

# Aus der praktischen Anwendung von Tracern und Isotopen

L. Eichinger<sup>1</sup>, M. Bauer<sup>2</sup>, W. Deiglmayr<sup>3</sup>, M. Heidinger<sup>1</sup>, G. Heinrichs<sup>1,4</sup>, H.H. Loosli<sup>5</sup>, C. Mair<sup>1</sup>, H. Oster<sup>6</sup>, M. Selg<sup>7</sup> & K. Osenbrück<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hydroisotop GmbH, Woelkestr. 9, D-85301 Schweitenkirchen

<sup>2</sup> Hydroisotop GmbH, Gustav-Eisenlohr-Weg 15, D-79312 Emmendingen

<sup>3</sup> Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Lazarettstr. 67, D-80636 München

<sup>4</sup> DLR Internationales Büro des BMBF, Königswinterer Str. 522, D-53227 Bonn

<sup>5</sup> Physikalisches Institut, Universität Bern, Sidlerstr. 5, CH-3012 Bern

<sup>6</sup> Spurenstofflabor Dr. Oster, Mandelring 29, D-67157 Wachenheim

<sup>7</sup> Landesamt für Geologie, Rohstoffe u. Bergbau, Albertstr. 5, D-79104 Freiburg

## Einleitung

Isotope und Spurenstoffe werden mittlerweile in vielen praktischen Anwendungen als Tracer im Wasser- bzw. in Stoffkreisläufen erfolgreich eingesetzt. Insbesondere um die ergeizigen Ziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie erreichen zu können, müssen vielfältige Fragestellungen be-

antwortet werden. Große Herausforderungen an die geforderte nachhaltige Bewirtschaftungsplanung stellen komplexe interaktive Grundwasserzirkulationssysteme. Isotopenmethoden bieten sich hierbei als effiziente Werkzeuge an. Anhand von drei Fallbeispielen soll der Einsatz von Isotopen und Spurenstoffen in der hydrogeologischen Praxis vorgestellt werden.

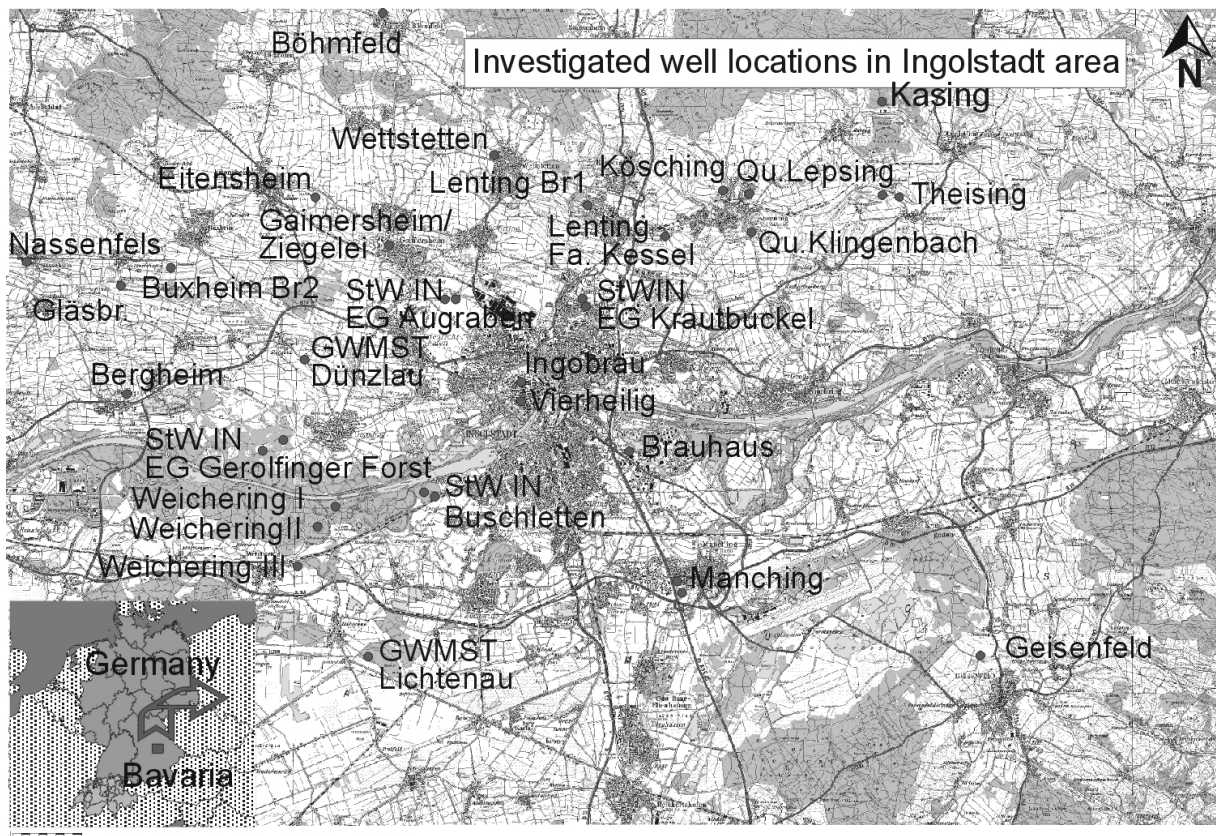


Abb. 1: Lage der untersuchten Grundwasserproben

## Fließdynamik des Tiefgrundwassersystems nahe der Donau

Das Grundwasserfließregime im Oberjura-Karst und tertiären Hügelland nahe der Donau im Bereich Ingolstadt wird seit Jahren intensiv untersucht. Aufgrund des steigenden Trinkwasserbedarfs am Industriestandort Ingolstadt, werden belastbare hydrogeologische Modelle und ein nachhaltiges Grundwassermanagement benötigt. Dazu ist eine bisher noch ausstehende tragfähige Modellvorstellung des komplexen Grundwassersystems am Interface von jungen Karstgrundwasser aus dem Norden (offener Karst) und altem Tiefgrundwasser im Süden (bedeckter Karst) erforderlich. Erste Hinweise auf eine Übernutzung des Grundwassersystems liegen anhand hydrochemischer und isotopenhydrologischer Untersuchungen vor.

