

Karstwassermarkierungsversuche im Umfeld der Mühlbachquellhöhle (Südliche Frankenalb)

Martin Rüsseler, Stefan Glaser & Klaus Dieter Raum

1 Einleitung

Die hier dargestellte Untersuchung hatte das Ziel, die Verweildauer des Grundwassers im Untergrund und das Einzugsgebiet der zur Trinkwassergewinnung genutzten Sipplquelle (auch „Quelle Parleithen“) abzugrenzen. Die Quelle mit einer mittleren Schüttung von 40 l/s, die aber auf bis zu 120 l/s steigen kann, entspringt etwa drei Kilometer nordöstlich von Dietfurt a.d. Altmühl in einem Seitental.

Der örtliche Wasserversorgungs-Zweckverband Jachenhausener Gruppe beauftragte mit der Klärung das Sachverständigenbüro für Grundwasser Dr. Prösl. Die Karstgruppe Mühlbach e.V. half bei Planung und Durchführung der Versuche im August 2010 und führte in den verschiedenen Teilen der Mühlbachquellhöhle Messungen mit selbst entwickelten und gebauten Fluorimetern durch.

Bei den Markierungsversuchen wurden auch benachbarte Quellen mit beobachtet: im Norden insbesondere die Quellen am Campingplatz Breitenbrunn und bei St. Sebastian, im Süden die Mühlbachquelle und die Quellen Gundelfing und Aubrunnen.

Mit einer mittleren Schüttung von ca. 300 l/s ist die Mühlbachquelle, die etwa 3,5km südlich der Sipplquelle am Ortsrand von Mühlbach liegt, die bedeutendste dieser Quellen. Im Jahr 2001 wurde hier nach zweijähriger Grabungsarbeit der Karstgruppe Mühlbach der Zugang zu dem bisher größten bekannten wasseraktiven Höhlensystem der Frankenalb – der Mühlbachquellhöhle – ge-

schaffen (KARSTGRUPPE MÜHLBACH 2002). Das Höhlensystem beinhaltet ein unterirdisches Gewässernetz mit drei Hauptzuflüssen. Da die Einzugsgebiete von Sipplquelle und Mühlbachquelle direkt an einander grenzen, erschien es möglich, dass Teile der Tracer über die Mühlbachquellhöhle fließen und dass dann mit einem gewissen Mehraufwand auch die Einzugsgebiete der Höhlenzuflüsse abgegrenzt werden können.

2 Ausgangssituation

Im Altmühltal und seinen Nebentälern existieren in der Südlichen Frankenalb zahlreiche kleinere und größere Karstquellen. Die Entwässerung der umliegenden Hochflächen, die meist etwa 100 bis 150 m höher liegen als die Täler, erfolgt komplett unterirdisch durch die verkarsteten Kalk- und Dolomitgesteine des Malm.

Aus der klimatischen Wasserbilanz ist bekannt, dass die Grundwasserneubildung im untersuchten Gebiet durchschnittlich bei 8 bis 9 Litern pro Sekunde und Quadratkilometer liegt (GLASER 1998). Das Einzugsgebiet der Sipplquelle ist demnach etwa fünf, das der Mühlbachquellhöhle etwa 35 Quadratkilometer groß.

Direkt begeh- bzw. betauchbar sind die unterirdischen Wasserläufe nur in der Mühlbachquellhöhle – jeweils etwa 1,5 km weit in östlicher und nordöstlicher Richtung. Sie verzweigt sich in drei wasserführende Äste (Abb. 1), wobei außerhalb von Hochwassersituationen der Ostgang etwa 90-95 % der

insgesamt 300 l/s bringt, während der Nordwestgang mit wenigen Litern pro Sekunde nur unbedeutend zur Gesamtschüttung beiträgt.

Der Ostgang endet nach einer Kette von großen Siphons in einem über Wasser liegenden Verbruch. Die Siphonketten im Nordosten und Nordwesten enden an unpassierbaren Unterwasserengstellen. Es existieren noch Fortsetzungen auf höherem Niveau, die untersucht werden, da sie eventuell eine Umgehung der Siphonstrecken ermöglichen können.

Hinweise auf die Lage der Einzugsgebiete der Quellen geben verschiedene Markierungsversuche, die in dem Gebiet bereits

vor der Erschließung der Mühlbachquellhöhle durchgeführt wurden. Von fünf Eingabeorten im Nahbereich zur Sipplquelle und von zwei Eingabeorten in etwa 3,5 km Distanz zur Mühlbachquelle lagen bereits Daten von erfolgreichen Markierungsversuchen vor (Tab. 2, Abb. 7). Auch in dem weiter östlich gelegenen Gebiet, in größerer Entfernung von Sipplquelle und Mühlbachquelle, waren bereits Markierungsversuche durchgeführt worden, die jedoch ohne Ergebnis geblieben waren, so z.B. südöstlich von Mungenhofen, östlich von Ödenhaid und bei Pellndorf. In all diesen Fällen handelte es sich um Dolinen oder Gräben ohne natürlichen Zufluss.

