

^3He und ^{85}Kr – Erfahrungen und Anwendungsbeispiele

Stephan Weise

UFZ-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, AG Isotopenhydrologie, Theodor-Lieser-Straße 4, 06120 Halle; E-mail: weise@halle.ufz.de

Die Suche nach alternativen und additiven Methoden zur Tritium-Methodik bei der Erkundung des Wasserkreislaufs führte frühzeitig auf die Edelgas-Isotope ^3He und ^{85}Kr . Die Grundlagen für die Nutzung von ^3He wurden bereits von TOLSTIKHIN & KAMENSKIY 1969 angerissen, während der Einsatz von ^{85}Kr als Grundwasser-Datierungsinstrument von ROZANSKI & FLORKOWSKI 1979 vorgestellt worden war. Die ^3He -Methodik ist zwangsläufig eng gekoppelt an ^4He , welches wiederum selbst in gewissem Rahmen als Datierungsinstrument eingesetzt werden kann, jedoch für einen im allgemeinen um Größenordnungen höheren Altersbereich. Aus diesem Grund soll die ^4He -Methodik hier nicht besprochen werden.

In diesem Beitrag soll anhand von Anwendungsbeispielen, zu denen ich einen unmittelbaren Kontakt hatte bzw. hat, ein Überblick über die methodischen Besonderheiten der auf diesen beiden Edelgas-Isotopen beruhenden Methoden vorgestellt werden. Untersucht wurden dabei größtenteils Systeme, zu denen an nur wenigen Stellen über Quellen und Brunnen Zugang möglich war. Die wenigen daraus resultierenden Isotopendaten wurden bzw. werden daher nur mittels „Black-Box“-Modellen mit niedriger Parameteranzahl (auch Speicher-Durchfluss-Modelle oder lumped parameter models genannt; vgl. MALOSZEWSKI & ZUBER 1996) interpretiert. Der apparative Aspekt beider Methoden wird hier nicht behandelt.

Methodische Grundlagen

Eine Gemeinsamkeit und in mancher Hinsicht besonderer Vorteil beider Isotope liegt in ihrer Edelgas-Natur, so dass chemische Wechselwirkungen keine Rolle spielen. Die Gehalte an ^3He und ^{85}Kr werden im sich neu bildenden Grundwasser durch das Löslichkeitsgleichgewicht, beschrieben durch den Bunsenschen Löslichkeitskoeffizienten, mit dem benachbarten Gasraum – im allgemeinen der Bodenluft – bestimmt. Wie weiter unten ausgeführt wird, hat dies für beide Methoden sehr verschiedene Konsequenzen.

^3He (und $^3\text{He}/^3\text{H}$)

^3He ist das stabile Zerfallsprodukt von Tritium (^3H). Es ist in niedrigen, aber relevanten Konzentrationen ubiquitär, wobei Mengen bzw. Konzentrationen normalerweise über das Verhältnis zum wesentlich häufiger vorkommenden Isotope ^4He angegeben werden. So liegt der atmosphärische $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Wert bei $1,4 \times 10^{-6}$ bei

einer ^4He -Konzentration von etwa 5,2 ppm. Die ^3He -Konzentration ist demnach knapp 7,3 ppt. In (Süß-) Wasser lösen sich bei einer Temperatur von 8 °C und 1013 hPa Luftdruck $6,38 \times 10^{-14}$ Nml/g ^3He . Da der komplette Zerfall von 1 TU Tritium eine ^3He -Konzentration von $2,49 \times 10^{-15}$ Nml/g erzeugt, entspricht die im Gleichgewicht mit der Atmosphäre in Wasser gelöste ^3He -Konzentration einer Konzentration an „zerfallendem Tritium“ von 25,6 TU. Dies ist der Minimal-Background, vor dem ein aus dem Zerfall von Tritium aus dem Niederschlag erzeugter ^3He -Anteil aufgelöst werden muss. Weitere Background-Beiträge können sich prinzipiell durch Heliumzutritt aus den Reservoirien Gestein der Erdkruste sowie Erdmantel ebenso wie durch über das Löslichkeitsgleichgewicht hinausgehende Heliumanteile atmosphärischen Ursprungs ergeben (siehe z.B. STUTE et al. 1992).

Einen groben Überblick über die verschiedenen Heliumreservoirs und die einflussnehmenden Prozesse zeigt Abbildung 1.

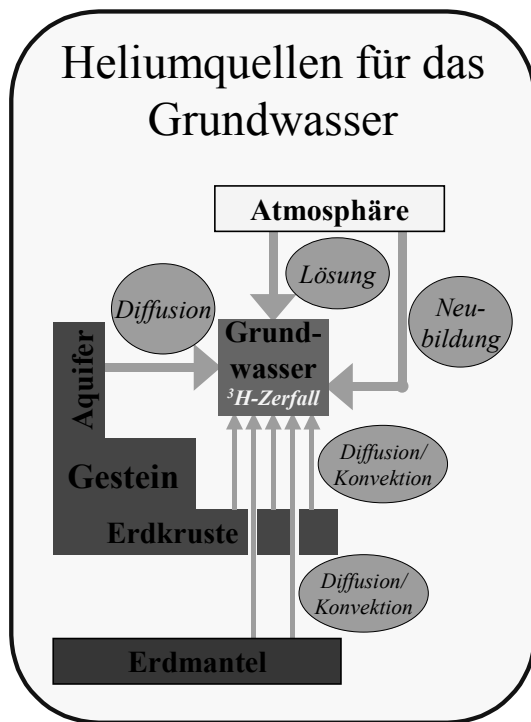


Abb. 1: Überblick über die verschiedenen Heliumreservoirs und der damit verbundenen Prozesse, die auf die Heliumisotopengehalte im Grundwasser Einfluss nehmen können.

