

Tracerversuch im Bereich der Schratten- und Schwändilifluf (LU)

Essai de traçage dans la région Schrattenfluf - Schwändilifluf (LU)

Robert Ganauser

Traduction: Jean-Pierre Tripet

Einleitung

Die zwei Gebirgsstöcke Schratten- und Schwändilifluf befinden sich in der Kern- bzw. Pflegezone der UNESCO-Biosphäre Entlebuch.

Bereits ab Ende der 50er-Jahre waren unterschiedliche Wissenschaftler daran beteiligt, die Höhlensysteme und unterirdischen Wassernetzwerke in diesem Bereich zu erforschen und zu verstehen (Website UNESCO-Biosphäre Entlebuch).

In den vergangenen Jahrzehnten wurden Färbversuche vor allem südlich dieses Bereiches durchgeführt, die signifikanteste der Schrattenfluf dürfte die gut dokumentierte Färbung aus dem Jahre 1970 sein, organisiert von Franz Knuchel. Es wurde nachgewiesen, dass das Wasser aus dem südlichen bis mittleren Teil der Schrattenfluf das Emmental unterwandert und in den etwa 20 km entfernten Thunersee entwässert (Knuchel 1972).

Da aber am NO-Fuss der Schrattenfluf auch Quellen existieren, stellt sich die Frage, ob praktisch die gesamte Region nach SSW entwässert oder ob ein Teil in die Quellen nordöstlich fliesst. Nördlich der Schrattenfluf setzt sich die helvetische Randkette fort; aus dieser ganzen Region bis hin zum Vierwaldstättersee sind allerdings bisher überhaupt keine Färbversuche bekannt.

Mit der vorliegenden Wasserfärbung sollen eben genau diese Fragen beantwortet werden, um noch mehr Licht ins Dunkel der Gesteine der Schratten- und Schwändilifluf zu bringen.

Introduction

Les deux massifs montagneux de la Schrattenfluf et de la Schwändilifluf sont situés dans la zone centrale de la réserve de biosphère UNESCO d'Entlebuch. Déjà à la fin des années 1950, divers scientifiques ont participé à l'exploration et à l'étude des systèmes de cavités et des réseaux d'écoulement souterrain de cette région (site Internet UNESCO-Biosphère Entlebuch/Biosphère d'Entlebuch).

Dans les dernières décennies, des essais de coloration ont été réalisés principalement au sud de la région mentionnée. Concernant la Schrattenfluf, le plus significatif doit être l'essai bien documenté organisé par Franz Knuchel dans les années 1970. Cet essai a démontré que les écoulements souterrains de la partie sud et centrale de la Schrattenfluf passent sous la vallée de l'Emme pour trouver leur exutoire dans le lac de Thoune, à une distance d'environ 20 km (Knuchel 1972).

Comme il existe des sources également au pied nord-est de la Schrattenfluf, on peut cependant se poser la question si pratiquement tout le massif est drainé vers le sud-sud-ouest, ou si une partie des écoulements trouve son exutoire dans ces sources situées au nord-est. La Chaîne bordière helvétique se poursuit au nord de la Schrattenfluf; dans toute cette région et jusqu'au lac des Quatre-Cantons, aucun essai de coloration n'est toutefois connu.

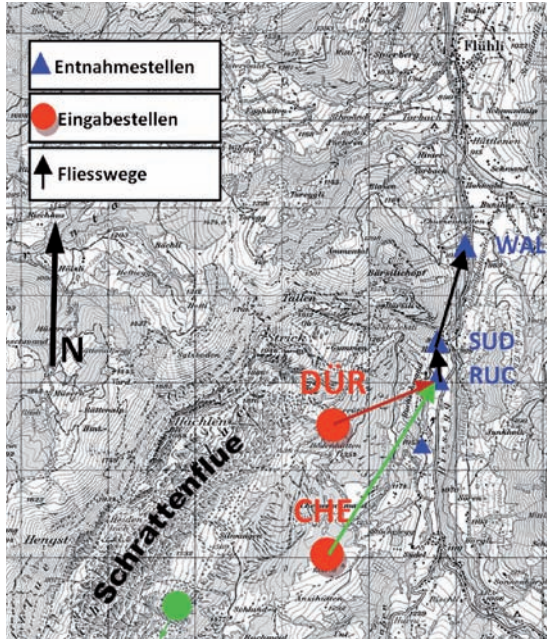
Le présent essai de coloration a précisément pour but de répondre à cette question, afin de mieux comprendre les conditions du sous-sol de la Schrattenfluf et de la Schwändilifluf.

Grün-gelbe Färbung des Gewässers bei Cheiserschwand direkt nach der Eingabe des Tracers Uranin.

Coloration vert-jaune du cours d'eau à Cheiserschwand immédiatement après l'injection de l'urarine.

Detaillierte Karte, die die Eingabe- und Entnahmestellen sowie nachgewiesenen Fliesswege durch Tracer in der Region Schratzenfluh zeigt. Der grüne Punkt ist die Eingabestelle von Knuchel (1970).

Région de la Schratzenfluh – Carte de situation des points d'injection et de prélèvement, avec directions d'écoulement observées. Le point vert représente le lieu d'injection de Knuchel (1970).



Was wird für eine erfolgreiche Wasserfärbung benötigt?

Für eine Wasserfärbung braucht man Ponore, Quellen und eine ausreichende Wasserführung. Um letztgenannte Bedingung für unsere Wasserfärbung zu gewährleisten, wurde der Tracerversuch zwischen Ende Mai und Anfang Juni anberaumt, um noch genügend Abfluss aus der Schneeschmelze zu erhalten.