Teil der Studie war eine Bestimmung der Isotope  $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{13}\text{C}$ -DIC und  $^{14}\text{C}$ -DIC. Zusätzlich wurde ein numerisches Modell entwickelt um vertiefende Kenntnisse über das GW-System zu gewinnen. Es wurde eine Interpretation vorliegender Daten (53 Brunnen) und neueren Messungen (29 Brunnen) (Abb. 1) durchgeführt, um quantitative und qualitative Informationen über das Grundwasservorkommen zu gewinnen.

Die Ergebnisse lassen eine Aufteilung in drei Grundwasser-Provinzen mit unterschiedlicher Altersstruktur und Neubildungsbedingung zu (vgl. Abb. 2). Die Grundwässer im nördlichen offenen Karst werden durch tritiumhaltige Komponenten dominiert. Vergleichsweise schwere  $\delta^2\text{H}$ - und  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte sowie hohe  $^{14}\text{C}$ -Gehalte lassen auf Grundwasseralter kleiner 2.000 a schließen. Das Erneuerungsgebiet dieser dem aktuellen Wasserkreislauf zugehörigen Grundwässer ist der offene Karst nördlich des Untersuchungsgebiets.

Die Grundwässer in dem mit undurchlässigen tertiären Sedimenten überdeckten Oberjura-Karst zeigen generell leichte  $\delta^2\text{H}$ - und  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte sowie geringe  $^3\text{H}$ - und  $^{14}\text{C}$ -Gehalte. Die Änderung der Isotopengehalte und -Signaturen von Nord nach Süd spiegelt die komplexen Wechselwirkungen der Grundwässer mit unterschiedlichen Neubildungsprozessen wider. Eine Mischungszone, die anhand der  $^3\text{H}$ -,  $^{85}\text{Kr}$ - und  $^{39}\text{Ar}$ -Gehalte identifiziert werden kann (Abb. 3), befinden sich an der Übergangszone von jungem Grundwasser hoher Dynamik und altem stagnierendem Grundwasser.

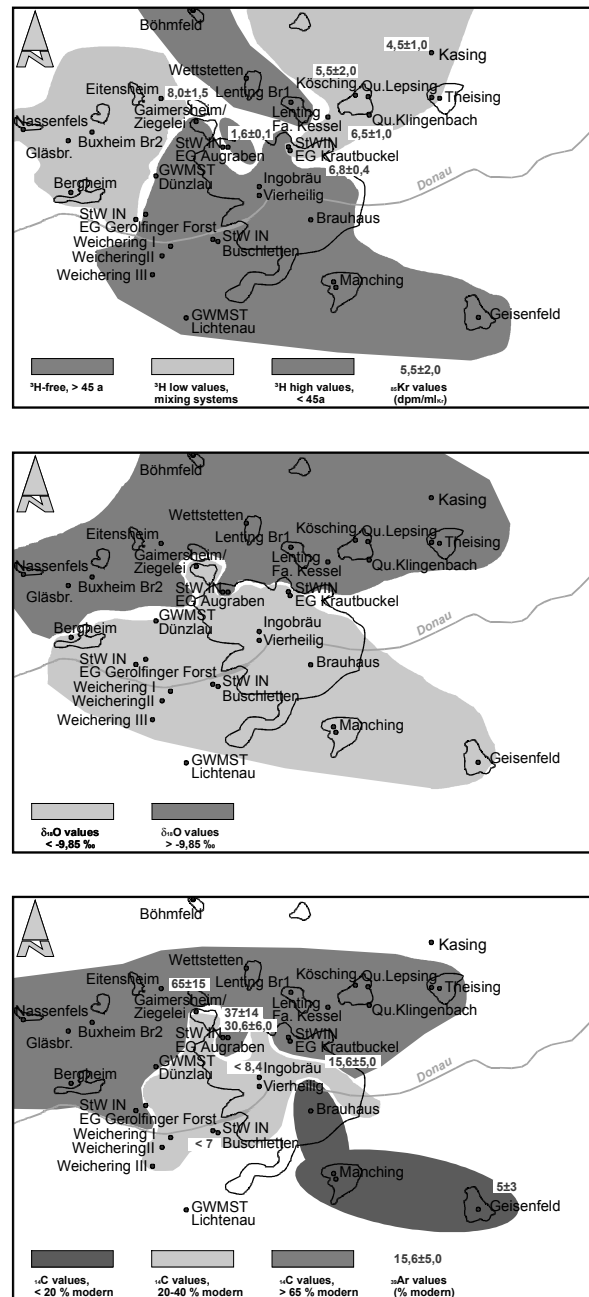


Abb. 2: Räumliche Darstellung der  $^{18}\text{O}$ -,  $^3\text{H}$ - und  $^{14}\text{C}$ -Untersuchungsergebnisse

Das aktuelle Fließgeschehen wird überwiegend durch die steigenden Grundwasserentnahmen und eine Verlagerung dieser Übergangszone charakterisiert. Die unter spätpleistozänen Klimabedingungen gebildeten alten Tiefgrundwässer gelangten als Folge des frühholozänen Grundwasserspiegelanstieges in ihre heutige Reservoirposition. Aufgrund des heute deutlich niedrigeren hydraulischen Gradienten zur Donau, handelt es sich um ein weitgehend isoliertes Teilsystem mit extrem niedrigen Drucksatz.