Es ist offensichtlich, dass mit einer Bestimmung ausschließlich des ^3He -Gehaltes im Grundwasser die Beiträge dieser verschiedenen Heliumquellen nicht auflösbar sind. Werden noch ^4He - und Neon-Gehalte mitbestimmt, können zumindest drei, unter gewissen Annahmen auch vier Komponenten separiert werden. Die Datierung mit ^3He wird jedoch grundsätzlich problematisch, wenn hohe Heliumbeiträge aus Erdkruste und/oder Erdmantel anzutreffen sind.

Die alleinige Verwendung von ^3He zur Grundwasser-Datierung macht wenig Sinn, da zu den Unsicherheiten der ^3He -Methode selbst noch sämtlich Unsicherheiten hinsichtlich der Tritium-Eintragsfunktion hinzukommen. ^3He wird daher erst in der Mutter-Tochter-Kombination $^3\text{He}/^3\text{H}$ zur interessanten Methode. Streng nach der Gesetzmäßigkeit des radioaktiven Zerfalls ist dieser Verhältniswert nur von der Zeit, nicht aber von der ^3H -Anfangskonzentration abhängig. Hieraus wird gern die scheinbare Unabhängigkeit der $^3\text{He}/^3\text{H}$ -Methode von der Tritium-Eintragsfunktion abgeleitet, was ein kaum zu unterschätzender Zugewinn zur einfachen Tritium-Methode wäre. Mischungsvorgänge können jedoch zu drastischen Verschiebungen im $^3\text{He}/^3\text{H}$ -Wert führen, weswegen auch bei der

Interpretation kombinierter $^3\text{He}/^3\text{H}$ -Werte der Tritium-Eintrag und Modellvorstellungen über das Fließsystem berücksichtigt werden müssen.

^{85}Kr

^{85}Kr tritt als Produkt bei der Spaltung von Uran auf. Der Umfang, in dem es in die Atmosphäre gelangt, ist daher direkt mit der Nutzung der Kernspaltung und der Verbreitung der Wiederaufarbeitungsanlagen verbunden; der natürliche Background an ^{85}Kr in der Kryptonfraktion der Luft ist ebenso wie die Produktion im Gestein der Erdkruste im allgemeinen vernachlässigbar. Die Schwankungen im ^{85}Kr -Gehalt in der Luft können von der Windrichtung ebenso abhängig sein wie von den Prozessabläufen der Wiederaufbereitungsanlagen. Im groben Mittel allerdings ist der ^{85}Kr -Gehalt der Luft über die Jahre hin monoton ansteigend, was einen wesentlichen tracermethodischen Vorteil gegenüber Tritium und den FCKWs darstellt. Eine auf den Münchener Großraum bezogene ^{85}Kr -Eintragsfunktion zeigt Abbildung 2.

Der ^{85}Kr -Gehalt wird allgemein, wie in, durch den Bezug auf die Gesamt-Kryptonfraktion der Luft bzw. des untersuchten Gases als relative Größe dargestellt. Vorteilhafterweise entfällt damit die beispielsweise bei der ^3He -Methode unbedingt erforderliche quantitative Erfassung des Gasgehaltes des zu untersuchenden Wassers. Dies hat einerseits Unempfindlichkeit hinsichtlich von Entgasungseffekten zur Folge und

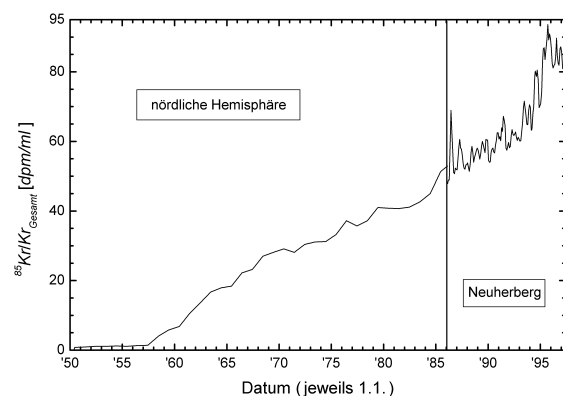


Abb. 2: ^{85}Kr -Eintragsfunktion beispielhaft für die Fränkische Alb, angegeben in ^{85}Kr -Zerfällen pro Minute (dpm) je Milliliter Krypton. Für die Zeit vor 1986 wurden nur Jahresmittelswerte der ^{85}Kr -Konzentration in der nördlichen Hemisphäre verwendet. Die seit 1986 in beim GSF-Forschungszentrum in Neuherberg aufgezeichneten Daten sind auf Monatsmittel umgerechnet und geglättet. (aus: RAU 1999)

macht andererseits die Probenahme etwas weniger aufwendig.

