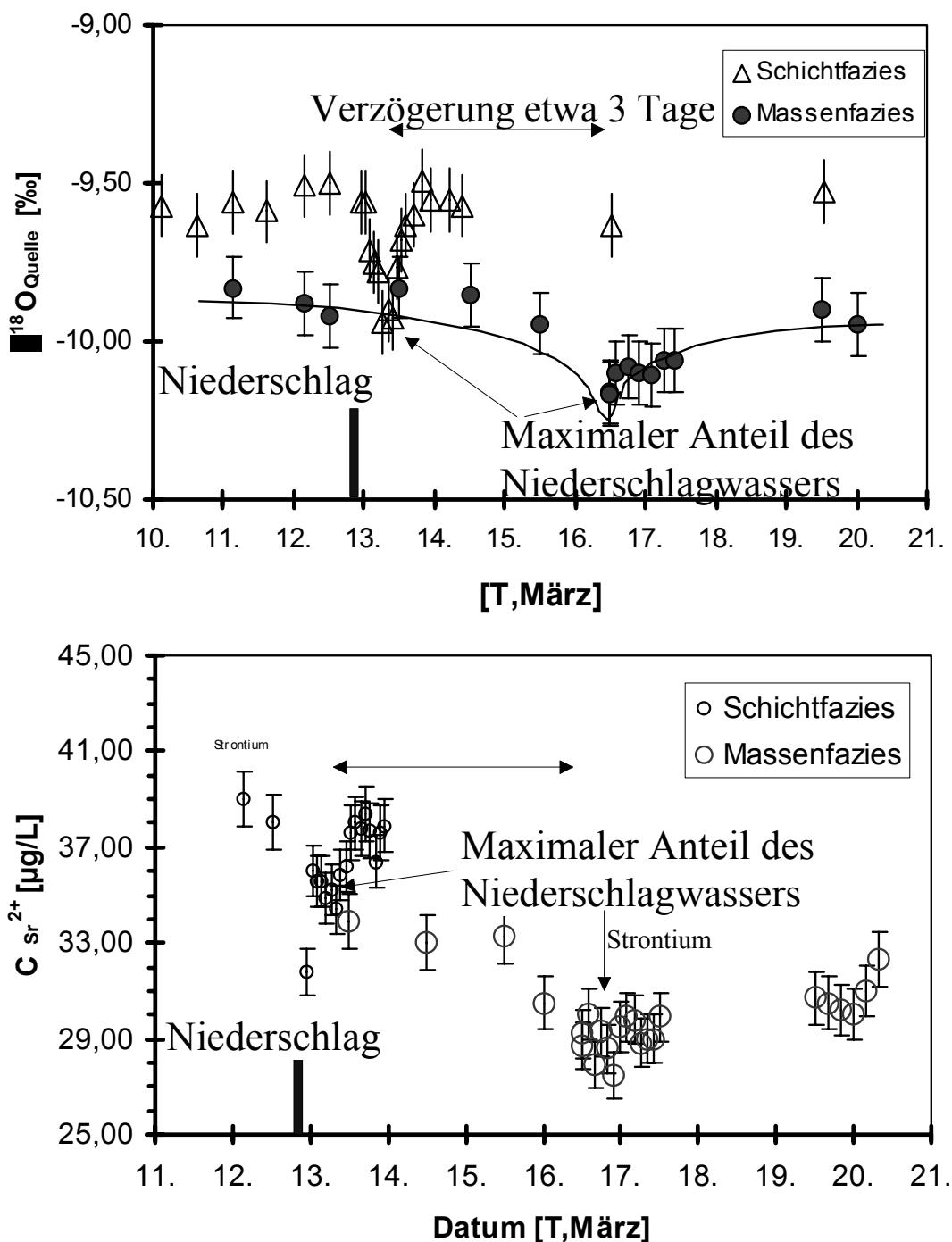


Abb. 2: Vergleich der zeitlichen Variation des $\delta^{18}\text{O}$ und der Ionenkonzentrationen Sr^{2+} und Cl^{-}

durchgeführt wurde (Kreissignatur). Der Anteil der direkten Komponente wird mit Sr^{2+} und $\delta^{18}\text{O}$ auf 12-15 % abgeschätzt.