Man entschloss sich, die Färbung am 23. Mai 2015 durchzuführen. Drei Tage vor Beginn der Färbung überquerte eine Kaltfront die Zentralschweiz, und die Tageshöchstwerte in Flüfli fielen von etwa 20 Grad auf 10 Grad über Null. Nachts fiel die Temperatur sogar auf knapp über den Gefrierpunkt, und Schnee fiel bis auf 1600 m ü.M. Diese Umstände erwiesen sich schliesslich als sehr günstig für die Färbung, da am Tag der Färbung an allen Einspeisestellen ausreichend Abfluss vorhanden war.

Einspeisepunkte

Doch bevor man mit der Färbung beginnen konnte, mussten erst gut geeignete Stellen für die Eingabe der Farbstoffe sowie Quellen für die Probenahme gefunden werden. Dadurch, dass nicht alle Bachläufe und Quellen in Karten eingezeichnet waren, erwiesen sich intensive Feldbegehungen als unumgänglich. Schliesslich hatte die Suche Früchte getragen, und man fand in Summe vier Einspeisepunkte, die zu diesem Zeitpunkt ideal für die Färbung waren. Es gab genug Abfluss, der zudem auch noch rasch in den Karstuntergrund eindrang.

Die Einspeisestelle „Hurbele“ befindet sich im nördlichen Bereich der Schwändilifluf auf 1676 m ü.M. etwa 100 Meter nordöstlich der Berghütte Hurbele. Der Abfluss betrug zum Zeitpunkt der Färbung etwa 5 l/s und verschwand in einer Doline mit einem Durchmesser von 1,5 Metern.

Die Einspeisestelle „Rüchi“ befindet sich am südlichen Ende der Schwändilifluf auf einer Seehöhe von 1470 Metern. In diesem Bereich fand man gleich drei Stellen, die geeignet waren, um dort den Farbstoff einzubringen. Die erste Stelle

Quelles sont les conditions du succès d'un essai de coloration ?

Pour satisfaire aux conditions nécessaires à la réalisation d'un essai de coloration (présence d'une perte, de sources et d'un débit d'eau suffisant), l'essai en question a été programmé pour fin mai à début juin; ceci permettait de profiter du débit lié à la fonte des neiges.

La date a été fixée au 23 mai 2015. Trois jours avant le début de l'essai, un front froid a traversé la Suisse centrale, et les maxima à Flüfli sont tombés de 20°C à 10°C. La nuit, la température a presque atteint le zéro degré, et il a neigé jusqu'à 1600 m. Ces conditions se sont finalement avérées très favorables pour le traçage, car au jour de l'essai, suffisamment de débit s'infiltrait dans tous les points d'injection.

Points d'injection

Avant de réaliser l'essai cependant, des points d'injection appropriés et des sources pour l'observation de la réapparition du colorant devaient être trouvés. Comme tous ces points ne figurent pas sur la carte, des reconnaissances de terrain approfondies ont été indispensables. Celles-ci ont été finalement couronnées de succès, et quatre points d'injection, adéquats compte tenu des conditions du moment, ont été trouvés. L'eau s'infiltrait en quantité suffisante et de manière rapide vers la profondeur.

Le point d'injection de *Hurbele* est situé dans la partie nord de la Schwändilifluf, à une altitude de 1676 m, environ 100 m au nord-est de la cabane de Hurbele. Au moment de la coloration, le débit se montait à environ 5 l/s et l'eau s'infiltrait dans une doline d'un diamètre de 1,5 m.

Le point d'injection de *Rüchi* est situé à l'extrémité sud de la Schwändilifluf, à une altitude de 1470 m. Dans cette zone, trois sites étaient adéquats pour une injection de colorant. Le premier était un ruisseau, qui s'écoulait d'ouest en est avec un débit de 10-15 l/s. L'eau disparaissait cependant de manière diffuse dans le lit du cours d'eau sur une distance d'environ 30 m. Dans les environs immédiats se trouvaient deux petits ruisseaux, chacun d'un débit d'environ 0,5 l/s, et qui s'infiltraient dans deux émospues bien développés.

Sur la Schratzenfluf ont été définis les deux autres points d'injection, ceux de *Dürrütli* et de *Cheiserschwand*. Dürrütli est situé à une altitude de 1395 m dans la partie nord-est du massif, le débit d'écoulement se montait à 2 l/s environ.

Le quatrième point d'injection, à *Cheiserschwand*, est situé à 1270 m d'altitude dans le tiers nord de la Schratzenfluf, le débit se montait à environ 8 l/s.

Points de prélèvement aux exutoires

Afin d'éviter que les traceurs n'échappent aux observations, onze points de prélèvement aux exutoires potentiels ont été définis grâce à des recherches de terrain préalables; dès le moment de l'injection de colorant, ces points ont fait l'objet de prélèvements périodiques. Quelques jours avant la coloration, un échantillon de contrôle a été prélevé à chaque point d'injection et d'exutoire. Ces échantillons servent de référence pour les analyses après l'injection du traceur.

war ein Bächlein, das von Westen nach Osten floss und einen Abfluss von 10-15 l/s aufwies. Auf einer Länge von etwa 30 Metern verlor sich jedoch das Wasser diffus im Bachbett. In unmittelbarer Nähe befanden sich zwei Rinnsale, die je einen Abfluss von circa 0,5 l/s hatten und in schön ausgeprägten Schlucklöchern verschwanden.

In der Schrattenfluh fand man die verbleibenden zwei Einspeisestellen „Dürrütli“ und „Cheiserschwand“. Dürrütli liegt auf einer Höhe von 1395 m ü.M. im nordöstlichen Bereich der Schrattenfluh und wies einen Abfluss von etwa 2 l/s auf.

Der vierte und letzte Einspeisepunkt „Cheiserschwand“ befindet sich ebenfalls in der Schrattenfluh, und zwar auf 1270 m ü.M. im nördlichen Drittel der Schrattenfluh, mit einem Abfluss von circa 8 l/s.