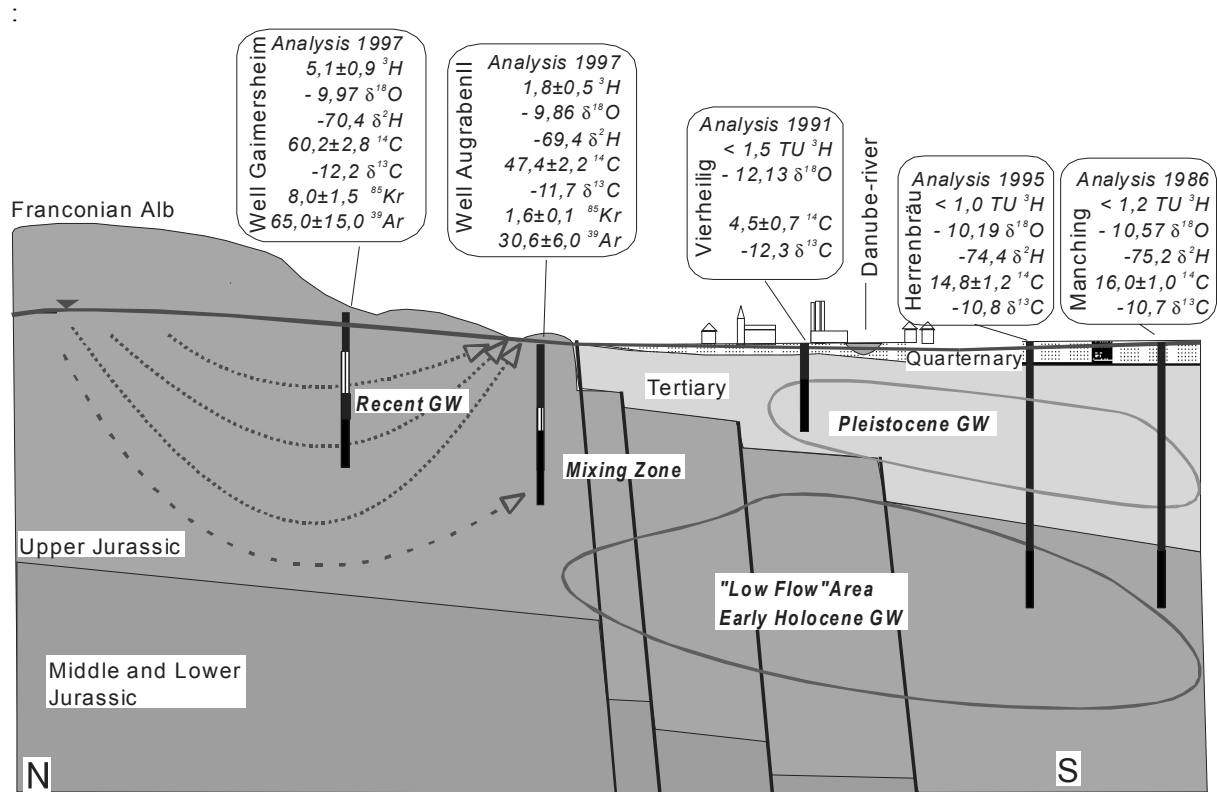
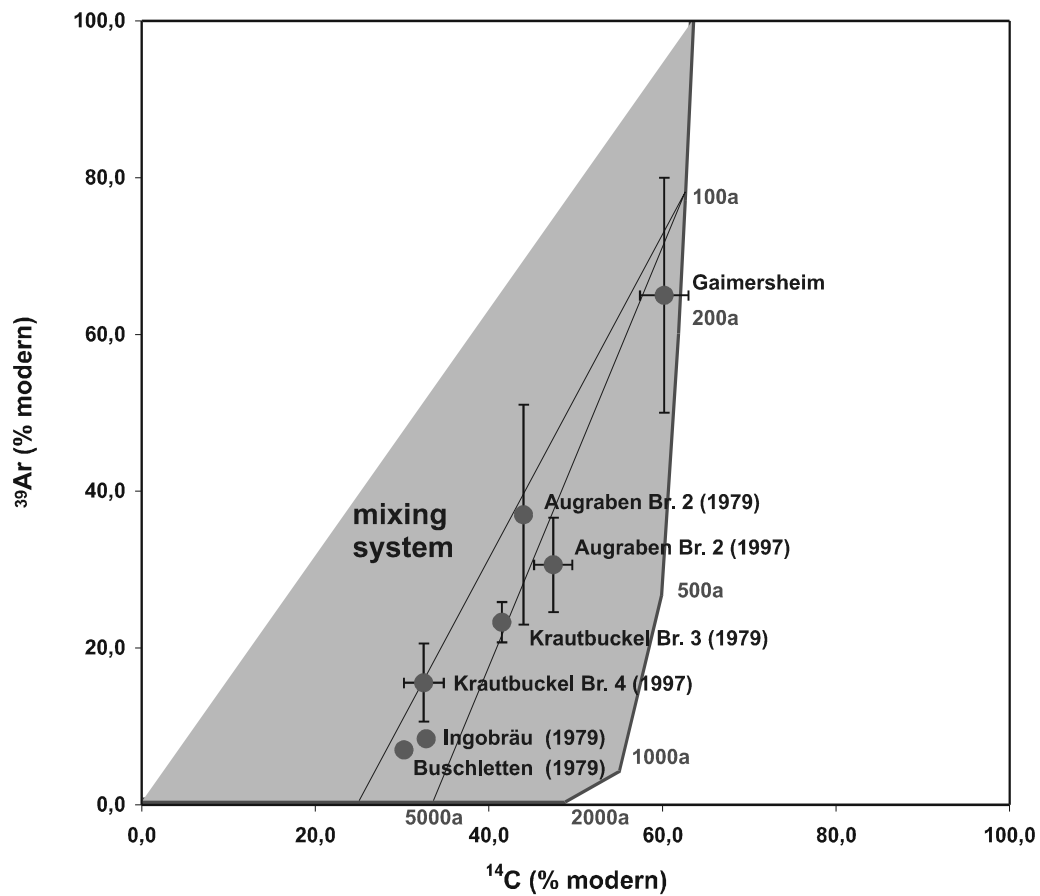


