

Karsthydrologie im Ybrig (SZ)

Untersuchung der Bachschwinden und Quellen
zwischen Waag- und Sihltal

30. September 2015

Geographisches Institut der Universität Zürich

Domenika Bucher

09-719-667

Betreut durch

Dr. Martin Lüthi

Prof. Dr. Jan Seibert

Verantwortliches Fakultätsmitglied

Prof. Dr. Jan Seibert

Domenika Bucher Suanzes
dbuchers@geo.uzh.ch
Schaffhauserstrasse 79
8075 Zürich

Zusammenfassung

Das Gebiet zwischen Sihltal und Waagtal weist aufgrund seiner Karstifizierung eine komplexe Hydrologie auf, wobei das Wasser teils oberirdisch und teils unterirdisch abläuft. In den höheren Lagen befinden sich einige Bachschwinden, ab denen das Wasser durch unterirdische Fliesswege zu den Quellen im Tal fliesst. Die unterirdischen Fliesswege sind bis anhin unbekannt und können deshalb nicht in die örtliche Planung für Hochwasser- und Grundwasserschutz miteinbezogen werden.

Um dieses Wissensdefizit zu reduzieren haben zwei Speleologengruppen (OHG und HGY) ein gemeinsames Projekt lanciert und das SISKa (Schweizerisches Institut für Späleologie und Karstforschung) als Hilfe miteinbezogen. Im Rahmen des Projekts wurde das Gebiet späleologisch untersucht und basierend auf ein geohydrologisches Modell (KARSYS) der SISKa wurden die Einzugsgebiete der Quellen berechnet. Die hydraulischen Verbindungen zwischen Bachschwinden und Quellen sind jedoch mit diesen Methoden noch nicht bestätigt.

Das Ziel dieser Masterarbeit ist, die hydraulischen Verbindungen und die Quellen im Gebiet zu untersuchen. Die hydraulischen Verbindungen wurden mit vier Markierungsversuchen mit Uranin und zwei Markierungsversuchen mit Salz ermittelt. Die Konzentrationsmessungen an den Quellen wurden kontinuierlich mit Fluotometer bzw. mit Conductiometer registriert. Anhand der Durchgangskurven wurden die Fleisszeiten, die Abstandsgeschwindigkeit (Luftdistanz durch mittlere Fleisszeit) und der Wiedererhalt berechnet. Zusätzlich wurde bei den meisten Kurven die Dispersivität ermittelt. Dies erfolgte durch die Approximierung einer theoretischen Durchgangskurve (Dispersions-Modell und Multi-Dispersions-Modell) an die gemessene Kurve indem die Fliessparameter Dispersivität und Fliesszeit angepasst wurden. Für die Untersuchung der schütungsreichsten Quellen des Waagtals wurden diese alle zwei bis drei Wochen auf Wassertemperatur, Elektrische Leitfähigkeit (EL) und Isotope untersucht. Diese Messreihe begann im Juni 2014 und endete Ende März 2015 und kann so die saisonalen Muster der Quellen aufzeigen. Anhand von denen können weitere Eigenschaften der Quellen interpretiert werden, welche bei den Markierungsversuchen verborgen blieben.

Die Markierungsversuche bestätigen grösstenteils die Annahmen der Höhlenforscher und des KARSYS-Modells. Die Resultate zeigen, dass das Wasser von der Alp Wannan und von Unterweid zu den Quellen Furli und Schachen fliesst, das Wasser von Chalberalpeli zu den Quellen Kreuzloch und Krähloch und das Wasser von Riedloch zu Kreuzloch und Furli. Zudem bestätigen die Resultate die Verbindung zwischen der Kreuzlochquelle und einer tiefer gelegenen Quelle. Bei den Markierungsversuchen wurde nie ein gesamthafter Wiedererhalt von mehr als 50% erreicht. Dafür kann es mehrere verschiedene Gründe geben. Wahrscheinlich ist, dass in allen Fällen

II

das Wasser der Bachschwinden teils unterirdisch gespeichert wurde oder auch weitere Fliesswege zu anderen Quellen nahm. Es wurden also nur manche hydraulische Verbindungen entdeckt. Die berechneten Dispersivitäten und Abstndsgeschwindigkeiten variieren stark zwischen den Messungen. Diese Parameter können aber nicht für den Vergleich der Fliesswege verwendet werden, da die Markierungsversuche zu unterschiedlichen Zietpunkten mit unterschiedlichen Wasserständen durchgeführt wurden.

Die Messungen von Wassertemperatur, EL und Isotopen an den Quellen zeigen, dass sich die Parameter aller Quellen saisonal ähnlich verhalten. Die Wassertemperaturen korrelieren mit den Lufttemperaturen. Die EL ist im Herbst am grössten und Ende Frühling am tiefste. Die teife EL wird durch Schmelzwasser ausgelöst, die hohe EL möglicherweise durch die Viehwirtschaft. Bei den Isotopen wurden Anfangs Herbst die höchste Konzentration schwerer Isotope gemessen und im Frühling die tiefste. Ausnahme ist die Quelle Studen, welche ausserhalb des Waagtals liegt und ein Grundwasseraufstoss ist. Bei Studen sind die Werte der Parameter das ganze Jahr hindurch konstant. Bei den Isotopen ist bei Studen ein leichter Antizyklus erkennbar, der auf eine Flieszeit von vier bis sechs Monaten schliessen lässt. Bei den Quellen im Waagtal ist es nicht möglich, klare Schlüsse für das Einzugsgebiet oder für den Fliessweg aus den regelmässigen Messungen zu machen, da diese Parameter bei Karstquellen innerhalb von kurzer Zeit stark schwanken können. Vermutungen können jedoch erstellt werden. Bei Laueli wird aufgrund der Wassertemperaturschwankungen und der EL angenommen, dass die Quelle infiltriertes Wasser von nahegelegenen Weiden führt. Bei Chäsloch und Studen wird aus denselben Gründen ebenfalls partiell ein kurzer Fliessweg vermutet.

Für weitere Untersuchungen der Karsthydrologie im Untersuchungsgebiet sind Multi-Tracer-Versuche empfehlenswert sowie genaue Abflussmessungen für die Erstellung einer Wasserhaushaltsbilanz.

Dank

Während meiner Arbeit bekam ich von vielen Menschen Unterstützung. Die wohl wichtigste Helfergruppe formten die aktiven Mitglieder der HGY (Höhlengruppe Ybrig) und OGH (Ostschweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung), welche mich bei der Feldarbeit begleiteten. Ihnen allen möchte ich danken für die herzliche Aufnahme in der Gruppe, die ausserordentlichen Hilfe bei der Feldarbeit, die Ortskenntnisse, die spannenden Diskussionen und die Cerveilas. Besonderen Dank schulde ich Edwin Fuchs für das Übernehmen vieler Messungen und für seine Ortskenntnisse, Beat Hediger für die Einführung in die Geologie und Karsthydrologie des Gebietes, Robert Kälin für die Fahrdienste und Gastfreundschaft, Richard Graf für die vertiefte Einführung in das Karsthydrologie-Projekt Hoch-Ybrig und die Vernetzung mit dem SSKA und Andreas Dickert für die präzisen Höhlenbeschreibungen. Sie alle haben bei den Markierungsversuchen und/oder regelmässigen Messungen mehrfach mitgeholfen. Ebenfalls danken möchte ich Markus Kälin, Markus Bettschart, Christoph Kälin, Remo Reichmut und Nick Hediger. Auch sie haben bei den Messungen mehrmals geholfen und unter anderem die schweren Fluorometer den steilen Wald hochgetragen. Ohne ihre Hilfe hätten die Messungen nicht so durchgeführt werden können. Bei den Jägern des Waagtals bedanke ich mich für die warmen Kafis während der Feldarbeit und den angenehmen Rastplatz.

Ich möchte mich ausdrücklich bei meinen beiden Betreuern Martin Lüthi und Jan Seibert bedanken, welche diese spannende Masterarbeit ermöglicht haben. Sie halfen mir gerne bei Fragen weiter, gaben konstruktive Feedbacks und motivierten mich mit ehrlichem Interesse. Martin Lüthi möchte ich zusätzlich für die Einführung in das Untersuchungsgebiet und seine grossen Hilfeleistungen bei der Feldarbeit danken. Der ganzen Familie Lüthi danke ich für ihre Gastfreundschaft. Für fachliche Unterstützung, anregende Diskussionen und konstruktives Feedback möchte ich mich bei Arnauld Malard (SSKA), Julien Gobat und Philipp Häuselmann bedanken. Die Treffen mit ihnen waren prägend für meine Arbeit.

Vom Institut möchte ich mich bei folgenden Personen bedanken: Bei Sandra Pool für die Einführung in den Fluorometer Gebrauch, bei Benjamin Fischer für die Hilfeleistung in der Isotopenanalyse, bei Philipp Schneider für wichtige Ratschläge zu Tracerexperimenten und Materialhandhabung und bei Michael Hilf für die Einführung in die Laborarbeit.

Ausserfakultär bedanke ich mich bei Johannes Schneider (WSL) für die freundliche Ausleihe der Fluorometer, bei Barbara Herbstritt (Universität Freiburg, DE) für die Isotopenanalyse und bei Yves-André Schnegg (Leiter Albillia Sarl) für die Reperatur eines Fluorometers.

Zuletzt bedanke ich mich bei Lukas von Känel, Eva Gastberger und Franz Bucher für das Gegenlesen der Arbeit, bei Daniela Müller für die Gastfreundschaft und bei Christoph Rohner für die Hilfe bei Problemen mit LaTeX.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Dank	III
1 Einführung	2
2 Untersuchungsgebiet	4
2.1 Lage	4
2.2 Geologie, Geohydrologie und Geomorphologie	4
2.3 Gewässer allgemein	7
2.4 Messstandorte	7
2.4.1 Injektionsstandorte	7
2.4.2 Quellen	9
2.4.3 Wetterstationen	11
2.5 Klima und Vegetation	11
2.6 Nutzung	12
3 Stand der Forschung und Forschungsfragen	14
3.1 Stand der Forschung	14
3.1.1 Speläologische und Karsthydrologische Untersuchungen im Gebiet	14
3.1.2 Geohydrologische Modellierung mit dem KARSYS-Ansatz	15
3.2 Grobe Wasserbilanz des Gebietes	17
3.3 Forschungsfragen	19
4 Methoden und Feldforschung	20
4.1 Theoretische Grundlagen der verwendeten Methoden	21
4.1.1 Isotope und ihre Anwendung in der Karsthydrologie	21
4.1.2 Wassertemperatur von Quellen	23
4.1.3 Elektrische Leitfähigkeit des Wassers	25
4.1.4 Künstliche Tracer in der Karsthydrologie	26
4.1.5 Auswertung von Markierungsversuchen	28
4.2 Instrumente	32
4.3 Feldzugang	33
4.3.1 Regelmässige Wassermessungen	33
4.3.2 Färbversuche & Salzversuche	35
4.3.3 Witterung und Wasserstand während der Messungen	40

4.4	Datenverarbeitung, Analyse und Auswertung	41
4.4.1	Datenverarbeitung der Temperatur, EC und Isotopenmessungen	41
4.4.2	Kalibrierung der Fluorometer	41
4.4.3	Datenverarbeitung der Markierungsversuche	43
5	Messresultate	44
5.1	Ergebnisse der regelmässigen Wassermessungen	44
5.1.1	Wassertemperatur	44
5.1.2	Leitfähigkeit	46
5.1.3	Isotopen Analyse	47
5.2	Ergebnisse der Markierungsversuche	50
5.2.1	Markierungsversuche 1-RL und 2-RL	50
5.2.2	Markierungsversuch 3-WA	50
5.2.3	Markierungsversuch 4-UW	54
5.2.4	Markierungsversuch 5-CA	58
5.2.5	Markierungsversuch 6-RL	62
5.2.6	Markierungsversuche 7-KL und 8-KL	66
6	Diskussion	70
6.1	Interpretation der Resultate	70
6.1.1	Interpretation der hydrochemischen Daten	70
6.1.2	Interpretation der Markierungsversuche	73
6.2	Schlüsse auf das Karstsystem	79
6.2.1	Unterirdische Fliesswege und Einzugsgebiete	79
6.2.2	Charakterisierung des Karstsystems	81
6.3	Quervergleich zum KARSYS-Modell	81
6.4	Unsicherheiten in der Interpretation	82
6.5	Methodenkritik	83
7	Schlussfolgerung	85
	Persönliche Quellen	88
	Literaturverzeichnis	89
	Anhang	94
	Persönliche Erklärung	97

Abbildungsverzeichnis

2.1	Bilder des Untersuchungsgebietes	5
2.2	Profilskizze Unterweid	8
2.3	Skizze Abflüsse Kreuzloch Höhle	10
2.4	Niederschlag und Temperaturen auf der Alp Wannan	12
3.1	KARSYS-Modell Ybrig	16
4.1	Die Lokal Meteorische Wasserlinie	22
4.2	Temperaturgradient des Karstwassers	24
4.3	Theoretische Durchgangskurve eines Tracers	29
4.4	Daten der Messungen an den Quellen	34
4.5	Schachen	34
4.6	Fotos der Markierungsversuche	37
4.7	Niederschlag und Temperatur auf der Alp Wannan (30.09.14 bis 23.10.14)	40
4.8	Kalibrierungslösungen für Fluorometer	42
5.1	Gemessene Wassertemperaturen an den Quellen.	44
5.2	Temperaturverteilung der Quellen	46
5.3	Gemessene Leitfähigkeiten an den Quellen.	46
5.4	EL Verteilung an den Quellen	47
5.5	Lokale Meteorische Wasser-Linie	48
5.6	$\delta^{18}O$ -Werte an den Quellen	48
5.7	$\delta^{18}O$ Verteilung an den Quellen und im Niederschlag	49
5.8	3-WA Versuch: Durchgangskurve von Schachen und Furli.	51
5.9	3-WA Versuch: Dispersionsmodell Furli	53
5.10	3-WA Versuch: Multi-Dispersions-Modell Schachen	53
5.11	4-Wa Versuch: Durchgangskurve von Schachen, Furli und Alt Stafel.	55
5.12	4-UW Versuch: Multi-Dispersions-Modell Furli	57
5.13	5-CA Versuch: Durchgangskurve von KLBS, Krähloch und Laueli	59
5.14	5-CA Versuch: Multi-Dispersions-Modell KLBS	61
5.15	5-CA Versuch: Dispersions-Modell Krähloch	61
5.16	6-RL Versuch: Durchgangskurve von Schachen, KLH und KLBS.	63
5.17	6-RL Versuch: Dispersions-Modell KLH	65
5.18	6-RL Versuch: Dispersions-Modell KLBS	65
5.19	6-RL Versuch: Multi-Dispersions-Modell Schachen	65
5.20	7- & 8-KL Versuch: Durchgangskurve von KLBS	67

5.21 7-KL Versuch: Multi-Dispersions-Modell KLBS	69
5.22 8-KL Versuch: Multi-Dispersions-Modell KLBS	69
6.1 6-RL Versuch: Neues Dispersions-Modell Schachen	77

Tabellenverzeichnis

4.1	Überblick verwendeter Messinstrumenten	32
4.2	Übersicht der Tracerversuche	36
4.3	Unterschiede in der Fluorometerkalibrierung	42
5.1	Versuch 3-WA: Resultate der Tracermessungen	52
5.2	Versuch 3-WA: Resultate der analytischen Auswertung	53
5.3	Versuch 4-UW: Resultate der Tracermessungen	56
5.4	Versuch 4-UW: Resultate der analytischen Auswertung	57
5.5	Versuch 5-CA: Resultate der Tracermessungen	58
5.6	Versuch 5-CA: Resultate der analytischen Auswertung	61
5.7	Versuch 6-RL: Resultate der Tracermessungen	62
5.8	Versuch 6-RL: Resultate der analytischen Auswertung	64
5.9	Versuch 7-KL und 8-KL: Resultate der Tracermessungen	66
5.10	Versuch 7-KL und 8-KL: Resultate der analytischen Auswertung	68
6.1	Versuch 6-RL: Minima Zeiten Schachen	77
6.2	Versuch 6-RL: Neue Resultate der analytischen Auswertung	77

Kapitel 1

Einführung

Global gesehen bezieht ungefähr ein Viertel der Weltbevölkerung Wasser aus karstischen Zonen (Ford & Williams 2007). In der Schweiz befindet sich der grösste Teil (80%) des gesamten Grundwasservolumens in Karstaquiferen (Karst-Grundwasserleiter). Diese sind vorwiegend im Jura-gebirge und in den Voralpen verbreitet. Vom nachhaltig nutzbaren Grundwasservolumen (18 km^3) befinden sich knapp 4 km^3 in Karstaquiferen. Ungefähr gleich viel befindet sich in Kluftaquiferen, der Rest ist in Lockergesteinaquiferen gespeichert (Sinreich et al. 2012).

Charakteristisch für Karst sind die unterirdischen offenen Abflussgänge, durch welche das Wasser ohne grossen Widerstand fließen kann. Die Fliessart dieser Fliesswege gleicht viel mehr jener von Bächen als von Grundwasser und ist charakterisiert durch heterogene Fliessgeschwindigkeiten (White 2002). Karstquellen reagieren dementsprechend schnell auf Niederschlagsereignisse. Der Lösungsvorgang des Kalk- oder Dolomitgesteins erfolgt im geologischen Zeitrahmen relativ schnell, so dass in einem Karstsystem Gänge aus verschiedenen Entwicklungs- und Wasserstandsstadien vorzufinden sind. Bei Hochwasser kann das Wasser auch durch alte Gänge abfliessen, die ansonsten trocken liegen (White 2002). Neben den instationären Fliesswegen charakterisiert sich ein Karstaquifer durch relativ schnelle Fliessgeschwindigkeiten und den damit verbundenen Nebeneffekten wie einer kurzen Verweilzeit, starken Schwankungen in den Wassertemperaturen und im Isotopengehalt (Mazor 1997). Dadurch, dass die Fliesswege in Karstaquiferen nicht der Topographie folgen, ist das Einzugsgebiet einer Karstquelle oft unbekannt. Dies erschwert die Erstellung von Hochwasserszenarien und sowie die Definition von Grundwasserschutzzonen.

Die Landschaft rund um das Hoch-Ybrig weist durch ihre Karstifizierung viele Bachschwinden, Quellen und Höhlen auf. Bis heute sind die Wasserwege und somit die Herkunft des Wassers der verschiedenen Quellen mehrheitlich unbekannt. Die Karstquellen reagieren sehr schnell auf heftige Niederschläge. Dies führt zu Murgängen und Rutschungen in den Hängen unterhalb der Felswand. Zudem kann die Waag im Tal wegen der kurzen Fliesszeit schneller anschwellen. Kenntnisse über das Einzugsgebiet von Quellen helfen, die Niederschlagsreaktion abzuschätzen und Gefahrenzonen konsistent zu planen.

Im Karst wird das Wasser bei der Versickerung kaum gereinigt. Gelangt schmutziges oder toxisches Wasser in das Grundwasser, bleibt es schmutzig bis zur Quelle. Kenntnisse über Versickerungsstandorte und Fliesswege sind deshalb wichtig für die Bestimmung allfälliger Grundwasserschutzzonen. Das Wasser im Untersuchungsgebiet wird hauptsächlich durch die Alpwirtschaft

und Abfallsammlungen verunreinigt. Dieses Wasser fliesst in die Quellen des Waagtals und speist manche Brunnen, von welchen Kühe, aber auch Touristen und Anwohner trinken.

Aus diesem Grund lancierten 2011 die Höhlengruppe Ybrig (HGY) und die Ostschweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung das Hydrologieprojekt Ybrig mit dem Ziel "der Erfassung der unterirdischen Wasserwege und Einzugsgebiete [der Quellen] sowie der [Berechnung der] Wasserhaushaltsbilanz für die einzelnen Teilgebiete"(Ostschweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung 2015). Die hier vorgestellte Masterarbeit ist im Rahmen jenes Karsthydrologie-Projektes entstanden.

Das Ziel dieser Arbeit ist, das Einzugsgebiet der Quellen vom Waagtal zu ermitteln. Die dabei gewonnenen Erkenntnissen können der örtlichen Hochwasserprävention und Wasserversorgung dienen. Durch die Höhlenforscher wurde das Gebiet bereits speläologisch untersucht und kartiert (siehe Kapitel 2). Da die unterirdischen Fliesswege nur zum Teil begehbar sind, müssen andere karsthydrologische Methoden angewendet werden um die Einzugsgebiete der Quellen zu ermitteln. Hier werden neue Erkenntnisse zur Karsthydrologie des Gebietes vorgestellt, die durch Tracerversuche und hydrochemischen Messungen gewonnen wurden. Die Tracerversuche dienen der Untersuchung der hydraulischen Verbindungen zwischen Bachschwinden und Quellen. Messungen der Elektrischen Leitfähigkeit, der Isotopen und der Temperatur geben zusätzliche Informationen über den Fliessweg zu den Quellen.

Die Arbeit ist folgendermassen aufgebaut: Als Erstes wird das Untersuchungsgebiet vorgestellt (Kapitel 2), um die Problemstellung besser verstehen zu können. Dazu gehört eine Behandlung der örtlichen Geologie und Hydrologie. Zudem werden die Bachschwinden und Quellen beschrieben, bei denen die Messungen und/oder Markierungsversuche durchgeführt wurden. Zusätzlich wird auf die Vegetation, das Klima und die wirtschaftliche Nutzung der Region eingegangen. In Kapitel 3 wird auf Unklarheiten bezüglich einzelner Quellen eingegangen. Dazu werden als Erstes durchgeführte Studien und Untersuchungen zum Ort vorgestellt. Anschliessend wird analysiert, wo Widersprüche herrschen und daraus die Forschungsfragen definiert. Kapitel 4 widmet sich den angewandten Methoden und dem Messbeschrieb. Ein erster Theorieteil stellt die Grundlagen der verwendeten Methoden vor. Anschliessend werden die Messmethoden, die Datenauswertung und der Feldzugang beschrieben. In den Messresultaten (Kapitel 5) werden als Erstes die Ergebnisse der regelmässigen Quellwassermessungen besprochen. Anschliessend werden die Durchgangskurven der einzelnen Markierungsversuche besprochen und analytisch ausgewertet. In der Diskussion (Kapitel 6) werden die Resultate interpretiert und allfällige Schlüsse auf das Karstsystem gezogen. Anschliessend wird die Interpretation der Resultate mit bisherigen Untersuchungen verglichen. Zwei weitere Unterkapitel widmen sich den Unsicherheiten, welche bei der Interpretation berücksichtigt werden sollten und den Methoden und Feldbegehung. Dabei wird besprochen, wie bei späteren Untersuchungen die Unsicherheiten minimiert und das Aufwand-Ertrags-Verhältnis verbessert werden könnte. In Kapitel 7 werden die formulierten Forschungsfragen beantwortet und weiterführende Forschungsfragen definiert.

Kapitel 2

Untersuchungsgebiet

2.1 Lage

Das untersuchte Gebiet liegt in den Schwyzer Voralpen an der Ostflanke des oberen Waagtals und gehört im Talbereich zur Gemeinde Unteriberg und im höheren Bereich zur Gemeinde Oberiberg (Karte im Anhang II). Das Waagtal ist das westliche Paralleltal zum Sihltal und wird von der Waag durchflossen, welche im Hoch-Ybrig entspringt, bei Unteriberg in die Münster fließt und anschliessend im Sihlsee mündet. Zwischen dem Waagtal und dem Sihltal erhebt sich eine Berggruppe mit dem Biet, Drusberg, Forstberg und weiteren Gipfeln. Die Höhe des Untersuchungsgebietes liegt zwischen 940 m.ü.M. im Tal bei Schachen und 2280 m.ü.M. auf dem Druesberg. Hinter dem Drusberg bzw. südlich des Waagtals liegt das Muotathal mit dem Hölloch Höhlensystem.

2.2 Geologie, Geohydrologie und Geomorphologie

Das Untersuchungsgebiet gehört tektonisch zur Drusberg-Decke (Süd-Helvetikum), welche primär aus Kreidesedimenten besteht. Der Fidisberg als Ausnahme besteht im oberen Bereich aus tertiären Sedimenten (Jeannet 1941).