Entnahmestellen

Damit die Markierstoffe nicht sprichwörtlich den Bach runtergehen, wurden durch vorangegangene Feldbegehungen elf Entnahmestellen definiert, an denen ab dem Zeitpunkt der Einfärbung regelmässig Proben entnommen wurden. Ein paar Tage vor der Wasserfärbung wurden sogenannte Nullproben an allen Einspeise- und Entnahmestellen entnommen. Diese Proben dienen als Referenz zu den Wasserproben nach der Tracereingabe.

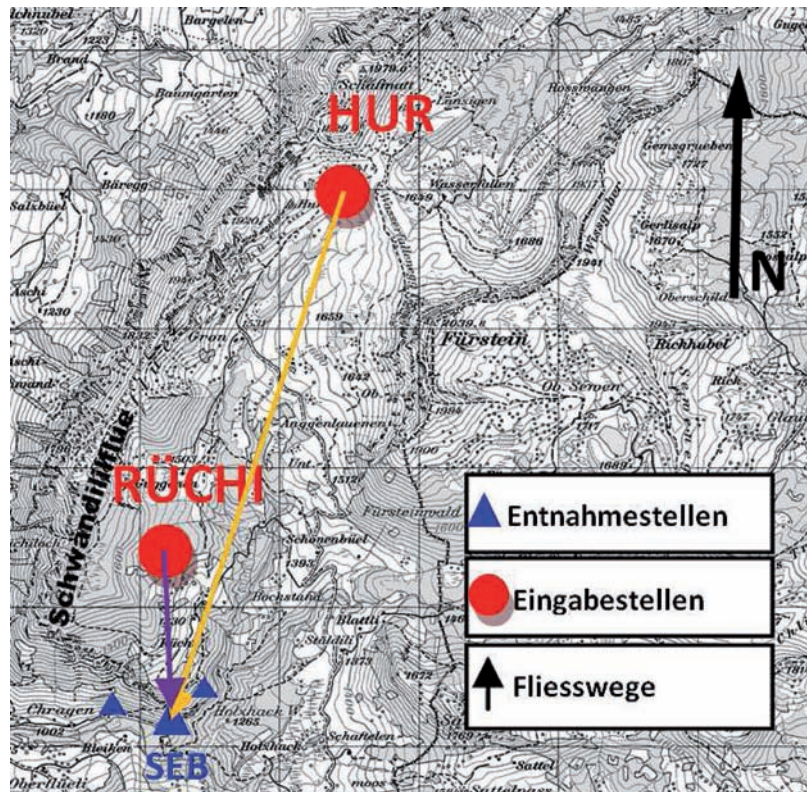
Mit einem Team aus motivierten Freiwilligen gelang es die ersten 60 Stunden, Proben an den Quellen und Flüssen in 12-Stunden-Schichten und einem Intervall von 0,5-2 Stunden zu entnehmen. Mit fortschreitendem zeitlichem Abstand von der Farbstoffeingabe wurden auch die Intervalle an allen Entnahmestellen vergrössert. Da die Farbstoffe über Monate und sogar Jahre im System nachweisbar bleiben können, wurden Proben bis in den September entnommen, damit kein Farbstoff verloren geht.

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Färbung 1970 wurden die zwei bekannten Quellen, Harderquelle (HAR) und Gelber Brunnen (GLB) am Thunersee beprobt.

Im nordöstlichen Bereich der Schrattenfluh wurden zwei Quellen bei den Feldbegehungen entdeckt. Diese erwiesen sich als temporäre Quellen und münden in den Südelbach, der die Oberflächenabflüsse aus dem Südelgraben ableitet. Die Quellen bekamen die Bezeichnung Ruchschwand (RUC) und Ahornli (AHO). Die Quelle RUC tritt entlang einer vermuteten Störzone aus. Je nach Wetterlage tritt entweder Wasser diffus aus dem Bachbett aus oder es werden zusätzlich zwei Quellen am orographisch linken und rechten Ufer aktiviert. Ähnlich verhält sich die Quelle AHO. Sie tritt bei Niederschlag am orographisch rechten Ufer zu Tage, versiegt jedoch nach niederschlagsarmen Perioden.

Um ein unkontrolliertes Entweichen des Farbstoffes aus der Schrattenfluh zu verhindern, wurden die aus dem Gebirge fliessenden Flüsse Südelbach (SUD) und Waldemme (WAL) ebenfalls beprobt.

Um den Bereich der Schwändiliflüh befinden sich fünf weitere Entnahmestellen. Auch diese wurden durch Probenahme in regelmässigen Intervallen überwacht. Zwei davon befinden sich in der Nähe des Chessilochs. Dies waren der Seebenbach (SEB) vor der Mündung in den Rotbach und etwa 400 Meter flussabwärts ein intermittierendes Bächlein (CHR), das auf der orographisch rechten Seite in den Seebenbach mündet.



Grâce à une équipe de volontaires motivés, il a été possible, pendant les 60 premières heures, par des périodes de travail de 12 heures, de prélever des échantillons aux points d'observation (sources et cours d'eau) selon un intervalle de 0,5-2 heures. La cadence des prélèvements à chaque point d'observation a ensuite été réduite. Comme les colorants peuvent persister dans le système et rester mesurables pendant des mois, le prélèvement des échantillons s'est poursuivi jusqu'en septembre.

Sur la base des expériences faites lors de la coloration de 1970, les deux sources bien connues en bordure du lac de Thoune, la source du Harder (« Harderquelle », HAR) et la source de Gelber Brunnen (GLB) ont fait l'objet de prélèvements.

Dans la partie nord-est de la Schrattenfluh, deux sources ont été découvertes lors des recherches de terrain. Il s'agit de sources temporaires qui se déversent dans le Südelbach, qui draine les eaux de surface du Südelgraben. Ces sources ont été dénommées Ruchschwand (RUC) et Ahornli (AHO). La source RUC jaillit le long d'un accident structural supposé. Selon la situation météorologique, l'eau sourd de manière diffuse dans le lit du cours d'eau, ou alors deux déversoirs apparaissent sur chacune des deux rives. La source AHO se comporte de manière semblable. Elle jaillit sur la rive droite du cours d'eau en période de précipitations et tarit en période sèche.

