

Markierungsversuche mit einer umweltschonenden Tracertechnik in der Falkensteiner Höhle, Schwäbische Alb

von

MAIKE LAMBARTH & MATTHIAS MARTIN

Zusammenfassung

Der Markierungsversuch von CLEMENS et al. (1997) wurde mit einer neuen, umweltschonenden Methode wiederholt, die gleichzeitig auf Einsetzbarkeit für einen großen Markierungsversuch geprüft wurde. Zu diesem Zweck waren programmierbare, automatische Wasserprobenahmegeräte entwickelt worden. Verschiedene Salze wurden auf ihre Tauglichkeit für Markierungsversuche im Karst untersucht. Darüber hinaus wird das aktuelle Fließverhalten des Karstwassers der Falkensteiner Höhle mit den Ergebnissen von 1997 verglichen.

Tracer tests using a new sustainable method in the Falkensteiner Höhle, Schwäbische Alb, Germany

The tracer test of CLEMENS et al. (1997) in the Falkensteiner Höhle was repeated using a new, sustainable method. The method was tested for its applicability in a larger tracer test planned in the future. For the tests, programmable, automatic water samplers had been developed. Different salts were examined for their usability in karst tracer tests. Additionally, the actual water flow regime in the cave is compared to the findings of 1997.

Traçage réalisé avec une méthode non polluante dans la Falkensteiner Höhle, Jura suabe, Allemagne

Le traçage réalisé par CLEMENS et al. (1997) dans la Falkensteiner Höhle a été repris avec une nouvelle méthode non polluante qui a été testée pour une future tentative de traçage à une plus grande échelle. Dans ce cadre, des échantillonneurs d'eau automatiques et programmables ont été développés, différents composés ont été testés quant à leur aptitude à servir aux traçages en milieu karstique et le régime actuel des écoulements a été comparé à celui de 1997.

1. Einleitung und Problemstellung

Die Falkensteiner Höhle ist ca. 5 km lang und befindet sich zwischen Bad Urach und Grabenstetten auf der Schwäbischen Alb. Auf den ersten 3,5 km liegt die Höhle ca. 50 - 130 m unter der Oberfläche der Erkenbrechtsweiler Halbinsel. Die Höhle ist im delta 3- und delta 4-Bereich des Weißen Jura angelegt. Der für die Trennung beider Schichten charakteristische Glaukonithorizont ist in der Höhle an mehreren Stellen, z.B. im Eingangsbereich, sichtbar. Während am Anfang eine große Anzahl an Schichtfugen zu erkennen sind, werden im hinteren Teil die Kalkblöcke immer größer und die Mergelfugen immer kleiner, wie es für den Delta 4-Bereich typisch ist. Abb. 1 zeigt den Verlauf der Falkensteiner Höhle. Im Plan sind die Eingabestelle des Tracers (E) sowie Probenahmestellen ST (Stuttgarter Block), RH (Reutlinger Halle) und SL (Schluckloch) eingezeichnet.

Bei der Analyse der Ionenkonzentrationen in verschiedenen Quellen in der Höhle konnten in den Arbeiten der Höhlen-AG Tübingen (www.hoehlenag.de) von BALL (2006), WEIHING (2006) und LAMBARTH & LEHMANN (2010) signifikante Unterschiede der Chlorid-, Natrium-, Kalium-, Magnesium- und Eisenkonzentrationen gefunden werden. Interessant ist vor allem die Quelle am Stuttgarter Block (ST), in der die Natrium- und Chloridkonzentrationen ganzjährig etwa um den Faktor 10 höher sind

als im Höhlenbach und den anderen Quellen. Eine eindeutige Erklärung hierfür konnte bisher nicht gefunden werden – in Frage kommen endogene (Herkunft aus dem verkarsteten Gestein) und exogene Faktoren (Verunreinigungen z.B. durch Düngemittel oder Streusalz).

Zu den endogenen Faktoren wurden verschiedene Theorien entwickelt und diskutiert, sie können jedoch nur schwer überprüft werden. Um den Einfluss der exogenen Faktoren zu beurteilen, müssen die Fließwege des Wassers von der Oberfläche in die Höhle bekannt sein. Diese könnten mit Hilfe von Markierungsversuchen untersucht werden. CLEMENS et al. (1997) beschreiben einen Markierungsversuch in der Höhle. Dabei wurden große Mengen NaCl im Bereich des T-Sees (E) ausgebracht und die Leitfähigkeit im Höhlenbach gemessen.

2. Methoden

Tracertechniken

Nach SCHUDEL et al. (2002) müssen Markierungsmittel folgende Anforderungen erfüllen: chemische Stabilität, geringe Sorptionstendenz und gute Wasserlöslichkeit. Dazu kommen wichtige praktische Anforderungen: Unbedenklichkeit für Menschen, Tiere und Pflanzen, gute Erfassbarkeit, keine oder nur geringe Grundlast im Wasser, tiefe Nachweisgrenze und eine gute Kosten-/Nutzen-Relation. KÄSS (2004) beschreibt verschiedene Tracer, die sich für Markierungsversuche eignen. Die folgende Übersicht beschränkt sich auf die wesentlichen Markierungsstoffe, die bei den in der Literatur beschriebenen Versuchen Anwendung finden. Weitere Tracer wie Umweltsotope, Schaum- oder Geruchsstoffe werden seltener eingesetzt und die Versuchsergebnisse gelten als teilweise nicht ausreichend gesichert (GLASER 2010).

Fluoreszenzfarbstoffe werden in der Markierungstechnik am häufigsten eingesetzt. Gebräuchlichste Farbstoffe sind Uranin, Eosin, Rhodamine, Pyranin und Natriumnaphthionat. Der Vorteil der färbenden Substanzen liegt darin, dass sie in großer Verdünnung noch erkenn- und messbar sind (KÄSS 2004). Aber in Karstsystemen kann es zu starken Adsorptionserscheinungen am Gestein kommen, dadurch sind in vielen Karstgewässern Fluoreszenzfarbstoffe über Jahre hinweg nachweisbar. GLASER (2010) berichtet von einem Markierungsversuch auf der Fränkischen Alb, bei dem eine Quelle, die sich 1,7 km vom Ausbringungsort befindet, erst nach vier Tagen ansprach. Das Maximum wurde erst nach 32 Tagen gemessen. Der Markierungsstoff war dann zehn Jahre lang nachweisbar, wobei der Wiedererhalt auf 20 % anwuchs.