Für diese Arbeit sind die tertiären Schichten der Drusberg-Decke nicht von Relevanz, sie kommen im Untersuchungsgebiet nur auf dem Fidisberg vor. Es werden folglich nur die Kreideserie der Drusberg-Decke vorgestellt. Die Schichten werden der Reihe nach von Oben nach unten besprochen zusammen mit ihren hydrogeologischen Eigenschaften. Schichten können als Wasserleiter (Aquifer) oder Wasserstauer (Aquiclude) wirken oder zum Teil beide Eigenschaften besitzen, je nach Zusammensetzung. Kalkegesteine haben in der Regel eine grosse Durchlässigkeit, während Mergel in der Regel wasserstauend sind. Mergelige und sandige Kalke wie z.B. der Kieselkalk haben eine uneinheitliche Durchlässigkeit (Haering et al. 1994). Die hier verwendeten hydrogeologischen Eigenschaften stützen sich auf diese Faustregel und auf die Einschätzung in Gobat & Malard (2013), welche sich wiederum auf Feldbeobachtungen in einer schriftlichen Mitteilung von Andreas Dickert stützen.

Die *Wang Formation* besteht aus dunkeln, schwach glaukonischen Kalke und Kalkschiefern mit einer Mächtigkeit von 100 bis 120 m (Jeannet 1941). Gut sichtbar ist die Wang Formation an den Felswänden des Schülbergs. Die Wang Formation weist verschiedene Durchlässigkeiten auf. In



Abbildung 2.1: a) Sicht von Süden auf Schülberg b) Sicht von West- Nordwest auf Drusberg und Twäriberg. Darunter zieht sich die Felswand fallend nach Süden. c) Blick auf die Felswand und Krähloch von Weglosen aus. d) Blick auf die Felswand und die bewaldete Osthänge des Waagtals von Süden aus.

der Regel ist diese Schicht semipermeabel. Bei Sternen wurde jedoch ein Aquifer-Verhalten beobachtet und auf dem Schülberg ein Aquiclude-Verhalten (Andreas Dickert in Gobat & Malard (2013)).

Der *Amdener Mergel* hat eine Mächtigkeit von bis zu mehreren hundert Metern und besteht aus fein geschichteten grauen Mergel, welche oft mit Calcitadern durchzogen sind (Jeannet 1941). Amdener Mergel kommt um den Schülberg vor, beispielsweise südlich von der Strasse, welche von der Lehhütte nach Hinterhofen führt. Der Amdener Mergel besitzt eine geringe bis sehr geringe Durchlässigkeit (Haering et al. 1994).

Der *Seewermergel* und der *Seewerkalk* haben zusammen eine Mächtigkeit von 10 bis 60 m im Sihl-talgebiet. Der oberliegende Seewermergel ist durch helle, unregelmässige und feine Kalkbänke mit schwärzlichen Mergelstreifen charakterisiert (Jeannet 1941). Der darunterliegende Seewerkalk wird durch helle, dünnplattige Kalke mit Tonsuturen geformt und wird gegen Süden dünner (Jeannet 1941). Der Seewerkalk ist leicht löslich und kann als Aquiclude eingestuft werden (Haering et al. 1994).

Die *Garschella Formation* oder auch Helvetischer Gault fasst die Subformationen (Member) Selun, Brisi und Luiteren zusammen (Hantke & Thomas 1961) und hat eine Mächtigkeit von 30 bis 60 m (Jeannet 1941). Der Selun-Member liegt zuoberst und besteht aus Mergelschiefer, siltigen Kalken und glaukonitischen Sandsteinen (Hantke & Thomas 1961). Die darunterliegenden Brisischichten bestehen aus Spatkalk, Echinodermenbrekzie und Glaukonitsandstein und haben eine Mächtigkeit

keit von 20 bis 30m (Jeannet 1941). Die Luiterschichten bestehen aus Mergel und Sandstein und haben eine sehr geringe Mächtigkeit von rund 0.1 m (Jeannet 1941). Die Garschella Formation wird als Aquiclude eingestuft. Dies aufgrund der Beobachtung, dass in diesen Regionen das Wasser oberirdisch abfließt (Gobat & Malard 2013), zum Beispiel auf den Weiden um die Twäriberghütte.

Der *Obere Schrattenkalk* ist ein heller zoogener Kalk mit einer Mächtigkeit zwischen 25-20 m (Jeannet 1941). Der Obere und der Untere Schrattenkalk werden durch eine Orbitulinmergelschicht von rund 5m Mächtigkeit voneinander getrennt (Jeannet 1941). Der *Untere Schrattenkalk* ist etwas brüchiger als der Obere Schrattenkalk und hat eine vergleichbare Mächtigkeit von rund 20 m, welche gegen Norden zunimmt (Jeannet 1941). Der Schrattenkalk ist stark durchlässig (Haering et al. 1994). Gut an der Oberfläche erkennbar ist der Schrattenkalk an der östlichen Felswand des oberen Waagtals, um die Bachschwinden bei Chalberalpeli, im Chäserenwald und an den nördlichen Wänden von Wannenstein und Biet (Hantke 2009). Die *Drusberg Schicht* hat eine Mächtigkeit von bis zu 200 m und ist besonders gut auf der Südseite des namensgebenden Drusbergs zu erkennen. Die Mächtigkeit dieser Schicht nimmt gegen Norden ab. Die Drusbergschicht besteht aus bräunlichem Mergel mit Kalk-Bänken. Hängend, als Grenze zu den Kieselkalken liegen die Altmann Schichten, welche glaukonitische Kalke sind und eine Mächtigkeit von 3-5m haben (Jeannet 1941). Die Teile mit den Kalk-Bänken können leicht durchlässig sein. Im allgemeinen gilt die Drusbergschicht aber als nicht durchlässig (Gobat & Malard 2013).

Der dunkle, bräunliche Kieselkalk hat eine Mächtigkeit von mehreren hundert Metern und enthält Mergelschiefer-Einlagerungen (Jeannet 1941). Der Kieselkalk ist aufgrund von Klüften vorwiegend ein Kluftaquifer (Gobat & Malard 2013), die Durchlässigkeit ist mässig und kleiner als jene des Schrattenkalkes oder Seewerkalkes (Haering et al. 1994). Da diese Schicht unter den Quellen liegt (Ausnahme Schachen), spielt sie wahrscheinlich keine grosse Rolle in der Hydrologie der Quellen. Der Kieselkalk kommt erst unter dem Felsband an die Oberfläche, zum Beispiel bei den Fliederrennen.

Tektonischer Bau und Folgen für die Hydrogeologie

Die Mächtigkeit der Schichten nimmt generell gegen Norden hin ab. Die Drusberg-Decke ist stark verfaltet, wobei die Achsen der Falten einen ungefähren West-Ost Verlauf haben (Jeannet 1941). Das Gebiet ist durch viele Brüche geprägt, welche verschiedenste Ausrichtungen haben. Ein sichtbar auffälliger Bruchkomplex verläuft von der Chöplishütte Richtung Nord-Nordost (Jeannet 1941). Die Schichten fallen monoklinal Richtung West-Nordwesten. Es ist deshalb zu erwarten, dass das Wasser unterirdisch in Synklinalen Richtung West-Nordwest abfließt und oder den vielfältigen Brüchen folgt. Die Käseren liegt in einer leichten Synklinalen (Jeannet 1941). Zwei prägende Falten führen durch Biet-Totenplangg und knapp nördlich durch Schwarzenstock-Farenstock.

Geomorphologie

Das Kalkgestein zeigt sich in verschiedenen typischen Karstformen. An den Stellen wo der Seewerkalk oder der Schrattealk an der Oberfläche liegen, prägen vereinzelt Karren das Landschaftsbild. Bei Unterweid befindet sich eine relativ grosse Doline. Weitere kleine Senken und Löcher sind auch bei Oberweid, Wannan und Hinterhofen zu finden. Mehrere Höhlen sind in den Felsen verborgen. Bis jetzt sind im Gebiet zwischen Waag- und Sihltal und in der Region des Hoch Ybrigs mehr als 60 Höhleneingänge registriert worden. Die meisten Höhlen sind wasserführend. Trockenhöhlen befinden sich im oberen Bereich des Gebietes (Dickert et al. 2012).

2.3 Gewässer allgemein

Die Waag im Talboden wird vorwiegend aus Bächen gespeisen, die von der östlichen Talflanke oder aus dem Gebiet Sternen kommen. Die Waag hat einen Basisabfluss von 1-5 m³/s. Oberhalb der Felswand gibt es vom Schülberg und Pfannenstock her einige Oberflächenabflüsse. Der Abfluss ist jedoch relativ gering (unter 100 l/s). Von der Chöpplishütte zum Chalberalpeli hoch gibt es einige kleine Bachschwinden und Quellaustritte, welche zum Teil ausserhalb des Bachtobels liegen. Dieses Phänomen wurde im ganzen Gebiet regelmässig beobachtet. Es ist jeweils schwierig zu beurteilen, ob das Wasser nur leicht versickert und nahe der Oberfläche weiterfliesst und in der Nähe wieder auftritt, oder ob das Wasser tiefere Fließwege durch Karstgänge und Klüfte nimmt. An einigen Stellen wo der Seewerkalk an die Oberfläche kommt ist Wasserrauschen zu hören, zum Beispiel auf der Alp Wannan, bei Hinterhofen oder bei Ober Weid in der Nähe des Leiterenstollen.

Unterhalb der Felswand versickert bei Basisabfluss das Wasser aus den Quellen häufig im Bachtobel und kommt zum Teil erst in der Nähe der Waag wieder zum Vorschein.

Südwestlich des Schülbergs befindet sich eine Grundwasserschutzzone des Typs S3, an deren unteren Ende sich eine Brunnstube für die Wasserversorgung der Drusberghütte befindet.

Die Waag wurde 1992 fertig eingedämmt, ist jedoch ein Jahr nach Bauende bereits wieder über die Ufer getreten und hat Schaden angerichtet (E.Fuchs).

2.4 Messstandorte

Die untersuchte Quellen und Bachschwinden sind alle perennierend. Sie werden in der Folge vorgestellt und sind auf der Karte im Anhang II verzeichnet.

2.4.1 Injektionsstandorte

Riedloch (RL)

Das Riedloch entwässert das Ried bei Hinterhofen, welches Teils ein Flachmoor ist. Der Ponor befindet sich an der Grenze zum Seewerkalk und liegt auf 1746 m.ü.M. Bei starken Niederschlägen kann das Ried um das Riedloch unter Wasser liegen. Während den Feldbegehungen verschwanden jedoch nicht mehr als 3 l/s in das Loch. Das Riedloch wird von Alpweiden umgeben, welche zumindest im Herbst 2014 gedüngt wurden.

Wannen (WA)

Bei der Wannenalp gibt es zwischen Wannenstock, Fidisberg und Biet mehrere kleine Bachschwinden, wobei jedoch nicht alle im Jahr 2014 immer Wasser führten. Die Schwinde mit dem grössten Abfluss im Herbst 2014 (1 l/s) befindet sich rund 40m östlich der Strasse, welche zur Alphütte führt, in einer leichten Mulde. Die Bachschwinde befindet sich auf 1696 m.ü.M. an der Grenze von Seewerkalk und Selun-Member.

Unterweid (UW)

Die Injektionsstelle UW ist eine zubetonierte Quelle, welche aus dem Seewerkalk tritt und im selben Loch etwas tiefer wieder versickert (Profilskizze in Abbildung 2.2). Bei dieser Schwinde wurde der geringste Abfluss von rund 0.6 l/s gemessen. Die Schwinde ist durch ein Gullydeckel begehbar. Das Wasser fliesst von Osten in das Loch und versickert wieder Richtung Osten auf lockerem Untergrund. Weiter westlich befindet sich eine grössere Doline, welche zum Injektionszeitpunkt jedoch trocken lag.

Chalberalpe (CA)

Das Chalberalpe (1820 m.ü.M.) ist eine ovale Senke, welche südöstlich durch den Twäriberg, Drusberg und Forstberg umrahmt wird. Nordwestlich wird das Alpe durch eine un stetige Schrat-tenkalk Wand mit einer Höhe von 5-15 m begrenzt. Am Fuss der besagten Wand befinden sich zwei Bachschwinden, eine südlich und eine nördlich, beide ungefähr mit dem selben Abfluss. Bei der nördlichen Bachschwinde wurde im Jahr 2013 auf der Suche nach einem Höhleneingang gesprengt, diese Schwinde wurde für den Markierungsversuch gewählt. Die Bachschwinde CA ist somit die einzige, welche im Schrat-tenkalk und nicht im darüberliegenden Seewerkalk liegt. Auf dem Chalberalpe bleibt der Schnee länger liegen aufgrund der schattigen Kessellage. Gegen Ende der Schmelzperiode wurde in den Jahren 2015 und 2014 ein Schmelzwassersee im Chalberalpe beobachtet, welcher jedoch nach wenigen Tagen wieder verschwindet.

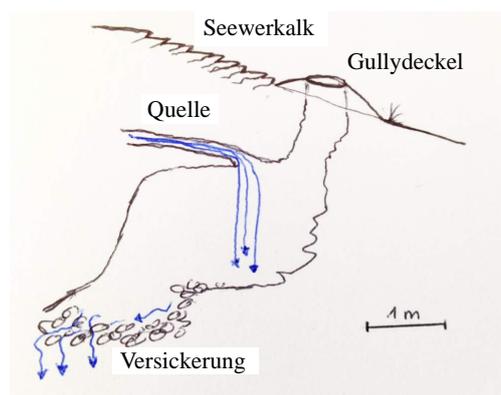


Abbildung 2.2: Profilskizze der Injektionsstelle von Unterweid

2.4.2 Quellen

Schachen (SCHA)

Die Schachenquelle liegt im Talboden (Alluvial) an der Grenze zwischen oberen und unteren Waagtal und ist die Quelle mit dem grössten Abfluss, welcher während der Messperiode gesamt- haft zwischen 60 und 700 l/s lag. Die Quelle besteht aus drei bis fünf Unterquellen, welche auf der Wiese austreten und nach wenigen Meter zusammenfliessen.

Furli (FU, FUR und FUB)

Die Furiquelle (FU) ist eine horizontale Karstquelle und entspringt aus dem Furlihöhlenbach welcher sich an der Schichtgrenze von Schraffenkalk in der Felswand oberhalb von Furli befindet. Speziell ist, dass diese Quelle Anfangs 20. Jahrhundert zur Energiegewinnung benutzt wurde (Wieland 1919). Dafür wurde vor dem Höhlenausgang in einem künstlichen Basin das Wasser gefasst, gespeichert und über Rohre zum Kraftwerk am Talboden bei Twingli geführt. Für das Kraftwerk wurde ein Basisabfluss von 12 l/s gemessen (Wieland 1919) Beobachtungen von den Höhlenforschern gehen aber von einem rund halb so grossen Basisabfluss aus. Die Quelle kann sehr schnell auf Starkniederschlag reagieren. Edwin Fuchs beobachtete Reaktionszeiten unter einer Stunde. Bei FU wurde nie direkt beim Höhlenausgang gemessen, sondern an zwei Standorten in Talbodennähe: FUB und FUR. FUB ist ein Brunnen am Stall des Furli Hofes. FUR ist ein höher gelegener Standort, wo ein Schlauch endet, welcher Wasser direkt von der Furlihöhle leitet.

Kreuzloch (KLQ, KLBS und KLB)

Die Kreuzlochquelle ist eine horizontale Karstquelle und entspringt aus dem Höhlenbach des Kreuzloches. Die Quelle ist an der unteren Grenze des Schraffenkalkes situiert und liegt auf 1370 m.ü.M. Die Quelle hat im Eingangsbereich einen Mindestabfluss zwischen 10 und 20 l/s¹ und einen Maximalabfluss von 5-10 m³/s, wobei sie sehr schnell auf Starkniederschlag reagieren kann, zum Beispiel einem Wasserspiegelanstieg von 8 m in 20 min (Lüthi 2012a). Der Höhlenbach tritt bei dieser Quelle nicht aus dem Höhleneingang, sondern fliesst weiter unterirdisch ab. Bei Starkniederschlägen kann der Höhlenbach jedoch soweit ansteigen, dass er aus dem Höhleineingang strömt. Dieses Phänomen ereignete sich zuletzt im Juni 2014, als bei Wann 61mm Niederschlag gemessen wurden. Der Höhlenbach verursachte vor dem Höhleneingang und im Bachtobel starke Gesteinsverschiebung. Für die Kreuzlochmessungen wurden drei verschiedenen Messstandorte verwendet: KLH, KLBS und KLB.

Der Standort KLH (Kreuzloch Höhle) befindet sich in der Höhle selber, wo der Höhlenbach einige Meter vor dem Höhleneingang weiter in den Untergrund fliesst. Dabei gibt es zwei Abflüsse (Abbildung 2.3). Einer, der aus dem Seeli 1 nordwärts abfliesst, und einer, der über den Unteren Abfluss geht. Bei mittlerem und hohem Wasserstand fliesst das Wasser aus dem Seeli 1 über in den Unterabfluss.

Der Standort KLBS (Kreuzloch Brunnstube) befindet sich in Talnähe. Im Sattlertobel, welches von der Kreuzlochhöhle zum Tal führt, tritt eine Quelle aus bei 1070 m.ü.M. Ein Teil ihres Wassers

¹Eigene Beobachtung

wird über Rohre zur nahegelegenen (ca. 30 m) Brunnstube (KLBS) geführt. Es wird angenommen, dass es sich um dasselbe Wasser wie im Kreuzloch handelt.

Der Standort KLB (Kreuzloch Brunnen) ist ein Holzbrunnen bei der Jägerhütte, welcher vom KLBS gespeisen wird.

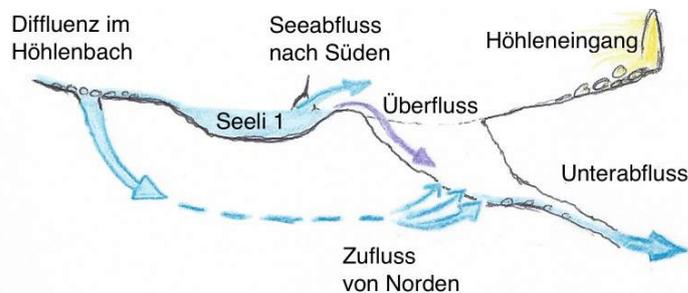


Abbildung 2.3: Skizze der Abflüsse der Kreuzlochhöhle (KLH) mit Ausrichtung Ost-West.

Chäsloch (CHÄS)

Die Chäsloch Quelle befindet sich auf 1210 m.ü.M. und ist ebenfalls eine horizontale Karstquelle, welche aus der Schichtgrenze zwischen Schrattenkalk und Drusbergschicht tritt. Das Wasser tritt aus einiger Höhe aus dem Felsen und plätschert über Moosbänke bevor es sich in einem Steinigem Bachbett findet. Der Basisabfluss dieser Quelle liegt bei 3 l/s. Bei der Quelle befindet sich ein Wasserfall von einem oberirdischen Bach mit einem ähnlichem Basisabfluss wie die Quelle.

Krähloch (KRÄH)

Das Krähloch ist ebenfalls eine horizontale Karstquelle, welche aus der Schichtgrenze zwischen Schrattenkalk und Drusbergschicht aus dem Felsen tritt. Sie befindet sich auf 1165 m.ü.M. und hat über sich einen Wasserfall mit vergleichbarer Schüttung. Der Basisabfluss dieser Quelle wird auf 2-3 l/s geschätzt. Diese Quelle ist die Einzige, die nicht das ganze Jahr durch Wasser führt, sondern im Winter in der Regel trocken liegt.

Lauei (LA)

Die Lauei Quelle befindet sich im obersten Teil des Waagtales im bewaldeten Talboden, nahe vom Waagbach. Die Quelle tritt aus dem Schotter und es ist nicht bekannt, ob es sich um eine bedeckte Karstquelle handelt. Dichter Moos und Pflanzenwachstum um die Quelle deuten darauf hin, dass die Quelle keine extremen Hochwasser hat. Der Basisabfluss liegt um die 20 l/s. Einheimische berichten, dass sich die Quelle vor rund 30 Jahren ein Stück weiter hangaufwärts in der Wiese befand.

Studen (STU)

Die Studen Quelle liegt bei Adelmatt, Studen in einer Wiese am Rande der Siedlungen. Sie ist die einzig regelmässig beprobte Quelle, welche nicht im Waagtal sondern im Sihltal liegt. Es handelt sich um einen Grundwasseraufstoss (Schenker Korner & Partner GmbH 2011), wobei manche Höhlenforscher einen Karstwasseraufstoss in Frage stellen. Die Quelle hat selbst in trockenen Zei-

ten relativ viel Wasser und hat eine Basisschüttung grösser als 300 l/s.

Alt Stafel (AS)

Der Standort bei Alt Stafel ist ein Bächlein östlich der Tierfäderenegg im Sihltal, welches aus Quellen um die Rinderweid entspringt. Einige dieser Quellen liegen im Schrattekalk nördlich des Chalberstöcklis. Der Standort liegt auf einer Alp und hat nordwestlich des Baches Flach- und Hochmoore. Dieser Standort wurde ausschliesslich bei einem Markierungsversuch benutzt und sonst nie beobachtet.

2.4.3 Wetterstationen

Im Untersuchungsgebiet gib es zwei Wettermessstationen. Beide messen im Halbstundentakt. Eine Station liegt auf der Alp Wannen auf rund 1700 m.ü.M. und wird vom SLF (Institut für Schnee- und Lawinenforschung) betrieben (MS WA). Die Station misst Lufttemperatur, Niederschlag, Schneehöhe und Wind. Diese Daten dürfen im Rahmen des Hydrologieprojektes verwendet werden.

Die zweite Messstation liegt südwestlich von der Chöpplishütte (MS CH) auf rund 1600 m.ü.M. und misst Lufttemperatur sowie Niederschlag. Diese Station wurde im Rahmen des Hydrologieprojektes durch die HGY und OGH montiert. Der Niederschlag kann nur bei Positivtemperaturen gemessen werden, da der messende Totalisator nicht beheizt ist. Die Messungen werden über Funk übertragen und werden gespeichert. Funkprobleme haben jedoch während der Projektphase zu einigen Messlücken geführt.

2.5 Klima und Vegetation

Auf der Wannenalp betrug die Mittlere Lufttemperatur im Jahr 2014 5.5 °C. gesamthaft wurden im Jahr 2014 2100 mm Niederschlag auf Wannen gemessen (Abbildung 3.1). In Waag (930 m.ü.M., Gemeinde Unteriberg) ist die durchschnittliche mittlere Jahrestemperatur 6.7 °C und der mittlere Jahresniederschlag 1317 mm, wobei der August der niederschlagreichste- und der Februar der niederschlagärmste Monat ist (Climate Data 2015). Der Sommer 2014 war besonders im Juli sehr niederschlagsreich und eher kühl. Der Winter 2013/2014 und der Herbst 2014 waren dafür relativ warm.

Laut Beobachtungen der Höhlenforscher nimmt der Niederschlag im Tal gegen Süden zu. Zwischen Dezember und Mai liegt auf Wannen und allgemein oberhalb der Felswand Schnee (SLF 2015). Im Chalberalpeli, in der südlichen Flanke vom Twäriberg und beim Heuloch (östlich von Schülberg) bleibt der Schnee am längsten liegen (B. Hediger).

Das obere Waagtal ist aufgrund seiner Nord-Süd Ausrichtung besonders im Winter sehr schattig. Durch die Kesselform bleiben Wolken häufig länger über dem Tal hängen.

Der Talboden besteht vorwiegend aus Weidewiesen. Zwischen Talboden und Felsbänder ist das steile Gelände bewaldet, vorwiegend mit Nadelhölzer. Oberhalb des östlichen Felsbandes befin-

det sich wenig Wald, mit Ausnahme des Bereiches nahe der Felswand um den Schwarzenstock und des Chäserenwaldes unterhalb der Chöplishütte. Die Waldgrenze ist wie in vielen Regionen der Schweiz am steigen. Oberhalb des Waldes befinden sich vereinzelt Bäume und Sträucher.

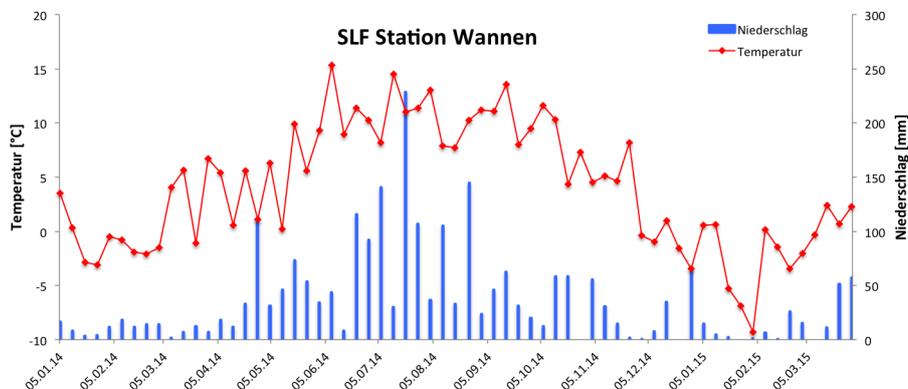


Abbildung 2.4: Wochendurchschnitt der Temperaturen und Wochenniederschlag auf der Alp Wannen, aufgezeichnet durch die SLF Messtation Wannen in der Periode zwischen 29.01.2013 und 30.03.2015. Gut erkennbar ist der relativ feuchte Sommer mit den grossen Niederschlagsmengen besonders im Juli.