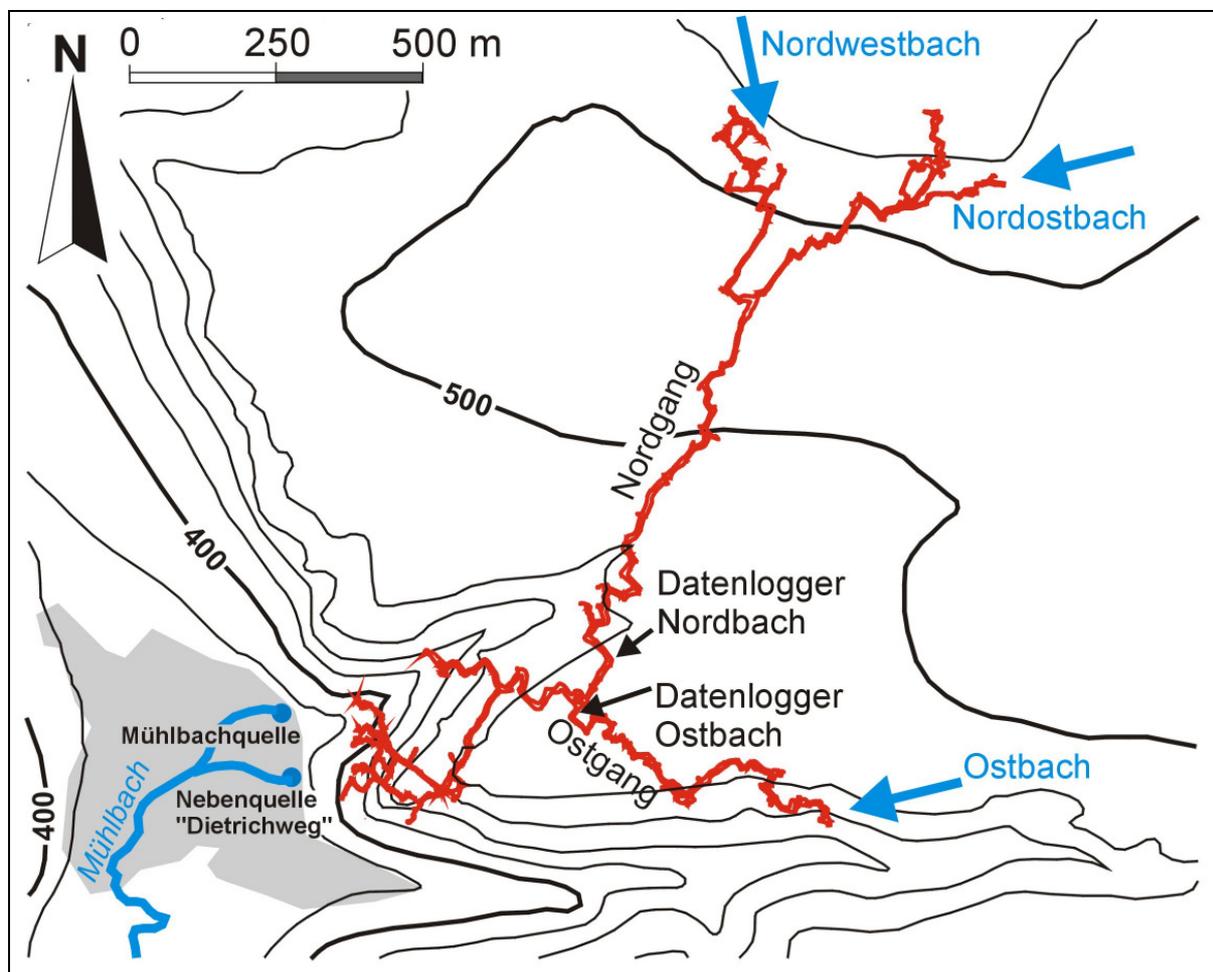


Abb. 1: Lage der Gänge der Mühlbachquellhöhle unter dem Geländeprofil.

Im Jahre 2006 wurden von der Karstgruppe Mühlbach an sechs Orten in der Höhle (Hauptbach, zweimal Ostbach, Nordbach, Nordostbach und Nordwestbach) Datenlogger installiert, die Pegel, elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, und Trübung der Ge-

wässer im 10-Minuten-Takt aufzeichnen. Die so gewonnenen Daten ermöglichen Aussagen über die Reaktion der Höhlengewässer auf Niederschläge und Schneeschmelze selbst bei Situationen, die eine Befahrung unmöglich machen.

Zusätzlich können aus den Daten extremer Hochwasserereignisse Rückschlüsse auf die noch nicht bekannten Teile des Höhlensystems gezogen werden. Diese Schlüsse beruhen auf den Unterschieden zwischen dem freien Fließen in einem unterirdischen Bachbett und dem Fließen in einem Siphon: Bei freiem Fließen erscheint das Abflussmaximum nahezu gleichzeitig mit dem neu infiltrierten Wasser (erkennbar an Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit), während das Abflussmaximum einen Siphon ohne Zeitverzögerung passiert, das frisch infiltrierte Wasser dagegen relativ lange zur Passage des Siphons benötigt. Wenn man zusätzlich Annahmen über die durchschnittlichen Fließquerschnitte in den unterirdischen Bachbetten und Siphonstrecken macht, kann man Spekulationen zu den Längen solcher Strecken jenseits der bekannten Höhlenteile anstellen. Da diese jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet sind und sich die Ergebnisse für einzelne Hochwasserereignisse sogar zu widersprechen scheinen, sollen sie erst nach weiteren Untersuchungen veröffentlicht werden.