Mit Salzen können nach KÄSS (2004) gute Ergebnisse erzielt werden. Auch WERNLI (2003) hält Steinsalz für einen geeigneten Tracer in Karstsystemen. Bevor man messtechnisch in der Lage war, Uraninkonzentrationen bei Färberversuchen hinreichend genau und in einer größeren Anzahl von Wasserproben rasch zu bestimmen, setzte man zur quantitativen Auswertung von Markierungsversuchen Natriumchlorid ein (KÄSS 2004). Die Handhabung bei der Ausbringung und Analytik ist einfach. Bei großen Salzmengen kann der Durchgang des Tracers bequem und billig über den Leitwert des Wassers bestimmt werden. Um

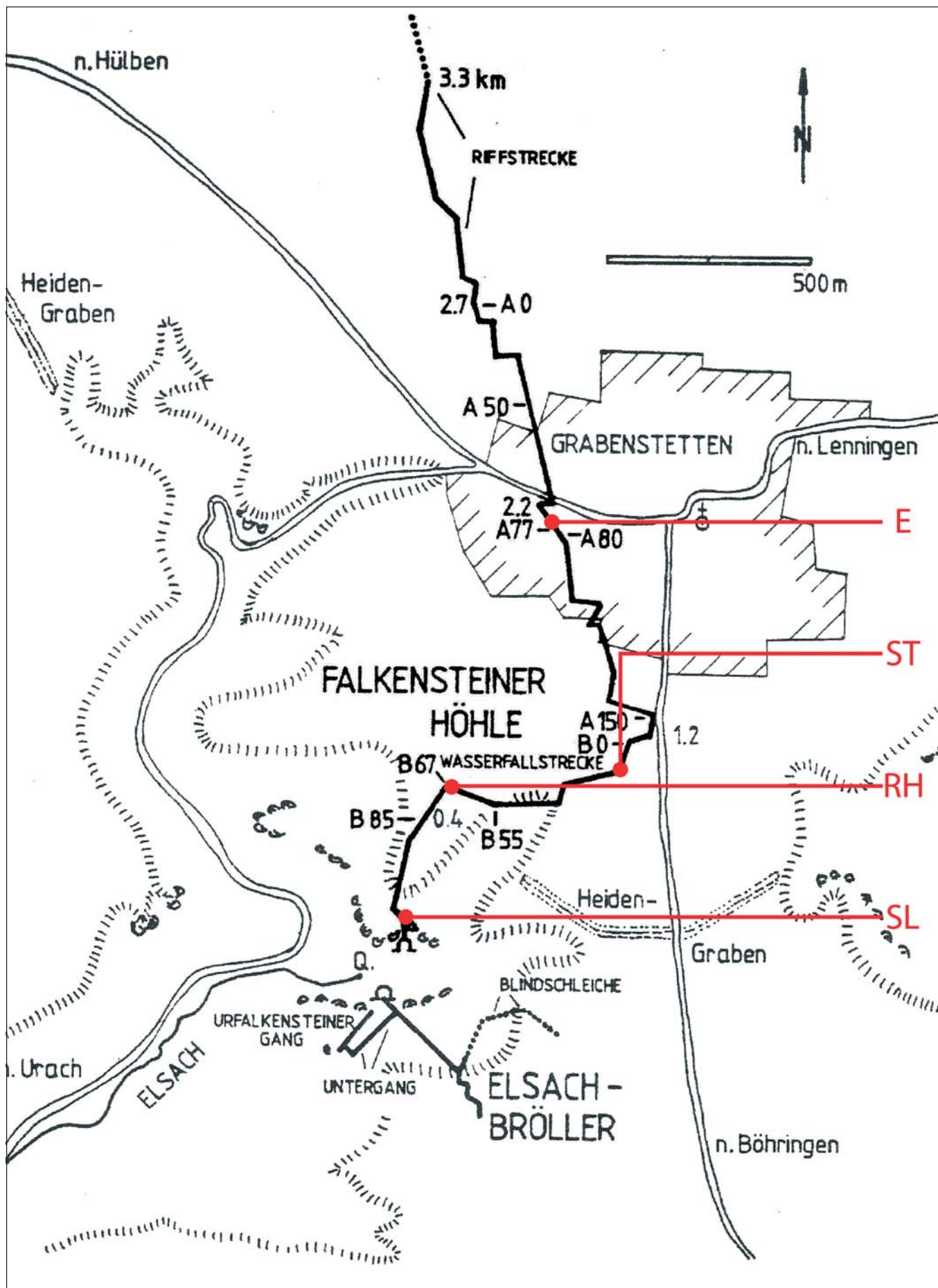


Abb. 1: Übersichtsplan Falkensteiner Höhle nach Plänen von ArGe Berg, HHV Laichingen und ArGe Grabenstetten

aber einen Anstieg der Leitfähigkeit im Gewässer zu erzielen, müssen teilweise extrem große Salzmengen ins Grundwassersystem eingebracht werden. Deshalb ist die toxische Wirkung hoher Salzkonzentrationen auf Wasserorganismen in Betracht zu ziehen (SCHUDEL et al. 2002).

Beim kombinierten Markierungsversuch zur Vorbereitung des 2. Symposiums für die Markierung unterirdischer Wässer wurden am 26. August 1969 50 t Streusalz aufgelöst und in eine Doline geleitet. Auch bei vielen weiteren von KÄSS (2004) beschriebenen Versuchen liegen die Salzmengen im Bereich von 1 - 6 t. Die großen Natriumchloridmengen, die bei Salzungsversuchen zur eindeutigen Anhebung der Grundlasten an Chlorid und Natrium benötigt werden, ergeben ein entsprechend großes Volumen an Salzlösung, die in jedem Fall eine höhere Dichte als das markierte Wasser hat. Dadurch besteht die Gefahr des Absinkens der Markiermittellösung in tiefe Zonen, die sich nur langsam mit dem Wasserstrom vermengt (KÄSS 2004).

