

Universität für Bodenkultur Wien

University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Institut für Angewandte Geologie (IAG)

Leiter: Univ. Prof. Mag. rer. nat. Dr. sc. nat. Christian Zangerl

MULTITRACERVERSUCH IN DEN SCHWEIZER VORALPEN

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

eingereicht von:

ROBERT GANAUSER

Betreuer: PD Dr. Philipp Häuselmann

Mitbetreuer: Univ. Prof. Mag. rer. nat. Dr. sc. nat. Christian Zangerl

Robert Ganauser

MULTITRACERVERSUCH IN DEN SCHWEIZER VORALPEN



Danksagung

Zunächst möchte ich meinen Diplomarbeitsbetreuern PD Dr. Philipp Häuselmann und Univ. Prof. Mag. Dr. Christian Zangerl danken; Philipp Häuselmann für die kompetente Betreuung der Diplomarbeit, die tatkräftige Unterstützung in der Schweiz in allen Phasen des Multitracerversuchs, die Bereitstellung des gesamten Teams, das die Umsetzung des Multitracerversuchs erst möglich gemacht hat, und für das Weitergeben der Freude und Leidenschaft an der Forschung am Berg und in den Höhlen; Christian Zangerl für das Ermöglichen und Realisieren der Masterarbeit

Großen Dank möchte ich auch der Familie Otz und dem Labor Nano Trace Technologies™ für ihre intensive Unterstützung aussprechen. Sie haben mich mit den notwendigen Gerätschaften ausgestattet und mir mit umfangreichem Know-how bei den zeitaufwendigen Auswertungen der Proben zur Seite gestanden (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 hinunterging, 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 gilt mein Dank jenen Helferinnen und Helfern, 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).

Weiters möchte ich mich bei den Vereinen SCMN und SCPF (Gemeinschaft Höhlenforschung Schrattenfluh GHS) für die Vorarbeiten (Suche nach Einspeisestellen, Literatursuche) bedanken. Die folgenden Institutionen haben dieses Projekt finanziell unterstützt und ermöglicht: In erster Linie das Biosphärenreservat Entlebuch (T. Schnider), der Kanton Luzern sowie sein Lotteriefonds; von Höhlenforscher- und dritter Seite die Schweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung SGH (Fonds Bitterli), SGH Bern, SGH Interlaken, SC Préalpes fribourgeoises, SC Montagnes neuchâtelaises, SCNat – Speläologische Kommission, Uferschutzbund Thuner- und Brienersee. Ihnen allen sei herzlich gedankt.

Bedanken möchte ich mich weiters bei Eva Grasser für das Korrekturlesen der Arbeit. Großer Dank gebührt nicht zuletzt meinen Eltern Marianna und Wolfgang, die mein Studium ermöglicht und unterstützt haben und mich während meiner Ausbildung zu keiner Zeit unter Druck gesetzt haben.

Abstract

Im Zuge dieser Masterarbeit wurde der unterirdische Abfluss im Karstgebiet von zwei Gebirgsstöcken untersucht. Dazu wurde ein Multitracerversuch durchgeführt. Die Untersuchung betraf die Gebirgsstöcke Schratzen- und Schwändiliflue im Südwesten der Region Zentralschweiz, genau genommen in den Schweizer Voralpen im Süden des Kantons Luzern. Bereits seit den 1970er-Jahren besteht reges Interesse an der Erforschung des vorhandenen Höhlensystems und des oberflächlich abfließenden Niederschlags- und Schneeschmelzwassers, welches in dieser Region in Dolinen verschwindet und deren Wiederaustritt noch teilweise unbekannt ist. Nach dem erfolgreich durchgeführten Tracerversuch 1970 wurde angenommen, dass die gesamte Schratzenflue gegen den Thunersee entwässert. Ziel dieser Arbeit war es, die Grenzen der Einzugsgebiete in der Schratzen- sowie Schwändiliflue zu bestimmen und hydraulische Verbindungen zwischen Dolinen und Wiederaustritten nachzuweisen. Der erste Teil der Arbeit beschäftigt sich mit den Rahmenbedingungen dieses Multitracerversuchs, mit der Geschichte der Wasserfärbung sowie mit früheren Markierversuchen in dieser Region. Im zweiten Abschnitt wird auf die Organisation des Tracerversuches eingegangen. Der letzte Teil beschäftigt sich mit der Methodik der Auswertung der Proben, den Ergebnissen und der Interpretation derselben. Die Ergebnisse wurden durch empirische Methoden, mittels Tracereingabe, Probennahme und Auswertung dieser im Labor erarbeitet. Es wurden alle vier Tracer in einigen der beprobten Quellen nachgewiesen und somit konnten wichtige Erkenntnisse über die Abgrenzung der Einzugsgebiete sowie den hydraulischen Verbindungen gewonnen werden.

In the course of this master thesis, the underground runoff in the karst area Schratzen- and Schwändiliflue, which is located in the Swiss pre-Alps in the south of the canton of Lucerne, was investigated. Since the 1970s there has been a keen interest in the exploration of the existing cave system and the superficial runoff of the precipitation and meltwater, which disappears in this region in dolines, and whose re-emergence is still partly unknown. After a successful tracer experiment in 1970 it was assumed that the entire runoff from Schratzenflue flows into the lake Thunersee. The aim of this work was to determine the boundaries of the hydrological drainage areas in the Schratzen- and Schwändiliflue and to prove hydraulic connections between dolines and the re-emergences. In order to conduct this study a multitracer research has been used. The first part of this thesis gives an overview of the framework conditions of this multitracer research, the history of water colouring as well as previous tracer experiments in this region. The second part deals with the organization of the tracer experiment. The last section is concerned with the methodology used for this study and the evaluation of the samples. Moreover, the findings of the research as well as their interpretation are presented in the final chapter. The results were obtained by empirical methods, by means of tracer input, sampling and evaluation in the laboratory. All four tracers were detected in some of the sampled sources and thus important insights have been gained about the boundaries of the hydrological drainage areas and the hydraulic connections in the investigated region.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	7
1. Einleitung.....	9
2. Allgemeines.....	15
2.1. Ziel.....	15
2.2. Geographischer und hydrogeologischer Rahmen.....	15
2.3. Geologischer und stratigraphischer Rahmen.....	21
2.3.1. Geologischer Rahmen.....	21
2.3.2. Stratigraphie.....	22
2.4. Allgemeines über Karst.....	23
3. Allgemeines über geohydrologische Markierungstechnik.....	26
3.1. Geschichte der Wasserfärbung.....	26
3.2. Arten von Markierungsmittel.....	27
3.2.1. Allgemeines.....	27
3.2.2. Allgemeines über die in diesem Multitracerversuch eingesetzten Fluoreszenzfarbstoffe.....	29
3.2.2.1. Uranin.....	29
3.2.2.2. Eosin.....	30
3.2.2.3. Natrium-Naphthionat.....	31
3.2.2.4. Tinopal CBS - X.....	32
3.2.3. Multitracerversuche.....	32
3.2.4. Aktivkohle.....	33
4. Frühere Markierversuche.....	35
5. Organisation der Wasserfärbung 2015.....	38
5.1. Feldbegehungen.....	38
5.2. Auswahl der Tracer und Abschätzung der Einspeisemenge.....	39
5.3. Auswahl der Tracer und Bestimmung der Einspeisemenge.....	39
5.4. Einspeisepunkte.....	42
5.5. Entnahmestellen.....	49
5.6. Erstellung eines Zeitplanes für die Probennahme.....	54
5.7. Durchführung der Wasserfärbung.....	58
5.7.1. Allgemeines.....	58
5.7.2. Wetterlage während und nach der Eingabe.....	58
5.7.3. Einbringen der Tracer.....	59
5.8. Probennahme.....	60
5.9. Organisatorisches.....	61
6. Versuchs - Auswertung.....	63
6.1. Methodik der Auswertung der Proben.....	65

7.	Ergebnisse	69
7.1.	Schwändilflue	69
7.1.1.	Standort Seebenbach (SEB)	71
7.1.1.1.	Na-Naphthionat	71
7.1.1.2.	Tinopal CBS-X.....	71
7.2.	Schrattenflue.....	73
7.2.1.	Standort Ahornli (AHO)	75
7.2.2.	Standort Ruchschwand (RUC)	76
7.2.3.	Entnahmestelle Südelbach (SUD)	77
7.2.4.	Entnahmestelle Waldemme (WAL).....	80
7.2.5.	Wo konnte nichts nachgewiesen werden.....	82
7.3.	Background Fluorescence Analysis (BFA) (=Grundfluoreszenzanalyse)	83
7.3.1.	Allgemeines über BFA.....	83
7.3.2.	Ergebnisse	84
8.	Interpretation	88
8.1.	Schwändilflue	89
8.2.	Schrattenflue.....	90
9.	Zusammenfassung und Ausblick.....	95

1. Einleitung

Im Zuge dieser Masterarbeit sollte der unterirdische Abfluss im Karstgebiet untersucht werden. Dazu wurde ein Multitracerversuch durchgeführt. Die Untersuchung betraf die Gebirgsstöcke Schratten- und Schwändiliflue in der Zentralschweiz, genau genommen in den Schweizer Voralpen im Südwesten des Kantons Luzern (siehe Abbildung 1-1).



Abbildung 1-1: Lage des Kantons Luzern (rot eingefärbt) in der Schweiz (Foundation, 2004)

Im südlichsten Teil dieses Kantons befindet sich das Massiv der Schrattenflue. Es liegt südwestlich der Gemeinde Flühli, wird nach Nordosten von der Waldemme und im Westen vom Kanton Bern begrenzt (Abb. 1-2).

Der zweite Gebirgsstock, die Schwändiliflue befindet sich östlich der Gemeinde Flühli und erstreckt sich von der im Norden der Schwändiliflue gelegenen Hütte Hurbele bis zum Seebenbach, der die Schwändiliflue nach Süden hin abgrenzt (Abb. 1-2).

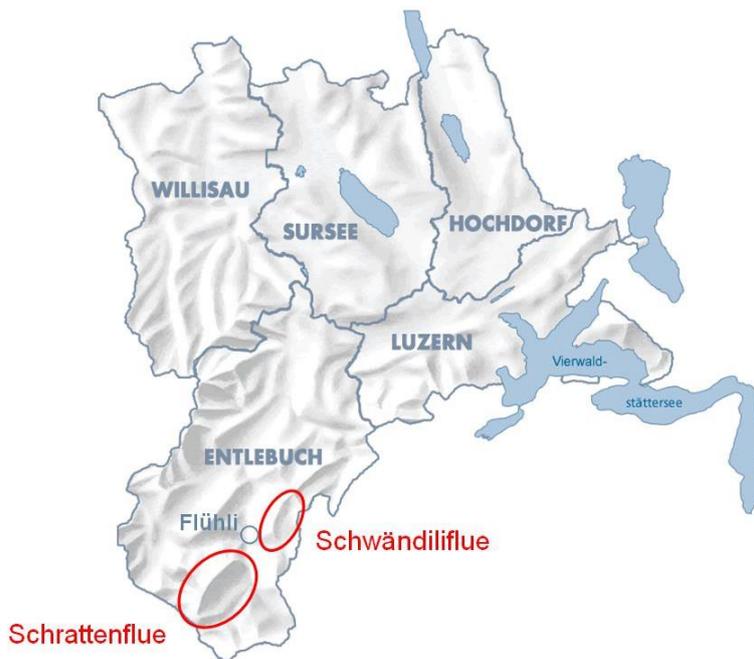


Abbildung 1-2: Lage der Schratzen- sowie Schwändiliflue im Kanton Luzern

Die beiden Gebirgsstöcke befinden sich im Karstgebiet. Durch die Verwitterung von Calciumcarbonat im Karst, bildeten sich über Tausende von Jahren, charakteristische Verwitterungs- und Erosionserscheinungen im Gestein aus.

Kennzeichnend für diese beiden Gebiete ist daher, dass der Oberflächenabfluss aus Niederschlags- oder Schmelzwasser zur Gänze in den Karrenfeldern der Schratzenflue und partiell in der Schwändiliflue in Dolinen/Störzonen/Ponoren verschwindet und sein Wiederaustritt noch teilweise unbekannt ist. Mit Hilfe der Erkundung dieser unterirdischen Fließwege können beispielsweise Einzugsgebiete abgegrenzt, Zusammenhänge zwischen den Massiven und Quellen erkannt sowie potentielle Trinkwasserquellen geschützt werden. Deshalb gab es bereits in den 1970er-Jahren reges Interesse an der Erforschung der unbekanntem Wiederauftritte des unterirdischen Abflusses. Allerdings ist der Wiederaustritt einiger in Dolinen verschwindenden Wässer bis heute unbekannt. Ziel dieser Arbeit ist es die hydraulischen Verbindungen im Norden der Schratzen- sowie der gesamten Schwändiliflue zu erforschen und mehr Kenntnisse über die Ausdehnung der Einzugsgebiete zu erhalten.

In der Schratzenflue gab es bis vor dem in dieser Arbeit dokumentierten Färbversuch erst einen Tracerversuch, und zwar 1970. Dieser brachte erste Erkenntnisse über die unterirdischen Fließwege und damit eventuell vorhandene Höhlensysteme.

In der Schwändiliflue wurde bislang noch kein Markierungsversuch durchgeführt, der Aufschluss über Wasserwege innerhalb des Gebirgsstockes und deren Wiederaustritt geben könnte.

Die im Zuge dieser Diplomarbeit durchgeführten Färbversuche im Bereich der Schwändli- und Schrattenflue, die im Zeitraum von Mitte Mai 2015 bis Ende Juni 2015 durchgeführt wurden, stützen sich vor allem auf den Tracerversuch aus dem Jahr 1970, organisiert und durchgeführt von Franz Knuchel. So konnten zumindest für die Schrattenflue einige wertvolle Erkenntnisse aus der damaligen Färbung in die Planung und Organisation des aktuellen Färbversuches berücksichtigt werden.

Durch Franz Knuchels Färbversuch ist bekannt, dass der südliche bis mittlere Teil der Schrattenflue gegen SSW in den Thunersee entwässert (Abb. 1-3). Da aber am NO-Fuß ebenfalls Quellen entspringen existieren, stellt sich die Frage, ob das Schmelz- und Niederschlagswasser der gesamten Schrattenflue nach SSW abfließt oder ob ein Teil davon in die Quellen im NO läuft (Abb. 1-4).

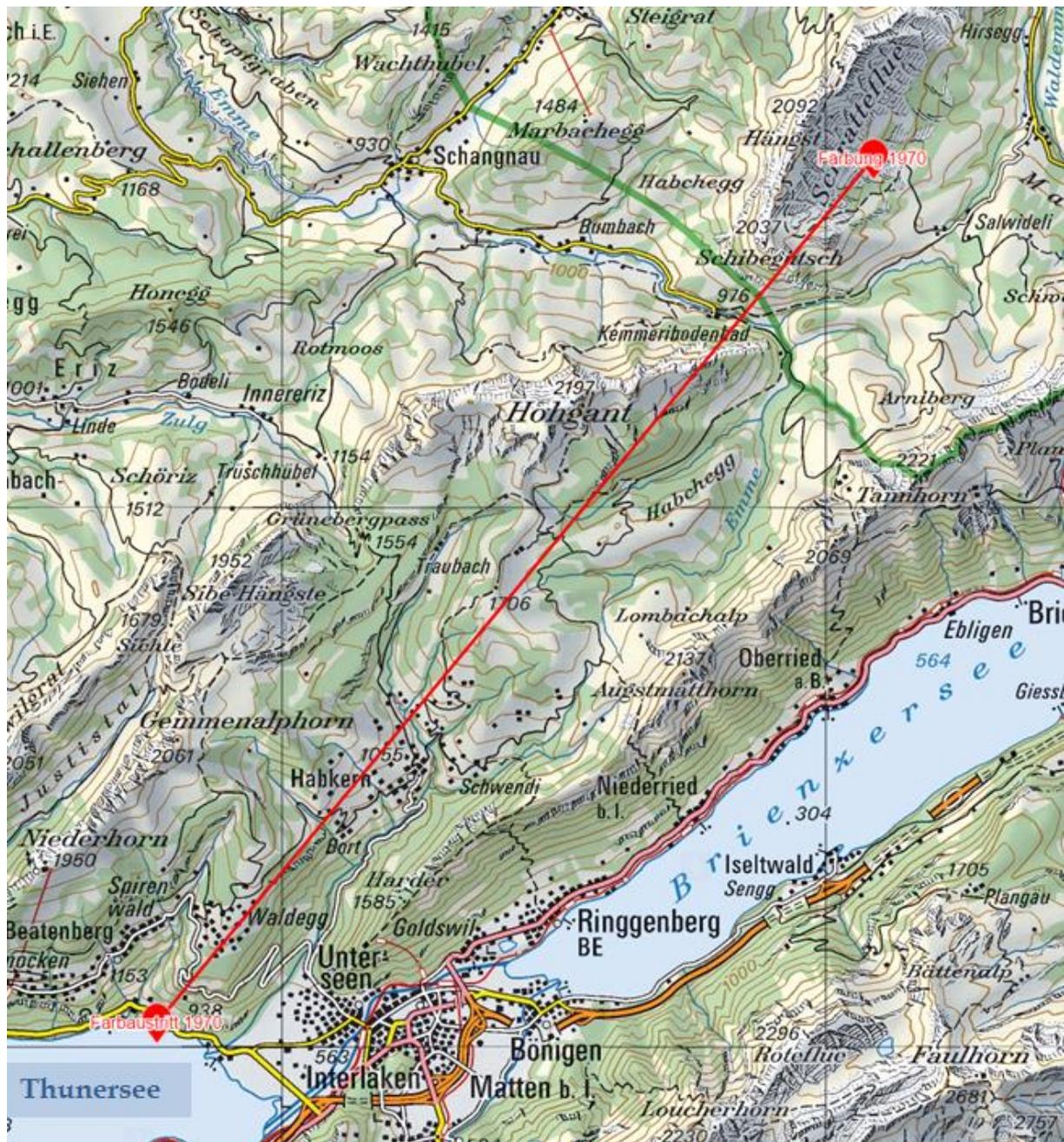


Abbildung 1-3: Durch die Färbung 1970 nachgewiesene hydraulische Verbindung (rote Linie) im südlichen bis mittleren Teil der Schrammflue. Entwässerung in den Thunersee, Sundlauenen (<https://map.geo.admin.ch>)

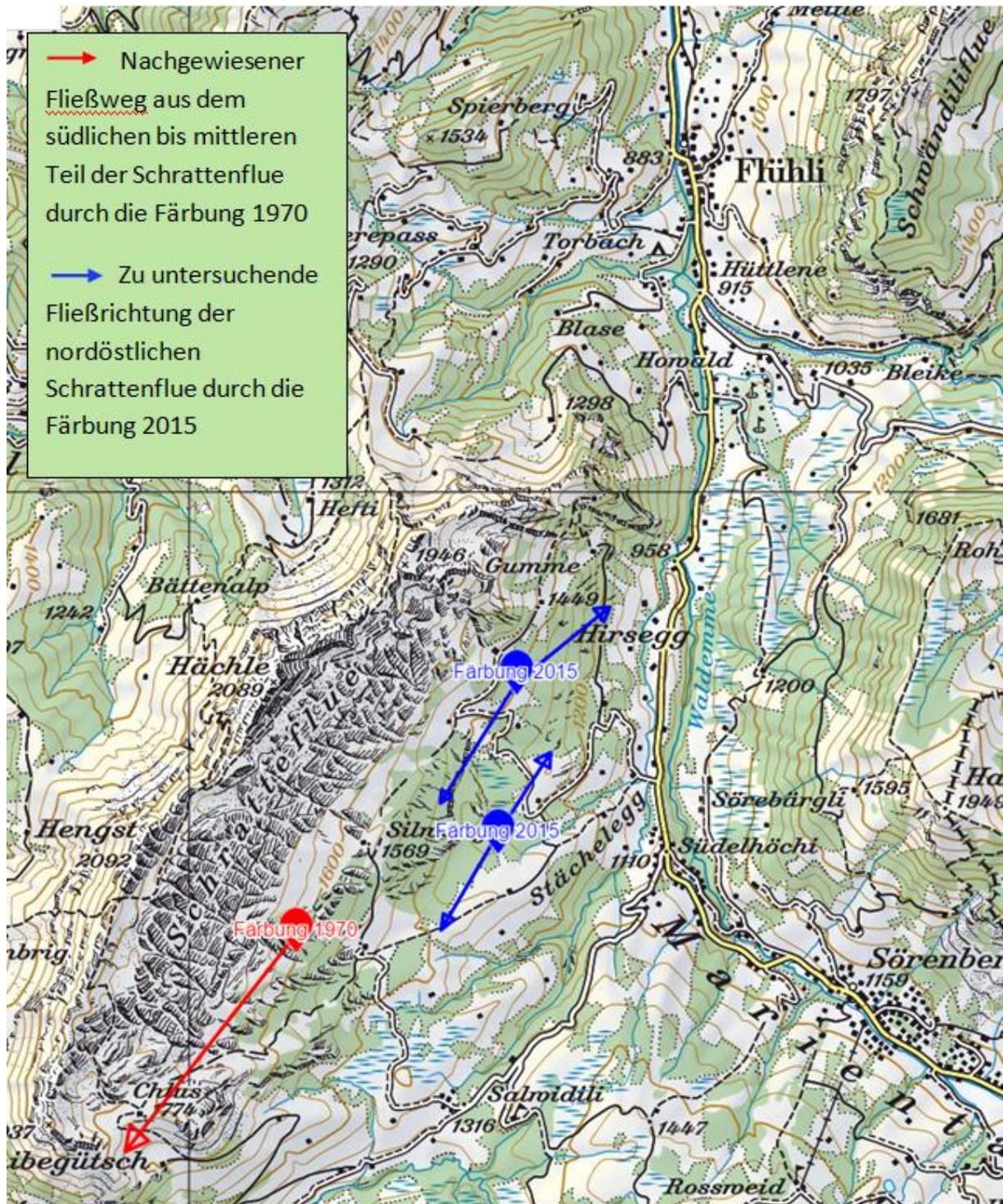


Abbildung 1-4: Die rote Linie zeigt die durch die Färbung im Jahr 1970 nachgewiesene Fließrichtung; die blauen Linien zeigen die zwei Entwässerungsmöglichkeiten der nordöstlichen Schratzenflue vor der Färbung 2015 (<https://map.geo.admin.ch>).

Nördlich der Schratzenflue setzt sich die helvetische Randkette fort. Aus dieser Region bis hin zum Vierwaldstättersee sind keine Färbversuche dokumentiert. Es ist zwar bekannt, dass Höhlen auftreten und dass der Kalk verkarstet ist, aber ob die Wässer gegen die Brüedere in den Nordosten oder noch weiter östlich in den Vierwaldstättersee fließen, oder ob sie vielleicht, wie die Schratzenflue, gegen den Thunersee in den Südwesten strömen, ist unklar.

Um erste Erkenntnisse für diese Region zu erhalten, sollte im Zuge dieser Forschungsarbeit eine Färbung in der Schwändiliflue durchgeführt werden. (Abb. 1-5). Hier versickert das Oberflächenwasser aus der Schneeschmelze und aus Regenfällen in bereits bekannten Bachschwinden, deren Wiederaustritt unbekannt ist.

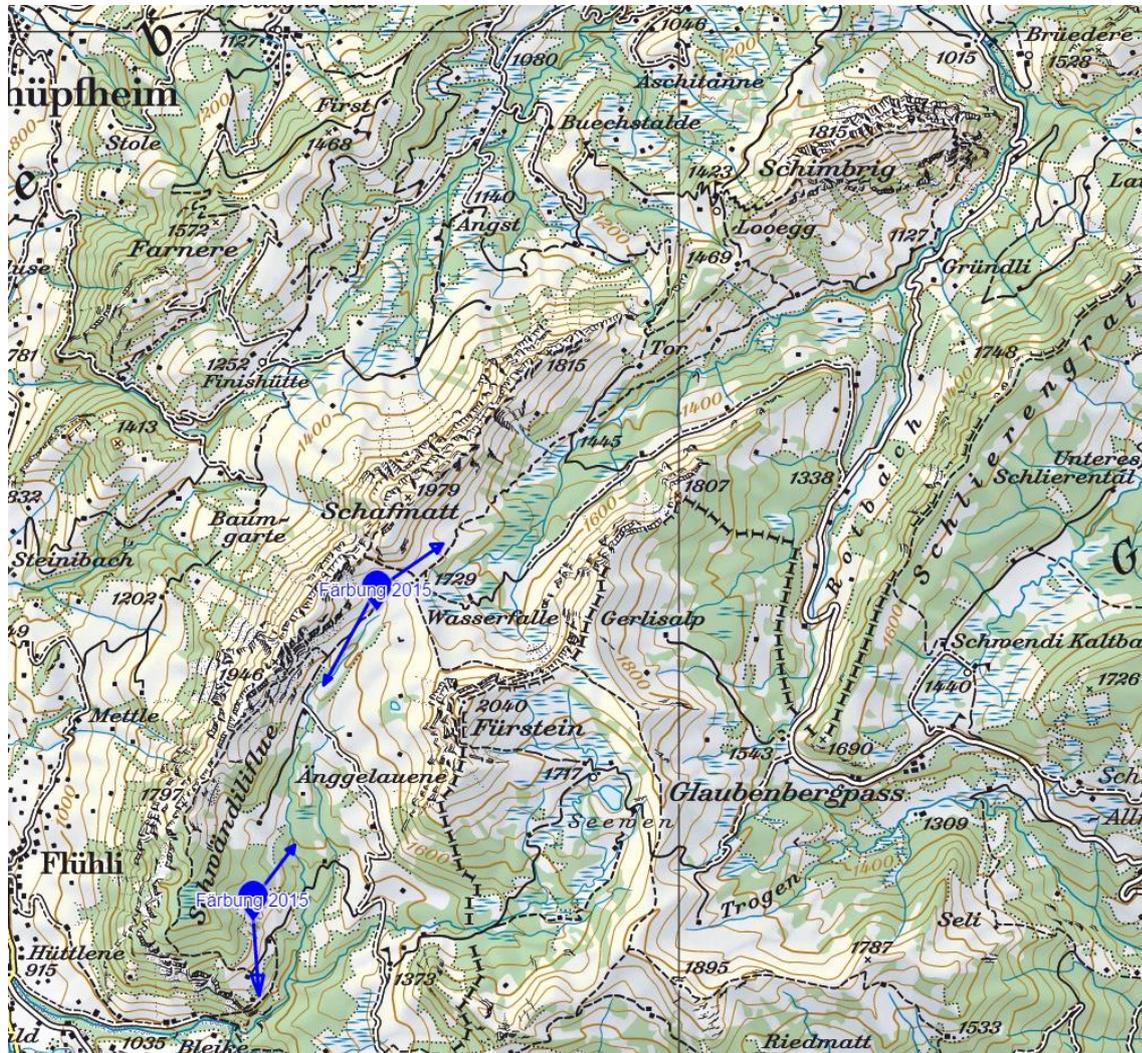


Abbildung 1-5: Mögliche Fließwege der versickernden Oberflächenwässer in der Schwändiliflue vor der Färbung 2015 (<https://map.geo.admin.ch>)

In der Schratten- sowie in der Schwändiliflue wurden je zwei Eingabestellen gewählt. Somit gab es insgesamt vier Eingabestellen mit vier unterschiedlichen Farbstoffen. In der Folge wurden diverse Quellen sowie die aus dem Gebirge fließenden Flüsse beprobt. Anschließend wurden die Proben fluorimetrisch analysiert, ausgewertet und interpretiert.

Durch die vorliegende Arbeit sollen die unterirdischen Fließwege im Bereich der Schratten- und der Schwändiliflue besser verstanden, wichtige Fragen zur Ausdehnung der Einzugsgebiete beantwortet und bessere Einblicke in eventuell vorhandene Höhlensysteme ermöglicht werden.

2. Allgemeines

2.1. Ziel

Im Zuge dieser Masterarbeit sollen folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Gibt es hydraulische Verbindungen zwischen den Dolinen und den vermuteten Austrittsorten? Wenn ja, wie lange braucht das Wasser, um diesen Weg zurückzulegen?
- Entwässert die gesamte Schrattenflue nach SSW in den Thunersee oder fließt ein Teil des Schmelz- und Niederschlagswassers in die NO-Quellen?
- Fließen die Oberflächenwässer der Schwändilflue Richtung Süden gegen den Seebenbach oder doch nach NO in Richtung Schimbrig?
- Wo kann man nach diesem Multitracerversuch die Einzugsgebietsgrenzen der beiden Felsbänder ziehen?
- Welchen Verlauf nehmen die unterirdischen Wasserwege?
- Welche Zusammenhänge bestehen zwischen den Massiven und den Quellen?
- Wie können potenzielle Trinkwasserquellen geschützt werden?

2.2. Geographischer und hydrogeologischer Rahmen

Die zwei Gebirgsstöcke Schratten- und Schwändilflue, voneinander getrennt durch das Tal der Waldemme, prägen das Ortsbild der Gemeinde Flüfli. Beide Gebirgsbänder befinden sich in der UNESCO-Biosphäre Entlebuch. Die UNESCO (=United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) weist weltweit Biosphärenreservate im Rahmen des Programms ‚Mensch und Biosphäre‘ (Man and Biosphere = MAB-Programm) zum Schutz typischer Kulturlandschaften aus. Dabei geht es nicht um den klassischen Naturschutz im engeren Sinn. Grundsätzlich ist der Ansatz des Programms interdisziplinär und sieht den Menschen als einen Bestandteil der Biosphäre. Die Erhaltung bzw. Verringerung des Verlusts biologischer Vielfalt, die Verbesserung der Lebensbedingungen für den Menschen und die Weiterentwicklung sozialer, wirtschaftlicher und kultureller Voraussetzungen für die ökologische Nachhaltigkeit stehen im Fokus des MAB-Programms (UNESCO).

Jedes UNESCO-Biosphärenreservat weltweit muss eine Zonierung vorweisen. So auch die Biosphäre Entlebuch. Es wird unterteilt in Kernzone, Pflegezone und Entwicklungszone. Die Kernzone ist ein strenges Schutzgebiet für die in diesem Gebiet lebenden Tiere und Pflanzen und der biologischen Vielfalt. Hier soll sich die Natur möglichst unbeeinflusst vom Menschen entwickeln. Entlebuch weist etwa 8 % Kernzone auf. Die anzutreffenden Landschaftsformen sind hier: Hoch-, Flach- und Übergangsmoore, Moorwälder, Auenwälder,

Jagdbanngebiete und Felsformationen. Die in diesem Tracerversuch untersuchte Karstlandschaft der Schratzenflue wird zur Kernzone gezählt (vgl. Entlebuch, 2012).

Die Pflegezone umgibt oft die sensible Kernzone. Sie wird land- und forstwirtschaftlich extensiv genutzt, das heißt, hier überwiegt die natürliche Entwicklung und die naturverträgliche Nutzung der Ressourcen. In der Biosphäre Entlebuch gehören etwa 42 % der Gesamtfläche der Pflegezone an. Die Schwändilflue ist zur Gänze, bis auf einen Bereich, der der Kernzone angehört, der Pflegezone zugeordnet (vgl. Entlebuch, 2012).

Die dritte Zone ist die Entwicklungszone. Hier stehen der Mensch und seine Entwicklung im Zentrum. Im Entlebuch macht diese Zone rund 50 % aus. Es geht hier weniger um den technischen oder industriellen Fortschritt, sondern um eine ausgewogene Entwicklung von sozialen, wirtschaftlichen und kulturellen Werten (vgl. Entlebuch, 2012).

Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über die Zonierung der UNESCO-Biosphäre Entlebuch.

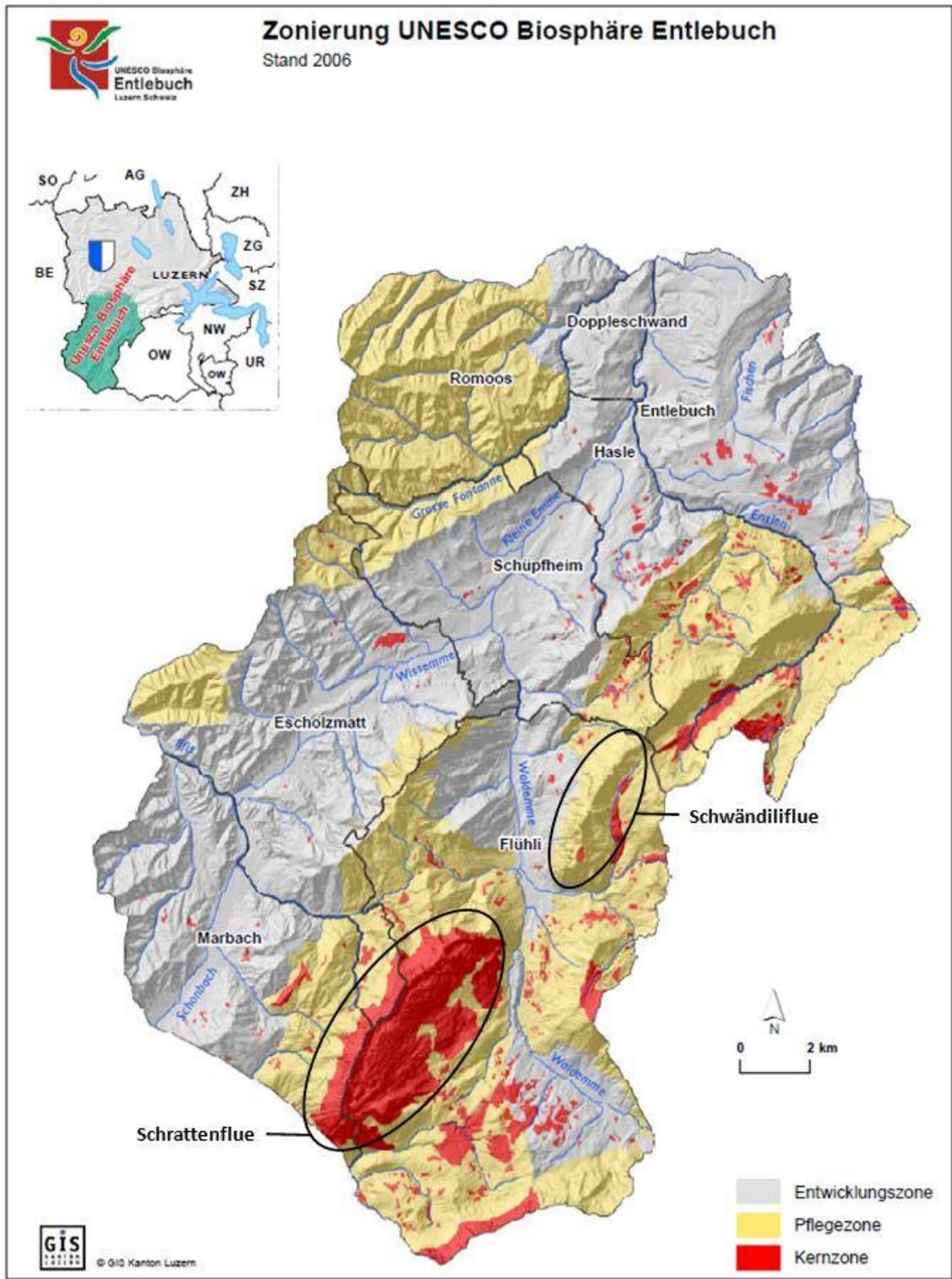


Abbildung 2-1: Zonierung der UNESCO-Biosphäre Entlebuch, Stand 2006 (Entlebuch, 2012)

Die Schratzenflue ist im Südwesten durch das Emmental und im Südosten durch den Südelgraben abgegrenzt. Das Tal der Waldemme trennt die Schratzenflue im Osten und gleichzeitig die Schwändiliflue im Westen. Der zuletzt genannte Gebirgsstock erstreckt sich nach Osten hin bis etwa zur Linie Wasserfallenegg-Leitere, nahe der Hütte Hurbele, 1666 m

ü. A. Es wird vermutet, dass diese Linie auch die Grenze des Wassereinzugsgebietes des langgestreckten Gebirgsstockes darstellt. Die Ortschaft Flühli bildet mit einer Höhe von 883 m ü. A. den tiefsten Punkt des Untersuchungsgebietes.