3 Versuchsdurchführung

Im Mittelpunkt der Untersuchungen für den Zweckverband Wasserversorgung Jachenhausener Gruppe standen der Ost- und Südrand des potentiellen Grundwassereinzugsgebietes der Sipplquelle, da hierüber auf Basis des Kenntnisstandes vor den Untersuchungen im August 2010 nur unzureichende Aussagen getroffen werden konnten. Dazu wurden vom Sachverständigenbüro Dr. Prösl nach mehrjähriger Beobachtungsphase und in enger Abstimmung mit der Karstgruppe Mühlbach drei Dolinen als Eingabestellen ausgewählt, die ein entsprechendes Schluckverhalten aufweisen und die mit schweren Fahrzeugen erreichbar sind, um die notwendigen Mengen an Spülwasser anfahren zu können (Abb. 7). Die dafür notwendigen Genehmigungen wurden entsprechend beantragt.

Die ursprüngliche Planung, den Versuch bei abklingender Schneeschmelze durchzuführen, musste in Ermangelung entsprechender Wetterverhältnisse in dem von den beteiligten Behörden zur Klärung der Fragestellung eingeräumten Zeitraum aufgege-

ben werden. Es war daher notwendig, größere Mengen an Spülwasser anzufahren.

Um die drei Eingabepunkte differenzieren zu können, wurden drei verschiedene Tracer eingesetzt: Uranin, Eosin, und Amidorhodamin G (Tab. 1). Die Zuordnung der Farbstoffe zu den Dolinen wurde unter Abwägung der Entfernung zum erwarteten Austrittspunkt, der damit zu erwartenden Konzentration sowie der Eigenschaften und Kosten für den jeweiligen Farbstoff getroffen.

Die Farbstoffe wurden als konzentrierte Lösung vorbereitet und am jeweiligen Einsatzort nach reichlich Vorspülung unter Zuhilfenahme von Tankwägen in die Dolinen eingebracht (Abb. 2). Die enormen Vor- und Nachspülmengen waren nötig, da an keiner der Dolinen ein natürlicher Zufluss vorhanden war und ohne ausreichende Spülung kaum eine Chance bestanden hätte, dass die Tracer das Grundwasser (etwa 100 m unterhalb der Hochflächen) zügig erreicht hätten.



Abb. 2: Eingabe von Uranin westlich von Pfälzerhof: In fester und hoch konzentrierter Form ist Uranin dunkelrot. Erst bei Verdünnung mit Wasser erhält es seine auffallend leuchtendgrüne Farbe. Technisch nachweisbar ist es noch in der "nahezu homöopathischen" Konzentration von $1 : 2 \times 10^{12}$.

Um mögliche Tracerdurchgänge in der Mühlbachquellhöhle zu registrieren, wurden im Zuge der Vorbereitung des Versuchs durch die Karstgruppe Mühlbach Fluorimeter in Ost- und Nordgang der Höhle installiert und in Betrieb genommen (Abb. 3).

Eine mehrmals tägliche Befahrung der Höhlenteile zur manuellen Probenentnahme in den beiden Wasserläufen war weder realisierbar noch wünschenswert, da sie zu einer Verfälschung der Ergebnisse hätte führen können.

Tab. 1: Übersicht über Zeiträume und Mengen des Spülwassers (in Trinkwasserqualität) und der Tracer

| Tag | Doline westlich Pfälzerhof | Doline südlich Ödenhaid | Doline nördlich Pestenrain |
|---------------------------|--|--|--|
| Vorspülung 16.08.2010 | 45 m ³ | 45 m ³ | - |
| Vorspülung 17.08.2010 | 50 m ³ | 25 m ³ | 25 m ³ |
| Tracereingabe | Tracereingabe: 13kg Uranin ca. 11.30 h | Tracereingabe: 14kg Amidorhodamin G ca. 14.00 h | Tracereingabe: 2kg Eosin ca. 12.40 h |
| Nachspülung | 55 m ³ | 95 m ³ | 85 m ³ |
| Nachspülung 18.08.2010 | 90 m ³ | 90 m ³ | 80 m ³ |
| Nachspülung 20.08.2010 | - | - | 60 m ³ |
| Spülwasser gesamt | 240 m ³ | 255 m ³ | 250 m ³ |



Abb. 2: Links der Fluorimetermesskopf (graues PE Rohr), das lange PE Rohr mit dem parallelen kurzen PE Rohr in der Bildmitte ist der kapazitive Pegelsensor mit dem Trübungssensor des schon vorhandenen Loggers. Im Hintergrund an der Höhlenwand befinden sich die Elektronik des Fluorimeters und der Datenlogger.

4 Messtechnik

Die in den verschiedenen Quellen vom Zweckverband entnommenen Wasserproben (gestaffelter Probenahmerhythmus: 1 x wöchentlich bis 4 x täglich pro Quelle) wurden in einem professionellen Labor für Wasseranalytik gemessen.