Partikeltracer wie Bakteriophagen, Mikrosphären (fluoreszierende Mikrokügelchen) und Bärlappsporen kommen seltener zum Einsatz und erst durch die Verfeinerung der Triftkörpermethoden wurden nach und nach brauchbare Ergebnisse erzielt (SCHUDEL et al. 2002). Vorteile sind Umweltverträglichkeit, gute Verfügbarkeit und günstiger Preis. Aber sie werden wegen ihrer Größe in feinporeigen Bereichen zurückgehalten und die Rückgewinnungsrate liegt unter der der Fluoreszenztracer. Mikrosphären müssen mühsam am Fluoreszenzmikroskop ausgezählt werden und kommen deshalb nach SCHUDEL et al. (2002) für routinemäßige Markierungsversuche nicht in Betracht.

Markierung mit Chloridsalzen und automatischen Probenahmegegeräten

Für unsere Markierungsversuche wurde eine eigene Methode entwickelt. Umweltfreundlichkeit sowie Durchführbarkeit der Analytik im eigenen Labor standen im Vordergrund. Als Tracer wurden Lithium-, Natrium- und Kaliumchlorid eingesetzt. Die einwertigen Kationen haben den Vorteil, dass sie gut lösliche Salze bilden und im karbonathaltigen Karstgewässer nicht oder nur sehr schwach ausfallen. Auch unterliegen einwertige Ionen den Ionenaustauschprozessen weniger stark als zweiwertige (KÄSS 2004). Durch den Einsatz von selbst entwickelten, automatischen Wasserprobenahmegegeräten sollte die Tracermenge soweit reduziert werden, dass sie für die Umwelt kaum noch eine Bedeutung hat. Auf Grund der unterschiedlichen Grundlasten im Gewässer der Falkensteiner Höhle (LAMBARTH & LEHMANN 2010) wurden gestaffelte Mengen von Chloridsalzen eingesetzt.

Tab. 1: Eingesetzte Tracermengen bei den durchgeführten Versuchen

	Versuch 1 19.7.2010	Versuch 2 9.10.2010	Versuch 3 6.11.2010
Natriumchlorid (NaCl)	3 kg	–	1 kg
Kaliumchlorid (KCl)	2 kg	1 kg	0,5 kg
Lithiumchlorid (LiCl)	0,5 kg	0,5 kg	0,5 kg

Die Markierungsversuche wurden vom Umweltschutzamt Reutlingen genehmigt. Die Natrium- und Kaliumchloridmengen wurden von den Behörden als unbedenklich eingestuft. Bei Lithium ist die ökotoxikologische Wirkung nicht abschließend geklärt. Deshalb wurde vom Umweltamt Reutlingen darum gebeten, die Empfehlung des „Arbeitskreises Human- und Ökotoxikologische Bewertung von Markierungsmitteln in Gewässern“ einzuhalten. Der Arbeitskreis hält eine kurzfristige, höchstens eine Woche andauernde Maximalkonzentration von 5 mg/L im Oberflächenwasser für unbedenklich (ARBEITSKREIS „HU-

MAN- UND ÖKOTOXIKOLOGISCHE BEWERTUNG VON MARKIERUNGSMITTELN IN GEWÄSSERN“ 1997).

In unseren Versuchen blieb die Lithiumkonzentration zu jeder Zeit unter 1,2 mg/L. Die durchgeführten Versuche können somit für die Umwelt als unbedenklich eingestuft werden. Die Tracer wurden im Bereich des T-Sees (E) ausgebracht. Die Probenahmegegeräten wurden am Stuttgarter Block (ST) sowie hinter der Reutlinger Halle (RH) aufgestellt. Darüber hinaus wurden von Hand Wasserproben im Eingangsbereich im Bereich Schluckloch II (SL) genommen.

Um auch in der Höhle regelmäßig über einen längeren Zeitraum Wasserproben nehmen zu können, wurde ein Probenahmegerät entwickelt, das einem X/Y-Plotter ähnlich gebaut ist. Mit einer Tauchpumpe wird das Wasser durch einen Schlauch gepumpt. Das Schlauchende wird mittels Schlitten über einem der 64 Probenfläschchen positioniert. Ein Mikrocontroller steuert das System. Der Zeitabstand einer Probenahme von der vorherigen kann für jede Probe individuell eingestellt werden. Für den Transport ist der Probenahmegerät in einem stoßfesten und wasserdichten Koffer untergebracht. Es wurden zwei Probenahmegegeräten gebaut.

Analytik mittels Ionenchromatographie

Die Chromatographie ist ein physikalisch-chemisches Verfahren zur Trennung von Substanzgemischen. Der Trenneffekt beruht auf einer wiederholten Verteilung zwischen zwei Phasen, von denen eine Phase als stationär betrachtet wird, während sich die zweite, mobile Phase in eine bestimmte Richtung bewegt (CAMMANN 2001). Die Wasserproben der Falkensteiner Höhle wurden mit dem Ionenchromatograph 792 Basic IC von Ω Metrohm untersucht. Das Kernstück des Chromatographen ist die Säule, in der sich Verteilungsgleichgewichte einstellen, die zur Trennung der Analytfractionen führen. Um die Retentionszeiten der einzelnen Ionen herauszufinden, wird eine Kalibrierlösung mit einem Li-, Na- und K-Standard in die Säule eingespritzt. Die Detektion erfolgt mit einem Leitfähigkeitsdetektor. Aus der Änderung der Leitfähigkeit über die Zeit wird die Konzentration berechnet (Abb. 2).

3. Ergebnisse und Diskussion

Erster Versuch vom 19.7.2010

In Abb. 3 sind die Konzentrationen von Natrium, Kalium sowie Lithium in mg/L über der Zeit aufgetragen. Da die Lithiumkonzentrationen mit Werten von unter 1 ppm deutlich geringer sind als die Werte für Natrium und Kalium, wurde für Lithium in diesem und allen folgenden Diagrammen rechts eine eigene y-Achse eingefügt.