Eine erste Auswertung von mehreren Hochwasserereignissen, die in verschiedenen Quelleinzugsgebieten durchgeführt wurden, lassen die Schlussfolgerung zu, dass die indirekten Komponenten (Basisabfluss, Epikarstreservoir) den Hauptanteil bei Hochwasserereignissen im Karst bilden und im Mittel nur einen Anteil von 13 % Ereigniswasser (direkter Abfluss) am Gesamtabfluss während einer Hochwasserspitze darstellt. MALOSZEWSKI et al. (2002) bestimmte mit Hilfe von ^{18}O für das Karstmassiv der Schneetalpe einen Anteil der direkten Komponente am Gesamtabfluss von knapp 18 %. Da aus den Ergebnissen des Multitracerversuchs gefolgert werden kann, dass neben dem Drainageabfluss ein weiterer Fließweg vermutlich über ein Epikarstsystem erfolgt, ist nach jetzigem Wissensstand eine Zwei-Komponentenseparation nicht mehr ausreichend, die Abflussbildung in diesem Karstsystem zu beschreiben. Das 2-Komponenten-Mischungsmodell ist dann durch eine 3-Komponentenseparierung zu ersetzen und ist Gegenstand der derzeitigen Untersuchungen. Es sei in diesem Zusammenhang aber darauf hingewiesen, dass die dazu notwendige Identifizierung der chemischen Zusammensetzung der Endglieder äußerst schwierig erscheint (RICE & HORNBERGER, 1998).

Die Ergebnisse aus der Abflusskomponentenseparierung erlauben auch eine weiterführende Interpretation des Tracerversuchs aus dem Jahre 1999. Abbildung 2 vergleicht den zeitlichen Konzentrationsverlauf der Tracer ^{18}O und Sr^{2+} für zwei Quelleinzugsgebiete.

Die zeitlichen Verläufe der Tracerkonzentrationen werden im ersten Beispiel alleine durch die Schichtfazies mit Matrixporositäten von < 2 % geprägt. Beispiel 2 (Kreissignatur) zeigt Konzentrationsverläufe, die auf Eigenschaften der Massenfazies zurückzuführen sind. Die etwa 6 km^2 großen Quelleinzugsgebiete grenzen geographisch direkt aneinander und weisen den gleichen geologischen Aufbau auf. Die prozentuale Abflusserhöhung, die durch das Ereignis hervorgerufen wurde, war an beiden Quellen praktisch identisch.

Offenbar erfolgt aber der Abfluss der direkten Komponente im 2. Beispiel teilweise auch über ein Epikarstsystem, das von Gesteinen der porösen Massenfazies gebildet wird und die beobachteten Tracerdurchgangskurven prägt.

Wie aus obiger Graphik hervorgeht, verursacht das selbe Niederschlagsereignis an der zweiten Quelle (Massenfazies) im Vergleich zur ersten einen um 3 Tage verzögerten Tracerdurchbruch, eine gedämpfte Amplitude und einen langsameren Wiederanstieg der Ionenkonzentrationen und Isotopenwerte im Grundwasser nach Erreichen der maximalen Verdünnung.

Derartige Tailingeffekte wurden in der Literatur oft diskutiert (MALOSZEWSKI & ZUBER, 1993; BECKER & SHAPIRO, 2000) und können auf Austauschprozesse zwischen mobilem Wasser in den Klüften und immobiler Phase in der Matrix hinweisen. Die diffusiven Prozesse sind aber nach HAUNS (2000) zur Beschreibung von Tailingeffekten nicht zwingend notwendig. Er sieht für beobachtete Tailingeffekte im Karst auch sogenannte Umkehrströmungsprozesse verantwortlich.