Die Messtechnik, um in der Höhle die verschiedenen Tracer in den beiden relevanten Wasserläufen nachweisen zu können, wurde selbst entwickelt und gebaut. Der Fokus lag hier vor allem auf einer qualitativen Aussage, welcher Tracer wo ankommt, und auf der Aufzeichnung des Durchgangs an sich. Die Messung musste in kurzen Abständen erfolgen, das Gerät aber mindestens für einen Monat autark in der Höhle verbleiben können, da der genaue Zeitpunkt der Tracereingabe von den Wetterbedingungen abhängig war.

Um die Systemkosten und den Aufwand klein zu halten, wurde auf die Verwendung von Fotomultipliern (PMT) verzichtet, obwohl diese eine weit höhere Empfindlichkeit besitzen und in professionellen Systemen Standard sind.

Die Fluorimeter bestehen aus einem Mikrocontroller (ATMega16), der in Verbindung mit einer Echtzeituhr die ermittelten Daten in einem EEPROM ablegt. Das System ist mehrkanalig aufgebaut, um sowohl die allgemeine Wassertrübung zu erfassen, als auch die verschiedenen Tracer differenzieren zu können. Die Farbtrennung erfolgt über optische Filter, weshalb die Trennschärfe hauptsächlich von der Filterbandbreite abhängt. Die Anregung der Tracer erfolgt über moduliertes UV-Licht, das mittels UV-LEDs erzeugt wird. Die Modulation ist notwendig, um aus dem Bereich des niederfrequenten Rauschens der Sensoren und der nachfolgenden Verstärker zu kommen und damit eine möglichst hohe Empfindlichkeit zu erreichen. Als Sensoren werden hochwertige PIN Photodioden verwendet, die über differentielle und möglichst lineare Transimpedanzverstärker das Signal

in den Synchrondemodulator speisen. Das Gleichspannungsausgangssignal wird dann vom Mikrocontroller aufbereitet und für die Speicherung dem entsprechenden Kanal zugeordnet. Da die Dynamik des Eingangssignals relativ hoch sein kann – es lässt sich schwer voraussagen, wie hoch die Tracerkonzentration am Empfangsort sein wird –, muss eine automatische Bereichsumschaltung für jeden Kanal vorhanden sein. In diesem Fall stehen 6 Bereiche zur Verfügung.

Eine besondere Schwierigkeit besteht in der wasserdichten Anordnung der Anregungs-UV-LEDs und der Sensoren, die einerseits nah beieinander angeordnet werden müssen, wobei andererseits keinerlei Anregungslicht direkt oder durch ungewollte Reflexion auf die Sensoren treffen darf. Auch eine strikte Trennung der Ansteuerung der LEDs und der Sensorik ist absolut notwendig, da selbst kleinste parasitäre Kapazitäten sonst zu ungewollter Signaleinkopplung in die Verstärker führen. Die Isolierung zum Wasser hin ist mittels Glascheiben realisiert, die so angeordnet werden, dass sich im Versuchszeitraum kein Schmutz darauf absetzen kann.

Eine grobe Kalibrierung kann über eine Verdünnungsreihe des jeweiligen Farbstoffs durchgeführt werden oder, wie in unserem Fall, über die Messdaten des Labors.

Ein grundsätzliches Problem des Verfahrens stellt vor allem auch die Wassertrübung dar, denn die Partikel verursachen Reflexionen und dämpfen das Anregungs- sowie Fluoreszenzlicht. Daher wird mit einem weiteren Messkanal das reflektierte UV Licht erfasst und als Trübungswert mit in die Auswertung einbezogen.

Zwei Fluorimeter, die über 12 Volt Bleiakumulatoren mit Energie versorgt werden, wurden vor Versuchsbeginn im Nordgang und im Ostgang der Mühlbachquellhöhle installiert.

