

Multitracing-Versuche 1992 und 1993 im Karstgebiet der Silberen (Muotatal und Klöntal, Zentralschweiz)

*Multitracing Tests 1992 and 1993 in the Karstic Region of Silberen
(Muotatal and Klöntal, Central Switzerland)*

P.-Y. JEANNIN¹⁾, A. WILDBERGER²⁾ & P. ROSSI³⁾

Inhalt

	Seite
1. Einleitung.....	44
2. Allgemeines.....	45
2.1. Ziele	45
2.2. Geographischer Rahmen.....	45
2.3. Geologischer Rahmen	49
2.4. Hydrogeologischer Rahmen.....	53
3. Die Markierversuche 1992 und 1993	56
3.1. Durchführung des Versuchs von 1992	56
3.1.1. Wahl der Eingabestellen.....	56
3.1.2. Überwachte Wasserstellen	59
3.1.3. Wahl der Markierstoffe	61
3.1.4. Meteorologische und hydrologische Bedingungen	61
3.2. Ziel und Durchführung des Markierversuchs von 1993	61
3.2.1. Ziel.....	61
3.2.2. Eingabestellen und Markierstoffe	62
3.2.3. Überwachte Wasserstellen	62
3.3. Versuchsergebnisse	63
3.3.1. Abgrenzung der Einzugsgebiete	63
3.3.1.1. Schlichenden Brünnen und damit verknüpfte Austrittsstellen.....	63
3.3.1.2. Blaubrunnen und damit verknüpfte Austrittsstellen...	69
3.3.1.3. Quelle von Hinter Seeberg	70
3.3.1.4. Neue Quelle und Resultate der Markierungen 1993 ...	70
3.3.2. Analyse der Tracergeschwindigkeiten	72
3.3.3. Analyse der Tracerausbeute	76
3.4. Verwendung von Bakteriophagen im Karstmilieu.....	78

¹⁾ Dipl.-Geol. P.-Y. JEANNIN, Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, Rue Emile Argand 11, CH-2007 Neuchâtel.

²⁾ Dr. A. WILDBERGER, Arbeitsgemeinschaft Höllochforschung, Im Tiergarten 49, CH-8055 Zürich.

³⁾ Dr. P. ROSSI, Laboratoire de Microbiologie, Université de Neuchâtel, Chantemerle 22, CH-2000 Neuchâtel.

4. Synthese und Folgerungen	80
4.1. Vergleich mit früheren Versuchen	80
4.2. Allgemeine Synthese.....	82
Zusammenfassung	83
Literatur.....	84
Summary	85
Résumé	86
Dank	87

1. Einleitung

Das Gebirgsmassiv der Silberer liegt in der Zentralschweiz, im Grenzgebiet der Kantone Schwyz und Glarus (zur Lage siehe Fig. 1). Der Karst dieser Region mit der bekannten Hölloch-Höhle ist seit Jahrzehnten ein Forschungsobjekt von Speläologen, Hydrogeologen und Geomorphologen. Erste Wasserfärbungen sind bereits zu Beginn des Jahrhunderts durchgeführt worden (E. RAHIR, 1905). Die Markierversuche von 1979 (A. BÖGLI & T. HARUM, 1981) haben den regionalen hydrogeologischen Rahmen des südlichen Muotatals einigermaßen erkennen lassen, Unklarheiten über die Einzugsgebietsbegrenzung der verschiedenen Karstquellen blieben aber zahlreich.

Seit längerem bestand deshalb bei der Speläologengruppe AGH (Arbeitsgemeinschaft Höllochforschung) das Projekt eines Multitracing-Versuchs im Hinblick auf die bessere Abgrenzung des Einzugsgebietes der sogenannten Schlichenden Brünnen, der Resurgenz der Hölloch-Wässer.

Die Höhlenforscher haben sich mit dem Projekt an das CHYN (Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel) gewandt und eine Zusammenarbeit vorgeschlagen.

Im Laufe des Jahres 1991 wurde das Projekt 65 der COST (Coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique) über die „Hydrogeologischen Aspekte des Schutzes unterirdischer Wässer in Karstzonen“ ausgearbeitet, in dessen Rahmen der Karst des Hölloches als eines der schweizerischen Referenzgebiete ausgewählt wurde. Das mit der Koordination des schweizerischen Teils dieses internationalen Projektes beauftragte CHYN kam auf den Vorschlag der AGH zurück.

Die in diesem Artikel vorgestellten Resultate der Multitracing-Tests von 1992 und 1993 sind im organisatorischen Rahmen des COST-Projektes erarbeitet worden.

Die in Text, Figuren und Tabellen verwendeten Lokalitätsbezeichnungen sind, mit Ausnahme der aus dem Sprachgebrauch der Höhlenforscher stammenden speläologischen Bezeichnungen, der schweizerischen Landeskarte entnommen. Die Quellnumerierung stimmt im westlichen Talbereich mit jener von A. BÖGLI & T. HARUM (1981) überein, im zentralen und östlichen Untersuchungsgebiet wurden neue Nummern gewählt. Die Zahlen am Rande der Karten (Fig. 1, 4, 6, 7 und 8) beziehen sich auf das Kilometernetz der schweizerischen Landeskoordinaten; auf dieselbe Orientierungshilfe beziehen sich die Koordinatenangaben in den Tab. 1 und 2.

2. Allgemeines

2.1. Ziele

Markierversuche dieses Maßstabes haben mehrere Zielsetzungen zu erfüllen. Die Höhlenforscher waren vor allem an einer besseren Abgrenzung des Einzugsgebietes der Schlichenden Brünnen interessiert, damit die mögliche Ausdehnung der Höhlenlabyrinth des Höllochs und des Silberer-Systems (Schwyzer und Iglu-Schacht) besser abgeschätzt werden kann. Der am Limnigraphen Schlichenden Brünnen durch die Landeshydrologie und -geologie seit 1988 kontinuierlich gemessene Abfluß ist im übrigen eher zu groß für das bis anhin angenommene Einzugsgebiet von 22 km² Größe (A. BÖGLI, 1970, A. BÖGLI & T. HARUM, 1981). Die Markierversuche sollten auch mithelfen, die unterirdischen Abflußbahnen in den unerforschten Bereichen (gesättigte Zone, unzugängliche Sektoren) besser zu erfassen.

Der schweizerische Teil des Projektes COST-65 hat prioritär solche Karstsysteme ausgewählt, wo gut bekannte und begehbare Höhlen direkte Beobachtungen und Beprobungen der unterirdischen Wässer zulassen. Der Akzent ist zuerst auf das Verständnis der das Fließverhalten steuernden Prozesse gelegt worden, später wurde das Transportverhalten von Stoffen und die Hydrochemie einbezogen. Der vorgeschlagene Markierversuch berücksichtigt diese zwei Aspekte insofern, als er hydraulische Daten liefert (Grenzen des Aquifers, Fließgeschwindigkeiten in den verschiedenen Teilen des Trägers usw.), aber auch Hinweise zum Verhalten von Verunreinigungen (Analogon der Markierstoffe) innerhalb des Karstsystems (Dispersivität des Milieus, Transportfunktionen usw.) gibt. Schließlich sollte durch die Verwendung von neuen Markierstoffen (Bakteriophagen) deren Brauchbarkeit im Karst geprüft und mit dem Verhalten der Fluoreszenztracer verglichen werden.

2.2. Geographischer Rahmen

Die Karstquelle der Schlichenden Brünnen liegt rechtsufrig der Muota am Eingang zum Bisistal (= oberer Teil des Muotatals, siehe Fig. 1). Der mittlere Abfluß liegt im Mittel der hydrologischen Jahre 1989–1993 bei 2,0 m³/s. Dies entspricht nach den registrierten Niederschlagswerten (mittlerer Niederschlag ca. 260 cm/Jahr, abflußwirksamer Teil etwa 220 cm/Jahr resp. etwa 70 l/s km²) einem Einzugsgebiet von rund 25–30 km².

Dieses zwischen dem Drusberg im N und dem Pfannenstock im S eingeklemmte Einzugsgebiet erstreckt sich von der Quelle nach E in den Bödmerenwald und weiter bis zu den nackten Karrenfeldern der Silberer (vgl. Fig. 2). Geographisch wird das Gebiet im SW durch das tief eingeschnittene Bisistal begrenzt, im NW durch das Tal der Starzlen, im NE durch die gegen das Klöntal und das Rossmatter Tal abfallenden Felswände, während die Südostgrenze weniger klar definiert ist. Das Einzugsgebiet der Schlichenden Brünnen erstreckt sich von 640–2350 m ü.M. Es ist unterhalb von 1700 m ü.M. von Vegetation (Wälder, Alpweiden) bedeckt, oberhalb tritt der Fels meist nackt zu Tage.

Das Labyrinth des Höllochs (168 km Länge) liegt im westlichsten Teil des Einzugsgebietes der Schlichenden Brünnen. Diese Höhle bestreicht eine Fläche von etwa 7 km² unter dem Bödmerenwald, das Gangnetz erlaubt eine direkte Beobachtung der unterirdischen Wässer. Weiter östlich liegt das Silberer-System (29 km Länge), welches Zugang zu einigen Bächen unter den Karrenflächen der Silberer und den obersten Alpweiden gibt.

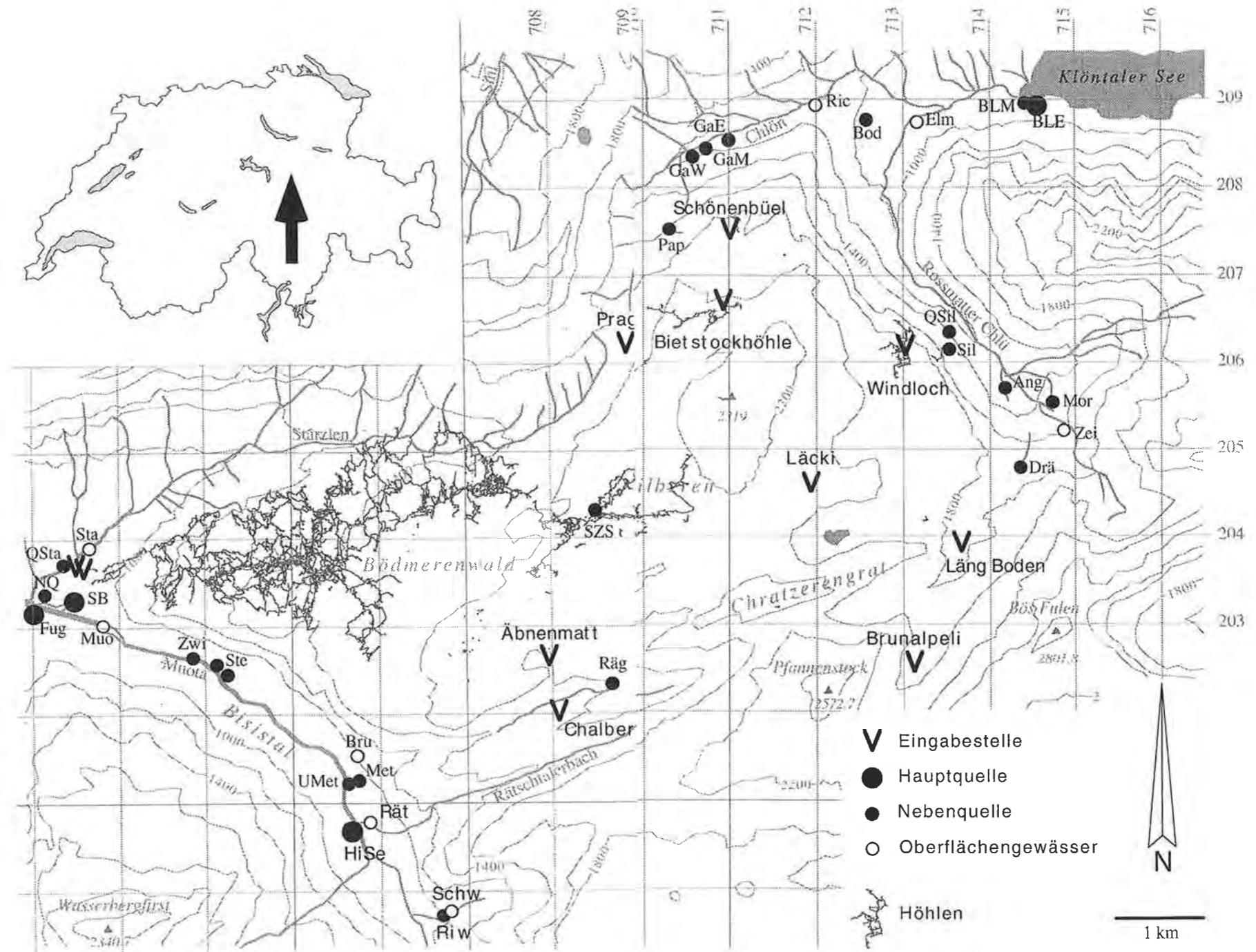


Fig. 1: Karte des Untersuchungsgebietes mit Eingabestellen der Markierstoffe und Beprobungsorte bei arsuren 1992 und 1993 (eingerückt: Karte der Schweiz mit Lage des Testgebietes). Bezüglich abgekürzter Bezeichnungen von Quellen und Oberflächengewässern siehe Tab. 2.
 Location map of the study area with the injection and sampling points of the tracer experiments 92 and 1993. Refer tab. 2 regarding the abbreviation of the designations of springs and surface runoff.



Fig. 2: Fotografische Übersicht des Einzugsgebietes der Schlichenden Brünnen: Blick vom Wasserberg über den Einschnitt des Bisistales zum Bödmerenwald und zu den Karrenfeldern der Silberer.
Photo view of the catchment area of Schlichenden Brünnen: incision through Bisistal valley, from Wasserberg to Bödmerenwald and to the lapie terraines of Silberer.

2.3. Geologischer Rahmen

Die Schlickenden Brunnen entspringen einem Aquifer, welcher hauptsächlich durch den Schrattenkalk (Unterkreide) der helvetischen Axen-Decke sensu lato gebildet wird. Der Schrattenkalk wird von der Garschella-Formation (sandige Spatkalke, Grünsandsteine, Mergel), diese wiederum vom Seewer Kalk (Oberkreide) überlagert (vgl. Fig. 3). Im Liegenden des Schrattenkalks finden sich die Mergel und Mergelkalke der Drusberg-Schichten. Der Seewer Kalk und der Schrattenkalk bilden zusammen einen Aquifer.

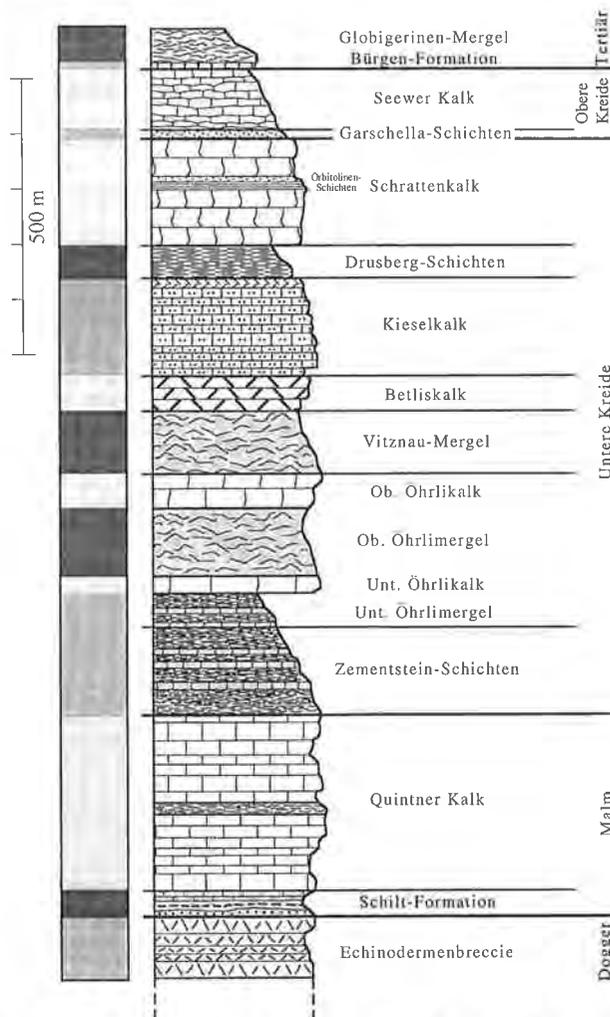


Fig. 3: Stratigraphisches Übersichtsprofil durch die Axen-Decke im Bisistal sowie schematisierte Aquifereigenschaften der Gesteinsformationen (dunkelgrau – nicht verkarstet, mittelgrau – wenig verkarstet, hellgrau – stark verkarstet).
Stratigraphic profile through the Axen nappe in Bisistal valley and schematic aquifer characteristics of the formations.