2.6 Nutzung

Das Gebiet wird vorwiegend landwirtschaftlich und touristisch genutzt. Fast alle Wiesen oberhalb der Felswand sind Alpweiden für Grossvieh. So sind mehrere Alphütten im Gebiet verteilt und durch ein umfängliches Strassennetz miteinander verbunden.

Die unmittelbare Nähe zum Skigebiet Hoch Ybrig und der dazugehörigen Bergbahn sorgen sowohl im Winter als auch bei trockenen Sommertagen für ein familienfreundliches Angebot und einen vielfältigen Sporttourismus. Besonders der südlichere Teil des Untersuchungsgebietes zwischen der Wirtschaft Drusberghütte, dem Druesberg und der Bergstation Hoch Ybrig hat im Sommer stark frequentierte Wanderwege.

Der obere Talboden wird das ganze Jahr hindurch von wenigen Familien bewohnt. Im unteren Waagtal befinden sich die Dörfer Waag und Unteriberg. Die Wiesen im Tal werden mehrheitlich landwirtschaftlich genutzt als Heimweiden und Naturwiesen. Die Talstation Weglosen bildet den touristische Hotspot im Talboden mit einer Gastwirtschaft und grosser Parkanlage und -Flächen, welche vielfältig genutzt werden.

Das Leitungswasser beziehen die meisten Gebäude im oberen Waagtal von der Wasserversorgung der Gemeinde Unteriberg. Manche kleinere Hütten, Ställe und Brunnen werden durch das Wasser aus den Ost-Waag-Quellen gespiesen.

Kapitel 3

Stand der Forschung und Forschungsfragen

3.1 Stand der Forschung

3.1.1 Speläologische und Karsthydrologische Untersuchungen im Gebiet

Die ersten karsthydrologischen Untersuchungen im Waagtal fanden anfangs 20. Jahrhundert statt. Vor der Erstellung des Elektra Werkes bei Furli wurde ein Markierungsversuch vom Pater Damian Buck auf Wannan durchgeführt, der die Verbindung zur Furliquelle bestätigte (Wieland 1919). Spezifische Unterlagen zu diesem Versuch sind jedoch nicht auffindbar, weshalb auch die genaue Injektionsstelle nicht bekannt ist.

Im Rahmen des Karsthydrologie Projekts Ybrig wurden einige Arbeiten errichtet, welche eine wichtige Basis für diese Masterarbeit sind (dargelegt in Dickert et al. (2012)). Als Erstes wurde das Gebiet in mehreren Feldbegehungen nach Schwinden, Quellen und Höhlen abgesucht, welche kartiert und inventarisiert wurden. Neben den Koordinaten wurden weitere Grössen und Eigenschaften der befragten Standorte aufgenommen (wie z.B. Wassertemperatur und Lagebeschriftung). Die meisten Quellen wurden unterhalb der östlichen Felswand vom Waagtal gefunden und drei in der Nähe der Waag, darunter Laueli und Schachen. Im Gebiet oberhalb der Felswand wurden vorwiegend unpassierbare Schwinden und inaktive Höhlen gefunden.

Die begehbaren Höhlen im Gebiet wurden speläologisch untersucht und ebenfalls minutiös kartiert. Bei manchen Höhlen – wo die Begehbarkeit mit einem Siphon endet – haben Höhlentaucher die Untersuchung soweit wie möglich fortgesetzt. Besonders weit konnte die Kreuzlochhöhle untersucht werden. Es zeigt sich, dass der Höhlenbach die Konfluenz von zwei perennierenden unterirdischen Bächen ist, wobei der eine von Norden kommt (Leschterigang) und der andere von Süden (Hauptgang) (Lüthi 2012b).

Zusätzlich wurden Messsonden installiert, welche Druck und Temperatur messen. Solche Installationen wurden in der Furlihöhle, im Kreuzloch, im Riedloch und bei Laueli vorgenommen. In Lüthi (2012a) werden die Wassertemperatur- und Druckdaten im Kreuzloch der erste vier Monate von 2010 analysiert. Dabei wurde beobachtet, dass bei kleinen Hochwasser die Wassertemperatur leicht zunimmt bevor sie sinkt. Dies kann damit erklärt werden, dass dabei Wassermassen mobilisiert werden, welche sich geothermal aufgewärmt haben.

In den aktiven Höhlen führt der Höhlenbach nicht immer gleich viel Wasser. Um die Fliesswege im Kreuzloch besser verstehen zu können, wurden kleinräumige Markierungsversuche mit Salz gemacht, welche den Zufluss vor dem Seeli 1 bestätigen von einer Diffluenz, welche sich im oberen Hauptgang befindet (Lüthi 2012b).

In Kombination mit Niederschlagsdaten sollten die Aufnahmen der Messsonden Aussagen über das Reaktionsverhalten der Quellen machen. Zu diesem Zweck wurden bei der Chöplishütte und bei Stüeligen (1322 m.ü.M., Ostflanke des Stocks) Messstationen installiert, welche im halbstundentakt Temperatur und Niederschlag aufzeichnen. Zusätzlich wurde ein Vertrag mit der SLF abgeschlossen, um die Daten der Wetterstation auf Wannan zu erhalten, für alle mit dem Projekt verbundenen Untersuchungen.

Im Rahmen des Projekts wurde das Schweizerische Institut für Speläologie und Karstforschung (SISKA) zur Untersuchung hinzugezogen. Das SISKA wendete einen geohydrologischen Ansatz für die Modellierung des Gebietes an (KARSYS), welcher im folgenden Unterkapitel behandelt wird.

Von der Projektgruppe Karsthydrologie Ybrig werden - basierend auf ihren Beobachtungen - folgende hydraulische Verbindungen im Gebiet angenommen: Chöplishütte-KLH, Riedloch-KLH, KLH-KLBS, Wannan-Furli und Unterweid-Furli (Dickert 2012). Zudem nimmt B. Hediger eine Verbindung von Chalberalpeli zu Kreuzloch an, da beim Kreuzloch an warmen Frühlingsnachmittagen der Abfluss zunimmt, wenn nur noch auf dem Chalberalpeli Schnee liegt.

3.1.2 Geohydrologische Modellierung mit dem KARSYS-Ansatz

Der KARSYS-Ansatz wurde im Rahmen des SWISSKARST-Projekts entwickelt, welches das Ziel der Erfassung der Karstgrundwasserkörper in der Schweiz hat (Jeannin et al. 2013). Mit dem KARSYS-Ansatz wird aufgrund vorhandenen geologischen und hydrogeologischen Daten von einem Gebiet eine räumliche Modellierung der Karstwassergrundleiter und Fliesssysteme vorgenommen. Das Resultat ist ein 3D Modell der hydrogeologischen Charakteristiken des Aquifers.

Das resultierende Modell widmet sich (a) dem Ursprung des Quellwassers, (b) dem Charakter der Fliesswege und (c) der Existenz, Lage und Grösse von Grundwasserreserven.

Für die Modellierung der Wasserwege geht der Ansatz von folgenden Prinzipien aus (Malard & Jeannin 2013a):

- i In der ungesättigten Zone von Aquiferen fliesst das Wasser vertikal.
- ii Erreicht das Wasser die Oberfläche einer undurchlässigen Schicht, folgt es der Falllinie.
- iii In der gesättigten Zone fliesst das Wasser pseudo-horizontal.

Für die Erstellung des Modells für das Ybrig wurde zuerst aus den geologischen Befunden, wie z.B. Querprofilen der Region, ein geologisches Modell erstellt. Es wurden nur zwei von vielen Brüchen im Modell aufgenommen. Ein Bruch ist jener nordwestlich vom Chalberalperli und der andere liegt zwischen Twäriberg und Pfannenstock. Bei beiden Brüchen ist der Teil hangabwärts aufgeschoben worden, sodass sie wasserstauend wirken (Gobat & Malard 2013).

Für das hydrologische Modell des Ybrigs wurde zur Vereinfachung angenommen, dass die Wang

Formation durchlässig ist und dass die Garschella Formation sowie die Drusbergschichten undurchlässig sind (Gobat & Malard 2013).

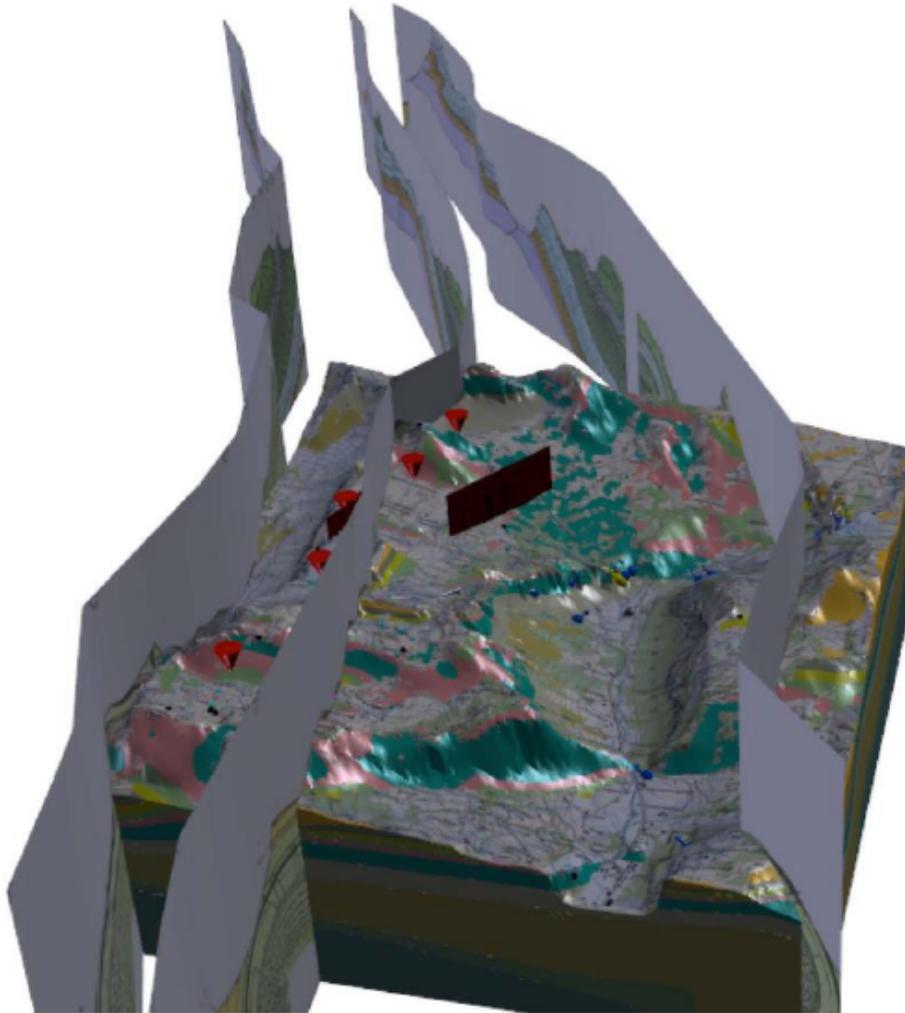


Abbildung 3.1: 3D Modell nach dem KARSYS-Ansatzes vom Studiengebiet. Die Querprofile stammen von Hantke (Hantke & Thomas 1961), die dunkelbraunen Balken stellen die Brüche dar, die blauen Punkte mit Pfeil Quellen und die hellblauen Punkte Bachschwinden.

Die Resultate bzw. modellierte Fliesswege, welche mit dem KARSYS-Ansatzes berechnet wurden sind folgende (Karte im Anhang I): Das Modell zeigt fünf Karstwasserkörper, welche durch Mulden in der Topographie der Drusberg Schicht entstehen. Der grösste Karstwasserkörper erstreckt sich von Tierfäderenegg zu Mittelwald, Schachen und weiter westlich der Waag. Die Schachenquelle liegt am Rande des gespannten Spiegels dieses Körpers. Weitere Karstwasserkörper (alle mit freiem Spiegel) befinden sich bei Unter Weid, bei Hinterfirst nördlich des Biets, zwischen Schülberg und Fidisberg und am südlichsten Ende des Waagtals wo die Laueliquelle am Rande entspringt.

Das Wasser des Riedlochs fliesst über einen Grundwasserkörper zum Kreuzloch. Der Grundwasserkörper sorgt wahrscheinlich für die perennierende Schüttung des Kreuzloches.

Das Gebiet von Ober Weid, nördlich des Biets, entwässert in zwei mögliche Richtungen, nachdem es auf der Höhe vom Injektionsstandort Unterweid in ein Karstwasserkörper fliesst. Nach dem Modell führt der Fliessweg nach dem Karstwasserkörper nach Nordwesten, wo das Wasser bei Mittelwald in einen grösseren Karstwasserkörper fliesst, der auch die Schachenquelle speist. Wahrscheinlicher erachten Gobat & Malard (2013), dass das Wasser nach dem Karstwasserkörper westwärts zu Furli fliesst. Grund für diese Annahme ist, dass die Drusbergschicht bei der Furliquelle tiefer angenommen ist als im Modell verwendet und dass die hydraulische Verbindung zu Ober Weid erklärend für die Schüttung der Quelle ist.

Wannen liegt nach dem Modell auf einer Wasserscheide. Die nördlichste Schwinde nördlich der Wannen Hütte soll über Unter Weid zu Schachen bzw. Furli führen, während die Schwinden näher dem Fidisberg über den Karstwasserkörper zwischen Schül- und Fidisberg zum Kreuzloch entwässern.

Das Gebiet zwischen Rütistei und Forstberg (Bachschwinde von Chalberalpe) entwässert nach dem Modell in den Töblerenquellen. Dieses Resultat soll jedoch besonders mit Vorsicht behandelt werden, da aufgrund der Brüche unterhalb des Twäribergs das Wasser auch zu Kreuz- und Chäsloch umgeleitet werden könnte oder zum südlichen Karstwasserkörper, welcher die Quelle Laeli speist. Ansonsten wird Laeli nach dem Modell mit dem Wasser zwischen Forstberg und Sternen gespeisen.

Im Allgemeinen folgt der Fliessweg der angenommenen Oberfläche der Drusbergschicht, nachdem es vertikal durch Schrattekalk, an Bruchstellen durch die Garschella Formation und vertikal durch den Seewerkalk geflossen ist.

Ungeklärt bleibt die Speisung des Chäslochs. Eine Umleitung von den Töbleren oder vom Kreuzloch her ist möglich. Letzteres wird als am wahrscheinlichsten erachtet. Die Schwäche des Modells ist, dass keine Diffluenzen möglich sind. Dadurch werden weitere mögliche Fliesswege ignoriert.

3.2 Grobe Wasserbilanz des Gebietes

Mit einer Analyse der Abflüsse können Aussagen zur Grösse eines Einzugsgebietes gemacht werden. Die Basis bildet die Gleichung der Wasserbilanz $\Delta S = P - (Q_{out} + ET)$ (Goldscheider & Drew 2007), wobei δS die Änderungen im Speichervolumen ist, P der Niederschlag, Q_{out} der Abfluss aus dem System und ET die Evapotranspiration. Über längere Zeiträume kann δS als Null angenommen werden.

Die Idee ist nun, anhand einer Wasserbilanz des Gebietes, die Resultate des KARSYS-Modells bzw. die modellierten Einzugsgebiete zu überprüfen. Wenn die berechnete Wasserbilanz mit den modellierten Einzugsgebieten nicht übereinstimmt, bedeutet dies, dass a) mehr Wasser von einem anderen Gebiet hinzukommen oder, b) dass ein Teil des Wassers aus dem Einzugsgebiet weitere Fliesswege haben muss.

Limitierend für diese Überprüfung ist, dass keine exakten Abflüsse der Quellen bestehen, sondern nur grobe Berechnungen basierend auf Breite, Tiefe und Fliessgeschwindigkeit. Genaue Abflussmessungen hätten jedoch den Rahmen dieser Arbeit gesprengt. Für weitere Unsicherheiten sorgen räumliche Variationen im Niederschlag, in der Evaporation und im Aquifer. Aufgrund dieser

Unsicherheiten soll der Vergleich von Modell und Abflussmessungen nicht absolut, sondern proportional von statten gehen.

Für den proportionalen Vergleich werden die Quellen und Bäche in den Haupteinzugsgebieten vom KARSYS-Modell gruppiert: Furli, Kreuz- & Chäsloch und Töbleren. Das Einzugsgebiet von Laueli wird aus der Analyse der Wasserbilanz ausgeschlossen, da es räumlich nicht klar begrenzt wird im KARSYS-Modell. Es werden für den Vergleich zwei Abflussschätzungen verwendet, eine von E. Fuchs und eine, die auf eigene Beobachtungen basiert. Die Modellabflüsse (berechnete Ressourcen) wurden anhand der modellierten Einzugsgebietsgrößen und modellierten Wasserressourcen aus Malard & Jeannin (2013b) berechnet.

Das Resultat der Berechnung der Abflüsse und deren Proportionen aufgrund der Modellierung nach KARSYS und aufgrund der Schätzungen sind in der Tabelle 3.1 abgebildet.

Tabelle 3.1: Q_m ist der mittlere Abfluss, Q_p ist der prozentuale Anteil am gesamten Abfluss der drei Einzugsgebiete. Die berechneten Ressourcen sind die Abflüsse, welche basierend auf den Einzugsgebieten vom KARSYS-Modell und den modellierten Ressourcen berechnet wurden. Die Schätzungen, welche mit *a* bezeichnet sind, stammen von meinen Beobachtungen im Feld, jene mit der Bezeichnung *b* stammen von den Beobachtungen von Edwin Fuchs

Einzugsgebiet	Fläche [km ²]	Geschätzter Abfluss				Berechnete Ressourcen	
		Q_m [l/s]		Q_p [%]		Q_m [l/s]	Q_p [%]
		a	b	a	b		
Furli	2.2	40	50	30	7	97	23
Chäs- und Kreuzloch	3.8	60	625	50	90	158	37
Töbleren	3.6	20	20	20	3	170	40

Die Schätzungen der Abflüsse (a und b) variieren beim Einzugsgebiet von Kreuzloch und Chäsloch sehr stark (Tabelle 3.1). Bei beiden Schätzungen trägt das Einzugsgebiet von Chäsloch und Kreuzloch jedoch zum meisten Abfluss bei und sollte somit am grössten sein. Basierend auf den Einzugsgebieten des KARSYS-Modells und den Wasserressourcenberechnungen ist das Einzugsgebiet von Chäs- & Kreuzloch vergleichbar mit dem von Töbleren und zusammen machen sie rund 80% des Gesamtabflusses der drei Einzugsgebiete aus. Das Furli Einzugsgebiet trägt nach dem Modell nur zu rund einem Fünftel des Abflusses bei. Bei beiden Schätzungen wird jedoch der Anteil des Furli-Abfluss deutlich grösser geschätzt als Töbleren, wobei Furli zwischen 150 und 250% des Töbleren-Abflusses ausmacht.

Bei der Schätzung wird davon ausgegangen, dass die Gesamtfläche der drei Einzugsgebiete stimmt. Es ist jedoch möglich, dass die Gesamtfläche der drei Einzugsgebiete kleiner oder grösser ist. Zum Beispiel könnte das Einzugsgebiet von Töbleren kleiner sein, weil ein Teil das Laueli speist, oder das Einzugsgebiet vom Kreuzlochbach ist kleiner, weil ein Teil ins Sihltal entwässert. Die Werte können deshalb nur proportional verwendet werden. Zudem könnten die Töbleren Quellen unterschätzt werden, weil sie weniger besucht werden als zum Beispiel die hoch frequentierte Kreuzlochhöhle.

3.3 Forschungsfragen

Die Beobachtungen der Höhlenforscher, das KARSYS-Modell und die Wasserbilanz werfen fragen auf, welche zu meinen Forschungsfragen führen (*kursiv*).

Der modellierte Fliessweg vom Chalberalpetli widerspricht sich mit den Vermutungen von B. Hediger. Die Vermutung einer hydraulischen Verbindung zwischen Chalberalpetli und Kreuzloch wird damit bestärkt, dass das Einzugsgebiet KL nach den geschätzten Wasserbilanzen proportional grösser sein muss als im KARSYS-Modell berechnet.

Wohin fliesst also das Wasser vom Chalberalpetli?

Da das Kreuzloch den längsten erforschten Höhlengang hat und das Riedloch ebenfalls speläologisch untersucht wurde, ist für die beiden Höhlenforschergruppen eine Überprüfung der hydraulischen Verbindungen beider Höhlen besonders interessant.

Besteht eine hydraulische Verbindung zwischen Riedloch und Kreuzloch? Was bedeutet das Resultat für die Höhlenforschung?

Das KARSYS-Modell wirft einige Fragen auf, welche, - neben dem Fliessweg von Chalberalpetli - zu beantworten sind. Je nach dem, können die Einzugsgebiete vom KARSYS-Modell korrigiert werden:

Woher kommt das Wasser von Chäsloch?

Bestätigt sich die Wasserscheide vom KARSYS-Modell bei Wannan sodass das Wasser der westlichen Schwinden nur zu Furli fliesst, oder fliesst es auch zu Kreuzloch?

Welchen Weg nimmt das Wasser von Unterweid? Fliesst es über Norden direkt zu Schachen, wie vom KARSYS-Modell vorausgesagt, oder fliesst es zu Furli, wie vom Gobat & Malard (2013) vermutet?

Die Quellen wurden bis anhin nicht kontinuierlich auf Wassertemperatur, Elektrische Leitfähigkeit und Isotopen untersucht. Eine solche Messreihe würde das Inventar der Quellen ergänzen und kann Hinweise zu Besonderheiten und Eigenschaften der Fliesswege liefern.

Wie verhalten sich die Wassertemperaturen, die EL und die Isotopenzusammensetzung der Quellen saisonal? Gibt es Unterschiede zwischen den Quellen?

Der Grundwasseraufstoss bei Adelmatt Studen ist den Höhlenforschern aufgrund seiner grossen Schüttung und saisonalen Kontinuität aufgefallen. Es besteht die Möglichkeit, dass das Wasser Grundwasser vom Sihltal ist, oder Karstwasser vom westlich gelegenen Stock und Charenstock. Aus diesem Grund soll diese Quelle ebenfalls in die Messreihe aufgenommen werden.

Kapitel 4

Methoden und Feldforschung

Dieses Kapitel widmet sich den Methoden, mit welchen die Forschungsfragen beantwortet werden sollen und dem Beschrieb, wie die Messungen im Feld vollzogen wurden. Im ersten Teil werden die Grundlagen der verwendeten Methoden behandelt. Anschliessend werden die Feldmessungen beschrieben. Der letzte Teil widmet sich der methodischen und analytischen Verarbeitung der erhobenen Daten. Die karsthydrologische Untersuchung umfasst folgende Messungen:

Hydrochemische Untersuchungen

Isotope (Kapitel 4.1.1), Wassertemperatur (Kapitel 4.1.2) und Elektrische Leitfähigkeit (EL)(Kapitel 4.1.3) wurden alle zwei bis drei Wochen gemessen, um das saisonale Muster zu untersuchen. Die Wasserproben für die Isotopenanalyse wurden in 20 ml Glasflaschen mit luftundurchlässigem Plastikverschluss gesammelt. Die Proben wurden bei 4°C in Kühlschränken gelagert. Für die Präparation der Isotopenmessung wurden die Wasserproben gefiltert und in 1 ml Fläschchen gefüllt. Die Isotopenmessung wurden an der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg von Barbara Herbstritt vorgenommen. Die Messungen wurden mit einem Picarro gemacht (Kapitel 4.2).

Färbversuche

Die hydraulischen Verbindungen wurden durch Färbversuche (auch Tracerversuche, Markierungsversuche) ermittelt. Alle Tracer wurden momenteingspiesen. Bei allen Tracerversuchen wurde jeweils nur ein Tracer (Uranin bzw. Salz) injiziert. Grundlagen zu künstlichen Tracern finden sich im Kapitel 4.1.4. Sowohl Uranin als auch Salz wurde in gelöster Form eingespiesen. Das Uranin wurde als eine 40% Lösung injiziert (Ausnahme ester Färbversuch mit 10% Lösung) und das Salz in 25% Lösung. Das heisst, für 120 g Uranin wurden 300 g Lösung und für 5kg Salz 15 Liter Salzwasser eingespiesen. Das Uranin wurde in entionisiertem Wasser gelöst, das Salz wurde in Leitungswasser gelöst. An den Quellen wurde die Konzentration kontinuierlich mit den Fluorometern (Kapitel 4.2) oder mit den EL-Messgeräten aufgezeichnet. Die Grundlagen für die Analyse der Resultate der Markierungsversuche werden im Kapitel 4.1.5 behandelt.