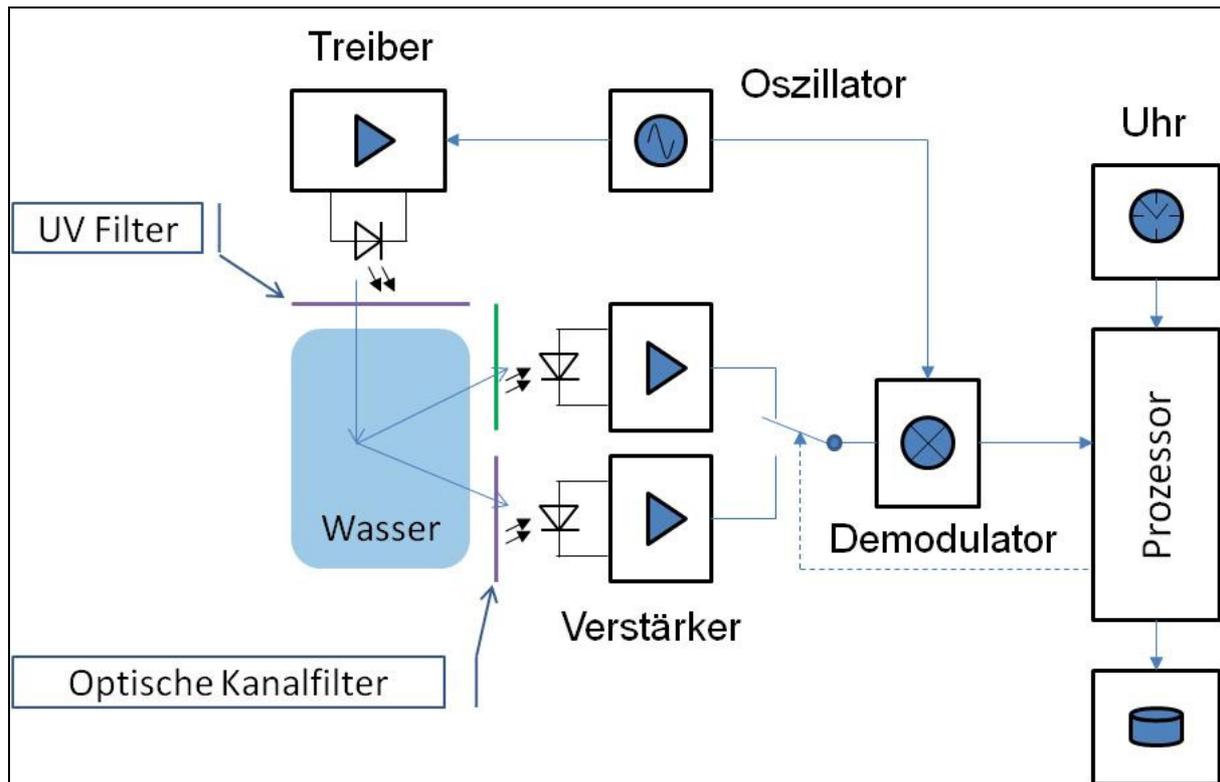


Abb. 3: Schematische Darstellung des Fluorimetersystems zur automatisierten Messung in der Höhle (exemplarisch sind hier nur zwei Kanäle dargestellt).

5 Ergebnisse

Keiner der eingegebenen Tracer konnte in der Sipplquelle nachgewiesen werden. Der Tracer Amidorhodamin G von der Doline südlich Ödenhaid konnte bis sechs Monate nach Versuchsbeginn in keiner der beprobten Quellen nachgewiesen werden. Die Tracer Uranin von der Doline westlich Pfälzerhof sowie Eosin von der Doline nördlich Pestenrain wurden in der Mühlbachquelle eindeutig nachgewiesen.

Damit liegen die Dolinen Pfälzerhof und Pestenrain sowie die dahin oberirdisch entwässernden Bereiche nicht im Einzugsgebiet der zur Trinkwassergewinnung genutzten Sipplquelle. Von den Bereichen um die Doline Ödenhaid gibt es zumindest keine schnelle hydraulische Verbindung zur Sipplquelle und daher liegt auch diese mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht im Einzugsgebiet. Die Grenze der Einzugsgebiete der Sipplquelle und der Mühlbachquelle ist zwischen Predlfing und Pestenrain nun auf 250 m genau bekannt. Es ist außerdem zumindest bei normalen Wetterbedingungen eine klare Trennung zwischen den Einzugsgebieten vorhanden, da bei den (frühe-

ren und neuen) Versuchen jeweils nur eine der Quellen einen Durchgang zeigte, während an der jeweils anderen nicht einmal Spuren der Tracer nachgewiesen wurden. Nur 56 Stunden nach der Tracereingabe war das Maximum des Uranindurchgangs im Ostgang der Mühlbachquellhöhle erreicht, an der Quelle erfolgte der Durchgang etwa 3,5 Stunden später (Abb. 5). Der Farbstoff ist in dieser hohen Konzentration deutlich mit dem Auge zu erkennen und der Bachlauf war dementsprechend grün eingefärbt. Der steile Anstieg der Konzentration in Verbindung mit dem ausgeprägten Maximum und den hohen Konzentrationswerten lässt auf einen sehr leistungsfähigen unterirdischen Fließweg mit der erstaunlichen Länge von über sieben Kilometern Luftliniendistanz schließen. Der aus Schüttung und Konzentration überschlägig ermittelte Tracer-Wiedererhalt liegt bei ca. 80%. Der Eingabepunkt steht demnach wohl in nahezu direkter Verbindung mit dem unterirdischen Wasserlauf.

Nach 84 Stunden war das Maximum des Eosindurchgangs im Nordgang der Mühlbachquellhöhle erreicht (Abb. 6). Die Kon-

zentrationenwerte fielen hier deutlich niedriger aus, da vor allem auch die Einspeisemenge weitaus geringer war. Die Ausbreitung in diesem Höhlenteil ist deutlich langsamer als im Ostteil. Ein Messpunkt aus den Labordaten am 21.08.10 um ca. 10 Uhr weicht vollständig von dem Verlauf der kontinuierlichen Messung in der Höhle ab. Die Abweichung konnte nicht zufriedenstellend geklärt werden. Nachdem die Durchgangskurve aus der Höhle plausibel erscheint, handelt es sich entweder trotz Nachuntersuchung durch das Labor um einen Messfehler, oder bei der Probenentnahme am Ufer des Mühlbaches ist z.B. aufgrund eines Kehrwassers eine „verfälschte“ Probe genommen worden. Der Versuch erbrachte – wie die früheren Versuche in Eutenhofen und Gundelshofen – eine vergleichsweise geringe Fließge-

windigkeit. Dies legt die Vermutung nahe, dass auch die genannten früheren Versuche über den Nordgang der Höhle geflossen sind. Dass die Tracer über den Nordwestbach in die Höhle gelangten, ist unwahrscheinlich, da dessen sehr geringe Schüttung von nur etwa 0,5–3 l/s ein sehr kleines Einzugsgebiet erwarten lässt, das kaum bis zu den Eingabepunkten reichen dürfte. Zudem müsste sich hier sogar der Durchgang des Spülwassers auf den Loggerdaten abzeichnen, was nicht der Fall ist. Die mit etwa 10-30 l/s im Vergleich zum Ostbach relativ geringe Schüttung im Nordostbach führt dazu, dass die Tracerwolke in den volumenreichen Siphons, die nur zum Teil bekannt sind, sich aber wohl auch im noch unbekanntem Teil des Höhlensystems fortsetzen, nur langsam weiterbewegt und stark verdünnt wird.