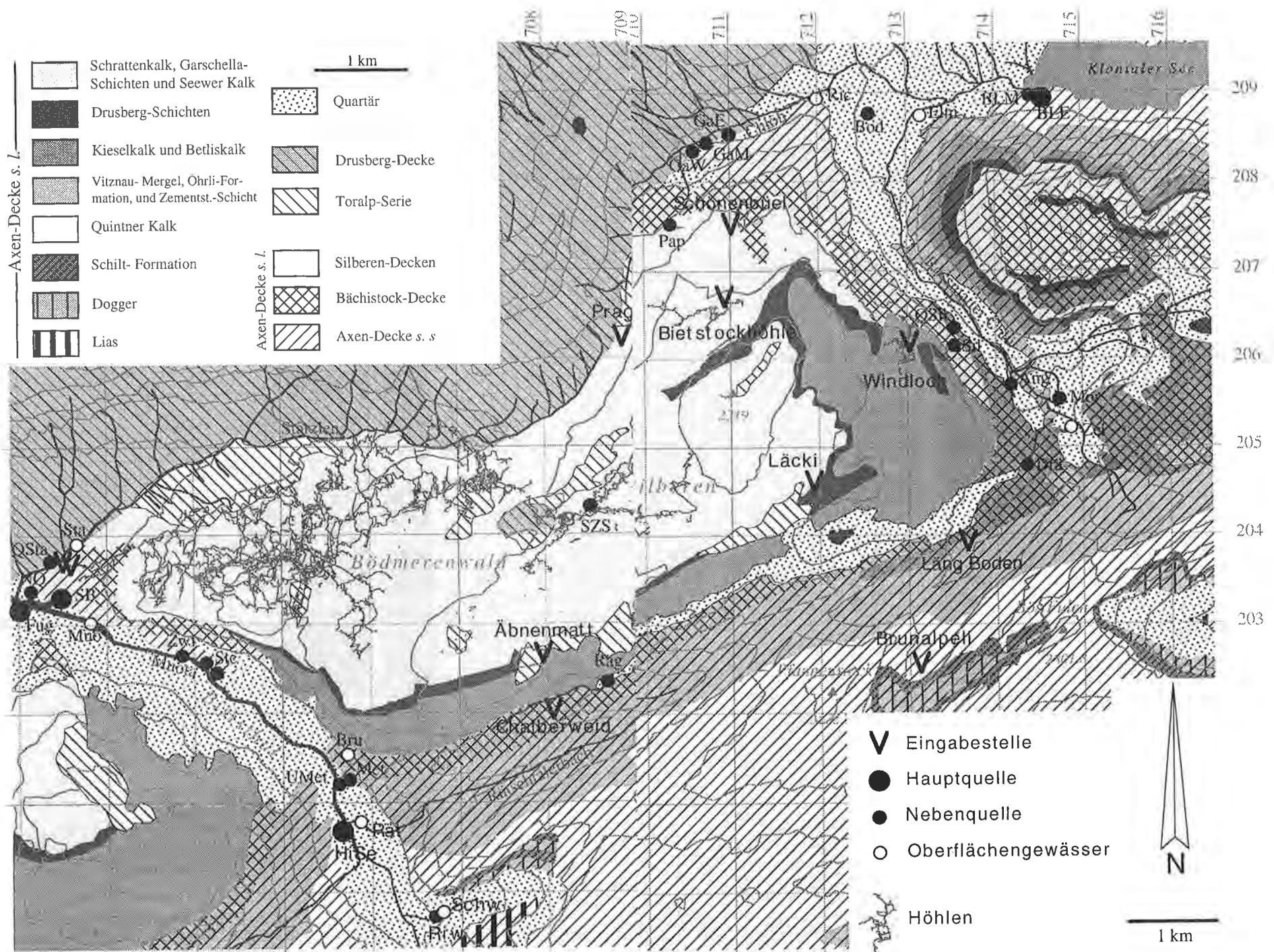


Fig. 4: Schematische geologische Karte (nach R. HANTKE, 1961). Bezüglich abgekürzter Bezeichnungen Quellen und Oberflächengewässern siehe Tab. 2. Schematic geological map (after R. HANTKE, 1961). Refer tab. 2 regarding the abbreviation of designations of springs and surface runoff.

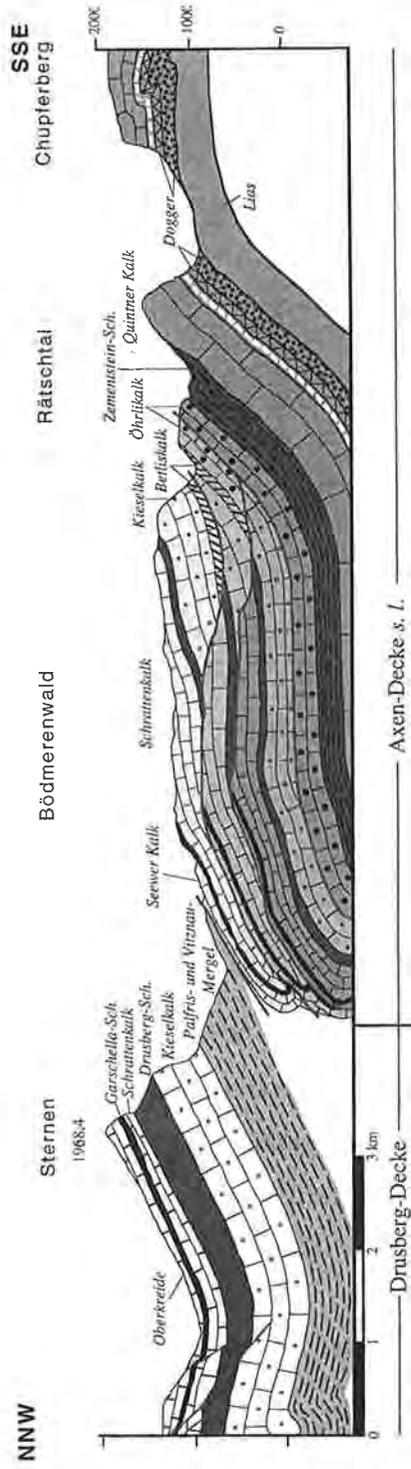


Fig. 5: Geologisches Profil durch das Einzugsgebiet der Schlichenden Brücken (nach R. HANTKE, 1961).
 Geological profile through the catchment area of the Schlichenden Brücken (after R. HANTKE, 1961).

Weiter unten in der stratigraphischen Serie finden sich drei weitere, Aquifere bildende und durch Mergelhorizonte abgetrennte Kalkformationen: Der Kiesel- und der Betliskalk (Valanginien/Hauterivien), die Öhrlikalke (Berriasien) und der Quintner Kalk (Malm). Der letztere überlagert die Kalkserien des Dogger und des Lias, welche uns im vorliegenden Beitrag nicht weiter beschäftigen.

Im Einzugsgebiet der Schlichenden Brünnen ist die Axen-Decke s. l. in eine Reihe von tektonischen Schuppen aufgespalten. Im N bestehen diese hauptsächlich aus Schrattenkalk, die Schichtreihe reicht lokal aber bis ins Tertiär und an der Basis liegen teilweise Drusberg-Schichten; im S bestehen die Schuppen stratigraphisch aus den Schichten vom Öhrli- bis zum Kieselkalk (vgl. mit Fig. 4). Die obersten beiden Einheiten werden Obere und Untere Silbernen-Schuppe genannt, darunter folgen die Bächistock-Decke und die Axen-Decke *sensu stricto*. Im Detail können Abweichungen von diesem Schema auftreten. Durch tektonische Repetition erreicht die Abfolge Schrattenkalk/Seewer Kalk lokal Mächtigkeiten von > 800 m. Diese Kalkserie fällt nach NNW unter die Palfris-Mergel (Berriasien) der basalen Drusberg-Decke ein (vgl. Profil Fig. 5).

Im SE stehen die beinahe senkrecht einfallenden Schichten vom Betliskalk bis zu den Öhrlikalken an, welche teilweise zum Einzugsgebiet der Schlichenden Brünnen zu gehören scheinen, noch weiter südöstlich bilden die mergeligen Zementstein-Schichten (Berriasien) eine wirksame Begrenzung zum anschließenden Karstaquifer des Quintner Kalks.

Eingeklemmt zwischen der Oberen Silbernen-Schuppe und der Drusberg-Decke sind einzelne Gesteinsspäne nachgewiesen, die zu den Formationen vom Betliskalk bis zu den Garschella-Schichten gehören. Diese Toralp-Serie genannten, in der Regel verkehrt liegenden Schuppen werden als überfahrene, ausgewalzte und zurückgebliebene Front der Drusberg-Decke gedeutet (R. HANTKE, 1961).

Auf der geologischen Karte der Glarner Alpen von J. OBERHOLZER (1942) ist der östliche Teil des Untersuchungsgebietes dargestellt. Jene von R. HANTKE (1961) deckt zwar die gesamte Region, ihr Maßstab von 1 : 100 000 erforderte aber eine Generalisierung, welche bei detaillierteren Studien einige Wünsche offen läßt.

2.4. Hydrogeologischer Rahmen

Es sind bereits zahlreiche Untersuchungen in unserem Gebiet ausgeführt worden, hauptsächlich unter der Leitung von A. BÖGLI und im Rahmen des 4. SUWT (Symposium on Underground Water Tracing). Im wesentlichen stützen sich die nachstehenden Ausführungen auf A. BÖGLI & T. HARUM (1981), daneben auf A. WILDBERGER (1986). Auf der Basis dieser Arbeiten versuchen wir Hypothesen zur Begrenzung des Einzugsgebietes der Schlichenden Brünnen zu formulieren. Diese Hypothesen beruhen auf geologischen, morphologischen und hydrogeologischen Argumenten, auf deren Grundlage sich das Einzugsgebiet folgendermaßen umschreiben läßt (Fig. 6):

Im NW taucht die Axen-Decke s. l. entlang der Linie Starzlen-Pragel-Chlön unter die an ihrer Basis durch mächtige Mergelserien aufgebaute Drusberg-Decke. Die Schlichenden Brünnen entspringen in einer Entfernung von weniger als einem Kilometer von diesem tektonischen Kontakt zwischen den beiden Decken. Abgeleitet aus der Lage der Höhlensysteme, dem strukturellen Kontext und den Ergebnissen von Wasserfärbungen kann eine Fließrichtung parallel dem Deckenkontakt angenommen werden, d. h. ENE-WSW; die basalen Schichten der Drusberg-Decke

scheinen also eine wirksame Barriere gegen NW und demzufolge auch eine Einzugsgebietsgrenze zu bilden.

Im N und NE lassen die großen Wasseraustritte des Blaubrunnen am Ufer des Klöntaler Sees, welcher allerdings dem Quintner Kalk entspringt, und die kleineren Quellen im Rossmatter Tal (z. B. Silberbrunnen an der Basis des Schrattenkalks der Bächistock-Decke) vermuten, daß ein Teil der im Silberbrunnen-Gebiet versinkenden Wasser dorthin fließen. Einerseits ist der hydraulische Gradient ab einer gewissen Distanz von den Schlichenden Brünnen zum Klöntal hin größer als zum Bisistal, andererseits fallen die Strukturen der Axen-Decke s. l. in diesem Sektor deutlich nach NNW unter die Drusberg-Decke resp. nach WSW zur Axialdepression unter dem Bödmerenwald. Eine Reihe von Markierstoffen ist deshalb beim Multitracing-Versuch 1992 im vermuteten Grenzbereich der hydrogeologischen Systeme Schlichenden Brünnen und Blaubrunnen eingegeben worden.

Im SE streichen im Bereich des Chratzerengrates die Betlis- und Öhrlikalk subvertikal aus. Am Westende des letzteren Karstwasserträgers liegt im Einschnitt des Bisistals die temporär fließende Mettlen-Quelle, welche der Hauptaustritt dieses Aquifers zu sein scheint. Immerhin schließt der komplexe geologische Aufbau des Gebirges eine Verbindung zum Aquifer im Schrattenkalk und damit zu den Schlichenden Brünnen nicht aus. Oder gibt es gar eine Konnektion zum Karst im südlich davon gelegenen Quintner Kalk?

Beim Einschnitt des Bisistales im SW ist man zur Annahme geneigt, daß die Axen-Decke s. l. genügend tief durchtrennt ist, um eine effektive hydrogeologische Barriere zu bilden. Allerdings hat seinerzeit eine Färbung im westlich des Wasserbergfirstes gelegenen Hürital, einem linksseitigen Zubringer zum Muotatal, gezeigt, daß – unter anderem – der Markierstoff auch östlich der Muota im Westteil des Höllochs auftreten kann, wobei in diesem Fall spezielle meteorologische Verhältnisse mitgespielt haben dürften (A. BÖGLI & T. HARUM, 1981).

Die oben formulierten Thesen zur Einzugsgebietbegrenzung der Schlichenden Brünnen waren beim Multitracing-Test 1992 zu prüfen. Eine häufige Probenahme, inklusive bei den Stellen unter Tage, verbunden mit Abflußmessungen an den Quellen sollten eine quantitative Auswertung der Versuche gestatten und zudem erlauben, auch gewisse Fragestellungen des Projekts COST 65 zu beantworten.

3. Die Markierversuche 1992 und 1993

3.1. Durchführung des Versuchs von 1992

3.1.1. Wahl der Eingabestellen

Entsprechend den angepeilten Zielen, der vorgängigen Analyse, den verfügbaren Mitteln und den technischen und praktischen Grenzen wurden neun Eingabestellen von Markierstoffen ausgewählt. Für jeden der Injektionspunkte beschreiben wir im folgenden die Situation, die Eingabebedingungen sowie die zu überprüfenden Arbeitshypothesen. Die Fig. 1, 4 und 6 zeigen die geographische und geologische Lage dieser Punkte während die Tab. 1 die Injektionsbedingungen resümiert.

Pragel (708°880/206°250, 1545 m ü.M.): Ein aus den sumpfigen Weiden im Gebiet der Mergel an der Basis der Drusberg-Decke (Palfris-Schichten) stammendes Bächlein von 20 l/min (19. 7. 1992) versinkt beim Erreichen des Seewer Kalks der

Tab. 1: Basisdaten zu den Eingabestellen der Markierstoffe.
Base data of the injection sites for tracers.

Ort	Koordinaten	Höhe (m ü.M.)	Tracer	Quantität	Datum/Zeit	Abfluß	Typ	Geologie
Prägel	708°880/206°250	1545	Phage T7	1,13E+15	19.7.1992 10.15	20 l/min	Ponor	Seewer Kalk
Schönenbüel	711°020/207°480	1830	Phage Pm7a	1,60E+14	19.7.1992 11.45	2-3 l/min	6 m-Schacht	Seewer Kalk
Bietstockhöhle	710°950/207°480	1830	Duasyn	15 kg	19.7.1992 11.30	ca. 2,5 l/s	unterird. Bach	Basis Schrattekn.
Windloch	713°020/206°120	1470	Phage f1	1,74E+15	19.7.1992 11.00	ca. 5 l/s	unterird. Bach	Basis Schrattekn.
Läng Boden	713°640/203°850	1750	Uranin	10 kg	19.7.1992 12.00	ca. 2 l/s	Ponor	Öhrlkalk
Brunalpeli	713°100/202°500	1950	Eosin	15 kg	19.7.1992 10.00	ca. 2 l/s	Ponor	Basis Quimner Kalk
Läcki	711°930/204°520	1990	Sulfo-G-extra	15 kg	19.7.1992 12.30	ca. 8 l/s	Ponor mit See	Drusberg-Schichten
Äbnenmatt	707°970/202°570	1600	Phage Vh5a	1,40E+13	19.7.1992 09.30	ca. 1 l/min	Ponor	Betliskalk
Chalberweid	708°050/201°930	1530	Naphthionat	23 kg	19.7.1992 12.30	ca. 10 l/min	Versickerung	Öhrlkalk
Ponor Prägelsstr.	702°580/203°660	685	Sulfo-G-extra	1,35 kg	6.8.1993 14.50	1,6 l/s	Ponor	Schratteknalk
Bohrung	702°531/203°691	692	Uranin	1 kg	6.8.1993 14.30	3,5 m³	Bohrung	Schratteknalk

Oberen Silberer-Schuppe (Axen-Decke s. l.), etwa 100 m vom Kontakt zwischen den beiden tektonischen Einheiten. Wird dieses Wasser auf seinem Weg zu den Schlichenden Brünnen das wenig entfernte und 700 m tiefer gelegene Hölloch passieren oder wird es gegen E zum Blaubrunnen am Klöntaler See fließen?

Schönenbüel (711°020/207°480, 1830 m ü.M.): Ein kleines Schmelzwasserrinnal (2–3 l/min am 19. 7. 1992) des benachbarten Schneefeldes verschwindet in einem 6 m tiefen Schacht im Seewer Kalk der Oberen Silberer-Schuppe (Axen-Decke s. l.). Die dortige Injektion sollte die Größe des Einzugsgebietes einer kleinen, 700 m westlich gelegenen, im Seewer Kalk entspringenden Quelle (Papeeteloch, Quelle Nr. 151) überprüfen. Wenn der Markierstoff aber nicht dort austritt, fließt er nach SW (Schlichenden Brünnen) oder nach E (Blaubrunnen)?

Bietstockhöhle (710°950/206°670, 1910 m ü.M.): Der Eingabeort in dieser 4,5 km langen Höhle befindet sich rund 100 m unter Terrain. Der Höhlenbach (100–150 l/min) folgt generell der Grenze Schrattenkalk/Drusberg-Schichten der Oberen Silberer-Schuppe (Axen-Decke s. l.). Morphologisch repräsentiert die großteils phreatisch entstandene Höhle einen oberen Teil des Schwyzer Schachts (Silberer-System). Erreichen die heutigen, vadosen Wasserläufe immer noch das Silberer-System, das Hölloch und schließlich die Schlichenden Brünnen, wie es die Fallrichtung der Strukturen vermuten läßt oder sind sie nach E zum nahegelegenen Klöntal gerichtet, zu dem hin der hydraulische Gradient wesentlich größer ist?

Windloch (713°020/206°120, 1470 m ü.M.): In dieser großen Höhle von > 7 km Länge findet sich ein permanenter Bach, welcher anlässlich der Markierstoffeingabe etwa 5 l/s Wasser führte (19. 7. 1992). Wenige Dutzend Meter nach der Injektionsstelle versickert das Gewässer im Schutt. Die Höhle folgt in weiten Teilen der Grenze zwischen dem Schrattenkalk und den Drusberg-Schichten der Bächistock-Decke (Axen-Decke s. l.). Man könnte einen Wiederaustritt des Markierstoffs im einige hundert Meter entfernten und sich in äquivalenter geologischer Position befindenden Silbererbrunnen erwarten. Eine Verbindung zum Blaubrunnen oder zu den Schlichenden Brünnen ist aber nicht ausgeschlossen.