Die Rücken der beiden Gebirgszüge fallen sanft nach Südosten ab, wogegen die nordwestlichen Enden durch einen senkrechten Felsabbruch charakterisiert sind. Die Schrattenflue weist eine maximale Höhe von 2091 m ü. A. auf und die Schwändiliflue erhebt sich bis auf 1946 m ü. A. Bereiche unterhalb von 1700 m ü. A. sind von Vegetation und Erdboden bedeckt und dadurch auch größtenteils bewirtschaftet. Aufgrund der Steilheit des Geländes überwiegt bei der Bewirtschaftung die Milchwirtschaft. Oberhalb von 1700 m tritt der Schrattenkalk, der in einigen Bereichen vom Hohgant sandstein überdeckt ist, meist nackt zutage (Häuselmann, 2002).

Aus hydrogeologischer Sicht erstreckt sich das Untersuchungsgebiet vom Thunersee über den Beatenberg, den Hohgant, die Siebenhengste, die Schrattenflue, die Schwändiliflue bis hin zum Schimbrig (Abb. 2-2).

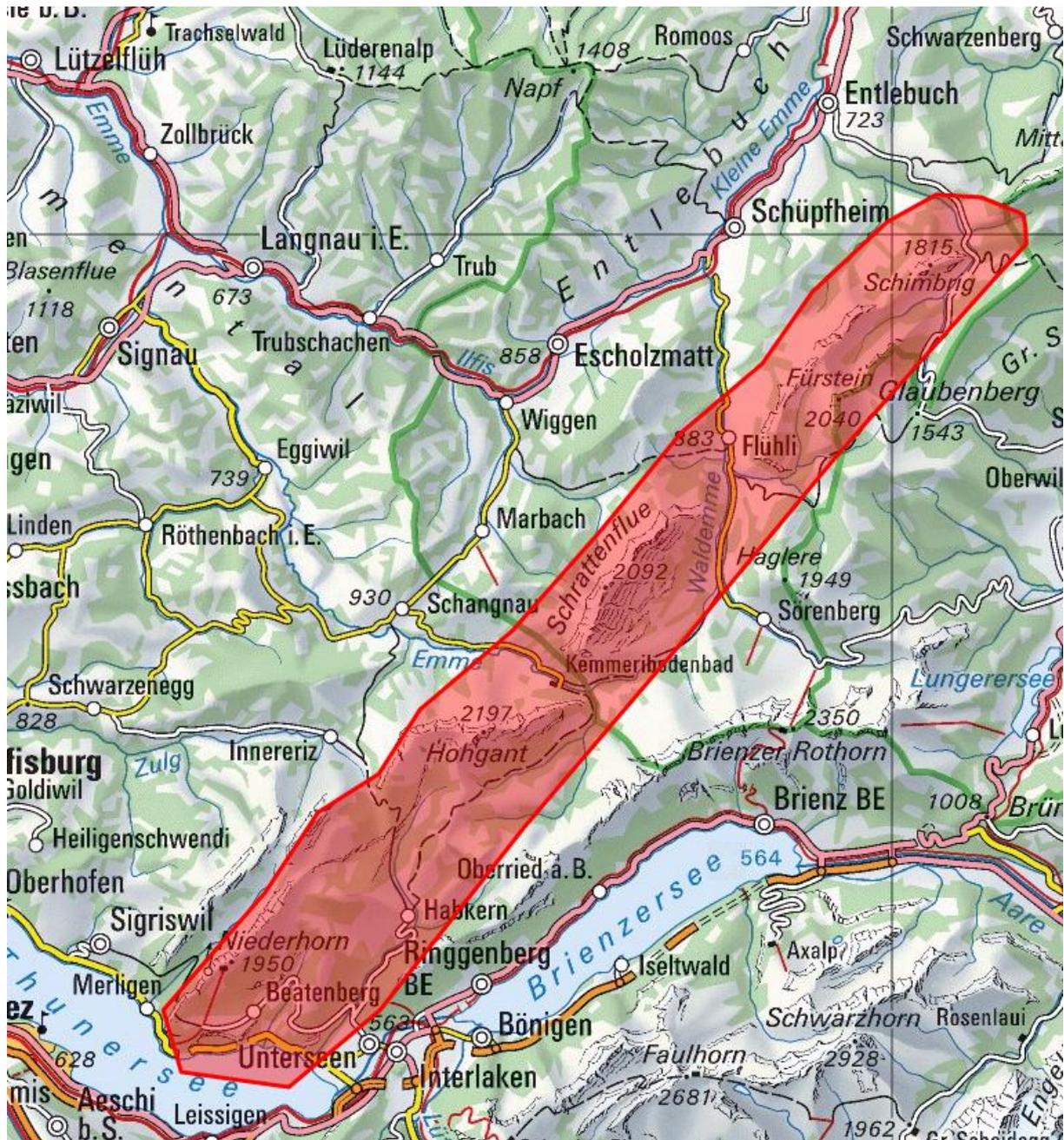


Abbildung 2-2: Überblick über das hydrogeologische Untersuchungsgebiet (rot eingefärbt) (<https://map.geo.admin.ch>)

In diesem Untersuchungsgebiet befindet sich unter anderen die Höhlenregion der Siebenhengste. Diese erstreckt sich vom Thunersee bis zum Berg Hohgant. Die gesamte Bergkette fällt, ebenso wie die Schratte- und Schwändiliflue, flach nach Südosten ab, wobei die nordwestliche Flanke durch steile Klippen charakterisiert ist. Im oberen Teil des Gebirges, zwischen 1700 und 2000 m, trifft man vor allem auf nackten Kalkstein. Im unteren Bereich wachsen vorrangig Tannen auf sumpfigem Untergrund.

Die Höhlenregion der Siebenhengste ist in zwei Wassereinzugsgebiete geteilt: einerseits in das Einzugsgebiet der Siebenhengste und andererseits in das der Beatushöhle (Abb. 2.3).

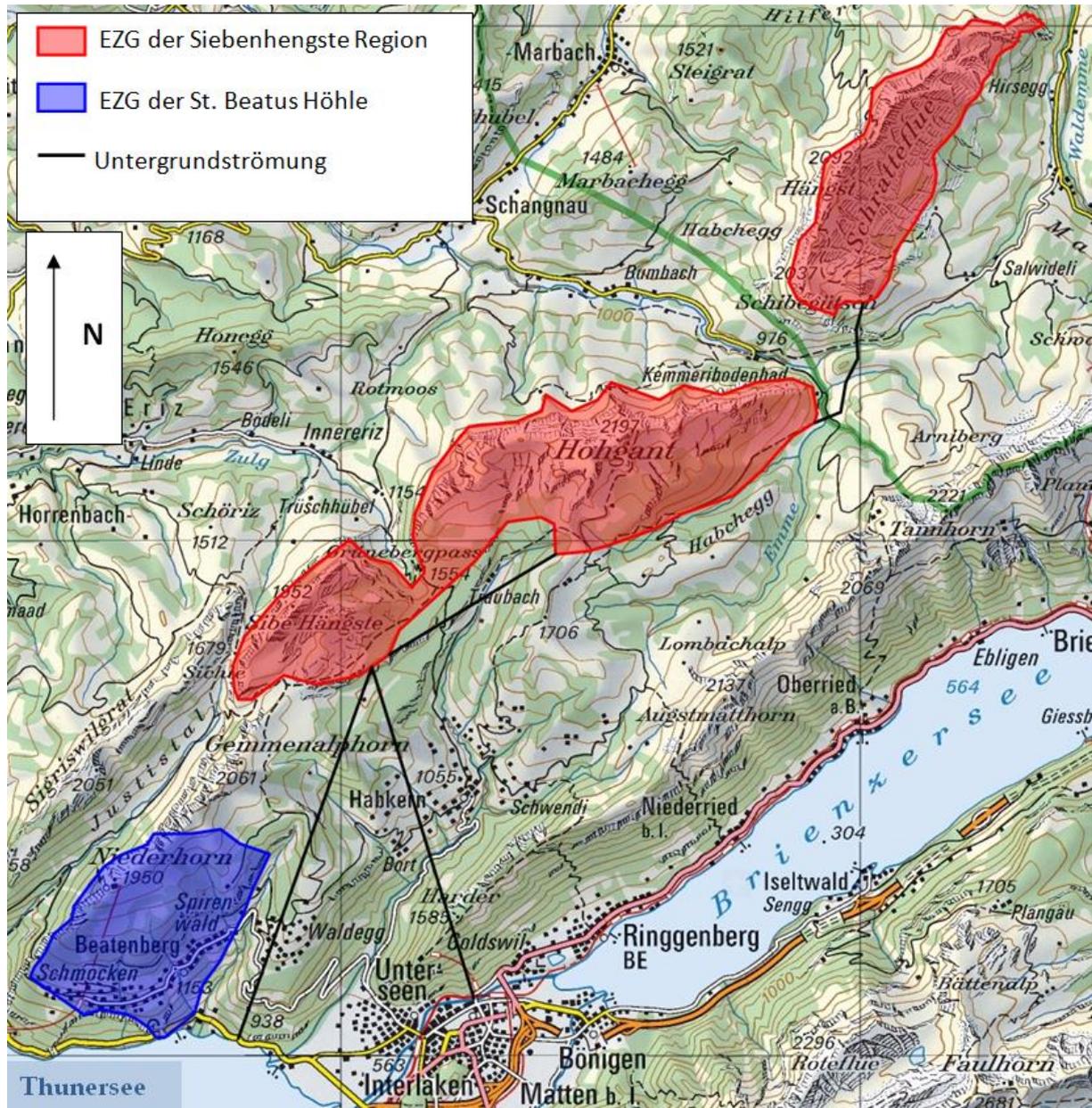


Abbildung 2-3: Einzugsgebietsplan vor der Färbung 2015 (<https://map.geo.admin.ch>)

Im Einzugsgebiet der Beatushöhle befinden sich die Waldheim-Höhle, der Fitzlischacht und das Häliloch. Es weist etwa eine Fläche von etwa 10.5 km² auf (Häuselmann, 2004).

Das zweite Einzugsgebiet, jenes der Siebenhengste, beinhaltet den Bärenschacht, das Höhlensystem Réseau Siebenhengste-Hohgant und umliegende Höhlen sowie die Schratteflue. Letztgenanntes liegt nördlich des tiefeingeschnittenen Tales der Emme und entwässert direkt über die Quellen Bätterich und Gelbenbrunnen in den Thunersee. Die

Grenzen des Einzugsgebietes basieren auf dem Wissensstand bis zur Färbung 2015. Dieses EZG umfasst insgesamt eine Fläche von ungefähr 35 km².

Grundsätzlich wird zwischen topographischen (oberirdischen) und unterirdischen EZG unterschieden. Aufgrund der geologischen Gegebenheiten und der bereits gesammelten Daten des oben beschriebenen Einzugsgebiets kann davon ausgegangen werden, dass sich das topographische vom unterirdischen Einzugsgebiet in Bezug auf Abgrenzung und Fläche unterscheidet.

Das Klima wird vor allem durch Westwinde und mäßige Feuchtigkeit beeinflusst. Die durchschnittliche Jahrestemperatur liegt bei etwa 8°C auf 600 m und 2°C auf 1800m, bei saisonalen Unterschieden zwischen -35°C und bis zu 40°C. Der jährliche durchschnittliche Niederschlag liegt zwischen 1500 und 2000 mm (Häuselmann, 2002).

2.3. Geologischer und stratigraphischer Rahmen

2.3.1. Geologischer Rahmen

Die in diesem Tracerversuch beobachtete Region ist Teil der helvetischen Voralpenkette, die im Nordwesten der Alpen liegt und im Norden an das Molassebecken anschließt. Ab der ältesten Unterkreide, vor rund 145 Millionen Jahren, bis zum Eozän, vor etwa 40 Millionen Jahren, wurden die Sedimentgesteine des Urmeers Tethys auf dem Meeresboden im Bereich von Norditalien abgelagert. Im Laufe dieser Periode setzten sich Kalk (vor allem biogener Herkunft, durch Mikroorganismen und gesteinsbildende Korallen), Sand- und Mergelgesteine ab. Durch abwechselnde Ablagerungsbedingungen wurden unterschiedliche Sedimente sedimentiert: Wurde Feinsand abgelagert, entstand dadurch Sandstein, wurden Tonminerale am Meeresgrund abgelagert, führte das zur Ausbildung von Mergeln. Dadurch und durch die Diagenese unverfestigter Sedimente bildete sich die heute charakteristische Abfolge von Kieselkalk-Drusbergmergel-Schrattenkalk (von unten nach oben).

Die Prozesse der Alpenbildung führten dazu, dass die Meeressedimente über die nördlich liegenden Schichten gestoßen wurden. Dies erklärt auch die schräge Lage der Platten Schratten- und Schwändliflue und ihr schroffes Abfallen im Nordwesten (Abb. 2-4).



Abbildung 2-4: Geologisches Profil der Schrattenflue (Schnitt NW-SO) (Schider, 1911 u. 1912)

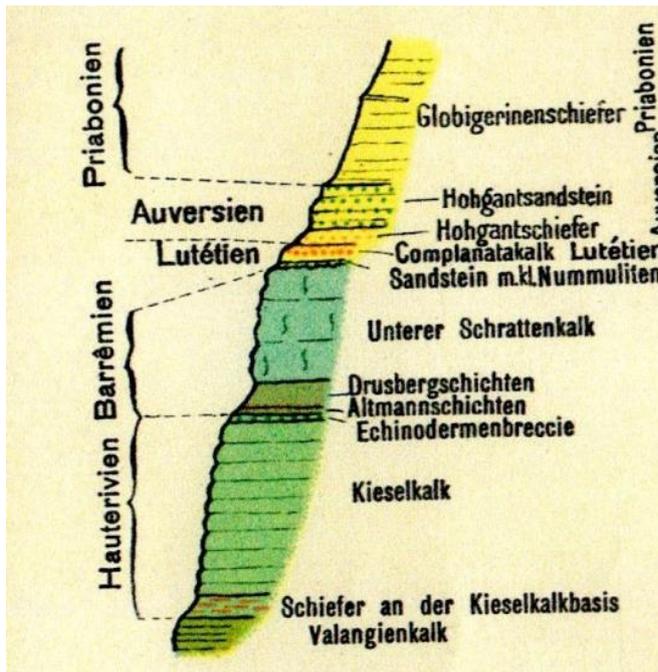


Abbildung 2-5: Legende zum geologischen Profil (Schider, 1911 u. 1912)

2.3.2. Stratigraphie

Die maßgebliche Stratigraphie der Karstformation ist wie folgt (Abb. 2-5):

- Den Unterbau bildet Kieselkalk (untere Kreide, etwa 130 Mio. Jahre) mit einer Mächtigkeit von etwa 200 m. Er gilt als schlecht verkarstungsfähig, weswegen sich hier nur einzelne Höhlenteile befinden.
- Der Drusbergmergel bildet im Allgemeinen eine wasserundurchlässige Schicht. Er weist eine Schichtdicke von etwa 40 m auf und enthält oft in seinen oberen Bereichen kalkige Einschlüsse.
- Oberhalb des Mergels befindet sich der 160-200m dicke Schrattenkalk (untere Kreide). Dieser ist leicht verkarstungsfähig. Daher bildeten und bilden sich in dieser Gesteinsformation die meisten Höhlen.
- Obenauf findet sich vor allem in einigen Bereichen der Schwändilflue noch eine Schicht Hohgantsandstein bzw. eine Abfolge von Quarzsandstein über Kalksandstein bis hin zu reinen Kalken (Eozän, etwa 40 Mio. Jahre).

2.4. Allgemeines über Karst

Karstlandschaften sind durch das Vorhandensein von löslichem Gestein, geringen oder keinen Oberflächenabfluss und Höhlen definiert. Der Begriff Karst stammt aus der Region Karas, einer Hochebene zwischen Slowenien und Italien. Charakteristisch für dieses Plateau ist eine Vielzahl an Dolinen (Abb. 2-6) und Bachschwinden (Ponoren), die Abwesenheit von Oberflächenwasser, schwindende Flüsse an der Grenze von Kalkstein und große Quellen an den tiefsten Punkten – an der Küste in der Nähe von Triest (Häuselmann, 2009).

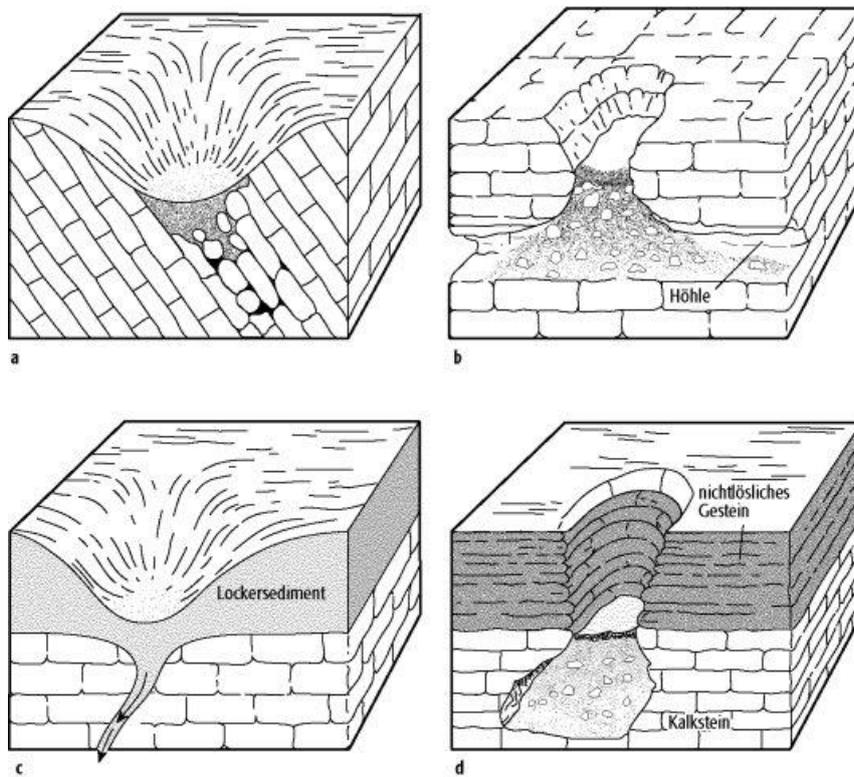


Abbildung 2-6: Unterschiedliche Ausprägungen einer Doline, a) Lösungsdoline, b) Einsturzdoline, c) Schwemmlanddoline, d) Sackungsdoline (Spektrum, 2016)

Etwa 20 % der Erdoberfläche sowie der Landesfläche der Schweiz werden vom Kalkstein eingenommen. Dieses Gestein ist in der Schweiz vor allem in der geologischen Großregion Jura, in den Voralpen sowie in einigen Gebieten der Alpen zu finden (Abb. 2-7) (SISKA, 2016).

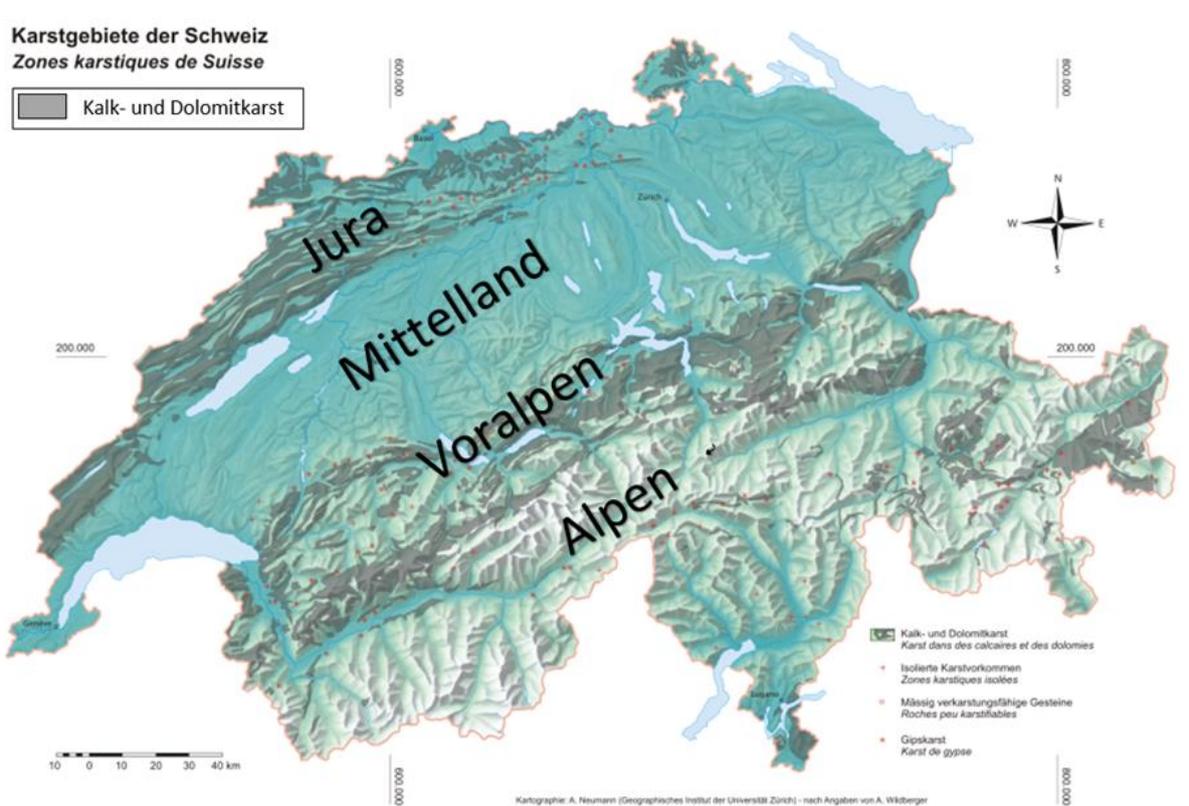


Abbildung 2-7: Karstverteilungskarte der Schweiz (Wildberger & Preiswerk, 1997)

99 % der vorhandenen Höhlen in der Schweiz befinden im Kalkgestein. Weltweit liegen etwa 95 % der Höhlen im Karst (Ford, et al., 1996). Diese Verteilung lässt sich auf die Löslichkeit des Kalkgesteins zurückführen.

Die Hauptbestandteile von Kalkgestein sind Calcit und Aragonit, und somit Calciumcarbonat (CaCO_3). Ein Liter chemisch reines Wasser löst bei einer Temperatur von 20°C etwa 13 mg Calcit. Durch die Reaktion des Niederschlagswassers mit dem in der Luft vorhandenem Kohlenstoffdioxid CO_2 entsteht eine stark verdünnte Kohlensäure (H_2CO_3). Diese ist in der Lage, 40 mg Calcit pro Liter zu lösen. Zusätzlich reichert sich Regen beim Durchfließen einer Humusschicht mit dem beim Abbau von organischem Material und durch die Photosynthese im Erdreich entstandenen CO_2 an. Die Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Bodenluft kann Werte von bis zu 25 % – das Siebenhundertfache der Konzentration in der atmosphärischen Luft – erreichen (Bögli, 1978). Diese nun höhere Konzentration an Kohlenstoffdioxid im Sickerwasser ist in der Lage, Calcit in wesentlich größeren Mengen zu lösen, und zwar bis zu 600 mg Calcit pro Liter (Pavuzza, 1986).

Dieses Wasser dringt entlang von kleinen Rissen und Fugen in das Kalkgestein ein. Entlang der Fließwege wird der Kalkstein nach und nach angegriffen und vergrößert dabei vorhandene Spalten über Jahrtausende zu Höhlenräumen. Trifft das Wasser auf eine wasserundurchlässige Schicht, wie zum Beispiel den Drusbergmergel, so bilden sich entlang

dieser Wasserkanäle im Gestein, die ebenfalls mit der Zeit vergrößert werden (Schudel, et al., 2002). Ist ein Höhlengang entstanden, wirkt auf diesen zusätzlich die Erosionskraft. Das einströmende Wasser transportiert Tone, Sand und Geröll mit in den Höhlengang. Diese wirken wie ein Schleifmittel entlang der Fließwege. Gerade nach Gewittern oder bei der Schneeschmelze sorgt dieser Effekt für starke Erosion (Häuselmann, 2004).

Die Region Siebenhengste-Schrattenflue ist noch vor der Höllochregion das Gebiet mit den meisten Höhlen der Schweiz.

3. Allgemeines über geohydrologische Markierungstechnik

Seitdem Forscher an der Erkundung unterirdischen Fließwegen interessiert waren suchten sie nach geeigneten Markierungsmitteln. Die ersten Versuche wurden mit Sägemehl unternommen. Doch es wurde schnell klar, dass man bei der Anwendung dieses natürlichen Markierungsmittels bald an die Grenzen der Einsatzmöglichkeiten stößt. Trifft zum Beispiel das Sägemehl auf seinem Weg durch den Berg auf Siphone, so wird dieser Bereich für das Sägemehl zu einem nicht überwindbaren Hindernis, da es aufgrund der geringeren Dichte auf der Wasseroberfläche treibt. Mit radioaktiven und fluoreszierenden Färbemitteln wurden neue Möglichkeiten in der Traceranalyse geschaffen (Käss, 1992).

3.1. Geschichte der Wasserfärbung

Die geohydrologische Markierungstechnik blickt auf eine lange Geschichte zurück. Die erste sichere Überlieferung eines gezielt durchgeführten Grundwassermarkierungsversuchs liegt etwa 1900 Jahre zurück. Der Schriftsteller Flavius Josephus übermittelte im Jahr 90 n. Chr. den Markierungsversuch des Tetrarchen Philippus von Trachonitis, der um 10 n. Chr. stattgefunden haben soll. Um die Quellzuflüsse des Jordans zu bestimmen, verwendete man die natürlich vorkommende Substanz Spreu. Nachdem sie in den Teich Phialo gestreut wurde, konnte die Spreu an einer Quelle, die aus dem Höhlensystem Panium tritt, nachgewiesen werden (Käss, 1992).

Der erste wissenschaftlich durchgeführte Markierungsversuch fand in Südwestdeutschland an der Donauversickerung zwischen Immendingen und Möhringen statt, durchgeführt durch den Geognosten Prof. A. Knop. Der erste Versuch, dem unterirdischen Fließweg der versickernden Donau nachzugehen, fand mit dem Farbstoff Anilinrot im Jahr 1869 statt. Dieser Versuch brachte jedoch keine Ergebnisse (Knop, 1875).

Acht Jahre später, im Oktober 1877, wurde der Versuch erneut durchgeführt. Um dieses Mal sicher zu gehen, setzte Knop gleich drei Markiermittel ein. Bei diesem Versuch wurden 12 Zentner Schieferöl, 200 Zentner Salz und 10 kg Natriumfluoreszein in die Dolinen eingebracht. Nach einer Fließzeit von zwei bis vier Tagen traten alle drei Mittel in der 12 km entfernten Aachquelle in Form von deutlich erhöhtem Chloridgehalt, kreosotartigem Geschmack und durch "prachtvoll grünleuchtendes" Wasser auf (Knop, 1878).

3.2.Arten von Markierungsmittel

3.2.1. Allgemeines

Generell werden Markierungsmittel in zwei Gruppen eingeteilt; in die der natürlichen und die der künstlichen Tracer. Natürliche Tracer sind Stoffe, die einen natürlichen Ursprung haben. Von künstlichen Tracern ist die Rede, wenn Stoffe, die problemlos und möglichst exakt an anderen Stellen nachgewiesen werden können, bewusst dem Wasser hinzugefügt werden. Die weitaus ältere Methode, um Fließwege zu erkunden, ist die mittels künstlichen Markierungsmitteln. Da es sich um einen Eintrag künstlicher Stoffe in das Untersuchungsgebiet handelt, müssen diese Tracer bestimmte Anforderungen erfüllen, um nachgewiesen werden zu können und das Untersuchungsgebiet nicht negativ zu beeinträchtigen:

- Chemische Stabilität (d. h. stabil gegen unterschiedliche chemisch ablaufende Reaktionen, Licht- und Temperatureinwirkungen und Abbau durch Mikroorganismen)
- Gute Wasserlöslichkeit
- möglichst geringe Sorptionseigenschaften
- Unbedenklichkeit für Mensch, Tier und Pflanze (Biozönose)
- Niedrige Nachweisgrenze
- Quantitativ gute Erfassbarkeit
- Abwesenheit in natürlichen Gewässern oder nur in minimalen Konzentrationen vorkommend
- Kostengünstig in der Anschaffung, im Einsatz und in der Analytik

(Käss, 1992; Schudel et al., 2002)

Da jeder Markierversuch seine eigenen Anforderungen und Eigenheiten hat, gibt es keinen idealen Markierstoff. Je nach Fragestellung und hydrogeologischer Situation wird ein geeigneter Tracer für das Untersuchungsgebiet ausgewählt. Zusätzlich muss bei Multitracerversuchen auch der traceranalytische Faktor betrachtet werden, da es beim Einsatz von mindestens zwei Fluoreszenzstoffen zu Störungen kommen kann.

Die Gruppe der künstlichen Markierungsstoffe kann folgendermaßen eingeteilt werden:

Wasserlösliche Markierstoffe

- Fluoreszenztracer
- Salze

Partikeltracer

- Fluoreszierende Kügelchen
- Bakteriophagen

Die oft sehr gute quantitative analytische Erfassbarkeit der Fluoreszenztracer und ihre einfache Anwendung machen sie zu der wichtigsten Gruppe der Markierungsstoffe. Die Statistik des Bundesamtes für Wasser und Geologie in der Schweiz bestätigt dies. So wurden 95 % der von 1992-2002 gemeldeten durchgeführten Markierungsversuche in der Schweiz mit Fluoreszenztracern durchgeführt (Schudel et al., 2002).

Die Fluoreszenz ist ein Teilgebiet der Lumineszenz und kann folgendermaßen definiert werden:

Als Fluoreszenz wird die spontane Emission von Licht bezeichnet, die beim Übergang eines elektronisch angeregten Systems zurück in einen Zustand niedrigerer Energie erfolgt. Dies geschieht, wenn Licht einer bestimmten Wellenlänge (Anregungswellenlänge) zum Beispiel auf ein Molekül trifft. Dabei werden Photonen absorbiert und Elektronen des Moleküls in ein energetisch höheres Orbital gehoben, also angeregt. Fallen sie von dort auf ihr ursprüngliches Niveau zurück, wird die freiwerdende Energie als Wärme und Photonen (Fluoreszenzlicht) abgegeben (Lichtscheidl, 2016).

Die elektromagnetische Strahlung umfasst einen Bereich von 10^{-15} bis 10^7 Wellenlänge [m]. Das für den Menschen sichtbare Spektrum, auch Licht oder Lichtspektrum genannt, befindet sich im Wellenlängenbereich von etwa $380\mu\text{m}$ (Ultraviolett) bis etwa $780\mu\text{m}$ (Chemie Information Service, 2016). Der Wellenlängenbereich von etwa $300\mu\text{m}$ bis $600\mu\text{m}$ wird für die Analyse in der Markiertechnik verwendet.

Es gibt eine große Anzahl an fluoreszierenden Markierungsstoffen, jedoch eignen sich nicht alle für die hydrogeologische Markierungstechnik. Die nachfolgende Liste soll einen Überblick über die am besten geeigneten und regelmäßig angewendeten Tracer geben:

- Uranin
- Eosin
- Natrium-Naphthionat
- Tinopal CBS-X
- Rhodamin B
- Amidorhodamin G

- Sulforhodamin G
- Rhodamin WT
- Pyranin
- Duasyn

3.2.2. Allgemeines über die in diesem Multitracerversuch eingesetzten Fluoreszenzfarbstoffe

Die im Zuge des vorliegenden Markierversuches eingesetzten Markierungsmittel sind Uranin, Eosin, Natrium-Naphthionat und Tinopal CBS-X. Nachfolgend werden diese Tracer und ihre Eigenschaften beschrieben.

3.2.2.1. Uranin

Uranin hat eine sehr gute Nachweisgrenze, seine Sorption ist gering, die Tracer-Rückgewinnung ist groß und aus toxikologischer Sicht ist es unbedenklich. Von allen bekannten Stoffen ist Uranin der am stärksten fluoreszierende. Diese Eigenschaften machen Uranin zum besten, in der Markierungstechnik unabdingbaren, Tracer. Uranin gilt als der am häufigsten eingesetzte Tracer. Bereits der erste wissenschaftlich durchgeführte Markierversuch im Jahr 1877 wurde erfolgreich mit Uranin durchgeführt.

Uranin ist, wie einige andere Fluoreszenzfarbstoffe, lichtempfindlich. Dadurch eignet es sich am besten für Markierungsversuche im Grundwasser. Bei Probennahme und Lagerung der Proben muss jedoch auf UV-Strahlungsschutz geachtet werden. Durch Oxidationsmittel, wie Chlor, Chlordioxid und Ozon, die häufig in der Trinkwasserversorgung zur Desinfektion verwendet werden, wird Uranin zerstört.

Die konzentrierte Eingabelösung ist dunkelrot gefärbt und fluoresziert nicht. Erst bei der Verdünnung mit Wasser kommt es zu einem selbsttätig ablaufenden Vorgang der Zerlegung der Moleküle (Dissoziation) in Natriumkationen und fluoreszierende Uraninanionen (Abb. 3-1) (Käss, 1992; Schudel et al., 2002).