Pour éviter que le traceur injecté dans la région de la Schrattenfluh n'échappe aux observations, le Südelbach (SUD) et la Waldemme (WAL), deux cours d'eau drainant ce massif, ont également fait l'objet de prélèvements.

Autour de la région de la Schwändiliflüh, cinq autres points de prélèvement ont été fixés. Là aussi, des échantillons ont été pris à intervalles réguliers. Deux d'entre eux sont situés aux environs du Chessiloch. Il s'agit du Seebenbach (SEB) en amont de son confluent avec le

Detaillierte Karte, die die Eingabe- und Entnahmestellen sowie nachgewiesenen Fliessewege durch Tracer in der Region Schwändiliflüh zeigt.

Région de la Schwändiliflüh – Carte de situation des points d'injection et de prélèvement, avec directions d'écoulement observées.



Einbringen des Tracers Tinopal CBS-X in der Hurbele auf 1676 m ü.M.

Injection du tinopal CBS-X à Hurbele, à 1676 m d'altitude

Die restlichen drei Quellen liegen nord- bis südöstlich des Schimbrigs. Der südlichste Entnahmeort in dieser Region war die perennierende Quelle Wanegg (WAN), die in die grosse Entle (GRE) mündet. Letztgenannte wurde ebenfalls beprobt. Die letzte regelmässig beprobte Entnahmestelle war der Eibach (EIB) kurz vor der Mündung in die grosse Entle. Ein grosser Teil des Eibachs wird von einer Karstquelle gespeist, die für die Stadt Luzern gefasst ist.

Verwendete Tracer

Um die unterschiedlichen unterirdischen Wege des Wassers nachvollziehen zu können, war es notwendig, für jede Einspeisestelle einen eigenen fluoreszierenden Farbstoff zu verwenden. So kamen vier unterschiedliche Tracer zum Einsatz: Tinopal CBS-X, Natrium-Naphthionat, Eosin und Uranin. Die eingesetzten Farbstoffe sind ungiftig und somit unbedenklich für Mensch, Tier und Pflanzen (Biozönose).

Natrium-Naphthionat (50 kg) wurde dem Abfluss an der Einspeisestelle „Rüchi“ am 23. Mai von 10:30 bis 11:30, und Tinopal CBS-X (20 kg) in das Schluckloch „Hurbele“ von 12:00 bis 12:30 Uhr beigemischt.

Die Tracer Uranin (15 kg) und Eosin (15 kg) kamen in der Schrattenfluh zum Einsatz. Erstgenannter wurde von 13:30 bis 14:00 in der Einspeisestelle „Cheiserschwand“ eingesetzt, und Eosin von 14:30 bis 15:00 Uhr bei „Dürrütli“.

Wetterlage während und nach der Eingabe

Als es am Samstag, den 23. Mai um 10:30 endlich hiess: „Die Farbe läuft“, fand man folgende Wetterbedingungen vor: leicht bewölkt, niederschlagsfrei und eine Tageshöchsttemperatur von etwa 11°C in der Gemeinde Flühli. Durch den drei Tage zuvor gefallenen Schnee bis auf 1600 m ü.M. (vgl. Foto oben) floss jedoch aufgrund von Temperaturen über dem Gefrierpunkt reichlich Schmelzwasser. Die Wetterverhältnisse am darauffolgenden Sonntag waren quasi identisch wie am Tag zuvor. Lediglich die Temperatur stieg um 2 Grad.

Montag, der 25. Mai zeigte bereits vermehrt starke Bewölkung, jedoch blieb es noch bis etwa 18 Uhr trocken. In der Nacht auf Dienstag setzte Dauerregen ein, und es fiel bis kurz vor sechs Uhr früh 21,1 mm Regen. Tagsüber gab es dann zum Teil sonnige Auflockerungen, die sich mit lokal recht starken Niederschlägen abwechselten. So sind am Dienstag in Summe über der Gemeinde Flühli nochmals 10,5 mm Regen niedergegangen. In den darauffolgenden Tagen dominierte trockenes Wetter mit Tageshöchsttemperaturen von bis zu 20°C (Wetterdaten von Office fédéral de météorologie et de climatologie, MétéoSuisse).

Ergebnisse

Insgesamt wurden knapp 750 Doppelproben an den Entnahmestellen genommen und ausgewertet. Martin H. Otz und das Labor von Nano Trace Technologies™ in Orpund haben die Auswertung der Proben überhaupt erst ermöglicht und dementsprechend auch tatkräftig mitgeholfen, diese auszuwerten.

Rotbach et, environ 400 m en aval, un petit ruisseau intermittent (CHR), qui se jette dans le Seebenbach en rive droite.

Les trois autres sources sont situées entre le nord-est et le sud-est du Schimbrig. Le point de prélèvement le plus au sud était la source pérenne de Wanegg (WAN), qui se jette dans la Grande Entle (GRE). Celle-ci a également été échantillonnée. Le dernier point de prélèvement régulier était l'Eibach (EIB), peu en amont de son confluent avec la Grande Entle. Une partie importante du débit de l'Eibach est alimenté par une source karstique captée pour la ville de Lucerne.

Traceurs utilisés

Afin d'analyser les différentes trajectoires de l'eau souterraine, il a été nécessaire d'utiliser un colorant fluorescent spécifique pour chaque point d'injection. Quatre traceurs ont été utilisés: le tinopal CBS-X, le naphthionate de sodium, l'éosine et l'uranine. Ces substances sont non toxiques et non nuisibles pour l'homme, les animaux et les plantes (biocénose).