Abflussschätzungen

Kenntnisse über den Abfluss der Quellen waren nötig, um die Abflusskonditionen während den Messungen für spätere Analyse zu kennen, für die Abschätzung der Wasserbilanz und für die Berechnung des Wiedererhalts (Kapitel 4.1.5). Für die Abschätzung/Berechnung des Abflusses

wurde eine möglichst einfache Methode gewählt, welche wenig Material und Aufwand erfordert. Dies war notwendig, weil die Messungen alle zwei bis drei Wochen an jeder Quelle durch Edwin oder mir durchgeführt werden mussten. Für die Abflussberechnung wurde anhand der Bachbreite b [dm] und der durchschnittlichen Tiefe d [dm] die Durchflussfläche geschätzt. Mit einem Grashalm oder Blatt wurde mehrfach gemessen, wie schnell der Strom an den schnellsten Stellen fließt v_{max} [dm/s] (Stöckchenmethode). Für die Abflussberechnung [l/s] wurde anschliessend die halbierte Fließgeschwindigkeit mit der Durchflussfläche multipliziert.

$$Q = b * d * \frac{v_{max}}{2}$$

Diese Methode verlangt wenig Aufwand und nur einen Massstab und eine Stoppuhr als Instrumente. An manchen Quellen (Chäsloch, Krähloch und Kreuzloch) konnte der Abfluss nicht auf diese Weise geschätzt werden, da sich der Strom zwischen Steinen und Felsen verteilt. An solchen Standorten wurde der Abfluss von Auge geschätzt und unter den Anwesenden diskutiert.

4.1 Theoretische Grundlagen der verwendeten Methoden

4.1.1 Isotope und ihre Anwendung in der Karsthydrologie

Grundlagen

Isotope sind Atome des selben Elements, welche jedoch eine andere Anzahl Neutronen besitzen. Dadurch unterscheiden sie sich in ihrer atomaren Masse und somit auch in der Bindungskraft, welche wiederum einen Einfluss auf chemische und physikalische Reaktionen hat (Mazor 1997). Die in der Hydrologie am häufigsten verwendeten stabilen Isotope sind Deuterium (D) und Sauerstoff-18 (^{18}O), welche ein durchschnittliches Vorkommen von 0.015% bzw. 0.2% haben (Leibundgut et al. 2009).

Das Verhältnis der schweren Isotopen zu den leichteren Majoritätsisotopen wird als Promille angegeben und folgendermassen berechnet, wobei als internationaler Standard der VSMOW (Vienna Standard Mean Oceanic Water) verwendet wird (Mazor 1997):

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{\text{Ratio}_{\text{Probe}} - \text{Ratio}_{\text{Standard}}}{\text{Ratio}_{\text{Standard}}} \right] \cdot 1000$$

Das Verhältnis der schweren Isotopen zu den Majoritätsisotopen ^1H und ^{16}O variiert räumlich und zeitlich. Aufgrund ihrer stärkeren atomaren Bindung benötigen die schwereren Isotope Träger bei der Verdunstung mehr Energie, und kondensieren schneller (Mazor 1997). Dies führt zur sogenannten Isotopenfraktionierung, bei welcher sich die prozentuale Häufigkeit der schweren Isotope von einer Phase in die nächste verändert (z.B. Meereswasser und Wasserdampf). Die Effekte der Fraktionierung auf die räumliche und zeitliche Häufigkeit der schweren Isotope können in vier Muster zusammengefasst werden (Mazor 1997):

(1) Das Isotopenverhältnis korreliert mit der Temperatur. Je tiefer die Temperatur, desto geringer der Anteil an den schweren Isotopen D und ^{18}O (Dansgaard 1964). Im Winter und in Polnähe

sind das Wasser deshalb tendenziell leichter.

(2) Die monatliche Niederschlagsmenge korreliert im Sommer der mittleren Breiten negativ mit den $\delta^{18}\text{O}$ und δD Verhältnissen (Dansgaard 1964).

(3) Je weiter die Distanz zum Meer, desto geringer ist der Anteil an schweren Isotopen im Regenwasser in Europa, weil bereits ein Grossteil der schweren Isotopen ausgerechnet wurden (Mazor 1997).

(4) Das Isotopenverhältnis nimmt mit der Höhe graduell ab, wobei die Abnahme in der Schweiz -0.26 Promille δ pro 100 m Höhe beträgt (Siegenthaler & Oeschger (1980) in Mazor (1997)).

Aus dem Verhältnis von $\delta^{18}\text{O}$ und δD im lokalen Niederschlag wird die lokale Meteorische Wasserlinie (LMWL) gebildet. Die gemittelte Globale Meteorische Wasserlinie aus Wasserproben der ganzen Welt ist $\delta\text{D} = 8\delta\text{O} + 10$ (Craig (1961) in Mazor (1997)). Da ^{18}O und D nicht exakt im selben Verhältnis die Phase wechseln, ändert sich die Steigung und die Höhe der LMWL räumlich und kann Hinweise zum Niederschlagsgebiet geben. Der Summand der Gleichung gibt den Deuterium Exzess an, welcher abhängig von der Feuchtigkeit bei der Verdunstung ist. Die Steigung ist abhängig von den Bedingungen während der Kondensation und ist steiler je feuchter und flacher je arider. Die in Clark & Fritz (1997) detailliert beschriebenen Einflüsse auf die Form der MWL sind in Abbildung 4.1 dargestellt.

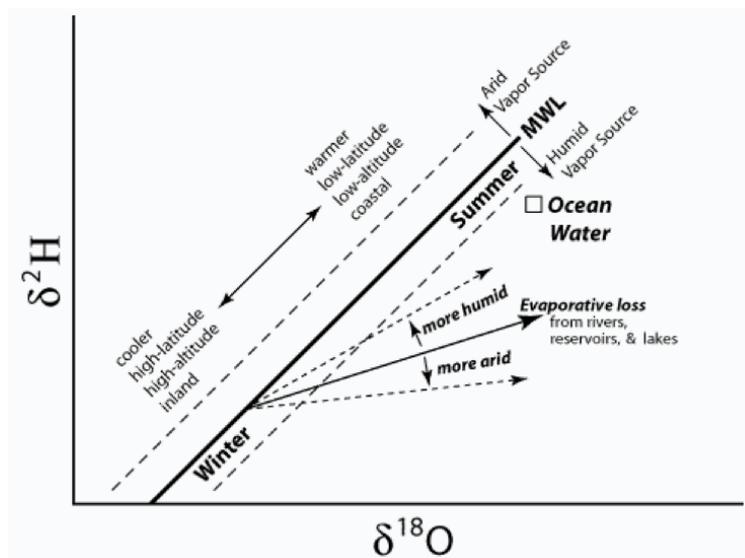


Abbildung 4.1: Zusammenfassung der Einflüsse auf die Form der MWL, erarbeitet durch Clark & Fritz (1997), dargestellt in Sahra (2005)

Interpretationsmöglichkeiten

Die Isotopenverhältnisse von Grundwasser liegen meist leicht unter der LMWL, da durch Evaporation eine weitere Fraktionierung stattgefunden hat (Mazor 1997). Bei Karstquellen liegen die Werte meist nahe der LMWL. Grössere Abweichungen sind vor allem in Gebirgsregionen zu beobachten, wo das Quellwasser von Niederschlag von höheren Lagen stammt als das Wasser für die LMWL (Goldscheider & Drew 2007). Die Streuung von Isotopenverhältnissen ist an den Quellen jedoch geringer als im Niederschlag, da sich das Niederschlagswasser verschiedener Verhältnisse

in den unterirdischen Fließsystemen mischt. Je länger die Residenzzeit, desto grösser die zeitliche Durchmischung und desto kleiner die Varianz der $\delta^{18}\text{O}$ und δD (Goldscheider & Drew 2007). Durch die Untersuchung der stabilen Wasserisotopen können somit Eigenschaften des Fließsystems (z.B. Residenzzeit, Reaktion auf Niederschläge, Jahreszeit der Wasseranreicherung) und des Einzugsgebietes (z.B. Höhe und Niederschlagsregime) ermittelt werden (z.B. Mance et al. (2014) und Einsiedl et al. (2009)). Die möglichen Interpretationen hängen von der Periodizität der Messungen ab.

Unsicherheiten

Da Karstsysteme den Niederschlag relativ weiterleiten, variieren die Wassereigenschaften noch relativ stark an den Quellen. Die Varianz der Eigenschaften ist zwar kleiner als an den Bachschwinden, doch noch immer genug gross, dass eine Messung von einem vorgehenden Ereignis beeinflusst und so nicht dem Durchschnitt einer Zeitperiode entspricht. Diese Unsicherheit besteht auch für die Temperatur und die Elektrische Leitfähigkeit.

Bei dem Sammeln von Proben können Fehler entstehen, wenn viel Wasser verdunstet (Mazor 1997). Dies ist der Fall, wenn die Probeflaschen nicht luftdicht verschlossen sind oder die Probeflasche nur minim mit Wasser gefüllt ist, sodass mehr verdunsten oder kondensieren kann.

Bei kleineren Einzugsgebieten sind die Variationen den $\delta^{18}\text{O}$ und δD grösser als in grossen Einzugsgebieten, wo lokale Variationen durch die grosse Fläche homogenisiert werden (Goldscheider & Drew 2007). Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit ist relativ klein. Die LMWL ist deshalb nur repräsentativ für das entsprechende Jahr.

4.1.2 Wassertemperatur von Quellen

Grundlagen

In der vadosen Zone von Karstaquiferen wird die Wassertemperatur durch die Lufttemperatur bestimmt. Jeannin (1991) zeigt, dass sich nach der Infiltration die Wassertemperatur nach und nach der Lufttemperatur der Höhle angleicht, bis sich nach einigen 100m ein Gleichgewicht einstellt. Die Luftzirkulation in der Höhle spielt dabei eine wichtige Rolle. Nahe der Oberfläche sind die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen noch spürbar (Heterothermische Zone), und wirken tiefer, je stärker die Luftzirkulation ist. Bei geringerer Luftzirkulation ist die Lufttemperatur der Höhle relativ konstant und entspricht ungefähr der mittleren Jahrestemperatur auf derselben Höhe (Homothermische Zone). Der Temperaturgradient in der Höhle entspricht in diesem Fall dem feucht-adiabatischen Temperaturgradienten. Bei geringer Luftzirkulation flacht der Temperaturgradient durch den geothermischen Wärmeaustausch ab (Leutscher & Jeannin 2004). Dies führt dazu, dass die Wassertemperatur von Karstquellen fast der mittleren Jahrestemperatur auf dieser Höhe entspricht und in der Regel leicht tiefer liegt (um 0.15°C) (Jeannin 1991). Die Wassertemperatur an Quellen hängt somit weniger von der Höhe der Infiltration und des Einzugsgebietes ab, sondern eher von der Geometrie des Karstsystems, der Wassermenge und der Abflussgeschwindigkeit.

Das Temperaturequilibrium zwischen Luft und Wasser wird durch hohe Fließgeschwindigkeiten

und grosse Abflussmengen von der Infiltrationsstelle weiter weg verschoben, sodass die Infiltrationstemperatur einen grösseren Einfluss hat. Der geothermische Fluss hat vor allem in den phreatischen, tiefen Zonen des Karstsystems Einfluss auf die Wassertemperatur (Jeannin 1991).

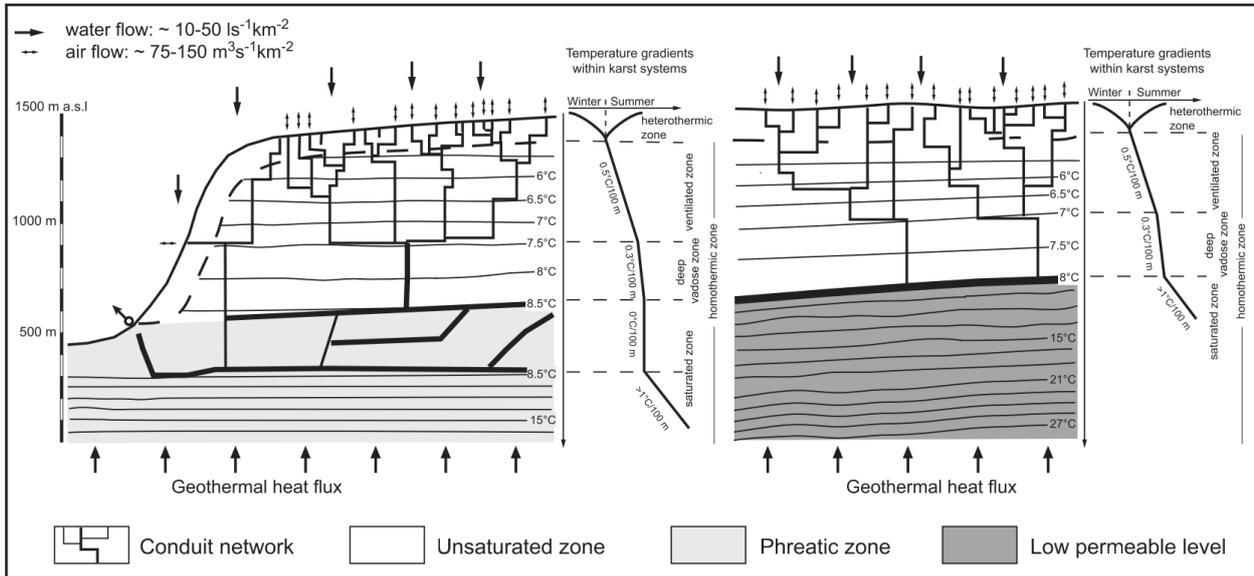


Abbildung 4.2: Temperaturgradienten des Karstwassers über die Tiefe hinweg. In der heterothermen Zone nahe der Oberfläche sind Jahreszeitschwankungen sichtbar. Mit zunehmender Tiefe nehmen die Schwankungen ab, bis die homotherme Zone erreicht wird, wo die Wassertemperatur konstant ist. Ab der phreatischen Zone nimmt die geothermische Erwärmung zu. (Grafik aus Leutscher & Jeannin (2004))

Diese Eigenschaften können den Temperaturanstieg und die anschliessende Abnahme nach einem starken Gewitter erklären. Durch das Hochwasser werden zusätzliche Fliesswege genommen. Es ist denkbar, dass dadurch Wassermassen mobilisiert werden, welche in der phreatischen Zone erwärmt wurden, was zum kurzen Temperaturanstieg führt. Wenn die besagten phreatischen Gänge durchgespült sind, sinkt die Temperatur wieder. Aufgrund des grossen Abflusses wird das Temperaturequilibrium vor der Quelle nicht erreicht, die Temperatur sinkt unter die mittlere Lufttemperatur (wurde z.B. in der Kreuzlochhöhle beobachtet).

Interpretationsmöglichkeiten

Die Höhe des Einzugsgebietes kann nicht mit der Temperatur ermittelt werden. Die Stärke der saisonalen Temperaturschwankungen könne Aussagen zur Luftzirkulation oder zur Oberflächennähe machen. Die Interpretationsmöglichkeiten sind jedoch gering. Kontinuierliche Temperaturmessungen mit kürzeren Zeitintervallen können mehr Informationen zur Geometrie und Reaktion von Karstsystemen liefern. Luhmann et al. (2011) hat verschiedene Gruppen definiert, welche sich durch konkrete Temperaturmuster charakterisieren.

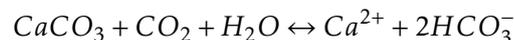
4.1.3 Elektrische Leitfähigkeit des Wassers

Grundlagen

Die Elektrische Leitfähigkeit des Wassers (EL) wird in Mikro-Siemens pro Zentimeter ($\mu\text{S}/\text{cm}$) angegeben und widerspiegelt die Anzahl gelöster Ionen im Wasser. Alternativ kann auch die Masse der gelösten Komponenten in mg/l angegeben werden, wobei 1 mg/l ungefähr $1\mu\text{S}/\text{cm}$ entspricht. Auf dem Fließweg wird das Wasser mit Ionen angereichert, z.B. durch den Kontakt mit dem Gestein oder Landnutzung. Niederschlagswasser hat dementsprechend eine sehr geringe EL. Mazar (1997) legt die typischen Werte für Quellen aus Kalkgestein zwischen 500 und 800 mg/l. Andere Fallbeispiele zeigen jedoch EL zwischen 150 und 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Ozyurt & Bayari (2008), Mohammadi & Field (2009), Ravbar et al. (2011), Hunkeler & Mudry (2007)).

Quellen für Ionen im Wasser Folgende drei Hauptquellen für Ionen in Karstaquiferen können aus Hunkeler & Mudry (2007) entnommen werden: (1) Aus dem Kalkgestein oder dem Dolomit, wo Karstaquifere entstehen können, kann HCO_3^- , Ca^{2+} und Mg^{2+} gelöst werden. (2) Im Kalk oder Dolomit kommen zum Teil Evaporite (Gips, Anhydrit und selten Halit) vor, welche sehr löslich sind und so besonders zur Ionenanreicherung führen. (3) Anthropogene Quellen können lokal und zeitlich zu einer Erhöhung der EL führen. Typische Beispiele sind Dünger, undichte Abwasserleitungen, Salzstreuung auf Strassen im Winter oder Aufschüttungen. Selten wird das Niederschlagswasser direkt durch marine oder anthropogene Aerosole mit Ionen angereichert.

Die Lösung von Ca^{2+} und Mg^{2+} erfolgt mehrheitlich durch gelöstes CO_2 welches durch Wurzelrespiration und Zersetzung von organischem Material durch Mikroorganismen ins Wasser gelangt (Hunkeler & Mudry 2007). Die Reaktion für Ca^{2+} ist in folgender Gleichung (Hunkeler & Mudry 2007) abgebildet und kann in beide Richtungen erfolgen.



In Karstaquiferen wird die Leitfähigkeit durch die Lösung von Kalkmineralien, insbesondere Ca^{2+} , erhöht. Da Ca^{2+} in der Regel stark mit der EL korreliert und die EL einfacher zu messen ist, wird häufig die EL als Parameter für die Lösung von Kalkgestein gemessen Hunkeler & Mudry (2007). EL-Werte an Karstquellen werden in der Regel in Kombination mit anderen Größen verwendet (z.B. Abfluss oder Temperatur) um Aussagen über die Verweilzeit des Wassers im System, der Herkunft von Wasser und der Charakterisierung des Systems und dessen Reservoirs sowie Fließwege zu machen.

Weitere Einflüsse auf die EL

Die EL von Quellwasser hängt nicht nur von den Ionenquellen ab, sondern auch von den herrschenden Bedingungen, welche die Lösung des Gesteins fördern oder hemmen können. Die Verfügbarkeit von CO_2 im Wasser ist Voraussetzung für die oben abgebildete Reaktion. Dabei ist die Konzentration von gelöstem CO_2 (H_2CO_3) im Wasser abhängig von der Aussentemperatur, der Luftzirkulation in den wasserführenden Gängen und dem Austausch zwischen Wasser und Luft. Wenn dem Wasser kein weiteres CO_2 nachgeliefert werden kann, wird ein Equilibrium erreicht und keine Mineralien werden mehr aus dem Gestein gelöst. Bei höheren Umgebungstempera-

turen ist die biologische Aktivität grösser, was zu einer höheren EL führt. Die Löslichkeit von CO_2 korreliert hingegen negativ mit der Wassertemperatur. Bei einem fixen partialen CO_2 -Druck nimmt die Löslichkeit mit zunehmender Wassertemperatur ab (Hunkeler & Mudry 2007). Hohe Aussentemperaturen erhöhen die Lösung von Calcit jedoch in der Regel mehr, als sie durch resultierende höhere Wassertemperaturen reduziert wird (Hunkeler & Mudry 2007). Die Fließgeschwindigkeit und die Fließart (laminar oder turbulent) haben ebenfalls einen Einfluss auf die Lösung der Gesteinsminerale. Je stärker die Durchmischung an den Kontaktflächen, desto besser können Ionen aus dem Gestein gelöst werden (Hunkeler & Mudry 2007). Ebenfalls einen Einfluss auf die EL hat die Abflussmenge (Ford & Williams 2007). Bei einer starken Abflusszunahme und anschließender -abnahme (z.B. ausgelöst durch einen kurzen Starkniederschlag) nimmt die EL mit dem Abfluss zu, erreicht das Maximum aber vor dem Abflussmaximum und sinkt unter die initiale EL ab, um danach langsam wieder anzusteigen.

Unsicherheiten

Mit der EL wird die Ionenzusammensetzung nicht gemessen. Es ist also nicht ersichtlich, ob eine hohe EL durch Ca^{2+} bedingt wird, was mit dem Fließweg zusammenhängt, oder ob die hohe EL durch beispielsweise Düngung ausgelöst wurde. Zudem unterliegt die EL den schnellen Reaktionszeiten von Karstsystemen, sodass kurzzeitig wie bei der Wassertemperatur und bei den Isotopen starke Abweichungen vom Monatsmittel hervorgerufen werden können, insbesondere durch Abflussschwankungen bei Starkniederschlägen.

4.1.4 Künstliche Tracer in der Karsthydrologie

Grundlagen

Tracer oder Markierungsstoffe sind in der Geohydrologie Stoffe oder Wassereigenschaften, welche eingesetzt werden um Informationen über die Wasserwege zu bekommen (Benischke et al. 2007). Sie können künstlich in das Wasser gespiesen werden (z.B. Färbemittel, Salze und Bakterien) oder man kann bereits natürlich vorhandene Umwelttracer verwenden, wie z.B. Umweltisotope, Temperatur, Pflanzensporen, gelöste organische Kohle (DOC) und Umweltchemikalien.

Die wichtigsten künstlichen Grundwassertracer sind Fluoreszenzstoffe, Salze und Partikel, wobei letztere wegen ihrer zeitaufwändigen Analyse eher ungeeignet sind (Benischke et al. 2007). Fluoreszenzstoffe gehören zur wichtigsten Gruppe der Markierungsstoffe (Käss 2004) und haben die Eigenheit, dass sie Lichtwellen in einem bestimmten Spektrum absorbieren und Licht in längeren Wellenlängen emittieren (Benischke et al. 2007). In ihren Eigenschaften kommen sie einem idealem Tracer am nächsten. Ein idealer Tracer ist charakterisiert durch hohe Wasserlöslichkeit, keinem natürlichen Vorkommen, Unsichtbarkeit, Nicht-Toxizität, einfacher Handhabung, Reaktionslosigkeit mit anderen Stoffen, gute Messbarkeit bei tiefen Konzentrationen und Preiswertigkeit (Käss 2004). Für die hier beschriebenen Markierungsversuche wurde Uranin und Salz verwendet. Beide Stoffe werden weiter unten beschrieben.

Uranin

Uranin, auch Natriumfluoreszein oder Natriumsalz genannt, ist der am stärksten fluoreszierender Tracer. Sein Absorptionsmaximum liegt bei 491 nm, ein Nebenmaximum liegt bei 322 nm. Das Fluoreszenzmaximum liegt bei 512 nm (Käss 2004). In Reinform ist Uranin fest und besteht aus dunkelroten Kristallen. Als konzentrierte Lösung von 600 bis 1g pro Liter ist Uranin ebenfalls dunkelrot und von einer öligen Konsistenz (Benischke et al. 2007). Im dunkelrotem Zustand ist Uranin nicht fluoreszierend. Bei stärkerer Verdünnung mit Wasser erfolgt eine Dissoziation in Natrium- und Uraninionen, wobei letztere fluoreszierend sind. Die Lösung wechselt von dunkelroter Farbe zu hellgrün (Käss 2004).

Uranin ist aufgrund seiner Eigenschaften ein oft verwendeter Tracer in der Grundwasserhydrologie. Die Nachweisgrenze von Uranin ist sehr tief und liegt unter idealen Bedingungen bei 0.002 $\mu\text{g/l}$. Dadurch sind geringe Injektionsmengen und Messungen unter der Sichtbarkeitsgrenze möglich. Eine weitere positive Eigenschaft ist die geringe Sorptionsneigung und der relativ niedrige Preis (Käss 2004).