Tab. 2: Erfolgreiche Tracerversuche aus dem Untersuchungsgebiet (Ergebnisse der Versuche Ergertshofen und Pestenrain lt. freundlicher mündlicher Mitteilung Dr. Ernst SCHÖNFELD, restliche Alt-Daten GLASER 1998). Vmax: Luftliniendistanz/Zeit bis zum ersten Nachweis des Tracers; Vdom: Luftliniendistanz/Zeit bis zum Erreichen des Tracermaximums; Cmax: Maximalkonzentration des Tracers, normiert auf 1 kg Tracer.

| Eingabeort | Beobachtungsort | Dis- tanz [m] | Vmax [m/h] | Vdom [m/h] | Cmax [mg/(m³xkg Tracer)] | Wiederer- halt [%] |
|---|----------------------------------|---------------------|--|--------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Versuch 2010 | | | | | | |
| W' Pfälzerhof | Mühlbachquelle | 7100 | 137 | 115 | | |
| N' Pestenrain | Mühlbachquelle | 2750 | 44 | 32 | | |
| Versuch 2010, aufgeteilt auf Teilstrecken | | | | | | |
| W' Pfälzerhof | Ostgang Mühl- bachquellhöhle | 6680 | 140 | 119 | ca. 65 | Ca. 80 |
| Ostgang Mühl- bachquellhöhle | Mühlbachquelle | 500 | 143 | Kein Messwert im Maximum | | |
| N' Pestenrain | Nordgang Mühl- bachquellhöhle | 2350 | 44 | 28 | ca. 2 | >1 |
| Nordgang Mühl- bachquellhöhle | Mühlbachquelle | 570 | ca. 100 | Kein Messwert im Maximum | | |
| Versuche zwischen 1993 und 2001 | | | | | | |
| W' Wolfertshofen | Sipplquelle | 2300 | 72 | 58 | 275 | 11 |
| S' Leiterzhofen | Sipplquelle | 2400 | 250 | 121 | 64 | 12 |
| S' Ergertshofen | Sipplquelle | 1200 | 189 | 143 | - | 96 |
| SE' Predlfing | Sipplquelle | 1250 | 142 | 69 | 310 | 60 |
| N' Pestenrain | Sipplquelle | 1550 | Unklar, da von anderem Tracer überlagert | | | |
| E' Eutenhofen | Mühlbachquelle | 3600 | 18 | 14 | 14,5 | 98 |
| E' Eutenhofen | Mühlbachquelle | 3600 | 14 | 10,5 | 15 | 80 |
| Gundelshofen | Mühlbachquelle | 3300 | 35 | 22,5 | 15 | 80 |

Die Beobachtung der Ausbreitung von Trübungswolken in den Bächen der Mühlbachquellhöhle und deren Ankunft an der Quelle lässt auf Fließgeschwindigkeiten zwischen 50 und 300 m/h schließen (Luftlinienentfernung). Die niedrigsten Geschwindigkeiten treten hierbei vor allem auf den unbekanntesten Strecken zwischen den verstürzten unteren Höhlenenden und dem Quellaustritt auf, die höheren im Bereich von Gefällestrecken. Die wahre Länge der Fließwege

ist meist etwa 1,5–2-mal größer als die Luftliniendistanz. Derselbe Faktor gilt natürlich für die Fließgeschwindigkeit, die demnach etwa 75–600 m/h auf dem tatsächlichen Fließweg beträgt. Hierbei liegt das Gefälle der Höhengewässer auf dem tatsächlichen Fließweg bei etwa 8-10%. Bei Hochwassersituationen können – laut Auswertung von Loggerdaten – noch erheblich höhere Fließgeschwindigkeiten auftreten (ca. 960m/h).