Le naphthionate de sodium (50 kg) a été dilué dans l'eau du point d'injection de Rüchi le 23 mai de 10:30 à 11:30, et le tinopal CBS-X (20 kg) dans la doline de Hurbele de 12:00 à 12:30.

L'uranine (15 kg) et l'éosine (15 kg) ont été utilisées dans la région de la Schrattenfluh. La première a été injectée à Cheiserschwand de 13:30 à 14:00, et l'éosine à Dürrütli de 14:30 à 15:00.

Situation météorologique pendant et après l'injection

Le samedi 23 mai à 10:30, lorsque les colorants ont enfin pu être injectés, les conditions météorologiques étaient les suivantes: légèrement nuageux, pas de précipitations et une température journalière maximum d'environ 11°C dans la commune de Flühli. En raison de la neige tombée trois jours auparavant jusqu'à 1600 m (voir photo ci-dessus) et de températures positives, il s'écoulait cependant suffisamment d'eau de fonte. Les conditions météorologiques du dimanche furent quasi identiques à celles du jour précédent, la température augmenta toutefois de deux degrés.

Le lundi 25 mai le ciel était plus nuageux, le temps resta cependant sec jusqu'aux environs de 18h. Dans la nuit du lundi au mardi eurent lieu des chutes de pluie continues, qui produisirent une lame d'eau de 21,1 mm jusque peu avant six heures. Ensuite, pendant la journée, des éclaircies alternèrent avec des précipitations localement fortes. La somme des chutes de pluie du mardi, dans la commune de Flühli, se monta à 10,5 mm. Dans les jours suivants, le temps fut généralement sec avec des températures maximales journalières jusqu'à 20°C (données météorologiques de l'Office fédéral de météorologie et de climatologie, MétéoSuisse).

Résultats

Au total, près de 750 échantillons doubles ont été prélevés aux points d'observation et ont fait l'objet d'une analyse. Martin H. Otz et le laboratoire Nano Trace Tech-

Der Markierversuch bestätigte mehrere direkte hydraulische Verbindungen der Eingabestellen zu den Entnahmestellen SEB, RUC, SUD und WAL.

Das in der Schwändilifluf (Rüchi) eingespeiste Natrium-Naphtionat wurde bereits nach zwölf Stunden ab Einspeisung an der Entnahmestelle im Seebenbach nachgewiesen. Ebenso erfolgte der Nachweis an dieser Entnahmestelle von Tinopal CBS-X, welches bei der Hurbele im nordöstlichen Bereich der Schwändilifluf eingebracht wurde. Dieser Tracer konnte zum ersten Mal nach 40 Stunden nachgewiesen werden.

Es ergibt sich somit eine Fließgeschwindigkeit von der Eingabestelle Hurbele bis zur Entnahmestelle Seebenbach von 102 m/h. Eine ziemlich ähnliche Fließgeschwindigkeit von 99 m/h erreichte das Wasser entlang unterirdischer Wege von Rüchi bis Seebenbach.

Man kann also davon ausgehen, dass der gesamte südliche Bereich der Schwändilifluf (mindestens bis zur Hurbele) nach Süden in den Seebenbach entwässert.

Die Tatsache, dass in den beprobten Quellen im Norden (Wanegg, Eibach, Grosse Entle) kein Farbstoff gefunden wurde, deutet darauf hin, dass deren Einzugsgebiet erst nördlich der Hurbele beginnt. Aufgrund der Ausdehnung des Karstes und der Quellschüttung gehen wir zurzeit davon aus, dass sich das Einzugsgebiet der Wanegg-Quelle mehr oder weniger ab der Hurbele gegen Norden befindet, während sich dasjenige des Eibachs von der Quelle aus gegen den Pilatus hin erstreckt. Die letztere Vermutung scheint auch aufgrund der tektonischen Lage der Quelle 300 m über dem Talgrund der Entle wahrscheinlich.

Aufgrund des Farbstoffnachweises in den Entnahmestellen RUC, SUD und WAL konnte die Vermutung bestätigt werden, dass der nordöstliche Teil der Schratzenfluf tatsächlich zur Nordostflanke hin in Richtung Südelbach entwässert.

Die Farbstoffe Eosin, eingebracht bei Dürrütli, und Uranin, eingespeist bei Cheiserschwand, sind etwa zeitgleich nach circa 67 Stunden (26.5. um 04:00) in der temporären Quelle bei Ruchschwand nachgewiesen worden. Bei der regelmässigen Entnahme der Proben bei Ruchschwand wurde deutlich, dass sich in diesem Bereich eine Störzone befinden muss. Bei hoher Wasserführung wird zusätzlich zur Ruchschwand eine zweite an der orographisch rechten Seite gelegene Quelle aktiviert.

Sobald die Wasserführung jedoch soweit abfällt, dass das Bachbett oberhalb der Ruchschwandquelle trocken fällt, wird erst sichtbar, dass etwa zehn Meter flussabwärts der Quelle Wasser diffus aus dem Bachbett und auf der orographisch linken Seite aus der Böschung quillt.

Da der Südelbach bei der Hirseggbücke in die Waldemme mündet, ist naturgemäss auch dort der Tracernachweis von Eosin und Uranin gelungen. In der Waldemme wurde der Tracer jedoch bereits fünfeinhalb Stunden vorher nachgewiesen (25.5. um 23:30). Dies lässt sich dadurch erklären, dass es ab Montag abend anhaltenden und starken Niederschlag gab. Dies führte dazu, dass sich der bis dato recht ruhige Südelbach (~150 l/s) rasch zu einem reissenden Fluss (~400 l/s) entwickelte. Auch die Schüttung der Ruchschwandquelle nahm so stark zu, dass eine sichere Probenahme an beiden Entnahmestellen bis in die Morgenstunden nicht mehr möglich war. Entlang der Waldemme gab es jedoch einige Stellen, die eine sichere

Tabelle 1: Details zu den Eingabestellen.

Tableau 1: Détails concernant les points d'injection.