Im Höhlenbach waren am 19.7.2010 im Mittel folgende Kationen-Konzentrationen zu finden: Natrium: 6,4 ppm, Kalium: 1,4 ppm, Lithium: nicht nachweisbar. Beim Durchgang der Tracerwolke stiegen die Werte auf maximal 14,3 ppm (Na^+), 8,2 ppm (K^+) und 0,6 ppm (Li^+). Die Wolke passierte das Schluckloch zwischen 13 und 18 Stunden nach Eingabe des Tracers. Die Maximalkonzentrationen wurden ca. 15 Stunden nach Tracer-eingabe registriert. Die Durchgangszeiten der verschiedenen Marker sind gleich.

Eine Trennung der analysierten Kationen aufgrund ihrer Masse war in der Falkensteiner Höhle bei diesem Versuch nicht gegeben. Auf der Strecke vom T-See bis zum Schluckloch zeigen die eingesetzten Tracer keine unterschiedliche Wechselwirkung mit dem Gestein (Sorptionverhalten), da das Wasser auf diesen zwei Kilometern vor allem durch Kalkgestein fließt. Die Mengen der eingesetzten Tracer (NaCl: 3 kg, KCl: 2 kg, LiCl: 0,5 kg) waren hoch genug. Bei allen drei Ionenarten sind die Peaks gut aus-

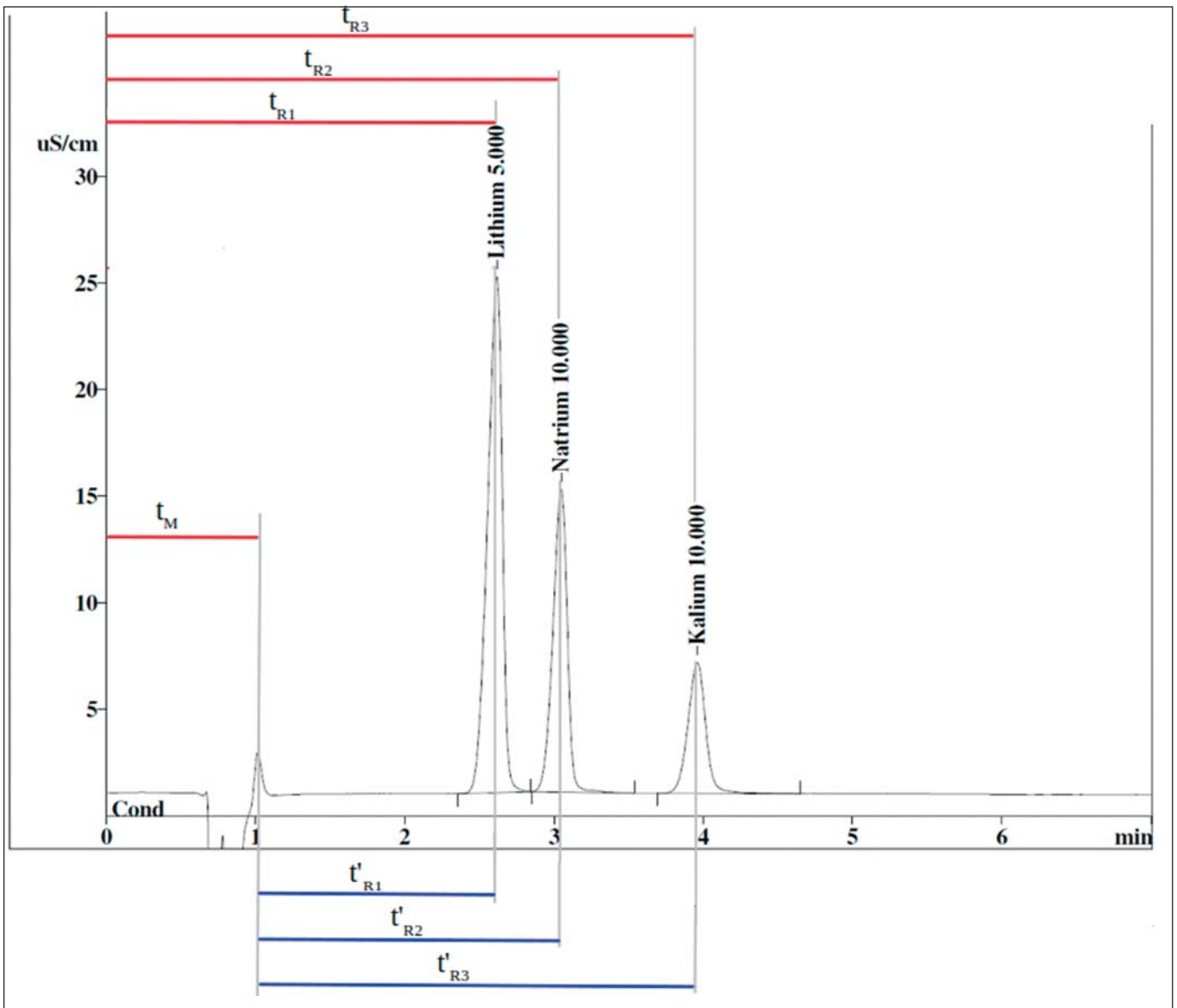


Abb. 2: Differenzielle Auftragung einer Kalibrierung in einem Chromatogramm; t_M = Durchflusszeit, t_{Ri} = Retentionszeit der Komponente i ; t'_{Ri} = reduzierte Retentionszeit der Komponente

wertbar. Die Methode ist umweltschonend, da durch die sehr geringen Tracermengen mit keiner Beeinflussung der Fauna oder Flora zu rechnen ist. Der empfohlene Grenzwert von 5 ppm Lithium im Oberflächenwasser wurde deutlich unterschritten. Beim Markierungsversuch von CLEMENS et al. (1997) wurde die maximale Konzentration ca. 13,5 Stunden nach Tracereingabe registriert. Das Wasser bewegte sich also 1997 mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 0,15 km/h durch die Höhle. Am 19.7.2010 war, vermutlich durch geringere Wassermengen, die Geschwindigkeit mit 0,13 km/h etwas geringer. An diesem Tag

kam kein Wasser aus dem Höhlenportal, was der Normalzustand ist, da das Wasser des Höhlenbachs noch vor dem Eingangsportal in B104 versickert.