Abb. 3: Schematischer Schnitt durch das Untersuchungsgebiet

Abb. 4: Korrelation der  $^{39}\text{Ar}$ -Gehalte als Funktion der  $^{14}\text{C}$ -DIC-Gehalte

## Fazit

Anhand von Isotopenuntersuchungsergebnissen lassen sich heterogene Grundwasserreservoirs

hinsichtlich ihrer Alterszusammensetzung und Genese genauer differenzieren, so daß eine planmäßige schonende Bewirtschaftung erfolgen kann.

## Bestimmung der Fließzeit von infiltrierendem Flußwasser

Niederschlagsereignisse zeichnen sich in der Regel relativ rasch in Fließgewässern ab, sowohl in der Abflußmenge als auch in der hydrochemischen und isotopischen Zusammensetzung. Die natürliche Markierung des Niederschlages ( $^{18}\text{O}$ - bzw.  $^2\text{H}$ -Ganglinie) ist in gedämpfter Form auch im Flußwasser und im durch Uferfiltration beeinflussten Grundwasser noch erkennbar.

Durch einen Vergleich der  $^{18}\text{O}$ - bzw.  $^2\text{H}$ -Ganglinie des Flußwassers mit den Ganglinien von flußnahen Grundwassermeßstellen können wertvolle Erkenntnisse über die Beeinflussung des Grundwassers durch infiltrierendes Flußwasser gewonnen werden und die Fließzeiten und Mengenanteile des Uferfiltrats bestimmt werden.

Vorteil dieser Isotopenmethodik bei der Erfassung der Uferfiltratsdynamik ist, daß bei der Infiltration und der Untergrundpassage des infiltrierenden Flußwassers im Gegensatz zu den meisten hydrochemischen Parametern (z.B. Nitrat) keine Änderungen der Isotopensignatur ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ) durch physikalische chemische und biologische Prozesse auftreten. Eine Eingabe von künstlichen Tracern ist nicht erforderlich, da durchweg die natürliche Markierung des Wassermoleküls für die Beurteilung herangezogen wird.

Im dargestellten Beispiel wurden über einen ca. 3-monatigen Beobachtungszeitraum die  $^{18}\text{O}$ -