Auswirkungen der ungesättigten Bodenzone

Der Sickerwasser-Transfer durch die ungesättigte, also mit Gasräumen versetzte Bodenzone hat auf den ^3He - und den ^{85}Kr -Gehalt im Sickerwasser unterschiedliche Konsequenzen. ^3He wird im Sickerwasser aus dem Zerfall des Tritiums erzeugt, wodurch ein Konzentrationsgradient zur Bodenluft entsteht, der sich durch das sich immer wieder einstellende Löslichkeitsgleichgewicht ausgleicht: Der ^3He -Überschuss diffundiert aus dem Sickerwasser heraus. Die schlechte Löslichkeit von Helium hat zur Folge, dass der ^3He -Gehalt im Gleichgewicht in der Gasphase um etwa zwei Größenordnungen höher ist als in der flüssigen Phase. Die Bodenluft hat damit eine beträchtliche Aufnahmekapazität für das aus dem Sickerwasser zudiffundierte ^3He , bevor die Änderung ihres ^3He -Gehalts selbst messbar wird. So wurden an Bodengas-Proben aus verschiedenen Untersuchungsgebieten innerhalb des analytischen Unsicherheitsbereiches keine signifikanten Anstiege im $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Wert gefunden (vgl. Abb. 3).

Auch der ^{85}Kr -Gehalt des Sickerwassers stellt

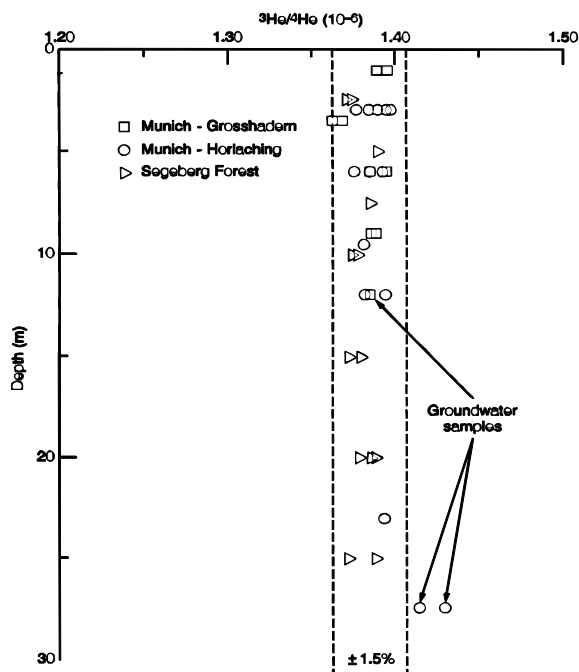


Abb. 3: $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Werte von Bodenluft-Proben aus der Münchener Schotterebene und dem Segeberger Forst. Zum Vergleich sind die Werte von Grundwasser-Proben eingezeichnet, die knapp unterhalb des Grundwasserspiegels entnommen sind. (aus: WEISE et al. 1992)

sich mit der umgebenden Bodenluft ins Gleichgewicht. Da in diesem Fall die Bodenluft bereits selbst ^{85}Kr enthält, hängt der Konzentrationsgradient zwischen Sickerwasser und Bodenluft wesentlich von der Durchlüftung der Bodenzone ab.

Maximale Durchlüftung würde atmosphärische ^{85}Kr -Gehalte im gesamten Bodengas bedeuten. Das versickernde Wasser würde dadurch seinen ^{85}Kr -Verlust durch Zudiffusion wieder auffüllen. Das sich neubildende Grundwasser ist in diesem Fall immer mit dem aktuellen ^{85}Kr -Gehalt der Atmosphäre beladen.

Ist die Durchlüftung vernachlässigbar, reflektiert der ^{85}Kr -Gehalt des Bodengases den Versickerungsprozess. Abbildung 4 zeigt ein ^{85}Kr -Profil an Bodengas-Proben aus der Münchener Schotterebene. Hier wurden aus der Annahme heraus, dass Bodengas und Sickerwasser miteinander in die Tiefe wandern, Verweilzeiten für das Bodengas und damit auch für das Sickerwasser berechnet, die bis knapp 10 Jahren reichen.

Eine solche Information ist aus der $^3\text{He}/^3\text{H}$ -Methodik nur indirekt und mit wesentlich größerer Unsicherheit abzuleiten. Grundlage ist dabei, dass die „Uhr“ der Tritium-Methode mit dem Niederschlagsereignis „tickt“, während die ^3He -Anreicherung erst im Bereich des Grundwassers beginnt. Die Differenz beider „Uhren“ sollte

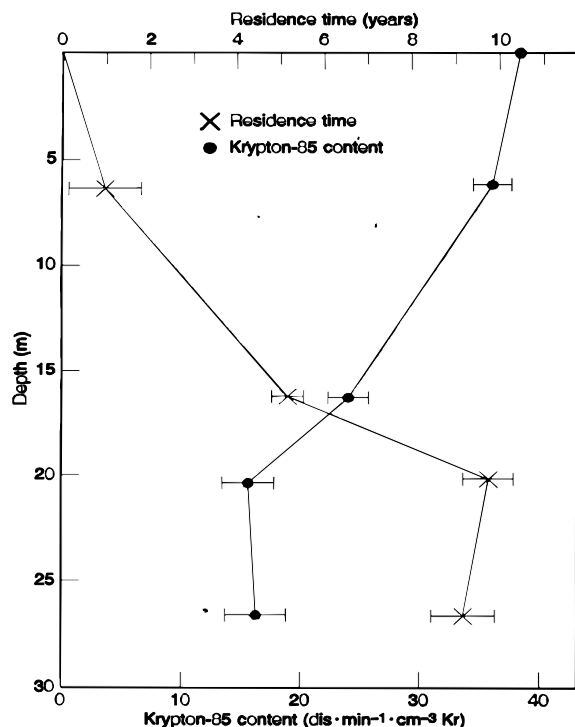


Abb. 4: ^{85}Kr -Gehalt von Bodengas-Proben aus der Münchener Schotterebene und die daraus unter Annahme von Piston-Flow-Bedingungen berechneten Verweilzeiten in den verschiedenen Horizonten. (aus: WEISE et al. 1992)