Abbildung 3-1: Einbringen des Tracers Uranin; Eingabelösung: dunkelrot, Verdünnung: fluoreszierend grün

3.2.2.2. Eosin

Durch Bromierung von Fluoreszein entsteht Eosin. Es besitzt dadurch eine rote Färbung (Abb. 3-2). Im Vergleich zu Uranin hat es eine geringfügig höhere Sorptionsneigung. Aufgrund dieser Eigenschaft werden diese beiden Tracer gerne gemeinsam in einem Multitracerversuch eingesetzt. Mittlerweile wurden Verfahren entwickelt, um das Problem der gegenseitigen Störung bei der Auswertung zu beheben. Somit ist es möglich, die beiden Stoffe in einer Wasserprobe nebeneinander bestimmen zu können. Eosin ist etwas weniger pH-empfindlich als Uranin. Wegen der hohen Lichtempfindlichkeit ist der ideale Anwendungsbereich für diesen Markierstoff Grundwässer bzw. unterirdische Wassersysteme (Käss, 1992; Schudel et al., 2002).



Abbildung 3-2: Tracer Eosin direkt nach der Zugabe

3.2.2.3. Natrium-Naphthionat

Natrium-Naphthionat ist ein grau-rosa Pulver. Beim Einbringen in den Wasserkörper weist das Wasser ein irisierendes Blauviolett auf (Abb. 3-3). Bei weiterer Verdünnung ist der Tracer bis in einen hohen Konzentrationsbereich farblos. Dadurch ist die Gefahr einer Trinkwasser-Verfärbung relativ klein. Durch die Tatsache, dass die Sorptivität klein, aber durchaus nachweisbar, und ein durchwegs hoher störender analytischer Messhintergrund vorhanden ist, soll im Vergleich zu Uranin etwa die zehn- bis zwanzigfache Einspeisemenge verwendet werden. Natrium-Naphthionat ist besonders gut für kurze Fließstrecken geeignet (Käss, 1992; Schudel et al., 2002).



Abbildung 3-3: Irisierendes Blauviolett kurz nach der Eingabe des Tracers Natrium-Naphthionat

3.2.2.4. Tinopal CBS - X

Tinopal ist ein optischer Aufheller in hellgelber rieselfähiger Pulverform (Abb. 3-4). Durch die relativ große Sorptivität ist Tinopal am besten für weite Hohlräume im Karst und eher wenig für feinkörnige Porengrundwasserleiter geeignet. Weiteres ist der Markierstoff stark pH-empfindlich und vor allem in saurem Grundwasser nicht zu gebrauchen. Aufgrund des hohen analytischen Messhintergrundes wird eine große Einspeisemenge benötigt (Käss, 1992; Schudel et al., 2002).



Abbildung 3-4: Einbringen des hellgelben pulverförmigen Tinopals

3.2.3. Multitracerversuche

Kommen mehrere Tracer innerhalb eines Feldversuches zum Einsatz, spricht man von einem Multitracerversuch. Praktisch gesehen sind Multitracerversuche mit einem gleichzeitigen Einsatz von mehr als vier oder fünf Markierstoffen nur im Karst möglich (Schudel et al., 2002).

Dabei wird an mehreren Eingabestellen jeweils ein anderer Tracer eingebracht. Durch die Verwendung von unterschiedlichen Tracern in einem Versuch ist es möglich, die Aussagekraft eines Färbversuches bei nicht allzu großem Mehraufwand zu steigern.

Ausschlaggebend für einen erfolgreichen Multitracerversuch ist die gründliche Auswahl der Tracer und eine optimale Aufteilung auf die Eingabestellen. Die einzelnen Markierstoffe sind für unterschiedlichste hydrogeologische Milieus geeignet. Somit ist die Anzahl der gleichzeitig eingesetzten Tracer durch ihre spezifischen Eigenschaften begrenzt. Hier muss vor allem auf die Unterschiede in der Mobilität der Tracer und ebenso auf die traceranalytischen Aspekte geachtet werden. Besonderes Augenmerk ist auf Überlagerungen zwischen den Fluoreszenztracern und der Nachweisempfindlichkeit zu legen.

Treten mehrere Tracer in der gleichen Wasserprobe auf, ergeben sich bei der herkömmlichen Messmethode analytische Beeinträchtigungen, welche die Identifizierung und die quantitative Erfassung der Fluoreszenzfarbstoffe wesentlich erschweren oder im schlimmsten Fall sogar verhindern können. Wird in der Versuchsvorbereitung aber bereits diese Thematik berücksichtigt, können solche Interferenzen im Vorfeld minimiert oder sogar zur Gänze verhindert werden. Deshalb ist es ratsam, bereits in der Planungsphase ein Tracerlabor in die Entscheidungen über die Auswahl der Fluoreszenzstoffe und deren Eingabestellen miteinzubeziehen. Von besonderer Bedeutung ist auch die Entnahme und Analyse einer Blindprobe, die ebenfalls in der Planungsphase erfolgen soll.

3.2.4. Aktivkohle

Aktivkohle, auch bekannt unter dem Namen Fluorocaptor, besteht zum größten Teil aus Kohlenstoff mit hochporöser Struktur (Abb. 3-5). Die große innere Oberfläche von bis zu 2000 m²/g Kohle wirkt als Adsorptionsmittel. Somit können Geschmacks-, Geruchs- und Farbstoffe, damit auch Fluoreszenztracer, zurückgehalten, in der Aktivkohle gespeichert und ausgewertet werden. Beim Einsatz von Aktivkohlefiltern kann nur eine qualitative Ja/Nein-Aussage hinsichtlich des Vorhandensein eines Tracers, getätigt werden. Es lässt sich aber mit relativ wenig Aufwand feststellen, ob ein Tracer die betreffende Probenentnahmestelle passiert hat oder nicht. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Aktivkohle über den ganzen Beobachtungszeitraum dem Wasserkörper ausgesetzt ist und so Tracerspuren akkumuliert werden. Weiteres fallen die Anschaffungskosten relativ gering aus.

Um eine sinnvolle Aussage über auftretende Tracer mittels Aktivkohlefiltern tätigen zu können, ist es notwendig, die Aktivkohle ein paar Tage vor dem Farbstoffeintrag in den zu untersuchenden Wasserkörper zu hängen. Diese "Blindprobe" nimmt die Grundbelastung auf und dient bei der Auswertung als Referenzwert. Kurz vor dem geplanten Start des Markierversuches wird die "Blindprobe" gegen einen neuen Aktivkohlefilter ausgetauscht, der dann über die gesamte Dauer des Beobachtungszeitraums im Wasserkörper verbleibt. Durch die Tatsache, dass sich die Aktivkohle über einen längeren Zeitraum im Wasser befindet und es naturgemäß zu unterschiedlich starken Abflüssen kommt, ist es notwendig, einen sorgfältig ausgewählten Probennahmeort für die Aktivkohle zu finden. Der Fluorocaptor sollte so platziert sein, dass er bei niedrigem Abfluss nicht trockenfällt und bei starkem Abfluss auch nicht von der Strömung mitgerissen wird. Dies erweist sich in der Praxis jedoch nicht immer als leicht umsetzbar und so kommt es oft zu hohen Verlusten bei den Aktivkohlefiltern.

Die Aktivkohle stellt eine sinnvolle Ergänzung zur direkten Beprobung dar. Zum Beispiel als zweite Informationsquelle oder zur Beprobung schwer zugänglicher Entnahmestellen (BWG, 2002).



Abbildung 3-5: In Nylonsäckchen verpackte Aktivkohle

4. Frühere Markierversuche ¹

Nach dem Zweiten Weltkrieg benötigte Interlaken, eine Schweizer Stadt im Kanton Bern, eine neue Wasserversorgung. Nach einigen Versuchen, Wasserwege mit Sägemehl zu erkunden, fand 1946 der erste echte, dokumentierte Wasserfärbversuch statt. Eingespeist wurde Natrium-Fluoresceine im Häliloch im Beatenberg. 17 Quellen wurden beobachtet. Der Tracer war nach 30 Stunden eindeutig in der St. Beatus-Höhle sichtbar. Der Farbstoff strömte aus zwei Flüssen der Beatus-Höhle zu. Die Fließgeschwindigkeit betrug gerade einmal 111m/h, was für frei fließendes Karstwasser eher langsam ist. Von diesem Färbversuch existieren nur handgeschriebene Manuskripte von Franz Knuchel (Häuselmann, 2002).

Der bislang einzig bekannte Färbversuch in der Schrattenflue fand 1970 statt. Er wurde ebenfalls von Franz Knuchel organisiert und ist gut dokumentiert. Am 06. Juni 1970 um 17:20 Uhr hieß es "Die Farbe läuft". Im südöstlichen Teil der unteren Hälfte der Schrattenflue wurden 40 kg Sulforhodamine eingespeist. (640 850 / 186 450 / 1623 (CH1903)) Fast alle bekannten Quellen um die Schrattenflue wurden beprobt. Nach einer Fließzeit von 38 Stunden, einer horizontalen Distanz von 20,8 km und einer Höhendifferenz von 980 m trat rotgefärbtes Wasser aus dem Höhlenbach bei Sundlauenen in den Thunersee auf (627 700 / 170 400 / 555). Ebenso trat diese Färbung beim etwa 110 m östlich von Sundlauenen gelegenen Gelbenbrunnen zutage. Daraus ergibt sich eine Fließgeschwindigkeit von 544 m/s. Dies bestätigte, dass das Wasser der Schrattenflue, mehr als 20,8 km entfernt, das Tal der Emme unterwandert und in der Bätterich-Quelle sowie im Thunersee unter der Wasseroberfläche aus dem Höhlenbach wieder zum Vorschein kommt (Abb. 4-1). Die schnelle Fließgeschwindigkeit lässt sich durch frei fließende Bedingungen und den zur Zeit des Tracerexperiments starken Abfluss aus der Schneeschmelze erklären (Häuselmann, 2002; Knuchel, 1972).

Der letzte Multitracerversuch in der Periode bis 2001 wurde 1996 in der Gemmenalp durchgeführt. Während die Einzugsgebietsgrenzen der St. Beatus Höhle nach SO und NW relativ gut gezogen werden können (die Hohgant-Sundlauenen-Verwerfung im SO, Balmholz im SW und die Klippen im NW), gibt es keine ausgeprägten morphologischen Grenzen zu den Siebenhengsten nach NO zu. Um einen Überblick über das Wassereinzugsgebiet zu

¹ In dieser Arbeit wird nur auf die für die Region Schrattenflue relevanten Tracerexperimente eingegangen. Alle weiteren Tracerexperimente zwischen 1946 bis 2001 können in der Doktorarbeit von Philipp Häuselmann "Cave Genesis and its relationship to surface processes: Investigations in the Siebenhengste region" nachgelesen werden.

erhalten, wurden sieben Eingabestellen und somit auch sieben Farbstoffe (je 200 gr Lissamin, Pyranin, Eosin, Duasyn, Sulforhodamin, 1 kg Fluorescein und 2 kg Naphthionat) gewählt. Um die größtmögliche Kenntnis über die Einzugsgebietsgrenzen zu gewinnen, wurden alle umliegenden Quellen und Gebirgsbäche beprobt. Es konnten sieben Tracer nachgewiesen werden. Somit konnte eine neue hydrogeologische Karte der eingefärbten Region gezeichnet werden. Durch den Nachweis von zwei Tracern in der Beatushöhle wurde beispielsweise das Einzugsgebiet gegen Norden deutlich erweitert (Häuselmann, 2003).

In der Schwändiliflue wurden bislang keine Färbeversuche durchgeführt. Aus diesem Grund wurde in den Tracerversuch, der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurde, auch dieser Bereich miteinbezogen. Ziel war es, erste Erkenntnisse über das Abflussverhalten, eventuell vorhandene hydraulische Verbindungen und Höhlensysteme der Schwändiliflue zu erlangen.

Färbung Schrattenfluh

Längenprofil: 5mal überhöht

Färbung	640 850 / 186 450 / 1530	Beginn: 6. 6. 1970	17.20 Uhr
Farbaustritt	627 700 / 170 400 / 550	Beginn: 8. 6. 1970	7.20 Uhr
Laufzeit	38 Stunden		
Luftlinie	Horizontale Distanz: 20,8 km	Mittleres Gefälle: 4,7 ‰	
	Höhendifferenz: 980 m	Mittlere Geschwindigkeit: 0,15 m/sec	

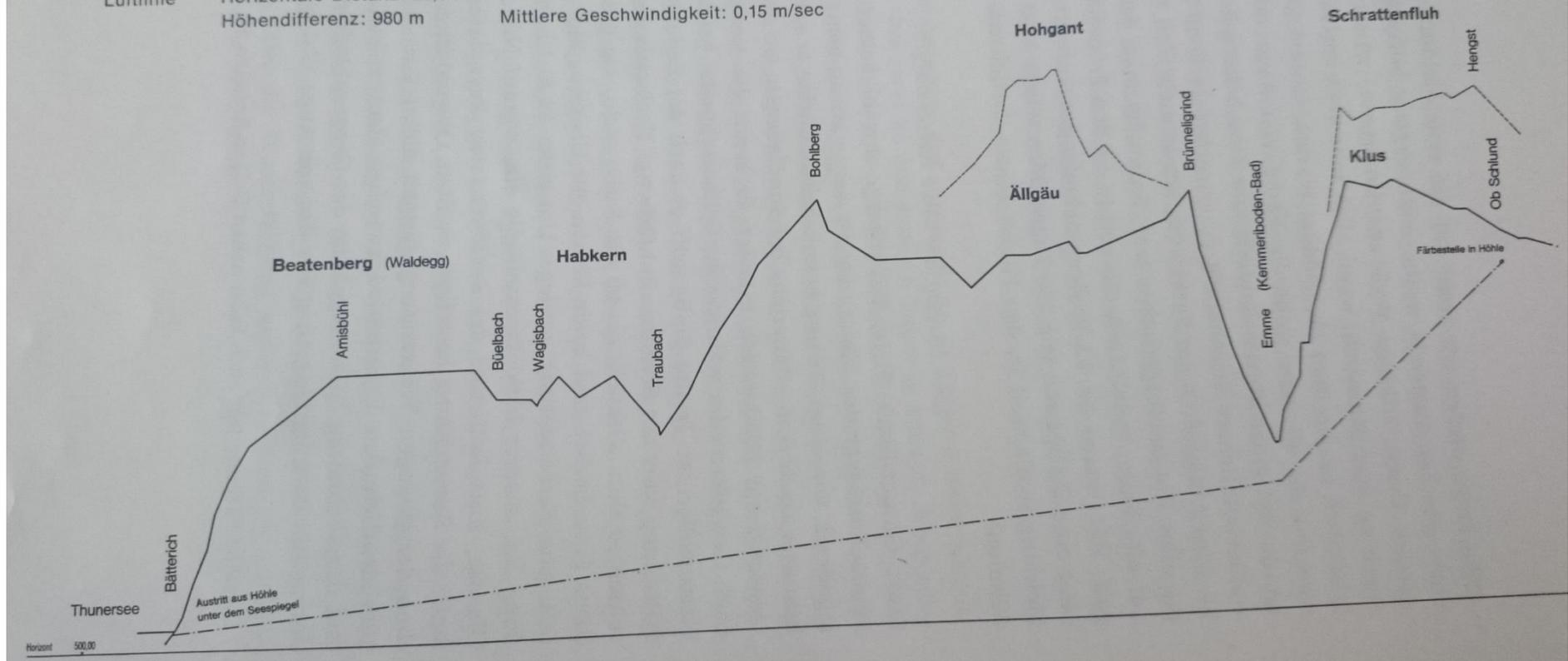


Abbildung 4-1: Mit der Färbung 1970 nachgewiesener Fließweg von der südlichen bis mittleren Schrattenflue in den Thunersee (Strichlierte Linie)

5. Organisation der Wasserfärbung 2015

Nach der Färbung 1970 war klar, dass der mittlere und südliche Teil der Schrattenflue unter dem Emmental hindurch in den Thunersee, über den Bätterich und den Gelbenbrunnen entwässert. Unklar war weiterhin, wie weit sich dieses Einzugsgebiet in den NO erstreckt, und ob auch der nördliche Teil dieses imposanten Karrenfeldes zu dem System gezählt werden kann. Wie eingangs erwähnt, ist die langgestreckte Zone zwischen dem Nordende der Schrattenflue bis auf den Pilatus noch nie Gegenstand eines Färbversuches gewesen. Deshalb sollte (im Rahmen dieser Arbeit) eine Färbung in der Schwändiliflue sowie im Nordosten der Schrattenflue durchgeführt werden.

Nach der Wasserfärbung in der Gemmenalp im Jahr 1996 erstellte Häuselmann für alle künftigen Wasserfärbungen einen Leitfaden für die Organisation eines Färbversuches. Auch in diesem Multitracerversuch diente die Publikation "Wasserfärbung 1996: Die Organisation" als Grundlage für Organisation, Planung und Ablauf. Die nachfolgenden Unterkapitel stützen sich auf den von Häuselmann verfassten Erfahrungsbericht.

5.1. Feldbegehungen

Wie bereits beschrieben, sind für eine Wasserfärbung Schlucklöcher und Quellen vonnöten. Deshalb wurde zunächst im Zuge mehrerer Feldbegehungen nach Schlucklöchern, die sich für die Eingabe von Tracern eignen, und nach entsprechenden Quellen für die Probennahme gesucht.

Der Zeitpunkt des Markierversuches sowie die dazu notwendigen Feldbegehungen sollten gut geplant sein. Da die Quellen in Karstgebieten zumeist eine temporäre oder stark unterschiedliche Schüttung aufweisen, sollte die Feldbegehung zu günstigen Abflussverhältnissen durchgeführt werden. Fließt zu wenig bis gar kein Abfluss, ist ein Tracerversuch nicht möglich. Sind die Abflüsse jedoch zu stark, fließt das Wasser über die Schlucklöcher hinweg. Zusätzlich kann es passieren, dass die Entnahmestellen bei zu hoher Wasserführung erst gar nicht erreichbar sind oder nicht sicher beprobt werden können. Als geeigneter Zeitpunkt bietet sich der Spätfrühling bzw. der Frühsommer an. Dann sind die Eingabestellen meist schon schneefrei, während es trotzdem noch genug Schneefelder gibt, die den notwendigen Abfluss gewährleisten. Somit ist der Zeitpunkt der Färbung von besonderer Bedeutung, ja sogar der entscheidende Faktor.

Im Zuge der Feldbegehungen wurde bei der Auswahl der Färbepunkte und Entnahmestellen auf Zugänglichkeit, Abflussmengen und -verhältnisse sowie auf geologische und tektonische

Gegebenheiten geachtet. Gerade die Zugänglichkeit der Einspeisepunkte ist von großer Bedeutung, da die Tracer zu den Schlucklöchern bzw. Dolinen transportiert werden müssen.

Nach mehreren Feldbegehungen wurden vier geeignete Einspeisepunkte und elf Entnahmestellen ausgewählt.

5.2. Auswahl der Tracer und Abschätzung der Einspeisemenge

Nach der Lokalisierung der Eingabe- und Beprobestellen wurde mit dem Tracerlabor Nano Trace Technologies Kontakt aufgenommen. Das Tracerlabor Nano Trace, früher Hydrologiebüro Oetz in Bellmund, war bereits am Multitracerversuch 1996 im Gebiet Gemmenalp beteiligt und somit der ideale Ansprechpartner für den aktuellen Markierversuch. Durch die Betreuung des Multitracerversuches 1996 und seine Beteiligung bei weiteren Tracerversuchen im Südwesten der Region Zentralschweiz war das Team mit den hydrogeologischen Verhältnissen vor Ort bestens vertraut.

Die Annahme einer Fließdauer diene als Grundlage für die Festlegung der Beprobungsdauer. Da es für Karstgrundwasserleiter nur unzureichende Kalkulationsmethoden zur Abschätzung der Fließzeit gibt, sind Erfahrungswerte aus früheren Markierversuchen die beste Methode, um die Aufenthaltszeit zwischen Einspeise- und Austrittsort abschätzen zu können und die Probenahme effizient und sinnvoll zu planen. Der aktuelle Versuch orientierte sich an früheren Färbversuchen, vor allem an dem im Jahr 1970 durchgeführten. Dabei war eine Fließgeschwindigkeit von bis zu 544 m/s ermittelt worden.

5.3. Auswahl der Tracer und Bestimmung der Einspeisemenge

Wie eingangs erwähnt, sollten für diesen Tracerversuch die Tracer Uranin und Eosin zur Einspeisung in der Schrattenflue und für die Tracer Tinopal CBS-X und Na-Naphthionat zur Einbringung in der Schwändiliflue eingesetzt werden. Aufgrund der Ergebnisse aus dem Tracerversuch 1970 wurde angenommen, dass die eingebrachten Tracer in der Schrattenflue eine Fließstrecke von etwa 20 km bis in den Thunersee zurücklegen. Uranin und Eosin haben eine relativ geringe Sorptionsneigung und werden dadurch oft gemeinsam in einem Multitracerversuch eingesetzt. Mit modernen Auswertungsverfahren kann das Problem der gegenseitigen Störung behoben werden. So können beide Tracer heute problemlos in einer Wasserprobe vorkommen. Aufgrund ihrer geringen Sorption und ihrer hohen Nachweisgrenze wurden Uranin und Eosin auch für den Einsatz in der Schrattenflue gewählt (Käss, 1992, Schudel et al., 2002). Wegen der größeren Verluste über weitere Strecken durch die höhere Sorptivität wurden Natrium-Naphthionat und Tinopal CBS-X in der

Schwändiliflue eingebracht. Es wurde angenommen, dass die Tracer nach Einspeisung in der Schwändiliflue im Chessloch vom Vorschein kommen. Dies entspricht einer Fließstrecke von etwa 1 bis 3 km.

Eine eindeutige bzw. sichere Berechnungsformel zur Ermittlung der Einspeisemenge existiert nicht. Daher sind Erfahrungswerte von hoher Bedeutung. Bei zu geringen Mengen kann der gesamte Versuch scheitern, zu große Tracermengen führen hingegen zu einer unnötigen Gewässerbelastung und verursachen eine langfristige Tracerkontamination des Grundwasserleiters.

Die nachstehende Faustformel von KÄSS (1992), WERNLI (1994) und WORTHINGTON (2001) dient als Orientierungshilfe und zur groben Abschätzung der Einspeisemenge:

Formel 5-1: Formel zur groben Abschätzung der Einspeisemenge

$$M = \alpha * L * A$$

M = Einspeisemenge [g]

α = Korrekturfaktor für den Markierstoff [g/m] vgl. Tabelle 5-1

L = Distanz [m]

A = Anpassungsfaktor für Aquiferverhältnisse [-], vgl. Tabelle 5-2

Fluoreszenz-Tracer	α	Salz-Tracer	α	Partikel-Tracer	α
Uranin	1	Natriumchlorid NaCl	10^4	Phagen (Anzahl Phagen)	10^{12}
Eosin	2-3	Kaliumbromid KBr	$3 \cdot 10^3$ bis $5 \cdot 10^3$	Mikrokügelchen	10^{12}
Amidorhodamin G	2	Lithiumchlorid LiCl	10^3		
Sulforhodamin B	4				
Pyranin	5				
Naphthionat	15				
Tinopal	25				
Duasyne	4				

Tabelle 5-1: Korrekturfaktoren α für den eingesetzten Markierstoff [g/m]

Porengrundwasserleiter	Kluftgrundwasserleiter	Karstgrundwasserleiter
bei k-Wert $>10^{-3}$ m/s: $A = 0.25 \cdot \text{Grundwassermächtigkeit [m]}$	Allgemein: $A = 0.2 \text{ bis } 2$	Allgemein: $A = 0.2 \text{ bis } 1$
bei k-Wert zwischen 10^{-3} und 10^{-4} m/s: $A = 0.5 \cdot \text{Grundwassermächtigkeit [m]}$	bei voraussichtlichem Ausbreitungswinkel $> 60^\circ$: $A = 2 \text{ bis } 4$	Bei Karstverbindungen von Bachversinkung zu Quelle: $A = 10 \cdot (Q/100)^{0,93}$ (Q= Quellschüttung in m^3/s)
bei k-Wert $< 10^{-4}$ m/s: $A = \text{Grundwassermächtigkeit [m]}$		

Tabelle 5-2: Anpassungsfaktor A für unterschiedliche Aquiferhältnisse [-]

Der Faktor der Erfahrung mit Einspeisemengen in einem Untersuchungsgebiet spielt eine sehr große Rolle, da so die Menge des eingesetzten Tracers am besten eingeschätzt werden kann. Nach Rücksprache mit dem Tracerlabor Nano Trace Technology wurden folgende Einspeisemengen (für den Tracerversuch) gewählt:

Färbemittel	Menge [kg]
Tinopal CBS-X	20
Natrium-Naphthionat	50
Eosin	15
Uranin	15

Tabelle 5-3: Die mithilfe des Tracerlabors Nano Technologies gewählten Einspeisemengen der Tracer

Nach Berechnung der Eingabemenge der einzelnen Tracer mit der Formel 5.1 unter Berücksichtigung der in Tabelle 5-4 angenommenen Fließdistanzen erhält man folgende Ergebnisse (Tab. 5-5):

Färbemittel	angenommene Fließdistanz [m]
Tinopal CBS-X	4000
Natrium-Naphthionat	1000
Eosin	20000
Uranin	20000

Tabelle 5-4: Angenommene Fließdistanzen

Färbemittel	errechnete Eingabemenge [kg]
Tinopal CBS-X	62
Natrium-Naphthionat	21
Eosin	13
Uranin	19

Tabelle 5-5: mittels Formel 5-1 ermittelte Einspeisemengen

Vergleicht man die Erfahrungswerte des Tracerlabors und die errechneten Eingabemengen, so lässt sich gut erkennen, dass die Tracer Uranin und Eosin durchaus in der gleichen Größenordnung liegen. Die errechneten Mengen der Färbemittel Tinopal CBS-X und Natrium-Naphthionat weichen jedoch um 30 – 40 kg von den vom Tracerlabor empfohlenen Mengen ab. Dies entspricht einer Abweichung von bis zu 300 %. Da auch die Menge der eingesetzten Tracer über Erfolg oder Misserfolg eines Markierversuches entscheidet, ist das Aufsuchen eines qualifizierten und erfahrenen Tracerlabors unumgänglich.

5.4. Einspeisepunkte

Aufgrund der hydrogeologischen Verhältnisse wurden vier Einspeisepunkte ausgewählt; zwei in der Schwändiliflue und zwei in der Schratzenflue (Siehe Abbildung 5-6).

Die erste Einspeisestelle *Hurbele* ("Hur") befindet sich im nördlichen Bereich der Schwändiliflue auf 1676 m ü. A., etwa 70 Meter nordwestlich der Berghütte Hurbele. Der Abfluss betrug zum Zeitpunkt der Färbung etwa 5 l/s und verschwand in einer typischen Doline mit einem Durchmesser von 1.5 m. (Abb. 5-1).



Abbildung 5-1: Eingabestelle Hurbele

Die zweite Einspeisestelle "Rüchi" befindet sich am südlichen Ende der Schwändilflue auf einer Seehöhe von 1421 m. (Abb. 5-2) In diesem Bereich fand man im Umkreis von etwa 80 m gleich drei Stellen, die geeignet waren, den Farbstoff einzubringen (Abb. 5-3).

Die erste Stelle war ein Bächlein, das von Westen nach Osten floss und einen Abfluss von 10 – 15 l/s aufwies. Auf einer Länge von etwa 30 m 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 deutlich ausgeprägten Schlucklöchern verschwanden.



Abbildung 5-2: Eingabestelle Rüchi

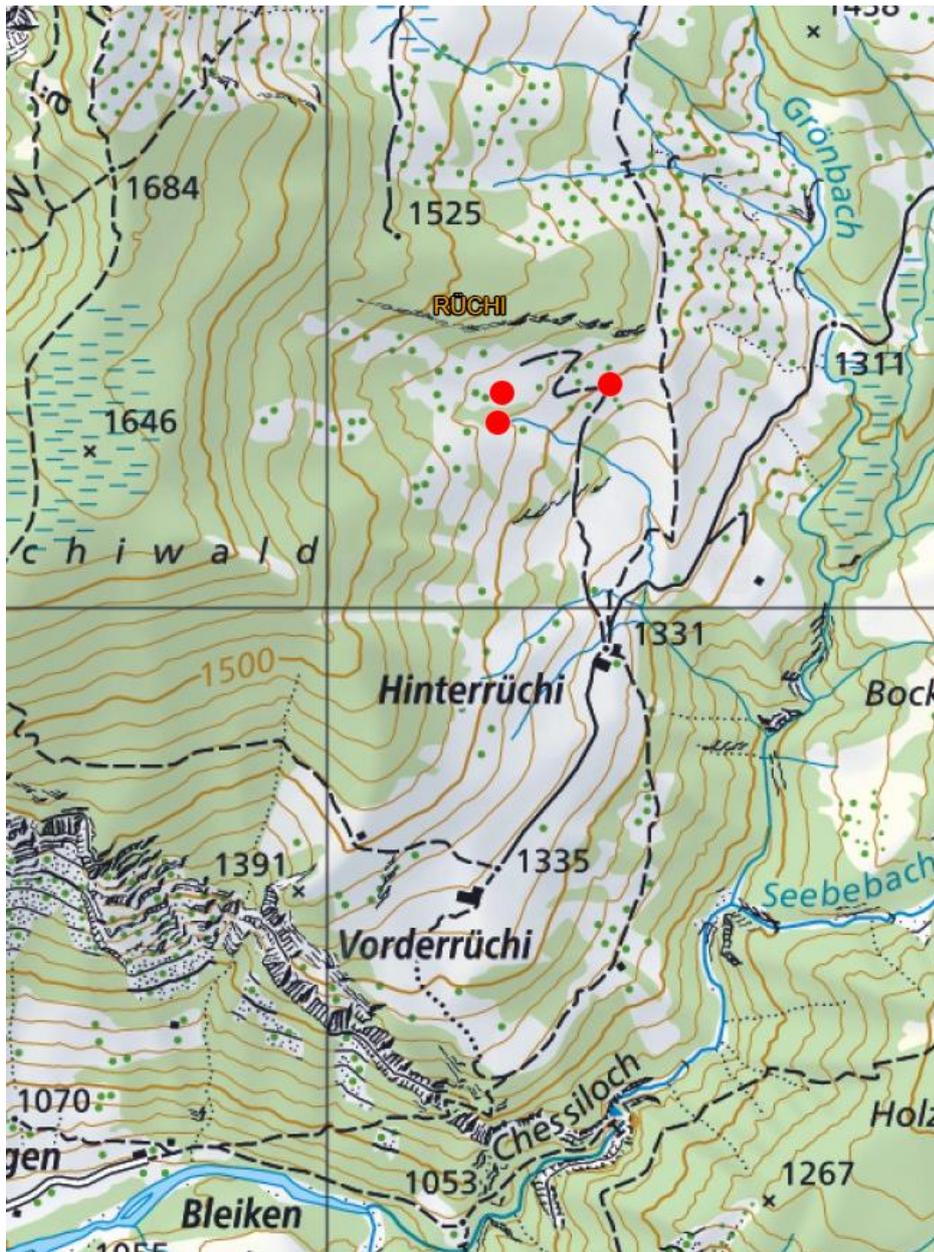


Abbildung 5-3: Kleinerer Maßstab der Einspeisestelle "Rüchi", der die Lage der drei Einspeisepunkte genauer darstellt

In der Schratzenflue wurden die verbleibenden zwei Einspeisestellen Dürrütli („*DUER*“) und Cheiserschwand („*CHE*“) gefunden (Abb. 5.4 und Abb. 5.5). Die Einspeisestelle Dürrütli liegt auf einer Höhe von 1395 m ü. A. im nordöstlichen Bereich der Schratzenflue und befindet sich etwa 230 Meter talabwärts der Hütte Dürrütli, die namensgebend für die Färbepunkte war. Das Bächlein fließt mit einem Abfluss von etwa 2 l/s entlang einer recht großen Senke mit einem Durchmesser von etwa 7 m und verschwindet am tiefsten Punkt der Senke in einem Schluckloch (Abb. 5-4).

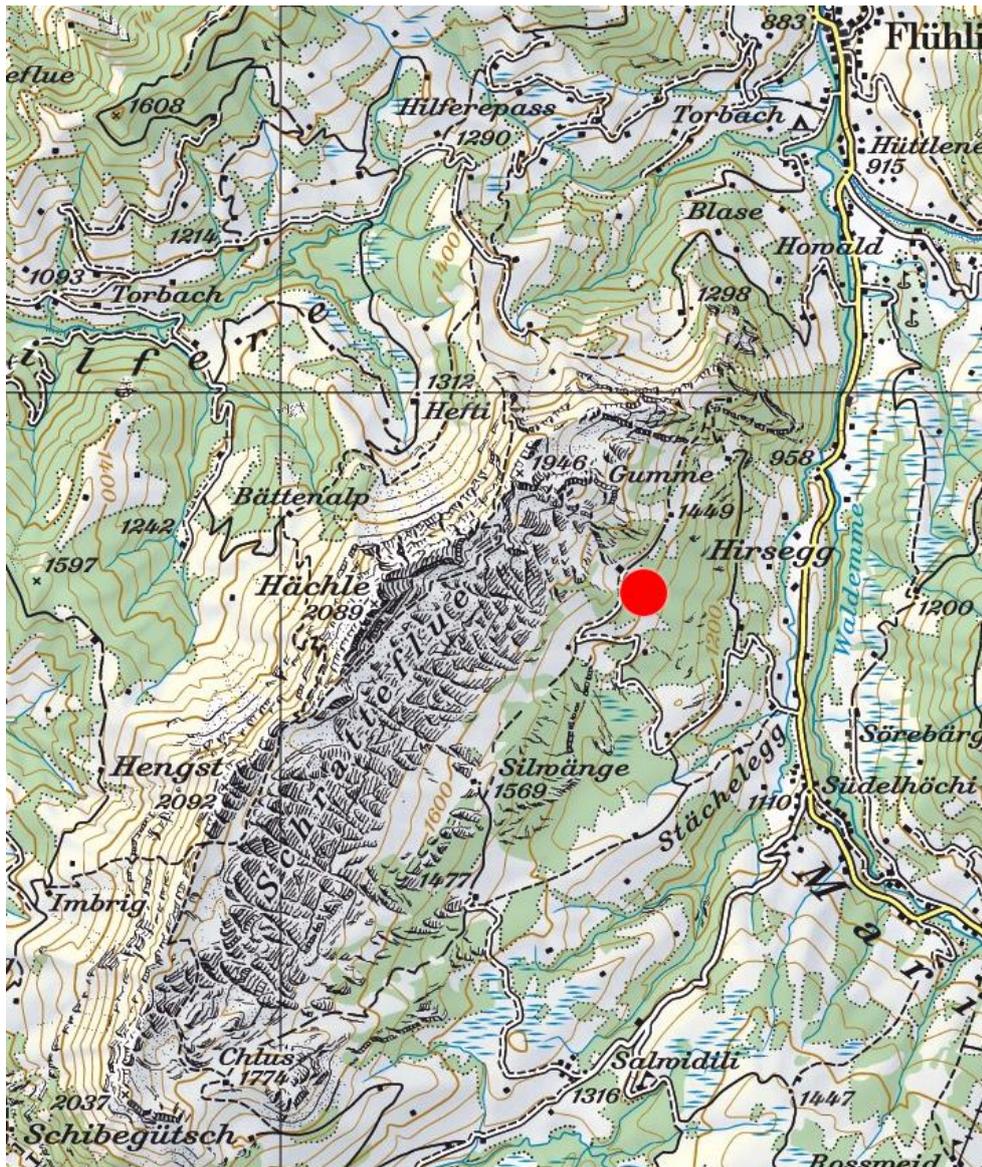


Abbildung 5-4: Eingabestelle Dürrütli

Der vierte und letzte Einspeisepunkt Cheiserschwand „CHE“ befindet sich in der Schratteflue auf 1280 m ü. A., etwa 1,2 km südlich der Färbestelle Dürrütli und etwa 400 m südwestlich der Hütte Cheiserschwand die wiederum namensgebend für die Einspeisestelle war. Das Bächlein, das sich im bewaldeten Bereich der Schratteflue befindet, hatte zum Zeitpunkt der Begehung einen Abfluss von etwa 8 l/s (Abb. 5-5).