Die Fluoreszenz von Uranin nimmt nach der Dissoziation mit der Konzentration linear ab. Es gibt jedoch weitere Faktoren, welche die Fluoreszenz beeinträchtigen. Uranin ist pH empfindlich. Oberhalb von 8.5 pH wird die maximale Fluoreszenz erreicht. Darunter nimmt die Fluoreszenz exponential ab. Bei pH 7 beträgt die Fluoreszenz nur noch 80%, bei pH 7 nur noch 60% des Maximalwertes. Diese Fluoreszenzreduktion ist bis zu einem pH von 5.5 reversibel, sodass bei einer Erhöhung des pH auch die Fluoreszenz wieder zunimmt. Unterhalb eines pH von 5.5 nimmt die Sorption von Uranin zu, da es zu einer Änderung der Molekülstruktur kommt (Käss 2004).

Uranin wird durch Licht abgebaut. Von einer Nutzung bei der Untersuchung von Fließwegen, welche länger als 30 min exponiert sind, wird deshalb abgeraten (Wernli 2011). Oxidationsmittel wie Chlor oder Ozon, welche häufig bei der Trinkwasseraufbereitung verwendet werden, zerstören Uranin (Käss 2004). Eine besondere Unsicherheit bei Fluoreszenzmessungen können organische Abfälle bilden. Fulvosäuren, welche bei der Zersetzung pflanzlicher Materialien entstehen, fluoreszieren zwischen 390 und 430 nm (Baker & Genty 1999) und überschneiden sich knapp mit dem Fluoreszenzspektrum von Uranin. Fulvosäure kommt erhöht in Gülle und Viehmist vor (Baker 2001).

Salz (NaCl)

Salz, insbesondere Natriumchlorid wurde früher häufig als Tracer eingesetzt, da es relativ konservativ, einfach zu besorgen und sehr günstig ist (Benischke et al. 2007). Nachteile sind die Grundkonzentration, welche natürlich im Wasser vorkommt und eine hohe Nachweisgrenze bei 0.1 $\mu\text{g/l}$. Dies zwingt zu höheren Injektionsmengen, welche ab einem gewissen Mass umweltbelastend sein können (Benischke et al. 2007). Salzlösung haben eine höhere Dichte als reines Wasser. Durch den Dichteunterschied kann es zum Absinken der Salzlösung kommen, was zu einer längeren Fließzeit führt. Weitere Schwächen dieses Tracers sind sein Hang zu Ionenaustausch und Adsorption. Beide Prozesse betreffen besonders das Natrium Kation und nehmen mit organischem Material und mit Kontaktfläche zu. In einem Karstaquifer wird das Natrium langsamer reduziert als in einem Porengrundwasser (Käss 2004). Wernli (2011) empfiehlt die Verwendung von Salztracern

bei kleinen Abflüssen ($< 3\text{m}^3/\text{s}$), kurzen Distanzen ($< 200\text{m}$) und durchlässigen Aquiferen ($k_f > 10^{-2}\text{m/s}$).

4.1.5 Auswertung von Markierungsversuchen

Grundlagen zum Stofftransport

Der Transport von Markierungsstoffen im Wasser wird mit der Konvektion und der Dispersion beschrieben. Bei einem idealen Tracer wird angenommen, dass er im Wasser schwebt (sich in Konvektion befindet) und vollständig durch das Wasser mitgeführt wird (Werner 1997). Bei der Dispersion werden aufgrund von Geschwindigkeitsunterschieden beim Transportprozess die Wassermassen (Schulz 2004) und im Falle eines Färbeversuches die verschiedenen Konzentrationen vermischt. Geschwindigkeitsunterschiede resultieren zum Beispiel auf unebenen Fließuntergrund oder unterschiedlichen Breiten des wasserführenden Ganges.

Die Dispersion wird dreidimensional durch den transversalen, den longitudinalen und den vertikalen Dispersionskoeffizient beschrieben. Alle Dispersionskoeffizienten D bildet sich aus $D = \alpha * v_a$ mit der entsprechenden Richtung, wobei α die Dispersivität und v_a die Abstandsgeschwindigkeit des Wassers ist. Die Konzentrationskurve wird somit mit zunehmender Fließgeschwindigkeit und -distanz flacher (Schulz 2004).

Die Dispersivität α_L nimmt mit der Fließdistanz zu und widerspiegelt die Heterogenität des Grundwasserleiters (Schulz 2004). Je länger der Fließweg und je turbulenter der Strom, desto grösser wird die Dispersion und desto flacher wird die Durchgangskurve. Die Dispersion und die Dispersivität sind richtungsabhängig und sind grösser in Richtung der Wasserströmung (Schulz 2004).

Die Dispersions-Konvektionsgleichung beschreibt mit der dreidimensionalen Konvektion und der Abstandsgeschwindigkeit die Konzentration in Abhängigkeit zur Zeit (Bear (1972) in Schulz (2004)) und dient als Grundlage für die analytische Auswertung von Durchgangskurven:

$$\frac{\delta C}{\delta t} = D_x \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} + D_y \frac{\delta^2 C}{\delta y^2} + D_z \frac{\delta^2 C}{\delta z^2} - v \frac{\delta C}{\delta x}$$

wobei:

C	Tracerkonzentration
$D_{x,y,z}$	Longitudinale, transversale und vertikale Dispersion
v	mittlere Abstandsgeschwindigkeit
x, y, z	Ortsvariable
t	Zeitvariable

Form und Grössen einer Durchgangskurve

Die Durchgangskurve stellt Konzentration in Relation zur Zeit dar. Aufgrund der Dispersion auf dem Fließweg gleicht eine ideale Durchgangskurve der Gaussischen Normalverteilung. Die Durchgangskurve ist jedoch leicht asymmetrisch, denn die Abnahme erfolgt langsamer als die Zunahme. Der Grund dafür ist, dass zum Zeitpunkt, an dem die ersten Tracer-Spuren den Messpunkt erreichen, die Dispersion kleiner ist als zu späteren Zeitpunkten, zum Beispiel gleich nach dem Erreichen des Konzentrationsmaximums (Schulz 2004).

Die am einfachsten zu ermittelnden Grössen der Durchgangskurven sind die Fließzeit und die Abstandsgeschwindigkeit. Es werden verschiedene Fließzeiten aus der Durchgangskurve entnommen. Schulz (2004) unterscheidet folgende vier Fließzeiten (Abbildung 4.3):

- Die kürzeste Fließzeit t_{max} , welche aus der maximalen Fließgeschwindigkeit bestimmt wird. Sie entspricht der Zeitspanne zwischen der Injektion des Tracers und der erstmaligen Erkennung des Tracers am Messpunkt.
- Die dominierende Fließzeit t_{dom} : Sie entspricht der Zeit nach der Injektion, bei welcher am Messstandort das Konzentrationsmaximum (auch Peak genannt) erreicht wird.
- Die mediane Fließzeit t_{med} , welche der Zeit entspricht, bei der 50% der gesamthaft zurückgewonnenen Tracermenge die Messstelle passiert hat.
- Die mittlere Fließzeit t_w : Sie ist die Zeit, welche für die Berechnung der Abstandsgeschwindigkeit v_m verwendet wird. Diese Geschwindigkeit kann nicht direkt aus der Durchgangskurve gelesen werden, sondern wird z.B. durch analytische Analyse (Siehe Abschnitt zum Dispersionsmodell in Kapitel 4.1.5) ermittelt. Die t_w liegt zwischen t_{dom} und t_{med} , meistens im mittleren Bereich.

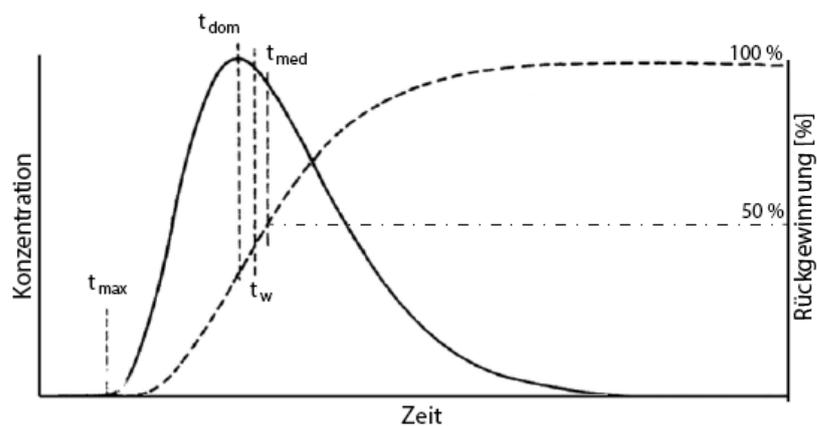


Abbildung 4.3: Tracerdurchgangskurve und Rückgewinnungskurve (gestrichelt) mit den verschiedenen Fließzeiten (modifiziert übernommen aus Schulz (2004)).

Je schmaler die Durchgangskurve, desto enger liegen die fließgeschwindigkeiten beieinander. Bei einem Tailing wird die mediane Fließzeit nach hinten verschoben, weshalb die mittlere Fließzeit nicht mehr gemäss Faustregel zwischen t_{dom} und t_{med} gesetzt werden kann. Da in der Regel die

karstischen Fließwege nicht begehbar sind, ist die Fließstrecke eine unbekannte Grösse. Die effektiven Fließgeschwindigkeiten können somit nicht berechnet werden. Als Ersatz dient die Abstandsgeschwindigkeit v_m , welche aus der Luftdistanz berechnet wird.

Die mittlere Fließzeit ist abhängig von der hydraulischen Leitfähigkeit k_f [m/s]:

$$k_f = \frac{v_w \cdot n_{eff}}{J}$$

wobei n_{eff} das durchflusswirksame Porenvolumen ist und J der Hydraulische Gradient, beide sind dimensionslos (Wernli (2011), 10.3, 12.7). Die hydraulische Leitfähigkeit ist neben der Dispersivität die wichtigste Aquiferkonstante, mit welcher der Fließweg charakterisiert wird ((Wernli 2011) 10.4)

Der Wiedererhalt (auch Recovery oder Rückgewinnungsrate) gibt an, welche Menge des eingespierten Tracers durch die Messstelle fließt. Für die Berechnung des Wiedererhalts werden die kontinuierlichen Konzentrationsmessungen des Tracers und die Abflussrate verwendet. Der Wiedererhalt kann als absolute Masse oder in Prozent angegeben werden (Schulz 2004). Ein Wiedererhalt von 50% kann als hoch erachtet werden. Drei Ursachen können für einen tieferen Wiedererhalt angenommen werden, abgesehen von Rechnungsfehlern. Eine Ursache ist der Tracer, der nicht ideal ist und so abgebaut oder durch Sorption reduziert wird. Des Weiteren können Fehler bei der Injektion dazu führen, dass nicht die ganze Tracermenge in den Abfluss kommt. Zum Schluss kann ein Teil des markierten Wassers auch einen anderen Weg nehmen und nicht durch die Messstelle fließen (Schudel et al. 2002).

Bei der Auswertung der Durchgangskurve können Schwierigkeiten entstehen, wenn die gemessenen Durchgangskurve nicht der in Abbildung 4.3 dargestellte Durchgangskurve entspricht. Aufgrund der schnellen Reaktionszeit und den damit verbundenen variablen Fließwegen, kann die Durchgangskurve einen irregulären Verlauf nehmen, mehrere Peaks beinhalten und/oder einen langgezogenen Konzentrationsabbau (sogenanntes Tailing) haben (Werner 1997).

Es gibt verschiedene Gründe für ein Tailing. Durch Fehler während der Injektion kann der Tracer bei der Injektionsstelle länger verweilen und nur langsam abfließen. Dadurch wird die Durchgangskurve in die Länge gezogen. Es ist auch möglich, dass die Ursache in den Tracereigenschaften liegt und der Tracer zuerst sorbiert wird und später durch Desorption wieder mobilisiert wird. Durch eine Überlagerung mehrerer Durchgangskurven kann ebenfalls ein Tailing entstehen. Dies ist der Fall, wenn es einen oder mehrere Fließwege mit unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten zwischen Eingabe- und Messstelle gibt. Zudem können Pools und turbulente Strömungen in Karstaquiferen ebenfalls zu einer Verlangsamung der Konzentrationsabnahme führen (Schulz 2004).

Eine Durchgangskurve mit mehreren Peaks kann durch mehrere Fließwege mit unterschiedlichen Abstandsgeschwindigkeiten oder durch unregelmässigen Abfluss entstehen (Schulz 2004). Letzteres kann zum Beispiel vorkommen, wenn während der Injektion der Abfluss abnimmt. Dadurch können Teile des Tracers in Becken geraten, wo sie mit dem sinkenden Abfluss nicht mitgeführt werden. Wenn der Abfluss aufgrund eines Niederschlagsereignisses wieder steigt, werden

diese Tracermassen wieder mobilisiert und zur Messstelle geschwemmt, was zu einem erneuten Konzentrationspeak führt.

Analytische Auswertung von Durchgangskurven

Mathematische Auswertungen von Durchgangskurven basieren auf der Dispersions-Konvektionsgleichung von Bear (1972). Die dreidimensionale Transportgleichung kann dabei auf eine oder zwei Dimensionen reduziert werden. In einem Karstaquifer eignet sich eine eindimensionale Lösung (sogenanntes Dispersions-Modell), da das Wasser entlang von Klüften und Gängen fließt, wodurch transversale und vertikale Dispersion vernachlässigbar sind (Werner 1997).

Dispersions-Modell (DM)

Ein DM erklärt die Durchgangskurve als Polynomialkurve, welche eine Funktion der Dispersion und der Fließgeschwindigkeit ist. Es gibt vier verschiedene Varianten von DM (Kreft & Zuber (1978) in Werner (1997)). Die Randbedingungen und Unbekannte variieren je nach Variante. Für die analytische Auswertung wird der Verlauf der gemessenen Durchgangskurve mit der Polynomialkurve approximiert, indem die Fließparameter (Dispersion und Fließgeschwindigkeit) angepasst werden. Für Karstaquifere eignet sich am besten folgende Variante (Werner (1997), Schulz (2004) und Benischke et al. (2007)):

$$C(x, t) = \frac{M}{Qt_0 \sqrt{4\Pi P_D \left(\frac{t}{t_0}\right)^3}} \exp\left[-\frac{\left(1 - \frac{t}{t_0}\right)^2}{4P_D \frac{t}{t_0}}\right]$$

wobei:

C Tracerkonzentration im Wasser [$\mu\text{g/l}$]

M Masse des Tracers [mg]

Q Abfluss [m^3/s]

t_0 mittlere Durchflusszeit [s]

P_D Dispersionsparameter $P_D = \frac{D_L}{v \cdot x}$

Die Fitparameter dieses DM sind t_0 und P_D . Die restlichen Größen müssen bekannt sein. Bei der Anwendung des DM wird davon ausgegangen, dass der Fließweg homogen und isotroph ist. Dies ist in der Praxis jedoch selten der Fall. Das DM stimmt in der Form nicht immer mit der gemessenen Durchgangskurve überein. Die häufigsten Ursachen dafür sind Tailing und mehrere Peaks. Wenn die Möglichkeit besteht, dass die gemessene Anomalie durch verschiedene Fließwege erzeugt wurde, kann das Multi-Dispersions-Modell für die Analyse verwendet werden.

Multi-Dispersions-Modell (MDM)

Das MDM stellt im Grunde eine Überlagerung zweier oder mehrerer DM dar. Es wird verwendet, wenn eine Durchgangskurve mehrere Peaks hat und davon ausgegangen werden kann, dass diese durch verschiedene Fließwege mit verschiedenen Abstandsgeschwindigkeiten zwischen Injektion und Messstelle entstehen. Das MDM wurde erstmals von Maloszewski et al. (1992) erfolgreich

angewendet (Schulz 2004). Bei der Anwendung des MDM wird angenommen, dass sich die verschiedenen Fließwege gleich nach der Injektionsstelle trennen und erst knapp vor der Messstelle zusammenfließen. Die Fließwege sind dabei komplett voneinander isoliert (Maloszewski et al. (1992) in Werner (1997)).

4.2 Instrumente

Es kamen vier verschiedene Messgeräte bei dieser Arbeit zum Einsatz (Tabelle 4.1). Für die Temperatur- und EL-Messungen des Wassers an den Quellen wurden zwei Geräte der WTW Manufaktur verwendet: der Cond 3310 mit dem Sensor TetraCon 325 und der Multi 3420 mit dem Sensor TetraCon 925 (WTW 2012). Der Multi 3420 wurde zudem bei einem Markierungsversuch mit Salz verwendet. Beide Sensoren messen nur Temperatur und EL. Beide Messgeräte können kontinuierliche Messungen machen und speichern. Für die Markierungsversuche mit Uranin kamen vier Durchfluss-Feld-Fluorometer (kurz Fluorometer) zum Einsatz mit den Seriennummern 514, 702, 707 und 709. Die Messgenauigkeit der Fluorometer hängt stark von der Kalibrierung ab. Um eine Genauigkeit von 2% zu erreichen muss der Fluorometer kurz vor der Messung mit demselben Tracer, demselben Wasser und derselben Wassertemperatur kalibriert werden wie an der Messstelle vorhanden. Ansonsten kann die gemessene Konzentration bis zu 20% vom Realwert abweichen (P.-A. Schnegg). Die Messungen der Fluorometer werden mit dem Computer Programm FLUO eingelesen. Dieses Programm wird auch für die Kalibrierung und das direkte Ablesen während der Messungen verwendet. Die Fluorometer können drei verschiedene Tracer gleichzeitig in situ messen. Ursprünglich sind dafür die Tracer Uranin, Rhodamin und Tinopal gedacht. Variationen sind jedoch möglich. Daneben werden Temperatur und Trübung gemessen, da beide einen Einfluss auf die Konzentrationsmessung haben. Die Konzentration wird nicht direkt gemessen, sondern die Reflektion in mV. Das Verhältnis zwischen mV und Konzentration wird bei der Kalibrierung berechnet. Die Isotopen wurden mit einem Picarro L2130-i an der Universität Freiburg gemessen. Diese Messungen wurden durch eine externe Person durchgeführt.

Tabelle 4.1: Überblick verwendeter Messinstrumenten (WTW (2012), Picarro (2012) und Schnegg & Doerfliger (1997))

Variable	Messgerät (Sensor)	Manufaktur	Messbereich	Genauigkeit
$\mu\text{S}/\text{cm}$	Cond 3310	WTW Germany	10 bis 10^6	$\pm 0.5\%$
$^{\circ}\text{C}$	(TetraCon 325)		-5 bis 100	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
$\mu\text{S}/\text{cm}$	Multi 3420	WTW Germany	10 bis $2 \cdot 10^6$	$\pm 0.5\%$
$^{\circ}\text{C}$	(TetraCon 925)		0 bis 100	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$
mV	GGUN FL30	Albilla	0 bis 2842 mV	2-20%
$^{\circ}\text{C}$	Fluorometer	Neuchatel		0.01 K
$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	Picarro L2130-i	Picarro	ab 0.05 ‰	$\pm 0.16 \text{‰}$
$\delta\text{D}\text{‰}$	(CRDS)		ab 0.3 ‰	$\pm 0.6 \text{‰}$

4.3 Feldzugang

In diesem Unterkapitel wird geschildert, wie die regelmässigen Messungen und die Markierungsversuche abliefen und aus welchem Grund sie so durchgeführt wurden.

4.3.1 Regelmässige Wassermessungen

Die regelmässigen Untersuchungen starteten Mitte Juni 2014 und wurden bis Ende März 2015 durchgeführt (Abbildung 4.4). Insgesamt wurden an 21 Daten die Wassertemperatur, die EL und der Isotopengehalt gemessen. An manchen Tagen konnte nicht an allen Quellen gemessen werden. In diesen Fällen wurden die Messungen über zwei Tage verteilt. Für die Aufzeichnung wurde dann jenes Datum für die Messungen verwendet, an dem mehr Quellen gemessen wurden. Im Verlauf der Messungen wurden die Messstellen, Messverfahren und Messgeräte verändert und verbessert. Die ersten Messungen wurden ausschliesslich durch Edwin Fuchs durchgeführt. Ab September konnten die Untersuchungen mit den Markierungsversuchen kombiniert werden und wurden deshalb auch von anderen HGY-Mitglieder und mir durchgeführt. Die darauf folgenden Messungen im Herbst und Winter wurden zwischen Edwin Fuchs und mir aufgeteilt.

Die Auswahl der zu messenden Quellen wurde vor Arbeitsbeginn Anfangs 2014 innerhalb der HGY und OGH bestimmt. Die gewählten Quellen sind diejenigen, welche die angenommene grösste und wichtigste Schüttung haben.

Es wurde versucht, die Messungen so nahe wie möglich an den Quellen zu machen, um äussere Einflüsse zu reduzieren. Bei den Quellen Furli und Kreuzloch ist dies jedoch mit grösserer Anstrengung verbunden, weshalb hier z.T. auch tiefer gelegene Messstandorte gewählt wurde (siehe Kapitel 2.4.2). Bei Schachen und bei Studen wurden Temperatur und EL möglichst oberhalb der Stellen gemessen, wo das Wasser aus dem Boden aufsteigt. Der Abfluss wurde bei Schachen an einer Stelle gemessen, wo noch nicht alle Nebenquellen zusammengefloßen sind, sondern wo erst der Abfluss der sonst gemessenen Nebenquelle gemessen wurde (Abbildung 4.5).

Bei Furli wurden nie direkt am Höhlenausgang gemessen. Zu Beginn fanden die Messungen beim äusseren Trog der Scheune von Furli statt. Der Bauer von Furli bezieht sein Wasser über Rohre direkt aus der Furliquelle. Um externe Einflüsse auf die Wassertemperatur zu verringern, wurde jedes Mal vor der Messung der Hahnen ganz geöffnet, um das Wasser schneller durchfliessen zu lassen. Dies stellte jedoch kein Garant für unveränderte Temperaturen dar. Zudem wurde nachträglich ein Partikelfilter entdeckt, der ebenfalls Einfluss auf die Proben haben könnte. Der Messstandort wurde deshalb im Oktober 2014 zu FUR verschoben.

Das Kreuzlochwasser wurde an drei verschiedenen Orten gemessen (siehe Kapitel 2.4.2). Die ersten Messungen bis Mitte September wurden ausschliesslich bei KLB vorgenommen. Danach folgten auch Messungen in KLH und bei KLBS. Bei KLH wurde das Wasser im ersten See des Höhlenganges gemessen, bei KLBS wurde jeweils im zweiten oder dritten Behälter gemessen. Beim Chäsloch wurde einige wenige Meter unterhalb der Austrittsstelle gemessen (4-10 m), möglichst nahe an der Quelle und so, dass man beim Messen nicht nass wurde. Dabei wurde darauf geachtet, dass an Stellen gemessen wurde, wo das Wasser konstant floss und keine Luftbläschen

Datum	Schachen	Furli		Kreuzloch			Chäsloch	Lauele	Studen
		Furli B	Furli R	KL B	KL H	KL BS			
22.12.13							I		
05.01.14					I				
26.04.14	I							I	
30.04.14							I		
16.05.14	I	I		I			I	I	I
31.05.14	I	I		I			I	I	I
12.06.14	TLI	TLI		TLI			TLI	TLI	TLI
26.06.14	TLI	TLI		TLI			TLI	TLI	TLI
12.07.14	TLI	TLI		TLI			TLI	TLI	TLI
01.08.14	TLI	TLI		TLI			TLI	TLI	TLI
14.08.14	TLI	TLI		TLI			TLI	TLI	TLI
28.08.14	TLI	TLI		TLI			TLI	TLI	TLI
07.09.14	TLI	TLI		TLI			TLI	TLI	TLI
13.09.14	TLI	TLI		TLI	TLI				
03.10.14	TLI		TLI	TLI	TLI		TLI	TLI	TLI
10.10.14	TLI		TLI	TLI	TLI		TLI	TLI	
17.10.14	TLI				TLI	TLI		TLI	
23.10.14						TLI		TLI	
08.11.14	TLI		TLI	TLI			TLI	TLI	
14.11.14									TLI
22.11.14	TLI		TLI	TLI	TLI	TLI	TLI	TLI	
18.12.14	TLI		TLI	TLI	TLI		TLI	TLI	TLI
18.01.15	TLI	TLI		TLI	TLI			TLI	TLI
29.01.15	TLI	TLI			TLI	TLI	I	TLI	TLI
21.02.15	TLI		TLI	TLI	TLI	TLI	TLI	TLI	TLI
09.03.15	TLI		TLI	TLI	TLI	TLI	TLI	TLI	TLI
23.03.15	TLI		TLI	TLI	TLI	TLI	TLI	TLI	TLI

Abbildung 4.4: Messungen von Wassertemperatur (T), Elektrische Leitfähigkeit (L) und Isotopen (I) an den Quellen.