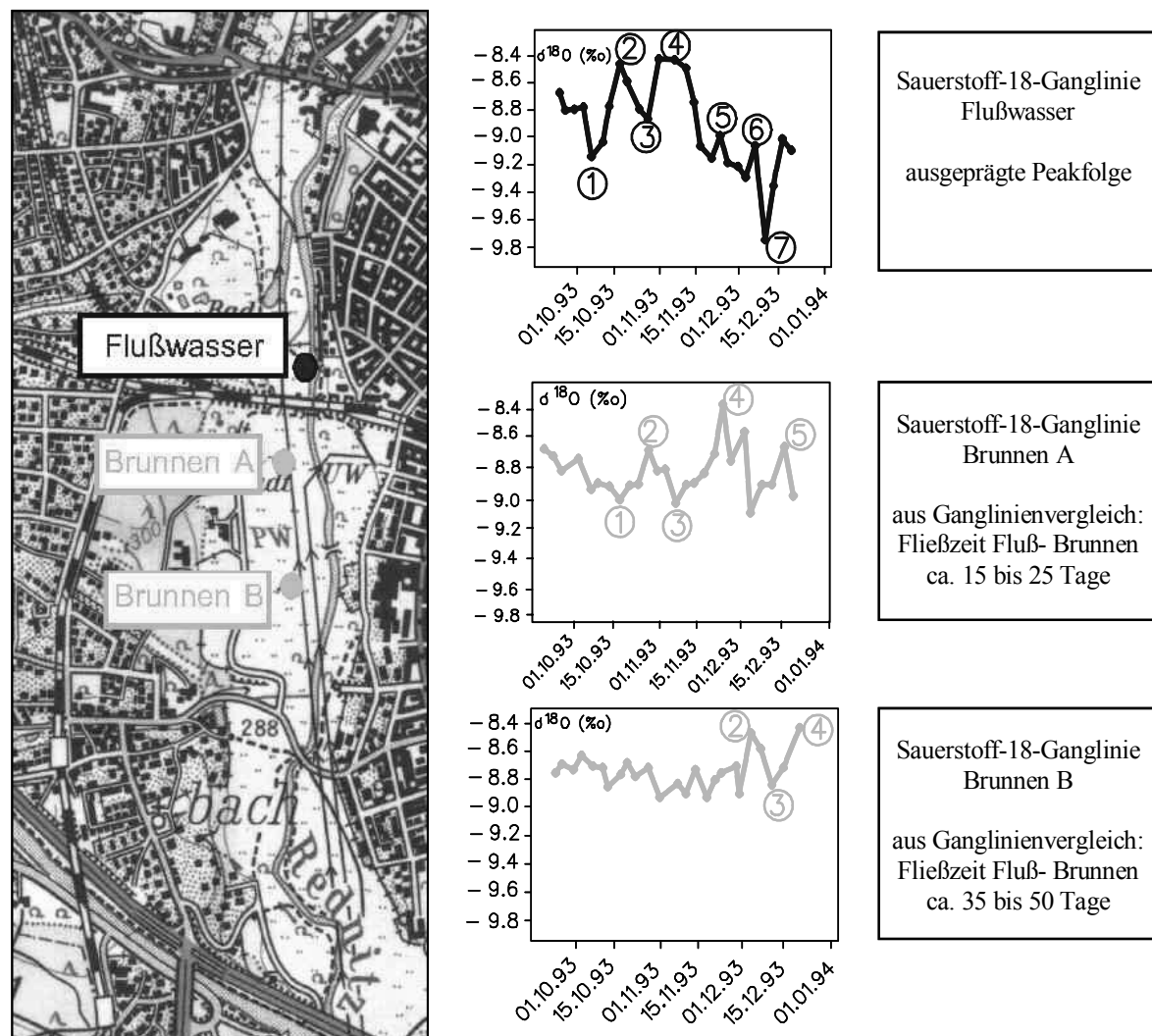


Abb. 5:  $^{18}\text{O}$ -Ganglinien in der Rednitz sowie in flussnahen Messstellen

Ganglinien des Flußwassers und des Förderwassers der ca. 100 m vom Ufer entfernten Brunnen ermittelt (Stadtwasserversorgung im Großraum Nürnberg).

Durch einen Ganglinienvergleich war es möglich, die Fließzeiten des Flußuferfiltrates zu den einzelnen Brunnen bei unterschiedlichen hydraulischen Verhältnissen (Flußwasserstände) zu bestimmen.

## Fazit

Anhand der Ganglinien der natürlichen Isotopensignaturen lassen sich Anteile und Fließzeiten von Uferfiltrat in flussnahen Wasserversorgungsbrunnen exakt bestimmen. Im Vergleich zur Anwendung von künstlichen Tracern ist die Methode aufwandsarm und kostengünstig.

## Schadstoffe in einem Kluft- und Karstgrundwasserleiter

Das intensiv für die Trinkwasserversorgung genutzte Grundwasser im Tiefenkarst der südlichen Schwäbischen Alb ist auch 10 Jahre nach Anwendungsverbot immer noch mit dem Pflanzenschutzmittel Atrazin und dessen Abbauprodukten belastet.

Zur Erkundung der Situation wurden an 8 Tiefenkarstbrunnen nähere Untersuchungen zur Altersstruktur der erschlossenen Grundwässer

durchgeführt. Wesentliches Ziel der Isotopen- und Spurenstoffuntersuchungen ( $^3\text{H}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ , FCKW,  $\text{SF}_6$ ) war es, Aufschluß über die Zustromkomponenten der Tiefbrunnen und deren Altersstruktur zu erhalten. Auf der Grundlage dieser Kenntnisse sollen zu einem späteren Zeitpunkt Prognosen zur weiteren Entwicklung der Pflanzenschutzmittelgehalte im Tiefengrundwasser gemacht werden.

Auf Basis der Isotopenuntersuchungsergebnisse (z.B. Tritiumreihenuntersuchungen, Abb. 6) konnte eine Gruppe mit homogenen Zuflussverhältnissen und vergleichsweise jungem, ca. 5 Jahre alten Grundwasser von einer Gruppen mit heterogener Alterszusammensetzung unterschieden werden.

In den Tiefbrunnen mit heterogener Alterszusammensetzung besteht das Förderwasser aus einer Mischung von mindestens 2 Hauptkomponenten. Eindeutige Aussagen zur Grundwasseraltersstruktur und quantitative Angaben zum Mischungsverhältnis dieser Komponenten wurden hier aus den Ergebnisse von FCKW-,  $\text{SF}_6$ - und  $^{85}\text{Kr}$ -Bestimmungen abgeleitet.

Während eine leichte Verfälschung der Ergebnisse der FCKW-Gehalte durch punktuelle lokale Einträge festgestellt wurde, liefern die  $\text{SF}_6$ - und  $^{85}\text{Kr}$ -Bestimmungen im Grundwasser des Tiefenkarsts gut übereinstimmende Ergebnisse (vgl. Abb. 7 und 8).