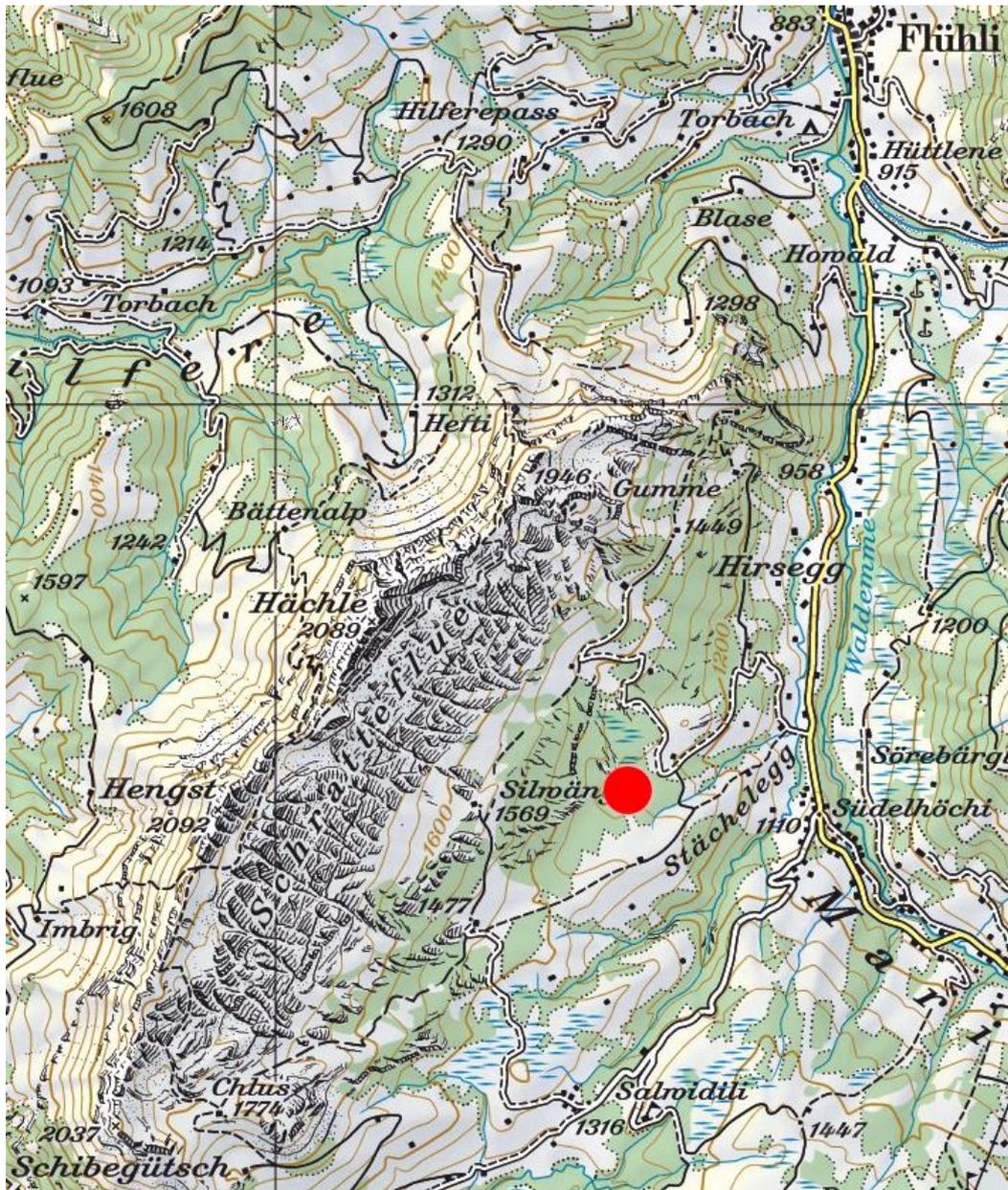


Abbildung 5-5: Eingabestelle Cheiserschwand

Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die Lage der vier Einspeisepunkte:

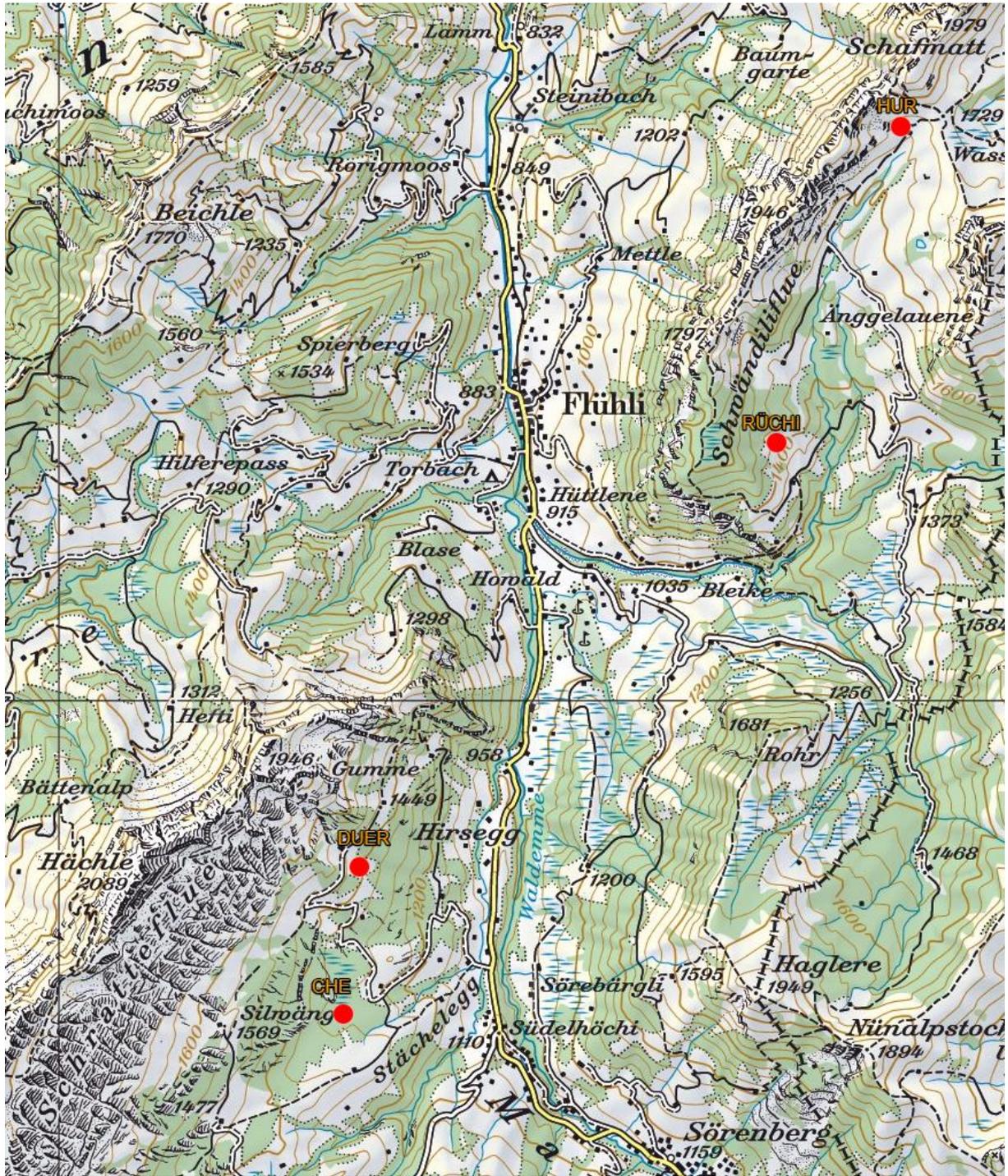


Abbildung 5-6: Überblick über die Lage aller vier Einspeisepunkte

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 5-6) gibt Details der vier Einspeisepunkte wieder.

Ort / Beschreibung	Kürzel	Koordinaten		m.ü.M.	Q (l/s)	Färbemittel	Menge [kg]
		CH1903 / LV03			am 23.Mai 2015		
Hurbele	HUR	647'323	195'026	1668	5,0	Tinopal CBS-X	20
Schluckloch 1	RÜCHI	646'241	192'298	1427	0,5	Natrium - Naphthionat	5
Bächlein (Abfluß verliert sich diffus im Bachbett)		646'236	192'261	1421	10-15		35
Schluckloch 2		646'393	192'310	1394	0,5		10
Dürrütli	DUER	642'614	188'533	1395	2,0	Eosin	15
Cheiserschwand	CHE	642'470	187'250	1280	8,0	Uranin	15

Tabelle 5-6: Details zu den Eingabestellen

5.5. Entnahmestellen

Im Zuge der Feldbegehungen zur Ermittlung der Eingabestellen wurde am Fuße der Schratten- sowie der Schwändiliflue auch nach geeigneten Quellen für die Probenahme gesucht. Das Auffinden geeigneter Entnahmestellen bzw. potentieller Austrittstellen der Tracer erweist sich oft als schwieriger als das Lokalisieren entsprechender Einspeisestellen. Wie bereits in Kapitel 5.1. beschrieben, ist der Zeitpunkt der Beprobung von entscheidender Bedeutung. Grundsätzlich sollten auch Oberflächenflüsse und Bäche, die aus dem Einzugsgebiet abfließen, beprobt werden, um ein Verpassen der Markierstoffe zu vermeiden.

Aufgrund der Erkenntnisse über das Abflussverhalten der Schrattenflue aus der Färbung 1970 wurden die zwei bekannten Quellen, Harderquelle (HAR) und Gelbenbrunnen (GLB) am Thunersee, beprobt (Abb. 5-8). Am nordöstlichen Ende der Schrattenflue, an den Ufern des Südelbaches, etwa 60 m flussab der Brücke zu Ruchschwand, wurden bei den Feldbegehungen zwei Quellen entdeckt. Diese erwiesen sich als temporäre Quellen und mündeten 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. Bei einem bis zwei aufeinanderfolgenden niederschlagsfreien Tagen fallen diese Quellen trocken (Abb. 5-7). Ähnlich verhält sich die Quelle AHO. Sie tritt bei Niederschlag am orographisch rechten Ufer zutage, versiegt jedoch nach niederschlagsarmen Perioden. Sie befindet sich vis-a-vis dem Hof Ahornli (Abb. 5-7).

Um ein unkontrolliertes Entweichen des Farbstoffes aus der Schrattenflue zu verhindern, wurden auch die aus dem Gebirge fließenden Wasserläufe Südelbach (SUD) und Waldemme (WAL) beprobt (Abb. 5-7).

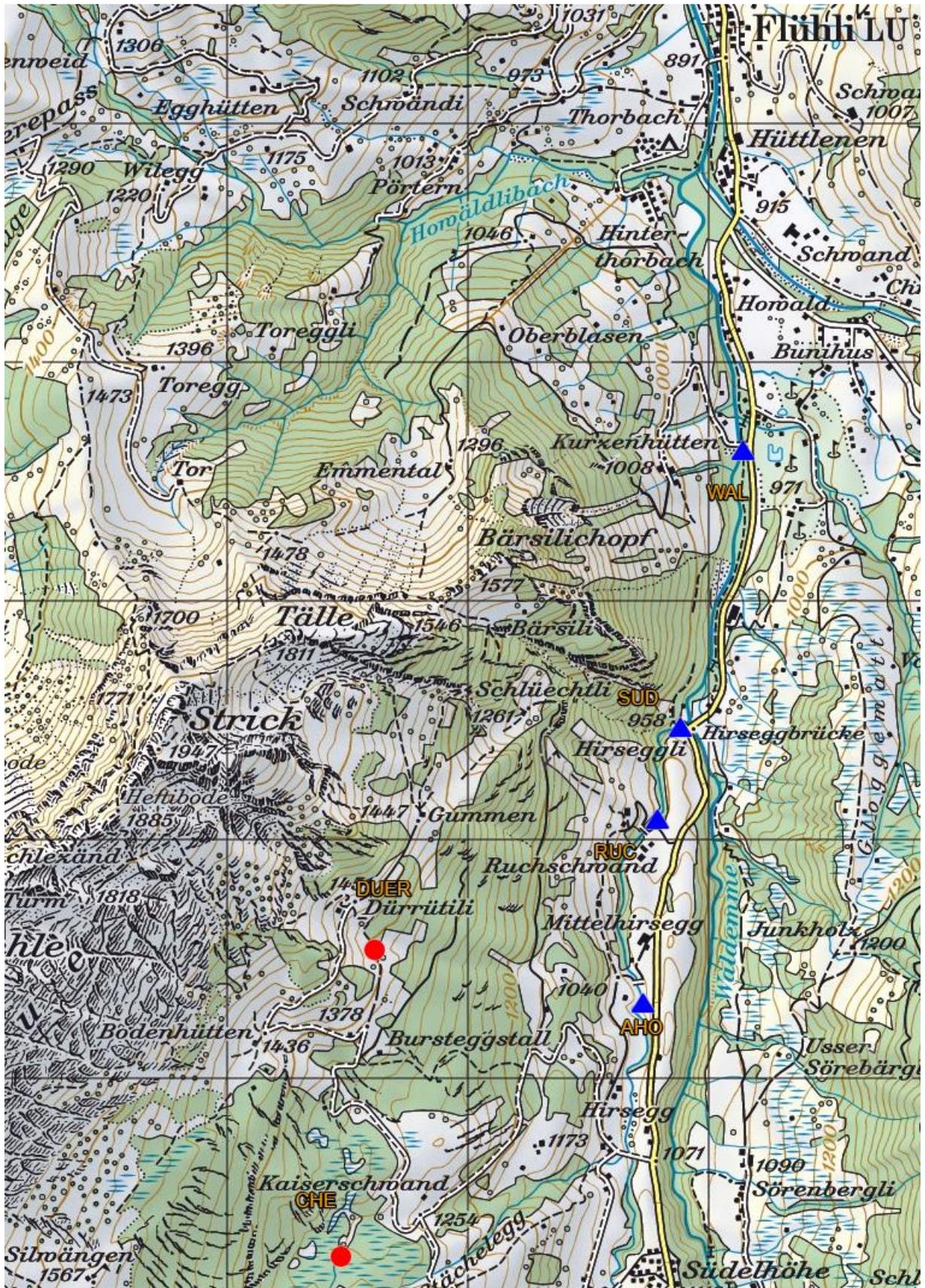


Abbildung 5-7: Überblick über die Entnahmestellen nordöstlich der Schratteflue

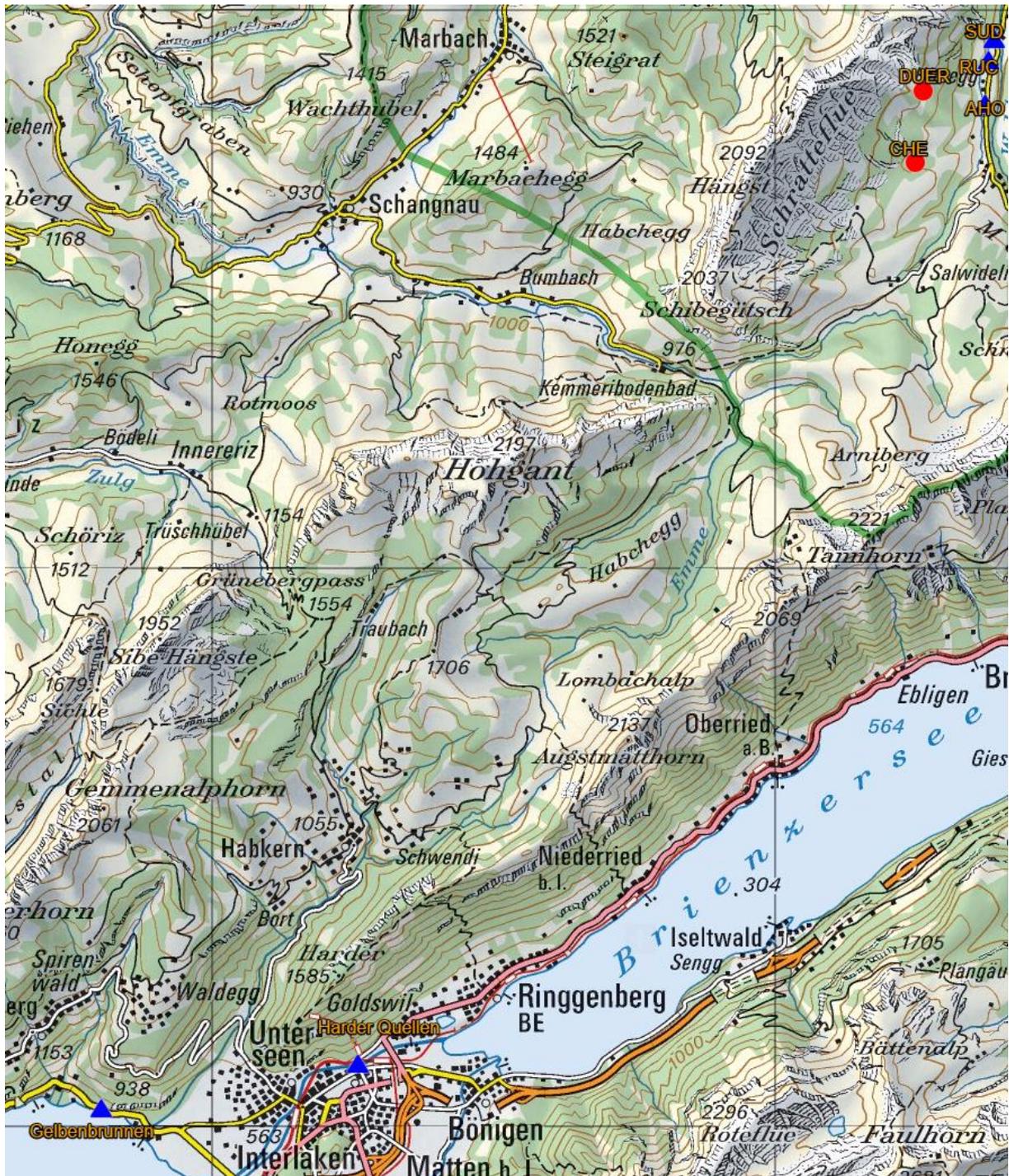


Abbildung 5-8: Entnahmestellen Gelbenbrunnen und Harder Quelle im Süden des Untersuchungsgebietes

Im Bereich der Schwändilflue befinden sich fünf weitere Entnahmeorte. Auch diese wurden durch Probennahme in regelmäßigen Intervallen überwacht. Zwei Entnahmeorte befinden sich in der Nähe des Chessilochs, welches am südlichen Fuß der Schwändilflue liegt. Diese waren der Seebenbach (SEB), vor der Mündung des Rotbaches in denselben, und etwa 250

flussaufwärts der Brücke bei Wanegg, die über den Eibach führt. Sie befindet sich auf der orographisch linken Seite der Großen Entle, welche ebenfalls beprobt wurde (GRE). 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 als Trinkwasserfassung für die Stadt Luzern gefasst ist.

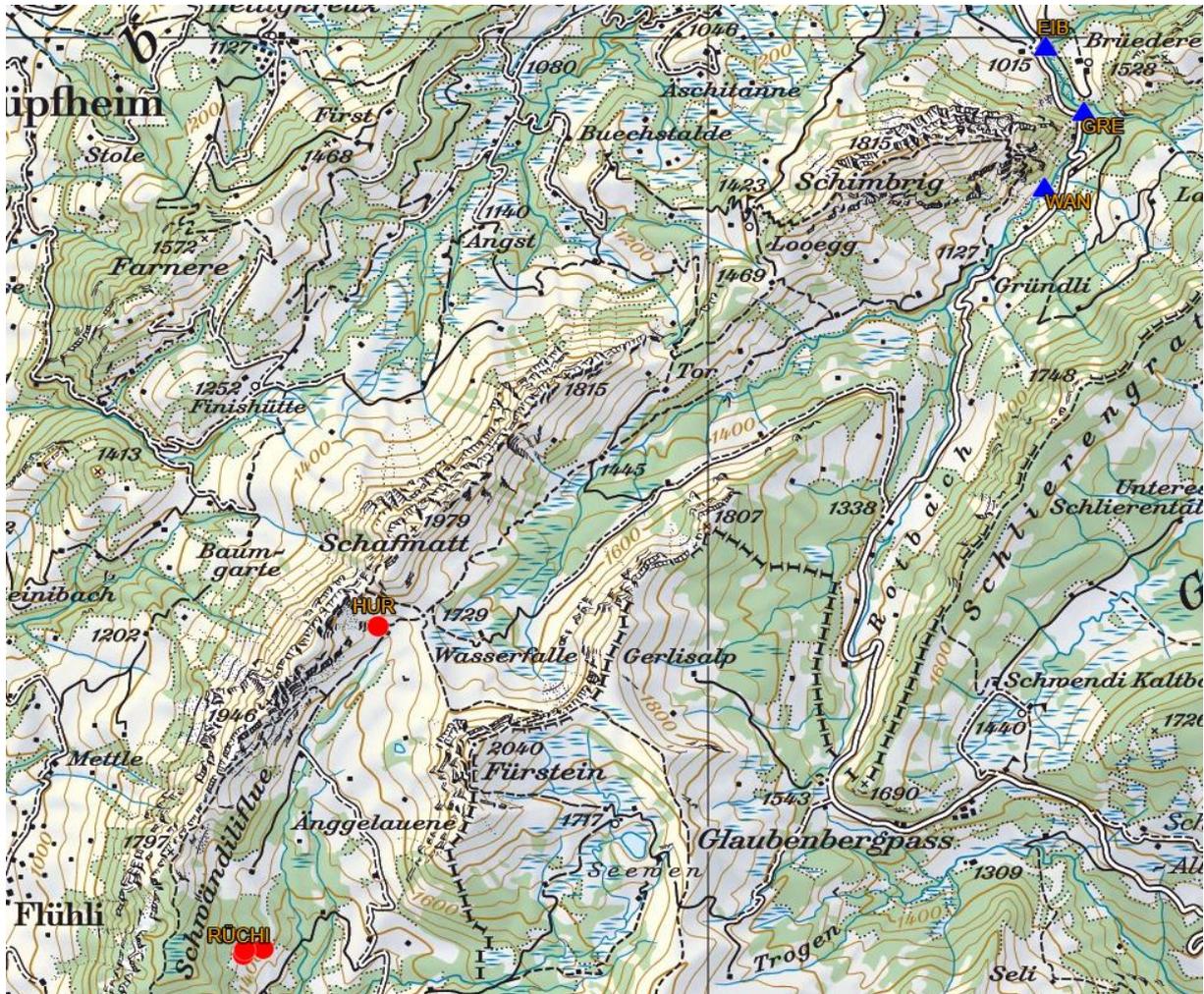


Abbildung 5-10: Überblick über die Entnahmestellen östlich des Schimbrigs

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 5-7) gibt Details der Entnahmestellen wieder.

Kürzel	Langtext	Koordinaten (CH1903 / LV03)		m ü. A.
CHR	Chessiloch, Chragen	645'824	191'271	1049
SEB	Seebenbach vor Mündung Rotbach	646'201	191'110	1045
GLB	Gelbenbrunnen	628'024	170'314	561
HAR	Harder Quelle	632'575	171'120	565
WAN	Wanegg	652'727	198'745	1086
GRE	Große Entle	653'045	199'375	1042
EIB	Eibach	652'729	199'933	1018
RUC	Quelle westlich Südelbach, Ruchschwand	643'787	189'086	994
SUD	Südelbach bei Hirseggli	643'884	189'471	954
WAL	Waldemme (Churzenhütte)	644'141	190'630	926
AHO	Ahornli	643'727	188'317	1034

Tabelle 5-7: Koordinaten der Entnahmestellen mit Höhenangabe

An allen Entnahmestellen wurden im Zuge der Feldbegehung und unmittelbar vor dem Versuchsbeginn Blindproben genommen. Diese dienten bei der Probenauswertung als Referenzwerte.

5.6. Erstellung eines Zeitplanes für die Probennahme

Dann war es wichtig, einen zeitlichen Rahmen für den Färbversuch festzulegen. Wie bereits in Kapitel 5.1 beschrieben, sollte der Versuch auf Grund der hydrogeologischen Bedingungen im Spätfrühling bzw. Frühsommer stattfinden. Da es bei einem Färbversuch nicht das Wichtigste ist, Farbe einzuspeisen, sondern sie wieder aus dem Bach zu entfernen, mussten entsprechend viele freiwillige Helfer für die Entnahmen organisiert werden. Daher wurde das lange Pfingstwochenende vom 23. Mai bis 25. Mai 2015 ausgewählt, um die Färbung durchzuführen. Für diesen Zeitpunkt konnten die meisten freiwilligen Helfer gefunden werden, die überdies an fast allen Tagen zur Verfügung standen.

Im Vorfeld war ein provisorischer Zeitplan erarbeitet worden, der die Entnahmeintervalle und die Dauer der Beprobung für jeden Entnahmeort darstellt, um zu sehen, wie viele Personen insgesamt benötigt werden. In den Probennahmenplan wurden die hydrogeologische Dynamik des Grundwasserleiters, die zu erwartenden Fließgeschwindigkeiten und die Auswirkungen von Schmelz- und Niederschlagswasser miteinbezogen. Die Einspeisung wurde für Samstag, den 23. Mai 2015, 9:00 Uhr anberaumt.

Das Prinzip bei der Festlegung der Probennahme-Intervalle war, dass die dem Einspeisepunkt nächstgelegenen Entnahmestellen zuerst und in einem dichteren Intervall beprobt werden sollten. Für die weiter entfernten Entnahmestellen wurde entsprechend der

angenommenen Fließzeit ein etwas späterer Zeitpunkt für die Probennahme gewählt. So wurden die Quellen "Ahornli", "Ruchschwand" und "Südelbach" ab der vierten Stunde nach der Farbstoffeingabe beprobt. Es wurde ein 30-Minuten-Intervall zwischen der vierten und der achten Stunde nach Versuchsbeginn angeordnet. Danach wurde die Beprobung in einem stündlichen Intervall fortgeführt.

Durch die Erkenntnisse des Färbversuches 1970 in der Schrattenflue war bekannt, dass der eingespeiste Farbstoff erst nach etwa 36 Stunden aus den Quellen Gelbenbrunnen und Bätterich bei Sundlauenen fließt. Deshalb wurde entschieden, die Probennahme bei den Quellen "Gelbenbrunnen" und "Harderquelle" erst nach 24 Stunden zu beginnen, da davor aus hydrogeologischer Sicht mit keinem Tracer zu rechnen war. An diesen beiden Quellen wurde nach 24 Stunden nach Einspeisung mit der Entnahme in einem Intervall von zwei Stunden begonnen. Nach 30 Stunden wurde auf ein einstündliches Intervall umgestellt. Dieses wurde dann bis zur 50. Stunde, fortgesetzt. Danach wurde wieder im Zwei-Stunden-Intervall beprobt.

Die nachfolgende Tabelle 5-8 zeigt einen Ausschnitt des Einsatzplans mit den geplanten Entnahmeintervallen bei den einzelnen Probennahmestellen.

		Samstag 23.5.																								
	Uhrzeit	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	t (h)=	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Kürzel	Name																									
WAN	Wanegg																									
GRE	Große Entle																									
EIB	Eibach																									
AHO	Ahornli																									
RUC	Ruchschwand																									
SUD	Südelbach																									
WAL	Waldemme																									
CHR	Chragen																									
SEB	Seebenbach																									
GLB	Gelber Brunnen																									
HAR	Harder Quelle																									

Tabelle 5-8: Ausschnitt des Einsatzplanes mit geplanten Entnahmeintervallen je Probennahmeort

Grundsätzlich wurden an allen Entnahmestellen, ausgenommen "Gelbenbrunnen" und "Harderquelle", 24 Stunden nach Tracereinspeisung Proben in einem Zwei-Stunden-Intervall entnommen. In der Nacht auf Dienstag, etwa nach der 60. Stunde, wurde ein vierstündiges Entnahmeintervall eingehalten.

Nachdem geklärt worden war, wo und wie oft beprobt werden sollte, wurde ein Einsatzplan für die einzelnen Probennehmer erstellt. Aufgrund der Anzahl der zur Verfügung stehenden Helfer und der Notwendigkeit der kontinuierlichen Probennahme wurde ein Schichtbetrieb

mit Schichten von je zwölf Stunden festgelegt. Dieser Schichtbetrieb wurde über drei Tage beibehalten. Aufgrund der geographischen Nähe einiger Probenahmestellen konnten mehrere Entnahmestellen von einer Person bedient werden. So wurden die Entnahmeorte in drei Blöcke eingeteilt. "Wanegg", "Grosse Entle" und "Eibach" wurden innerhalb einer Zwölf-Stunden-Schicht von einer Person, "Ahornli", "Ruchschwand", "Südelbach", "Waldemme", "Chragen" und "Seebenbach" von einer anderen und schließlich "Gelbenbrunnen" und "Harder Quelle" von jeweils einer Person innerhalb einer Schicht beprobt. Ab der 60. Stunde wurde dann nur noch eine Person für die ersten neun Probennahmestellen, die in Tabelle 5.7 angeführt sind, eingeteilt.

Für die Koordination des Entnahmepersonals wurden Einsatz- und Probennahmepläne erstellt. (Tab.5-9, Tab. 5-10)

Probennehmer-Einsatzplan Wasserfärbung 2015			
Name: Andreas Wildberger	Nimm bitte Material mit:	Fahrzeug	
		Picknick	
	(unnötiges ist ----)	Regenzeug/Sonnenschirm	
		Geld (nicht unbedingt nötig)	
		sonstiges:	
			Du triffst dort:
1. Treffpunkt in: Gemeindehaus Flühli	am: Samstag, 23.05.2015	um 09:00 Uhr (pünktlich!!)	Alle
2. Treffpunkt in: Parkplatz Entnahmestelle SUD	am: Samstag, 23.05.2015	um 21:00 Uhr (pünktlich!!)	Loic Palpacuer
3. Treffpunkt in: Parkplatz Entnahmestelle SUD	am: Sonntag, 24.05.2015	um 09:00 Uhr (pünktlich!!)	Loic Palpacuer
4. Treffpunkt in: Parkplatz Entnahmestelle SUD	am: Sonntag, 24.05.2015	um 21:00 Uhr (pünktlich!!)	Loic Palpacuer
5. Treffpunkt in: Parkplatz Entnahmestelle SUD	am: Montag, 25.05.2015	um 09:00 Uhr (pünktlich!!)	Loic Palpacuer
6. Treffpunkt in: Parkplatz Entnahmestelle SUD	am: Montag, 25.05.2015	um 21:00 Uhr (pünktlich!!)	Robert Ganauser
Nimm weiter Wasserproben in den folgenden Schichten und an den folgenden Orten:			
Schicht	wo:	vorher ist dort:	Deine Ablösung:
Schicht 1: Sa 0900-2100	AHO,RUC, SUD, WAL, CHR, SEB		Loic Palpacuer
Schicht 2: Sa 2100-0900			
Schicht 3: So 0900-2100	AHO,RUC, SUD, WAL, CHR, SEB	Loic Palpacuer	Loic Palpacuer
Schicht 4: So 2100-0900			
Schicht 5: Mo 0900-2100	AHO,RUC, SUD, WAL, CHR, SEB	Loic Palpacuer	Robert Ganauser
Falls Deine Ablösung nicht eintrifft, so bleibe bitte an Ort und nehme weitere Proben.			
Wir werden uns bei Dir melden.			
Gibt es mit diesem Einsatzplan Probleme, so ist es unbedingt nötig, mir dies bis spätestens			
Freitag 18 Uhr mündlich mitzuteilen.			
Telefonnummern bei Problemen oder Fragen:			
Philipp Häuselmann			
Robert Ganauser			

Tabelle 5-9: Ein Beispiel für den Einsatzplan für eine Einzelperson

Probenahmeplan Wasserfärbung 2015							
Ort	WANEGG	Bemerkung	Bedient eine Person mehrere Stellen, so verstehen sich die angegebenen Zeiten als Richtwerte. Auf den Fläschchen wird jedoch die auf 10 Minuten gerundete tatsächliche Entnahmezeit angeschrieben!				
Kürzel (auch auf Etikette schreiben)	WAN						
Probennehmer	Zeiten						
	→						
Jörg Dreybrodt	900	930	1000	1030	Samstag		
	1100	1130	1200	1230			
	1300	1330	1400	1430			
	1500	1530	1600	1630			
	1700	1730	1800	1830			
	1900	1930	2000	2030			
Peter Aeberhard	2100	2130	2200	2230	Sonntag		
	2300	2330	0	30			
	100	130	200	230			
	300	330	400	430			
	500	530	600	630			
	700	730	800	830			
Thomas Kesselring	900	930	1000	1030			
	1100	1130	1200	1230			
	1300	1330	1400	1430			
	1500	1530	1600	1630			
	1700	1730	1800	1830			
	1900	1930	2000	2030			
Peter Aeberhard	2100	2130	2200	2230	Montag		
	2300	2330	0	30			
	100	130	200	230			
	300	330	400	430			
	500	530	600	630			
	700	730	800	830			
Thomas Kesselring	900	930	1000	1030			
	1100	1130	1200	1230			
	1300	1330	1400	1430			
	1500	1530	1600	1630			
	1700	1730	1800	1830			
	1900	1930	2000	2030			

Tabelle 5-10: Beispiel eines Probennahmeplans für einen bestimmten Entnahmeort

5.7. Durchführung der Wasserfärbung

5.7.1. Allgemeines

Bereits während der Planung sollte auf etwaige Kontaminationsgefahren sowie auf folgende Punkte geachtet werden, um eine fehlerfreie Probung zu ermöglichen:

- Bei der Einteilung des Probennahmepersonals sollte von Beginn an darauf geachtet werden, dass Personen, die bei der Tracer-Einspeisung beteiligt waren, nicht bei der Probennahme eingeteilt werden.
- Die Probenfläschchen sollten nicht im selben Fahrzeug wie die Tracer transportiert werden.
- Die Etiketten auf den Probefläschchen sollten während der Beprobung eindeutig beschriftet werden, am besten mit einem Kürzel der Entnahmestelle, dem Datum und der Uhrzeit der Entnahme.
- Die Lagerung der Probefläschchen hatte bruchstabil sowie licht- und frostfrei zu erfolgen.
- Außerdem war sicherzustellen, dass durch die Probenflächen keine Kontamination erfolgen konnte.