Läng Boden (713°640/203°850, 1750 m ü.M.): Ein Bach von 2 l/s (19. 7. 1992) entspringt einem Schneefeld und verschwindet nach einigen Dutzend Metern in einer dolinenartigen Senke. Der Ponor befindet sich unmittelbar neben einer Geländerippe aus Oberem Öhrlikalk der Axen-Decke s. s. Das Ziel war hier die Überprüfung der hydrogeologischen Rolle dieses relativ schmalen Kalkbandes zwischen den beiden großen Karstaquiferen im Malm (Quintner Kalk) und in der Kreide (Schrattenkalk und Seewer Kalk). In Anbetracht der Lage der Eingabestelle könnte der Tracer in irgendeiner der überwachten, großen Quellen wiedererscheinen. Sollte der Öhrlikalk jedoch einen von seinen Nachbarn mehr oder weniger unabhängigen Träger bilden, wäre das gefärbte Wasser in der Mettlen-Quelle zu erwarten, welche an jener Stelle im Bisistal liegt, wo diese morphologische Senke die subvertikal eintauchenden Öhrlikalke quert.

Brunalpegi (713°100/202°500, 1950 m ü.M.): Die Schneeschmelze erzeugte einen Bach von 2 l/s (19. 7. 1992), welcher sich nach kurzem Lauf in den den Quintner Kalk überlagernden Blöcken verlor. Wenn der Aquifer des Quintner Kalks (Malm) von jenem im Schratten- und jenem im Öhrlikalk unabhängig ist, kommen nur zwei Quellen für den Farbstoffaustritt in Frage: Die Quelle von Hinter Seeberg (Bisistal) und der Blaubrunnen (Klöntal), welche beide den Malmkalken der Axen-Decke s. s. entspringen. Die Neigung der Faltenachsen scheint den Abfluß zum Bisistal

hinzulenken, eine Verbindung zum Blaubrunnen könnte aber dessen große Schüttung erklären. Zudem wäre eine Diffluenz der im Quintner Kalk versinkenden Wässer sowohl zum Klön- wie zum Bisistal hin eine plausible Erklärung für die seinerzeit bei Färbungen im Gebiet der Charetalp (südlich des Brunalpeli) festgestellten, geringen Tracerausbeuten in der Quelle von Hinter Seeberg (B. LOISELEUR, 1978).

Läcki (711°930/204°520, 1990 m ü.M.): Einem großen Schneefeld entspringt hier ein Bach von 8 l/s (19. 7. 1992), welcher in einer Senke in den Mergelkalken der Drusberg-Schichten der Oberen Silbernen-Decke (Axen-Decke s. l.) versickert. Diese Stelle befindet sich in geringer Entfernung vom Schrattenkalk der Karrenfelder der Silbernen. In dieser Gegend befindet sich eine Reihe von Schluckstellen, von denen das Wasser sowohl zu den Schlichenden Brünnen als auch zu den wesentlich näher gelegenen Quellen im Rossmatter Tal (Silbernenbrunnen u. a.) fließen könnte.

Äbnematt (707°970/202°570, 1600 m ü.M.): Eine kleines Hangmoor nährt hier ein Bächlein, welches nach kurzem Lauf in verkarsteten Spalten im Betliskalk der Oberen Silbernen-Schuppe oder der Toralp-Serie verschwindet (ca. 1 l/min am 19. 7. 1992). Diese Lokalität befindet sich an der angenommenen Südgrenze des Einzugsgebietes der Schlichenden Brünnen. Erreicht der Tracer diese Quelle oder andere, wie die Mettlen-Quelle, oder jene von Steinweid und Zwingsbrügg, welche näher liegen, aber anderen geologischen Horizonten entspringen?

Chalberweid (708°050/201°930, 1530 m ü.M.): Ein kleiner, der Lockergesteinsbedeckung entspringender Bach von 10 l/min (19. 7. 1992) versickert hier im Schutt über Öhrlikalk der Bächistock-Decke). Diese Impfstelle ist in ähnlicher geologischer Position wie jene von Läng Boden, aber 5 km westlicher und ein tektonisches Stockwerk höher. Es ist recht wahrscheinlich, daß der Markierstoff in der kaum 3 km entfernten und in derselben Formation liegenden Mettlen-Quelle wieder austritt. Eine Diffluenz in den Schrattenkalk und in Richtung der Schlichenden Brünnen ist aber nicht auszuschließen.

3.1.2. Überwachte Wasserstellen

Alle wichtigen und eine repräsentative Auswahl der weniger wichtigen Wasserstellen rund um die Silbernen, insgesamt 35 Quellen und Bäche, wurden in variablen Frequenzen beprobt (Fig. 6). In der Tab. 2 sind diese Stellen zusammen mit den dort analysierten Tracertypen und der Probenanzahl aufgelistet. Die Probenahmen erfolgten anfänglich häufig (je nach Stelle alle 1–6 Std.), später sind die zeitlichen Abstände vergrößert worden; die letzten Proben sind sechs Wochen nach der Markierstoffeingabe erhoben worden. Zwei weit entfernte, dem Quintner Kalk der unter der Axen-Decke liegenden Mürtschen-Decke entspringende Quellen (Sackberg-Quelle im unteren Klöntal und Mettensee im Glarner Haupttal, beide Quellen außerhalb der Karten in den Figuren) sind mit Hilfe von Fluocaptoren überwacht worden. Um über das Transportverhalten im Innern der Karstsysteme Auskünfte zu erhalten, sind mehrere Proben im Hölloch (Probestellen in den Fig. 1, 4, 6 und 7 nicht eingezeichnet) und im Schwyzer Schacht entnommen worden.

Ein solches Überwachungsnetz schließt praktisch aus, daß ein Tracer ausschließlich an einer nicht beprobten Wasserstelle erscheint oder allein zwischen zwei Probenahmen austritt und so unbemerkt bleibt. Der Verlust eines Fluocaptoren an der Sackberg-Quelle und die hochwasserbedingte Panne des automatischen Probennehmers am Silbernen Brunnen ließen dann allerdings in diesen Fällen einige Zweifel über die Präsenz oder das Fehlen von Tracern im Quellwasser aufkommen.

Tab. 2: Liste der Probestellen, Basisdaten zu den Probestellen, Art der Analysen und Zahl der Proben. Tracer: P – Phagen, F – Fluoreszenztracer, * – keine Probenahme (überschwemmt oder trockengefallen).

List and base data of the sampling points, method of analyses and number of samples. Tracer: P – phagen, f – Fluorescent tracer, * – no sample (flooded or dry).

Kode	Nr.	Name	Koordinaten	Höhe (m ü.M.)	Abfluß (l/s)	Jahr/ Tracer	Proben- anzahl	
							1992	1993
SB	1	Schlichenden Brünnen	702'440/203'280	637	20–15 000	92 P + F; 93F	88	82
NQ	1c	Neue Quelle	702'150/203'410	636	0,2–10	93 F	0	5
Fug	14	Fugglen	702'040/203'290	635	20–5000	92 P + F	41	–
Zwi	21	Zwingsbrügg	702'840/202'530	725	0–200	92 P + F	44	–
HiSe	24	Hinter Seeberg	705'620/200'600	782	200–50 000	92 P + F	79	–
Ste	47	Steinweid	704'120/202'520	727	0–100	92 P + F	18	–
Ste	49	Seinweid	704'090/202'540	725	0–100	92 P + F	20	–
Rät	60	Rätschtaler Bach (Hinter Seeberg)	705'600/200'800	785	50–2000	92 P + F	19	–
Hbs	77	Höllbachschlucht	702'480/203'720	670	0–4000	–	0	–
Sta	78	Starzlen (Stalden)	702'500/203'870	670	50–20 000	92 P + F	19	–
QSta	78a	Quelle an der Starzlen	702'400/203'750	660	0–20	92 P + F; 93 F	19	37
Muo	79	Muota (Höch Mur)	702'800/203'100	650	0–> 50 000	92 P + F	20	–
Met	81	Mettlen-Quelle	705'770/201'240	880	0–2000	92 P + F	40	–
UMet	81a	Untere Mettlen-Quelle	705'740/201'290	780	0–100	92 P + F	19	–
Bru	82	Bruuschtbach (Nägeliberg)	705'730/201'520	1000	?	92 P + F	20	–
Räg	83	Rägenloch	708'650/202'330	1590	5–500	92 F	20	–
Riw	84	Richliswald	706'660/199'690	950	?	92 F	12	–
Schw	85	Schwarzenbach (Ober)	706'740/199'740	980	?	92 F	12	–
SZQ	86	Siphon-Quelle Schwyzer Schacht	708'530/204'280	1450	?	–	0	–
SZS	86a	Siphon Schwyzer Schacht	708'490/204'310	1465	?	92 P + F	14	–
Pap	151	Papeetloch	710'320/207'530	1635	0–5	92 P + F	54	–
Qu	152	Quelle bei Pkt. 1326	709'720/207'720	1320	?	92 P + F	34	–
GaW	153	Unter Gampel West	710'600/208'370	1180	?	92 P + F	30	–
GaM	154	Unter Gampel Mitte	710'750/208'460	1160	?	92 P + F	19	–
GaE	155	Unter Gampel Ost	711'020/208'530	1150	?	92 P + F	18	–
Bod	156	Bodenberg	712'560/208'780	900	?	–	–	–
BLM	157	Blaubrunnen Mitte	714'400/208'930	855	0–1000	92 P + F	45	–
BLE	158	Blaubrunnen Ost	714'580/208'900	850	300–20 000	92 P + F	47	–
Sil	159	Silberbrunnen	713'460/206'210	1400	0–2000	92 P + F	50	–
QSil	160	Quelle unterhalb Silberbrunnen	713'460/206'400	1260	?	92 P + F	4	–
Drä	161	Dräcklochstafel	714'340/204'760	1695	?	92 F	10	–
Mor	162	Quelle im Moränen- tälchen	714'700/205'540	1480	?	92 F	10	–
Sac	166	Sackberg-Quelle (Glarus)	721'900/210'750	650	?	92 F	3	–
Mes	167	Mettlensee (Netstal)	722'550/215'400	445	?–3000	92 F	3	–
Ric	171	Chlön (Richisau)	712'000/708'960	1090	?	92 P + F	16	–
Elm	172	Chlü (Elmer)	713'170/208'730	870	?	92 P + F	17	–
Ze	173	Bach Zeinenstafel	714'800/205'270	1570	?	92 F	10	–
Ang	174	Bach im Anggenloch	714'120/205'740	1250	?	92 P + F	36	–
Zh		Zürichsee (Hölloch)	702'711/203'457	640		93 F	–	23
Bd		Blinddarm (Hölloch)	702'807/203'485	638		92 P + F; 93 F	15	24
Fjord		Fjord (Hölloch)	704'367/204'196	640		92 P + F	6	–
Ng		Nordgang (Hölloch)	703'757/204'071	670		92 P + F	1	–
Rg		Riesengang (Hölloch)	703'955/203'994	670		92 P + F	1	–
Rest		Reinacherstollen (Hölloch)	707'328/204'847	891		92 P + F	3	–
STu		Schutt-Tunnel (Hölloch)	705'901/204'904	680		92 P + F	6	–
Sg		Sintergang (Hölloch)	702'708/203'483	670		93 F	–	8
						total:	942	179

3.1.3. Wahl der Markierstoffe

Bei neun Eingabestellen ist es praktisch unmöglich, neun gute Tracer ohne Interferenzen auszuwählen. Man muß aber die bestmögliche Kombination zwischen den Markierstoffen und den Impfstellen finden. Es wurden zwei Gruppen von Tracern ohne gegenseitige Beeinflussung selektiert: Fluoreszenztracer (Uranin, Sulforhodamin G-extra, Eosin, Duasyn gelb T (Hoechst), Natrium-Naphtionat) und Bakteriophagen (T7 – Wirtsbakterium *Escheria coli* B, f1 – Wirtsbakterium *Escheria coli* K12, Vh5a – Wirtsbakterium *Vibrio harvey*, Pm7a – Wirtsbakterium *Bacillus subtilis*). Die verschiedenen Markiermittel und deren Menge sind in Abhängigkeit der an den verschiedenen Eingabestellen zu überprüfenden Hypothesen, den Impfbedingungen, den Nachweisgrenzen, den Tracerkosten und den Interferenzen ausgewählt worden.

Bei den Phagen gibt es im Prinzip keine gegenseitigen Beeinflussungen, aber die mechanische Resistenz über einen langen, unterirdischen Pfad ist nicht sehr gut bekannt. Man setzte sie deshalb dort ein, wo der vermutete Wiederaustritt nicht allzuweit entfernt war.

Bei den Fluoreszenztracern versuchten wir zu vermeiden, daß die fünf Farbstoffe an der gleichen Quelle erscheinen. Zudem sollten jene Tracer, die sich mit den klassischen Analysenmethoden nur schwierig unterscheiden lassen (Sulforhodamin G-extra/Eosin und Duasyn/Uranin), nicht an derselben Quelle austreten. Das Naphtionat schließlich, als relativ schlechter Tracer, sollte nicht allzuweit von den potentiellen Austrittsstellen eingegeben werden.

Die oben skizzierten, schwierig zu lösenden Probleme wurden mit der in Tab. 1 angegebenen Verteilung der Markierstoffe auf die verschiedenen Impfstellen angegangen.

3.1.4. Meteorologische und hydrologische Bedingungen

Die erste Julihälfte 1992 entsprach bezüglich der Niederschläge etwa einem durchschnittlichen Hochsommermonat (vgl. Klimaangaben in A. BÖGLI & T. HARUM, 1981), die anschließende Periode hingegen wies eher unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen auf. In den Hochlagen sorgten die vielen Schneefelder während der Versuche für einen stetigen Wasseranfall, während unterhalb etwa 1700 m ü.M. die Schneeschmelze bereits Mitte Juli abgeschlossen war.

In der Zeitperiode der Probenahmen sind mehrere, z. T. intensive Gewitterregen aufgetreten, welche den Abfluß an den Quellen stark beeinflussten. Die Werte der täglichen Niederschläge der Station Bisisthal sind zusammen mit dem Abfluß bei den Schlichenden Brünnen in der Fig. 9 angezeichnet. Die in derselben Figur angegebenen Abflüsse bei den Quellen Hinter Seeberg und Blaubrunnen stellen lineare Extrapolationen der bei den Schlichenden Brünnen gemessenen Schüttung dar. Das Hochwasser vom 24. 7. korrespondiert nicht mit einem großen Niederschlag bei der Station Bisisthal, offensichtlich war das Gewitter mehr in den Hochlagen und im Klöntal aktiv und nicht im Bisistal.

3.2. Ziel und Durchführung des Markierversuchs von 1993

3.2.1. Ziel

Der Hauptzweck der Versuche war die Prüfung, ob die im Rahmen des Programms COST-65 bis unter den Bergwasserspiegel abgeteufte Bohrung zum Ein-

zugsgebiet der Schlichenden Brünnen gehört oder nicht; gleichzeitig sollte dieselbe Fragestellung an einem 50 m entfernten Ponor getestet werden (Fig. 8). Sowohl die Bohrung als auch die Schwinde befinden sich im Schrattenkalk derselben tektonischen Einheit wie der Westteil des Höllochs und die Schlichenden Brünnen (nach R. HANTKE, 1961, Axen-Decke s. s.; nach J. OBERHOLZER, 1933 und R. HANTKE, 1982, Bächistock-Decke).

Die Bohrung repräsentiert im Prinzip den wenig permeablen Teil des Aquifers, der Ponor dagegen die sehr durchlässige Partie. Eine häufige Probenahme an den potentiellen Austrittsstellen sollte es erlauben, eine präzise Konzentrationskurve zu erstellen und ergänzende quantitative Analysen durchzuführen.

3.2.2. Eingabestellen und Markierstoffe

Ponor an der Prugelstraße (702'590/203'675, 690 m ü.M.): Bei dieser Stelle ist das Risiko einer Adsorption des Tracers kleiner als bei der Bohrung, weshalb hier der „weniger gute“ Markierstoff eingesetzt wurde (Sulforhodamin G-extra, 1,35 kg). Der Abfluß bei der Schwinde betrug zum Zeitpunkt der Eingabe 1,6 l/s (Messung mittels Kochsalz und spezifischer elektrischer Leitfähigkeit), die Temperatur 9,5° C und die Leitfähigkeit 275 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}/25^\circ \text{C}$. Die Eingabe erfolgte am 7. Juli zwischen 14.50 und 14.53 Uhr, nachdem der Tracer in 25 l Wasser vorgelöst worden war. Das Wasser am Grund des Kessels mit der Schwinde blieb mindestens während 5 Std. orange gefärbt.

Bohrung (702'531/203'691, 692 m ü.M.): Ebenfalls am 7. 8. 1993 wurde zwischen 14.30 und 14.34 Uhr ein Kilogramm Uranin (Fluoreszein) in die Bohrung eingespült. Der Markierstoff war vorgängig in 30 l Wasser gelöst worden. Zwischen 14.35 und 14.48 Uhr wurde mit ungefähr 3,5 m³ Wasser nachgespült (ca. 4 l/s). Das Wasserniveau im Bohrloch lag vor der Färbung bei 655,3 m ü.M., die Wassertemperatur in der bis 620 m ü.M. hinunterreichenden Sondierung lag je nach Tiefe zwischen 7,22 und 6,84° C. Die spezifische elektrische Leitfähigkeit betrug auf 651 m ü.M. 262 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}/25^\circ \text{C}$.

3.2.3. Überwachte Wasserstellen

Es wurden zwei Wasseraustrittsstellen überwacht: Die Schlichenden Brünnen (SB 1) und ein Quelle am Ufer der Starzlen (QSta 78a). Drei weitere Wasserstellen wurden im Innern des Aquifers beprobt: Die Bohrung und im Hölloch der sogenannte Zürichsee sowie der Blinddarm (in den Karstwasserspiegel eintauchender Gang). Was die Lage der Beprobungsorte anbetrifft, wird auf Fig. 8 verwiesen. Die spezifische elektrische Leitfähigkeit betrug bei den Schlichenden Brünnen 190 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}/25^\circ \text{C}$ und bei der Quelle am Ufer der Starzlen 288 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}/25^\circ \text{C}$, wobei die Temperatur 11,4° C betrug. Der Oberflächenbach Starzlen selbst zeigte Werte von 272 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}/25^\circ \text{C}$ und eine Temperatur von 12,8° C.