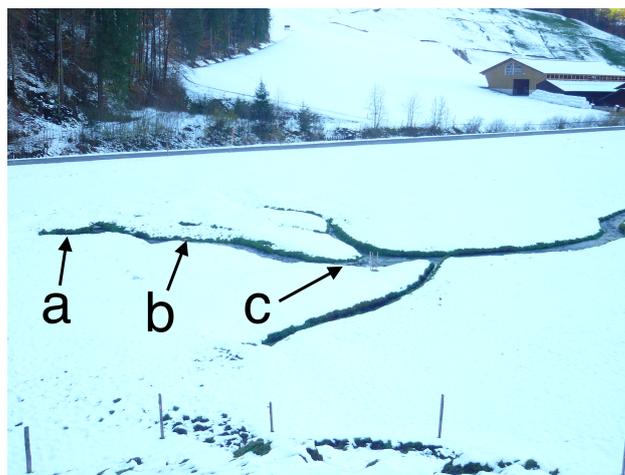


Abbildung 4.5: Quelle bei Schachen mit den verschiedenen Unterquellen. Die Messungen wurden nur an einer der Unterquellen durchgeführt. An Standort a wurden Temperatur, EL und Wasserproben entnommen, bei Standort b wurde der Abfluss geschätzt und bei Standort c wurde der Fluorometer installiert.

hatte. Das Wasser der Laueli Quelle konnte gleich an der Quelle gemessen werden. Für die Messungen wurde der Sensor zwischen die Steine gehalten, aus denen das Wasser tritt. Bei MS CH wurde Niederschlagswasser für die Isotopenanalyse vom Totalisator (Niederschlagssammler und -messer) entnommen. Diese Proben wurden weniger regelmässig gesammelt. Zwischen den Messungen verstrichen häufig mehr als zwei Wochen. Im Dezember verschwand das Sammelbecken, weshalb zwei mal Schnee bei der Messstation für Niederschlagsproben verwendet wurden. Aufgrund der längeren Zeiten zwischen Niederschlag und Probenahme wurde das Isotopenverhältnis des Niederschlages wahrscheinlich leicht verfälscht.

4.3.2 Färbversuche & Salzversuche

Die Markierungsversuche wurden erst im September begonnen, um Sommergewitter möglichst zu meiden, da bei einem Gewitter ein schneller Abflussanstieg die Fluorometer beschädigen könnte. Insgesamt wurden sechs Markierungsversuche mit Uranin durchgeführt, fünf davon im Herbst 2014 und einer im Winter 2015. Zudem wurden im März 2015 zwei Markierungsversuche mit Salz auf kurze Distanz gemacht. Anders als die Markierungsversuche mit Uranin, beschränkten sich die Salzversuche auf ein Gebiet im Tal, unterhalb des Felsbandes. Die Tracer wurden bei allen Markierungsversuchen in Fliessgewässer eingespiessen und mussten deshalb nie mit zusätzlichem Wasser heruntergespült werden. Bei den Versuchen mit Uranin dauerte es jedoch jeweils fast 15 min, bis der Tracer sichtbar von der Injektionsstelle weggespült war. Die Markierungsversuche sind nach Nummer des Markierungsversuches und Kürzel der Injektionsstelle benannt (Tabelle 4.2). Der erste Markierungsversuch mit der Injektionsstelle Riedloch heisst z.B. 1-RL.

Färbversuche 1-RL, 2-RL und 6-RL

Ziel der drei Färbversuche vom Riedloch in Hinterhofen war, die von HGY und OGH vermutete hydraulische Verbindung zu prüfen. Die Injektion in das Riedloch erfolgte gleich unterhalb der Stelle, wo die Bächlein von Hinterhofen zusammenfliessen und leicht oberhalb der Bachschwinde (Abbildung 4.6). Beim ersten Versuch wurden nur zwei Fluorometer installiert, bei KLH und im Kreuzloch Tobel. Beim zweiten Versuch kamen zwei weitere Fluorometer hinzu und damit die Standorte Chäsloch und Furli. Der Fluorometer bei Chäsloch wurde installiert, um die These - eine Diffluenz vom Kreuzlochhöhlenbach speise das Chäsloch - überprüfen zu können. Bei Furli wurde ein Fluorometer installiert um sicher zu gehen, dass das Wasser nicht in diese Richtung fliesst. Beim Versuch 6-RL konnten nur drei Fluorometer eingesetzt werden, da beim Fluorometer 901 der Mikrocontroller beschädigt war. Um bei Kreuzloch sicher eine fehlerfreie Messung zu haben, wurde Fluorometer bei KLH und bei KLBS installiert. Am Chäsloch wurde auf Grund von Eisschlaggefahr auf eine Fluorometerinstallation verzichtet. Der Fluorometer von Schachen wurde unter der Annahme installiert, dass Schachen Wasser aus der Waag hat. Die Messung von Schachen würde so alle Quellen des oberen Waagtals zusammenfassen.

Bei der ersten Färbung im September wurden 6g Uranin eingespiessen. Diese Menge wurde nach der Prüfung verschiedener Mengenermittlungsmethoden bestimmt (Käss (2004), Worthington & Smart (2003) und Field (2003)). Für die nachfolgenden Versuche wurde diese Menge verzwan-

Tabelle 4.2: Übersicht der Tracerversuche. Die Messzeit ist die verstrichene Zeit zwischen Injektion und Ausschalten des Fluorometers. Bei den Messgeräten sind die Fluorometer nur mit ihrer Seriennummer vermerkt. Die ID ist der Name des Markierungsversuches, welcher in den Resultate und der Diskussion weiterverwendet werden.

ID	Datum Zeit	Injektionsstelle (m.ü.M.)	Markierstoff Menge	Messstelle	Messgerät	Messzeit
1-RL	06.09.14	Riedloch (1746)	Uranin 6g	KLH	901	13h
	07:31			Sattlerbach	514	13h
2-RL	20.09.14 07:35	Riedloch (1746)	Uranin 120g	Schachen	901	ca. 29
				Furli Tobel	907	ca. 29h
				KLH	902	ca. 26h
				Chäsloch	514	26h
3-Wa	03.10.14 08:08	Wannen (1700)	Uranin 120g	Schachen	907	3d 15h
				Furli R	902	3d 9h
				KLH	514	1d 5h
4-UW	10.10.14 15:00	Unterweid (1530)	Uranin 120g	Schachen	907	5d 1h
				Furli	902	5d 2h
				Alt Stafel	514	6d
5-CA	16.10.14 15:00	Chalberalpele (1825)	Uranin 120g	XL-BS	514	6d 22h
				Krähloch	907	6d 19h
				Lauele	901, 902	6d 19h
6-RL	26.01.15 10:20	Riedloch (1746)	Uranin 160g	Schachen	902	9d 23h
				KLH	514	10d 1h
				KLBS	907	10d 6h
7-KL	09.02.15 09:45	KLH See (1370)	NaCl 5 kg	KLBS	Multi 3420	8h
8-KL	23.02.15 08:35	KLH Unterabfluss (1370)	NaCl 7.2 kg	KLBS	Multi 3420	8h



Abbildung 4.6: a) Wasserfall von Riedloch mit Uranin gefärbt (2-RL). b) Injektion bei Riedloch mit Uranin (2-RL). c) Fluorometerinstallation bei Krähloch. d) Fluorometerinstallation bei FUR. e) Fluorometer im ersten See der Kreuzlochhöhle, über dem Seeabfluss und Drucklogger. f) Brunnen bei Furli mit gefärbtem Wasser (3-WA).

zigfacht bzw. für den Versuch 6-RL sogar weiter erhöht, um eine schwache Verbindung besser messen zu können.

Bei den Versuchen 1-RL und 2-RL ist die Messzeit an den Quellen nach der Injektion mit 13h und knapp 30h relativ kurz. Die Messzeiten wurden an angenommene Fliesszeiten angepasst. Diese wiederum basieren auf Messungen der Wassertemperatur, welche mit den Sensoren im Riedloch und in KLH gemacht wurden. Diese zeigen einen zeitlichen Verzug der Wassertemperatur auf ein Niederschlagsereignis von rund 5 h bei KLH. Diese Messungen wurden im Rahmen des Karsthydrologieprojektes gemacht. Bei der Messung 6-RL wurde die Messzeit auf über sechs Tage verlängert. Der Abfluss beim Riedloch war bei allen Versuchen relativ gering. Beim ersten Versuch wurde der Abfluss auf rund 2 l/s geschätzt, beim zweiten Versuch wurde der Abfluss auf 1.5 l/s geschätzt. Der dritte Versuch fand Ende Januar statt. Zu diesem Zeitpunkt lag die Bachschwinde unter einer Schneedecke von rund 1.5m welche zuerst weggeschaufelt wurde. Der Bach, welcher ins Riedloch fliesst, hatte zu diesem Zeitpunkt den tiefsten Abfluss mit geschätzten 0.5-1 l/s.

Färbversuch 3-Wa

Die Alp Wannan liegt nach dem KARSYS-Modell auf der Grenze zwischen dem Einzugsgebiet von Furlli und Kreuzloch. Bei diesem Versuch sollte untersucht werden, welche Fliessrichtung das Wasser bei Wannan einschlägt. Der dritte Versuch wurde anfangs Oktober durchgeführt. Um die Forschungsfrage möglichst beantworten zu können, wurde die Bachschwinde auf Wannan mit dem grössten Abfluss gewählt. Einige Tage vor dem Versuch untersuchten Mitglieder der HGY die Alp auf mögliche Injektionsstellen ab. Die gewählte Injektionsstelle befindet sich im unteren Bereich an der Westseite der Alp, nahe der Strasse. Es ist möglich, dass die höher gelegenen Bachschwinden und unterirdischen Bäche mit dem Abfluss der gewählten Bachschwinde zusammenfliessen. Fluorometer wurden bei Furlli R und KLH installiert. Zusätzlich wurde ein Fluorometer bei Schachen montiert, da gemäss dem KARSYS-Modell Wasser von Wannan über eine nördliche Antiklinale zu Schachen fliesst, wobei zwei Karstwasserkörper durchflossen werden. Die Messung bei KLH wurde wegen dem Gewitterrisiko frühzeitig beendet. Bei Starkniederschlägen kann der Höhlenbach sehr stark anschwellen und die Messgeräte beschädigen. Der Abfluss wurde bei Wannan als ungefähr gleich hoch geschätzt wie bei Riedloch mit 1 l/s. Die Fliessgewässer hatten einen Wasserstand zwischen Mittel- und Basisabfluss. Am 30.09. und 01.10. wurde auf Wannan über 10mm Niederschlag verzeichnet. Zum Injektionszeitpunkt war es neblig-feucht. Am Morgen des 05.10. fielen nochmals 4 mm Niederschlag, was möglicherweise Auswirkungen auf die Abflussmengen der gemessenen Quellen und somit auf die gemessene Uraninkonzentrationen hatte (siehe Abbildung 4.7).

Färbversuch 4-UW Der vierte Färbversuch sollte die hydraulische Verbindung zwischen Unterweid und Furlli bestätigen, welche vom KARSYS-Modell suggeriert wird. Diese Messung fand eine Woche nach dem dritten Versuch statt. Da beim dritten Versuch die Konzentrationskurven am Ende der Messungen fast die Basiskonzentration erreicht hatten, wurde die Wahrscheinlichkeit eines Nachwirkens auf den vierten Versuch für gering gehalten. Als Injektionsstelle wurde eine unterirdische Versickerungsstelle gewählt, welche durch einen unterirdischen Zufluss gespeisen

wird. Die Stelle ist zubetoniert und mit einem Gullydeckel geschlossen. Fluorometer wurden bei Furli R, Schachen und Alt Stafel installiert. Die Injektionsstelle liegt knapp auf dem vom KARSYS-Modell gezeichneten Grundwasserkörper. Der nördliche Fliessweg zu Schachen könnte deshalb knapp gewährleistet sein. Der dritte Fluorometer wurde zwei Tage nach Injektion von Edwin Fuchs bei Alt Stafel installiert, um die Aussage eines Anwohners zu überprüfen, welcher von einer hydraulischen Verbindung von Unterweid zu Alt Stafel überzeugt war. Der Abfluss bei der Injektionsstelle wurde mit Hilfe eines Kübels auf etwas mehr als 0.5l/s geschätzt. In den Tagen vor der Injektion gab es weniger Niederschlag als in der Vorwoche. Der Pegel des ersten Sees in der Kreuzloch Höhle war um 4cm gesunken. In der Schachenquelle floss das Wasser deutlich langsamer, der Abfluss betrug ungefähr die Hälfte des Abflusses in der Vorwoche.

Färbversuch 5-CA

Der fünfte Färbversuch sollte prüfen, ob das Wasser von Chalberalpeli wie gemäss dem KARSYS-Modell zu den Töbleren-Quellen fliesst, oder ob es wie von Beat Hediger prognostiziert, zum Kreuzloch fliesst. Für die Injektion wurde die nördliche Bachschwinde von Chalberalpeli gewählt, bei der im Juni 2013 der Eingang gesprengt wurde. Der Abfluss wurde bei beiden Bachschwinden auf jeweils knapp 5 l/s geschätzt. Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde jeweils ein Fluorometer bei KLBS, bei KRÄH und bei Laueli installiert. Die Krählochquelle ist die Quelle mit dem grössten Abfluss der Töbleren Gruppe. Der Standort Laueli wurde gewählt, weil diese Quelle nahe der Grenze des im KARSYS Modell eingezeichneten Töbleren-Einzugsgebiet liegt und eine hydraulische Verbindung nicht ausgeschlossen werden wollte. Verglichen mit den letzten beiden Markierungsversuchen führten die Quellen und Bäche mehr Wasser. Beim ersten See im KL kam es zum Überfuss. Der Abfluss aus dem See wurde statt auf 2 l/s auf über 10 l/s geschätzt. Zwischen der 15. und der 22. Stunde nach Injektion fielen auf Wannen 18 mm Regen und zwischen der 104. und 112. Stunde weitere 40 mm.

Salzversuche 7-KL und 8-KL

Die Resultate der sechs Markierungsversuchen führten zu neuen Fragen und Unsicherheiten. In der verbleibenden Zeit wurde deswegen untersucht, ob der Kreuzlochbach wie angenommen im Sattlerbach aus der Quelle tritt und den KL Brunnen speist. Diese letzten beiden Tracerversuchen wurden mit Salz durchgeführt, da die Verwendung der benötigten Messgeräte weniger aufwändig ist und die kurze Distanz (500m) zwischen Injektions- und Messstelle eine ökologisch unbedenkliche Salzmenge erlaubt. Es wurde für die beiden bekannten Abflüsse des Kreuzlochbaches – der reguläre Abfluss aus dem See und der Unterabfluss – jeweils einen Salzversuch durchgeführt mit einem zeitlichen Abstand von 2 Wochen (09.03.15 und 23.03.15). Zuvor wurde mit Uranin untersucht, ob ein Zufluss vom Seeabfluss in den Unterabfluss von Auge beobachtbar ist innerhalb des leicht begehbaren Bereiches des Unterabflusses. Der Unterabfluss bildet sich aus drei Zuflüssen, die ersten zwei führen wenig Wasser (geschätzt je 1 l/s zum Injektionszeitpunkt), der dritte Zufluss führte zum Injektionszeitpunkt ca 10 l/s. Die Salzlösung wurde zwischen dem zweiten und dem dritten Zufluss in den Höhlenbach injiziert. Die Salzkonzentration wurde bei beiden Versuchen über die EL mit dem Multi3420 bei KLBS gemessen. Beim zweiten Salzversuch

wurde die eingespiesene Salzmenge von 5 auf 7.3 kg (von 15 auf 22 l Lösung) erhöht, da aufgrund der höheren Temperaturen mit Schmelzwasser gerechnet werden musste. Bei beiden Versuchen wurde während etwas mehr als 8 h im Minutentakt die EL gemessen. An beiden Versuchstagen wurde es auf den Mittag hin sonnig im Tal und die Schneeschmelze hatte im Tal eingesetzt. Beim zweiten Versuch war die gefühlte Lufttemperatur höher. Im Waagbach konnte am 9.3. keine Abflusszunahme beobachtet werden, am 23.3. stieg der Afluss hingegen leicht an.

4.3.3 Witterung und Wasserstand während der Messungen

In der Abbildung 4.7 wird der Niederschlag und die Temperatur während der Markierungsversuche 3-Wa, 4-UW und 5-CA gezeigt, welche mit der Wetterstation YBR vom SLF auf Wannengemessen wurden. Es wird angenommen, dass der Niederschlag auf Wannengemessen repräsentativ für den Niederschlag im ganzen Gebiet ist. Die Niederschlagsdaten sind insofern wichtig, weil sie die einzigen Hinweise auf allfällige Abflussänderungen sind, da von den Quellen keine kontinuierliche Abflussmessungen gemacht wurden während den Markierungsversuchen. Beim Versuch 3-WA fiel ungefähr in der zweiten Hälfte ein wenig Niederschlag. Dieser war jedoch sehr gering und hatte wahrscheinlich keinen Einfluss auf die Abflussmengen. Der vierte Markierungsversuch wurde in der Halbzeit durch relativ starke Niederschläge gestört, welche sich vermutlich auf den Abfluss ausgewirkt haben. Beim Markierungsversuch 5-CA setzte nach der Injektion Regen ein, die Spülung des Tracers und die Fließgeschwindigkeit wahrscheinlich beschleunigte. Gegen Ende der Messung gab es einen starken Niederschlag, der wahrscheinlich den Abfluss erhöhte.

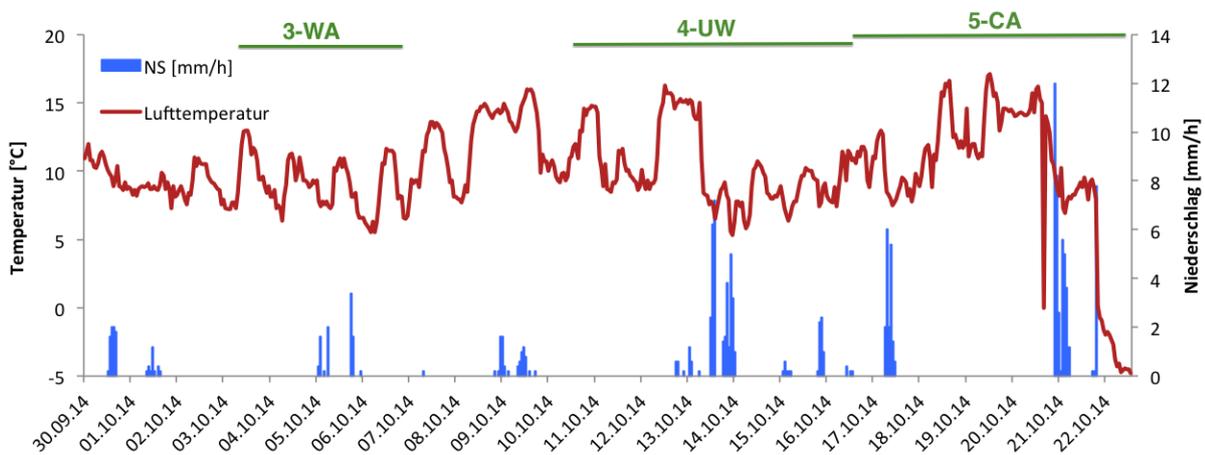


Abbildung 4.7: Niederschlag und Temperatur auf der Alp Wannengemessen während den Markierungsversuchen 3-WA, 4-UW und 5-CA.

4.4 Datenverarbeitung, Analyse und Auswertung

4.4.1 Datenverarbeitung der Temperatur, EC und Isotopenmessungen

Die δD - und $\delta^{18}O$ -Werte wurden im Verhältnis zueinander gestellt, um die Hydrologische Wasserlinie aller Quellen und Messstellen zu berechnen. Das lokale Verhältnis der beiden Isotope verhält sich linear. Werte, welche sich nicht auf dieser Linie befinden, sind fehlerhaft und wurden von den folgenden Analysen und Abbildungen ausgeschlossen. Dies kann zum Beispiel vorkommen, wenn eine Probeflasche nicht gut verschlossen wird und Wasser aus der Flasche verdunstet. Die Temperaturmessungen, welche am Furli-Brunnen gemacht wurden, zeigten relativ hohe Werte (bis 14 °C) im Sommer an, sowie relativ starke Schwankungen. Da das Wasser von der Quelle zur Scheune in einem schwarzen, meist freigelegtem Rohr geleitet wird, wird die Wassertemperatur durch äussere Bedingungen beeinflusst. Derselbe Effekt ist schwächer auch bei den Standorten Furli Rohr und Kreuzloch Brunnen zu erwarten. Die gemessenen Wassertemperaturen dieser Standorte entsprechen wahrscheinlich nicht den Wassertemperaturen der Quellen. Deshalb werden sie in den Resultaten und der Diskussion nicht berücksichtigt.

Am 22.11.14 und 18.01.15 wurde mit dem Cond3310-Messgerät Wassertemperaturen von unter null Grad Celsius sowie überhöhte EL-Werte gemessen. Die betroffenen Messungen wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die Ursache für diesen Messfehler ist nicht bekannt. Es wird angenommen, dass bei den anderen Messungen dieser Messfehler nicht vorhanden war.

Sowohl für die EL als auch für die Isotopenanalyse werden die Messungen von Furli B und Furli R zusammengefasst. Dies geschieht unter der Annahme, dass zwischen diesen Standorten und den Quellen keinen Phasenwechsel und keinen chemischen Austausch mit dem leitenden Rohr stattfinden, welche das Isotopenverhältnis bzw. die EL verändern würden. KLBS und KLB wurden ebenfalls zusammengefasst, ausser für die Darstellung der Verteilung anhand von Quantilen (sogenannte Boxplots), wo die Quelle getrennt dargestellt werden, da mehrere Messungen zum selben Zeitpunkt gemacht wurden und die Wintermonate übergewichtet worden wären.

4.4.2 Kalibrierung der Fluorometer

Die Kalibrierung der Fluorometer ist die Grundlage für die Umwandlung der gemessenen Fluoreszenz in mV Werte in die Konzentrationseinheit ppb (Parts per Billion). Die Fluorometer wurden zweimal im Labor getestet, im September 2014 und im Januar 2015. Bei den Kontrollen wurden die Datenlogger der Fluorometer nicht direkt kalibriert. Es wurden jedoch 4 Uraninlösungen mit den Konzentrationen von 0 ppb, 1 ppb, 10 ppb und 100 ppb erstellt (Abbildung 4.8). Die Lösungen wurden bei der Kalibrierung jeweils vier mal gemessen, wobei die erste Messung nur zum Spülen des Fluorometers verwendet wurde und nicht in die Kalibrationsgleichung einfluss. Gemessen wurden zuerst die tiefen Konzentrationen. Auf diese Weise wurde der Einfluss von vorhergehenden Proben auf die Messungen der aktuellen Probe reduziert. Die gemessenen mV-Werte weisen mit zunehmender Konzentration eine grössere Standardabweichung aus. Für 10ppb liegen die Standardabweichungen bei den mV-Werten zwischen 0 bis 4. Für die Umwandlungsgleichung, welche eine lineare Funktion ist, wurde das Mittel der gemessenen mV verwendet. Für

jeden Fluorometer wurde empirisch eine lineare Beziehung zwischen mV und der Konzentration bestimmt mit der Form:

$$ppb = mV \times a - b$$

wobei a und b empirische Konstanten sind. b liegt bei allen Umwandlungsgleichungen zwischen -1.1 und -0.2. Das Bestimmtheitsmass (R^2) aller Umwandlungsgleichungen ist grösser als 0.99, was eine gute Übereinstimmung bedeutet. Das Wasser für die Kalibrierungen stammte aus dem Untersuchungsgebiet. Beim ersten Durchgang wurde Wasser von der Bachschwinde bei Hinterhofen verwendet, beim zweiten Wasser von der Furli-Quelle.

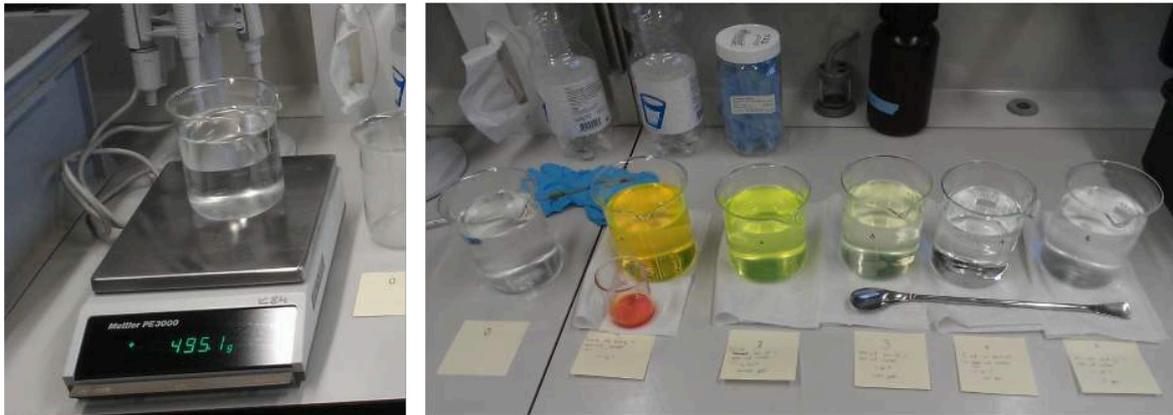


Abbildung 4.8: Kalibrierungslösungen mit Uranin für die Kalibrierung der Fluorometer.