Kürzel Abréviation	Name Nom	Koordinaten Situation		m ü.M. m s. m.	Tracer / kg Traceur / kg
HUR	Hurbele	647350	195050	1676	Tinopal CBS-X / 20
RÜCHI	Rüchi	646325	192250	1470	Na-Naphtionat / 50
DUER	Dürrütli	642620	188525	1395	Eosin / 15
CHE	Cheiserschwand	642470	187250	1270	Uranin / 15

Tabelle 2: Details zu den Probenahmestellen, in denen Tracer nachgewiesen wurden

Tableau 2: Détails concernant les points de réapparition des traceurs.

Kürzel Abréviation	Name Nom	Koordinaten Situation		m ü.M. m s. m.
SEB	Seebenbach	646200	191110	1035
RUC	Ruchschwand	643800	189075	990
SUD	Südelbach	643885	189475	950
WAL	Waldemme	644125	190650	935

nologies™ à Orpund, grâce auxquels l'analyse des échantillons a été possible, ont participé activement à ces travaux.

L'essai de traçage réalisé le 23 mai a confirmé une relation hydraulique directe entre les points d'injection et les endroits de réapparition de traceur SEB, RUC, SUD et WAL.

Le Naphtionate de sodium injecté à Rüchi sur la Schwändilifluf a été détecté après un temps de parcours de douze heures au point d'observation du Seebenbach. A ce même point d'observation est également réapparu de Tinopal CBS-X, injecté à Hurbele dans la partie nord-est de la Schwändilifluf. La première réapparition de ce traceur a été observée après 40 h.

Il résulte de ces observations une vitesse d'écoulement de 102 m/h de Hurbele au Seebenbach. De Rüchi au Seebenbach, la vitesse se monte à 99 m/h. Dans les deux cas, la vitesse est donc semblable.

On peut donc conclure de ces observations que l'ensemble de la Schwändilifluf au sud de Hurbele est drainé vers le sud par le Seebenbach.

Le fait qu'aucun traceur n'ait été détecté dans les sources du nord (Wanegg, Eibach, Grosse Entle) nous montre que leur bassin versant se trouve au nord de Hurbele. En tenant compte de l'étendue du karst et du débit des sources, nous pensons que le bassin versant de la source de Wanegg commence peu au nord de Hurbele, tandis que celui de l'Eibach s'étend de la source vers le Pilate. Cette dernière idée nous semble probable compte tenu de la situation tectonique de la source, 300 m au-dessus du lit de l'Entle.

Compte tenu de la réapparition du colorant aux points d'observation RUC, SUD et WAL, il se confirme que la partie nord-est de la Schratzenfluf est drainée en direction du Südelbach, au pied du versant nord-est du massif.

L'éosine, injectée à Dürrütli, et l'urantine, injectée à Cheiserschwand, ont été observées à peu près simultanément, après 67 h (le 26 mai à 4 :00) à la source temporaire près de Ruchschwand. Grâce aux prélèvements périodiques près de Ruchschwand, il est possible d'affirmer que ce



Rötlich gefärbter Abfluss bei Dürrütli, kurz bevor das Wasser in einer Doline verschwindet.

Coloration rougeâtre de l'eau à Dürrütli, peu avant que l'eau ne disparaisse dans une doline.

Probennahme auch in den Nachtstunden ermöglichen. Hier wurde somit der Tracer früher detektiert, weil über die Nacht hindurch Proben genommen worden sind, im Gegenteil zu den Entnahmestellen RUC und SUD.

Somit kann man davon ausgehen, dass die Tracer Eosin und Uranin schon in den Nachtstunden die Ruchschwandquelle erreicht haben und nicht erst um vier Uhr früh.

Aus dem Markierversuch im Jahre 1970 ging hervor, dass der Tracer nach 38 Stunden im Bätterich und Gelben Brunnen auftrat. Die ergibt eine Fliessgeschwindigkeit von etwa 544 m/h (Knuchel 1972). In unserem Tracerversuch bahnte sich das Wasser seinen Weg von der Eingabestelle Dürrütli bis Ruchschwand nur mit einer Fliessgeschwindigkeit von etwa 21 m/h. Eine Fliessgeschwindigkeit von circa 38 m/h erreichte das Wasser von der Einspeisestelle Cheiserschwand bis zur Quelle Ruchschwand. Diese eher langsamen Tempi sprechen gegen ein schnelles Fliesen in Höhlen.

Ein Grund für diese langsamen Fliesszeiten könnte sein, dass das Wasser Geröll passieren muss oder anderweitig im System zurückgehalten, gespeichert und nur langsam wieder freigegeben wird, bis es zu verstärktem Niederschlag oder Schneeschmelze kommt. Erst diese zusätzliche Menge an Wasser aktiviert das Wasser und befördert es in Richtung Quelle. Diese Interpretation wird gestützt durch die Beobachtungen der Bauern, wonach bei grossen Hochwässern Quellen bis über 100 Höhenmeter oberhalb des tiefsten Austritts aktiv werden: Der Karst scheint also nicht sehr durchlässig zu sein. Die Tracer Eosin und Uranin sind erst nach etwa 62 Stunden detektiert worden. Vom Zeitpunkt der Eingabe bis zum ersten Fund des Tracers herrschten trockene Bedingungen und somit wenig Abfluss. Auf der Schrattenfluh waren im Vergleich zur Schwändilifluf kaum mehr Schneefelder vorhanden, die für erhöhten Abfluss hätten sorgen können. Ab der 60. Stunde nach Eingabe begann es zu regnen, wodurch dann wenig später die Tracer aktiviert wurden.

Durch diese Erkenntnis lässt sich das Einzugsgebiet der Schrattenfluh in mindestens zwei Bereiche aufteilen. Der eine Teil entwässert nach NO und der andere bereits bekannte südliche bis mittlere Bereich der Schrattenfluh in Richtung Thunersee.