Bei den verschiedenen überwachten Stellen wurden folgende Probenahmefrequenzen eingehalten:

- Im Hölloch und in der Bohrung während 6 Std. nach der Farbeingabe alle 15 Min., nachher mit Fluocaptoren.
- Bei der Quelle an der Starzlen während 6 Std. alle 15 Min., dann jede halbe Stunde bis 9 Std. nach der Impfung, später alle 2 Std. bis 26 Std. nach der Eingabe.
- Bei den Schlichenden Brünnen während 8 Std. alle 15 Min., dann jede halbe Stunde bis 22 Std. nach der Farbeingabe, dann jede Stunde in der Zeit von 22–28 Std.

und schließlich alle 6 Std. bis zum Ende der Probenahmen 144 Std. nach der Impfung.

Während der Versuchszeit war der Abfluß bei den Schlichenden Brünnen (Fig. 9) vorerst konstant um $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$, dann erfolgte eine Abnahme bis $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$, worauf ein kleiner Peak von $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ folgte. Am 10. August stieg der Abfluß beim folgenden Hochwasser bis gegen $7 \text{ m}^3/\text{s}$. Man kann annehmen, daß vor diesem Ereignis stabile, sommerliche Niederwasserverhältnisse herrschten.

3.3. Versuchsergebnisse

Die Fig. 7 und die Tab. 3 zeigen die durch die Versuche von 1992 nachgewiesenen, unterirdischen Wasserverbindungen auf. Von den neun Tracern sind acht wieder aufgetaucht. Einzig die Bakteriophagen Vh5a – ein mariner Phage – konnte nicht wiedergefunden werden. Es ist wahrscheinlich, daß sich die Eingabebedingungen (zu kleiner Abfluß) für diese Phagen fatal auswirkten, da sie an der Grenzfläche Wasser/Luft rasch deaktiviert werden (M. BRICELJ & M. SSKO, 1992).

3.3.1. Abgrenzung der Einzugsgebiete

3.3.1.1. Schlichenden Brünnen und damit verknüpfte Austrittsstellen

Das Multitracing bestätigte, daß die Nordnordwestgrenze des Einzugsgebietes der Schlichenden Brünnen entlang dem Kontakt zwischen der Axen-Decke s. l. und den basalen Mergeln (Palfris-Formation) der Drusberg-Decke verläuft. Die Fließbahnen folgen dieser als undurchlässig zu betrachtenden Grenze.

Im SSE ist die Zone zwischen dem Aquifer im Quintner Kalk und jenem im Öhrlikalk ebenfalls als impermeabel anzusehen (mindestens im Bereich zwischen dem Rossmatter und dem Bisistal), denn das im Brunalpeli eingespeiste Eosin zeigte keine Diffuenz zur Mettlen-Quelle hin und umgekehrt floß das auf dem Läng Boden eingespülte Uranin nicht zur Hinter Seeberg-Quelle. Im größeren Maßstab ist diese Grenzzone allerdings nicht total dicht, so konnte der Farbstoff vom Läng Boden (Öhrlikalk) in Spuren im Blaubrunnen (Quintner Kalk) nachgewiesen werden und auf der anderen Seite des Bisistals, in analogen geologischen Verhältnissen, wurden seinerzeit im Quintner Kalk und den Zementstein-Schichten eingegebene Markiermittel im Quellbezirk Balm-Fugglen (u. a. Schlichenden Brünnen) wiedergefunden, welcher im Schrattenkalk liegt (A. BÖGLI & T. HARUM, 1981).

Bei Mittelwasserverhältnissen scheint das Bisistal mit seinen Wasseraustritten das Einzugsgebiet der Schlichenden Brünnen gegen SW hin gut abzugrenzen. Anlässlich spezieller hydrodynamischer Verhältnisse (heftige, lokale Regen) können die Karstwässer der Region Wasserberg (im SW des Bisistals) auf die Nordostseite des Tals übertreten und die westlichen Teile des Höllochs erreichen (A. BÖGLI & T. HARUM, 1981).

Die Entdeckung von Uranin in der kleinen Quelle am Ufer des Starzlenbachs (QSta 78a) könnte auf einem analogen Phänomen beruhen: In der Folge des mittleren Hochwassers vom 25. 7. 1992 (Spitze von $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$ an den Schlichenden Brünnen) ist möglicherweise Wasser aus dem Hölloch nach N zu diesem kleinen Wasseraustritt übergelaufen; allerdings konnte dort kein weiterer, in den Schlichenden Brünnen belegter Tracer nachgewiesen werden. Der Uraninnachweis in einer einzigen Probe aus der Quelle 78a läßt eine Kontamination nicht ausschließen. Auf Grund von Messungen der Temperatur und der Leitfähigkeit anlässlich der Versuche von 1993

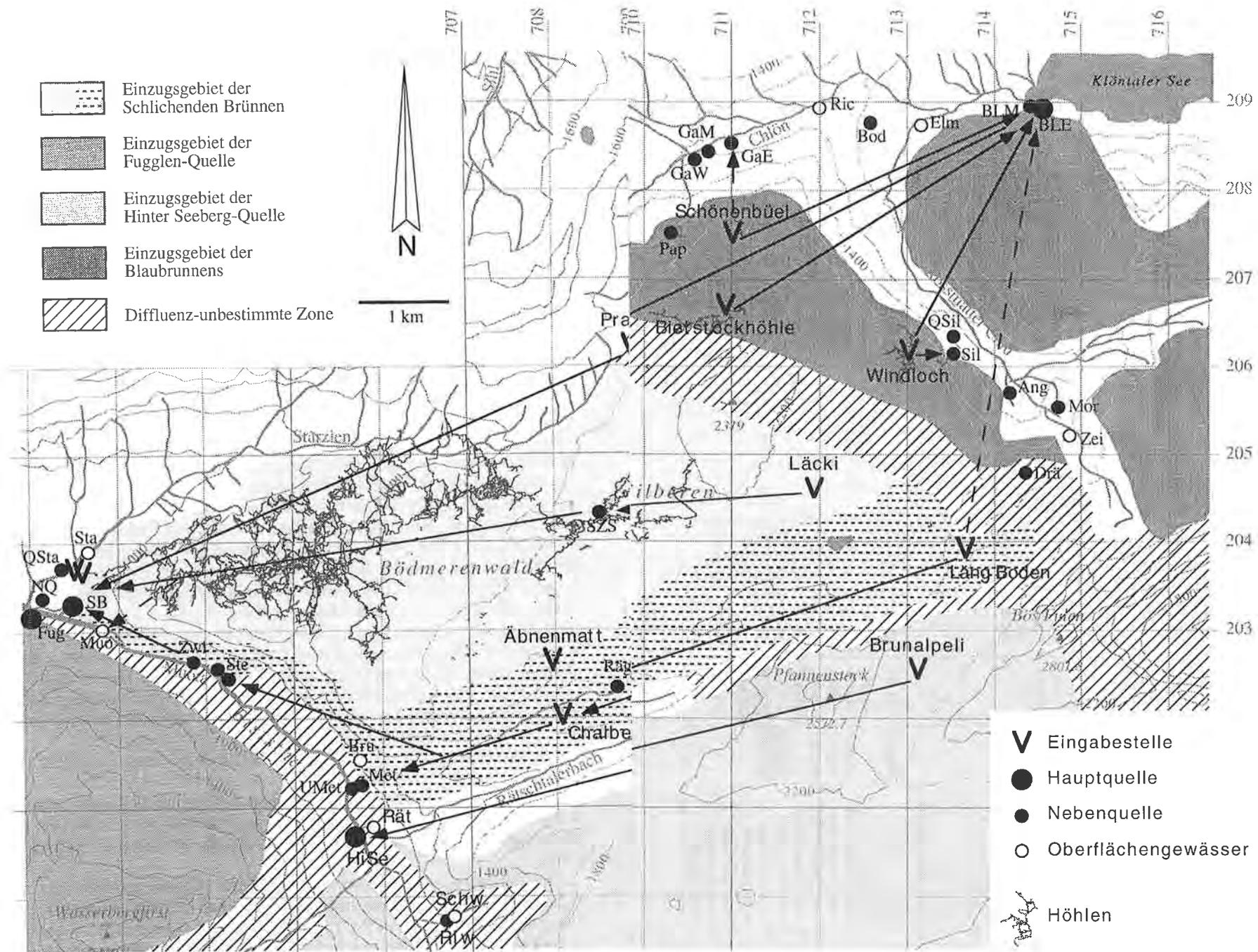


Fig. 7: Karte der durch das Multitracing von 1992 nachgewiesenen unterirdischen Wasserverbindungen und Abgrenzung des Einzugsgebiets der Schlichenden Brunn (strichliert – mögliche Verbindungen, Nachweis aber unsicher). Bezüglich abgekürzter Bezeichnungen von Quellen und Oberflächengewässern siehe Tab. 2.
 Map of the subsurface water connections, drawn based on the multitracing experiment carried 1992, and delineation of the catchment area of the Schlichenden Brunn. Broken line indicates inferred subsurface connection. Refer tab. 2 regarding the abbreviation of the designations of springs & face runoff.

Tab. 3: Liste der Probestellen mit den qualitativen Resultaten der Probenanalysen (= nicht analysiert). (Fortsetzung S. 67.)
 List of the sampling points with qualitative results of the analyses (= not analysed). (Continuation p. 67.)

Kode	Nr.	Name	Pragel T7	Schönen- bühl Pm7a	Bierstock- höhle Duasyn	Windloch fl	Läng Boden Uranin	Brunalpeli Eosin	Läcki Sulfo-G	Äbenmatt Vh5a	Chalber- weid Naphthionat	Ponor Pragelstr. Sulfo-G	Bohrung Stalden Uranin
SB	1	Schlichenden Brünnen	positiv	negativ	negativ	negativ ?	positiv	negativ	positiv	negativ	Spuren	positiv	negativ
NQ	1c	Neue Quelle	-	-	-	-	-	-	-	-	-	positiv	positiv
Fug	14	Fugglen	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	-	-
Zwi	21	Zwingsbrügg	negativ	negativ	negativ	negativ ?	positiv	negativ	negativ	negativ	Spuren	-	-
HiSe	24	Hinter Seeberg	negativ	negativ	negativ	negativ ?	negativ	positiv	negativ	negativ	negativ	-	-
Ste	47	Steinweid	-	-	negativ	-	positiv	negativ	negativ	-	positiv	-	-
Ste	49	Steinweid	negativ	negativ	negativ	negativ	positiv	negativ	negativ	negativ	positiv	-	-
Rät	60	Rätschtaler Bach (Hinter Seeberg)	-	-	-	negativ ?	negativ	negativ	negativ	negativ	Spuren	-	-
Sra	78	Sarzlen (Stalden)	negativ	negativ	negativ	negativ	-	-	negativ	negativ	-	-	-
QSta	78a	Quelle an der Sarzlen	negativ	negativ	negativ	negativ	Spuren	negativ	negativ	negativ	negativ	-	negativ
Muo	79	Muora (Höch Mur)	negativ	negativ	negativ	negativ	positiv	Spuren	Spuren	negativ	Spuren	negativ	-
Met	81	Mettlen-Quelle	-	-	negativ	negativ ?	positiv	negativ	negativ	negativ	positiv	-	-
UMet	81a	Untere Mettlen-Quelle	-	-	negativ	negativ ?	positiv	negativ	negativ	negativ	positiv	-	-
Bru	82	Bruuschtbach (Nägeliweg)	-	-	-	-	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	-	-
Räg	83	Rägenloch	-	-	-	-	negativ	negativ	negativ	-	-	-	-
Riw	84	Richliswald	-	-	-	-	-	negativ	-	-	-	-	-
Schw	85	Schwarzenbach (Ober)	-	-	-	-	-	negativ	-	-	-	-	-
SZS	86a	Siphon Schwyzzer- Schacht	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	-	positiv	negativ	-	-	-
Pap	151	Papeeteloch	-	negativ	negativ	-	-	-	negativ	-	-	-	-
Qu	152	Quelle bei Pkt. 1326	negativ	negativ	negativ	negativ	-	-	negativ	-	-	-	-
GaW	153	Unter Gampel West	negativ	negativ	negativ	negativ	-	-	negativ	-	-	-	-
GaM	154	Unter Gampel Mitte	negativ	negativ	negativ	negativ	-	-	negativ	negativ	-	-	-
GaE	155	Unter Gampel Ost	negativ	positiv	negativ	negativ	-	-	negativ	negativ	-	-	-
BLM	157	Blaubrunnen Mitte	positiv	negativ	positiv	positiv	negativ	negativ	negativ	-	-	-	-
BLE	158	Blaubrunnen Ost	positiv	positiv	positiv	positiv	Spuren	negativ	negativ	-	-	-	-
Sil	159	Silberbrunnen	-	positiv	negativ	Spuren	negativ	-	negativ	-	-	-	-
QSil	160	Quelle unterhalb Silberbrunnen	-	negativ	negativ	positiv	negativ	-	negativ	-	-	-	-
Drä	161	Dräcklochstrafel	-	-	-	-	negativ	negativ	negativ	-	-	-	-

Kode	Nr.	Name	Pragel T7	Schönen- büel Pm7a	Bierstock- höhle Dnasyn	Windloch f1	Läng Boden Uranin	Brunalpeli Eosin	Läcki Sulfo-G	Äbenmatt Vh5a	Chalber- weid Naphtionat	Ponor Pragelstr. Sulfo-G	Bohrung Stalden Uranin
Mor	162	Quelle im Moränen- tälichen	-	-	-	-	negativ	negativ	-	-	-	-	-
Sac	166	Sackberg-Quelle (Glarus)	-	-	negativ	-	-	-	negativ	-	-	-	-
Mes	167	Mettensee (Netstal)	-	-	negativ	-	negativ	negativ	negativ	-	-	-	-
Ric	171	Chlön (Richisau)	negativ	negativ	negativ	Spuren ?	-	-	negativ	-	-	-	-
Elm	172	Chlü (Elmer)	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	-	-	-	-
Zei	173	Bach Zeinenstafel	-	-	-	-	negativ	negativ	-	-	-	-	-
Ang	174	Bach im Anggenloch	negativ	negativ	-	negativ	negativ	negativ	negativ	-	-	-	-
Zh		Zürichsee (Hölloch)	-	-	-	-	-	negativ	-	-	-	negativ	fraglich
Bd		Blindarm (Hölloch)	-	-	negativ	negativ ?	positiv	negativ	-	-	Spuren	negativ	fraglich
Fjord		Fjord (Hölloch)	-	negativ	negativ	negativ	negativ	-	negativ	-	negativ	-	-
Ng		Nordgang (Hölloch)	-	negativ	negativ	negativ	negativ	-	negativ	-	negativ	-	-
Rg		Riesengang (Hölloch)	-	negativ	negativ	negativ	negativ	-	negativ	-	negativ	-	-
Rest		Reinacherstollen (Hölloch)	-	negativ	negativ	negativ	negativ	-	negativ	-	negativ	-	-
STu		Schurt-Tunnel (Hölloch)	-	negativ	negativ	negativ	Spuren?	-	-	-	negativ	-	-
Sg		Sintergang (Hölloch)	-	-	-	negativ	-	-	-	-	-	negativ	fraglich

(siehe Kap. 3.2.3.) ist es gut denkbar, daß ein wesentlicher Anteil dieses Quellwassers aus dem Starzlenbach stammt.

Die Ostnordostgrenze ist schlecht definiert. Die beim Prangel eingegebenen Phagen T7 erschienen sowohl in den Schlichenden Brünnen wie im Blaubrunnen, was zeigt, daß sich dieser Punkt im Grenzbereich der beiden Einzugsgebiete befindet. Der Prangel liegt in gleicher Distanz von den beiden Quellgruppen.

Die östlich des PASSES eingegebenen Tracer – das Duasyn von der Bietstockhöhle und die Bakteriophagen Pm7a vom Schönenbüel – konnten weder in den Schlichenden Brünnen noch im Hölloch nachgewiesen werden. Diese Impfstellen liegen bereits klar im Einzugsgebiet des Blaubrunnens. Die Beobachtung ist insofern bemerkenswert, als in der Vergangenheit die Bietstockhöhle – entsprechend dem Fallen der Achsen und der speliomorphologischen Evidenz – wahrscheinlich zum Einflußbereich des in Richtung Bisistal hin entwässernden Silberer-Systems gehörte. Die hydraulischen Gradienten sind allerdings in Richtung des den nordöstlichsten Teil des Einzugsgebietes der Schlichenden Brünnen kapernden Blaubrunnens wesentlich größer.

Die ab dem 8. 8. 1992 erfolgten Nachweise des Phagen f1 in Quellen und Bächen des Bisistales (Schlichenden Brünnen, Quellen Zwingsbrügg, Mettlen und Hinter Seeberg sowie Rätstaler Bach) müssen einer anderen Herkunft als unserer Eingabe im Windloch vom 19. 7. 1992 zugeordnet werden (siehe Kap. 3.3.1.2.).

Die Hintere Silberalp muß im Bereich der Ostgrenze des Einzugsgebietes der Schlichenden Brünnen liegen, wie dies durch das im Westteil dieser Alp (Läckli) eingegebene Sulforhodamin G-extra belegt wird.

Im SSE des Einzugsgebietes bilden die zwischen den Aquiferen im Schrattekalk und im Quintner Kalk eingeklemmten, subvertikal ausbeißenden Öhrlikalk ein ENE-WSW-streichendes Band. Die zwei in dieser Zone eingegebenen Markierstoffe (Uranin im Läng Boden und Naphtionat auf der Chalberweid) sind rasch und in konzentrierter Form in der Oberen und Unteren Mettlen-Quelle wieder erschienen. Dieses Kalkband bildet demzufolge das Einzugsgebiet dieser beiden, periodisch trockenfallenden Wasseraustritte. Die zwei Tracer wurden auch in den nicht permanenten Quellen von Steinweid und jener oberhalb der Zwingsbrügg sowie in den Schlichenden Brünnen festgestellt. Die Quelle bei der Zwingsbrügg zeigte seinerzeit auch einen positiven Sporennachweis von einer Eingabestelle im westlichen Hölloch (A. BÖGLI & T. HARUM, 1981). Das Naphtionat von der Chalberweid wurde in Spuren zusätzlich im Rätstaler Bach gefunden, welcher die morphologische Senke in den unterkretazischen Mergeln zwischen dem Quintner und dem Öhrlikalk entwässert.