Zweiter Versuch vom 9.10.2010

Beim zweiten Versuch wurden Proben an den Messstellen Stuttgarter Block (ST), Reutlinger Halle (RH) und Schluckloch (SL) genommen. Bei der Programmierung der Probenahmegeräte wurde mit ähnlichen Fließgeschwindigkeiten wie im Versuch vom Juli 2010 bzw. dem Versuch von CLEMENS et al. (1997) gerechnet. Die Fließgeschwindigkeit war am 9.10.2010 jedoch deutlich

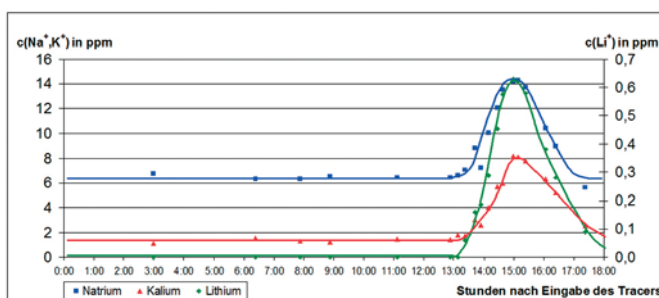


Abb. 3: Konzentrationsverlauf von Natrium, Kalium und Lithium am Schluckloch (SL), Versuch 1

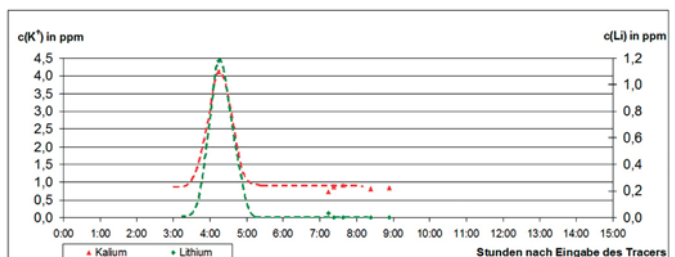


Abb. 4: Vermuteter Konzentrationsverlauf von Kalium und Lithium am Stuttgarter Block (ST), Versuch 2

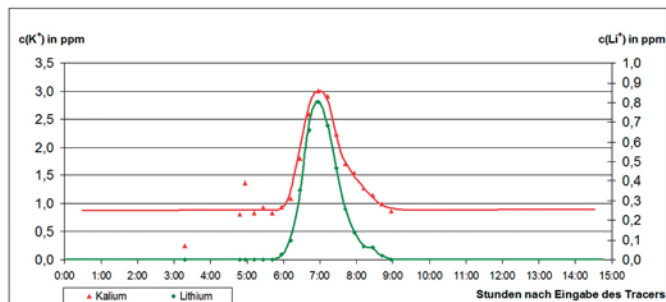


Abb. 5: Konzentrationsverlauf von Kalium und Lithium in der Reutlinger Halle (RH), Versuch 2

höher. Durch den verspäteten Start der Probenahme konnte die Tracerwolke nicht an allen Messpunkten vollständig erfasst werden. Am Stuttgarter Block (ST) wurde nur eine Probe während des Tracerdurchgangs genommen. Vergleicht man die Höhe der Konzentrationen bei dieser Probe mit den Werten in der Reutlinger Halle (RH) und am Schluckloch (SL) kann davon ausgegangen werden, dass der Wert in der Nähe des Peakmaximums gezogen wurde. In Abb. 4 sind die gemutmaßten Durchgangskurven am Stuttgarter Block dargestellt. Die Kurven können nicht als absolut angesehen werden, da im Peak nur ein Messpunkt existiert. Aus diesem Grunde wurden die Kurven gestrichelt dargestellt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Tracerwolke den Stuttgarter Block innerhalb von 2 Stunden passierte. Im Höhlenbach waren am 9.10.2010 im Mittel folgende Kationen-Konzentrationen zu finden: Kalium: 0,8 ppm, Lithium: nicht nachweisbar. Beim Durchgang der Tracerwolke stiegen die Werte auf maximal 3,0 ppm (K^+) und 0,8 ppm (Li^+). Die Wolke traf 6 Stunden nach Eingabe des Tracers in der Reutlinger Halle ein und war über 3 Stunden hinweg nachweisbar. Die Maximalkonzentrationen wurden ca. 7 Stunden nach Tracereingabe registriert. Die Peaks weisen ein deutliches Tailing auf. Die Durchgangszeiten der beiden Marker sind gleich.

Beim Durchgang der Tracerwolke stiegen die Werte auf maximal 2,6 ppm (K^+) und 0,5 ppm (Li^+). Die Wolke kam 9 Stunden nach Eingabe des Tracers am Schluckloch an und war bis Stunde 14 nachweisbar. Die Peaks, besonders der des Kaliums, weisen ein ausgeprägtes Tailing auf. Die Maximalkonzentrationen wurden ca. 10:45 h nach Tracereingabe registriert. Die Durchgangszeiten der beiden Marker sind gleich.

Auch beim zweiten Versuch kam es zu keiner Trennung der Tracer in Folge von unterschiedlicher Wechselwirkung mit dem Gestein (Sorption). Am 19.7.2010 floss Wasser aus dem Höhlenportal. Bereits daran konnte man erkennen, dass der Höhlenbach mehr Wasser als üblich führte. Bei normalem Wasserstand kann das Schluckloch II das gesamte Wasser aufnehmen und das Höhlenportal bleibt trocken. Aus diesem Grund war die ermittelte Fließgeschwindigkeit zwischen T-See und Schluckloch