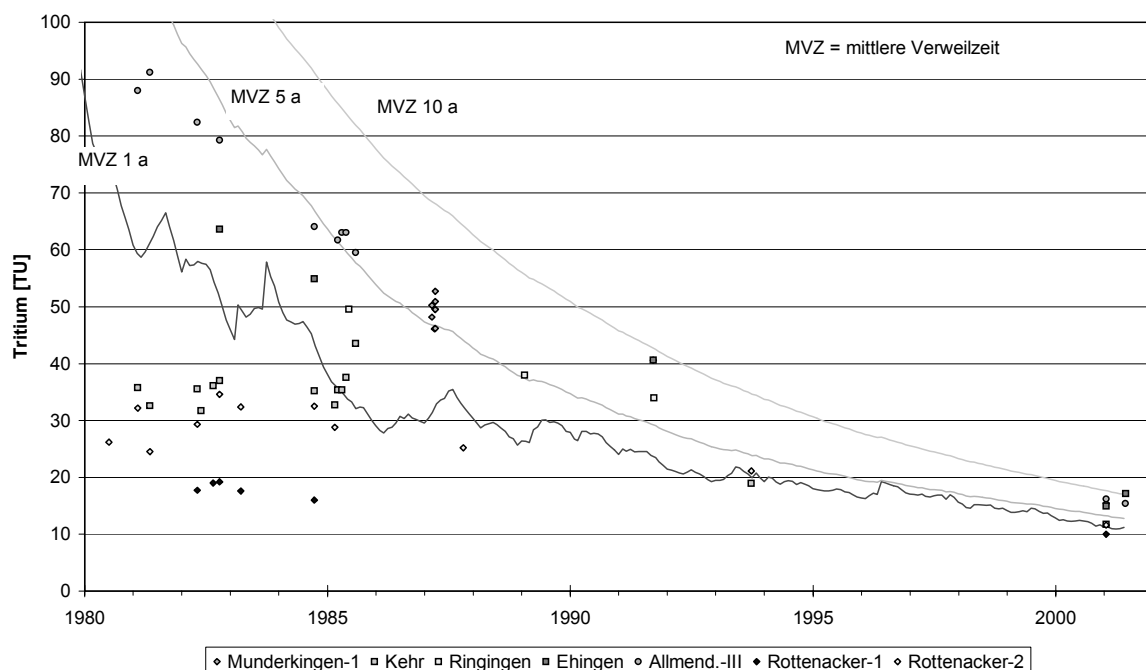


Abb. 6: Bestimmung von mittleren Grundwasserverweilzeiten anhand von Tritiumreihenuntersuchungsdaten nach dem Exponentialmodell

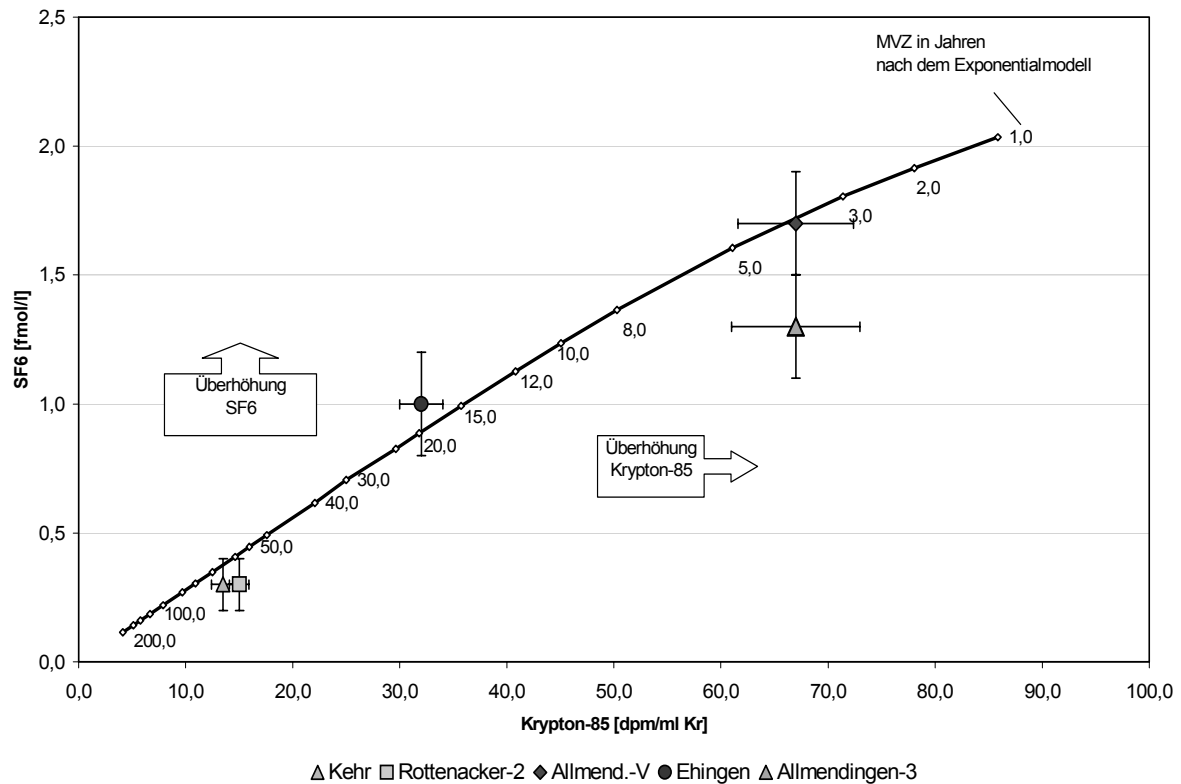


Abb. 7: Bestimmung der mittleren Grundwasserverweilzeit anhand von  $^{85}\text{Kr}$ - und  $\text{SF}_6$ -Daten nach dem Exponentialmodell