Der Bruuschtbach fließt in der in den Vitznau-Mergeln eingetieften Mulde zwischen der westlichen Fortsetzung des Chratzerengrates (Öhrlikalk) und dem Bödmerengebiet (Betliskalk und Jüngerer); dieses Fließgewässer stellt innerhalb des Einzugsgebietes der Schlichenden Brünnen eine unbestimmte Zone dar, da der hauptsächlich von den permanenten, ein vermutlich lokales Einzugsgebiet im Lockergestein sowie im Betlis- und Kieselkalk aufweisenden Quellen im Rängenloch gespeiste Bach vor dem Erreichen des Bisistales teilweise oder total versickert (Wasserverluste in den Untergrund von schätzungsweise 30 % bei Hochwasser und 100 % bei Niederwasser).

Es dürfte auf Grund der Versuchsergebnisse von 1992 klar sein, daß die Quellen von Mettlen, Steinweid, Zwingsbrügg sowie die Schlichenden Brünnen Ausflüsse eines gemeinsamen Aquifers darstellen und daß die Schlichenden Brünnen dessen

perennierender Hauptaustritt sind. Es scheint keine hydrogeologische Barriere zwischen dem Schrattenkalk und den anderen kretazischen Kalken zu existieren. Dieser große Aquifer verfügt in seinem Nordnordwestteil über eine permanent gesättigte, verkarstete Zone (tiefegelegene Partien des Höllochs) und entlang dem Bisistal und mehr oder weniger im Niveau der Muota möglicherweise über einen weiteren gesättigten Bereich (verkarstet oder teilweise lediglich geklüftet); sehr wahrscheinlich tritt ebenso in den Öhrlikalken unter dem Chratzerengrat eine gesättigte, verkarstete Zone auf.

Zwischen den beiden oben beschriebenen phreatischen Ästen finden sich im zentralen Teil des Einzugsgebietes Bereiche mit vadosem Abfluß. Das in Läckli eingegebene Sulforhodamin G-extra floß in Richtung WNW ab, wurde im Schwyzer Schacht nachgewiesen und erreichte erst im östlichen Teil des Höllochs (Nachweis im Schutt-Tunnel) die gesättigte Zone. Auf gleiche Weise scheinen die Wässer der Silberen und der Bödmeren abzufließen: Zuerst in der ungesättigten Zone ungefähr nach WNW (Igluschacht, Schwyzer Schacht, Hölloch-Hochsystem), wobei einige Siphonbereiche passiert werden (u. a. zwischen Iglu- und Schwyzer Schacht, zwischen Höllen- und Schwyzer Schacht, zwischen Bachschlucht und Via Mala im Hölloch); nach dem Erreichen der gesättigten Zone fließt das Wasser in generell westsüdwestlicher Richtung zu den Schlichenden Brünnen. Der Nachweis geringer Mengen von Sulforhodamin in der Muota bei der Probenahmestelle Höch Mur (500 m im SE der Schlichenden Brünnen) deutet auf eine gewisse Auffächerung dieser Abflußbahn im Austrittsbereich.

Die Geometrie der Wasserbahnen erlaubt es, das Einzugsgebiet entsprechend den Speisungsgebieten der zwei phreatischen Äste zweizuteilen. Bei Hoch- und Mittelwasser bildet das Band am Südsüdostrand des Einzugsgebietes der Schlichenden Brünnen (Zone der Öhrlikalke) den Hauptteil des Einzugsgebietes der Quellen von Zwingsbrügg, Steinweid und Mettlen. Im westlichsten Teil des Höllochs, sicher in der Gegend des Blinddarms, möglicherweise aber auch weiter im E (fraglicher Uraninnachweis im Schutt-Tunnel 3 km östlich des Blinddarms) vereinigen sich die beiden Stränge der gesättigten Zone, denn bei der genannten Probestelle konnten die Tracer von beiden Untereinheiten des Einzugsgebietes nachgewiesen werden.

Die Fläche des gesamten Einzugsgebietes der Schlichenden Brünnen kann auf der Grundlage der Markierversuche auf etwa 31 km² berechnet werden, dazu kommen noch rund 2 km² Diffuenzzone oder unklare Bereiche. Auf das Teileinzugsgebiet Chratzerengrat – Mettlen (in erster Linie Öhrlikalke) entfallen ca. 10 km² (Fig. 7).

3.3.1.2. Blaubrunnen und damit verknüpfte Austrittsstellen

Das Einzugsgebiet des dem Quintner Kalk (Malm der Axen-Decke s. s.) entspringenden Blaubrunnen befindet sich wohl zur Hauptsache auf dem südöstlich der Quelle gelegenen, vergletscherten Glärnisch (außerhalb der Karten in den Fig. 1, 4, 6 und 7), worauf die milchige Beschaffenheit des Quellwassers deutet („Gletschermilch“). Die bisherigen Markierungen erlauben keine umfassende Begrenzung des Einzugsgebietes, es kann aber immerhin gezeigt werden, daß der Nordteil der Silberen (Duasyn aus der Bietstockhöhle, Bakteriophagen Pm7a von Schönenbüel und teilweise die Phagen T7 vom Prigel, Schrattenkalk und Seewer Kalk der Silberendecken) dem auf der anderen Seite des Rossmatter Tales gelegenen Blaubrunnen tributär ist (vgl. auch mit Kap. 3.3.1.1.).

Der Tracer Pm7a von Schönenbüel war zudem in je einer Probe von einer kleinen Hangschuttquelle an der Chlön (Unter Gampel Ost) und vom Silberenbrunnen nach-

weisbar. Letztere Wasserbahn, sofern deren Nachweis reell ist, passiert vermutlich das Höhlensystem des Windlochs (Eingabestelle der Phagen f1, siehe unten), bevor der Silberbrunnen erreicht wird. Die vorgängig vermutete Verbindung von Schönenbühl zur nahegelegenen Höhlenquelle des Papeetelochs existiert offenbar nicht.

Die im Windloch eingegebenen Phagen f1 konnten nach kurzer Zeit im Silberbrunnen und einer Nebenquelle (Sil 159 und QSil 160) sowie im Blaubrunnen nachgewiesen werden. Die ersten Proben im Silberbrunnen gingen verloren (ein Hochwasser kippte den automatischen Probenehmer) und der Peak der Phagen f1 konnte dort somit nicht erfaßt werden. Ein visueller Vergleich zwischen Größe des Abflusses im Windloch und am Silberbrunnen erlaubt immerhin die Aussage, daß vom Höhlenwasser nur ein Bruchteil beim Silberbrunnen austritt.

Im Blaubrunnen konnten fragliche Spuren des Uranins festgestellt werden, was auf eine Diffluenz der hauptsächlich zum Bisistal hin gerichteten Abflußbahnen im Öhrlikalk von Läng Boden zu deuten scheint. Hingegen waren weder das Sulforhodamin von Läckli noch das Eosin vom Brunalpeli in Proben aus dem Blaubrunnen nachweisbar, diese beiden Eingabestellen gehören demzufolge klar zum Einzugsgebiet der Schlichenden Brünnen respektive zu jenem der Quelle von Hinter Seeberg.

Um den 8. 8. 1992 konnten mehrere Phagen f1 in Proben der Schlichenden Brünnen und der anderen Quellen des Bisistales gefunden werden. Es scheint sich hierbei um eine mit den heftigen Gewitterregen vom 7. August verbundene Kontamination mit Fäkalien zu handeln (f1 ist der Phage von Escheria coli K12), allerdings könnte erst ein neuer Versuch die Frage der Vertrauenswürdigkeit dieser Resultate beantworten.

3.3.1.3. Quelle von Hinter Seeberg

Einzig der Markierstoff Eosin ist bei dieser bedeutenden Quelle ausgetreten, was anzuzeigen scheint, daß auf der Ostseite des Bisistales die Aquifere im Quintner Kalk und im Öhrlikalk klar getrennt sind und keine nennenswerten Diffluenzen zwischen diesen auftreten. Der Nichtnachweis von Eosin in den für die Wasserversorgung der Gemeinde Muotathal gefaßten Richliswald-Quellen bestätigt den früheren Befund, daß einzig das Gebiet um die Glattalp als gemeinsames Einzugsgebiet mit der Hinter Seeberg-Quelle gelten kann (A. BÖGLI, 1970, B. LOISELEUR, 1978, A. BÖGLI & T. HARUM, 1981).

3.3.1.4. Neue Quelle und Resultate der Markierungen 1993

Anlässlich des Versuchs von 1993 sind die Tracer entgegen allen Erwartungen teilweise in einer nichtüberwachten Quelle ausgetreten (Fig. 8). Dieser „Neue Quelle“ getaufte Wasseraustritt, er war uns vordem entgangen, befindet sich unter einem Haus und ist vom Ursprung weg bis zu seiner Mündung in den Quellbach der Schlichenden Brünnen eingedolt. Zur Zeit der Färbung betrug der Abfluß der Neuen Quelle ungefähr 1,5 l/s. Erst durch die intensiv grüne Farbe in der Vorflut wurden wir auf die Existenz dieser kleinen Quelle aufmerksam. Auch in früheren Berichten, insbesondere auch in der Publikation über die Markierungen von 1979, wird weder im Text noch in Tabellen auf die Neue Quelle hingewiesen, hingegen ist sie in einer Kartenskizze von A. BÖGLI & T. HARUM (1981, Quelle 1c in Fig. 39) eingezeichnet.

Vier (späte) Proben von dieser Quelle erlauben die Aussage, daß dort beide Tracer massiv austraten und sie in weniger als 15 Std. erreicht hatten (Tab. 3). Die Markierungsversuche mußten wiederholt werden, um eine auswertbare Konzentrationskurve

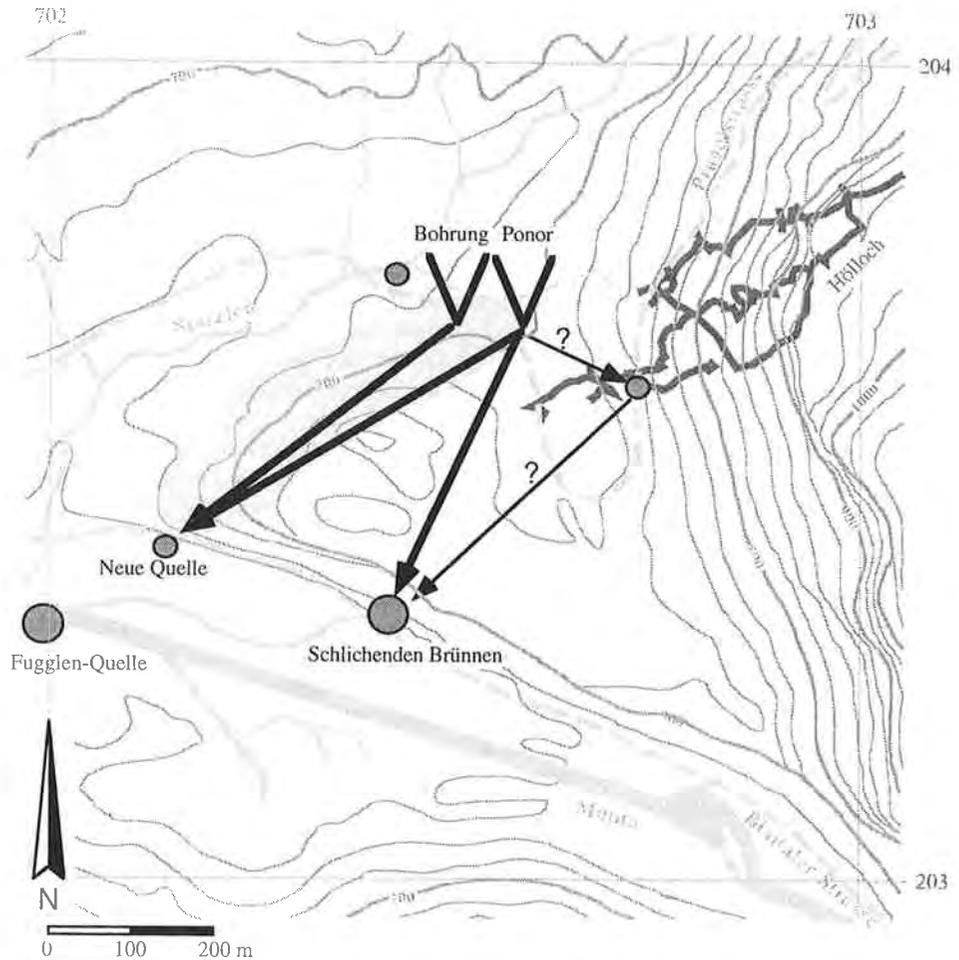


Fig. 8: Karte der durch den Markierversuch 1993 nachgewiesenen unterirdischen Verbindungen und Abgrenzung des Einzugsgebietes der Neuen Quelle (grau).
 Map of the subsurface water connections established using the tracing experiment carried out in 1993, and delineation of the catchment area of the Neue Quelle (grey).

zu erhalten. In den Schlichenden Brünnen konnte keine Spur von Uranin nachgewiesen werden, das Sulforhodamin dagegen erschien in dieser Quelle 12 Std. nach der Eingabe (Fig. 9). In der Bohrung war kein Sulforhodamin nachweisbar. Bei den verschiedenen Probestellen im Höllloch konnten Spuren des Uranins klar nachgewiesen werden, eine Verschleppung des Farbstoffs durch die Probennehmer kann aber nicht ausgeschlossen werden.

Der Markierversuch scheint anzuzeigen, daß der größte Teil des im Ponor versinkenden Wassers zur Neuen Quelle, ein geringer Anteil (ca. 8 %) aber zu den Schlichenden Brünnen fließt. Die beiden Aquifere sind also nicht unabhängig voneinander. Das in der Bohrung eingespülte Uranin dagegen konnte in den Schlichenden Brünnen nicht nachgewiesen werden. Es ist sehr wahrscheinlich, daß der Tracer v. a. in der obersten Partie der gesättigten Zone in den Aquifer übergetreten

ist, denn die Bohrung weist um 35–40 m unter Terrain (Wasserspiegel bei 36,5 m) eine besonders durchlässige Partie auf. Eine Injektion des Markierstoffs einzig in den wenig permeablen, unteren Bereich der Bohrung gäbe eventuell weitere interessante Aufschlüsse. Die Neue Quelle wurde bei den Tracerversuchen von 1979 und 1992 nicht und bei jenen von 1993 nur ungenügend beprobt, ihr Verhältnis zum Einzugsgebiet der Schlichenden Brünnen läßt daher noch einige Fragen offen.

3.3.2. Analyse der Tracergeschwindigkeiten

Die maximalen Abstandsgeschwindigkeiten sind sehr variabel (20–300 m/h, vgl. Tab. 4). Die Interpretation dieser Werte ist recht heikel wie bei allen Markierversuchen im Karstmilieu. Die Abstandsgeschwindigkeiten werden stark durch die Eingabebedingungen und die auf dem Fließweg angetroffenen Hindernisse beeinflusst (beispielsweise „Verlangsamung“ der Fließbewegung in einer wassergesättigten Höhlung großen Volumens).

Wir unterscheiden erhöhte und kleinere Geschwindigkeiten (> 150 m/h resp. < 125 m/h). Alle großen Abstandsgeschwindigkeiten traten bei den hochgelegenen Eingabestellen auf, wo noch Schneeschmelzwasser im Spiel waren. Solche Geschwindigkeiten sind im Prinzip nur in gut organisierten Systemen von Abflußbahnen mit Durchmessern im Bereich von Dezimetern oder Metern möglich.

Auf der Grundlage direkter Beobachtungen kann geschlossen werden, daß die erhöhten Geschwindigkeiten sowohl im vadosen als auch im phreatischen Bereich auftreten (Tab. 4): Beispielsweise verlaufen die Wasserbahnen von Läckli nach den Schlichenden Brünnen zu einem guten Teil in der gesättigten Zone und dies bei einer maximalen Abstandsgeschwindigkeit von > 200 m/h; im Schwyzer Schacht konnte nur ein stagnierender, aber piezometrisch mit den Abflußbahnen verbundener, temporärer Siphontopf beprobt werden, die dort ermittelte maximale Abstandsgeschwindigkeit von knapp 100 m/h stellt somit einen zu kleinen, für die generell vadose Strecke Läckli–Schwyzer Schacht nicht repräsentativen Wert dar. Folglich ist bei dieser Verbindung weder das Fließen in der ungesättigten noch jenes in der gesättigten Zone langsam.