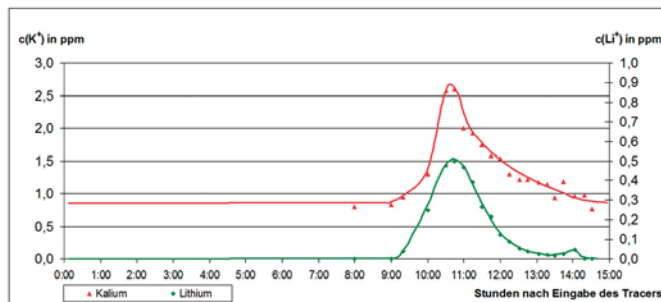


Abb. 6: Konzentrationsverlauf von Lithium und Kalium am Schluckloch (SL), Versuch 2

mit 0,19 km/h gegenüber der am 19.7.2010 (0,13 km/h) deutlich erhöht. Die K^+ -Werte streuen stärker als die Li^+ -Konzentrationen. Auch bei mehrfacher Analyse derselben Probe schwanken die K^+ -Werte relativ stark (Standardabweichung von 0,59 ppm). Die Reproduzierbarkeit der Lithiumkonzentrationen ist deutlich besser (Standardabweichung 0,01 ppm). Die Peaks am Schluckloch sind flacher und breiter als die Peaks in der Reutlinger Halle. Dieses Phänomen lässt sich durch die Diffusion des Tracers erklären. Sie nimmt im Laufe des Durchfließens der Höhle immer mehr zu, denn je länger der Fließweg und die dafür benötigte Zeit, desto größer wird die räumliche Verteilung der Tracerwolke. Dadurch wird der Peak breiter und flacher. Das Tailing der Peaks kann auf zwei mögliche Phänomene zurückgeführt werden. Durch hydromechanische Dispersion können sich Teile des Tracers temporär in langsam durchflossenen, feinporigen Bereichen aufhalten und anschließend wieder ins Bachbett zurückgelangen. In der Realität sind Diffusion und Dispersion kaum zu trennen. Die hydrodynamische Dispersion beschreibt daher beide Effekte (WERNLI 2003). Bei der Sorption wird der Tracer zum Teil am Gestein adsorbiert und anschließend wieder desorbiert. Da Lithium-, Kalium- und Natrium-Ionen jedoch nur einfach positiv geladen sind und auch ihre Oberfläche sehr klein ist, ist eine ausgeprägte Sorption eher unwahrscheinlich. Die Lage der Falkensteiner Höhle im Karstgestein, das hauptsächlich aus Kalk und untergeordnet aus Dolomit besteht, trägt ebenfalls zu einer schwachen Sorption bei. Nach KÄSS (2004) ist mit Sorption eher im tonhaltigen Gestein zu rechnen. Trotz der Reduktion der Kaliumchloridmenge von 2 kg (Versuch 1) auf 1 kg (Versuch 2) konnten die Durchgangskurven für Kalium gut ausgewertet werden.

Dritter Versuch vom 29.11.2010

Abb. 7 und 8 zeigen die Ergebnisse des dritten Versuchs. Die Mengen der Tracer wurden nochmals gesenkt. Es wurden 1 kg NaCl und jeweils 0,5 kg KCl und LiCl eingesetzt. Von der Messstelle Stuttgarter Block (ST) liegen keine Ergebnisse vor, da die Pumpe am Probenahmegerät defekt war.

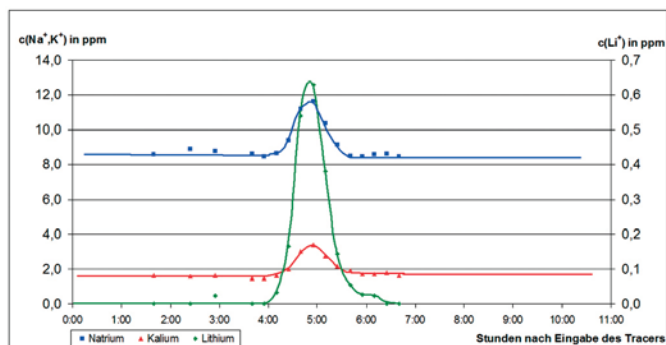


Abb. 7: Konzentrationsverlauf von Natrium, Kalium und Lithium in der Reutlinger Halle (RH), Versuch 3

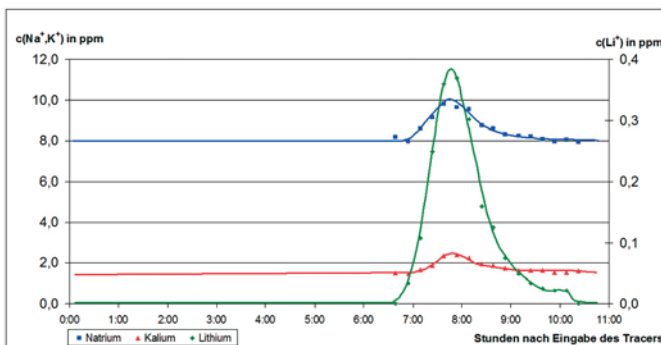


Abb. 8: Konzentrationsverlauf von Natrium, Kalium und Lithium am Schluckloch (SL), Versuch 3