Diese Tatsache wurde im letzten Stalactite, ausgehend vom Studium der tektonischen Verhältnisse (Malard et al. 2015), unabhängig vom Verlauf des Färbversuches bestätigt. Die Annahmen von Knuchel (1972), der aufgrund seiner Färbung davon ausging, dass der grösste Teil der Schrattenfluh in den Bätterich entwässern sollte, sind dementsprechend widerlegt. Die Resultate des Versuchs erlauben es, noch eine Vielzahl weiterer Hypothesen auszuformulieren, die Diplomarbeit ist

der letzte Site muss sich im Umkreis einer strukturellen Diskontinuität befinden. In Situation von hohem Wasserstand, an dem Punkt der Beobachtung von Ruchschwand, eine zweite Quelle tritt an der rechten Uferseite auf. Im Gegensatz dazu, sobald der Abfluss ausreichend gering ist, um das Bett des Gewässers oberhalb der Quelle von Ruchschwand austrocknen zu lassen, beobachtet man in einem Abstand von etwa zehn Metern unterhalb der Quelle, eine diffuse Wasserbildung im Gewässerbett und auf dem linken Uferhang.

Wie im Südelbach, der in die Waldemme bei Hirsegg mündet, ist die Anwesenheit von Eosin und Uranin natürlich an diesem Ort ebenfalls beobachtet worden. In der Waldemme, wurde der Tracer jedoch schon vor fünf Stunden und etwas früher (am 25. Mai um 23:30). Dies lässt sich durch die Tatsache erklären, dass am Montagabend, nach starken Regenschauern, der Südelbach, mit einem Abfluss von bis zu 150 l/s, plötzlich einen starken Anstieg auf 400 l/s erlebte. Auf der anderen Seite, sank der Abfluss der Quelle von Ruchschwand auf ein solches Niveau, dass die Entnahme von Proben zu zwei Zeitpunkten bis zum Ende der Nacht nicht möglich war. Im Verlauf der Waldemme, wurde eine Probenentnahme zu einem Zeitpunkt, der als möglich in mehreren Stellen auch nachts. Auf diese Weise, an diesem Ort, wurde der Tracer früher entdeckt, als in den Probenentnahmestellen RUC und SUD.

Dies lässt vermuten, dass Eosin und Uranin die Quelle von Ruchschwand während der Nacht erreicht haben und nicht erst am Morgen um vier Uhr.

Der Versuch der Tracierung von 1970 hat es ermöglicht, die Wiederentdeckung des Tracers bei Bätterich und an der Quelle des Gelben Brunnen nach 38 Stunden zu beobachten. Dies deutet auf eine Geschwindigkeit des Abflusses von etwa 544 m/h (Knuchel 1972). In dem Fall des Versuchs, der in diesem Artikel beschrieben wird, hat das Wasser unterirdisch von Dürrütli nach Ruchschwand mit einer Geschwindigkeit von 21 m/h fließen. Auf dem Weg von Cheiserschwand zur Quelle von Ruchschwand, steigt diese Geschwindigkeit auf 38 m/h an. Diese Werte scheinen relativ geringfügig zu sein, was im Widerspruch zu einem permanenten Abfluss in den Kanälen steht.

Eine Erklärung für diese langsamen Geschwindigkeiten könnte in einem Abfluss in den Alluvionen liegen. Oder, was wahrscheinlicher ist, in der Tatsache, dass das Karstnetzwerk eine Rolle bei der Ansammlung und dem Abfluss von Wasser spielt (starke Regenschauern oder Schneeschmelze). Diese Quelle spielt die Rolle eines « Pistons » und reagiert auf das System des Abflusses zum Exitor. Diese Interpretation ist mit den Beobachtungen der lokalen Bauern übereinstimmend, nach denen Quellen oberhalb von 100 m über der Quelle der tiefsten Stelle, bei hohem Wasserstand, nicht sehr entwickelt sind. Eosin und Uranin wurden erst nach etwa 62 Stunden entdeckt. Zum Zeitpunkt der Injektion war das Wetter trocken und die Abflüsse gering. Auf der Schrattenfluh blieb nur wenig Schnee, der hätte die Quelle speisen können. Sechzig Stunden nach der Injektion der Tracer begann es zu regnen, was zu einer Beschleunigung ihrer Bewegung führte.

Diese Beobachtungen zeigen, dass der Massif der Schrattenfluh zu mindestens zwei Einzugsgebieten gehört. Ein Teil wird nach nord-östlich abgeleitet; der südliche und zentrale Teil des Massifs, wird in Richtung des Thunersees abgeleitet, wie dies bereits beobachtet wurde.

aber noch in Entstehung begriffen. Erst im Laufe des Jahres 2016 sind weitere Resultate zu erwarten.

Letztendlich kann man von einem gelungenen Markierversuch sprechen. Erstens konnten einige wichtige Fragen zur Ausdehnung der Einzugsgebiete auf der Schratzenfluh beantwortet werden. Zweitens konnten neue Erkenntnisse über Karstwasserflusswege nördlich der Schratzenfluh, in welchen noch gar keine Tracerversuche bekannt waren, gewonnen und einige Einzugsgebiete neu skizziert werden. Schliesslich konnten, und das ist gar nicht unwichtig, alle eingesetzten Farbstoffe erfolgreich detektiert werden.

Danksagung

Einen grossen Dank möchte ich allen Beteiligten aussprechen, die es erst ermöglicht haben, diesen Tracerversuch zu realisieren. Dieser gilt vor allem meinem Betreuer Philipp Häuselmann, der mir immer tatkräftig zur Seite gestanden ist und diesen Tracerversuch im Zuge meiner Masterarbeit erst überhaupt ermöglicht hat.

Grossen Dank möchte ich auch der Familie Otz für ihre intensive Unterstützung aussprechen. Sie haben mich mit den notwendigen Gerätschaften ausgestattet und mich mit Know-how bei den zeitaufwendigen Auswertungen der Proben unterstützt (Heinz, Martin, Gerhild und Ines Otz).