5.7.2. Wetterlage während und nach der Eingabe

Als es am Samstag, dem 23. Mai, um 10:30 Uhr endlich hieß: "Die Farbe läuft", fand man folgende Wetterbedingungen vor: leicht bewölkt, niederschlagsfrei bei einer Tageshöchsttemperatur von etwa 11°C in der Gemeinde Flühli. Aufgrund des drei Tage zuvor bis auf 1600 m ü. A. gefallenen Schnees (siehe Diagr. 1) und Temperaturen über dem Gefrierpunkt floss reichlich Schmelzwasser. Die Wetterverhältnisse am darauffolgenden Sonntag waren fast identisch, die Temperatur stieg um 2 Grad Celsius.

Montag, der 25. Mai, zeigte bereits vermehrt starke Bewölkung, jedoch blieb es noch bis etwa 18 Uhr trocken. In der Nacht auf Dienstag, den 26.05., setzte Dauerregen ein. Bis kurz vor sechs Uhr früh fielen 21.1 mm Regen pro m² (siehe Diagr. 1). Tagsüber gab es zum Teil sonnige Auflockerungen, die sich mit lokal recht starken Niederschlägen abwechselten. So gingen am Dienstag in Summe nochmals 10.5 mm Regen über der Gemeinde Flühli nieder (Diagr. 1). In den darauffolgenden Tagen dominierte trockenes Wetter mit Tageshöchsttemperaturen von bis zu 20°C (Wetterdaten von MétéoSuisse, 2015).

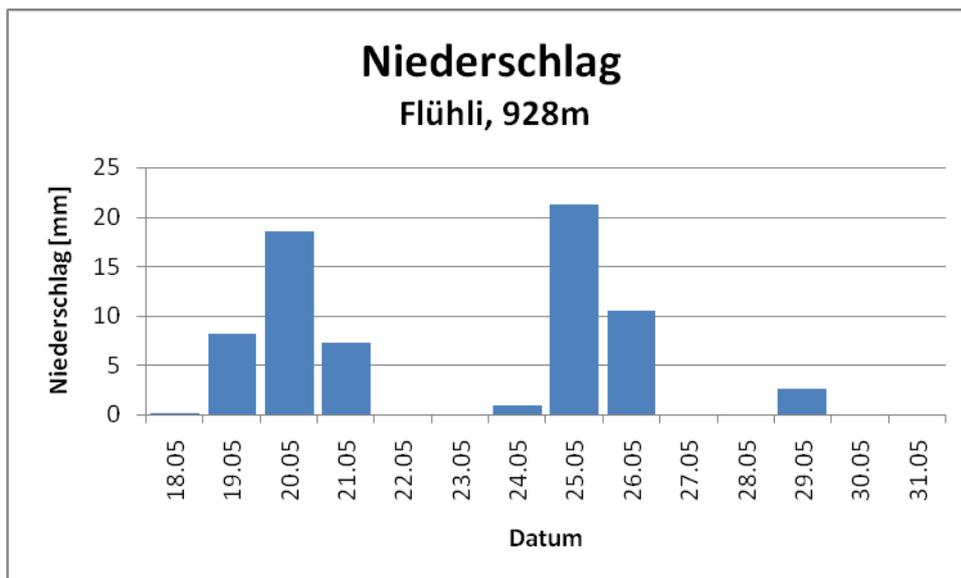


Diagramm 5-1: Niederschlagsdaten vom 18.05 bis 31.05.2016 gemessen an der Wetterstation im Flühli auf 928 m.ü.A

5.7.3. Einbringen der Tracer

Wie eingangs erwähnt, wurden vier unterschiedliche Tracer für die vier Eingabestellen gewählt. Die tracerspezifischen Eigenschaften, die geographische Lage und die Empfehlungen des erfahrenen Tracerteams entschieden über die Form der Einbringung.

Vor- oder Nachspülen war auf Grund des optimalen Abflusses bei keinem der vier Tracer an den vier Einspeisestellen erforderlich. In der untenstehenden Tabelle 5-11 sind die Abflussmengen, das verwendete Färbemittel und die Eingabemengen je Standort zu finden.

Ort	Kürzel	Q [l/s]	Färbemittel	Menge [kg]
		am 23.Mai 2015		
Hurbele	HUR	5.0	Tinopal CBS-X	20
Rüchi	RÜCHI	10-15	Naphthionate	50
Dürrütli	DUER	2.0	Eosin	15
Cheiserschwand	CHE	8.0	Uranin	15

Tabelle 5-11: Überblick über die Einspeisung der Farbstoffe

Aus Tabelle 5-11 ist erkennbar, dass durchwegs große Tracermengen für diese Färbung benötigt wurden. Wären die pulverigen Farbstoffe noch vor der Einspeisung im Labor gemischt worden, hätte das Vielfache ihres Gewichtes bis zu den Einspeiseorten getragen werden müssen. Durch die Anwesenheit von geschulten Fachleuten, die mit dem Umgang der Tracer bestens vertraut waren, und durch die optimalen Verhältnisse zum Zeitpunkt der Einspeisung (ausreichend Abfluss vorhanden und nahezu windstill), wurden die Tracer Tinopal CBS-X und Naphthionat in pulveriger Form zu den Eingabestellen transportiert und

erst direkt über den vorhandenen Oberflächenabfluss durch erfahrene Fachleute vorsichtig eingerieselt.

Die Tracer Eosin und Uranin wurden aufgrund der Empfehlung des Fachteams, welches die Tracer einbrachte, und der geringeren Mengen von je 15 kg Trockensubstanz vorab aufgelöst und in flüssiger Form in je 1,5-Liter-Flaschen zu den Eingabestellen transportiert. Dort wurden die Tracerlösungen kurz vor der Versickerungsstelle direkt in den Oberflächenabfluss eingebracht.

5.8. Probennahme

Im Zuge dieses Markierversuches wurden neben den Handproben auch Fluorocaptoren verwendet. Diese erfüllten den Zweck eines Back-ups im Falle etwaiger Unklarheiten. Sie wurden schlussendlich nicht zur Auswertung der Ergebnisse verwendet, da die Tracer bereits in den Probenfläschchen nachgewiesen werden konnten. Zum Einsatz kamen Braunfläschchen, da diese durch die braune Färbung des Glases UV-Schutz bieten und die Fluoreszenzersetzung durch UV-Licht eindämmen. Grundsätzlich wurden bei der Probennahme immer Doppelproben genommen: Zu jedem Zeitpunkt der Probennahme wurden zwei Braunglasfläschchen mit je 30 ml abgefüllt, um bei der Auswertung der Proben mehr Flüssigkeit zur Verfügung zu haben, und damit bei Bruch oder Verlust einer Probe Ersatz zur Verfügung stünde. Grundsätzlich ist es ratsamer mehrere Proben zu nehmen, um bei Unklarheiten genug Reserven zu haben. Ist das Budget zum Auswerten der Proben knapp bemessen, wird nur jede zweite Probe ausgewertet; die anderen Wasserproben werden als Rückstellproben aufbewahrt.

Jede Probenflasche wurde direkt nach der Probennahme mit einem zuvor ausgewählten Kürzel für jeden Standort beschriftet. Zusätzlich wurde am Aufkleber der Flasche die Uhrzeit und der Tag der Entnahme festgehalten (siehe Abbildung 5-11). Da Fluoreszenztracer durch UV-Strahlung zersetzt werden, wurden die Braunflaschen gleich nach der Probenahme in einem lichtgeschützten und bruchsichereren Behälter aufbewahrt. Ebenso musste der Transport der Flaschen bis ins Labor lichtgeschützt sowie hitze- und frostfrei erfolgen.



Abbildung 5-11:
Probenfläschchen mit
Aufkleber

Um eine eindeutige Identifizierung jeder einzelnen Probe zu jedem Zeitpunkt gewährleisten zu können, sind wasserfeste Sticker, die vor der Probennahme an den Fläschchen angebracht werden, zu empfehlen, damit die Aufkleber bei der Beprobung oder während der Aufbewahrung nicht verrutschen oder verloren gehen. Durch kaltes Wasser bildet sich häufig Kondenswasser an der Flaschenaußenwand, was dazu führt, dass sich nicht wasserfeste Etiketten von der Flasche lösen bzw. gar nicht erst fest angeklebt werden können.

5.9. Organisatorisches

Philipp Häuselmann veröffentlichte bereits 1996 einen Leitfaden bzw. eine Anleitung zur Organisation von Wasserfärbungen. Auch dieser Wasserfärbung diente diese Vorlage als Grundlage für die Planung und Durchführung des Multitracerversuches.

Darauf aufbauend sollen an dieser Stelle Empfehlungen ausgesprochen respektive Erfahrungen beschrieben werden, die in diesem Versuch gesammelt wurden, um zukünftige Organisatoren noch besser auf einen Tracerversuch vorzubereiten. Die Ergänzungen betreffen überwiegend Details, die im Einzelfall jedoch großen Einfluss auf die Auswertung haben können.

Bei diesem Färbeversuch trat das Problem auf, dass aufgrund eines Starkniederschlagsereignisses eine Probennahmestelle an einem Fluss nicht mehr sicher beprobt werden konnte. In diesem Fall wäre ein Verlängerungsarm, an dessen Ende ein

Probenfläschchen befestigt ist, ideal gewesen, um weiter sicher Proben nehmen zu können. Bei erhöhtem Abfluss ist eine Probennahme besonders wichtig, da die Tracer sehr oft noch stärker mobilisiert werden und in großen Konzentrationen die Entnahmestellen passieren. Wenn der Tracer ohne eine Probennahme wortwörtlich den Bach hinuntergeht, kann dies die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse stark beeinflussen.

Bei auftretenden Niederschlägen ist es sinnvoll, das Beprobungsintervall zu erhöhen, um eine genauere Auflösung des Tracerdurchgangs zu erhalten. Dementsprechend sollte bei angekündigten Regenfällen eine zusätzliche Person zum Beproben eingesetzt werden.

Da der Versuch das Ziel hat, Fließwege ausfindig zu machen, ist es möglich, dass das eingefärbte Wasser an anderen Orten früher austritt, wobei es noch gefärbt sein kann. Deshalb sollten die eventuell betroffenen Gemeinden, die Regionalstelle der Polizei sowie die Medien über die Wasserfärbung informiert werden.

Bereits erwähnt wurde die Verwendung von Aktivkohle, sogenannter Fluorocaptoren, als sinnvolle Ergänzung, um an potenziellen Wiederauftrittsorten eine qualitative Ja/Nein-Aussage zu erhalten. Im vorliegenden Tracerversuch wurde Aktivkohle zusätzlich an einigen Stellen eingesetzt. Jedoch kam es zu einem Fehler in der Handhabung. Die Aktivkohlefilter wurden zwar vor Einspeisung der Tracer installiert, jedoch nicht mehr rechtzeitig vor Ankunft der Tracer gegen neue ausgetauscht. Somit gibt es keinen Referenzwert im Vergleich zum mit dem eingespeisten Tracer belasteten Wasser. Aus diesem Grund waren die vorhandenen Fluorocaptoren unbrauchbar. Richtig wäre gewesen, diese einige Tage vor Einspeisung an der Probennahmestelle auszusetzen und etwa einen Tag vor Einspeisung gegen neue zu tauschen. So erhält man bei der Auswertung im Labor einen Vergleichswert und kann eine korrekte Ja/Nein-Aussage treffen.

6. Versuchs - Auswertung

Insgesamt wurden knapp 750 Doppelproben an den Entnahmestellen genommen und ausgewertet. Dr. Martin H. Otz und das Labor von Nano Trace Technologies™ in Orpund in der Schweiz ermöglichten und unterstützten die Auswertung der Proben.

Jede Probe wurde im Fluorometer Perkin Elmer LS2-B oder im Perkin Elmer LS-5 auf Fluoreszenz untersucht. Zusätzlich zu der Auswertung in diesen Geräten wurden Proben, bei denen mit den Geräten LS2-B und LS-5 bereits eine erhöhte Konzentration nachgewiesen wurde, vom Labor Nano Trace Technologies™ mittels Shimadzu Modell RF-5301PC nochmals auf die Tracer und deren Konzentration untersucht. Aus Kostengründen wurden nur ausgewählte Proben mittels Shimadzu RF-5301PC ausgewertet. Somit konnten einige Werte im Zweifel mit einem zweiten, unabhängigen Wert verglichen werden.

Die Perkin-Elmer-Geräte funktionieren nach demselben Prinzip. Im LS-5 war es jedoch möglich, eine Probe unmittelbar hintereinander auf zwei unterschiedliche Tracer zu überprüfen, ohne einen Kantenfilter austauschen zu müssen. Dadurch, dass beide Geräte bei der Auswertung zur Verfügung standen, wurden auch beide Fluorometer eingesetzt. Beim LS2-B wurde für den zu untersuchenden Tracer der entsprechende Kantenfilter in das Gerät eingesetzt. Dieser filtert nur die für den Tracer relevanten Wellenlängen, z. B. für Naphthionat 320-420nm. In der nachstehenden Tabelle sind die Anregungswellenlängen λ_{ex} (= Excitation Wavelength) und die Emissionswellenlängen (= Peak Emission Wavelength) für die in diesem Färbversuch verwendeten Tracer dargestellt. Trifft Licht einer bestimmten Anregungswellenlänge auf ein Molekül, werden dabei Photonen absorbiert und die Elektronen des Moleküls auf ein energetisch höheres Orbital (= räumliche Wellenfunktion eines einzelnen Elektrons) gehoben. Sie werden somit angeregt. Da sich die Moleküle jedoch in den energieärmeren Orbitalen aufhalten, fallen sie augenblicklich wieder auf ihr vorheriges Niveau zurück. Dabei wird die freiwerdende Energie als Wärme und Photonen (Fluoreszenzlicht) abgegeben.

Die Tabelle gibt einen Überblick, bei welcher Wellenlänge der Tracer optimal angeregt wird und mit welcher Wellenlänge die Photonen wieder abgegeben werden.

Farbstoff	λ_{ex} [nm]	λ_{em} [nm]
NAP	320	420
TIN	341	441
URA	491	512
EOS	516	538

λ_{ex} = excitation Wavelength = Anregungswellenlänge
λ_{em} = peak emission wavelength = Emissionswellenlänge

Tabelle 6-1: Anregungs- und Emissionswellenlängen der einzelnen Tracer

Um ein Verschleppen der Tracer durch Restmengen der Probenflüssigkeit in den Leitungen des Geräts zu vermeiden, musste zwischen den Untersuchungen einzelner Proben bei beiden Geräten ein Spülvorgang mit reinem Wasser durchgeführt werden. Da es zum Zeitpunkt der Auswertung der Proben nur Vermutungen bezüglich der Fließwege gab, wurden fast alle Proben auf alle vier eingesetzten Tracer untersucht. Allerdings wurden zuerst die mit höherer Wahrscheinlichkeit an einer Entnahmestelle anzutreffenden Tracer analysiert. Die Proben mit hohen Spitzenwerten wurden mit der Doppel-Scanner-Methode mittels Shimadzu RF5001-PC genauer überprüft.

Die Proben wurden in chronologischer Reihenfolge ausgewertet. Die Ergebnisse einer Probenreihe, zum Beispiel Entnahmestelle Südelbach 23. 5. 2015, 10:00 bis 18:00 Uhr wurden vom Fluorometer ausgedruckt und dann händisch in eine Excel-Tabelle eingetragen. Die Darstellung der Ergebnisse der nachgewiesenen Konzentrationen erfolgte in einem Konzentration-Zeit-Diagramm.

Die quantitative Bestimmung erfolgte mittels Erstellung von Eichkurven für jeden einzelnen Farbstoff im Fluorometer LS-2B sowie im LS-5B, je nachdem, in welchem Fluorometer die Probe zuvor analysiert wurde. Die Nachweisgrenze des LS-2B liegt bei $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ für Na-Fluorescein, Eosin und bei etwa $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ für Na-Naphthionat.

Zur Verifizierung, ob die vorgefundenen Spitzenwerte tatsächlich durch Farbstoffe und nicht durch andere organische Substanzen (z. B.: Huminstoffe) verursacht wurden, kam die HPLC-Analytik (High Performance Liquid Chromatography) zum Einsatz. Zudem wurde dieses Verfahren zur Trennung von Tracern bei Mischung von Fluoreszenztracern mit ähnlichen spektralen Eigenschaften eingesetzt. Die HPLC-Analytik ist ein Chromatografie-Verfahren, das eine Auftrennung von Stoffgemischen in ihre einzelnen Bestandteile erlaubt.

Zusätzlich wurden knapp 20 Wasserproben (2 x 40 ml) mittels BFA (Background Fluorescence Analysis) von Nano Trace Technologies™ (Orpund, Schweiz) auf ihre charakteristische Grundfluoreszenz untersucht. Die in diesem Verfahren untersuchten Proben wurden vor der Einspeisung der Tracer genommen, um ihre natürliche Zusammensetzung ermitteln zu können. Die Ergebnisse dieses Verfahrens dienen als Ergänzung der mittels Fluorometer erhaltenen Erkenntnisse (siehe dazu Kapitel 7.3.).

6.1. Methodik der Auswertung der Proben

Generell versteht man unter Fluorometrie die Messung von Fluoreszenz. Die Messung erfolgt mittels Fluorometer.

Das LS-2B hat auswechselbare Kantenfilter im Anregungsbereich und einen motorisch beweglichen Interferenzfilter (300-800nm) im Emissionsbereich. Eine mit linearer Frequenz gepulste Xenonentladungslampe dient als Lichtquelle. Der Fotomultiplier ist dabei die optische Verstärkerröhre. Anschliessend folgt elektronische Verstärkung mit digitaler Anzeige und Ausdruck auf Thermodrucker. Farbstoffe werden mit einer Empfindlichkeit von 10^{-6} g/m³ Wasser nachgewiesen. In der Regel werden die Proben mit diesem Gerät seriell mit "festen Einstellungen" ausgemessen, z. B.: für den Tracer Fluorescein wird eine Anregung von 480nm (Präzisions-Kantenfilter) und eine Emission von 515nm (Interferenzfilter) eingestellt etc. (Häuselmann, et al., 1997)

Mit diesem Gerät wurden alle Proben untersucht. Wiesen Proben mit hohen Peak-Werten, wurden mit dem Doppel-Scanning-Verfahren mit dem Gerät "Shimadzu RF5001-PC" überprüft: Jeder Stoff hat eine charakteristische Anregung und Emission. Man fährt von tiefen Wellenlängen zu hohen, wobei der Wellenlängenunterschied zwischen Anregung und Emission konstant gehalten wird. Damit erscheinen die Emissions-Maxima der Tracer an bestimmten Stellen. Die Darstellung erfolgt im Konzentrations/Zeit-Diagramm. (ebd.)

Um die Rückgewinnungsrate der Farbstoffe ermitteln zu können, wurden im Fluorometer LS-2B bzw. im LS-5B mittels gravimetrischer Verdünnungsreihen Eichkurven für jeden einzelnen der vier Tracer erstellt. Hierfür wurden eine Mikropipette mit einer Volumeneinstellung von bis zu 10µg und eine Präzisionswaage, die bis zu einem Tausendstel Gramm genau misst, verwendet. Von jedem Tracer wurde eine Stammlösung (=S_c) erstellt. Darunter versteht man eine Lösung, die einen Stoff in einer bestimmten Konzentration enthält (z. B. 100.000 ppb (= Parts Per Billion) pro 30 ml Lösung). Aus der Stammlösung wurde eine bestimmte Menge mittels Mikropipette in einen Behälter getropft und das Gewicht auf der Präzisionswaage abgelesen (=g_c). Danach wurde dieser Behälter auf 100 ml mit Wasser aufgefüllt und wiederum das Gewicht abgelesen (=g_L). g_c dividiert durch g_L ergibt den dimensionslosen Verdünnungsfaktor f_d.

Formel 6-2: Berechnung des Verdünnungsfaktors

$$\frac{g_L}{g_c} = f_d$$

Wird die Konzentration der Stammlösung (z. B. 100.000 ppb) nun durch den Verdünnungsfaktor f_d dividiert, erhält man die Konzentration des Tracers in der Lösung in ppb ($=S_c$). Diese Verdünnungslösung wird durch den Fluorometer analysiert. Das Gerät zeigt einen gerätespezifischen Wert [RFI] an, der anschließend geplottet wird. Führt man den oben beschriebenen Vorgang nun mehrmals mit unterschiedlichen Mengen oder Konzentrationen durch (entweder aus der Stammlösung oder aus Verdünnungslösungen), erhält man unterschiedliche RFI-Werte bei unterschiedlichen Konzentrationen. Die erhaltenen RFI-Werte bei bestimmten Konzentrationen ($S_s=S_c/f_d$) werden in die Excel-Tabelle eingetragen, eine Eichkurve wird erstellt. R^2 steht für das Bestimmtheitsmaß und gibt das Maß für die Güte der Anpassung wieder. Zudem gibt es den Anteil der Varianz der Daten an, welche durch das Modell erklärt werden. Das Bestimmtheitsmaß liegt zwischen den Werten 0 und 1 ($= 0 \leq R^2 \leq 1$). Je näher das Bestimmtheitsmaß R^2 bei 1 liegt, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit des linearen Zusammenhangs (siehe Diagramm 6-1 bis 6-7). Ist $R^2 = 0$, liegt kein Zusammenhang vor (Faes, 2016).

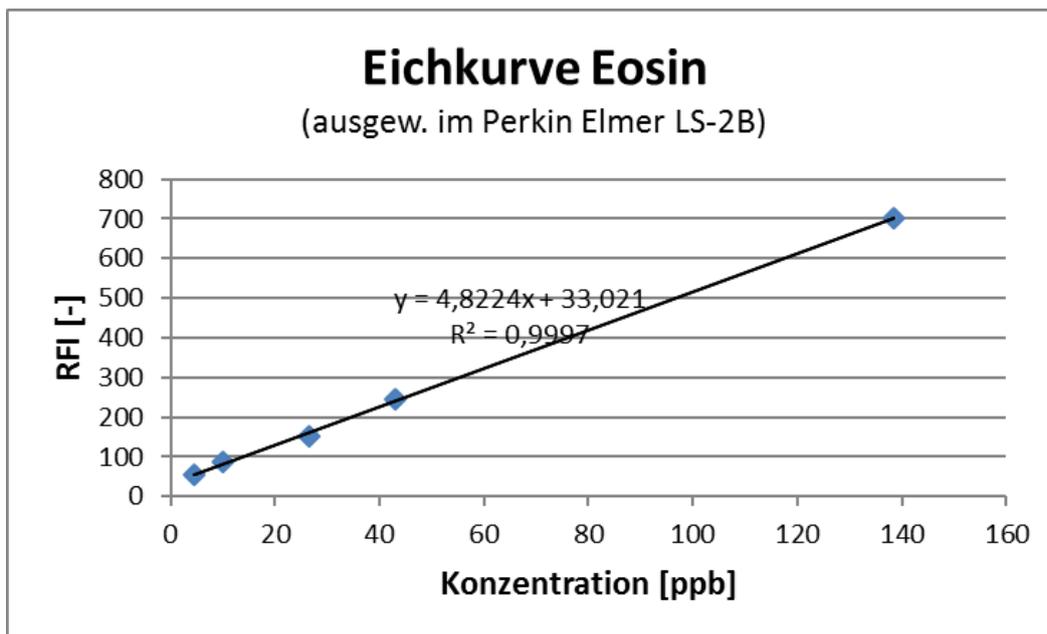


Diagramm 6-1: Eichkurve für den Tracer Eosin. Gerätespezifische RFI-Werte gemessen mit dem Fluorometer Perkin Elmer LS-2B

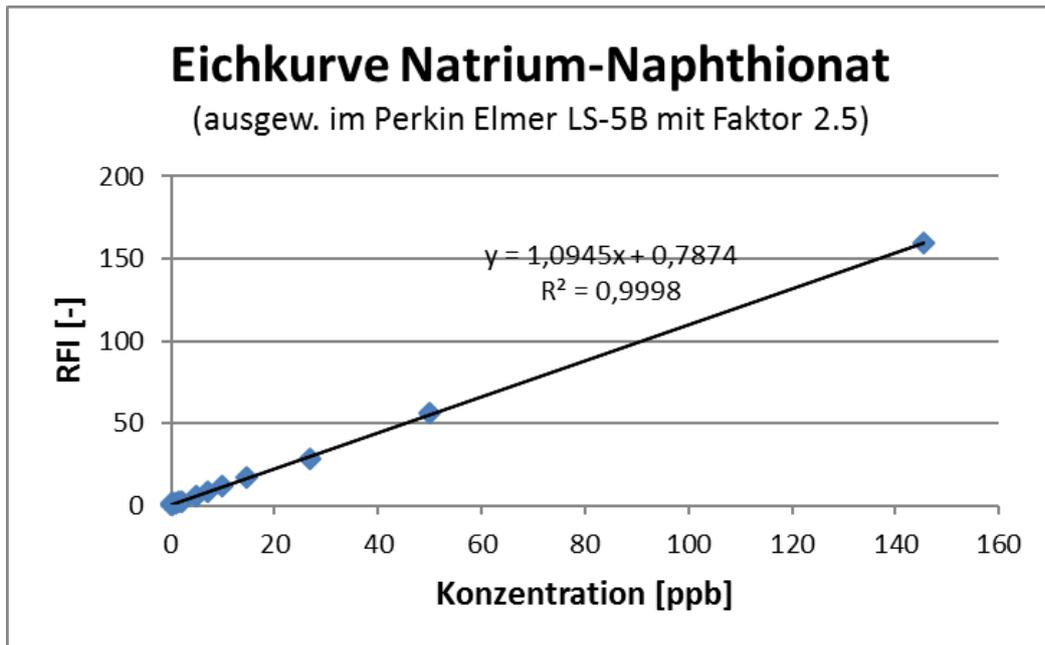


Diagramm 6-2: Eichkurve für den Tracer Natrium-Naphthionat. Gerätespezifische RFI-Werte gemessen mit dem Fluorometer Perkin Elmer LS-5B (Faktor 2.5)

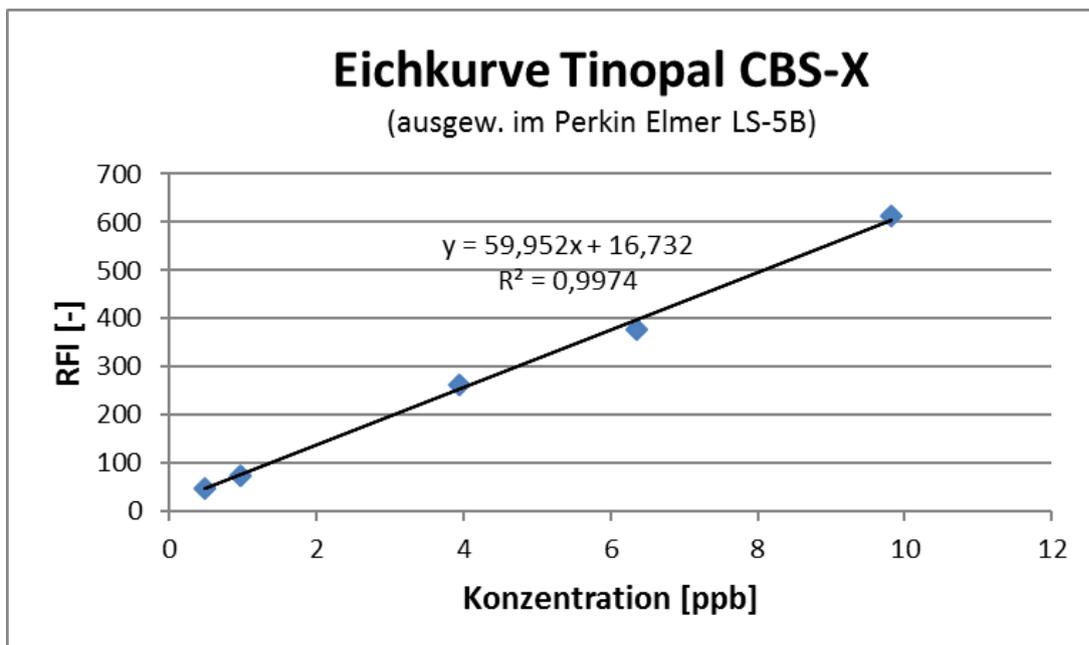


Diagramm 6-3: Eichkurve für den Tracer Tinopal CBS-X. Gerätespezifische RFI-Werte gemessen mit dem Fluorometer Perkin Elmer LS-5B

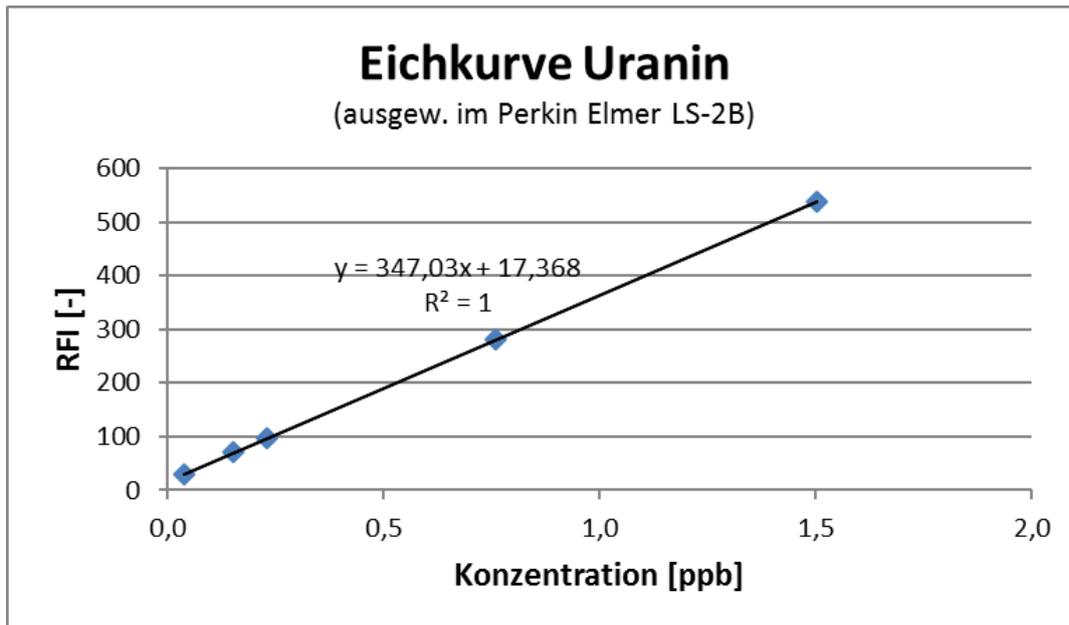


Diagramm 6-4: Eichkurve für den Tracer Uranin. Gerätespezifische RFI-Werte gemessen mit dem Fluorometer Perkin Elmer LS-2B

Aus der Eichkurve erhält man die untenstehende Formel, die den Verlauf der Regressionsgerade beschreibt.

Formel 6-3: Formel der Regressionsgerade

$$y = a + b * x$$

Die Variable y ist die Zielgröße, die Variable x die unabhängige Variable. Der Parameter a beschreibt den Schnittpunkt mit der y-Achse und der Parameter b die Steigung der Gerade.

Aus den ermittelten Formeln für jeden Tracer lassen sich nun die Absolutwerte [ppb] der nachgewiesenen Tracer errechnen. Multipliziert mit der geschätzten Schüttung [l/s] zum Zeitpunkt der Probennahme, kann die Rückgewinnungsrate der Tracer (z. B. in [mg/s]) annäherungsweise berechnet werden.

7. Ergebnisse

7.1. Schwändiliflue

In der Schwändiliflue wurden der Tracer Natrium-Naphthionat bei der Einspeisestelle Rüchi und der Farbstoff Tinopal CBS-X nordwestlich der Hütte Hurbele (HUR) eingebracht. Bei der Auswertung der Proben konnten beide Tracer erfolgreich an der Entnahmestelle am Seebenbach, kurz vor der Mündung in den Rotbach, nachgewiesen und die vermuteten hydraulischen Verbindungen bestätigt werden (Siehe dazu Abbildung 7.1).