Markierungsversuch mit Uranin

Der Fluoreszenzfarbstoff Uranin wurde als Markierungsmittel gewählt. Über eine Doline konnten 100 g des Markierungsstoffes in gelöster Form in das Karstsystem injiziert werden. Unmittelbar vor und nach der Tracereingabe gab man etwa 5 Kubikmeter Wasser dem System über die selbe Doline zu, um ein gesättigtes Fließen in der ungesättigten Zone und die geforderte Pulsinjektion für die Auswertung zu gewährleisten.

Die mit dem stabilen Isotop ^{18}O und Sr^{2+} beobachteten Tailingeffekte und zunächst daraus geschlossenen diffusiven Prozesse und der von SEILER et al. (1995) beschriebene Zusammenhang zwischen Gesteinsausbildung und Grundwasserbewegung wurden für die Auswertung und Interpretation des Markierungsversuches mit Uranin aus dem Jahre 1999 herangezogen. Abbildung 3 stellt die Tracerdurchgangskurve mit Uranin dar. Die in unterschiedlichen Signaturen markierten Durchgangskurven zeigen die aus der theoretischen Anpassung hervorgegangene Lösung.

Die für Uranin beobachtete Tracerdurchgangskurve im Quelleinzugsgebiet konnte unter Annahme von mehreren Fließwegen mit dem Dispersionsmodell und dem SFDM, das den Prozess der Matrixdiffusion einschließt, ausgewertet werden. Der Transport in den beiden Hauptfließwegen erfolgt im wesentlichen konvektiv-dispersiv. Aus dem Verhalten der ^{18}O und Sr^{2+} Konzentrationsverläufe wurde für den dritten Fließweg ein Matrixdiffusionsprozess ange-