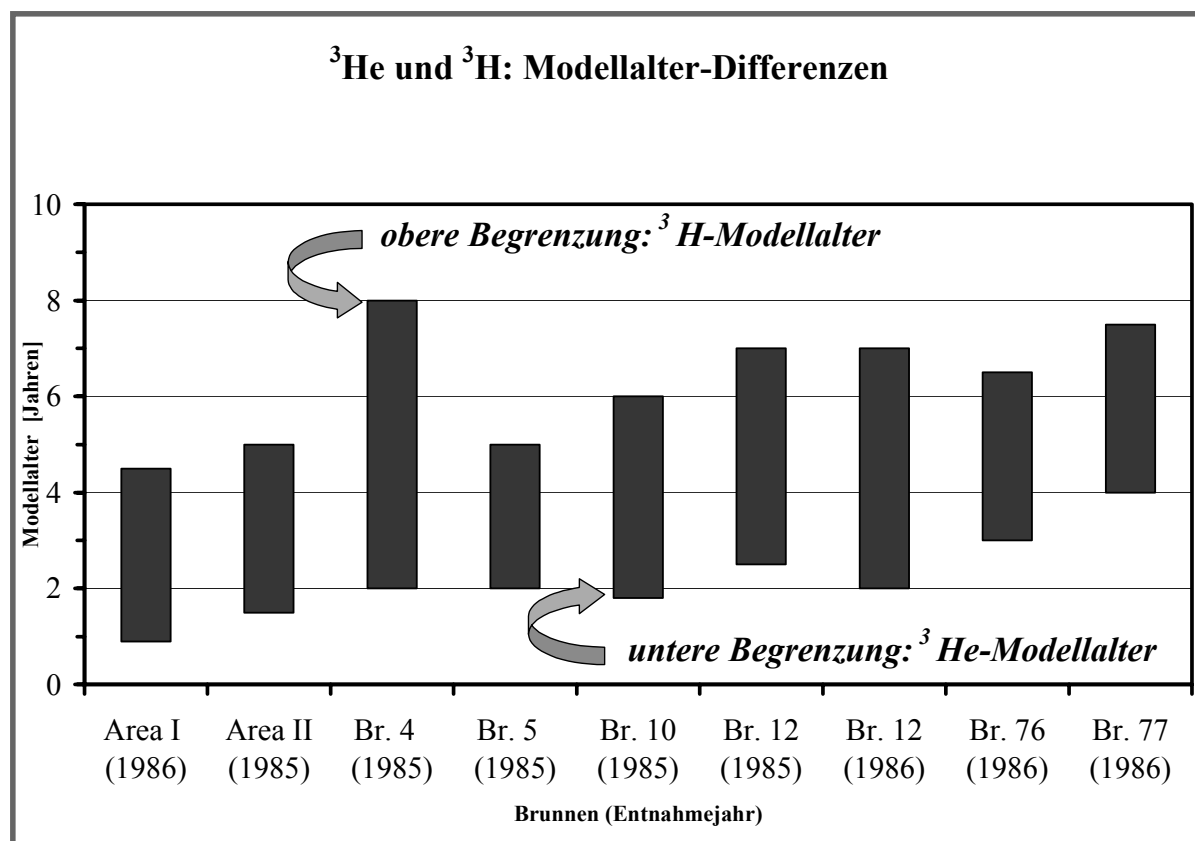


Abb. 5: Differenz zwischen ^3H - und ^3He -Modellaltern (EM) einiger Grundwässer aus dem Bereich der Münchener Schotterebene. Die Differenzbeträge (Höhe der Balken) liegen zwischen 3 und 6 Jahren.

damit die Passagezeit durch die ungesättigte Bodenzone wiedergeben.

In Abbildung 5 sind beispielhaft die Ergebnisse der ^3He - und ^3H -Datierung von Grundwasserproben aus der Münchener Schotterebene dargestellt. Die roten Balken symbolisieren die Differenz beider „Uhren“, die hier bis zu 6 Jahren erreicht und damit unter dem vom ^{85}Kr abgeleiteten Wert bleibt (Abb. 4). Dies hängt wesentlich mit den unterschiedlichen verwendeten Modellen (^{85}Kr : PFM; $^3\text{He} + ^3\text{H}$: EM) zusammen und belegt den Unsicherheitsbereich, mit dem die Verwendung solcher Modelle verknüpft ist.

Karst-Grundwässer

Besonders ausgeprägt fanden sich Gasaustausch-Effekte bzw. Auswirkungen der ungesättigten Bodenzone an Grundwasserproben aus dem Karst der Fränkischen Alb, die während Trockenwetterperioden entnommen worden waren (vgl. RAU 1999). Die Tritium-Daten (zwischen 7 und 27 TU) legen das Vorhandensein eines gewissen Altersspektrums über einen größeren Verweilzeitbereich nahe. ^{85}Kr - (und F113-) Werte deuten ebenfalls auf zumindest größere Anteile

le derartiger Wässer (zwischen 0 und 64 dpm/ml bzw. zwischen 6 und 73 ppt). Dagegen lassen sich die vielen um die Nachweisgrenze herum liegenden Gehalte an ^3He aus ^3H -Zerfall (tritiumgenes ^3He ; vgl. Abb. 6) nur im Sinne von Verweilzeiten von höchstens wenigen Jahren verstehen.