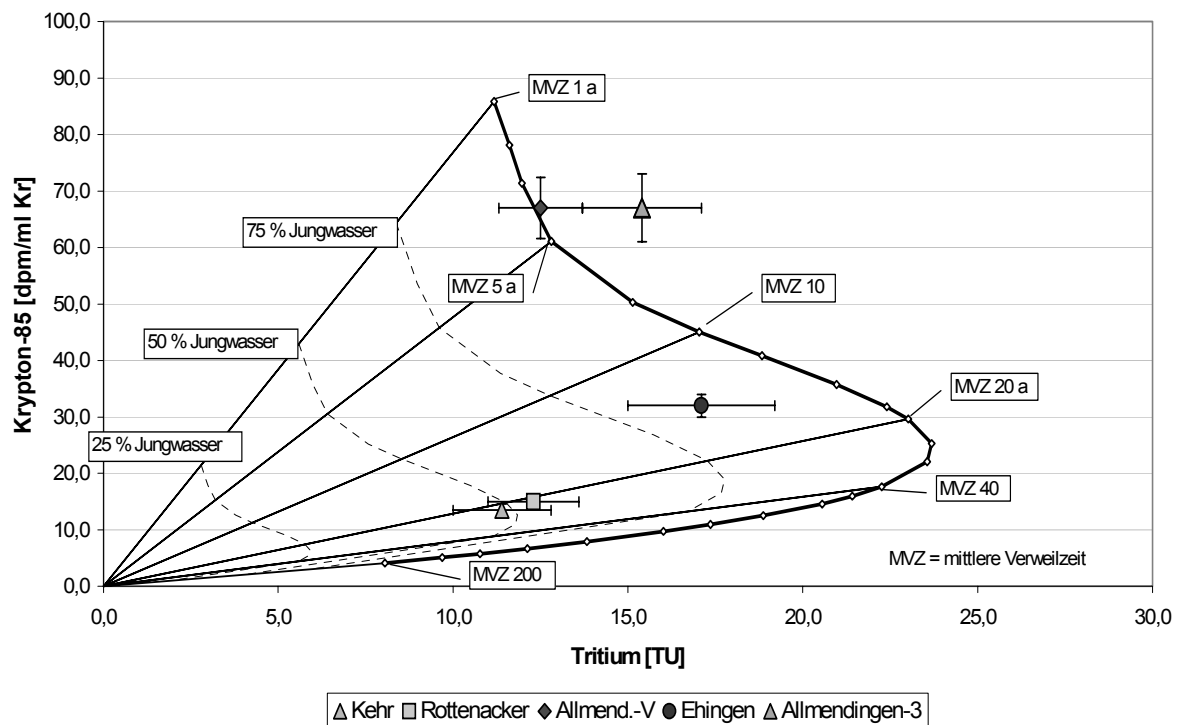


Abb. 8: Berechnung der mittleren Grundwasserverweilzeit anhand von  $^3\text{H}$ - und  $^{85}\text{Kr}$ -Daten nach dem Exponentialmodell

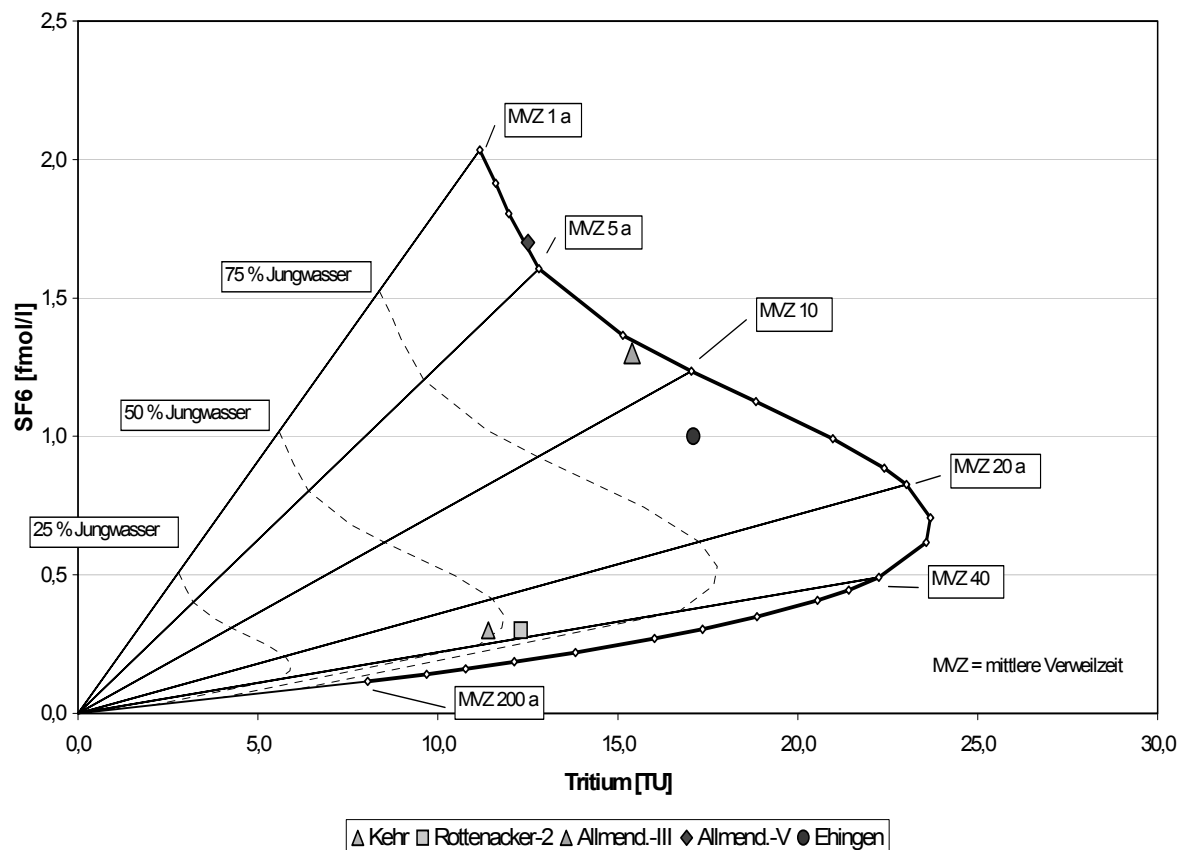


Abb. 9: Berechnung der mittleren Verweilzeit anhand von  $^3\text{H}$ - und  $\text{SF}_6$ -Daten nach dem Exponentialmodell