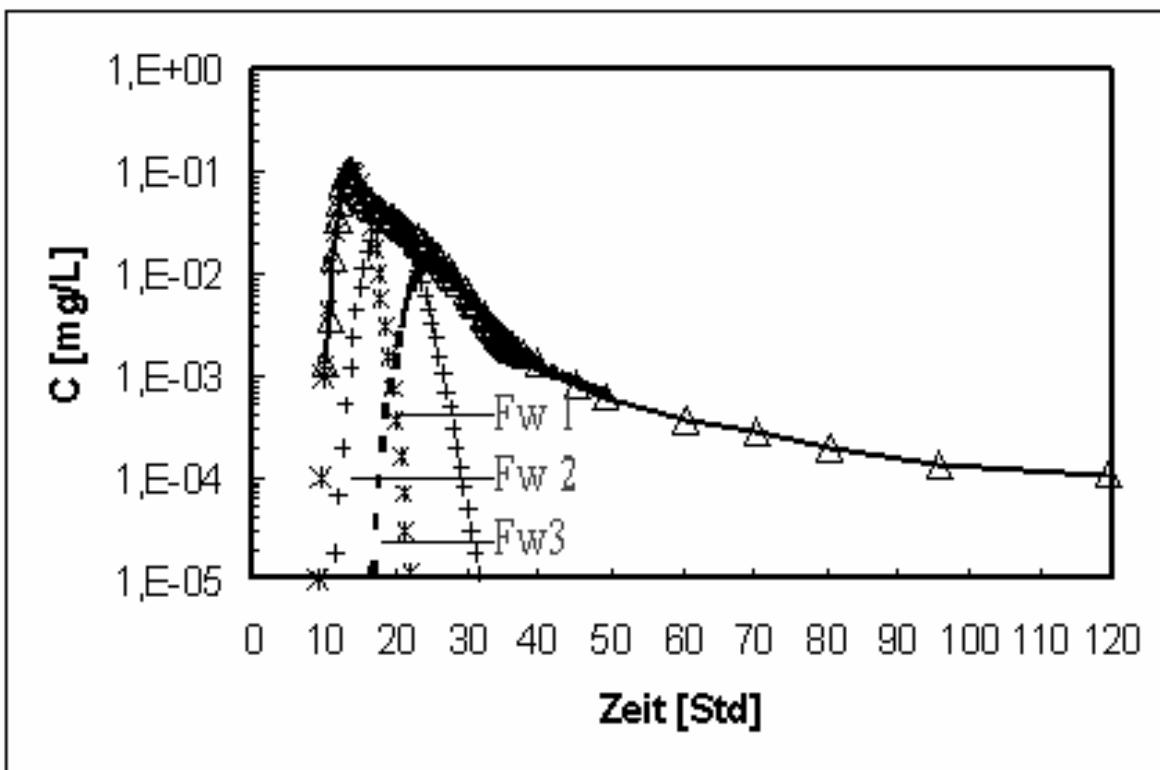


Abb. 3: Experimentell gewonnene Tracerdurchgangskurve aus dem Jahre 1999 (Dreiecke) und Auswertung mit dem Dispersionsmodell, das den diffusiven Traceraustausch zwischen mobiler und immobiler Phase berücksichtigt (Single Fissure Disperions Modell)

nommen. Dieser Diffusionsprozess kann durch eine Markierung des Epikarstsystems, das aus den porösen Gesteinen der Massenfazies aufgebaut wird, begründet sein. Nach Hauns (2000) können beobachtete Tailingeffekte im Karst aber nicht alleine durch diffusive Prozesse verursacht werden, sondern auch durch Umkehrströmung hervorgerufen werden.

Ein Multitracerversuch mit sich in ihrem Diffusionskoeffizienten und Sorptionsverhalten unterscheidenden Markierungsstoffen soll die hier vorgestellte Arbeitshypothese stützen, die Transportparameter in einem doppel-porösen Medium abschätzen und die hydrodynamischen Prozesse des Karstsystems klären helfen.

Multitracerexperiment mit Lithium, Chlorid, Bromid und Uranin

Zum Nachweis der Matrixdiffusion und der Differenzierung der postulierten Fließwege wurde ein Tracercocktail aus LiBr, LiCl, KBr und Uranin über die selbe Doline, die bereits im Jahre 1999 für die Tracerinjektion verwendet wurde, punktförmig injiziert. Das Vor- und Nachspülvolumen war im Vergleich zum Versuch aus dem Jahre 1999 mit 18 m^3 Quellwasser deutlich erhöht worden, um mögliche Dichte- und Aussal-

zungseffekte auszuschließen. Abbildung 4 zeigt die experimentell gewonnenen Tracerdurchgangskurven und relativen Wiedererhalte für Cl^- , Br^- , Li^+ und Uranin. Die berechneten Wiedererhalte von ca. 55 - 80 % für die einzelnen Tracer sind auf Grund einer nicht genau bestimmbarer Backgroundkonzentration für Cl^- , Br^- und Li^+ während des Versuchs als annähernd identisch zu bewerten.

Aus der logarithmischen Darstellung der Tracerdurchgangskurven ist nach etwa 25 Stunden seit Versuchsbeginn eine Differenzierung der unterschiedlichen C/M normierten Tracerdurchgangskurven zu beobachten. Für den Tracer Lithium ist, trotz eines im Vergleich zu Bromid kleineren Diffusionskoeffizienten, der diffusive Effekt durch Sorptionsprozesse mit sofortiger Gleichgewichtseinstellung in der Matrix verstärkt. Die unterschiedlichen Diffusionseigenschaften der Tracer würden eine Peakdämpfung mit gleichzeitiger Verschiebung des Konzentrationsmaximums und unterschiedlichen Tailingeffekts erwarten lassen. Die beobachteten Tailingeffekte sind jedoch hier nicht schlüssig. Aus den Ergebnissen kann zunächst kein eindeutiger Hinweis auf Austauschprozesse zwischen mobilem Kluftwasser und immobilem Wasser der Matrix abgeleitet werden.