Zwischen diesen beiden Kontrolldaten wurden alle Markierungsversuche bis auf eine durchgeführt. Die Umwandlungsgleichungen unterscheiden sich zwischen beiden Daten, indem bei den Gleichungen von Januar a kleiner ist, besonders beim Fluorometer 907. Das bedeutet, dass bei gleicher Konzentration im Januar ein höherer mV gemessen wird. Der prozentuale Unterschied ist in Tabelle 4.3 abgebildet. Gründe für diesen Unterschied könnten im unterschiedlichen Probewasser oder in den Kalibrierungslösungen liegen.

Tabelle 4.3: Prozentualer Unterschied zwischen dem berechneten ppb nach der Umwandlungsgleichung vom September und deren vom Januar. Die Zahlen geben an, um wieviel Prozent der berechnete ppb kleiner wird mit derselben mV Messung für jeden Fluorometer. Fluorometer 901 funktionierte im Januar nicht, weshalb kein Vergleich möglich ist.

514	902	907
6.3	5.8	18

Für die Messungen von 2014 wurden die Kalibrierungsgleichungen vom September 2014 verwendet und für die Fluorometermessung vom Januar/Februar 2015 die Kalibrierung vom Januar 2015. Bei den Kalibrierungen wurde jeweils nur a aus den Kalibrierungsgleichungen entnommen. b für jede Kurve einzeln aus der mittleren Konzentration vor dem Anstieg berechnet. So werden höhere Grundkonzentrationen, welche von früheren Messungen herrühren extrahiert. Es

gab Messungen, bei denen dies nicht möglich war, da der Fluorometer zu spät installiert wurde oder kein konkreter Anstieg sichtbar ist, z.B. 6-CA zu Krähloch. In diesen Fällen wurde der Subtrahent der Kalibrierungslösung verwendet.

4.4.3 Datenverarbeitung der Markierungsversuche

Die Rohdaten der Konzentrationsmessungen wurden mithilfe des FLUO Computer Programms in den Computer übertragen und in mV, Temperatur, Trübung und Zeit umgewandelt. Anschließend wurden die Werte von mV in ppb umgerechnet, um den Vergleich zwischen den Messungen zu ermöglichen und den Rückgewinn an den jeweiligen Quellen zu berechnen.

Die Messreihen von Fluo 514 enthielten mehrere alleinstehende Nullmessungen, welche wahrscheinlich auf einen Fehler des Messgerätes zurückzuführen sind. Diese Nullwerte wurden durch Glätten der Kurve eliminiert, bei welcher jeweils der Durchschnitt aus den nächstliegenden vier Werten berechnet wurde.

Um eine Abschätzung der Diffusivität zu erhalten, wurde eine theoretische Konzentrationskurve (siehe Kapitel 4.1.5) an die Kurven durch die Anpassung der Fließparameter approximiert. Die Masse M wurde aus dem Wiedererhalt des Tracers berechnet (z.B. $120\text{g} \times 0.25$), der Abfluss Q entspricht dem verwendeten Abfluss Wiedererhaltsberechnung. Für die beiden Fit-Parameter t_0 und P_D wurde für jede Kurve ein realistischer Bereich festgelegt. Für den Parameter t_0 wurden Werte zwischen t_{dom} und t_{med} gewählt. Der Bereich des Dispersionsparameters P_D wurde mit der geschätzten Bandbreite der Distanz und der Bandbreite der möglichen Dispersivität α berechnet. Anschließend wurden für beide Fit-Parameter ein Vektor mit 100 Werten innerhalb des definierten Bereichs erstellt. Mit der Kombination dieser beiden Fit-Parameter wurden 100 mal 100 Konzentrationskurven modelliert. Um die beste Kombination der Fit-Parameter zu ermitteln, wurde von jeder modellierten Kurve die mittlere Quadratdistanz zur gemessenen Konzentrationskurve berechnet. Mithilfe der vier besten Fits wurden die Parameter iterativ optimiert.

Bei Durchgangskurven mit mehreren Maxima oder Zwischenbuckel in den Kurven wurde davon ausgegangen, dass die Kurve durch eine Überlagerung mehrerer Durchgangskurven entstand. Deswegen ist für die Modellierung dieser Kurven ein MDM verwendet worden. Die Kurven des MDM wurden iterativ ermittelt. Die Kurvenannäherung war bei den MDM somit zeitintensiver. Es wurden keine MDM Modelle mit mehr als vier Sub-Durchgangskurven gemacht, denn die Komplexität und die Unsicherheiten nehmen mit jeder Kurve zu.

Tailings wurden zum Teil mit dem MDM anhand einer letzten flachen Kurve nachgebildet. Tailings wurden aber ignoriert, wenn ihre Herkunft als zusätzlicher Durchgangskurve unwahrscheinlich erschien. Wenn das Tailing ignoriert wurde, musste die rückgewonnene Masse M leicht reduziert werden.

Kapitel 5

Messresultate

5.1 Ergebnisse der regelmässigen Wassermessungen

5.1.1 Wassertemperatur

Die Wassertemperatur an den Quellen liegt zwischen 4 und 9 °C während der gesamten Messzeit (Abbildung 5.1). Bei allen Quellen bis auf Studen ist ein Jahresgang erkennbar. Bei den Quellen mit Jahresgang liegt die Wassertemperatur von Juni bis September meistens oberhalb von 7°C und ist somit in dieser Periode höher als diejenige von Studen. Im September beginnen die Wassertemperaturen zu sinken und erreichen im Februar ihr Minimum unter 6°C. Dieser Trend korreliert mit den Lufttemperaturen in Wannen. Die Wassertemperatur bei Studen blieb das ganze Jahr relativ konstant auf durchschnittlich 7.2°C. Die Temperaturstreuung ist in den Sommermonaten am kleinsten und im Spätwinter am grössten.

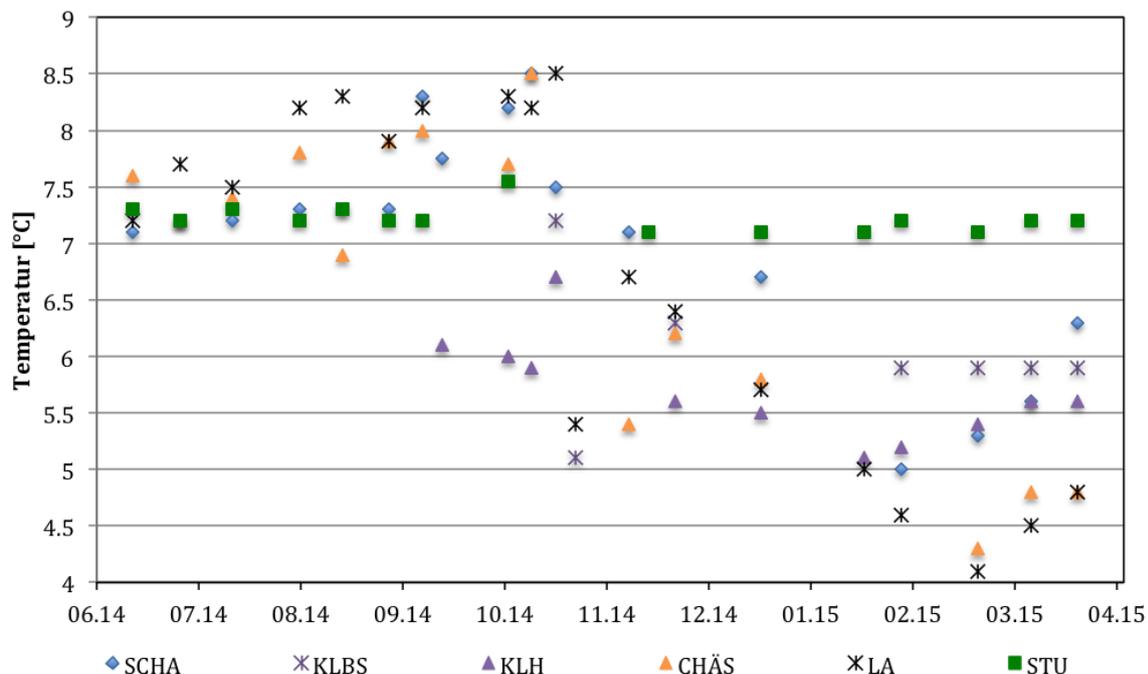


Abbildung 5.1: Gemessene Wassertemperaturen an den Quellen.

Die Jahresschwankungen in der Temperatur sind bei Laueli am stärksten. Im Sommer befindet sich die Wassertemperatur an der Quelle eher im oberen Bereich der Messwerte und im Winter klar unterhalb des Durchschnitts. Die erste Hälfte der Messungen haben höhere Temperaturen als Studen, die zweite Hälfte tiefere. Zwischen Oktober und März sinkt die Temperatur bei Laueli fast linear von rund 8°C auf 4°C ab. Diese Verteilung ist in Abbildung 5.2 gut sichtbar, wo die oberen zwei Quartile zwischen 7.2 und 8.5°C verteilt sind, während die unteren zwei Quartile oberhalb von 3°C liegen.

Da von Furlì und Kreuzloch Wassertemperaturmessungen an den Quellen fehlen, ist eine Aussage über die relative Stärke der Wassertemperaturschwankungen von Chäsloch und Schachen schwierig. Chäsloch scheint nach Laueli jedoch die grösste Wassertemperaturschwankungen zu haben. Ausnahme sind Wassertemperaturen im September bei Schachen, welche auffällig hoch sind. Im Oktober fallen die Wassertemperaturen bei Chäsloch deutlich schneller als bei Schachen und gehören ab November zu den Tiefstgemessenen. Die Wassertemperatur von KLH scheint im allgemeinen etwas konstanter als bei Chäsloch zu sein.

Zu den Sommertemperaturen des Wassers der Kreuzlochstandorte kann keine Aussage gemacht werden, da bis September nur die Temperatur am KLB gemessen wurde und diese Messungen wegen Unsicherheiten aus der Analyse ausgeschlossen sind. KLH zeigt relativ konstante Wassertemperaturen, welche sich zwischen 6 und 5°C bewegen. Eine Ausnahme bildet eine Messung im Oktober von über 6.5°C. Das Temperaturminimum von KLH liegt zusammen mit dem von Schachen ungefähr einen Monat vor jenem von Chäsloch und Laueli. Die Temperaturspanne des Wassers von KLBS ist vergleichbar mit jener von KLH (Abbildung 5.2). Bei KLBS liegen die Hälfte der Temperaturen nahe bei die 6°C, sodass das zweite und dritte Quartil eine geringere Streuung haben als bei KLH. Die Wassertemperaturen von KLBS sind bei allen Messdaten höher als die von KLH (Abbildung 5.1), im Durchschnitt ist das Wasser bei KLBS 0.3°C wärmer als bei KLH. Auffallend ist die Kontinuität der letzten vier Messungen bei KLBS. Nach Studen haben KLH und KLBS in Abbildung 5.2 die kleinste Temperatursreuung. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass an diesen beiden Standorten erst ab September bzw. Oktober gemessen wurde und so durch die fehlenden Sommermessungen die Streuung kleiner resultiert. Nach Laueli und Chäsloch hat das Schachenwasser die grösste Temperaturspanne, die zweiten und besonders die dritten Quartile bewegen sich jedoch in einem kleineren Temperaturbereich zwischen 6.7 und 7.5°C (Abbildung 5.2). Die Wassertemperaturen im Sommer bei Schachen korrelieren relativ stark mit jenen von Studen. Im September und Oktober steigen die Wassertemperaturen und sind vergleichbar mit jenen von Chäsloch. Ab November sinken die Wassertemperaturen bis auf 5°C und korrelieren bei drei Messungen relativ gut mit den Werten von KLH.

Studen hat mit 7.2°C die höchste Durchschnittstemperatur des Wassers. Die Quelle zeigt sehr konstante Wassertemperaturen zwischen 7 und 7.5°C über das ganze Jahr. Verglichen mit den anderen Quellen sind deshalb die Wintertemperaturen relativ hoch.

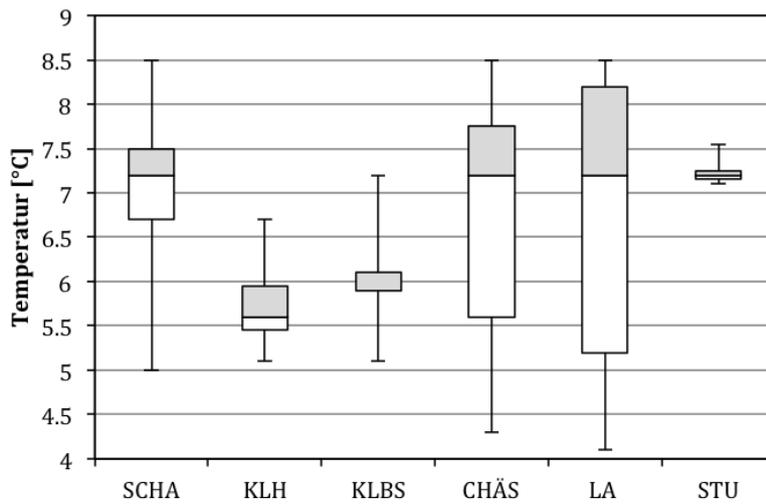


Abbildung 5.2: Temperaturverteilung der Quellen. Die weiße und die graue Box zeigen die Verteilung des zweiten und dritten Temperatur-Quartils

5.1.2 Leitfähigkeit

Die gemessene Elektrische Leitfähigkeit (EL) des Wassers an den Quellen befindet sich zwischen 200 und 370 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Abbildung 5.3).

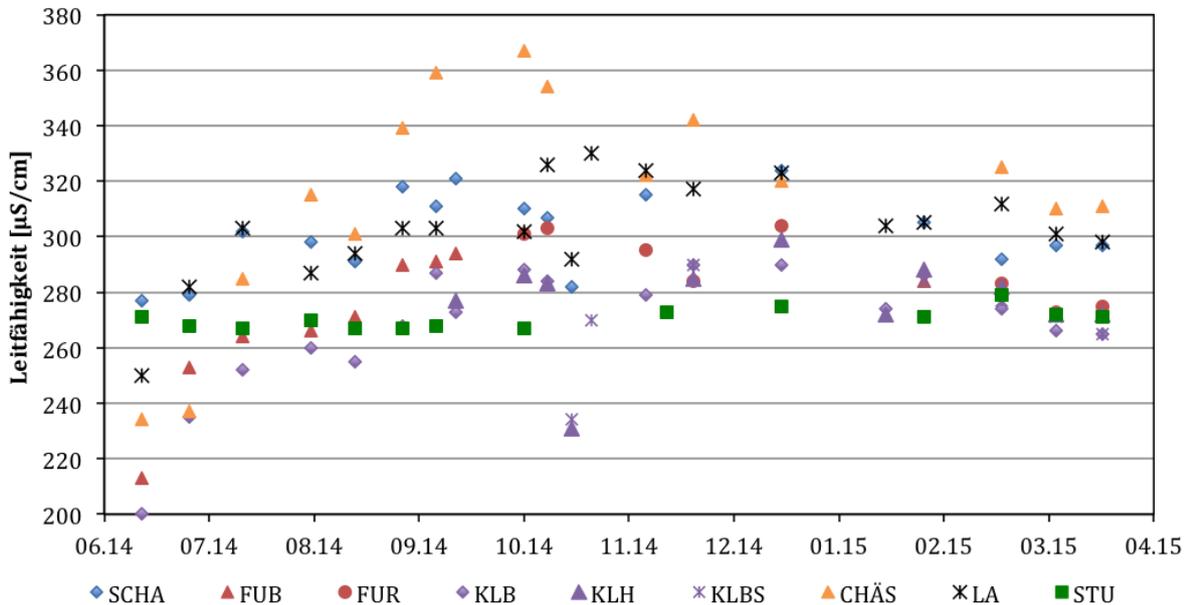


Abbildung 5.3: An den Quellen gemessene Leitfähigkeiten über das Jahr.

Die tiefste EL wurde im Juni gemessen, in den folgenden drei Monaten steigen die Werte bei allen Quellen tendenziell. Einzig klare Ausnahme ist hier wieder die Quelle bei Studen, welche das ganze Jahr durch Werte zwischen 265 und 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zeigt. Ab Juli befinden sich die EL der

Quellen vorwiegend zwischen 260 und 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Besonders auffallend ist der Jahresgang der Chäslochquelle. Diese zeigt nach einem starken Anstieg von 230 auf über 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im September die höchste EL. Im Oktober sinkt die EL wieder, bleibt aber verglichen mit den restlichen Quellen klar im oberen Bereich. Nach Chäsloch zeigen Laueli und dann Schachen die höchste EL. Die EL von Studen gehört das ganze Jahr hindurch zu den Tiefsten, ausser im Frühsommer. Von den Quellen im Waagtal haben die KL-Standorte meistens die tiefste EL was sich auch in Abbildung 5.4 widerspiegelt. Das erste und zweite Quartil von KLB liegen dabei tiefer als jene von KLH. An den Daten, an denen beide KL-Standorte beprobt wurden, sind deren EL relativ ähnlich (durchschnittlich mit 5 Einheiten Differenz), wobei sich die Standorte mit der höheren EL abwechseln. Die EL von Furli liegt meist knapp über derjenigen der drei KL-Standorten. In Abbildung 5.4 fällt auf, dass bei allen Quellen ausser Schachen und Studen das unterste Quartil doppelt so stark gestreut ist als das oberste.

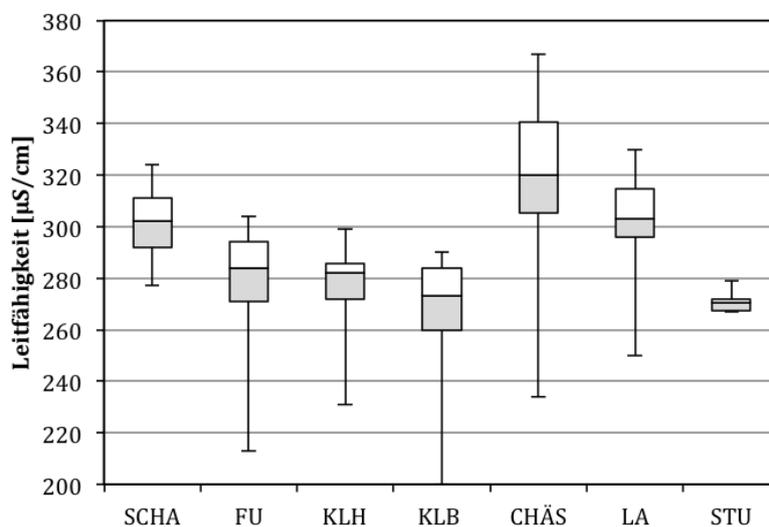


Abbildung 5.4: Verteilung der gemessenen Leitfähigkeiten an den Quellen. Die EL von Furli R und Furli B sind Furli zusammengefasst. Die weisse und graue Box zeigen die Verteilung des zweiten und dritten EL-Quartils.

5.1.3 Isotopen Analyse

Die Lokale Meteorische Wasser Linie (LMWL) gebildet aus den Niederschlagsproben, welche bei der Chöplishütte gesammelt wurden, korreliert mit den Verhältnissen der δD - und $\delta^{18}\text{O}$ Konzentration im Wasser an den Quellen (Abbildung 5.5). Erwartungsgemäss streuen sich die Werte des Niederschlags mehr als die der Quellen. Die Verhältnislinie der Quellen haben ungefähr dieselbe Steigung wie die LMWL mit Werten zwischen 8 und 8.6. Eine Ausnahme bildet wiederum Studen mit einer Steigung von 6. Studen unterscheidet sich auch in der Streuung der Werte von den restlichen Quellen: Während die Quellen vom Waagtal $\delta^{18}\text{O}$ Verhältnisse zwischen -10 und -14 haben, liegen die $\delta^{18}\text{O}$ Verhältnisse von Studen zwischen -11.5 und -12 (Abbildung 5.7).

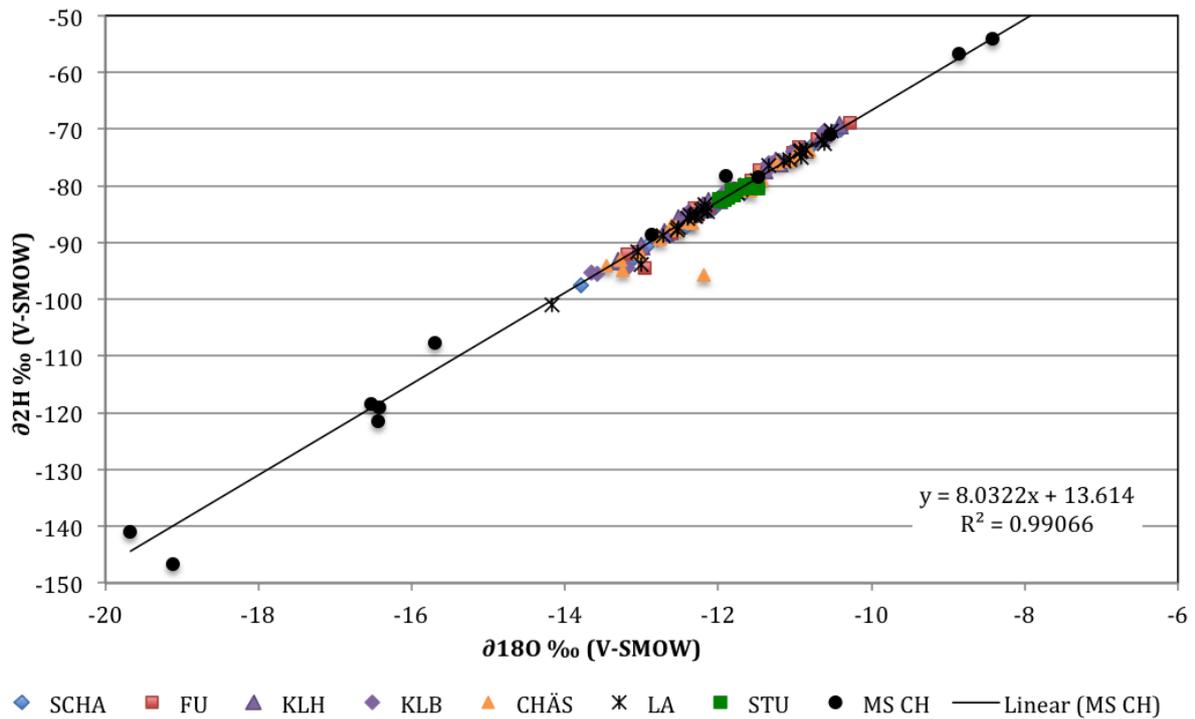


Abbildung 5.5: Paarwerte zwischen δD und $\delta^{18}O$ an den Quellen und im Niederschlag. Der Niederschlag wurde in der Messtation bei der Chöplishütte (MS Chöpl.) gesammelt, welche auf 1580 m.ü.M. liegt. Anhand der Istopenverhältnisse des Niederschlages wurde die Lokale Meteorische Wasserlinie (LMWL) gezogen.