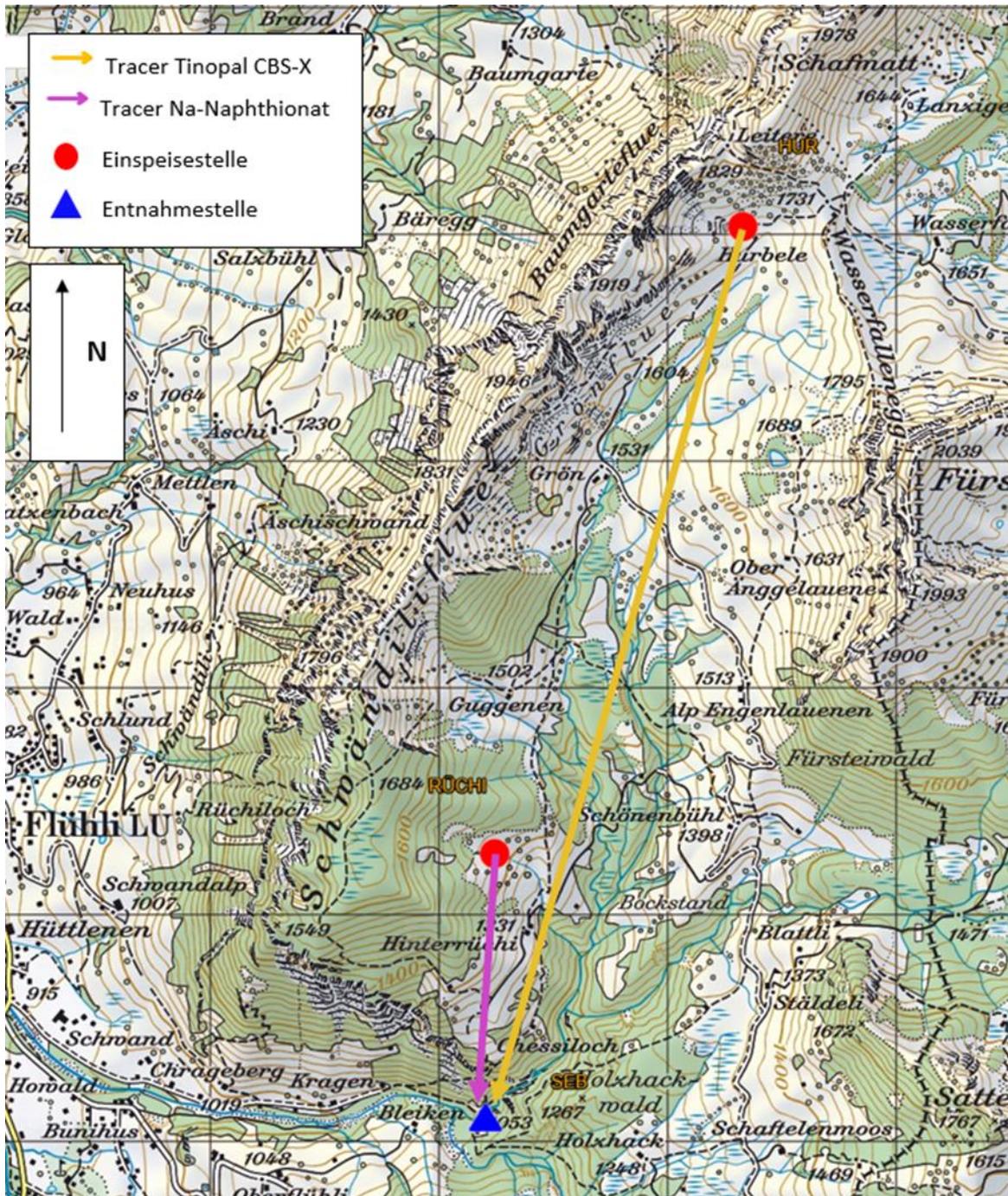


Abbildung 7-1: Nachgewiesene hydraulische Verbindungen durch die in der Schwändlilflue eingebrachten Tracer Tinopal CBS-X und Na-Naphthionat im Seebenbach

Natrium-Naphthionat wurde im Vergleich zu Tinopal CBS-X um etwa 28 Stunden früher nachgewiesen. Dieser Unterschied ist nicht verwunderlich, da Natrium-Naphthionat einen etwa 3 km kürzeren Fließweg aufweist als Tinopal.

7.1.1. Standort Seebenbach (SEB)

7.1.1.1. Na-Naphthionat

An der Entnahmestelle im Seebenbach wurde der Tracer Na-Naphthionat bereits zehn Stunden nach der Einspeisung nachgewiesen. Der erste kleinere Peak kam nach 14 Stunden im Seebenbach an. Danach sank die Konzentration, gemessen in ppb, wieder bis zur 30. Stunde. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden etwa 4,4 kg zurückgewonnen. Der höchste Peak kam im Seebenbach nach etwa 36 Stunden an. Dieser war, gemessen an der Konzentration, knapp doppelt so groß wie der erste Spitzenwert. Von diesem Zeitpunkt bis zur 55. Stunde nach Einspeisung konnten Konzentrationen zwischen 1100 ppb und 270 ppb nachgewiesen werden. In dieser Zeitspanne sind etwa 14,2 kg des Tracers Na-Naphthionat im Seebenbach geflossen. Ab diesem Zeitpunkt nähert sich die nachgewiesene Konzentration bis zum Ende des Beprobungszeitraumes konstant der X-Achse an (siehe dazu Diagramm 7-1). Insgesamt wurden im Seebenbach etwa 32,5 kg des Tracers Na-Naphthionat nachgewiesen, dies entspricht etwa einer Rückgewinnungsrate von 65 %.

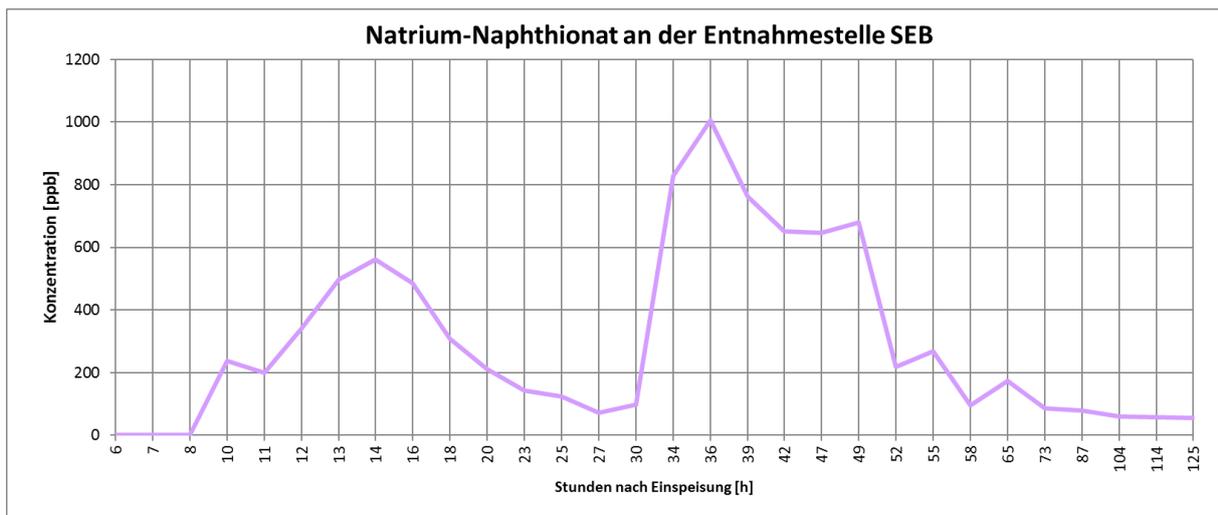


Diagramm 7-1: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Natrium-Naphthionat am Seebenbach

7.1.1.2. Tinopal CBS-X

Im Seebenbach wurde außerdem Tinopal CBS-X nachgewiesen, zum ersten Mal allerdings erst nach etwa 36 Stunden. Hier liegt mit knapp 240 ppb auch gleichzeitig der Spitzenwert der ausgewerteten Proben. Danach sinkt die Konzentration mehr oder weniger konstant. Bis zur 65. Stunde kamen etwa 4,4 kg des Tracers im Seebenbach wieder zu Tage. Ab der 65. Stunde nach Farbstoffeintrag sinkt der Anteil des Tracers in den Proben kontinuierlich und nähert sich der X-Achse an. In Summe konnten etwa 10,7 kg Tinopal nachgewiesen werden.

Dies entspricht einer Rückgewinnungsrate von etwas mehr als 53 % (siehe dazu Diagramm 7-2).

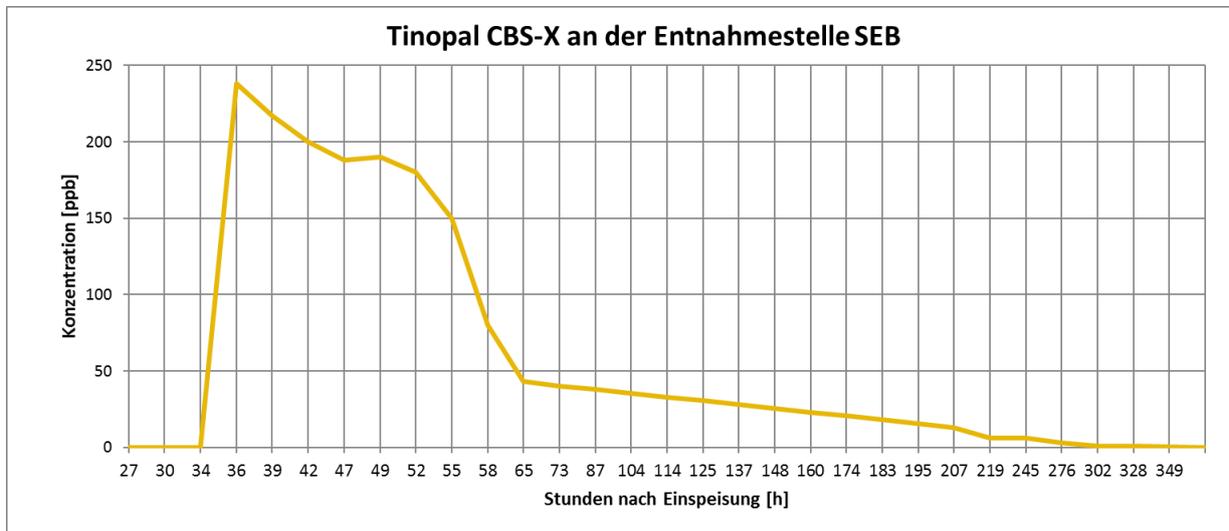


Diagramm 7-2: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Naphthionat am Seebenbach

7.2. Schrattenflue

Die verbleibenden zwei Tracer, Eosin und Uranin, wurden in der Schrattenflue eingebracht, Eosin in der Dürrütli (DUER) und Uranin in der Cheiserschwand (CHE). Eosin konnte an allen vier Entnahmeorten (Ahornli, Ruchschwand, Südelbach und Waldemme) nachgewiesen werden. In Ruchschwand, im Südelbach und der Waldemme konnte der Tracer Uranin erfolgreich detektiert werden (siehe Abbildung 7-2).

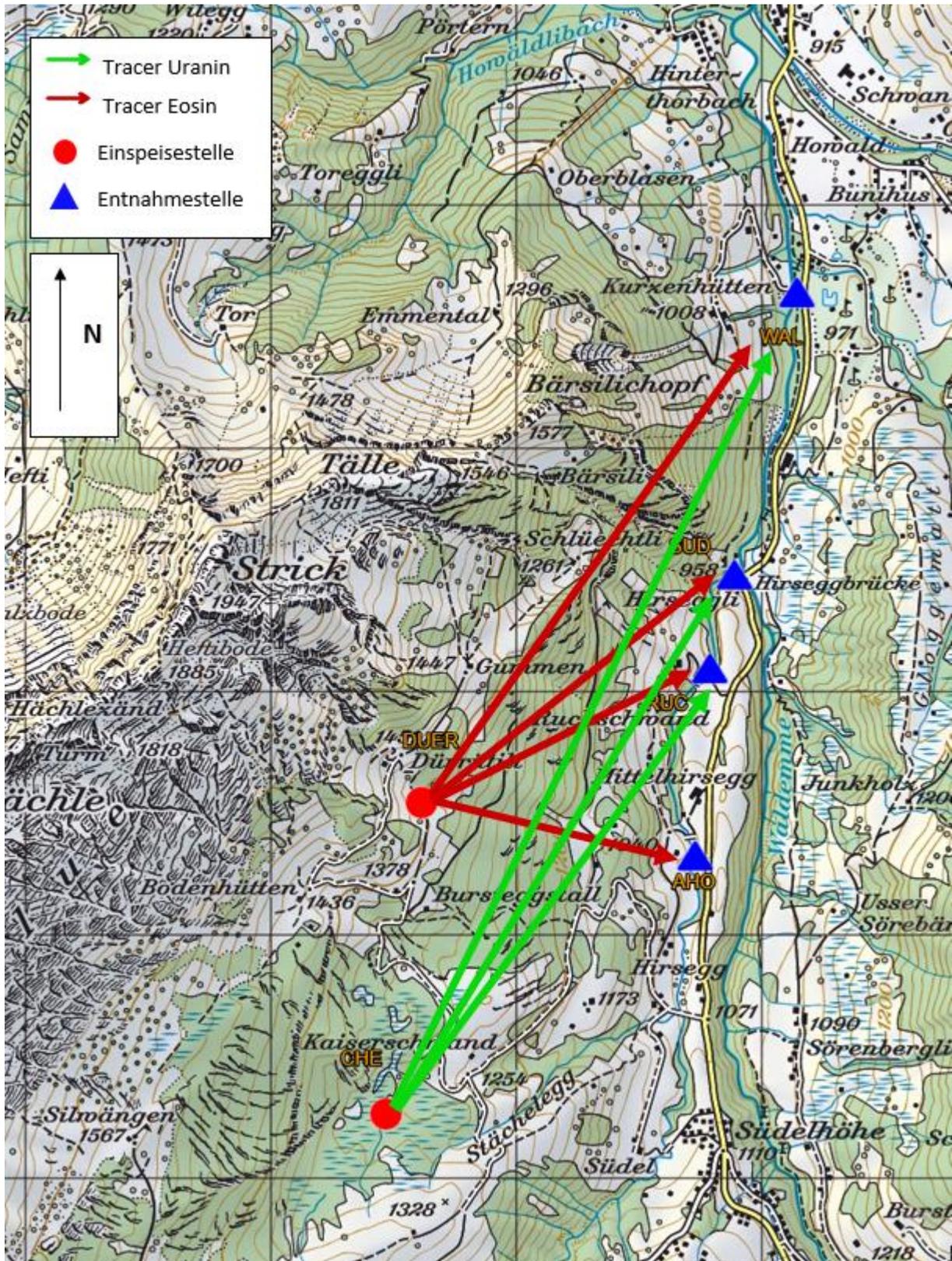


Abbildung 7-2: Nachgewiesene hydraulische Verbindungen durch die in der Schratzenflue eingespeisten Tracer Eosin und Uranin

In der Gegend von Ahornli und Ruchschwand dürfte sich eine Störzone befinden, da ein gewisser Anteil des Abflusses des Südelbaches oberhalb von Ahornli im Bachbett versickert, und der Ort des Wiederaustritts noch nicht verifiziert wurde. Die Quelle Ahornli springt bei

Niederschlag respektive Schneeschmelze an, versiegt aber recht rasch wieder. Bei der Entnahmestelle Ruchschwand tritt neben den beprobten Stellen auf einer Länge von mindestens zehn Metern diffus Wasser aus dem Bachbett.

7.2.1. Standort Ahornli (AHO)

An der Entnahmestelle Ahornli, am östlichen Ufer des Südelbaches, wurde der Tracer Eosin zum ersten Mal nach etwa 62 Stunden nach Einspeisung nachgewiesen. Dieser Wert war auch der mit der höchsten Konzentration der entnommenen Proben. Danach fiel die nachgewiesene Konzentration ab und stieg bis zur 67. Stunde wieder an. In den folgenden 48 Stunden näherte sich die Konzentration wieder dem Null-Wert an. Dann fiel die Quelle trocken und es konnten keinen weiteren Proben genommen werden. In der Zeit der ersten Ankunft des Tracers bis zur 77. Stunde nach Einspeisung wurden 0,82 kg, von den insgesamt eingebrachten 15 kg, des Tracers wiedergefunden. Dieser Zeitraum deckt sich ziemlich genau mit dem Niederschlagsereignis, welches von der 55. bis etwa zur 68. Stunde in dieser Region niederging (siehe dazu Diagramm 7-3).

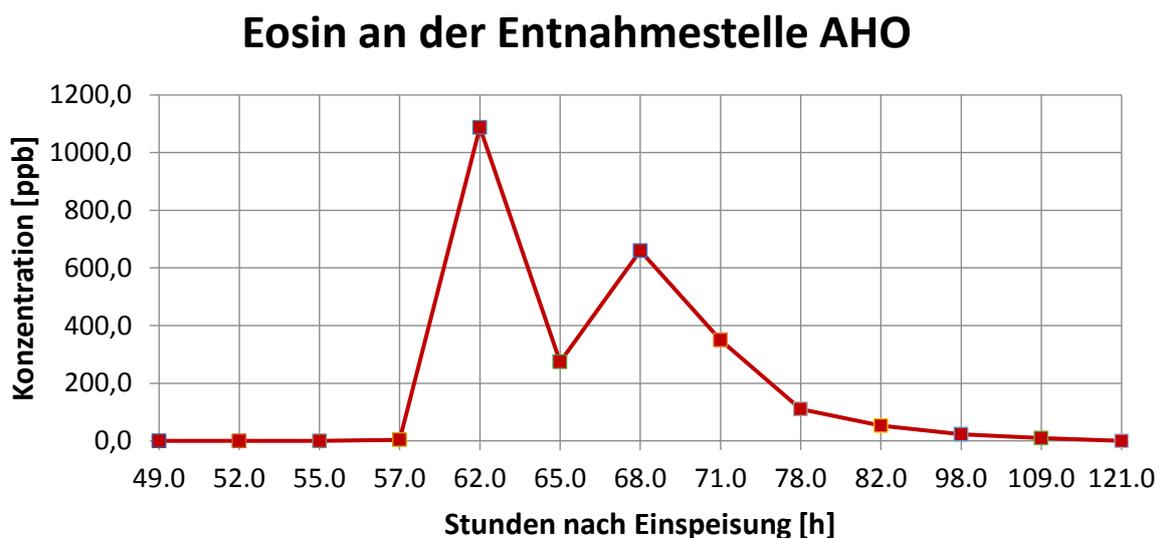


Diagramm 7-3: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Eosin an der Entnahmestelle Ahornli

Der Farbstoff Uranin wurde in dieser Quelle zum Zeitpunkt der Probennahme nicht nachgewiesen.

7.2.2. Standort Ruchschwand (RUC)

An der Quelle Ruchschwand konnte der Tracer Eosin ebenfalls nachgewiesen werden. 62 Stunden nach Einspeisung trat der Farbstoff erstmals aus der Quelle. Drei Stunden später wurde an dieser Probennahmestelle die höchste Konzentration gemessen. Dies ist genau der Zeitraum (die Nacht vom 25. 5. 2015 auf 26. 5. 2015), in dem starke Regenfälle niedergingen. Innerhalb von zwölf Stunden regnete es 21 mm pro m². Der Tracer dürfte durch den Niederschlag mobilisiert und Richtung Tal transportiert worden sein. Nach diesem Peak fällt die Konzentration bis etwa 93 Stunden nach Einspeisung rasch wieder ab. Danach sinkt die Konzentration nur langsam entlang der X-Achse ab (siehe Diagramm 7-4). Insgesamt wurden an dieser Quelle etwa 0,82 kg des Tracers Eosin zurückgewonnen. Die Rückgewinnungsrate beträgt somit 5,4 %.

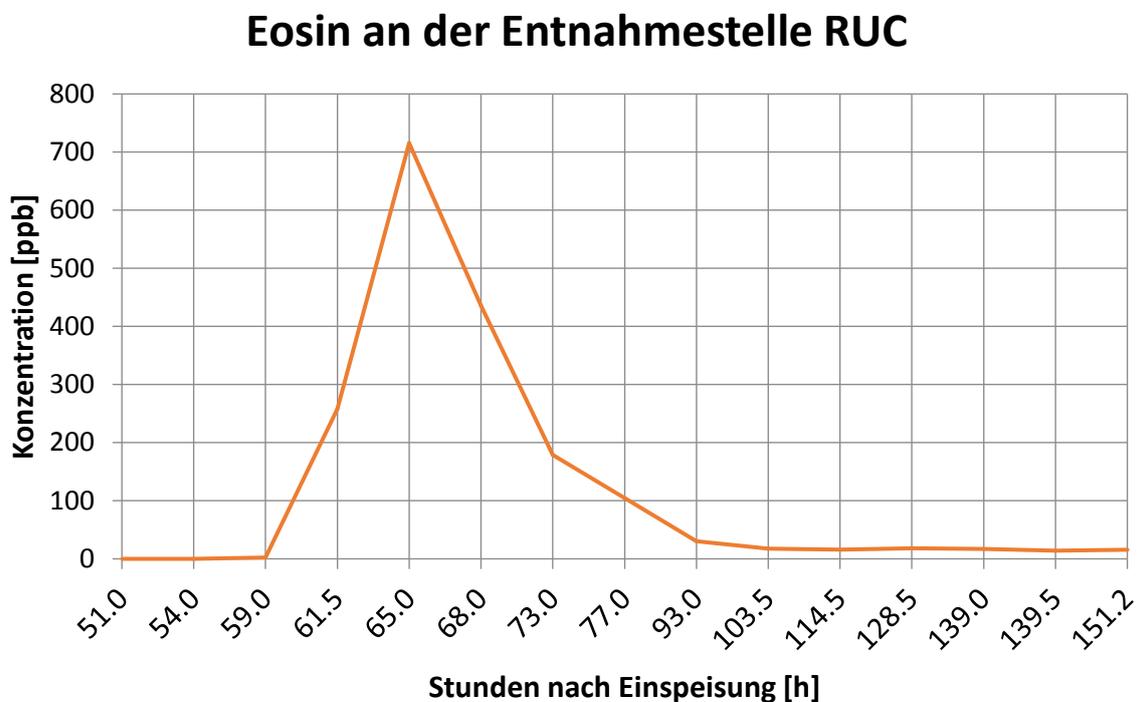


Diagramm 7-4: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Eosin am Standort Ruchschwand

Der Tracer Uranin konnte in Ruchschwand zum ersten Mal nach 59 Stunden nach Einspeisung identifiziert werden. Die Konzentration stieg bis zur 65 Stunde an. Danach fällt sie größtenteils konstant gegen die X-Achse ab (siehe Diagramm 7-5). Insgesamt wurden hier etwa 0,15 kg des Tracers Uranin zurückgewonnen. Die Rückgewinnungsrate liegt somit bei etwa 1 %.

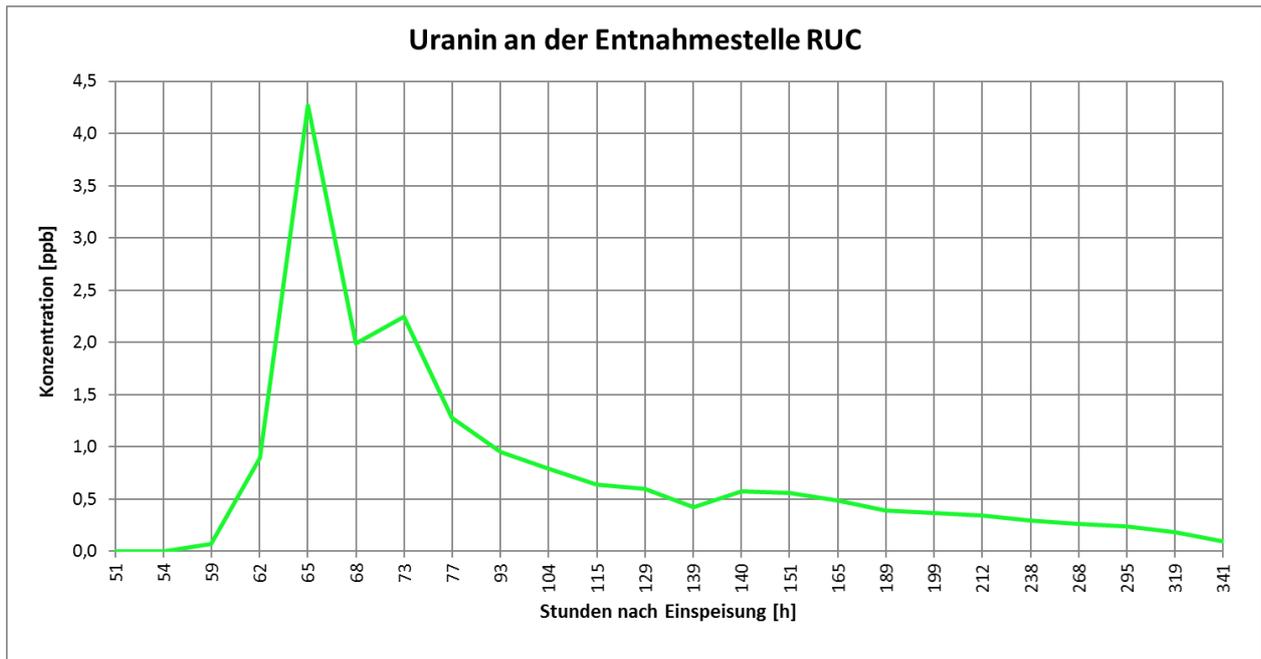


Diagramm 7-5: Konzentrations-Zeit Diagramm des Tracers Uranin an der Entnahmestelle Ruchschwand

7.2.3. Entnahmestelle Südelbach (SUD)

An der Entnahmestelle Südelbach, kurz vor der Einmündung in die Waldemme, konnten beide Tracer, Eosin und Uranin, die in der Schratzenflue eingespeist worden waren, nachgewiesen werden. Bis zur 54. Stunde nach der Einspeisung in der Schratzenflue konnte hier jedoch kein Farbstoff identifiziert werden. Ab diesem Zeitpunkt, Montagabend, setzten anhaltende Niederschläge ein und der Südelbach wurde binnen weniger Stunden zu einem reißenden Bach. Die Probennahme war von 23 Uhr bis in die Morgenstunden aus Sicherheitsgründen nicht möglich. Deshalb gibt es zwischen der 54. und 67. Stunde keine Probennahme an dieser Quelle.

Werden lediglich die vorhandenen Proben ausgewertet – ohne die Werte für den unbeprobten Zeitraum zu interpolieren –, so errechnet sich eine Rückgewinnungsrate von 18,4 %. Dies entspricht 2,76 kg Eosin. Der Konzentrationsverlauf des Tracers ist im untenstehenden Diagramm dargestellt.

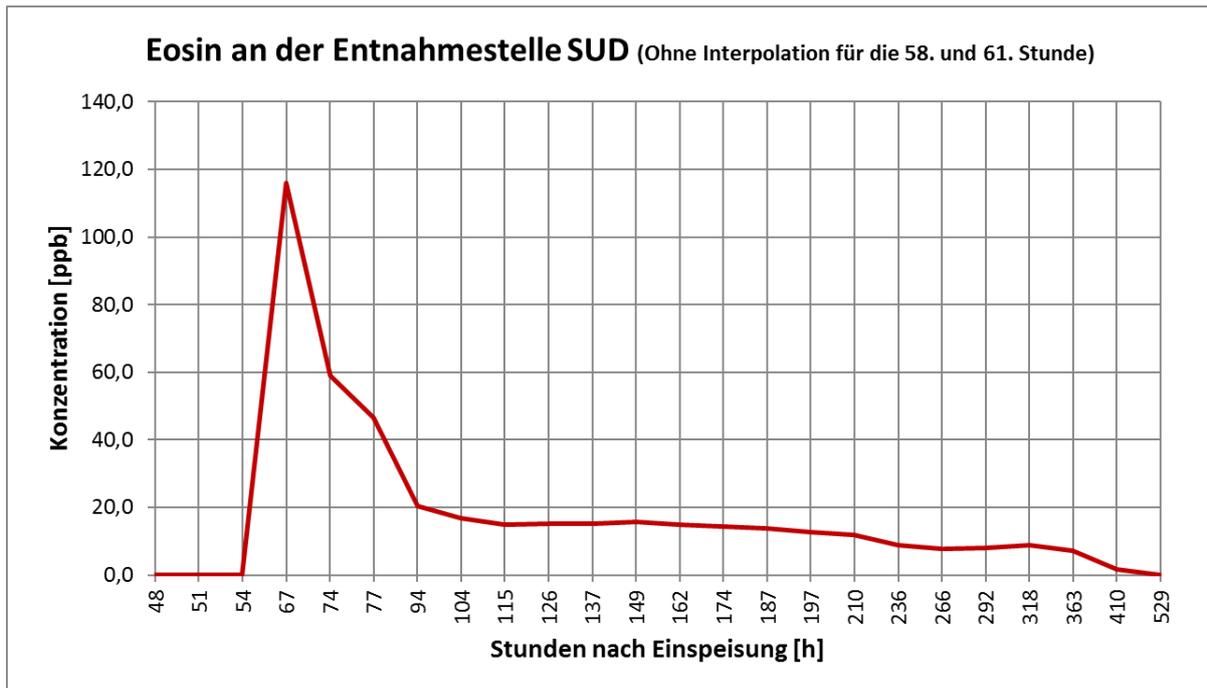


Diagramm 7-6: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Eosin an der Entnahmestelle Südélbach ohne Interpolation der nicht genommenen Proben zur 58. und 61. Stunde

Ähnlich verhält es sich mit dem Tracer Uranin. Auch für ihn fehlen die Werte zwischen 54. und 67. Stunde. Die Rückgewinnungsrate beträgt hier etwa 15 %, dies entspricht 2,35 kg. Das Diagramm 7-7 zeigt den Konzentrationsverlauf des Tracers Uranin ohne interpolierte Werte der nicht vorhandenen Proben.

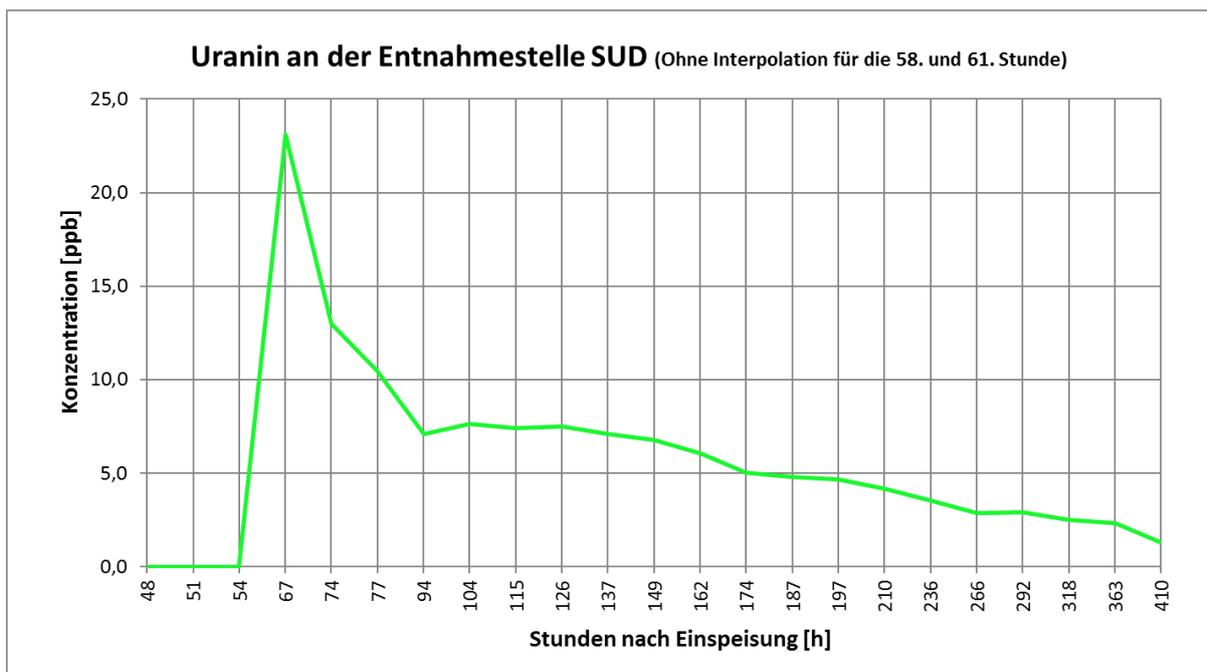


Diagramm 7-7: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Uranin an der Entnahmestelle Südélbach ohne Abschätzung der nicht genommenen Proben zur 58. und 61. Stunde

Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Peak an dieser Entnahmestelle genau im nicht beprobten Zeitraum lag. Um eine repräsentative Durchgangskurve und Rückgewinnungsmenge erhalten zu können, müssen die fehlenden Daten interpoliert bzw. abgeschätzt werden. Bei der flussaufwärts liegenden Quelle (Ruchschwand) wurde ein Peak etwa 65 Stunden nach Einspeisung registriert. Somit ist davon auszugehen, dass auch im Südelbach der größte Teil der Tracer um die 65. Stunde durchgeflossen ist. Werden die Werte wie in den beiden untenstehenden Diagrammen angenommen, kann für den Tracer Eosin eine Rückgewinnungsrate von 47 % (entspricht rund 7 kg) und für Uranin 18 % (entspricht 2,75 kg) errechnet werden (siehe dazu Abbildung 7-8 und 7-9).