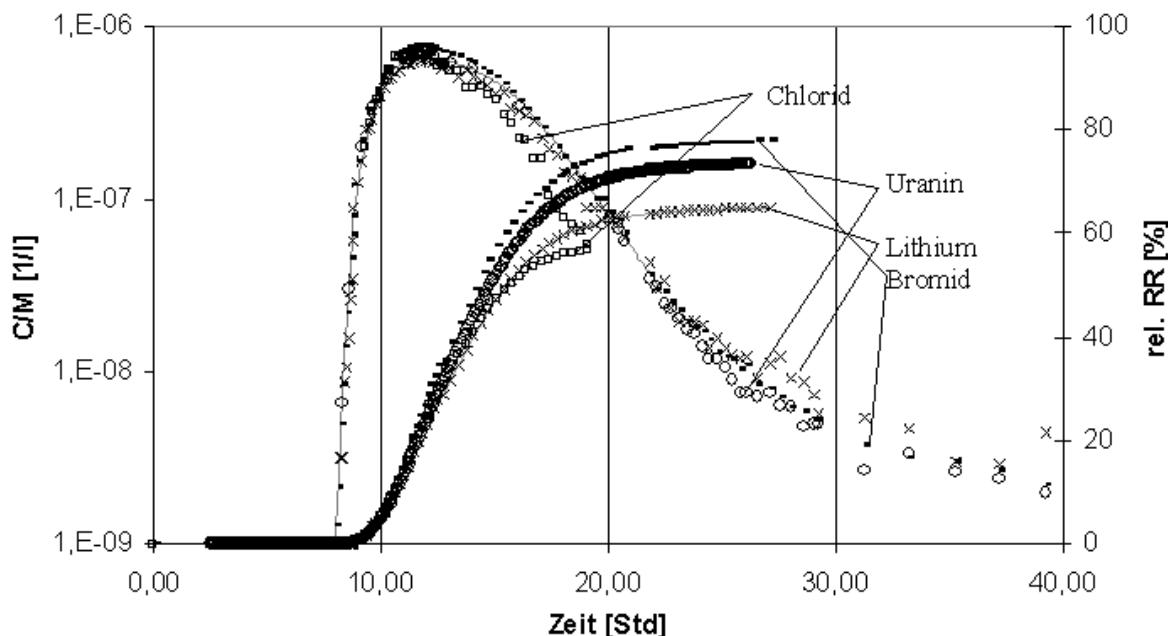


Abb. 4: Normierte Tracerdurchgangskurven und Wiedererhalte für alle eingesetzten Tracer