Auch bei allen freiwilligen Helferinnen und Helfern, die die Zwölf-Stunden-Schichten tapfer gemeistert und dafür gesorgt haben, dass die Farbe nicht sprichwörtlich den Bach hinunter ging, möchte ich mich ganz herzlich bedanken (P. Aeberhard, J. Dreybrodt, T. Kesselring, C. Lüthi, A. Manetsch, L. Palpacuer, P. Pfister, L. Rasch, A. Wildberger). Ausserdem möchte ich mich auch noch bei den Helferinnen und Helfern bedanken, die bei der Einspeisung der Farbstoffe mitgeholfen haben (I. und M. Otz, C. Seiler, M. Achtman). Dank möchte ich auch den fleissigen Fotografen aussprechen, die uns die schönen Bilder der Einspeisung der Farbstoffe zur Verfügung gestellt haben (M. Achtman, M.H. Otz, C. Seiler). Des Weiteren möchte ich mich bei den Vereinen SCMN und SCPF (Gemeinschaft Höhlenforschung Schratzenfluh GHS) für die Vorarbeiten (Suche nach Einspeisestellen, Literatursuche) bedanken.

Die folgenden Institutionen haben dieses Projekt finanziell unterstützt und ermöglicht: In erster Linie sind dies das Biosphärenreservat Entlebuch (T. Schnider), der Kanton Luzern sowie sein Lotteriefonds. Von Höhlenforscher- und dritter Seite unterstützten die Schweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung SGH (Fonds Bitterli), SGH Bern, SGH Interlaken, SC Préalpes fribourgeoises, SC Montagnes neuchâteloises, SCNat - Speläologische Kommission, Uferschutzbund Thuner- und Brienersee die Arbeiten. Ihnen allen sei herzlich gedankt. ◆

Bibliographie

- **KNUCHEL, F. (1972):** Färbung des unterirdischen Abflusses der Schratzenfluh. - Supplément à Stalactite No. 7, 32 p.
 - **MALARD, A. & JEANNIN, P.-Y. (2015):** Estimation des écoulements souterrains du système Siebenhengste (BE) / Schratzenfluh (LU) par l'application de l'approche KARSYS. - Stalactite 65 (2), 38-53.
- Website UNESCO Biosphäre Entlebuch: <http://www.biosphaere.ch/de/natur-landschaft/karst/hoehlensysteme> [Abruf/consultation 10.10.2015]

Ce fait a été corroboré dans le dernier Stalactite par l'étude des conditions tectoniques (Malard et al. 2015, indépendamment du résultat de l'essai de traçage. L'hypothèse de Knuchel (1972) selon laquelle la majorité de la Schratzenfluh devrait être drainée vers le lac de Thoune, est donc démentie. Les résultats de l'essai permettent de formuler une quantité d'autres hypothèses. L'évaluation des données (travail de diplôme) est cependant encore en cours, et les résultats complets ne seront disponibles que plus tard en 2016.

En conclusion, cet essai peut être qualifié de réussi. D'abord, d'importantes questions sur l'extension des différents bassins versants auxquels appartient la Schratzenfluh ont trouvé une réponse. Puis, de nouvelles connaissances sur les écoulements karstiques dans la zone située au nord de la Schratzenfluh, où aucun essai de traçage n'était connu auparavant, ont pu être acquises, et la situation de quelques bassins versants a été esquissée. Finalement, et cela a aussi son importance, tous les traceurs utilisés ont pu être détectés avec succès.

Remerciements

Je désire adresser mes sincères remerciements à tous ceux qui ont rendu possible la réalisation de cet essai. Ces remerciements s'adressent tout particulièrement à Philipp Häuselmann, qui a parrainé mon travail et m'a toujours appuyé de manière active ; grâce à lui, cette étude a pu être réalisée dans le cadre de mon travail de master.

J'exprime aussi ma reconnaissance à la famille Otz pour son précieux appui. Ils m'ont mis à disposition l'équipement nécessaire et m'ont fait profiter de leur savoir-faire pour l'analyse des échantillons, travail qui exige beaucoup de temps (Heinz, Martin, Gerhild et Ines Otz).

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les participants et participantes bénévoles, qui ont courageusement travaillé par périodes de douze heures et qui ont permis d'éviter que les traceurs n'échappent aux observations (P. Aeberhard, J. Dreybrodt, T. Kesselring, C. Lüthi, A. Manetsch, L. Palpacuer, P. Pfister, L. Rasch, A. Wildberger). D'autre part, j'aimerais remercier les participants et participantes aux opérations d'injection des colorants (I. und M. Otz, C. Seiler, M. Achtman). Mes remerciements s'adressent aussi aux diligents photographes qui ont réalisé et mis à disposition les belles images des opérations d'injection (M. Achtman, M.H. Otz, C. Seiler). Finalement je souhaite exprimer ma reconnaissance au SCMN et SCPF (Gemeinschaft Höhlenforschung Schratzenfluh GHS) pour la réalisation des travaux préparatoires (recherche des points d'injection, recherche de littérature).

Les institutions suivantes ont apporté à ce projet un soutien financier et en ont ainsi permis la réalisation. Il s'agit principalement de la réserve de biosphère d'Entlebuch (T. Schnider), du canton de Lucerne et de son fonds de loterie. Un soutien financier a été apporté par : la Société suisse de spéléologie SSS (Fonds Bitterli), la SSS Berne, la SSS Interlaken, le SC Préalpes fribourgeoises, le SC Montagnes neuchâteloises, la Commission de spéléologie scientifique (SSS-SCNAT), l'Uferschutzbund Thuner- und Brienersee (Association de protection des rives des lacs de Thoune et de Brienz). Que toutes ces organisations soient vivement remerciées. ◆