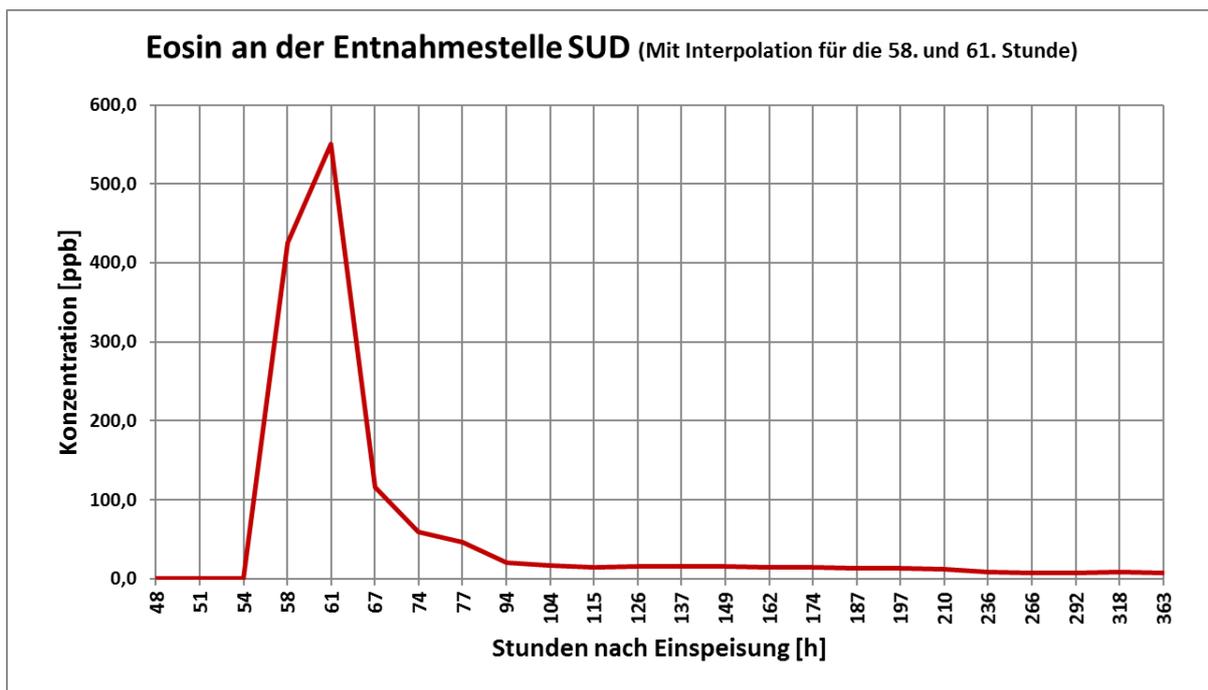


Diagramm 7-8: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Eosin an der Entnahmestelle Südelbach mit Abschätzung der nicht genommenen Proben zur 58. und 61. Stunde

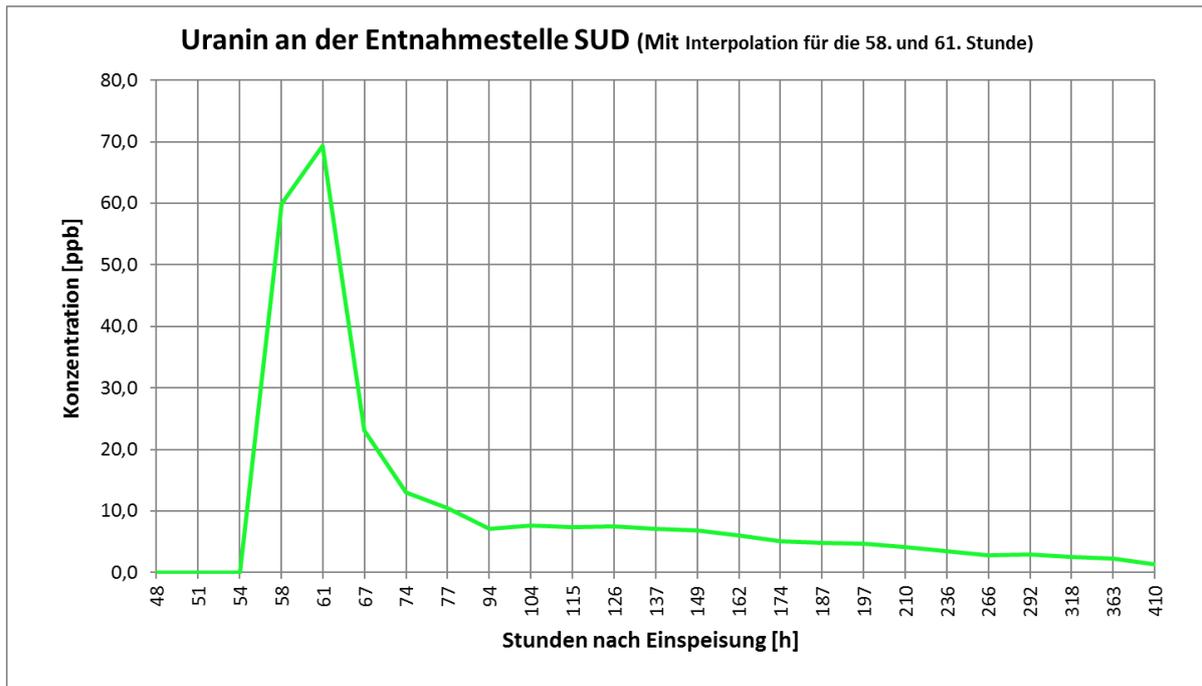


Diagramm 7-9: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Uranin an der Entnahmestelle Südelbach mit Abschätzung der nicht genommenen Proben zur 58. und 61. Stunde

Flussaufwärts befindet sich die Störzone Ahornli/Ruchschwand. Hier konnte während der Probennahme ein Zufluss aus dem Bachbett beobachtet werden. Es ist möglich, dass es hier noch mehr diffuse Wassereinträge aus dem Grundwasser in den Südelbach gibt, die die Tracer erst nach der Quelle Ruchschwand in den Südelbach getragen haben. Diese Vermutung lässt sich mit Vorsicht bestätigen, vergleicht man die Rückgewinnungsraten der einzelnen Quellen. Hier ist ein nicht unbedeutender Schwankungsbereich zu berücksichtigen. Erstens sind die interpolierten Werte zwischen der 54. und 67. Stunde eben nur geschätzt, und zweitens schwoll der Südelbach in dieser Zeit zu einem reißenden Fluss an, was die Abschätzung der Abflussmenge erschwert.

7.2.4. Entnahmestelle Waldemme (WAL)

An der Entnahmestelle Waldemme wurden die Tracer Eosin und Uranin, die im oberen Flusslauf bereits bei SUD aufgetreten waren, ebenfalls nachgewiesen. Beprobte wurde die Waldemme nach der Einmündung des Südelbaches in dieselbe. Die Verdünnung der Tracer war an dieser Stelle relativ groß, da die Waldemme vor der Vereinigung mit dem Südelbach etwa den 2,5-fachen Abfluss aufweist und dementsprechend die Tracer verdünnt.

Trotzdem konnte der Tracer Eosin, genau wie am Südelbach, nach 58 Stunden in der Waldemme nachgewiesen werden. Hier liegt zugleich der Spitzenwert der identifizierten Konzentration. Danach fällt die Konzentration bis zur 93. Stunde nach Einspeisung auf null ab. Im Vergleich zu den anderen beprobten Wasserläufen gibt es hier aufgrund der starken

Vermischung praktisch kein nachweisbares Tailing (langsames Annähern der Konzentration gegen die X-Achse), was natürlich nicht heißt, dass kein Eosin mehr vorhanden war (siehe Diagramm 7-10). Insgesamt konnten an der Waldemme knapp 2,6 kg Eosin zurückgewonnen werden. Dies entspricht einer Rückgewinnungsrate von 17 %.

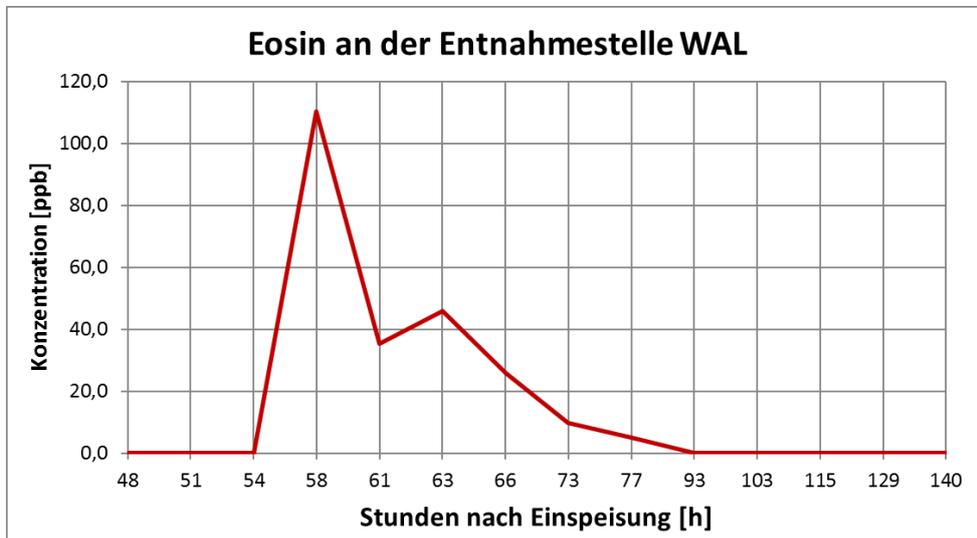


Diagramm 7-10: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Eosin an der Entnahmestelle Waldemme

Ebenfalls 58 Stunden nach Einspeisung, während des Starkregenereignisses, konnte Uranin in der Waldemme nachgewiesen werden. Danach fällt die Konzentration des Tracers rasch bis zur 77. Stunde nach Einspeisung wieder ab. 16 Stunden später wurde erneut ein leichter Peak dokumentiert. Anschließend sinkt die Konzentration allmählich gegen die X-Achse (siehe Diagramm 7-11). Insgesamt wurden 10 %, etwa 1,53 kg, des Uranins in der Waldemme nachgewiesen.

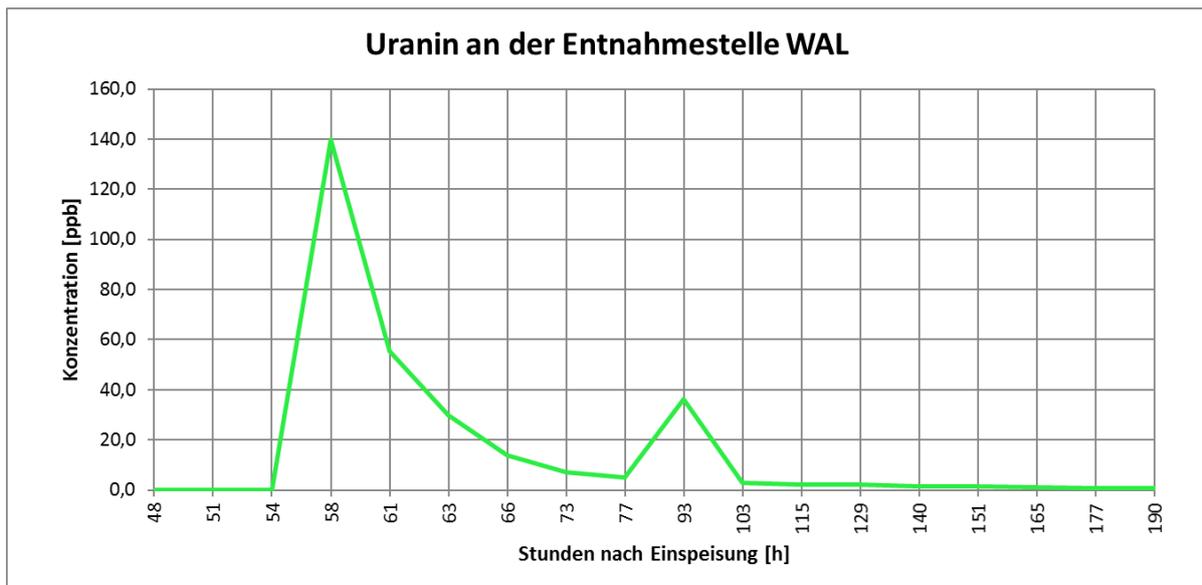


Diagramm 7-11: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Uranin an der Entnahmestelle Waldemme

7.2.5. Wo konnte nichts nachgewiesen werden

In fünf der elf regelmäßig beprobten Quellen konnten die Fluoreszenzfarbstoffe nachgewiesen werden. An allen anderen Quellen bzw. Entnahmestellen konnten die Tracer nicht nachgewiesen werden.

Es ist jedoch zu beachten, dass „nicht nachgewiesen“ nicht unbedingt bedeutet, dass keine hydraulische Verbindung zwischen dem Einspeise- und Austrittsort besteht. Es bedeutet lediglich, dass in der Zeitspanne dieses Tracerversuches mit den beschriebenen Auswerteverfahren bei den herrschenden Rahmenbedingungen kein Tracer nachgewiesen werden konnte. Dieser Versuch spiegelt ein kleines Zeitfenster und nur einen kleinen Ausschnitt in diesem großen System wider. Um dieses System noch besser verstehen zu können ist es notwendig, weiter zu forschen.

7.3. Background Fluorescence Analysis (BFA) (=Grundfluoreszenzanalyse)

7.3.1. Allgemeines über BFA

Zusätzlich zur Auswertung aller Proben wurden knapp 20 Wasserproben (2 x 40 ml) mittels BFA (Background Fluorescence Analysis) von Nano Trace Technologies™ (Orpund, Schweiz) auf ihre charakteristische Grundfluoreszenz untersucht. Die in diesem Verfahren untersuchten Proben wurden vor der Einspeisung der Tracer genommen, um ihre natürliche Zusammensetzung ermitteln zu können. Die Ergebnisse dieses Verfahrens dienen als Ergänzung zu den mittels Fluorometer erhaltenen Erkenntnissen (Otz, 2015).

Entgegen der häufig getroffenen Annahme bewegt sich Grundwasser nicht in einer homogenen und gleichförmigen Strömungsfront durch den Untergrund. Vielmehr bewegt sich der Großteil des Grundwasserstroms – inklusive aller gelösten Stoffe – überwiegend entlang bevorzugter Fließwege. Ursache hierfür sind Inhomogenitäten des Grundwasserleiters. Hauptziel der BFA ist nicht die Quantifizierung einzelner Schadstoffe/natürlicher Huminstoffe, sondern die Evaluation der hydraulischen Konnektivität eines Grundwasserleiters/Oberflächengewässers, insbesondere das Auffinden präferentieller Strömungsbahnen (ebd.).

Außerdem kann die BFA sehr rasch belastetes von unbelastetem Grundwasser unterscheiden und trennen. Aufgrund der Tatsache, dass jedes Grundwasser eine charakteristische Grundfluoreszenz aufweist, kann die BFA erfolgreich als Fingerprint-Analyse für Grundwasser verwendet werden (ebd.).

Die BFA misst die Intensität und Wellenlängenspitze von natürlichen und/oder anthropogenen Fluoreszenzen im Grundwasser. Die meisten organischen Verbindungen strahlen eine charakteristische Fluoreszenz aus, wenn sie bestimmte elektromagnetische Strahlung absorbieren. Mittels eines Spektralfluorometers werden alle fluoreszierenden organischen Verbindungen in einer Wasserprobe nachgewiesen. Unter der Annahme, dass jedes Gewässer eine einzigartige spezifische Fluoreszenz besitzt, kann die BFA erfolgreich als „Fingerabdruck-Werkzeug“ (Fingerprinting Tool) eingesetzt werden.

„Grundfluoreszenz-Fingerabdrücke“ werden auch Synchroscans genannt. Jeder Synchroscan enthält eine grafische 2D-Darstellung von allen gelösten organischen fluoreszierenden Verbindungen einer Wasserprobe. Werden alle Synchroscans miteinander verglichen, kann ein Spezialist die hydraulischen Verbindungen zwischen den Entnahmeorten, Informationen über Kontaminationen, Zersetzungsprodukte, Fließrichtung und deren natürliche Verdünnungsprozesse beschreiben. Die Nano Trace Technologies™ empfiehlt den Einsatz beider Methoden, Grundfluoreszenzanalyse sowie Einspeisung von Fluoreszenztracern, um ein optimales Ergebnis zu erhalten (ebd.).

7.3.2. Ergebnisse

Von 19. Mai 2015 bis 23. Mai 2015 wurden 19 Wasserproben in 2x 40 ml glasklaren Probenfläschchen gesammelt. Dr. Martin H. Otz nahm alle Wasserproben am 18. 5. 2015 von Robert Ganauser und Dr. Philipp Häuselmann entgegen. Alle Proben wurden am 25. 5. 2015 im Labor von Nano Trace Technologies™ in Orpund, BE, Schweiz, auf ihre Grundfluoreszenz hin ausgewertet. Alle Proben wurden vor der Analytik durch säuregewaschene 0.45-µm Glassfiberfilter aufbereitet. Zwischen jeder neuen Probe wurde die verwendete Quartzkuvette mit Reinstwasser auf ihre Reinheit überprüft.

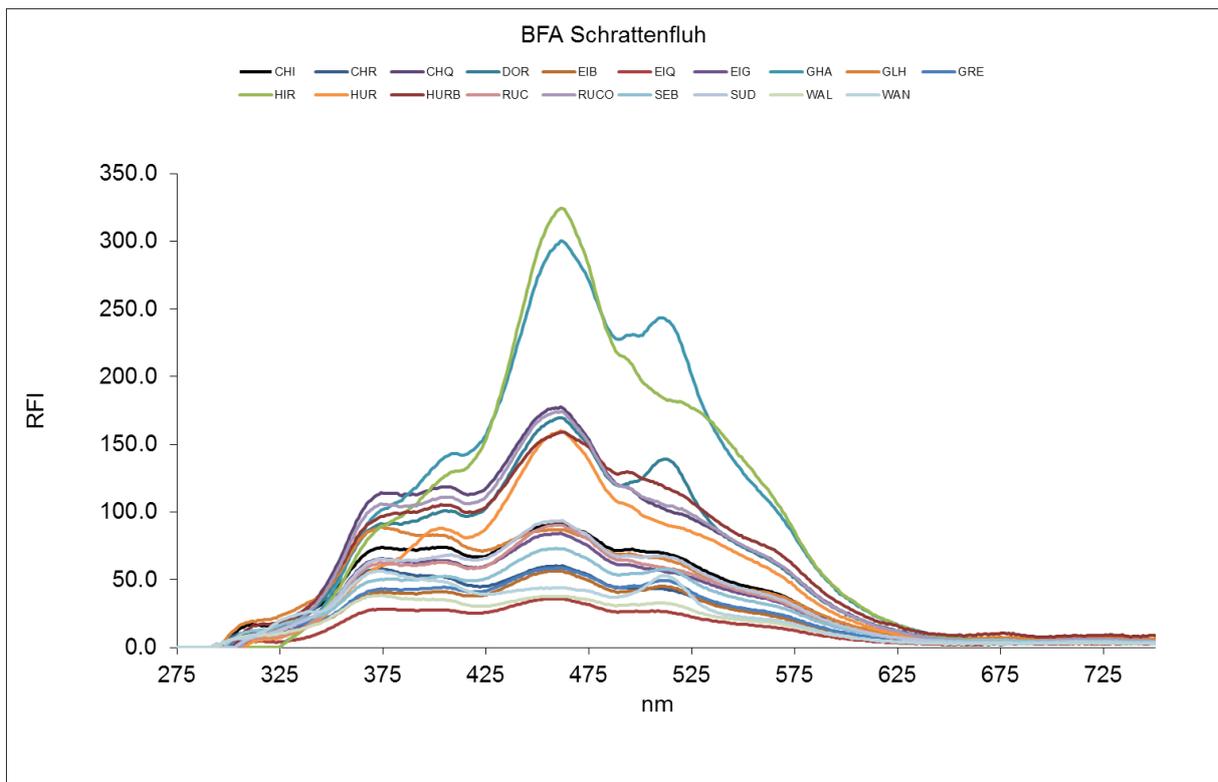


Diagramm 7-12: Das Diagramm zeigt die 19 Fluoreszenzfingerprints

Das Diagramm zeigt, dass sich alle Fluoreszenzfingerprints wohl unterscheiden, dass jedoch gewisse Bereiche übereinstimmen. Nun werden immer je zwei Signaturen miteinander verglichen und deren Ähnlichkeiten notiert. Das Ergebnis ist eine Tabelle, die die detektierten Emissionspeaks für alle untersuchten Proben zwischen den Wellenlängen von 312 nm und 734 nm zusammenfasst.

Tabelle 7-1: Grundwasser-Assoziationsmatrix

potenziell hydraulisch verbunden	→	diese Beziehung werden für die hydraulische Verbindungen verwendet	→	potenziell präferentielle Grundwasserfließwege
die Hauptpeaks stimmen überein			→	potenziell Grundwasserfluss durch die poröse Matrix
einige Segmente stimmen überein				
nur untergeordnete Peaks stimmen noch überein	→	nicht verwendet		
keine Übereinstimmung				

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	CHI	CHR	CHQ	DOR	EIB	EIG	EIQ	GHA	GLH	GRE	HIR	HUR	HURB	RUC	RUCO	SEB	SUD	WAL	WAN
CHI	Black	Black	Orange	Black	Black	Cyan	Green	Black	Cyan	Green	Black	Black	Orange	Green	Black	Green	Orange	Black	Black
CHR	Black	Black	Black	Black	Orange	Black	Black	Black	Orange	Orange	Black	Black	Black	Black	Black	Orange	Black	Black	Orange
CHQ	Orange	Black	Black	Green	Black	Green	Black	Black	Black	Black	Black	Orange	Green	Green	Cyan	Black	Black	Black	Black
DOR	Black	Black	Green	Black	Black	Black	Black	Orange	Black	Orange	Black	Black	Orange	Orange	Cyan	Orange	Green	Black	Black
EIB	Black	Orange	Black	Black	Black	Black	Orange	Black	Black	Cyan	Black	Black	Black	Black	Black	Green	Orange	Orange	Green
EIG	Cyan	Black	Green	Black	Black	Black	Orange	Black	Orange	Orange	Black	Black	Black	Cyan	Green	Orange	Orange	Orange	Black
EIQ	Green	Black	Black	Black	Orange	Orange	Black	Black	Orange	Orange	Black	Black	Black	Orange	Orange	Orange	Orange	Green	Black
GHA	Black	Black	Black	Orange	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Green	Orange	Black						
GLH	Cyan	Orange	Black	Black	Black	Orange	Orange	Black	Black	Orange	Black	Black	Green	Black	Black	Orange	Black	Black	Black
GRE	Green	Orange	Black	Orange	Cyan	Black	Black	Black	Orange	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Green	Orange	Orange	Green
HIR	Black	Green	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black						
HUR	Black	Black	Orange	Black	Black	Black	Black	Orange	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Orange	Black	Black	Black	Black
HURB	Orange	Black	Green	Orange	Black	Orange	Black	Black	Green	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black
RUC	Green	Black	Green	Orange	Black	Cyan	Orange	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Green	Black	Cyan	Black	Black
RUCO	Black	Black	Cyan	Cyan	Black	Green	Black	Black	Black	Black	Black	Orange	Black	Green	Black	Black	Orange	Black	Black
SEB	Green	Orange	Black	Orange	Green	Orange	Black	Black	Orange	Green	Black	Black	Black	Black	Black	Orange	Black	Orange	Black
SUD	Orange	Black	Black	Green	Orange	Orange	Orange	Black	Black	Orange	Black	Black	Black	Cyan	Orange	Orange	Black	Black	Black
WAL	Black	Black	Black	Black	Orange	Orange	Green	Black	Black	Orange	Black	Black	Black	Black	Black	Orange	Black	Black	Green
WAN	Black	Orange	Black	Black	Green	Black	Black	Black	Black	Green	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Green	Black

In der Grundwasser-Assoziationsmatrix (Abbildung oben) werden die Fluoreszenzfingerprints verglichen und die Ergebnisse farblich dargestellt. Beim Vergleich wird jeder Fluoreszenzfingerprint jeder Wasserprobe mittels eines speziellen Computeralgorithmus mit jedem anderen Fluoreszenzfingerprint verglichen. Den unterschiedlichen Übereinstimmungsgraden werden fünf verschiedene Farben zugeordnet: Eine blaue Zelle entspricht einer fast identischen Übereinstimmung der beiden Fluoreszenzfingerprints. Grün markiert eine gute Übereinstimmung, jedoch einige Abweichungen in gewissen Fingerprintsegmenten, sei es durch Stoffveränderungen entlang eines Fließweges oder aufgrund von Mischungen zweier Grundwässer mit unterschiedlichen Signaturen. Bei einer orangefarbenen Zelle stimmen nur noch einzelne Fingerprintsegmente überein.

Die blauen und grünen Zellen deuten auf potentiell bevorzugte hydraulische Verbindungen zwischen den entsprechenden Messstellen hin. Die orangefarbenen Zellen verweisen eher auf schlechte hydraulische Verbindungen zwischen den Messstellen, d. h. die Verbindung zwischen diesen Messstellen ist zwar potentiell gegeben, aber volumenmäßig weitaus weniger bedeutend als bei blau oder grün markierten Verbindungen. Bei den grauen und schwarzen Zellen gibt es sehr wenige Übereinstimmungen der Peaks, d. h. zwischen diesen Messstellen gibt es kaum potentielle Verbindungen.

Im nächsten Schritt werden die Informationen der Grundwasser-Assoziationsmatrix mit der Topografiekarte und den hydraulischen Informationen verglichen. Dabei ergeben sich grundsätzlich drei Möglichkeiten für eine Beziehung der Piezometer untereinander, sobald die Fingerprints Übereinstimmungen anzeigen (Abb. 7-3).

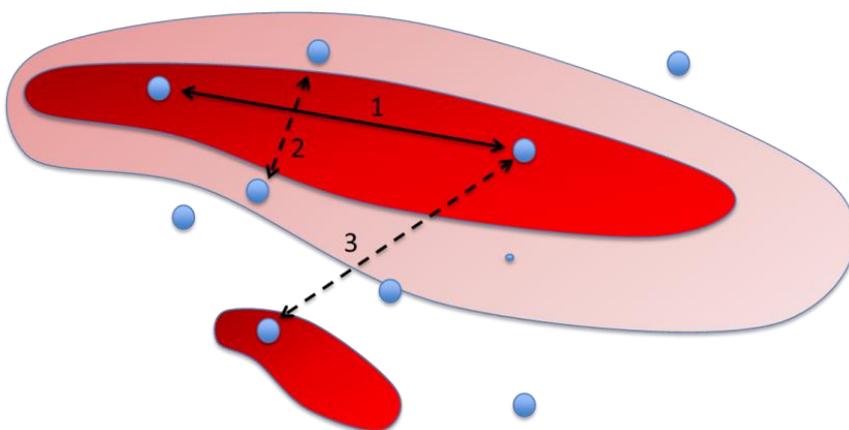


Abbildung 7-3: Drei Möglichkeiten für eine Beziehung der Piezometer

1. Es besteht eine direkte hydraulische Verbindung zwischen Piezometer A und Piezometer B, da die Fluoreszenzfingerprints identisch oder sehr ähnlich sind,
2. die zwei Piezometer sind nicht hydraulisch verbunden, da sich beide Piezometer in der Randzone der Fahne befinden. Beide zeigen also dieselben organischen Stoffe bzw. Abbauprodukte und somit eine sehr ähnliche Fluoreszenzsignatur, oder
3. die Ähnlichkeit ist auf zwei getrennte Eintragungsorte (Quellen) mit denselben organischen Stoffen zurückzuführen.

(Otz, 2015)

Von der Entscheidung, welcher Fall in der Beziehung der Piezometer vorliegt, hängt ab, ob es sich bei der Assoziation tatsächlich um eine hydraulische Verbindung handelt oder nicht. Schließlich müssen alle in der Grundwasser-Assoziationsmatrix aufgelisteten Beziehungen untereinander stimmen und im hydrogeologischen Kontext erklärbar sein. Wenn alle Bedingungen der Matrix erfüllt sind, erscheinen die präferentiellen Fließwege (Otz, 2015).

Die Ergebnisse zeigen, dass das Höhlensystem regional und extensiv ist. Außerdem wurden einige Verbindungen, die durch Tracer nachgewiesen wurden, auch auf diesem Weg nachgewiesen. Die Grundwasser-Assoziationsmatrix bietet aber viel Platz für Interpretationen, was die hydraulischen Verbindungen bzw. mögliche Zusammenhänge des Höhlensystems betrifft. Bei der Interpretation der Grundfluoreszenzanalyse ist jedoch zu bedenken, dass ähnliche Exposition, Geologie und Klima auch ähnliche Pflanzenvergesellschaftungen und Alpbewirtschaftungen produziert und dass die BFA sich auch ähneln kann, ohne dass ein hydraulischer Zusammenhang vorhanden ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es bei einem Tracerversuch sinnvoll ist, beide Methoden, die Tracer-Eingabe sowie die Grundfluoreszenzanalyse, zu kombinieren, um ein aussagekräftigeres Bild zu erhalten.

8. Interpretation

Die untenstehende Tabelle gibt einen Überblick über die Entnahmestellen, verwendete Tracer und deren Ankunftszeit sowie deren Rückgewinnungsmenge.

Tabelle 8-1: Überblick der Entnahmestellen, verwendeten Tracer, deren Ankunftszeit sowie die errechnete Rückgewinnungsmenge

Probennahme- stelle	Kürzel	Q (l/s) Mittelwert (geschätzt)	Tracer	erste	Spitze	Distanz (Luftlinie) (m)	Fließgeschwindigkeit		Rückgewinnungs- menge	
				Ankunft (h)	(h)		max (m/h)	Spitze (m/h)	(kg)	(%)
Ahornli	AHO	0-30	Eosin	62	62	1100	18	18	0,82	5,5
Ahornli	AHO	0-30	--	--	--	--	--	--	--	--
Chragen	CHR	0-15	--	--	--	--	--	--	--	--
Eibach	EIB	100-300	--	--	--	--	--	--	--	--
Gelbenbrunnen	GLB	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Große Entle	GRE	200-500	--	--	--	--	--	--	--	--
Harder Quelle	HAR	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Ruchschwand	RUC	0-60	Eosin	59	65	1200	20	18	0,82	5,5
Ruchschwand	RUC	0-60	Uranin	59	65	2200	37	34	0,15	1,0
Seebenbach	SEB	80-400	Tinopal CBS-X	36	36	4000	111	111	10,75	53,8
Seebenbach	SEB	80-400	Na-Naphthionat	10	14; 36	1200	120	86; 33	32,53	65,1
Südelbach bei Hirseggli	SUD	30-400	Eosin	58	61	1500	26	25	7,11	47,4
Südelbach bei Hirseggli	SUD	30-400	Uranin	58	61	2600	45	43	2,35	15,7
Waldemme	WAL	400-2000	Eosin	58	58	2200	38	38	1,53	10,2
Waldemme	WAL	400-2000	Uranin	58	58	3300	57	57	2,58	17,2
Wanegg	WAN	7-40	--	--	--	--	--	--	--	--

Die Rückgewinnungsmengen müssen mit Vorsicht betrachtet werden. Die aus dem Labor stammenden Werte werden auf mg/l umgerechnet. Dieser Wert wird mit dem Abfluss der Quelle respektive des Flusses multipliziert. Die optische Abschätzung des Abflusses, wenn sie auch noch so gewissenhaft erledigt wird, beinhaltet Ungenauigkeiten. Gerade zwischen der 55. und der 67. Stunde, in der Zeit des Niederschlagsereignisses und dem damit verbundenen Anschwellen der Abflüsse, kann sich eine falsche Einschätzung der Abflussmenge stark auf die Rückgewinnungsmenge auswirken. Zusätzlich bestimmt auch das Probenintervall die Rückgewinnungsmenge. Wurde das Intervall so gewählt, dass im schlimmsten Fall ein Peak genau zwischen zwei Proben fällt, geht der Tracer mehr oder weniger unbemerkt „den Bach hinunter“. Die Tracer weisen unterschiedliche Adsorptionsverhalten auf und bleiben Monate, ja sogar bis zu Jahre im System und werden nur langsam wieder freigegeben.

8.1. Schwändilflue

Aus der obenstehenden Tabelle geht hervor, dass alle Tracer erfolgreich nachgewiesen werden konnten. In der Schwändilflue wurde der Tracer Na-Naphthionat zum ersten Mal nach zehn Stunden im Seebenbach nachgewiesen, Tinopal CBS-X zum ersten Mal nach 36 Stunden. Die Spitzenwerte der beiden Tracer wurden jeweils zur 36. Stunde verzeichnet. Dies legt aufgrund der unterschiedlichen Fließdistanzen die Vermutung nahe, dass es bei der Auswertung im Fluorometer zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Tracer gekommen ist und die beiden Tracer nicht klar getrennt werden konnten.

Deshalb wurden einige Proben mittels Doppelscanning-Verfahren (Gerät: Shimadzu RF-5301PC) ausgewertet. In den Ergebnissen des Doppelscannings bestätigte sich die Vermutung, dass Tinopal von der 36. bis zur 65. Stunde so intensiv vorhanden war, dass der Tracer Na-Naphthionat camouflierte, wodurch eine genaue Quantifizierung der Konzentrationen in dieser Zeitspanne unmöglich wurde. Deswegen kommt es bei der Berechnung der Rückgewinnungsrate des Tracers zu einem bestimmten Schwankungsbereich. Ab der 65. Stunde nimmt die Konzentration von Tinopal so weit ab, dass Naphthionat wieder sicher bestimmt werden kann. Ab der 65. Stunde nach Einspeisung nehmen beide Konzentrationen langsam, aber stetig, in Form eines sich der X-Achse annähernden, abfallenden Asts ab. Mit Sicherheit kann gesagt werden, dass der Tracer Na-Naphthionat ab der zehnten bis zur 30. Stunde klar nachgewiesen werden konnte. Der erste Spitzenwert wurde 14 Stunden nach Einspeisung gemessen. Weiters wurde der Tracer Tinopal definitiv erst ab der 36. Stunde nachgewiesen; ebenso sein Peak und das recht starke Abklingen der Konzentration bis zur 65. Stunde.

Mit Vorsicht ist hingegen der zweite größere Peak des Na-Naphthionats zu betrachten. Wird vorausgesetzt, dass sich der Tracer nicht vom Tinopal beeinflussen ließ, kann eine

Rückgewinnungsrate von 65 % errechnet werden. Wird jedoch angenommen, dass der Peak durch das Auftreten der Tracers Tinopal verursacht oder zumindest beeinflusst worden ist und die in dieser Zeit zurückgewonnene Menge vernachlässigt, dann liegt die Rückgewinnungsrate von Naphthionat bei 29 %. Dies entspricht 14 kg.

Es ist davon auszugehen, dass die realen Werte dazwischen liegen. Der Tracer Tinopal hat den Tracer Na-Naphthionat bestimmt beeinflusst, da die Ankunft der Peaks zur selben Stunde nach Einspeisung aufgrund der unterschiedlichen Fließdistanzen recht auffällig ist. Außerdem muss das Starkregenereignis von der 55. Stunde bis etwa zur 70. Stunde berücksichtigt werden, da mit dem Oberflächenabfluss auch eine Menge organische Stoffe mitgeschwemmt wurden und diese bei der Auswertung der Proben ebenso zu Problemen führen bzw. das Ergebnis stark beeinflussen können.

Grundsätzlich ist aber davon auszugehen, dass der gesamte südliche Bereich der Schwändiliflue (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 wird davon ausgegangen, dass sich das Einzugsgebiet der Wanegg-Quelle etwa ab der Hurbele gegen Norden befindet, während sich jenes des Eibachs von der Quelle aus gegen den Pilatus hin erstreckt. Letzteres scheint auch aufgrund der tektonischen Lage der Quelle, 300 m über dem Talgrund der Entle, wahrscheinlich.

8.2. Schrattenflue

Aufgrund des Farbstoffnachweises in den Entnahmestellen Ahornli, Ruchschwand, Südelbach und Waldemme konnte die Vermutung bestätigt werden, dass der nordöstliche Teil der Schrattenflue tatsächlich zur Nordostflanke hin in Richtung Südelbach entwässert.

Der Farbstoff Eosin, eingebracht bei Dürrütli konnte in den temporäreren Quellen Ahornli und Ruchschwand nach circa 59 und 62 Stunden nachgewiesen werden. 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 so weit abfällt, dass das Bachbett oberhalb der Ruchschwandquelle trockenfällt, wird sichtbar, dass etwa zehn Meter flussabwärts der Quelle Wasser diffus aus dem Bachbett und, auf der orographisch linken Seite, aus der Böschung quillt.

In Ruchschwand wurden das erste Mal nach 59 und 62 Stunden die Tracer Uranin und Eosin nachgewiesen. Da die Wässer von Ruchschwand in Richtung Entnahmestelle Südelbach

fließen und der Südelbach bei der Hirseggbücke in die Waldemme mündet, ist auch dort der Tracernachweis von Eosin und Uranin gelungen.

Beim Markierversuch im Jahr 1970 war der Tracer nach 38 Stunden im Bätterich und Gelberbrunnen aufgetreten. Das ergibt eine Fließgeschwindigkeit von etwa 544 m/h (Knuchel 1972). Dass der Tracer 1972 diese Distanz in so kurzer Zeit durchfloss, lässt sich durch freies Fließen in reifem Karst erklären. Zusätzlich herrschte zum Versuchszeitpunkt erhöhter Abfluss durch Schmelzwasser.