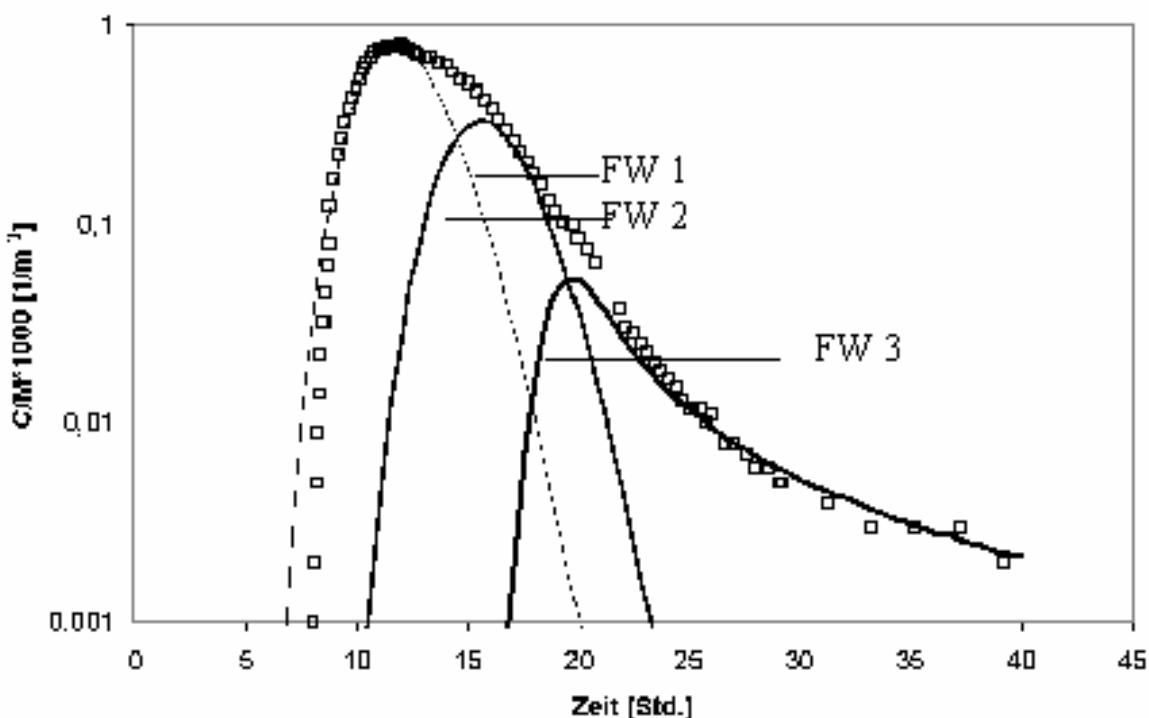


Abb. 5: Normierte Tracerdurchgangskurve für Bromid und Auswertung der experimentellen Tracerdurchgangskurve unter Annahme dreier Fließwege (FW)

Die beobachtete monomodale Tracerdurchgangskurve ist unter Annahme mehrerer Fließwege ausgewertet worden. Der Tracertransport findet nach den Ergebnissen der Modellierung

überwiegend in den hochdurchlässigen Drainageräumen des Karstsystems statt, die von zwei Fließwegen (FW 1 und FW 2) repräsentiert werden (Abb. 5). Die Dispersivitäten betrugen 16 m und 10 m für den ersten und zweiten Fließweg.

Der 3. Fließweg gibt auf Grund der Ergebnisse des Multitracerversuchs Hinweise auf einen Tracertransport in einem doppel-porösen Medium.

Die mittleren Abstandsgeschwindigkeiten betrugen 2880 m/d und 2184 m/d für den Tracertransport in Lösungshohlräume (1. u. 2. FW) und 1870 m/d für den Transport in einem engmaschig, sekundär geweiteten Kluftnetz und stimmen mit der von SEILER et al. (1995) vorgestellten Klassifikation von Abstandsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Gesteinsausbildung gut überein.

Im Gegensatz zu den Drainageräumen herrscht im sekundär geweiteten Kluftnetz eine kleine Advektion mit schmalen Kluftöffnungsweiten vor. Eine Mischung des Tracercocktails aus dem Drainageraum mit dem des Kluftnetzes verursacht vermutlich dann einen Prozess, der mit einem diffusiven Effekt vergleichbar ist und das signifikante Tailing für alle Markierungsstoffe erklären lässt. Aus Analogieschluss wäre dann auch das Vorhandensein mindestens dreier Fließwege gegeben. Die Interpretation des Multitracerversuches unterstützt die Auswertung der gemessenen ^3H -Werte mit dem Dispersionsmodell. Die ^3H -Daten wurden während Niedrigwasserabfluss in den Jahren 1968-2001 am Quellaustritt gesammelt (APEL 1971; PFAFF 1987; GLASER 1998). Bei einem doppel-porösen System, das durch diffusive Prozesse einen Austausch zwischen Kluft- und Matrixwasser verursacht, wird von MALOSZEWSKI & ZUBER (1991) die Anwendung eines Dispersionsmodells vorgeschlagen. Dabei kann nicht die mittlere Verweilzeit des Wassers, sondern die des beobachteten Tracers bestimmt werden. Ein best-fit für die gemessenen ^3H -Daten konnte mit dem Dispersionsparameter P_D von 0,6 und einer Verweilzeit von 62 Jahren gefunden werden. Die Ergebnisse der ^3H -und ^{18}O -Daten erlauben den Analogieschluss, dass nur durch eine Eigenporosität des Gesteins diese hohen mittleren Verweilzeiten (^3H) und charakteristischen Tracerdurchgänge für ^{18}O erklärt werden können. Die Arbeitshypothese eines komplexen dispersiven Mechanismus zwischen dem Drainage- und Kluftnetzwerk und die Auswirkung auf Tracerdurchgangskurven soll in einem weiteren Arbeitsschritt mit Hilfe einer Modellierung gestützt werden.