Die in Abbildung 6 ersichtlichen Gruppierungen andererseits erscheinen tendenziell plausibel im Sinne von ‚niedrige Verweilzeiten bedeuten hohe ^{85}Kr - und niedrige ^3He -Gehalte‘ sowie ‚hohe Verweilzeiten bedeuten niedrige ^{85}Kr - und hohe ^3He -Gehalte‘. Allerdings sind die Größenordnungen der jeweiligen Gehalte nicht so einfach interpretierbar. ‚Tritiumgenes $^3\text{He} = 0$ ‘ bedeutet Verweilzeiten von weniger als einem, maximal 2 Jahren. Hiermit ist ein ^{85}Kr -Gehalt von nur 30 dpm/ml nicht kompatibel (vgl. die ^{85}Kr -Eintragsfunktion in Abbildung 2). Ein Erklärungsmodell muss daher eine Wasserkomponente enthalten, die frei ist sowohl an tritiumgenem ^3He als auch an ^{85}Kr . Kein ^{85}Kr bedeutet, dass dieses Wasser vor mehr als etwa 40 Jahren neugebildet worden sein muss.

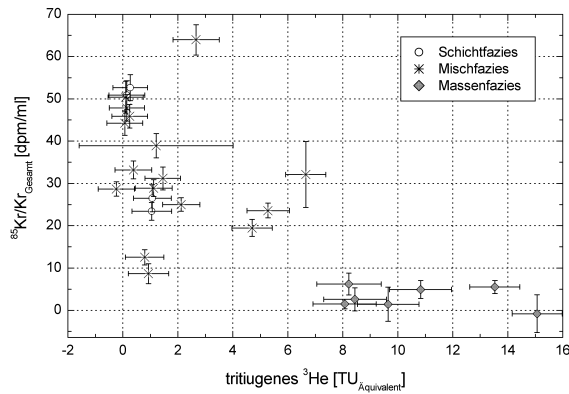


Abb. 6: ^{85}Kr - gegen tritiogenem ^3He -Gehalt von Quell- und Brunnenwässern aus der Fränkischen Alb, gegliedert nach Fazieszugehörigkeiten der Probenahmeorte. (aus: RAU 1999)

„Frei an tritiogenem ^3He “ ist eine noch weitergehende Bedingung, da auch in der Zeit vor der durch Kernwaffentests erzeugten ^3H -Freisetzung der Niederschlag einen natürlichen ^3H -Untergrund im Bereich von 5 bis 10 TU aufwies. Der Zerfall dieses Tritiums darf nicht im Grundwasserbereich vonstatten gegangen sein, weshalb hierfür eine viele Jahre währende Passage durch die ungesättigte Bodenzone angenommen werden muss. Zur Interpretation der Tritium-, ^3He -, ^{85}Kr - und F113-Gehalte wurde daher eine Modellvorstellung entwickelt, die einerseits einen sehr langsamen Transportpfad durch die ungesättigte und gesättigte Bodenzone berücksichtigt. Andererseits wurde eine „schnelle“ Komponente eingebracht, die im wesentlichen zur Erklärung der ^{85}Kr - (und F113-) Gehalte dient. Modellparameter sind

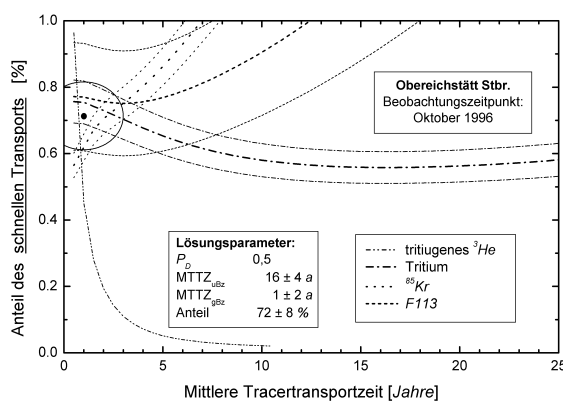


Abb. 7: Parameteranpassung für Tritium-, ^3He -, ^{85}Kr - und F113-Werte von Wasserproben aus der Quelle Obereichstätt Steinbruch. P_D ist der Dispersionsparameter, $MTTZ_{uBz}$ die mittlere Tracer-Transportzeit in der ungesättigten Bodenzone, $MTTZ_{gBz}$ die mittlere Tracer-Transportzeit in der gesättigten Bodenzone (aus: RAU 1999).

- die Verweilzeiten der schnellen Komponente in der gesättigten und in der ungesättigten Bodenzone,
- das Anteilsverhältnis von schneller und langsamer Komponente sowie
- der Dispersionsparameter des für den Bereich der gesättigten Bodenzone angenommenen Dispersionsmodells.

Beispielhaft ist in Abbildung 7 das Ergebnis eines Anpassungsverfahrens für die Quelle Obereichstätt Steinbruch angegeben. Die Parameter erwiesen sich als kompatibel mit den für diese Quelle vorliegenden Tritiumdaten aus vorangegangenen Jahren (vgl. Abb. 8).