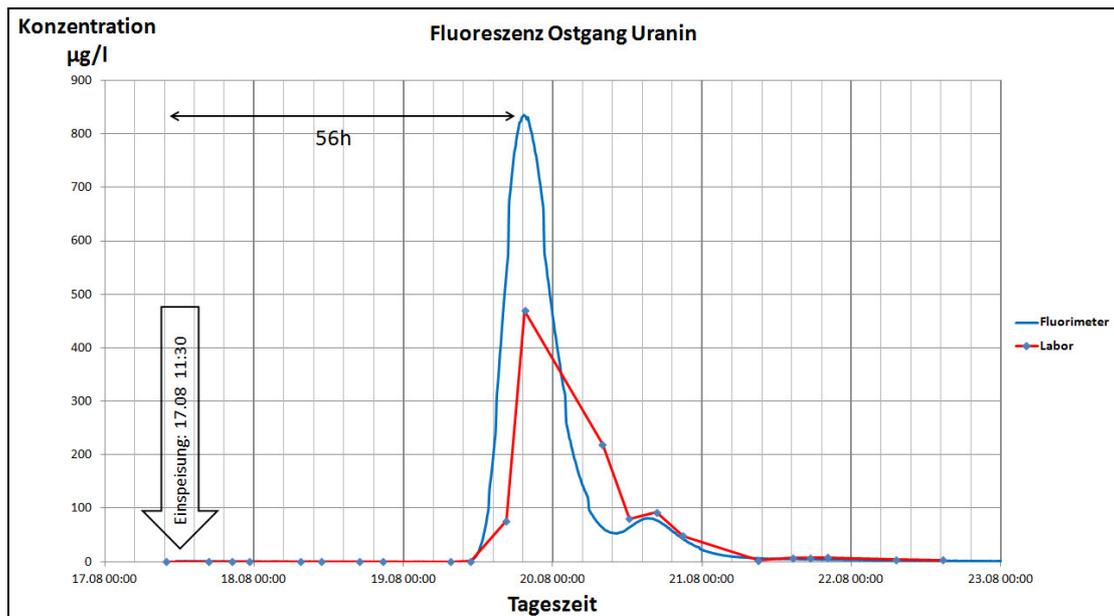


Abb. 4: Diskrete Labormesswerte für Uranin in der Mühlbachquelle und hierauf normierte Durchgangskurve der automatischen Messaufzeichnung im Ostgang der Mühlbachquellhöhle.

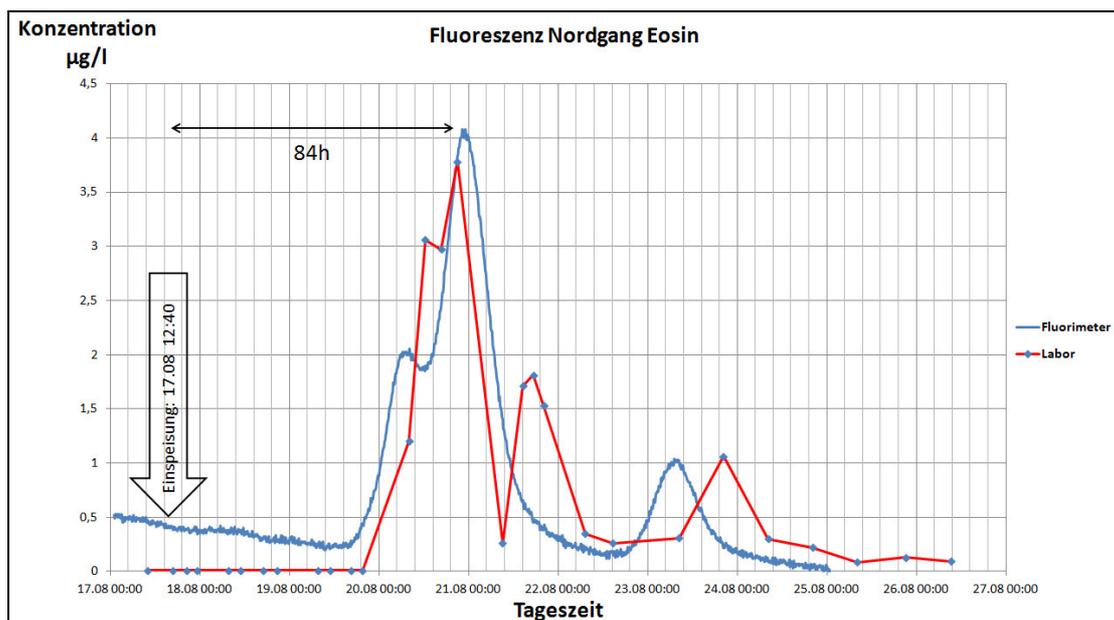


Abb. 5: Diskrete Labormesswerte für Eosin in der Mühlbachquelle und hierauf normierte Durchgangskurve der automatischen Messaufzeichnung im Nordgang der Mühlbachquellhöhle.

Der Verbleib des Tracers Amidorhodamin G ist ungeklärt, obwohl die Doline südlich von Ödenhaid mitten im Gebiet zwischen den beiden anderen Einspeisepunkten liegt und die beste Schluckfähigkeit der drei untersuchten Dolinen aufweist. Der Misserfolg ist überraschend, da der Tracer für die Markie-

rung von Karstgrundwässern gut geeignet ist und in großer Menge eingegeben wurde. Möglicherweise ist der Farbstoff in lehmigen Deckschichten oberhalb der verkarsteten Karbonate zurückgehalten worden und wird erst sehr stark verzögert und verdünnt das Grundwasser erreichen.