Schlussfolgerung

In der Studie über die Abflussbildungsprozesse konnten Messungen an ^{18}O und hydrochemischen Tracern durchgeführt werden und dabei auf Abflussbildungsprozesse im Karst geschlos-

sen werden. Aus der Abflusskomponententrennung ergab sich im Mittel ein maximaler Anteil von 13 % an Ereigniswasser (direkte Komponente) am Gesamtabfluss während eines Hochwasserereignisses. Daraus kann gefolgert werden, dass die flächige Komponente an der Grundwasserneubildung dominiert und die indirekten Komponenten das Abflussgeschehen während eines Hochwasserereignisses bestimmen. Der Konzentrationsverlauf der ^{18}O -Werte und das aus dem Multitracerversuch hervorgegangene Konzept eines doppel-porösen Systems unterstützt auch die aus dem best-fit mit dem Dispersionsmodell gefolgerten hohen mittleren Verweilzeiten von ^3H mit 62 Jahren. Jedoch verursachen vermutlich komplexe dispersive Mechanismen zwischen Kluftnetz und Drainageraum in sich unschlüssige Tailingeffekte für die Markierungsstoffe, die auf Grund ihrer unterschiedlichen diffusiven und sorptiven Eigenschaften ein doppel-poröses System charakterisieren können.

Danksagung

Für die technische Unterstützung und die tatkräftige Mithilfe im Gelände danke ich Herrn M. Stöckel, Herrn Dipl. Ing. (FH) V. Müller und Herrn Dipl. Ing. (FH) A. Schmeller herzlich.

Literatur

- APEL, R. (1971): Hydrogeologische Untersuchungen im Malmkarst der südlichen Frankenalb.- Geol. Bav., 53; München; 194-208.
- BEHRENS, H., HÖTZL, H., KÄSS, W. (2001): Application of Artificial Tracers in Comparative Tracer Experiments.- In: BÄUMLE, R., BEHRENS, H., EINSIEDL, F., GOLDSCHEIDER, N., GRUST, K., HÖTZL, H., KÄSS, W., KENNEDY, K., KINZELBACH, W., KOZEL, R., MÜLLER, I., MÜLLER, J., NIEHREN, S., ROSSI, P., SCHNEGG, P.-A., SEILER, K.-P., WITTHÜSER, K., WOHNLICH, S., ZOJER, H.: Comparative Tracer Studies in Groundwater: Vergleichende Studien über Markierungsversuche im Grundwasser. Beiträge zur Hydrogeologie, 52, Graz, 103-230.
- BEHRENS, H., DROST, W., WOLF, M., ORTH, J.P., MERKL, G. (1997): Groundwater exploration and contaminant migration testing in a confined karst aquifer of the Swabian Jura (Germany). -In: KRANJC, A. (Ed.) (1996): Tracer Hydrology.- 7. Int. Symp. on Water Tracing, Rotterdam, 305-312.