In unserem Tracerversuch bahnte sich das Wasser seinen Weg von der Eingabestelle Dürrütli (Eosin) bis zur Entnahmestelle Südelbach nur mit einer Fließgeschwindigkeit von rund 26 m/h. Eine Fließgeschwindigkeit von circa 45 m/h erreichte das Wasser von der Einspeisestelle Cheiserschwand bis zur Probennahmestelle Südelbach. Diese eher langsamen Geschwindigkeiten sprechen gegen ein schnelles Fließen in Höhlen. Ein Grund für diese langen 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 Wassermenge aktiviert das Wasser und befördert es in Richtung Quelle.

Weiters kann angenommen werden, dass es sich im untersuchten Bereich um jungen Karst handelt. Diese Interpretation wird durch die Beobachtungen der ansässigen Bauern gestützt, 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 wurden erst nach etwa 59 Stunden detektiert. Vom Zeitpunkt der Eingabe bis zum ersten Fund des Tracers herrschten trockene Bedingungen und somit wenig Abfluss. Auf der Schrattenflue waren im Vergleich zur Schwändiliflue kaum mehr Schneefelder vorhanden, die für erhöhten Abfluss hätten sorgen können. Etwa ab der 58. Stunde nach Eingabe begann es zu regnen, wodurch dann wenig später die Tracer aktiviert wurden.

Die Bachversickerung entlang des Südelbaches oberhalb der Entnahmestelle Ahornli bekräftigt die Annahme, dass es sich um unreifen Karst handelt. Während der Versuchsdurchführung wurde ersichtlich, dass bei abnehmendem Abfluss im Südelbach das Flussbett auf einer Länge von etwa 900 m trockenfiel, obwohl flussaufwärts Abfluss vorhanden war. Auf etwa einer Länge von 15 m versickert das Wasser unter dem Bachbett. Dies ist auf eine Störzone in diesem Bereich zurückzuführen. Sie dürfte aus unreifem Karst mit nur schwach ausgeprägten Klüften bestehen, da nur bis etwa 5 l/s im Bachbett verschwinden. Abflussmengen, die diesen Wert überschreiten, fließen über diese Bachversickerung hinweg. Somit ist bei normalem bis hohem Abfluss von dieser Versickerung nicht viel zu bemerken. Etwa 900m flussabwärts, unterhalb der Brücke Ruchschwand (Weg zum Haus Ruchschwand 1), wurde bei den Entnahmestellen

Ruchschwand zusätzlich aus dem Bachbett quellendes Wasser festgestellt. Es könnte sich um das flussauf versickernde Wasser handeln. Diese Annahme sollte jedoch mit einem weiteren Tracerversuch untersucht werden.

Die Aufteilung der Schrattenflue in zwei Einzugsgebiete wurde auch mittels KARSYS-Methode bei der erstmaligen Entwicklung eines konzeptuellen 3D-Modells, beschrieben im Stalactite Nr. 2, 2015, vorgeschlagen. Auf Basis dieses Modells konnte die Struktur des Aquifers konstruiert werden. Die gesättigte Zone des Aquifers Siebenhengste-Hohgant zieht ohne Komplikation bis südlich des Schrattenflue-Massivs, das heißt bis zur Blattverschiebung, welche von Schider (1913) entdeckt wurde. Es wird davon ausgegangen, dass ein Kollektor die Schrattenflue mit dem Thunersee verbindet. Dieser Kollektor, der im gesättigten Gebirgsbereich situiert ist, wird von Gängen überlagert, welche nur bei Hochwasserverhältnissen aktiv werden. Der Aquifer nördlich der Blattverschiebung wird beinahe 300m mächtig und ist vom südlichen Block getrennt. Die schlüssige Austrittsstelle befindet sich im Norden des Massivs, wo die Drainage entgegen den Kollektor verläuft. Dieser Umstand kann durch den Verlauf von lokalen Störungen erklärt werden. (Malard et al., 2015)

Insgesamt lässt sich durch diese Erkenntnis das Einzugsgebiet der Schrattenflue nun in zwei Bereiche aufteilen.

Ein Teil entwässert nach Nordosten und der andere, bereits bekannte, südliche bis mittlere Bereich der Schrattenflue in Richtung Thunersee.

Die jüngst angestellten Beobachtungen zeigen zwar eine Gebirgsdrainage im Nordosten der Schrattenflue gegen Südelbach und Waldemme, trotzdem kann eine Verbindung nach Süden nicht ganz ausgeschlossen werden. Die phreatische Zone reicht nämlich im Massiv der Schrattenflue höher hinauf als in den Massiven Siebenhengste-Hohgant. Eine genaue Abgrenzung der beiden Aquifers ist schwierig, da diese höchst wahrscheinlich in Abhängigkeit der hydrologischen Verhältnisse diffluent ist (Malard & Jeannin 2015).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Annahmen von Knuchel (1972), der aufgrund seiner Färbung davon ausging, dass der größte Teil der Schrattenflue in den Bätterich entwässert, widerlegt sind.

Die folgende Abbildung zeigt eine basierend auf der neusten Färbung getroffene Annahme, wie sich die Einzugsgebiete der Schrattenflue aufteilen könnten. In der unten dargestellten Einteilung weist das nordöstliche EZG eine Fläche von etwa 7,2 km² auf. Somit verringert sich das nach Südwesten entwässernde EZG der Schrattenflue von angenommenen 35 km² auf knapp 24 km².

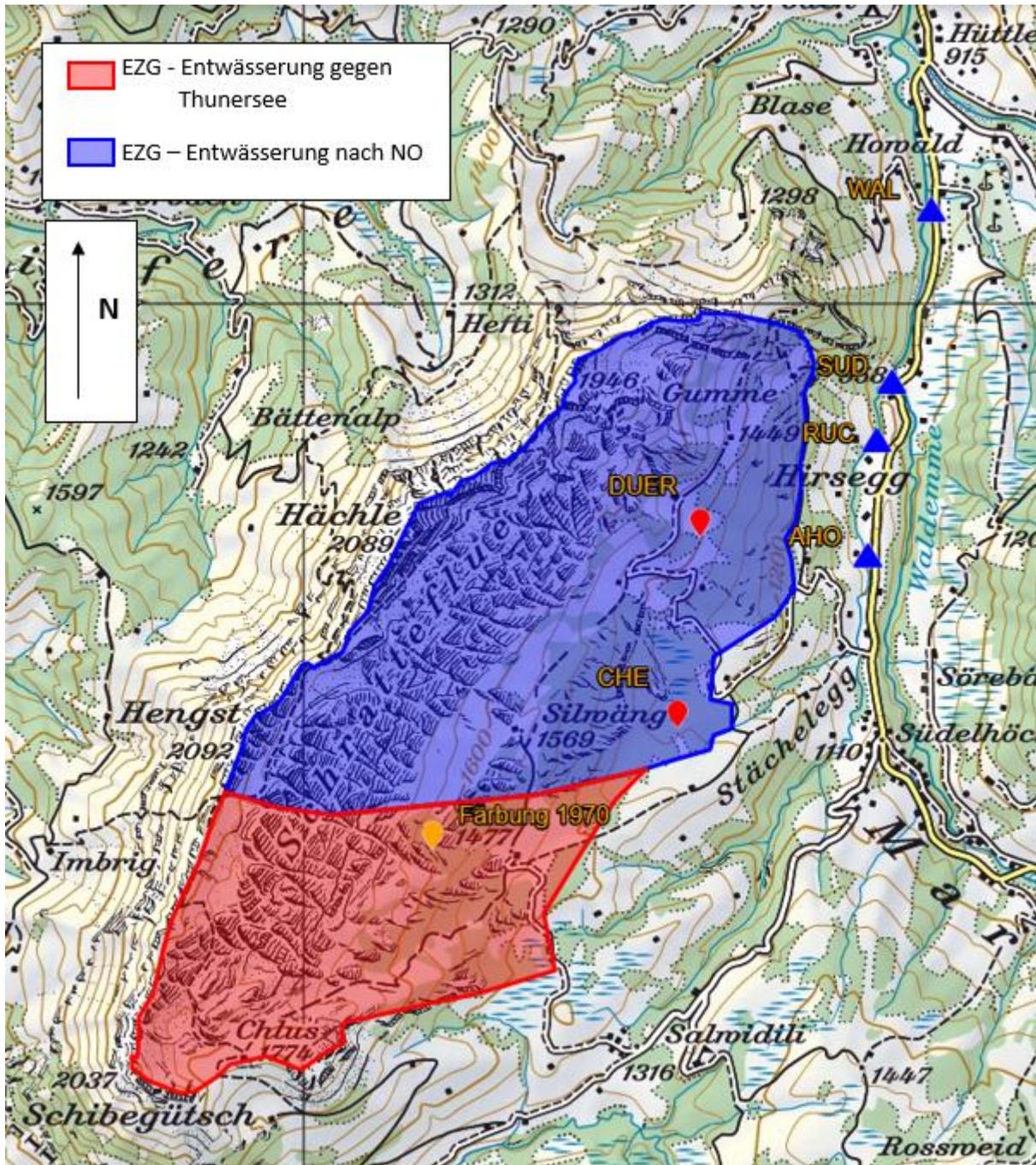


Abbildung 8-1: Mögliche Einteilung der Schratteflue in zwei Einzugsgebiete nach dem Tracerversuch 2015

Die folgende Abbildung zeigt eine mögliche Abgrenzung des Einzugsgebietes der Schwändiliflue nach der Färbung im Mai 2015. Die Annahmen, dass Wasserfallenegg nordöstlich der Hütte Hurbele die natürliche Grenze der Einzugsgebiete ist und die Schwändiliflue nach Süden in den Seebenbach entwässert, wurden bestätigt. Das so angenommene Einzugsgebiet weist etwa eine Fläche von etwa 3,7 km² auf.

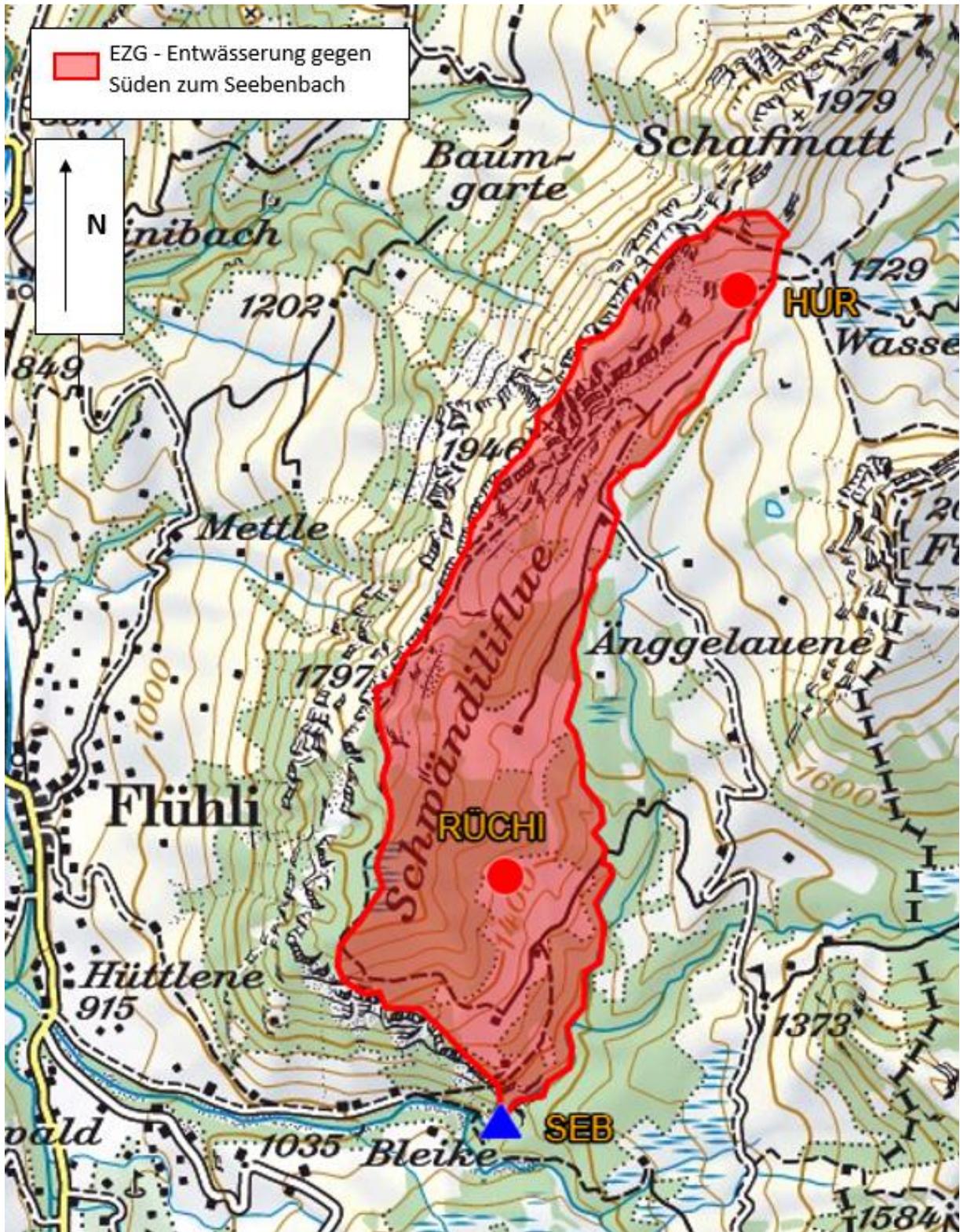


Abbildung 8-2: Mögliche Abgrenzung des Einzugsgebietes der Schwändilflue nach dem Tracerversuch 2015

9. Zusammenfassung und Ausblick

Nachdem 1970 ein von Franz Knuchel durchgeführter Tracerversuch die ersten Erkenntnisse über das unterirdische Abflussverhalten der Schrattenflue hervorgebracht hatte, galt es in dieser Arbeit, das Einzugsgebiet weiter im Nordosten zu erforschen, um zusätzliche Erkenntnisse über die Erstreckung des Einzugsgebietes und über hydraulische Verbindungen zwischen Dolinen und vermuteten Austrittsorten zu erlangen. Zum Zeitpunkt Färbung 2015 war bekannt, dass die Wässer der Schrattenflue gegen Süden das Tal der Emme unterwandern und in den knapp 21 km entfernten Thunersee fließen. Jedoch war nicht klar, ob die gesamten Wässer der Schrattenflue in den Süden geleitet werden, oder ob ein Teil in den Nordosten gegen Südelgraben respektive Waldemme fließt.

Nördlich der Schrattenflue setzt sich die helvetische Randkette fort. Aus dieser Region bis hin zum Vierwaldstättersee waren bis zu dieser Färbung keine Färbversuche belegt. Es war zwar bekannt, dass Höhlen auftreten und dass der Kalk verkarstet ist, aber ob die Wässer gegen die Brüedere in den Nordosten oder noch weiter östlich in den Vierwaldstättersee fließen, oder ob sie vielleicht, wie die Schrattenflue, gegen den Thunersee in den Südwesten strömen, war unklar. Im Zuge dieser Arbeit wurden Tracerversuche mit vier unterschiedlichen Tracern angestellt, um Erkenntnisse über das Abflussverhalten dieser Bereiche zugewinnen.

Eine Wasserfärbung benötigt Schlucklöcher und Quellen. Deshalb wurde zunächst im Zuge mehrerer Feldbegehungen am Fuß der Gebirgsstöcke nach Schlucklöchern, die sich für die Eingabe von Tracern eignen, und nach entsprechenden Quellen zur Probennahme gesucht. Es wurde auf Zugänglichkeit, Abflussmengen und -verhältnisse sowie auf geologische und tektonische Gegebenheiten geachtet. Schließlich wurden vier geeignete Einspeisepunkte und elf Entnahmestellen für diesen Multitracerversuch ausgewählt. Nachdem der zeitliche Rahmen für den Färbversuch festgelegt worden war, wurde der gesamte Multitracerversuch auf Basis eines Leitfadens für Organisatoren von Tracerversuchen (Häuselmann, 1996) organisiert. Unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Dynamik des Grundwasserleiters, der zu erwartenden Fließgeschwindigkeiten und der Auswirkung von Schmelz- und Niederschlagswasser wurde ein Zeitplan erarbeitet, der die Entnahmeintervalle und die Dauer der Beprobung für jeden Entnahmeort regelte. Die vier Tracer und deren Einspeisemenge wurden mit Hilfe von Heinz Otz und Nano Trace Technologies™ ausgewählt.

Am Tag der Färbung, dem 23. Mai 2015, wurden die insgesamt 100 kg Tracer teilweise auf unwegsamem Trampelpfad zu den vier Einspeisestellen transportiert und mit Hilfe von erfahrenem Personal fachgerecht eingebracht. Ein Team motivierter freiwilliger Helfer stand Tage und Nächte bereit, um die Tracer nach Farbstoffeingabe in einem festgelegten Intervall mittels Probenfläschchen (2 x 30 ml) an den vermuteten Austrittsstellen wieder einzufangen.

Insgesamt wurden über ein Monat lang etwa 750 Doppelproben an den Entnahmestellen rund um das Untersuchungsgebiet genommen und in Fluorometern ausgewertet. Die Auswertungen im Labor von Heinz Otz und im Labor von Nano Trace Technologies™ bestätigten mehrere direkte hydraulische Verbindungen der Eingabestellen zu den beprobten Entnahmestellen, dem Seebenbach südlich der Schwändiliflue sowie dem Südelgraben nordöstlich der Schrattenflue.

Die in der Schwändiliflue eingebrachten Tracer Natrium-Naphthionat und Tinopal CBS-X konnten erfolgreich an der Entnahmestelle am Seebenbach, kurz vor der Mündung in den Rotbach, nachgewiesen und die vermutete hydraulische Verbindung bestätigt werden. Der Tracer Na-Naphthionat, eingespeist bei Rüchi, konnte zum ersten Mal nach zehn Stunden im Seebenbach identifiziert werden. Der erste Peak kam 14 Stunden nach Einspeisung im Seebenbach an. Tinopal CBS-X, eingebracht bei der Hütte Hurbele, konnte nach etwa 36 Stunden nach Einspeisung nachgewiesen werden, wobei gleichzeitig der Spitzenwert gemessen wurde.

Aufgrund des Farbstoffnachweises in den Entnahmestellen nordöstlich der Schrattenflue, Ahornli (Eosin), Ruchschwand (Eosin), Südelbach (Eosin und Uranin) und Waldemme (Eosin und Uranin) konnte die Vermutung bestätigt werden, dass der nordöstliche Teil der Schrattenflue tatsächlich zur Nordostflanke hin in Richtung Südelbach entwässert. Der Tracer Eosin konnte zum ersten Mal 58 Stunden nach Farbstoffeingabe im Südelbach bei Hirseggli nachgewiesen werden. Bei der Entnahmestelle Ruchschwand wurden die Tracer nach etwa 59 Stunden identifiziert. Somit konnte die von Knuchel (1972) getroffene Annahme, dass der größte Teil der Schrattenflue in den Bätterich gegen den Thunersee entwässert, widerlegt werden. Nach der im Zuge dieser Arbeit beschriebenen Färbung kann die Schrattenflue nun in zwei Einzugsgebiete eingeteilt werden: Ein Teil entwässert nach NO, der andere, bereits bekannte, südliche bis mittlere Bereich der Schrattenflue in Richtung Thunersee.

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 so weit abfällt, dass das Bachbett oberhalb der Ruchschwandquelle trockenfällt, wird sichtbar, dass etwa zehn Meter flussabwärts der Quelle Wasser diffus aus dem Bachbett und auf der orographisch linken Seite aus der Böschung quillt. Während der Versuchsdurchführung wurde im Südelbach oberhalb der Entnahmestelle Ahornli ersichtlich, dass das Flussbett auf einer Länge von etwa 900 m trockenfiel, obwohl flussaufwärts Abfluss vorhanden war. Auf etwa einer Länge von 15 Metern verschwindet das Wasser unter dem Bachbett. Diese Störzone dürfte aus unreifem Karst mit nur schwach ausgeprägten Klüften bestehen, da nur bis etwa 5 l/s im Bachbett

verschwinden. Abflussmengen, die diesen Wert überschreiten, fließen über diese Bachversickerung hinweg. Somit ist bei normalem bis hohem Abfluss von dieser Versickerung praktisch nichts zu bemerken. Etwa 900 m flussabwärts, unterhalb der Brücke Ruchschwand (Weg zum Haus Ruchschwand 1), bei den Entnahmestellen RUC wurde außerdem aus dem Bachbett quellendes Wasser festgestellt. Es könnte sich um das flussauf versickerte Wasser handeln. Diese Annahme sollte jedoch mit einem weiteren Tracerversuch untersucht werden.

Letztendlich kann von einem gelungenen Markierversuch gesprochen werden. Erstens konnten einige wichtige Fragen zur Ausdehnung der Einzugsgebiete der Schrattenflue beantwortet werden. Zweitens konnten neue Erkenntnisse über Karstwasserfließwege in der Schwändiliflue, in welcher noch keine Tracerversuche bekannt waren, gewonnen und die Einzugsgebietskarten dieser Gebirgsstöcke neu skizziert werden. Schließlich konnten alle eingesetzten Farbstoffe erfolgreich detektiert werden, was von großer Bedeutung ist, da dadurch die meisten Erkenntnisse über das Untersuchungsgebiet getroffen werden konnten.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Lage des Kantons Luzern (rot eingefärbt) in der Schweiz (Foundation, 2004)	9
Abbildung 1-2: Lage der Schratten- sowie Schwändiliflue im Kanton Luzern	10
Abbildung 1-3: Durch die Färbung 1970 nachgewiesene hydraulische Verbindung (rote Linie) im südlichen bis mittleren Teil der Schrattenflue. Entwässerung in den Thunersee, Sundlauenen (https://map.geo.admin.ch)	12
Abbildung 1-4: Die rote Linie zeigt die durch die Färbung im Jahr 1970 nachgewiesene Fließrichtung; die blauen Linien zeigen die zwei Entwässerungsmöglichkeiten der nordöstlichen Schrattenflue vor der Färbung 2015 (https://map.geo.admin.ch).	13
Abbildung 1-5: Mögliche Fließwege der versickernden Oberflächenwässer in der Schwändiliflue vor der Färbung 2015 (https://map.geo.admin.ch).....	14
Abbildung 2-1: Zonierung der UNESCO-Biosphäre Entlebuch, Stand 2006 (Entlebuch, 2012)	17
Abbildung 2-2: Überblick über das hydrogeologische Untersuchungsgebiet (rot eingefärbt) (https://map.geo.admin.ch).....	19
Abbildung 2-3: Einzugsgebietsplan vor der Färbung 2015 (https://map.geo.admin.ch).....	20
Abbildung 2-4: Geologisches Profil der Schrattenflue (Schnitt NW-SO) (Schider, 1911 u. 1912).....	21
Abbildung 2-5: Legende zum geologischen Profil (Schider, 1911 u. 1912)	22
Abbildung 2-6: Unterschiedliche Ausprägungen einer Doline, a) Lösungsdoline, b) Einsturzdoline, c) Schwemmlanddoline, d) Sackungsdoline (Spektrum, 2016)	23
Abbildung 2-7: Karstverteilungskarte der Schweiz (Wildberger & Preiswerk, 1997).....	24
Abbildung 3-1: Einbringen des Tracers Uranin; Eingabelösung: dunkelrot, Verdünnung: fluoreszierend grün.....	30
Abbildung 3-2: Tracer Eosin direkt nach der Zugabe	31
Abbildung 3-3: Irisierendes Blauviolett kurz nach der Eingabe des Tracers Natrium-Naphthionat.....	31
Abbildung 3-4: Einbringen des hellgelben pulverförmigen Tinopals	32
Abbildung 3-5: In Nylonsäckchen verpackte Aktivkohle	34
Abbildung 4-1: Mit der Färbung 1970 nachgewiesener Fließweg von der südlichen bis mittleren Schrattenflue in den Thunersee (Strichlierte Linie).....	37
Abbildung 5-1: Eingabestelle Hurbele.....	43
Abbildung 5-2: Eingabestelle Rüchi	44
Abbildung 5-3: Kleinerer Maßstab der Einspeisestelle "Rüchi", der die Lage der drei Einspeisepunkte genauer darstellt.....	45
Abbildung 5-4: Eingabestelle Dürrütli	46
Abbildung 5-5: Eingabestelle Cheiserschwand	47
Abbildung 5-6: Überblick über die Lage aller vier Einspeisepunkte.....	48
Abbildung 5-7: Überblick über die Entnahmestellen nordöstlich der Schrattenflue.....	50
Abbildung 5-8: Entnahmestellen Gelbenbrunnen und Harder Quelle im Süden des Untersuchungsgebietes.....	51
Abbildung 5-9: Entnahmestellen südlich der Schwändiliflue	52

Abbildung 5-10: Überblick über die Entnahmestellen östlich des Schimbrigs	53
Abbildung 5-11: Probenfläschchen mit Aufkleber	61
Abbildung 7-1: Nachgewiesene hydraulische Verbindungen durch die in der Schwändiliflue eingebrachten Tracer Tinopal CBS-X und Na-Naphthionat im Seebenbach	70
Abbildung 7-2: Nachgewiesene hydraulische Verbindungen durch die in der Schrattenflue eingespeisten Tracer Eosin und Uranin.....	74
Abbildung 7-3: Drei Möglichkeiten für eine Beziehung der Piezometer.....	86
Abbildung 8-1: Mögliche Einteilung der Schrattenflue in zwei Einzugsgebiete der Karstquellen nach dem Tracerversuch 2015	93
Abbildung 8-2: Mögliche Abgrenzung des Einzugsgebietes der Schwändiliflue nach dem Tracerversuch 2015	94

Diagrammverzeichnis

Diagramm 5-1: Niederschlagsdaten vom 18.05 bis 31.05.2016 gemessen an der Wetterstation im Flühli auf 928 m.ü.A	59
Diagramm 6-1: Eichkurve für den Tracer Eosin. Gerätespezifische RFI-Werte gemessen mit dem Fluorometer Perkin Elmer LS-2B	66
Diagramm 6-2: Eichkurve für den Tracer Natrium-Naphthionat. Gerätespezifische RFI-Werte gemessen mit dem Fluorometer Perkin Elmer LS-5B (Faktor 2.5)	67
Diagramm 6-3: Eichkurve für den Tracer Tinopal CBS-X. Gerätespezifische RFI-Werte gemessen mit dem Fluorometer Perkin Elmer LS-5B	67
Diagramm 6-4: Eichkurve für den Tracer Uranin. Gerätespezifische RFI-Werte gemessen mit dem Fluorometer Perkin Elmer LS-2B	68
Diagramm 7-1: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Natrium-Naphthionat am Seebenbach	71
Diagramm 7-2: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Naphthionat am Seebenbach ..	72
Diagramm 7-3: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Eosin an der Entnahmestelle Ahornli	75
Diagramm 7-4: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Eosin am Standort Ruchschwand	76
Diagramm 7-5: Konzentrations-Zeit Diagramm des Tracers Uranin an der Entnahmestelle Ruchschwand.....	77
Diagramm 7-6: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Eosin an der Entnahmestelle Südelbach ohne Interpolation der nicht genommenen Proben zur 58. und 61. Stunde	78
Diagramm 7-7: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Uranin an der Entnahmestelle Südelbach ohne Abschätzung der nicht genommenen Proben zur 58. und 61. Stunde	78
Diagramm 7-8: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Eosin an der Entnahmestelle Südelbach mit Abschätzung der nicht genommenen Proben zur 58. und 61. Stunde	79
Diagramm 7-9: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Uranin an der Entnahmestelle Südelbach mit Abschätzung der nicht genommenen Proben zur 58. und 61. Stunde	80
Diagramm 7-10: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Eosin an der Entnahmestelle Waldemme	81
Diagramm 7-11: Konzentrations-Zeit-Diagramm des Tracers Uranin an der Entnahmestelle Waldemme	82
Diagramm 7-12: Das Diagramm zeigt die 19 Fluoreszenzfingerprints	84

Formelverzeichnis

Formel 5-1: Formel zur groben Abschätzung der Einspeisemenge.....	40
Formel 6-1: Berechnung des Verdünnungsfaktors.....	65
Formel 6-2: Formel der Regressionsgerade	68

Literaturverzeichnis

Bögli, Alfred. 1978. *Karsthydrographie und physische Speläologie*. Berlin : Springer Verlag, 1978.

Chemie Information Service. 2016. Chemie Information Service. [Online] 2016. [Zitat vom: 3. Oktober 2016.] <http://www.chemie.de/lexikon/Licht.html>.

Entlebuch, UNESCO Biosphäre. 2012. Biosphäre Entlebuch. *Biosphärenreservate*. [Online] 1. Oktober 2012. [Zitat vom: 11. September 2016.] <http://www.biosphaere.ch/de/portrait/biosphaerenreservat/zonierung-1>.

Faes, Günter. 2016. www.faes.de. [Online] Günter Faes, Koniferenstraße 82, 41542 Dormagen, 2016. <http://www.faes.de/Basis/Basis-Statistik/Basis-Statistik-Korrelation-Re/basis-statistik-korrelation-re.html>.

Ford, Derek und Williams, Paul. 1996. *Karst Geomorphology and Hydrology*. Great Britain : Chapman & Hall, 1996.

Foundation, Wikimedia. 2004. Wikimedia Commons. [Online] 7. September 2004. [Zitat vom: 12. Oktober 2016.] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kanton_Luzern_in_Switzerland.svg?uselang=de.

Ganauser, Robert. 2016. Tracerversuch im Bereich der Schratten- und Schwändiliflue (LU). *Stalactite*. 2016, N° 1.

Häuselmann, Philipp. 2002. *Cave Genesis and its relationship to surface processes: Investigations in the Siebenhengste region*. BE, Schweiz : Universität von Freiburg, 2002.

—. 2004. *Die St. Beatus-Höhlen*. Allschwil : Speleo Projects Caving Publications International, 2004.

—. 2009. *Karst and Caves, Their significance for morphogenesis and erosion of the Alps*. Wien : Universität für Bodenkultur, 2009.

Häuselmann, Philipp und Otz, Martin. 1997. Wasserfärbung im Gebiet Gemmenalp-Sieben Hengste: Ziele und Resultate. [Buchverf.] Pierre-Yves Jeannin. *Proceedings of the 12th International Congress of Speleology*. La Chaux-de-Fonds : Library of the Swiss Speleological Society, 1997.

Häuselmann, Philipp. 1996. *Wasserfärbung 1996: Die Organisation*. Bern : Häuselmann, 1996.

Käss, Werner. 1992. *Geohydrologische Markierungstechnik*. Deutschland : Gebrüder Borntraeger, 1992.

—. 1999. *Tacer in der Hydrologie*. 1999.

Knop, Adolph. 1875. *Über die hydrographischen Beziehungen zwischen der Donau und der Aachquelle im Badischen Oberlande*. Stuttgart : N. Jb. Miner, 1875.

—. 1878. *Über die hydrographischen Beziehungen zwischen der Donau und der Aachquelle im Badischen Oberlande*. Stuttgart : N. Jb. Miner, 1878.

Knuchel, Franz. 1972. *Färbung des unterirdischen Abflusses der Schrattenfluh (LU)*. Interlaken : Buchdruckerei O.Schläfli AG, 1972.

Lichtscheidl, Dr. Irene K. 2016. Universität Wien. [Online] 2016. [Zitat vom: 2. Oktober 2016.] https://www.univie.ac.at/mikroskopie/3_fluoreszenz/definition/1_einleitung.htm.

Luft, Sabine. UNESCO. [Online] [Zitat vom: 11. September 2016.] <https://www.unesco.de/wissenschaft/biosphaerenreservate/biosphaerenreservate-uebersicht/mab-programm0.html>.

- Malard, Arnauld und Jeannin, Pierre-Yves. 2015.** Karstsysteme Siebenhengste (BE) / Schrattenfluh (LU): Charakterisierung der unterirdischen Entwässerung mit dem KARSYS-Ansatz. *Stalactite*. N° 2, 2015, S. 38-53.
- MétéoSuisse. 2015.** *Wetterdaten*. Operation Center 1, Postfach 257, 8058 Zürich-Flughafen : Office fédéral de météorologie et de climatologie, MétéoSuisse, 2015.
- Otz, Martin H. 2015.** *Kurzbericht Färbung Schratten- und Schwändilflue 2015 (nicht veröffentlicht)*. Orpund , 2015.
- . **2015.** *Nano Trace Technologies™, Background Fluorescence Analysis (BFA)*. Orpund, Schweiz :, 2015.
- Pavuza, Rudolf. 1986.** *Die hydrochemischen Verhältnisse im Karstwasser. Merkblätter zur Karst- und Höhlenkunde*. 1986.
- Schider, Robert. 1911 u. 1912.** Geologische Karte der Schrattenflue. Basel :, 1911 u. 1912.
- Schudel, Bernhard, et al. 2002.** *Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie - Praxishilfe. Berichte des BWG, Serie Geologie Nr. 3*. Bern : Bundesamt für Wasser und Geologie BWG, 2002.
- SISKA. 2016.** Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung. [Online] 5. 10 2016. <http://www.isska.ch/>.
- Spektrum. 2016.** Spektrum der Wissenschaft. [Online] Juli 2016. [Zitat vom: 10. Januar 2017.] <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/doline/3398>.
- Wildberger, Andreas und Preiswerk, Christian. 1997.** *Karst und Höhlen der Schweiz*. Basel : Speleo Projects, 1997

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Korrekturfaktoren α für den eingesetzten Markierstoff [g/m].....	40
Tabelle 5-2: Anpassungsfaktor A für unterschiedliche Aquiferverhältnisse [-].....	41
Tabelle 5-3: Die mithilfe des Tracerlabors Nano Technologies gewählten Einspeisemengen der Tracer.....	41
Tabelle 5-4: Angenommene Fließdistanzen	41
Tabelle 5-5: mittels Formel 5-1 ermittelte Einspeisemengen.....	42
Tabelle 5-6: Details zu den Eingabestellen.....	49
Tabelle 5-7: Koordinaten der Entnahmestellen mit Höhenangabe	54
Tabelle 5-8: Ausschnitt des Einsatzplanes mit geplanten Entnahmeintervallen je Probennahmeort.....	55
Tabelle 5-9: Ein Beispiel für den Einsatzplan für eine Einzelperson.....	56
Tabelle 5-10: Beispiel eines Probennahmeplans für einen bestimmten Entnahmeort.....	57
Tabelle 5-11: Überblick über die Einspeisung der Farbstoffe.....	59
Tabelle 6-1: Anregungs- und Emissionswellenlängen der einzelnen Tracer	64
Tabelle 7-1: Grundwasser-Assoziationsmatrix.....	85
Tabelle 8-1: Überblick der Entnahmestellen, verwendeten Tracer, deren Ankunftszeit sowie die errechnete Rückgewinnungsmenge.....	88