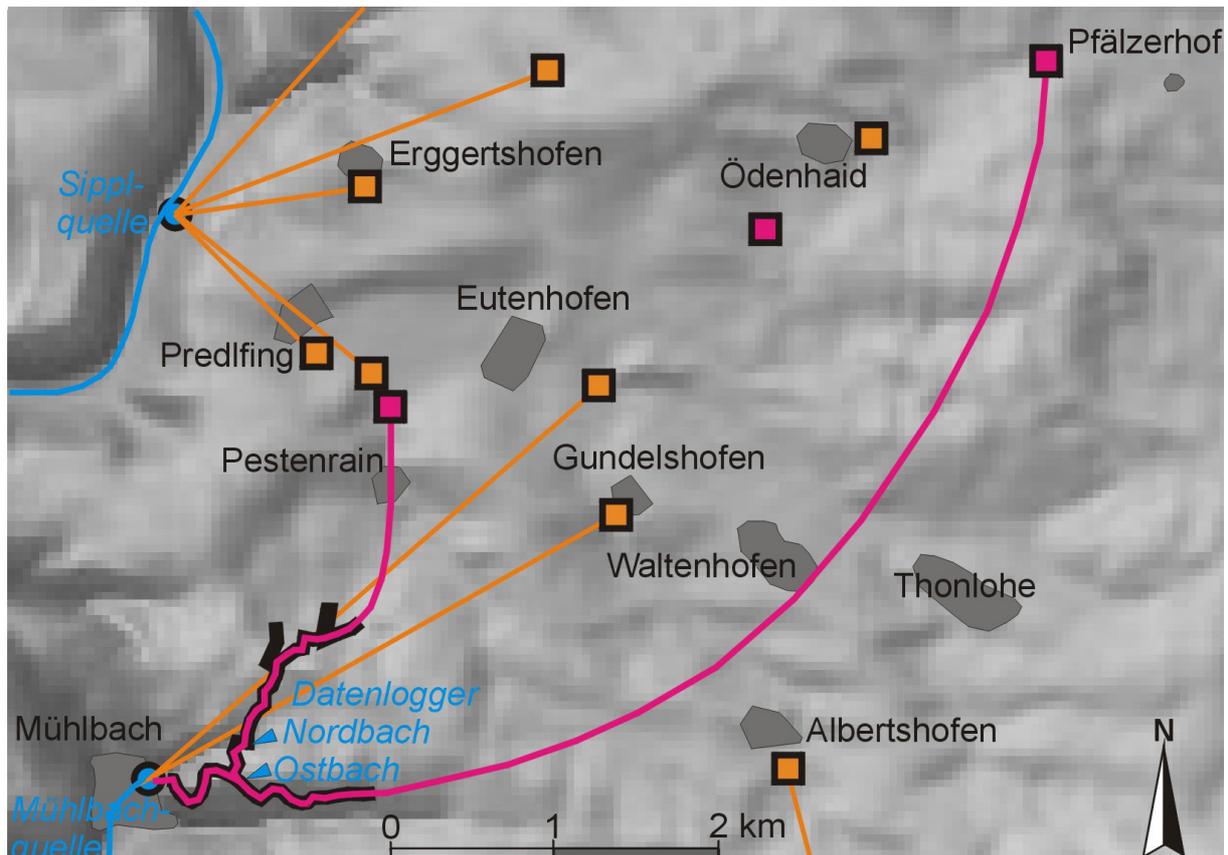


Abb. 6: Kartendarstellung der früheren (orange) und aktuellen (rot) Markierungsversuche.

6 Ausblick

Die enge Zusammenarbeit zwischen Wasserversorger, Sachverständigenbüro und Höhlenforschern erbrachte für alle Seiten Vorteile. Während die Profis von den Höhlenforschern in Planung und Durchführung unterstützt wurden, gelang es letzteren mit „verhältnismäßig“ einfachen Mitteln, die Einzugsgebiete der beiden Hauptäste der Mühlabachquellhöhle zu differenzieren und zusätzliche Erkenntnisse über die noch unbekannt Teile des unterirdischen Gewässernetzes zu gewinnen. Voraussetzung hierfür war eine ausreichend hohe Tracerkonzentration im Bereich von mehreren $\mu\text{g/l}$ bei möglichst geringer Wassertrübung.

Niederschlags- und weitere Wetterdaten sollen demnächst mit eigenen Mitteln der Karstgruppe Mühlabach präziser erfasst werden, um ein klareres Bild über das Hochwasserverhalten speziell bei Gewittern und Schneeschmelze zu bekommen.

In Verbindung mit den weiteren Logger-Daten (Leitfähigkeit, Pegel, Trübung und Temperatur), die an verschiedenen Stellen der Höhle erhoben werden, kann dann ein verbessertes hydrologisches Modell erstellt und verifiziert werden. Speziell durch die Kenntnis der schon betauchten Siphonstrecken lassen sich Rückschlüsse auf das Fließverhalten in offenen Gangprofilen gegenüber den Siphonstrecken ziehen. Und

natürlich wird die klassische Höhlenforschungsarbeit fortgesetzt, mit dem Ziel, weitere Teile des unterirdischen Flusssysteme

zu betreten, über die dann nicht mehr spekuliert werden muss.

Schriftenverzeichnis

GLASER, S. (1998). Der Grundwasserhaushalt in verschiedenen Faziesbereichen des Malm der Südlichen und Mittleren Frankenalb. – GSF-Bericht **2/98**, 135 S.; Neuherberg.

KARSTGRUPPE MÜHLBACH [Hrsg.] (2002): Die Mühlbachquellhöhle – ein neuentdecktes Naturwunder im Altmühltal. – Broschüre: 23 S.; Erlangen.