Gasreiche Grundwässer

Hochmineralisierte Grundwässer sind oft von balneologischer oder weitergehender medizinischer Bedeutung und unterliegen dann ganz besonderer Kontrolle. Zur Aufklärung oberflächennaher Einflüsse wurden Grundwässer im Raum Stuttgart auf ihre Gehalte an Tritium, ^3He und ^{85}Kr hin untersucht. Die dortigen Wässer sind z.T. hochgradig CO_2 -haltig und weisen beim Austritt Blasen auf. Die Verwendbarkeit der „gasförmigen“ Tracer ^3He und ^{85}Kr war daher a priori fraglich.

Wie schon erwähnt, wird der ^3He -Gehalt zusammen mit dem ^4He -Gehalt bestimmt. Der $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Wert wird durch die verschiedenen in Abbildung 1 dargestellten Komponenten unterschiedlicher Heliumquellen bestimmt. Abbil-

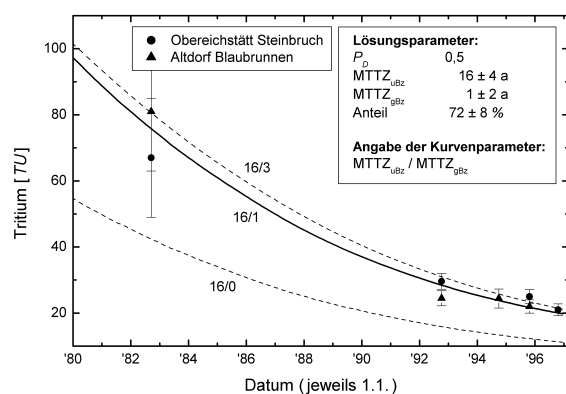


Abb. 8: Tritiumzeitreihe der unter Trockenwetterabflussbedingungen entnommenen Proben aus der Quelle Obereichstätt Steinbruch und Altdorf Blaubrunnen. Für diese beiden Entnahmestellen waren identische Parameter bei der Anpassung aus den Tracer-Daten ermittelt worden. Die in der Legende genannten Abkürzungen entsprechen denen von Abbildung 7 (aus: RAU 1999)

Abbildung 9 stellt einen Versuch dar, die Heliumisotopengehalte von Grundwasserproben in diese Komponenten zu differenzieren. Ein im Gleichgewicht mit der Atmosphäre befindliches Wasser ist durch das grüne Kästchen am rechten Rand des Diagramms gekennzeichnet ($[^3\text{He}/^4\text{He}]_{\text{Löslichkeit}} = 1,36 \times 10^{-6}$). Im Untergrund kann Helium aus dem Erdmantel (charakteristischer Wert: $[^3\text{He}/^4\text{He}]_{\text{Oberer Mantel}} \approx 11 \times 10^{-6}$), aus der Erdkruste ($[^3\text{He}/^4\text{He}]_{\text{Erdkruste}} < 0,1 \times 10^{-6}$) sowie aus dem Zerfall des meteorisch mit eingetragenen Tritiums (nur ^3He) hinzukommen. Die in Abbildung 9 dargestellten Geraden bezeichnen die Entwicklung des Heliumisotopeninventars im Grundwasser bei Zustrom von Helium aus der Erdkruste mit $^3\text{He}/^4\text{He} = 0,1 \times 10^{-6}$ und unterschiedlichen ‚Startgehalten‘ an ^3He aus dem Zerfall meteorischen Tritiums. Da die Messpunkte selbst bei sehr hohen ^4He -Gehalten (also bei einer Lage am linken Rand des Diagramms) noch $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Werte nahe $0,5 \times 10^{-6}$ aufweisen, sind Beiträge von Helium aus dem Erdmantel anzunehmen. Hierfür dürfte eine gewisse Dehnungstektonik des Stuttgart querenden Fiedergrabens verantwortlich sein.

Die hinsichtlich des Heliumabsolutgehaltes und der sonstigen Heliumkomponenten unsichere

Situation bei den Grundwässern aus dem Raum Stuttgart behaftet eine Bestimmung des tritiumgenerierten ^3He -Anteils und damit eine altersmäßige Klassifizierung mit sehr großen Ungenauigkeiten. Hier erweisen sich die ^{85}Kr -Daten als aussagekräftig, insbesondere, weil der ^{85}Kr -Gehalt des Grundwassers als Relativwert bezogen auf die Gesamt-Kryptonfraktion angegeben wird und damit unabhängig von Entgasungserscheinungen ist.

Abbildung 10 zeigt den ^{85}Kr -Gehalt der untersuchten Grundwässer über dem Verhältnisswert aus ^{85}Kr - und Tritium-Gehalt. Mit eingezeichnet sind die mit Exponential- und Piston-Flow-Modell errechneten Verweilzeit-Kennlinien. Die meisten Messpunkte passen sich in den durch die Kennlinien der beiden Extrem-Modelle (Exponentialmodell: völlige Durchmischung; Piston-Flow-Modell: überhaupt keine Durchmischung) aufgespannten Bereich, wobei die Messpunkte 1, 2, 5 und 8 recht gut der Piston-Flow-Kennlinie folgen, Messpunkt 3 (und 7) aber nahe der Exponentialmodell-Kennlinie gelegen ist.