- BECKER, M. W., SHAPIRO, A. M. (2000): Tracer transport in fractured crystalline rock: Evidence of nondiffusive breakthrough tailing. *Water Resour. Res.*, 36(7), 1677-1686.
- EINSIEDL, F. & STICHLER, W. (2002): Chemical Changes (in preparation)
- FORD, D., WILLIAMS, P. (1989): Karst geomorphology and hydrology. Unwin, London, 601 pp.
- FRICK, U. (1993): Beurteilung der Diffusion im Grundwasser von Kristallingesteinen -Ein Beitrag zur Kristallinstudie 1993. Mit Anhängen von Skagius, K., Alexander, W.R., Interne Bericht NIB 92-92, Nagra, Wettingen, Schweiz.
- GLASER, ST. (1998): Der Grundwasserhaushalt in verschiedenen Faziesbereichen des Malm der Südlichen und Mittleren Frankenalb. GSF-Bericht 2/98, München.
- HAUNS, M. (2000): Modelling tracer and particle transport under turbulent flow conditions in a karst conduit structures. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*. Bd. 12, Freiburg.
- MALOSZEWSKI, P., ZUBER, A. (1991): Influence of matrix diffusion and exchange reactions on radiocarbon ages in fissured carbonate aquifers. *Water Resour. Res.*, Vol. 27, 1937-1947.
- MALOSZEWSKI, P., ZUBER, A. (1993): Mathematical Modelling of Tracer Experiments in fractured rock: Matrix diffusion and the validity of models. *Water Resour. Res.*, Vol. 29/8, 2723-2735.
- MALOSZEWSKI, P., STICHLER, W., ZUBER, A., RANK, D. (2002): Identifying the flow systems in a karstic-porous aquifer, the Schneetal, Austria, by modelling of environmental ^{18}O und ^3H isotopes. *J. of Hydrology* 256, 48-59.
- MÜLLER, E., HARTMANN, A., SEILER, K.-P. (1999): Mikrobiologische Aktivitäten und Umsetzungen im Karst der Südlichen Frankenalb. GSF-Bericht 4/99, München, 82-91.
- MICHEL, U. (1999): Gesteinsphysikalische Eigenschaften und fazielle Ausbildung der oberjurassischen Massenfazies (kimmeridge) der Südlichen Frankenalb. GSF-Bericht 4/99, München, 48-57.
- NAUMANN, U. (1999): Der Karst im Labor - Untersuchungen zur Mikrobiologie im Grundwasserleiter. IFH-Jb. 1998, München, 182-191.
- PFAFF, T. (1987): Grundwasserumsatzzräume im Karst der Frankenalb. GSF-Bericht 3/87, München.
- RAU, I. (1998): Untersuchungen zur langzeitigen Speicherung von persistenten Schadstoffen in heterogenen porösen Medien mit Umwelttracern. Diss. an der LMU München, München.
- RICE, K. C., HORNBERGER, G. M. (1998): Comparison of hydrochemical tracers to estimate source contributions to peak flow in a small, forested headwater catchment. *Water Resour. Res.*, Vol. 34, 1755-1766.
- SCHMIDT-KALER, H. (1989): Geologische Karte 1:25000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 7136 Neustadt a. d. Donau.-167 S., München (Bay. Geol. Landesamt).
- SEILER, K.-P., MALOSZEWSKI, P., BEHRENS, H. (1989): Hydrodynamic dispersion in karstified limestones and dolomites in the Upper Jurassic of the Franconian Alb, F.R.G. *J. of Hydrology*, 108: 235-247.
- SEILER, K.-P., & BEHRENS, H., WOLF, M. (1995): Use of Artificial and Environmental Tracers to Study Storage and Drainage of Groundwater in the Franconian Alb, Germany, and the Consequences for Groundwater Protection. In: Isotopes in Water Resources Management. Proceedings of a Symposium, Vienna, 20-24 March 1995; Vienna.
- SEILER, K.-P., HEINRICH, G. (2000): Die Festlegung von Trinkwasserschutzgebieten in Festgesteinen mit Matrixporosität. *Würzb. Hydrogeol. Kolloquium*, 45-58; Würzburg.
- TRIPET, J.-P., DOERFLIGER, N., ZWAHLEN, F. (1999): Vulnerability mapping in Karst areas and its uses in Switzerland. GSF-Bericht 4/99 München, 16-24.