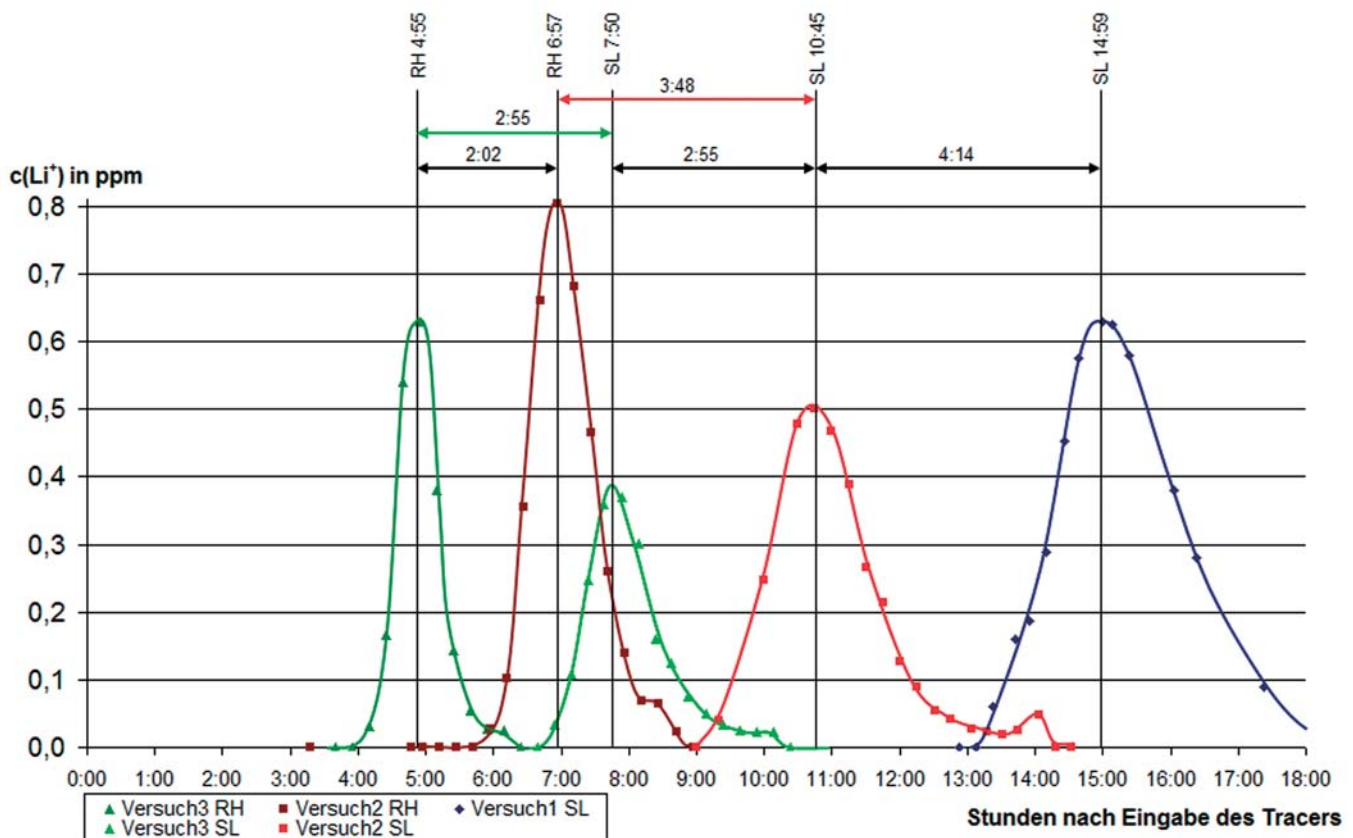


Abb. 9: Verlauf der Lithiumkonzentrationen bei drei verschiedenen Versuchen an den Messstellen Reutlinger Halle (RH) und Schluckloch (SL)

Im Höhlenbach waren am 29.11.2010 im Mittel folgende Kationen-Konzentrationen zu finden: Natrium: 8,5 ppm, Kalium: 1,6 ppm, Lithium: nicht nachweisbar. Beim Durchgang der Tracerwolke stiegen die Werte auf maximal 11,6 ppm (Na^+), 3,4 ppm (K^+) und 0,6 ppm (Li^+). Die Wolke passierte die Reutlinger Halle zwischen Stunde 4 und 6 nach Eingabe des Tracers. Die Maximalkonzentrationen wurden ca. 5 Stunden nach Tracereingabe registriert. Die Durchgangszeiten der verschiedenen Marker sind gleich.

Beim Durchgang der Tracerwolke am Schluckloch stiegen die Werte auf maximal 9,8 ppm (Na^+), 2,4 ppm (K^+) und 0,4 ppm (Li^+). Die Wolke passierte das Schluckloch zwischen 6,5 und 10,5 Stunden nach Eingabe des Tracers. Die Maximalkonzentrationen wurden ca. 8 Stunden nach Tracereingabe registriert.

Die Na^+ -Konzentrationen weisen mit 8,5 ppm einen sehr hohen Grundwert auf, der sehr wahrscheinlich auf den starken Schneefall mit verstärktem Einsatz von Streusalz auf der Erkenbrechtsweiler Halbinsel zurückzuführen ist. Trotz des hohen Grundwertes genügte die Masse von 1 kg NaCl für den Markierungsversuch. Der Tracerdurchgang konnte an beiden Messstellen eindeutig ermittelt werden. Auch beim Kaliumchlorid konnte trotz der auf 0,5 kg reduzierten Tracermasse gut nachgewiesen werden. Die Fließgeschwindigkeit zwischen T-See und Schluckloch war am 29.11.2010 mit 0,25 km/h deutlich höher als an den Tagen der ersten Versuche. Die Wasserstände in der Höhle waren ebenfalls deutlich erhöht, sodass der Höhlenbach in einem breiten Bach aus dem Höhlenportal floss, wie es nur bei Hochwasser beobachtet werden kann.

4. Fazit und Ausblick

Abb. 9 zeigt die Lithiumkurven aller Versuche. Beim Vergleich der Peaks fällt auf, dass die Peakmaxima des 2. und 3. Versuchs am Messpunkt Reutlinger Halle RH (RH) 2:02 h auseinander liegen. An der Messstelle Schluckloch SL (SL) beträgt die Diffe-

renz jedoch 2:55 h. Noch deutlicher erkennt man den Unterschied zwischen dem 1. und dem 2. Versuch am Schluckloch (SL). Dies ist hauptsächlich auf die unterschiedliche Schüttung an den jeweiligen Versuchstagen zurückzuführen. Diese nahm vom 1. zum 3. Versuch zu. Ist die Schüttung größer, fließt mehr Wasser mit höherer Geschwindigkeit durch den Messpunkt. Das Peakmaximum wird dadurch früher gemessen und die Peaks werden schmaler und spitzer. Außerdem ist die Maximalkonzentration aufgrund der höheren Wassermenge geringer.

Bei genauer Betrachtung erkennt man bei allen Lithiumkurven einen kleinen „Nachpeak“. Es scheint so, als ob die Lithium-Tracerwolke aufgespalten wurde. Da die Nachpeaks nur beim Lithium beobachtet werden können, könnte es sein, dass hierfür die Ähnlichkeit von Lithium- zu Magnesiumsalzen (Schrägbeziehung) verantwortlich ist. Magnesium und Lithium haben ein ähnliches Verhältnis zwischen Masse und Atomradius (JANDER 1990). Aus diesem Grund weist Lithium eine deutlich stärkere Wechselwirkung mit dem im Wasser gelösten Kalk auf als Natrium und Kalium. Die durchschnittliche Fließgeschwindigkeit in der Höhle ist mit Werten von 0,13 km/h bis 0,25 km/h sehr unterschiedlich. Die automatischen Probenahmegeräte funktionieren wie gewünscht. In dem großräumigen Bachlauf der Falkensteiner Höhle findet auf einer Strecke von 2 km keine Trennung von einwertigen Kationen durch unterschiedliches Sorptionsverhalten statt. Dieses Phänomen dürfte auf andere Karsterscheinungen übertragbar sein. Es besteht die Möglichkeit, dass in den hinteren Bereichen der Höhle adsorptive Effekte stärker zum Tragen kommen als in den Bereichen, in denen die Versuche durchgeführt wurden, da die Höhle zum Beispiel in der Staustrecke (2 bis 2,5 km) stark verlehmt ist.