Bemerkenswert ist die besondere Lage der hoch mineralisierten Grundwässer von 4 und insbesondere 6, eventuell auch von 7. Höchstwahrscheinlich

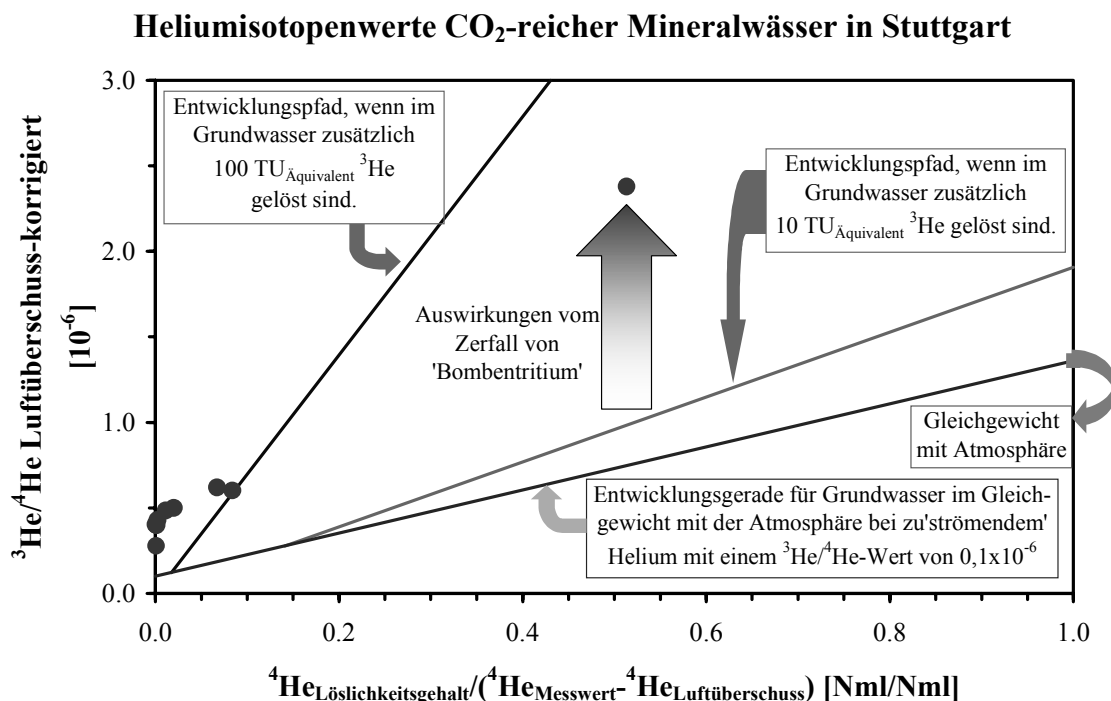


Abb. 9: Das um Luftüberschuss-Anteile korrigierte $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis über dem inversen, um Luftüberschuss-anteile reduzierten und auf den Löslichkeitsgehalt normierten ^4He -Gehalt von Grundwasserproben aus dem Raum Stuttgart (rote Kreise). Mit eingezeichnet sind Entwicklungspfade, die sich für den ‚Zustrom‘ von Helium mit $^3\text{He}/^4\text{He} = 0,1 \times 10^{-6}$ in das Grundwasser unter den verschiedenen aufgeführten Startbedingungen ergeben. Dieser $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Wert wird als obere Grenze für Helium aus der Erdkruste angesehen.