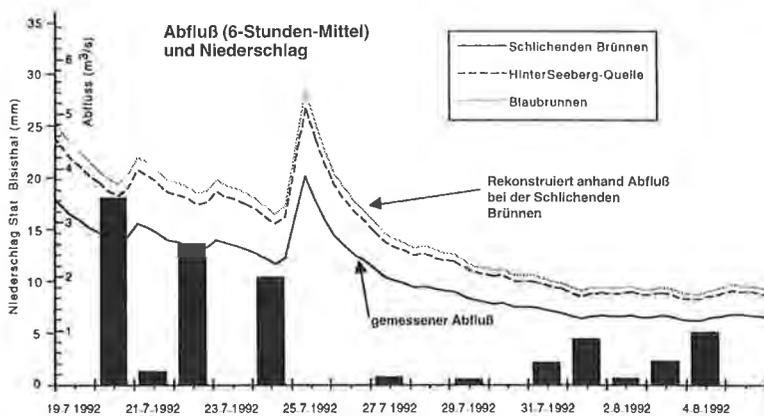
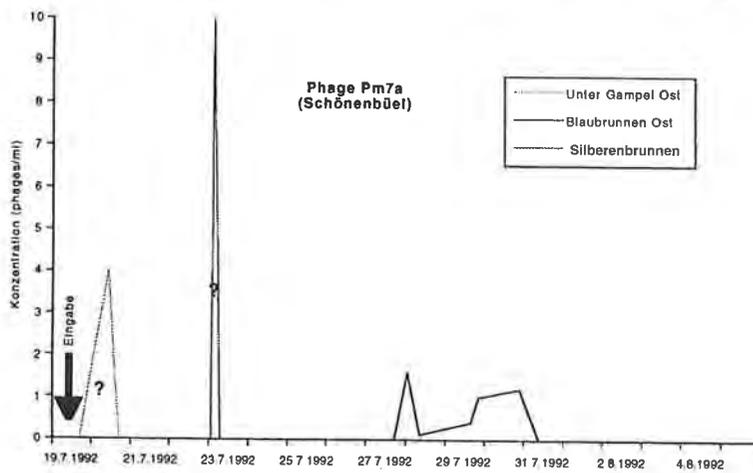
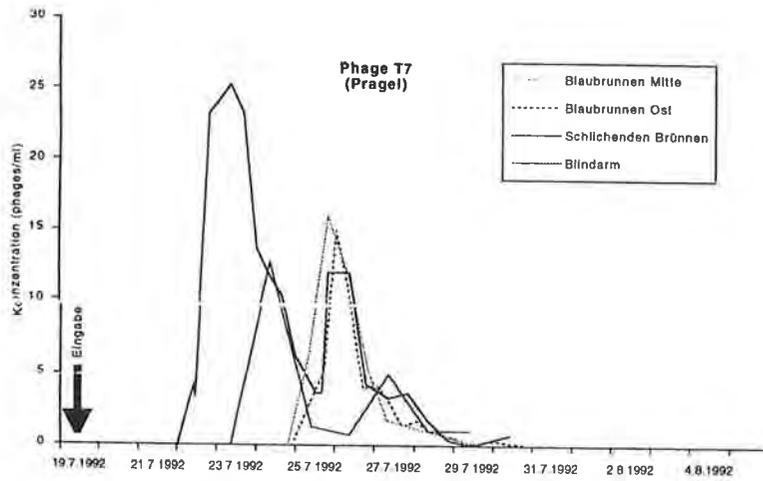
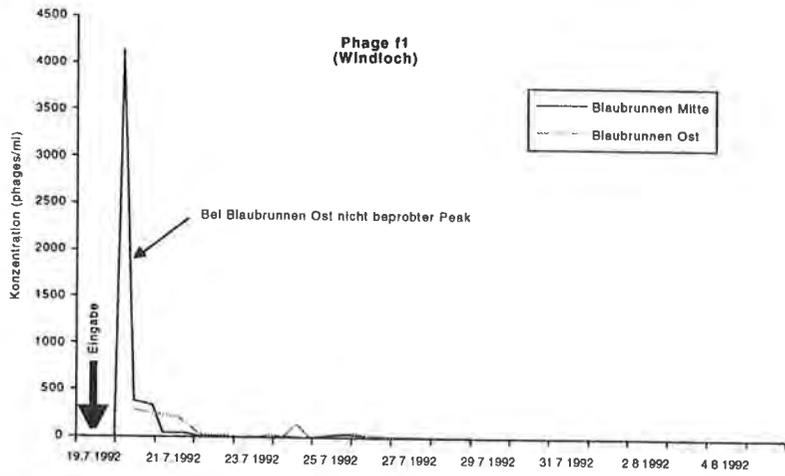
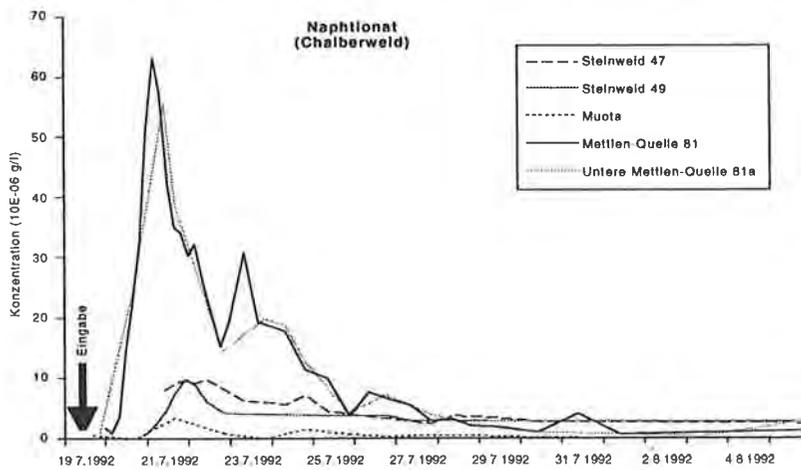
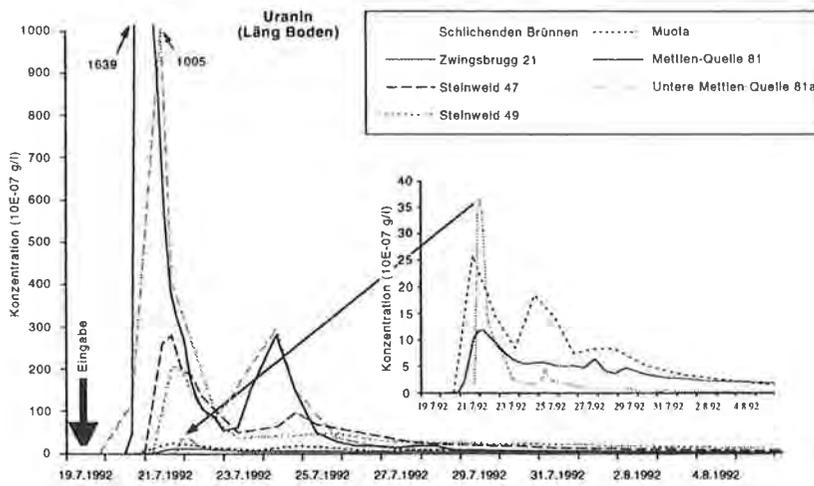
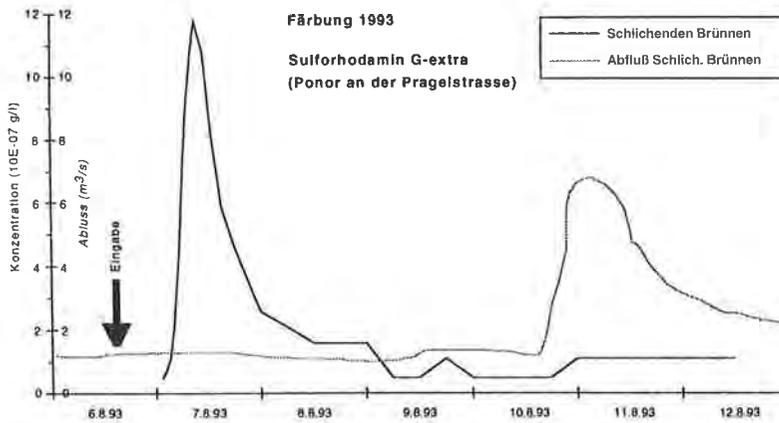
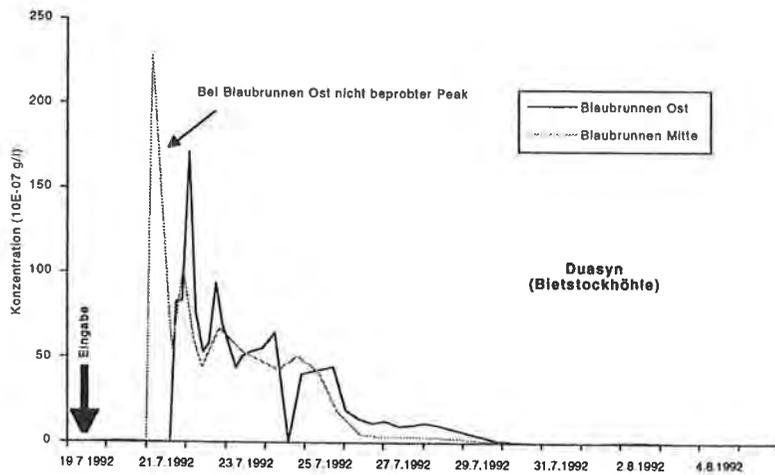
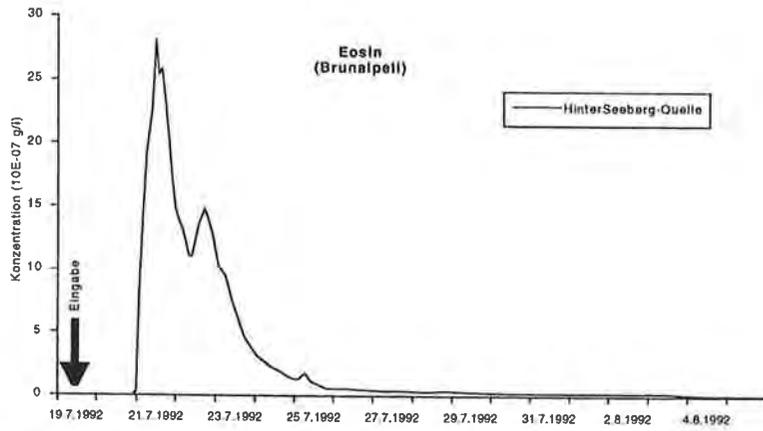
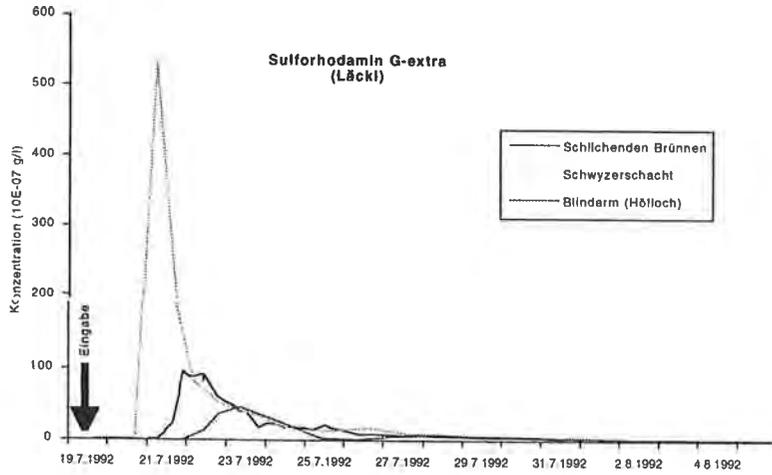


Fig. 9: Durchgangskurven der Markierstoffe (1992 und 1993), Abfluß bei den Hauptquellen sowie täglicher Niederschlag bei der Station Bisisthal. (Fortsetzung S. 73–75.)
Breakthrough curves of tracers injected in 1992 and 1993, of discharge of the main springs as well as of daily precipitation registered at the Bisisthal station. (Continuation p. 73–75.)







Die relativ kleinen Geschwindigkeiten (< 125 m/h) sind hauptsächlich bei jenen Verbindungen aufgetreten, bei denen die Injektionsbedingungen nicht ideal waren (wenig Wasser zur Nachspülung), wie z. B. auf der Äbnenmatt (Vh5a), dem Schönenbüel (Pm7a) oder der Chalberweid (Naphtionat). Die kleinen Abstandsgeschwindigkeiten scheinen auch an hydrogeologisch komplizierte Abflußbahnen gebunden zu sein (Diffluenzzonen wie beim Pragel (T7), Traversierung tektonischer Schuppen­grenzen, tiefer Täler oder wenig durchlässiger Bereiche).

Das Resultat der Markierstoffeingabe in der Bietstockhöhle (Duasyn) ist hierzu vielleicht das repräsentativste Beispiel: Die Eingabebedingungen im unterirdischen Bachlauf waren optimal, die ermittelten Geschwindigkeiten von rund 100 m/h aber vergleichsweise recht klein. Die benachbarten Eingabestellen von Schönenbüel (Pm7a) und vom Pragel (T7) zeigten ebenfalls relativ bescheidene Geschwindigkeiten (Tab. 4), welche zeigen, daß die geologischen Komplikationen auf dem Weg zum Blaubrunnen (Passage von Deckengrenzen und von schlechter permeablen Schicht­gliedern) den Abfluß etwas hemmen; bei der Bietstockhöhle kommt noch dazu, daß die Wasserwege in östlicher Richtung partiell relativ jung und demzufolge noch nicht ausgereift sein könnten (vgl. Kap. 3.3.1.1.).

Für den langsamen Abfluß vom Ponor an der Pragelstraße zu den Schlichenden Brünnen seien zwei mögliche Gründe angeführt:

- 1) Die Eingabe erfolgte in der Diffluenzzone zwischen der Neuen Quelle und den Schlichenden Brünnen, wo lediglich 8 % des Farbstoffs nachgewiesen werden konnten.
- 2) Im Quellbereich weist das Hölloch großräumige Gänge auf; wenn der Abfluß von 2 l/s auf einigen Dekametern des Fließweges durch phreatische Karstschläuche von mehreren Quadratmetern Querschnitt führt, wird die Geschwindigkeit folglich lokal sehr bescheiden (< 5 m/h).

3.3.3. Analyse der Tracerausbeute

Die Tracerausbeute ist nur bei den Schlichenden Brünnen berechnet worden, da allein dort der genaue Abfluß bekannt war. Bei anderen Quellen (Mettlen, Steinweid, Zwingsbrügg) ist die Ausbeute anhand der geschätzten Ergüsse und der gemessenen Konzentrationen beurteilt worden. Beim Blaubrunnen wurde eine Abflußmessung durchgeführt und die Ganglinie linear an jene der Schlichenden Brünnen gekoppelt (Fig. 9); den Fehler der auf diese Weise ermittelten Werte schätzen wir auf maximal 30 %. Bei der Hinter Seeberg-Quelle ist bekannt (B. LOISELEUR et al., 1985), daß der mittlere Abfluß rund 50 % höher liegt als bei den Schlichenden Brünnen. Auf Grund dieser Tatsache haben wir den Erguß bei den Schlichenden Brünnen mit 1,5 multipliziert, um jenen bei der Quelle Hinter Seeberg zu erhalten. Es ist anzufügen, daß beim letztgenannten Wasseraustritt die Abflußmessung problematisch ist, da er am Ufer der Muota aufstößt. Die Ausbeute des Eosins von 100 % in der Hinter Seeberg-Quelle deutet auf eine Überschätzung von deren Schüttung.

In der Tab. 4 sind die Tracerausbeuten zusammengestellt. Beim Eosin und beim Duasyn deuten die hohen Wert auf direkte Verbindungen von der Beschickungsstelle zur zugehörigen Quelle. Beim Sulforhodamin sind 32 % der eingegebenen Farb­menge wieder nachgewiesen worden. Dies weist auf eine gewisse Dispersion und Retention im Karstsystem hin (beispielsweise durch Verdünnung in den vielen „Piezometerröhren“ wie der Osirisgang und der Schutt-Tunnel im Hölloch oder jenen im Schwyzer Schacht usw.).

Tab. 4: Maximale Abstandsgeschwindigkeiten und Tracerausbeuten (die Unsicherheiten beim Markierstoffauftrag liegen bei den Schlichenden Brünnen in der Größenordnung von 15 %, bei den anderen Quellen bei etwa 50 %). (* Der Großteil ist bei der Neuen Quelle ausgetragen worden.)
 Maximum distance velocities and tracer recoveries (the uncertainty of tracer recovery is in the order of 15 % in the Schlichenden Brünnen and about 50 % in the other springs). (* Most of the tracer was discharged in the Neue Quelle.)

	Läng Boden Uranin	Läcki Sulfo-G	Brun- alpe Eosin	Chalber- weid Naphrio	Bierstock Höhle Duasyn	Wind- loch fl	Pragel T7	Schönen- büel Pm7a	Äbren- matt Vh5a	Ponor Pragelstr. Sulfo-G
Schlichenden Brünnen (SB 13)	8 % 220 m/h	32 % 218 m/h	-	< 8 % 110 m/h	-	-	1,3 % 113 m/h	-	-	8 % 40 m/h
Zwingsbrügg (Zwi 21)	< 1 % 207 m/h	-	-	Spuren 31 m/h	-	-	-	-	-	-
Steinweid Quelle (Ste 47)	1 % 214 m/h	-	-	Spuren 101 m/h	-	-	-	-	-	-
Mettlen-Quelle (Met 81)	8 % 302 m/h	-	-	3 % 125 m/h	-	-	-	-	-	-
Hinter Seeberg- Quelle (HiSe 24)	-	-	100 % 193 m/h	-	-	-	-	-	-	-
Schwyzer Schacht (SZS 86)	-	> 10 % 98 m/h	-	-	-	-	-	-	-	-
Blaubrunnen (BLM 157)	Spuren ? 109 m/h	-	-	-	70 % 106 m/h	26 % 209 m/h	Spuren 43 m/h	0,3 % 18 m/h	-	-
Total:	17 %	32 %	100 %	10 %	70 %	26 %	1,3 %	0,3 %	-	>> 8 %*

Die geringe Ausbeute des Uranins (ca. 17 %) und des Naphtionats (ca. 10 %) könnte auf verschiedenen Faktoren beruhen:

- 1) Der Abfluß bei diversen Quellen (Mettlen, Steinweid, Zwingsbrügg) wurde stark unterschätzt;
- 2) die Infiltration von karstbeeinflusstem Lockergesteinsgrundwasser in die Muota zwischen Mettlen und den Schlichenden Brünnen ist bedeutend;
- 3) die Markierstoffe sind effektiv in bedeutendem Ausmaß im Karstsystem zurückgehalten worden.

Die Muota führte in der Versuchsperiode etwa eineinhalb- bis zweimal mehr Wasser als die Schlichenden Brünnen (vgl. mit den Angaben in A. BÖGLI & T. HARUM, 1981). Die gemessenen Uraninkonzentrationen in diesen beiden Gewässern verhalten sich näherungsweise umgekehrt; daraus kann geschlossen werden, daß die Tracer- ausbeute der in die Muota mündenden Quellaustritte oberhalb der Schlichenden Brünnen größenordnungsmäßig korrekt erfaßt wurde. Eine Unterschätzung der Quellerträge oder der Infiltration in die Muota dürfte höchstens 15 % der fehlenden Menge ausmachen. Man muß deshalb annehmen, daß ein bedeutender Teil der Markierstoffe (Naphtionat und Uranin) durch Adsorption oder vielmehr durch eine große Dispersion (beim Traversieren des wenig verkarsteten Kieselkalks) im Karstsystem zurückgehalten oder stark verzögert worden ist.