Bei den Mischwässern können demzufolge zwei Gruppen unterschieden werden:

- Brunnen mit beträchtlichen Anteilen an jüngerem Grundwasser z.B. Tiefbrunnen Ehingen
- Brunnen mit geringeren Anteilen an jüngeren Grundwässern z.B. Tiefbrunnen Kehr, Rottenacker-2.

In den hier näher untersuchten Tiefenkarstbrunnen werden noch deutliche Gehalte an Atrazin bzw. dessen Abbauprodukte nachgewiesen (bis ca.  $0,3 \mu\text{g/l}$ ). Ursache dieser seit ca. 10 Jahre verbotenen und nicht mehr flächenhaft ausgebrachten Schadstoffgehalte im heutigen Grundwasser ist die Alterstruktur des Tiefenkarstwassers, das noch beträchtliche Grundwasseranteile aus der Zeit enthält, als Atrazin ausgebracht wurde (ca. 1960-1991).

Die tatsächliche Belastung dieser atrazinhaltigen Grundwasserkomponente ist noch wesentlich höher, als o.g. Wert, da alle Brunnen auch beträchtliche Zuflußanteile entweder an sehr jungem oder sehr altem Grundwasser erhalten, die nicht mit Atrazin belastet sind.

Zusammenfassend dargestellt zeigen die aktuell durchgeführten Untersuchungen, dass im Tiefenkarstsystem noch beträchtliche Grundwasseranteile mit einer Belastung durch Atrazin enthalten sind.

Für die Tiefenkarstbrunnen gelten in der Regel heterogene Zuflussverhältnisse, wobei es einerseits im Aquifer oder im Brunnen zu einer Vermischung verschiedener Komponenten kommt.

Auf der Basis der Alterszusammensetzung der Wasser ist eine Prognose des Wasserumsatzes im Tiefenkarstsystem möglich. Hiermit kann die weitere Entwicklung der Pflanzenschutzmittelgehalte im Grundwasser modellhaft beschrieben werden.

## Fazit

Da die errechnete mittlere Verweilzeit der jungen Grundwasserkomponente z.T. mehrere Jahrzehnte beträgt, kann ein schneller Erfolg von Sanierungsmassnahmen nicht erwartet werden. Soll eine Reduktion des Eintrages von PSM in das System Wirkung zeigen, so müssen die Maßnahmen konsequent über einen sehr langen Zeitraum beibehalten werden.

## Literatur

- BERTLEFF B., WATZEL R., EICHINGER L., HEIDINGER M., SCHNEIDER K., LOOSLI H.H. & STICHLER W. (1997): The use of isotope based modelling techniques for groundwater management in a Quaternary aquifer system. Isotope Techniques in the Study of Environmental Change (IAEA Proc. Symp. Vienna, 1997), IAEA, Vienna (1997) .
- CLARK, I. & FRITZ, P. (1997): Environmental Isotopes in Hydrogeology.
- DVWK (1995): Speicher-Durchfluß-Modelle zur Bewertung des Stoffein- und Stoffaustrags in unterschiedlichen Grundwasser-Zirkulationssystemen. DVWK Fachausschuß "Grundwassererkundung", Bonn, 118 S., 47 B., 11 T.
- EICHINGER L. & STICHLER W. (1997): Isotopenuntersuchungen in der Münchner Schotterebene, Beiträge zur Hydrogeologie Band 48/I Joanneum Research
- EICHINGER, L., HEINRICHS, G., HEIDINGER, M., LOOSLI, H. & DEIGLMAYER, W. (1999): Isotopic study of a deep groundwater system near the Danube-river/South Germany, EAEA-SM-361/95P
- FRITZ, P. & FONTES, J.CH. (1980): Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, ELSEVIER Scientific Publishing Company Amsterdam – Oxford – New York. 2 Bde.
- HEIDINGER, M., LOOSLI, H.H., BERTLEFF, B., EICHINGER L., GÖPPEL M., OSTER H. & TRAUB R. (1996): Kombination von Isotopenmethoden zum Verständnis ausgewählter Grundwassersysteme, Proceedings of Isotopenkolloquium Freiberg.
- HOEFS, J. (1997): Stable Isotope Geochemistry, Springer Verlag Berlin – Heidelberg
- MOSER, H. & RAUERT, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie, Gebrüder Borntraeger, Berlin Stuttgart
- OSTER H., SONNTAG C. & MÜNNICH K.O. (1996): Groundwater age dating with chlorofluorocarbons. *Water Resour. Res.* 32, 2989-3001.
- SALVAMOSER, J. (1982):  $^{85}\text{Kr}$  im Grundwasser - Messmethodik, Modellüberlegungen und Anwendungen auf natürliche Grundwassersysteme. Diss. Univ. München