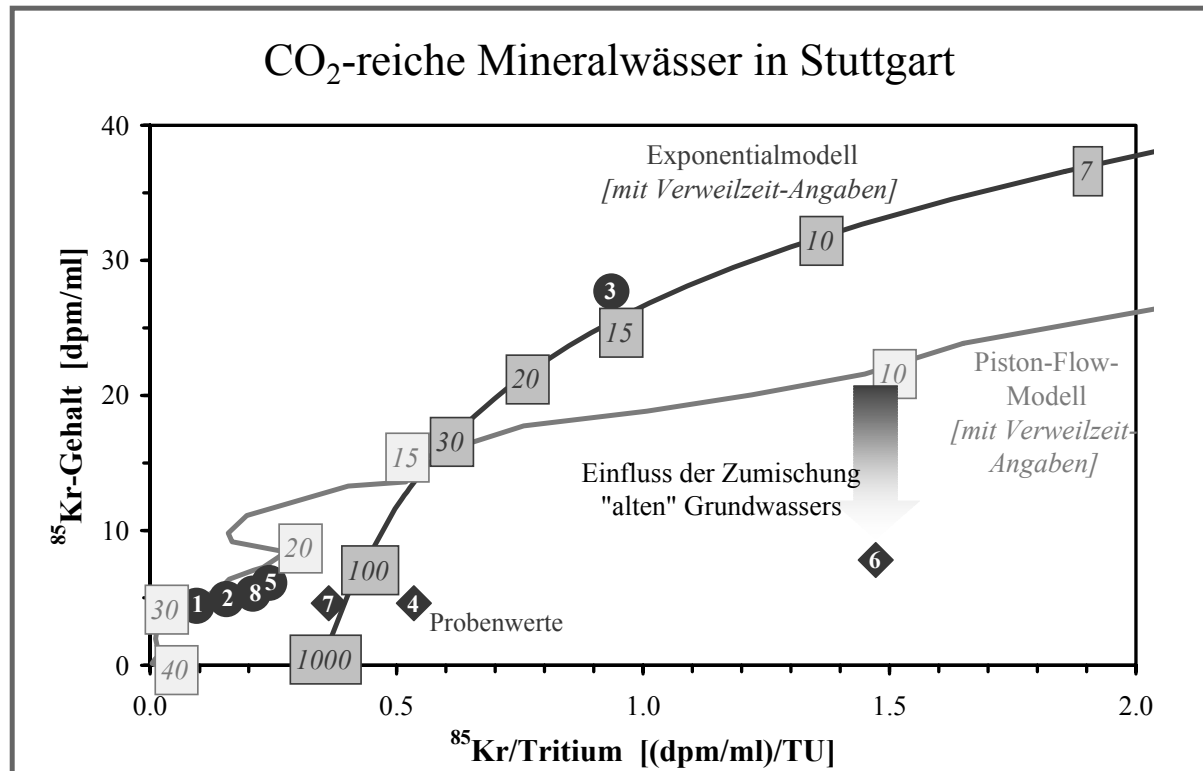


Abb. 10: ^{85}Kr -Gehalt aufgetragen über dem ^{85}Kr /Tritium-Verhältnis von hoch- (Raute) und niedrig (Kreis) mineralisierten Grundwässern aus dem Raum Stuttgart. Die aus dem Exponential- und dem Piston-Flow-Modell ermittelten Verweilzeit-Kennlinien sind an einigen Stellen mit den jeweiligen Verweilzeit-Angaben beschriftet. Der rote Pfeil kennzeichnet die Auswirkungen der Zumischung einer ^{85}Kr - und Tritium-freien und damit vergleichsweise „alten“ Grundwasserkomponente auf die Lage im Diagramm.

scheinlich ist hier die hohe Mineralisation mit einer ‚alten‘, Tritium- und ^{85}Kr -freien Grundwasserkomponente verbunden, wodurch zwar der ^{85}Kr -Gehalt im Mittel niedriger ist, das ^{85}Kr /Tritium-Verhältnis aber unverändert die Verweilzeit der ‚jungen‘ Komponente markiert.

Zusammenfassende Bemerkungen

Die auf der Messung der ^3He - und der ^{85}Kr -Gehalte beruhenden Methoden sind in etwa deckungsgleich mit dem Datierungsbereich der Tritium-Methodik, haben jedoch andere Vor- und Nachteile. Grundsätzlich sollten beide Methoden nur in Verbindung mit der Tritium-Methode angewandt werden.

Der Edelgascharakter von ^3He und ^{85}Kr bewirkt starke Wechselwirkungen mit Gasphasen, sei es in der ungesättigten Bodenzone oder sei es mit Gasblasen bei gasreichen Grundwässern. Die aus diesen Wechselwirkungen resultierenden Informationen können im Falle der ungesättigten Bodenzone jedoch zu durchaus relevanten Erkenntnissen hinsichtlich des untersuchten hydrologischen Systems führen.

Aufgrund seiner vielen potentiellen Quellen bedarf die ^3He -Methodik weitgehender Hintergrundinformationen über potentielle Heliumquellen und damit die geologische und hydrogeologische Situation. Einzeluntersuchungen führen fast zwangsläufig zu nicht handhabbaren Vieldeutigkeiten. Liegen die nötigen Hintergrundinformationen jedoch vor, sind gegenüber der alleinigen Verwendung der Tritium-Methode wesentlich präzisere Verweilzeitangaben insbesondere zu höheren Verweilzeiten hin und zusätzlich Aussagen über Mischungsverhältnisse möglich.

Dieselben positiven Aspekte gelten für die Kombination der ^{85}Kr - mit der Tritium-Methode, nur dass die Kombination dieser beiden Methoden besonders sensitiv zu kleinen Verweilzeiten hin ist. Der große Vorteil der ^{85}Kr -Methode liegt einerseits darin, dass die Atmosphäre praktisch die einzige ^{85}Kr -Quelle darstellt, und andererseits in dem quasi monotonen Anstieg der Eintragsfunktion, ein großer Nachteil in dem in diesem Beitrag noch nicht erwähnten Probenwasserbedarf von 200 Litern und mehr. Hierzu sind allerdings Fortschritte in Arbeit, es existiert bereits ein Mess-System mit einem Probenwasserbedarf von wenigen Litern.

Literatur

- MALOSZEWSKI, P. & ZUBER, A. (1996): Lumped parameter models for interpretation of environmental tracer data. Manual on Mathematical Models in Isotope Hydrogeology, IAEA-TECDOC 910, IAEA, Wien, 9-58.
- RAU, I. (1999): Multitracerstudie zum Langzeitspeicherverhalten von heterogenporösen Medien am Beispiel des Karstgrundwasserleiters der südlichen Fränkischen Alb. Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften, Ludwig-Maximilians-Universität München.
- ROZANSKI, K. & FLORKOWSKI, T. (1979): ^{85}Kr dating of groundwater. In: Isotope Hydrology 1978, Proc. Int. Symp., IAEA, Wien, 949-961.
- STUTE, M., SONNTAG, C., DEÁK, J. & SCHLOSSER, P. (1992): Helium in deep circulating groundwater in the Great Hungarian Plain: Flow dynamics and crustal and mantle helium fluxes. *Geochim. Cosmochim. Acta* 56, 2051-2067.
- TOLSTIKHIN, I.N. & KAMENSKIY, I.L. (1969): Determination of groundwater ages by the T- ^3He -method. *Geochemistry International* 6, 810-811.
- WEISE, S.M., EICHINGER, L., FORSTER, M. & SALVAMOSER, J. (1992): ^3He and ^{85}Kr dating of shallow groundwaters - Diffusive loss and correlated problems. In: *Isotopes of Noble Gases as Tracers in Environmental Studies* (Ed. IAEA). Vienna: International Atomic Energy Agency, ISBN 92-0-100592, 147-162.