Es ist noch anzufügen, daß ein älterer Markierversuch im nördlichen Teil des Karstsystems der Schlichenden Brünnen, wo der Kieselkalk fehlt, eine Farbausbeute von mehr als 60 % ergeben hat (Eosin, eingegeben im Oberen Roggenloch nahe dem Schwyzer Schacht, A. BÖGLI & T. HARUM, 1981).

3.4. Verwendung von Bakteriophagen im Karstmilieu

In der Folge von ersten Untersuchungen bezüglich der Verwendungsmöglichkeiten von Bakteriophagen in der hydrogeologischen Tracertechnik hat das Laboratoire de Microbiologie der Universität Neuchâtel in Zusammenarbeit mit dem dortigen Centre d'Hydrogéologie eine Reihe erfolgreicher Markierversuche im Karst des Jura gebirges durchgeführt. Das Multitracing von 1992 im Gebiet der Silberen war die erste Gelegenheit, diese neue Markiermethode im großen Maßstab anzuwenden (P. ROSSI et al., 1992).

Unter den in Frage kommenden biologischen Tracern sind die Bakteriophagen sicher jene, welche die größten Vorteile bieten. Ihr geringer Durchmesser ist in derselben Größenordnung (zwischen 45 und 230 nm) wie jener der Viren eukaryoter Organismen. Im Gegensatz zu ihren „Vettern“, den Viren, sind die Bakteriophagen aber nicht pathogen. Durch eine angepaßte Wahl kann man unerwünschte Folgen für die Mikroflora des Aquifers vermeiden. Ein zusätzlicher Vorteil ist die vollständige, konzentrationsunabhängige Unsichtbarkeit des Markierstoffs. Der letzte Trumpf der Bakteriophagen ist deren Charakteristik, nur über je ein einziges, artspezifisches Wirtsbakterium zu verfügen. Dank diesem biologischen Phänomen können gleichzeitig viele verschiedene Bakteriophagen eingesetzt werden, ohne daß die geringsten Interferenzprobleme bei der Analyse auftreten.

Gewisse Resultate des Großversuchs von 1992 sind ermutigend. Die Ausbeute der Phagen T7 (Pragel), f1 (Windloch) und Pm7a (Schönenbüel) ist bei einigen Quellen (Blaubrunnen und Schlichende Brünnen, Tab. 3) offensichtlich groß. Für die anderen Phagen und für andere Probestellen ist dies aber nicht der Fall. Die

Unsicherheiten in Bezug auf das Auftreten von f1 in den Quellen des Bisstaales (Schlichenden Brünnen u. a.), von Pm7a im Silberbrunnen und der totale Verlust von Vh5a liegt wohl im wesentlichen am Erfahrungsmangel und der noch nicht ganz gemeisterten Anwendungstechnik.

Im Laufe des Versuchs von 1992 sind hauptsächlich die folgenden drei Schwächen aufgetreten:

- Meßuntergrund: Ein solcher kann die Interpretation der Resultate stören und eine Berechnung der Ausbeute verunmöglichen. Der schwache Nachweis in gewissen Quellen läßt Zweifel aufkommen, ob nicht „autochthone“ Phagen einen Tracerdurchbruch vortäuschen. Dieses Problem betrifft im vorliegenden Fall die Phagen f1, Pm7a und T7. Die Phagen f1 und T7 kommen natürlicherweise im Wasser vor und sind ein Zeichen einer Kontamination durch Fäkalien.
- Verletzlichkeit der Bakteriophagen: Nach den Ergebnissen von Laborexperimenten ist Vh5a der fragilste der eingesetzten Phagen. Seine rasche Inaktivierung ist ohne Zweifel der Grund für sein Verschwinden. Die verwendeten Phagen sind zudem empfindlich auf Adsorption an den benetzten Grenzflächen des Gesteins oder an Suspension. Inaktivierung und Adsorption führten dazu, daß die Ausbeute der vier eingesetzten Phagen oft recht gering war (Tab. 4).
- Probenanalyse: Die 1992 angewendete Methodik war noch nicht ausgereift. Wir waren das erste Mal mit einer massiven Probenflut konfrontiert.

Die anlässlich des Versuchs von 1992 aufgetauchten methodischen Schwächen konnten in den zwei folgenden Jahren gelöst werden. Die Erfahrungen aus dem Großversuch dienten als Basis zur Weiterentwicklung der Methode im Labor und Feld, sodaß heute bei Tracertests in allen Milieutypen (Poren- und Kluftgrundwasser, Oberflächengewässer) vertrauenswürdige und reproduzierbare Resultate zu einem tragbaren Preis möglich sind. Die Vorteile dieser biologischen Markiertechnik sind nachstehend beschrieben:

- Die Phagen sind nicht pathogen, ungiftig und unsichtbar, sodaß keine Rücksicht auf Brauch- und Trinkwasser genommen werden muß.
- Jeder Phage attackiert in der Regel nur eine einzige Bakterienart und hat vermutlich keine nachhaltigen Auswirkungen auf die Flora des Aquifers.
- Im Grundwasserleiter ist keine Grundlast vorhanden, sofern der ausgewählte Phage dort natürlicherweise nicht vorkommt; die Lebensdauer der Phagen erlaubt bereits nach relativ kurzer Zeit deren erneuten Einsatz im selben Aquifer.
- Die Probenanalyse ist schnell, reproduzierbar und verhältnismäßig kostengünstig. Es genügen bereits 10 ml Wasser für eine Auszählung der Phagen. Bei Routineuntersuchungen ist mit einer Nachweisgrenze in der Größenordnung von 1 Phagen pro 2 ml zu rechnen. Man erhält dadurch eine mit den besten Fluoreszenzfarbstoffen vergleichbare oder gar höhere Empfindlichkeit; wenn nötig kann die Nachweisgrenze auf 1 Phagen pro 10 ml gesenkt werden.
- Die Analyse erlaubt die Unterscheidung und Auszählung von Mischungen verschiedener Phagen in derselben Probe, was quasi unbegrenzte Möglichkeiten für Multitracing-Versuche gestattet.
- 10 bis 20 l einer Phagenkultur sind für einen Markierversuch nötig. Ein solches Volumen ist selbst bei schwierig zugänglichen Eingabestellen einsetzbar. Diese Stoffmenge enthält 10^{12} – 10^{15} Phagen entsprechend rund 1 g Protein, der Einfluß auf das Ökosystem ist daher selbst bei geringen Abflüssen vernachlässigbar.

Die Resultatinterpretation der Phagentrift beim Versuch im Gebiet der Silberen ist teilweise nur mit Vorbehalten möglich und der Verbindungsnachweis ist in einigen Fällen zweifelhaft. Der Großversuch hat aber trotzdem in wesentlichem Maße dazu beigetragen, ein zusätzliches Instrument zum Studium der unterirdischen Wasserläufe weiterzuentwickeln.

4. Synthese und Folgerungen

4.1. Vergleich mit früheren Versuchen

Obschon das Einzugsgebiet der Schlichenden Brünnen seit Beginn des Jahrhunderts erforscht wird, ist dort nur eine kleinere Anzahl von Markierversuchen durchgeführt worden.

Eine erste Färbung fand 1904 im sogenannten Zürichsee statt, sie zeigte eine rasche Verbindung von diesem Punkt im Hölloch zu den Schlichenden Brünnen (45 Min. für 375 m Distanz, E. RAHIR, 1905).

1956 wurde durch Höhlenforscher der AGH 1 kg Uranin im Schluchtgang (östlichster Teil des Höllochs) eingegeben. Der Markierstoff wurde nach wenigen Stunden im Donnertal (nordöstlichster Teil der Höhle) gesehen, später in den Schlichenden Brünnen am Westende des Systems. In den folgenden Jahren wurden weitere Versuche zur Abklärung von Verbindungen innerhalb des Höllochs durchgeführt (A. BÖGLI, 1986, A. WILDBERGER, 1987).

Ein erster Multitracing-Test fand 1979 statt (A. BÖGLI & T. HARUM, 1981). Unter anderem wurde in der zwischen Hölloch und Schwyzer Schacht gelegenen Senke Ober Roggenloch ein Ponor mit Eosin beschickt. Wie ältere Markierungen dürfte der Farbstoff zuerst nach N bis zum phreatischen Kollektor randlich des Höllochs geflossen sein, um dann 89 Std. nach der Impfung in den Schlichenden Brünnen wieder ans Licht zu treten (maximale Abstandsgeschwindigkeit 64 m/h). Die Wasserbahnen der gesättigten Zone konnten bis anhin nie direkt beobachtet werden, aber praktisch alle aktiven Gänge führen in nördliche Richtung, um wenige Meter über dem Quellniveau unter Wasser zu tauchen. Diese Gänge bilden eine Art natürliche Piezometer. Bei Hochwasser steigt dort der Wasserspiegel bis um 180 m (A. BÖGLI, 1970, A. WILDBERGER & F. ZIEGLER, 1992).

Gleichzeitig mit dem Eosin wurden 1979 grüne und braune Bärlappsporen im Wasserdom (westliches Hölloch) eingespeist, welche rund 100 Std. später in den Schlichenden Brünnen nachgewiesen werden konnten (maximale Abstandsgeschwindigkeit ca. 15 m/h).

Die Sporen trifteten nachweislich zuerst nach N zur phreatischen Zone, dann nach W zur Hauptresurgenz. Allerdings floß ein Teil der Sporen nach S in die Gegend der Zwingsbrügg im Bisistal ab, wo eine temporäre Quelle einen Teil der Höllochwasser abzieht (maximale Abstandsgeschwindigkeit ca. 10 m/h, A. BÖGLI & T. HARUM, 1981).

Ein weiterer Markierversuch fand 1981 mit Eingabeort in der im Hochsystem des Höllochs gelegenen Bachhalle statt (A. BÖGLI, 1986). Dieser Test bewies einmal mehr ein bevorzugtes Abfließen in nördlicher Richtung bis zum Kollektor im gesättigten Bereich und von dort dann nach W zu den Schlichenden Brünnen. Dieser bei Niederwasser durchgeführte Versuch ergab maximale Abstandsgeschwindigkeiten in der ungesättigten Zone von 20–30 m/h.

Von den oben erwähnten Markierversuchen konnte keiner die Kenntnisse über die Ausdehnung des Einzugsgebietes der Schlichenden Brünnen und der zugehörigen Quellen über die auf Grund der geologischen Struktur und der Abflußmenge abgeschätzten Grenzen hinaus verbessern. Die Multitracing-Tests von 1992 und 1993 haben es ermöglicht, das Einzugsgebiet abzugrenzen (Fig. 7) und gewisse Besonderheiten seiner Funktionsweise zu erkennen.

Die älteren Untersuchungen zeigten die Größenordnung der Fließgeschwindigkeiten. Bei Niederwasser betragen die maximalen Abstandsgeschwindigkeiten sowohl in der gesättigten (Kollektor im phreatischen Bereich) als auch in der ungesättigten Zone (Bäche, Zubringer zum Kollektor) < 50 m/h. Bei Mittel- und Hochwasser überschreiten die Geschwindigkeiten häufig 50 m/h und erreichen in den Hauptabzugsbahnen 500 m/h. Die bei Mittelwasser mit einzelnen Hochwasserereignissen durchgeführten Versuche von 1992/93 bestätigen diese Angaben, denn die Mehrheit der berechneten, maximalen Abstandsgeschwindigkeiten betragen > 100 m/h, gewisse Werte überschreiten gar 300 m/h (Tab. 4). Die geringen Fließgeschwindigkeiten sind im allgemeinen mit kleinen Tracerausbeuten verbunden.

Drei Bemerkungen sollen obige Schlüsse etwas nuancieren:

- 1) Die in die phreatische Zone abtauchenden Gänge des Höllochs sind meist von großer Dimension und – mit Ausnahme von Hochwassersituationen – generell nur von kleinen oder gar keinen Gerinnen durchflossen (üblicherweise handelt es sich bei diesen Gewässern um Zubringer aus der ungesättigten Zone, nur bei steigendem Druckspiegel oder während Hochwässern kann Wasser vom phreatischen Kollektor aufsteigen). In diesen Gängen können unter Normalbedingungen extrem kleine Tracergeschwindigkeiten beobachtet werden (< 10 m/h).
- 2) Die Eingabebedingungen spielen eine sehr wichtige Rolle bei den Abstandsgeschwindigkeiten.
- 3) Es gibt kaum eine Beziehung zwischen mittlerem Gefälle der Fließverbindung und der dort auftretenden Wassergeschwindigkeit.

Diese drei Bemerkungen zeigen auf, daß im allgemeinen ein Tracer auf seinem Weg durch den Karstaquifer sehr unterschiedlich schnelle Abschnitte traversiert, die Geschwindigkeiten können von wenigen Metern pro Stunde bis zum Hundertfachen reichen. Die gemessenen Geschwindigkeiten sind also nur die Resultierende einer breiten Streuung von Werten der Abstandsgeschwindigkeit. Eine hohe Geschwindigkeit zeigt in der Regel eine offene, kaum behinderte Fließbahn an, kleine Geschwindigkeiten dagegen sind schwierig zu interpretieren.

A. BÖGLI (1970, S. 34) versuchte auf der Basis der Ergebnisse eines Markierversuchs das Volumen des Kollektors in der gesättigten Zone zu berechnen. Unter gewissen Voraussetzungen (keine Zubringer nach dem Farbeingabeort, piston flow, Färbung des gesamten Wasservolumens), setzte dieser Autor die zwischen dem Zeitpunkt der Eingabe und jenem des ersten Tracernachweises in den Schlichenden Brünnen bei der Resurgenz ausgeflossenen Wassermenge dem Kollektorinhalt gleich. Auf diese Weise erhielt er bei Niederwasser $200\,000\text{ m}^3$ und bei Hochwasser das Doppelte. Berechnet man auf dieselbe Weise mit den Werten vom Versuch mit Sulforhodamin G-extra das Kollektorvolumen, resultieren $400\,000\text{ m}^3$; dieser Test mit der deutlich weiter von den Schlichenden Brünnen entfernten Eingabestelle Läckli wurde bei Mittelwasser durchgeführt. Die Größenordnung ist offensichtlich dieselbe wie bei den Rechenresultaten von A. BÖGLI. Verwendet man die Werte aus dem Versuch mit den beim Prager eingeschleusten Phagen T7, erhält man $600\,000\text{ m}^3$. Bei

diesem Beispiel wurde der Markierstoffabfluß möglicherweise wegen der nicht optimalen Eingabebeziehungen in der ungesättigten Zone etwas verzögert, demzufolge ist die in die Rechnung eingehende Zeitspanne zwischen Einspeisung und Wiederaustritt deutlich länger als die reale Transferzeit in der gesättigten Zone und damit wird das berechnete Volumen zu groß.

4.2. Allgemeine Synthese

Die Hauptziele des Multitracings konnten fast vollständig erreicht werden. Das Einzugsgebiet der Schlichenden Brünnen und ihrer Nebenquellen ist nun recht gut abgegrenzt. Einzelne Punkte könnten noch präzisiert werden, wie beispielsweise der Umfang und das Verständnis der Diffuzionszone zwischen den Einzugsgebieten der Schlichenden Brünnen und dem Blaubrunnen oder der Grund des Verschwindens des Tracers von der Äbnenmatt oder die Klärung der Funktionsweise des Teileinzugsgebietes Chratzerengrat–Chalberweid oder die Beziehung der „Neuen Quelle“ zu den Schlichenden Brünnen usw.

Das Einzugsgebiet ist nun genügend bekannt, um in einem nächsten Schritt eine mehr quantitative hydrogeologische Studie (hydrologische Bilanz, Modellierung) in Angriff zu nehmen, für welche bereits mehrere Meßstationen (Druck-, Temperatur- und Leitfähigkeitsmessungen im Hölloch, in einer Bohrung und an den Schlichenden Brünnen, Limni- und Pluviographen sowie Totalisatoren) installiert worden sind.

Die Versuchsergebnisse von 1992 zeigen erneut, daß die heute aktiven Teile des Höllochs – entsprechend den geologischen Strukturen – nördlich der speleologisch erforschten und weitgehend inaktiven Höhlenpartien liegen. Morphologisch (oder paläohydrologisch) bildet die Bietstockhöhle (und eventuell auch das Windloch) wahrscheinlich ein Zuflußsystem des zum Bisistal hin entwässernden Höllochs, heute liegen diese östlichen Höhlen aber im Einzugsgebiet des Blaubrunnens im Klöntal.

Die hydraulischen Parameter, welche aus dem Mehrfachmarkierversuch abgeleitet werden konnten, sind schwierig zu interpretieren. Die berechneten Fließgeschwindigkeiten sind zu global, um präzise Angaben über Verhältnisse in den Wasserbahnen machen zu können, immerhin geben sie Hinweise zur Größenordnung verschiedener Phänomene. Die Berechnung der Dispersion oder der Gebrauch von Black-Box-Modellen mußte aufgegeben werden, da sich allzu viele Parameter während dem Versuch gleichzeitig änderten oder zu wenig bekannt waren (variabler Abfluß, mediokere Kenntnis der Infiltrationsbedingungen, zu summarisches Wissen über die Fließbedingungen der verschiedenen Stränge des Karstsystems usw.).

Die Probenahmen im Hölloch und im Schwyzer Schacht hätten erlauben sollen, die diversen Abflußbahnen zu separieren und deren Fließ- und Transportparameter zu ermitteln. Wir mußten aber konstatieren, daß die Probenahmen in den dem Kollektor benachbarten Gängen (Piezometerrohren) oder in dessen Zubringern keinerlei interpretierbare Resultate lieferten, die Markierstoffe trafen oft sogar später bei den untertägigen Probestellen ein als bei den Schlichenden Brünnen, der Hauptquelle des Karstsystems (d. h. es traten „negative Abstandsgeschwindigkeiten“ auf).