Natriumchlorid, Kaliumchlorid und Lithiumchlorid eignen sich gleichermaßen für Markierungsversuche in Karstgewässern und können für die geplante Markierung auf der Albhochfläche eingesetzt werden. Bei diesem Versuch sollen an drei verschiede-

nen Stellen auf der Hochfläche die verschiedenen Marker ausgebracht werden. In der Höhle soll festgestellt werden, ob die verschiedenen Quellen in der Höhle – insbesondere die Quelle am Stuttgarter Block – durch bestimmte Eingabestellen gesondert angesprochen werden können. Eventuell kann so geklärt werden, wo das Wasser der Quelle am Stuttgarter Block entspringt und damit der erhöhte Gehalt an Natriumchlorid erklärt werden. Bei extremen Regengüssen oder einsetzender Schneeschmelze ist mit noch mehr Wasser in der Höhle und damit noch höheren Fließgeschwindigkeiten zu rechnen. Dadurch ist die Vorhersage der Durchgangszeiten und damit die Programmierung der Probenahmegeräte für einen Markierungsversuch mit Tracereingabe auf der Albhochfläche sehr schwer.

Bei zukünftigen Versuchen sollten nicht nur die Konzentrationen der Marker, sondern auch die Fließgeschwindigkeit und die Schüttung an den einzelnen Messstellen bestimmt werden. Dadurch lassen sich dann Aussagen über die Ausbreitung der Tracerwolken (Diffusion bzw. hydrodynamische Dispersion) sowie die Wiederfindungsrate der eingebrachten Stoffmenge machen.

Direkt neben dem Quelllauf am Stuttgarter Block (ST) wurde eine zweite Quelle entdeckt. Diese schüttet bei hohem Wasserstand ebenfalls relativ stark und weicht in ihrer Zusammensetzung sehr stark von dem benachbarten Zufluss ab. Am dritten Versuchstag wies die Quelle am Stuttgarter Block mit 41,1 mg/l Natrium und 1,2 mg/L Kalium gewohnt hohe Werte auf. Die neu entdeckte Nachbarquelle lag jedoch mit Werten von 2 mg/L Natrium und 0,8 mg/L im normalen Durchschnittsbereich der anderen Quellen (LAMBARTH & LEHMANN 2010). Bei kommenden Markierungsversuchen könnte untersucht werden, welche der beiden Quellen anspricht, wenn der Marker auf der Albhochfläche direkt über den Quellen ausgebracht wird. Eventuell kann so die Frage beantwortet werden, warum nur die Quelle am Stuttgarter Block eine 10-mal höhere NaCl-Konzentration aufweist.

Literatur

- ARBEITSKREIS „HUMAN- UND ÖKOTOXIKOLOGISCHE BEWERTUNG VON MARKIERUNGSMITTELN IN GEWÄSSERN“ (1997): Human- und ökotoxikologische Bewertung von Markierungsmitteln in Gewässern. Empfehlungen eines Arbeitskreises beim Umweltbundesamt. – Grundwasser 2: 61 - 64
- BALL, A.-K. (2006): Anionenanalytik in der Falkensteiner Höhle. – Jugend Forscht-Arbeit und www.hoehlenag.de/anionenanalytik.html (Zugriff 2.1.2011)

- CAMMANN, K. (2001): Instrumentelle Analytische Chemie. – Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- CLEMENS, T., HARLACHER, C. & JEANNIN, P. Y. (1997): Fließgeschwindigkeiten in Höhlen der Schwäbischen Alb als Hinweis auf den Aufbau und die Entwicklung von Karstgrundwasserleitern. – Laichinger Höhlenfreund 32 (1): 7 - 20
- GLASER, S. (2010): Hydrogeologie der Südlichen Frankenalb – ein Überblick. – Karst und Höhle 2008-2010: 22 - 29
- JANDER, G. & BLASIUS, E. (1990): Einführung in das anorganisch-chemische Praktikum. – S. Hirzel, Stuttgart
- KÄSS, W. (2004): Geohydrologische Markierungstechnik. – Lehrbuch der Hydrogeologie 9, 2. Aufl., Gebr. Borntraeger, Berlin
- LAMBARTH, M. & LEHMANN, K. (2010): Quantitative Bestimmung von Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium in verschiedenen Quellen der Falkensteiner Höhle. – Jahresheft 2009, Grabenstetter höhlenkundliche Hefte 18: 15 - 24
- SCHUDEL, B., BIAGGI, D., DERVEY, T., KOZEL, R., MÜLLER, I., ROSS, J. H. & SCHINDLER, U. (2002): Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie. – Berichte des BWG, Serie Geologie – Rapports de l'OFEg, Série Géologie – Rapporti dell'UFAEG, Serie Geologia Nr. 3, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern
- WEIHING, F. (2006): Flintknollen. – www.hoehlenag.de/quantitativeanalytik.html (Zugriff 2.1.2011)
- WERNLI, H. R. (2003): Einführung in die Tracerhydrologie. – Geographisches Institut der Universität Bern
- Winter, U (1989): Übersichtsplan Falkensteiner Höhle nach Plänen von ArGe Berg, HHV Laichingen, ArGe Grabenstetten – Berichte zum Symposium „Die Grabenstetter Großhöhle“: 100

Anschrift der Autoren: Maïke Lambarth, Jahnstraße 31, 72184 Weitingen, maike91@gmx.net; Matthias Martin, Wilhelmstr. 111, 72074 Tübingen

Nachbemerkung der Redaktion: Die Arbeit wurde im Rahmen der Höhlen-AG an der Gewerblichen Schule Tübingen erstellt und bei Jugend Forscht 2011 mit dem 3. Preis für Geo- und Raumwissenschaften ausgezeichnet. Zudem hat sie einen Sonderpreis für Geographie der Deutschen Gesellschaft für Geographie e.V. erhalten. Wir gratulieren!