Die Verwendung von Bakteriophagen als Markiermittel ergab zufriedenstellende Resultate (drei der vier biologischen Tracer konnten an Quellen nachgewiesen werden), der Versuch hat aber auch Schwächen der voll in Evolution begriffenen Methode aufgezeigt (Probleme mit dem Meßuntergrund, mangelhafte Transport-

resistenz gewisser Phagen und die organisatorischen Schwierigkeiten bei großer Probenanzahl) und so die weitere Entwicklung der Methode gesteuert. Heute stellt die Bakteriophagentrift eine vertrauenswürdige und praktikable Methode dar.

Das Multitracing mit simultaner Eingabe von fünf Fluoreszenzmarkierstoffen hat die Grenzen der konventionellen Analyse mittels Spektrophotometrie aufgezeigt. Vorgängig des Versuchs brauchte es lange Überlegungen, um die möglichen Interferenzen der Tracer in Funktion der verschiedenen Einspeisungsstellen und den vermuteten Wiederaustritten zu minimieren. Zahlreiche Spektren waren zur Separierung oder Erkennung der Farbstoffe nötig und etwa 50 Proben mußten zur Bestätigung bzw. Verwerfung fraglicher Resultate zusätzlich mit HPLC analysiert werden.

Zusammenfassung

Der vorgestellte Versuch von 1992 hatte primär zum Ziel, das Einzugsgebiet der Schlichenden Brünnen genannten Karstquelle zu definieren. Diese Quelle repräsentiert den Hauptaustritt der im Hölloch (mit 168 km die längste Höhle Westeuropas) zirkulierenden Wässer. Im weiteren sollten Informationen über die hydraulischen Bedingungen und die Transporteigenschaften des Karstsystems gewonnen werden. Schließlich sollte die Anwendung von Bakteriophagen als Tracer deren Eignung als Markierstoff im Karstmilieu aufzeigen und mit den Ergebnissen des Einsatzes von Fluoreszenztracern verglichen werden. Fünf Fluoreszenzmarker (Uranin, Sulforhodamin G-extra, Eosin, Duasyn gelb T, Natrium-Naphtionat) und vier Bakteriophagen-Typen (T7, f1, Pm7a, Vh5a) wurden an neun verschiedenen, im Bereich der angenommenen Einzugsgebietsgrenze angeordneten Stellen, eingegeben.

Ein weiterer Tracerversuch wurde 1993 nahe der Schlichenden Brünnen durchgeführt. Rund 400 m von dieser Quelle entfernt wurden Sulforhodamin G-extra in einem Ponor und Uranin in einer Bohrung eingegeben. Dieser Test sollte die Interferenzen zwischen gut durchlässiger Zonen (Ponor) und den benachbarten, schlechter permeablen Blöcken (Bohrung) aufzeigen.

Die Versuchsergebnisse erlauben mit Ausnahme einzelner Areale eine recht gute Begrenzung des Einzugsgebietes der Schlichenden Brünnen und ihrer Nebenquellen (Fig. 7 und 8). Die bis anhin angenommenen Grenzen sind teilweise bestätigt worden, die Versuche haben aber insbesondere ein Teileinzugsgebiet in den Öhrlikalken im S des Haupteinzugsgebietes von Bödmeren und Silberen aufgezeigt. Bei Hochwasser speist dieses Teileinzugsgebiet neben der Hauptquelle, den Schlichenden Brünnen, eine Reihe von temporären Quellen (Mettlen-Quelle u. a.). Bei der Ostgrenze des Einzugsgebietes handelt es sich um eine Difffluenzzone im Bereich der orographischen Wasserscheide (Silberen); von dort können die versickernden Wässer sowohl nach W zu den Schlichenden Brünnen im Bisistal wie nach NE zum Blaubrunnen im Klöntal fließen.

Die Versuche bestätigen eine nordwärtige Verschiebung der heute aktiven Wasserbahnen in der gesättigten Zone gegenüber den durch die Höhlenforscher erkundeten, meist fossilen Gangnetzen. Paläohydrologisch handelt es sich bei der Bietstockhöhle und vielleicht auch beim Windloch um östliche Fortsetzungen des Höllochsystems, heute sind jene zwei Höhlen aber eindeutig dem Blaubrunnen tributär.

Die erhoffte Gewinnung von hydraulischen oder von Transportparametern erwies sich als problematisch, da die entsprechenden Resultate schwierig zu interpretieren sind. Die Abstandsgeschwindigkeiten sind zu global, um die Abflußbedingungen in den Wasserbahnen effektiv zu definieren, sie erlauben aber immerhin Größenordnungen zu erkennen. Die Ermittlung der Dispersion oder Anwendungsversuche von Modellen vom Typ „Black Box“ mußten aufgegeben werden, da während der Versuche zu viele Parameter simultan änderten (Abfluß, mediokere Kenntnis der Infiltrationsbedingungen, zu summarisches Wissen betreffend den Fließbedingungen in den verschiedenen unterirdischen Bahnen usw.).

Die Bakteriophagentrifer hat befriedigende Resultate ergeben (drei von vier Phagentypen konnten wieder nachgewiesen werden). Das Multitracing hat aber auch einige Schwächen der voll in Entwicklung stehenden Methode aufgezeigt (Probleme mit Meßuntergrund, mit Zerbrechlichkeit oder Adsorption gewisser Phagen oder Schwierigkeiten wegen der großen Menge zu analysierender Proben) und so deren Weiterentwicklung positiv beeinflusst. Heute kann eine vertrauenswürdige und praktische Methode angeboten werden.

Die Versuche haben aber auch Grenzen der konventionellen Analyse von Fluoreszenztracern mittels Spektrophotometrie beim gleichzeitigen Einsatz von fünf Farbstoffen gezeigt. Vor den Markierstoffeingaben mußten die möglichen Interferenzen zwischen den Tracern in Funktion der Impf- und der potentiellen Austrittsstellen eingehend überdacht werden. Zahlreiche Spektren waren zur Separierung und Erkennung der Fluoreszenzmarker nötig, zudem mußten etwa 50 Proben mit fraglichen Spektren zusätzlich mittels HPLC analysiert werden.

Literatur

- BÖGLI, A. (1970): Le Hölloch et son Karst/Das Hölloch und sein Karst. – Suppl. Stalactite, 4, 110 S., Neuchâtel (Baconnière).
- BÖGLI, A. (1986): Die Markierungsaktion im Winter 1981/82 im Hölloch. – Stalactite, 36 (1), 18–22.
- BÖGLI, A. & T. Harum (Schriftleitung, 1981): Hydrogeologische Untersuchungen im Karst des hinteren Muotatales (Schweiz). – Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 33, 125–264, Graz.
- BRICELJ, M. & M. SSKO (1992): Inactivation of phage tracers by exposure to liquid-air interfaces. – Tracer Hydrology, 71–75, Rotterdam (Balkema).
- HANTKE, R. (1961): Tektonik der helvetischen Kalkalpen zwischen Obwalden und dem St. Galler Rheintal. – Viertelsschr. Natf. Ges. Zürich, 106 (1), 1–212.
- HANTKE, R. (1982): Zur Talgeschichte des Gebietes zwischen Prigel- und Klausenpass. – Ber. Schwyzer Natf. Ges., 8, 3–12.
- LOISELEUR, B. (1978): Campagne de coloration dans les préalpes de Schwyz. – Stalactite, 28 (1), 13–21.
- LOISELEUR, B., J.-P. STORTI & G. BROCARD (1985): Recherches sur un karst haut-alpin: La Charetalp. – Stalactite, 35 (1), 3–19.
- OBERHOLZER, J. (1933): Geologie der Glarneralpen. – Beitr. Geol. Karte Schweiz, N.F., 28, 626 S., mit Atlasband.
- OBERHOLZER, J. (1942): Geologische Karte des Kantons Glarus 1 : 50 000. – Schweiz. Geol. Komm., Spezialkarte 117.
- RAHIR, É. (1905): Le Höll-Loch en Suisse. – Bull. Soc. belge géol., paléont. et hydrol., XIX, Mém., 318–364.
- ROSSI, P., I. MÜLLER, M. ARAGNO & M. GROB (1992): Utilisation des bactériophages en hydrologie: Influences de facteurs physiques sur la survie des virions dans les aquifères. Exemples de traçage en milieux poreux et karstiques. – Ann. scient. Univ. Besançon, Géol., Mém. h. s., 11, 199–206.

- WILDBERGER, A. (1986): Karstsysteme im Muotatal, vom Hölloch und dessen Nachbarn. – *Stalactite*, 36 (1), 12–17.
- WILDBERGER, A. (1987): Fließwege in der vadosen Zone eines alpinen Karstgebietes: Resultate von Wassermarkierungen im Hölloch (Zentralschweiz). – *Bull. Centre d'Hydrogéol. Neuchâtel*, 7, 123–137, Bern (Lang).
- WILDBERGER, A. & F. ZIEGLER (1992): Crue dans un karst alpin: Niveau d'eau dans les drains et débits aux exutoires – Exemples provenant de la grotte du Hölloch (Suisse centrale). – *Ann. scient. Univ. Besançon, Géol., Mém. h. s.*, 11, 255–261.

Summary

The tracing experiments in 1992 were primarily aimed at finding the limits of the drainage basin of the "Schlichenden Brünnen" karstic emergence and the springs associated with it. The spring marks the main emergence point for the water circulating in the Hölloch, with its 168 km in length, is the longest cave network in western Europe. Tracing also should give information on the hydraulic and transport conditions in the karst conduit network. Finally, the use of new tracers (bacteriophages) should allow an assessment of their usefulness in karstic media, and a comparison to be made with fluorescent tracers.

Another experiment was carried out in 1993 near to the Schlichenden Brünnen. The injection of Sulforhodamine G-extra into a sinkhole and of Uranine into a borehole, both at 400 m distance from the spring, was intended to compare the response of very permeable zones in the aquifer (karst network) with that of low permeability zones (slightly fractured rock).

In 1992, five fluorescent tracers (Uranine, Sulforhodamine G-extra, Eosin, Duasyne yellow T and Naphthionat) were injected along with four bacteriophages (T7, f1, Pm7a, Vh5a) in nine injection sites, spread out along the supposed perimeter of the drainage basin.

This experiment helped to define the drainage basin of the Schlichenden Brünnen and of the springs linked to it (Fig. 7). Nevertheless, some points could be better defined. The supposed drainage basin limits are in part confirmed, but the experiments also proved the existence of a sub-drainage basin, lying mostly in the limestones of Öhrli and Betlis to the S of the main Schlichenden Brünnen drainage basin (Bödmeren–Silberer area). During high water periods, the sub-basin flows, in part, through several ephemeral springs (Mettlen springs), and in the direction of the Hölloch and the Schlichenden Brünnen. The limit of the drainage basin nearly corresponds to the crest line of the Silberer, and is formed by a zone of flow divergence towards the Schlichenden Brünnen to the W and the Blaubrunnen to the E.

From the point of view of speleology and geomorphology, the experiments have shown the difference between the active conduit network of the present day and the networks explored by speleologists (mainly relic systems). Thus, from a morphologic point of view (or palaeohydrologic) the Bietstockhöhle and perhaps also the Windloch are the upstream parts of the Hölloch but are today found in the drainage basin of the Blaubrunnen.

Estimation of hydraulic or transport parameters from the multitracing technique is, in itself much more difficult. The flow speeds are too general to give a real idea of flow conditions in channels; nevertheless, they indicate the order of magnitude of the parameters. The dispersion measures and tests of the use of "black box" type models had to be abandoned because too many parameters vary simultaneously during experiments (variable discharge, poor knowledge of infiltration conditions, lack of knowledge of the flow conditions in the many underground sections, etc.).

The use of bacteriophages gave satisfactory results (three bacteriophages out of four were recovered), but this experiment highlighted above all, the weak points of a method still under development (background noise, vulnerability of some phages and the problems of analyzing large numbers of samples) which were improved over the following months so that today the method is a reliable and practical tracer in karstic media.

Finally, the tracing has clearly shown the limits of conventional methods of fluorescent tracer analysis by spectrophotometry when five fluorescent tracers have been injected simultaneously. Before injection, a great deal of consideration was given to the possible interferences between

tracers arriving from different injection points in the same springs. Many spectra were needed to separate or detect tracers, and about 50 samples have been analyzed by high pressure liquid chromatography (HPLC) in order to confirm the results.

Résumé

L'essai de traçage de 1992 visait en premier lieu à définir le bassin versant de la grande émergence karstique "Schlichenden Brünnen" et des émergences qui lui sont associées. Cet exutoire représente le point d'émergence principal des eaux circulant dans le Hölloch, le plus important réseau de grottes d'Europe occidentale, long de 168 km. En outre, ce traçage devait apporter des informations sur les conditions hydrauliques et le transport dans les réseaux de conduits karstiques. Enfin, l'utilisation de traceurs nouveaux (bactériophages) devait permettre d'évaluer leur efficacité dans les milieux karstiques et de les comparer aux traceurs fluorescents.

Un autre essai a été effectué en 1993 à proximité de la Schlichenden Brünnen. L'injection de Sulforhodamine G-extra dans une perte et d'Uranine dans un forage tous deux distants de 400 m environ de la source, avait pour but de comparer le comportement des zones très perméables de l'aquifère (réseau karstique) avec celui des zones peu perméables (roche peu fissurée).

En 1992, cinq traceurs fluorescents (Uranine, Sulforhodamine G-extra, Éosine, Duasynne jaune T et Naphtionate) ont été injectés ainsi que quatre bactériophages (T7, f1, Pm7a, Vh5a). Neuf points répartis sur le pourtour supposé du bassin versant ont ainsi été tracés.

Suite à cet essai, le bassin versant de la Schlichenden Brünnen et des exutoires qui lui sont associés est assez bien délimité (Fig. 7). Certains points pourraient toutefois encore être précisés. Les limites admises jusqu'ici sont partiellement confirmées, mais cet essai a mis en évidence un sous-bassin versant s'étendant principalement dans les calcaires de Öhrli et de Betlis au sud du bassin versant principal de la Schlichenden Brünnen (région de Bödmeren – Silberer). En période de crue ce sous-bassin s'écoule partiellement par plusieurs sources temporaires (sources de Mettlen), mais également en direction du Hölloch et de la Schlichenden Brünnen. La limite du bassin versant correspond presque à la ligne de crêtes de la Silberer, elle est formée par une zone où les écoulements affluent vers la Schlichenden Brünnen à l'ouest et la Blaubrunnen à l'est.

Du point de vue spéléologique et géomorphologique, cet essai permet de bien montrer le décalage entre les réseaux de conduits actifs aujourd'hui et les réseaux explorés par les spéléologues (principalement fossiles). Ainsi du point de vue morphologique (ou paléohydrologique) la Bietstockhöhle et peut-être aussi le Windloch sont les parties amont du Hölloch mais elles sont aujourd'hui situées dans le bassin versant de la Blaubrunnen.

L'estimation des paramètres hydrauliques ou du transport espérée par ce multitraçage est quant à elle nettement plus problématique. Les vitesses d'écoulement sont trop globales pour réellement permettre de définir les conditions d'écoulement dans les chenaux; elles donnent toutefois des ordres de grandeur. Les mesures de dispersion ou des tentatives d'utilisation de modèles de type "boîte noire" ont dû être abandonnées car trop de paramètres variaient simultanément pendant les essais (débit variable, médiocre connaissance des conditions d'infiltration, connaissances trop sommaires des conditions d'écoulements sur les divers tronçons souterrains, etc.).

L'utilisation des traceurs bactériophages a donné des résultats satisfaisants (trois bactériophages sur quatre sont ressortis), mais cet essai a surtout permis de situer les faiblesses de cette méthode en plein développement (problèmes de bruit de fond, fragilité de certains phages et problèmes d'analyses de grandes quantités d'échantillons) ce qui a guidé les développements de la méthode pendant les mois qui ont suivis et qui permet aujourd'hui d'offrir une méthode fiable et pratique.

Enfin, ce traçage a bien montré les limites des méthodes conventionnelles d'analyse de traceurs fluorescent par spectrophotométrie lorsqu'on injecte simultanément cinq traceurs fluorescents. Avant l'injection, il a fallu longuement réfléchir aux interférences possibles entre les traceurs en fonction des différents point d'injection et des sources qu'ils allaient probablement atteindre. De nombreux spectres ont été nécessaires pour séparer ou détecter les traceurs, et une cinquantaine d'échantillons ont été analysés par HPLC pour confirmation des résultats.

Dank

Ohne die freiwillige und unentgeltliche Mithilfe bei den Eingaben der Markierstoffe und bei den Probenahmen durch eine große Anzahl von Höhlenforschern, Berggängern und anderen Naturfreunden wäre der Großversuch nicht durchführbar gewesen. Im weiteren danken wir dem bei der Bereitstellung des Materials oder den Analysen behilflichen Personal des Centre d'Hydrogéologie. In der Hoffnung nicht allzuvielen vergessen zu haben, möchten wir namentlich G. BÄTTIG, D. BLANT, C. GERBER, A. MDAGRI ALLAOU, I. MÜLLER und F. ZWAHLEN erwähnen.

Als Ergänzung zu den Zuwendungen durch die Projektleitung COST konnten wir in verdankenswerter Weise auf finanzielle und materielle Beiträge folgender Institutionen zählen: Gemeinden Glarus und Muotathal, Arbeitsgemeinschaft Höllochforschung AGH, Schweizerische Gesellschaft für Hydrogeologie SGH, Nordostschweizerische Kraftwerke AG NOK, Geotechnisches Büro Dr. VON MOOS AG, Elektrizitätswerk des Bezirks Schwyz EBS, Kantonbank Schwyz, Kantonale Ämter für Umweltschutz Glarus und Schwyz, Schweizerischer Nationalfonds (Kredite Nr. 20-36418.92 und 20-40624.94).