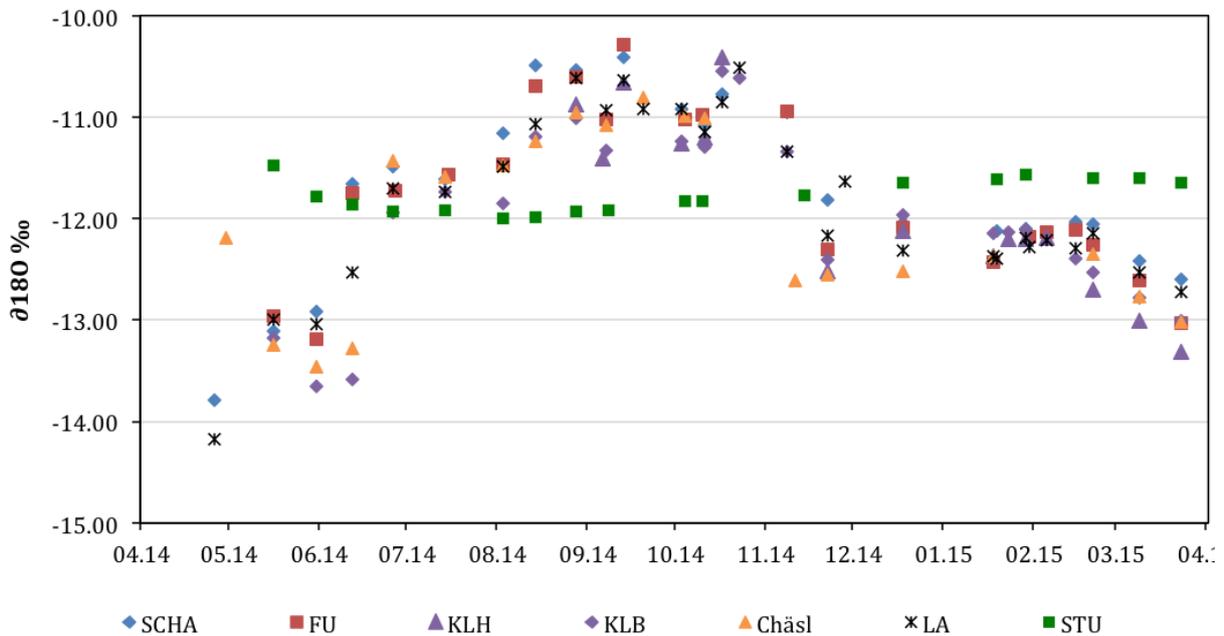


Abbildung 5.6: $\delta^{18}O$ an den Quellen. Der Jahresgang zeigt einen Anstieg im Spätsommer.

Alle Quellen bis auf Studen zeigen einen relativ ähnlichen $\delta^{18}\text{O}$ -Jahresgang mit einer starken Zunahme zwischen Mai bis August (Abbildung 5.6). Zwischen August und November befinden sich die Quellen auf ihrem $\delta^{18}\text{O}$ Maximum, bevor sie stufenartig auf ein tieferes Verhältnis fallen. Ähnlich wie bei der EL wurden die tiefsten Werte im Juni gemessen. Die letzten beiden Messungen im März zeigen jedoch eine Abnahme, weshalb unklar ist, ob das Jahresminimum tatsächlich im Juni liegt oder nicht früher. Die Werte bei Studen sind übers Jahr relativ konstant, haben aber einen leicht antizyklischen Charakter mit einem auf März verschobenen Maximum. Abgesehen von Schachen zeigt sich kein klarer Unterschied im Jahresgangmuster der Isotopenwerte der verschiedenen Quellen. Folgende Tendenzen sind aber sichtbar: Laueli liegt meistens ungefähr in der Mitte. Die tiefsten Werte werden häufig durch einen der KL-Standorte gesetzt (mit Ausnahme von Studen). Nach dem Wasser von Kreuzloch hat jenes von Chäsloch häufig die tiefsten $\delta^{18}\text{O}$ Werte. Die Schachenquelle bewegt sich meist im oberen Bereich. Furli liegt mit wenigen Ausnahmen Anfangs Winter oberhalb von den Kreuzlochstandorten. Bei den letzten drei Messungen im Februar, März behalten die Quellen ungefähr ihren Rang, wobei Schachen immer die höchsten Werte, knapp gefolgt von Laueli, und KLBS die Tiefsten hat.

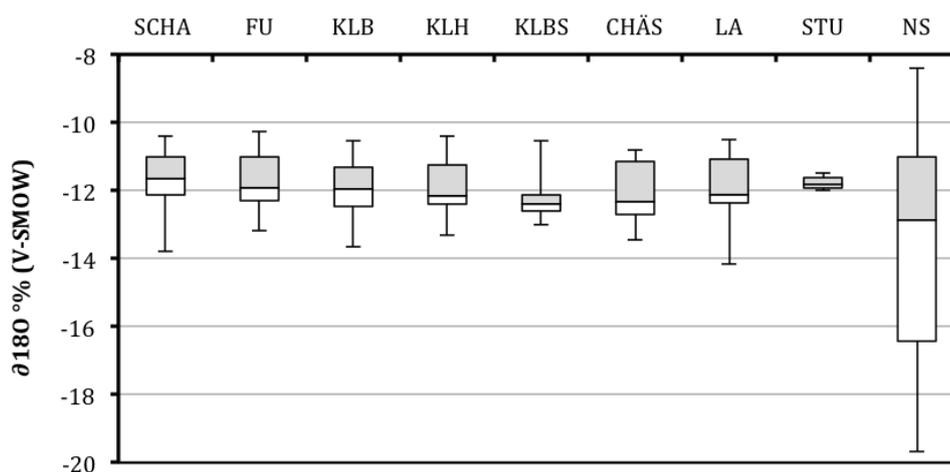


Abbildung 5.7: Verteilung der gemessenen $\delta^{18}\text{O}$ an den Quellen und im Niederschlag bei der Messstation Chöplis. Die weisse und graue Box zeigen die Verteilung des zweiten und dritten Quartils.

5.2 Ergebnisse der Markierungsversuche

Im folgenden Unterkapitel werden pro Markierungsversuch (Tabelle 4.2) die Durchgangskurven der gemessenen Quellen vorgestellt. Aus den Durchgangskurven werden die verschiedenen Fließzeiten und der Wiedererhalt berechnet. Zudem werden Dispersionsmodelle an die Durchgangskurven angepasst um die Fließparameter zu ermitteln. Diese letzte Analyse wird jedoch nur für jene Durchgangskurven gemacht, die keine Lücken in der Messreihe und eine mehr oder weniger typische Form haben. Die Resultate sind auf der Karte im Anhang III zusammengefasst.

5.2.1 Markierungsversuche 1-RL und 2-RL

Die ersten beiden Markierungsversuche vom 06.09.14 bzw. 19.09.14 konnten keinen Aufschluss über mögliche hydraulische Verbindungen geben. Keiner der installierten Fluorometer verzeichnete einen Konzentrationsanstieg von Uranin. Für diese beiden Versuche werden deshalb keine Durchgangskurven gezeigt.

Beim ersten Versuch wurden 6g Uranin in das Riedloch eingespeist und bis 13 Stunden nach Injektion an den Standorten KLQ und KL Tobel gemessen. Beim zweiten Versuch wurde die Uraninmenge auf 120g erhöht. Die Injektionsstelle blieb dieselbe. Neben dem Standort in der KLHöhle wurde ein weiterer Fluorometer im Furlitobel, beim Chäsloch und bei Schachen installiert. Beim zweiten Versuch wurde die Messzeit auf rund 30 Stunden erweitert.

Dass bei beiden Versuchen kein Konzentrationsanstieg gemessen wurde, bedeutet nicht, dass zwischen den der Injektionsstelle und den Standorten keine hydraulische Verbindung besteht. Es ist sehr wahrscheinlich, dass bei beiden Versuchen die Messzeit zu kurz war, wie der Markierungsversuch 6-RL zeigen wird. Zudem war die Tracermenge beim ersten Versuch wahrscheinlich zu gering.

5.2.2 Markierungsversuch 3-WA

Der dritte Versuch sollte untersuchen, wohin das Wasser fließt, welches auf der Wannenalp in einer Bachschwinde verschwindet. Laut dem KARSYS Modell liegt die Alp und die beprobte Bachschwinde auf der Grenze zwischen dem Einzugsgebiet vom Furli und jenem vom Kreuzloch. Dementsprechend wurde ein Fluorometer bei Furli R und eines im Kreuzloch installiert. Ein dritter Fluorometer mass bei der Schachenquelle, welche nach dem KARSYS Modell über einen Karstwasserkörper vom Furli Einzugsgebiet gespiesen wird. Die Messungen bestätigen die hydraulische Verbindung zum Furli und zur Schachenquelle. Die Konzentrationsmessungen, welche durch den Fluorometer 514 im ersten See des Kreuzloches aufgenommen wurden können nicht verwendet werden, um die hydraulische Verbindung zu Wannan zu bestätigen. Denn in der verkürzten Messzeit konnte kein signifikanter Konzentrationsanstieg aufgenommen werden. Die Messung beim Kreuzlochsee wurde wegen Gewittergefahr sicherheitshalber frühzeitig beendet, kurz vor dem Konzentrationsanstieg im Furli. Ausserdem zeigten die Messungen der KLH starke Konzentrationsschwankungen, welche eine Messstörung vermuten lassen.

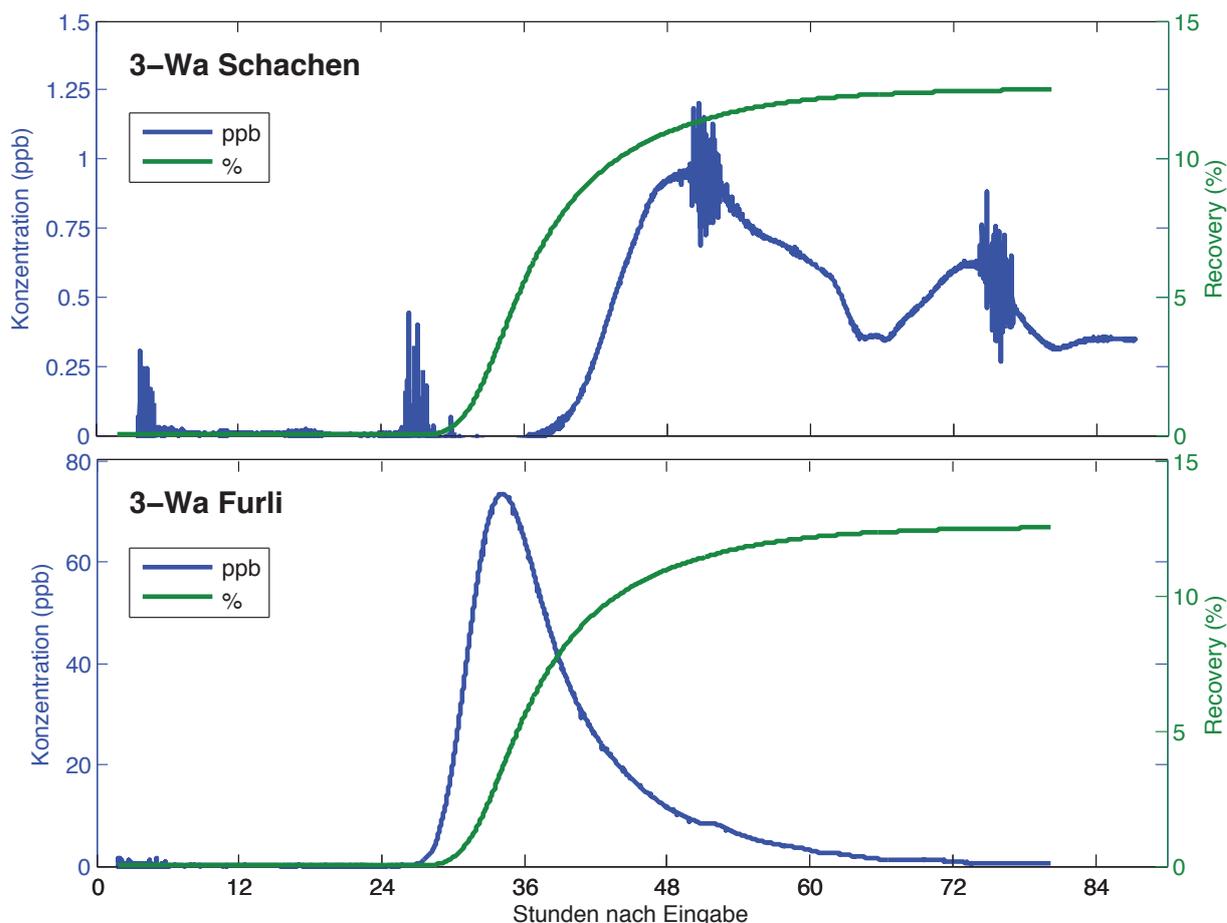


Abbildung 5.8: Konzentrationskurve und Wiedererhalt (Recovery) bei Schachen und Furli.

Konzentrationsmessungen 3-WA

Beim Standort Furli R konnte die höchste Konzentration gemessen werden mit 73.4 ppb (Tabelle 5.1). Die Durchgangskurve zeichnet sich durch einen einzigen Peak aus (Abbildung 5.8). Der Anstieg ist relativ schnell, die Abnahme sehr langsam. Der Abfluss der Furliquelle ist nicht bekannt, wird jedoch für die folgenden Berechnungen zwischen 5 und 15 l/s geschätzt. Damit hat die Furliquelle den höchsten Wiedererhalt von 13 bis 38%, je nach geschätztem Abfluss.

Die höchste Konzentration bei der Schachenquelle ist mit 0.9 ppb relativ klein, durch den starken Abfluss von geschätzten 120 l/s zeigt sie aber doch einen Wiedererhalt von rund 9%. Anders als bei Furli besteht die Durchgangskurve Schachens aus zwei Maxima, wobei das Erste einen Nachbuckel besitzt und nach dem Zweiten die Konzentration nicht auf ihren Ursprung zurückfällt. Bei der Durchgangskurve von Schachen sind die vier Perioden mit starken Konzentrationsauschlägen auffallend. Sie treten alle zwischen 10:30 und 11:30 Morgens auf und dauern zwischen 2 und 4 Stunden. Die Ursache ist unbekannt. Aufgrund der Regelmässigkeit wird jedoch angenommen, dass es sich um einen Artefakt handelt und nicht um effektive Konzentrationsschwankungen.

Das erste Signal erreicht das Messgerät bei Furli 10h früher, als jenes bei Schachen. Der Peak bei Furli wird rund 13h früher gemessen als bei Schachen. Bei Schachen steigt die Konzentration

erst kurz nachdem bei Furli das Maximum erreicht wird.

Tabelle 5.1: Eckdaten und Resultate des dritten Markierungsversuches. Die Zahl in Klammer (z.B. 907) ist die Seriennummer des Fluorometers. Der *Abfluss* an der Injektionsstelle und bei den Quellen ist geschätzt. Die *Luftdistanz* bezieht sich auf die Distanz zwischen Injektionsstelle und Messstelle ohne den Höhenunterschied. Das *Erste Signal* ist der Moment, bei dem die Konzentration zu steigen beginnt. *50% Recovery* ist die Zeit, nach der 50% des gemessenen Markierungsstoffes durch die Messstelle geflossen ist. Die Zahl in Klammern beim Abfluss gibt an, welcher Wert für die Recovery der Abbildung 5.8 verwendet wurde. Der *Wiedererhalt* gibt den Prozentsatz der Tracer Menge an, welche durch die Messstelle floss. Die Zeiten sind auf fünf Minuten gerundet.

Versuch 3-WA			
Injektionsstelle	Wannen	Abfluss [l/s]	2
Injektionszeit	08:10 03.10.2014		
Tracer	Uranin	Menge [g]	120
Resultate der Tracer Messungen			
	Schachen (907)	Furli R(902)	KLH(514)
Abfluss [l/s]	120	5-15 (5)	15-20
Luftdistanz [m]	1714	1306	1480
Erstes Signal	1d 13h 55'	1d 3h 50'	-
Peak 1	2d 0h 25'	1d 11h 0'	-
Peak 1 [ppb]	0.9	73.4	-
Peak 2	3d 0h 55'	-	-
Peak 2 [ppb]	0.6	-	-
50 % Recovery	2d 8h 50'	1d 13h 45'	-
Abbruch	3d 14h 55'	3d 9h 5'	1d 4h 45'
Abbruch [ppb]	0.3	0.4	-
Wiedererhalt [%]	9	13-38	-

Analytische Auswertung der Konzentrationskurven 3-WA

Für die analytische Auswertung der Durchgangskurven wurde für Furli das Dispersionsmodell (DM) verwendet und für Schachen das Multi-Dispersions-Modell (MDM) (siehe Kapitel 4.1.5). Die simulierte Kurve bei Furli stimmt mit der gemessenen Konzentrationskurve (Abbildung 5.9) besonders beim letzten Drittel der Abnahme eher schlecht überein. Bei der Modellierung musste ein Kompromiss zwischen langsamem Konzentrationsabfall und raschem Anstieg gefunden werden. Eine bessere Annäherung an die gemessene Kurve hätte durch das Überlagern mehrerer Durchgangskurven erreicht werden können. Doch es ist nicht sicher, ob das beobachtete Tailing tatsächlich durch einen zweiten Fliessweg bedingt ist, oder durch Dispersion. Deshalb wurde die einfachere Lösung mit einer einzigen Kurve gewählt. Um möglichst nahe der gemessenen Kurve zu sein, wurde der Dispersionsparameter etwas höher gesetzt als durch die aufsteigende Flanke gegeben wäre, was zu einem leicht flacherem Anstieg führt. Zudem wurde der Zeitpunkt des Maximums um einige Stunden nach hinten verschoben.

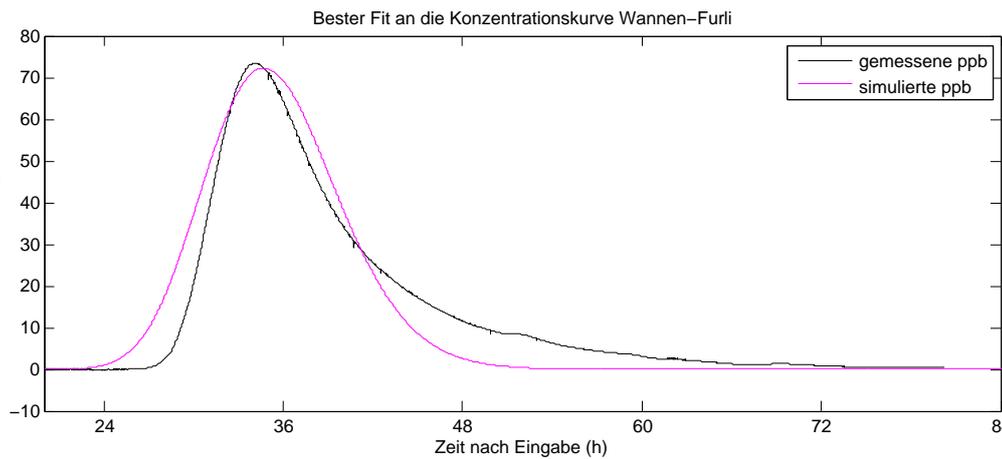


Abbildung 5.9: Gemessene Konzentration (schwarz) und modellierte Konzentration (magenta) bei Furli. Der Konzentrationsabfall erfolgt in Realität langsamer (Tailing).

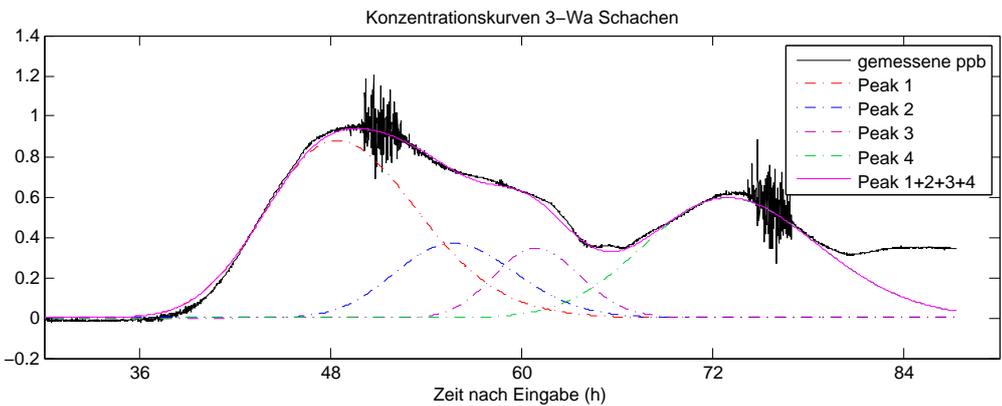


Abbildung 5.10: Gemessene Konzentration (schwarz) und modellierte Konzentration bei Schachen. Die Modellierete Konzentration (magenta) setzt sich aus der Überlagerung vier einzelner Durchgangskurven (Peaks) zusammen.

Tabelle 5.2: Fließparameter der Dispersionsmodelle von Furli und Schachen mit t_0 = mittlere Fließzeit, v_m steht mittlere Abstandsgeschwindigkeit, P_D = Disprsnionsparameter, α_L = Dispersivität und %= Prozentualer Anteil der einzelnnen Kurven an der gesamten Recovery.

Versuch 3-WA: Resultate der analytischen Auswertung					
	Furli R		Schachen		
	Kurve	Kurve 1	Kurve 2	Kurve 3	Kurve 4
t_0 [s]	125000	17700	202000	220000	265000
t_0	1d 10h 45'	2d 1h 10'	2d 8h 5'	2d 13h 5'	3d 1h 35'
v_m [m/h]	38	35	31	28	23
P_D [-]	0.008	0.0048	0.0023	0.0009	0.0029
α_L [m]	14-42	11-33	5-16	2-6	6-20
%	100	44	13	9	34

Die beste und einfachste Annäherung an die Durchgangskurve bei Schachen (Abbildung 5.10) wurde durch die Überlagerung von vier verschiedenen Kurven erreicht. Die erste Kurve brachte ungefähr die Hälfte des gesamten Wiedererhalts, rechnet man die zwei Folgenden dazu, sind es knapp 70%. Die Maxima der vier Kurven bei Schachen verteilen sich über 24 Stunden. Die Abstandsgeschwindigkeit (basierend auf der Luftlinie) zu Furlì ist höher als zu Schachen. Bei Schachen ist die Abstandsgeschwindigkeit je nach Kurve 23 bis 35 m/h. Der Dispersionsparameter sowie die Dispersivität ist bei Furlì höher als bei Schachen, besonders bei den letzten drei Kurven. Die Dispersivität ist jedoch bei beiden Quellen eher im unteren typischen Bereich für Kluft- und Karstwasser (10-1000m).

5.2.3 Markierungsversuch 4-UW

Der vierte Versuch untersucht, wohin das Wasser fließt, das bei einer Quelle von Unterweid gleich wieder versickert. Nach dem KARSYS Modell fließt dieses Wasser zu Furlì und kann über Umwege zu Schachen fließen. An diesen beiden Standorten wurde deshalb ein Fluorometer installiert. Ungefähr zwei Tagen nach Injektion wurde auch bei Alt Stafel ein Fluorometer plaziert. Motivation dafür war die Aussage eines Lokalen, der sich sicher war, das Wasser von Unterweid fließt zur Alt Stafel, welche zum Sihltal gehört. An allen drei Standorten wurde einen Konzentrationsanstieg gemessen.

Konzentrationsmessungen 4-UW

Die erste Konzentrationserhöhung wird rund 26 Stunden nach Injektion in Furlì R gemessen (Tabelle 5.3). Die Durchgangskurve bei Furlì hat untypischerweise einen steileren Abnahme als Zunahme. Der Anstieg beginnt relativ sanft und steigt bei rund 25ppb rapid zu einem Spitz zu. Die Durchgangskurve besitzt zwei schmale Peaks welche einen Zeitversatz von einer Stunde haben und so sehr nahe beieinander liegen. Die Maxima werden bei Furlì ungefähr zur selben Zeit wie bei Alt Stafel erreicht. Der erste Peak bei Furlì ist etwas tiefer als der Zweite mit 58 respektiv 84 ppb. Nach dem zweiten Peak nimmt die Konzentration schneller ab, als sie zugenommen hat. Zwei kurzzeitige Abnahmen der Konzentration sind am Fuss der abnehmenden Flanke zu erkennen, wobei letztere die Konzentration abrupt auf die Grundkonzentration zurückbringt.

Der Konzentrationsanstieg erreicht Schachen und Alt Stafel ungefähr zur selben Zeit. Bei Schachen gibt es eine Messunterbrechung von rund 11 Stunden während dem Anstieg. Der Unterbruch beim Anstieg folgte aufgrund leerer Batterien, welche später gewechselt wurden. Vor und nach dem Unterbruch steigt die Konzentration steiler an, als sie linear während dem Messunterbruch ansteigen würde. Das Maximum wird mit 0.6 ppb rund 18 Stunden nach Anstieg erreicht. Danach fällt die Konzentration langsamer ab als dass sie anstieg. Die Abnahme ist auffällig linear. Die Messung wird beendet, bevor die Ursprungskonzentration erreicht wird. Der Unterbruch und die frühe Beendigung erschweren eine Berechnung des Wiedererhalts. Wie beim Versuch 3-Wa zeigt auch diesmal die Durchgangskurve bei Schachen von Fluorometer 709 an einigen Stellen stärkere Fluktuationen. Die Zeiten der Fluktuationen sind jedoch nicht dieselben, der Start liegt jeweils zwischen 05:00 und 09:40, die Fluktuationsperioden dauern länger (über 12h) und die Zeit zwi-

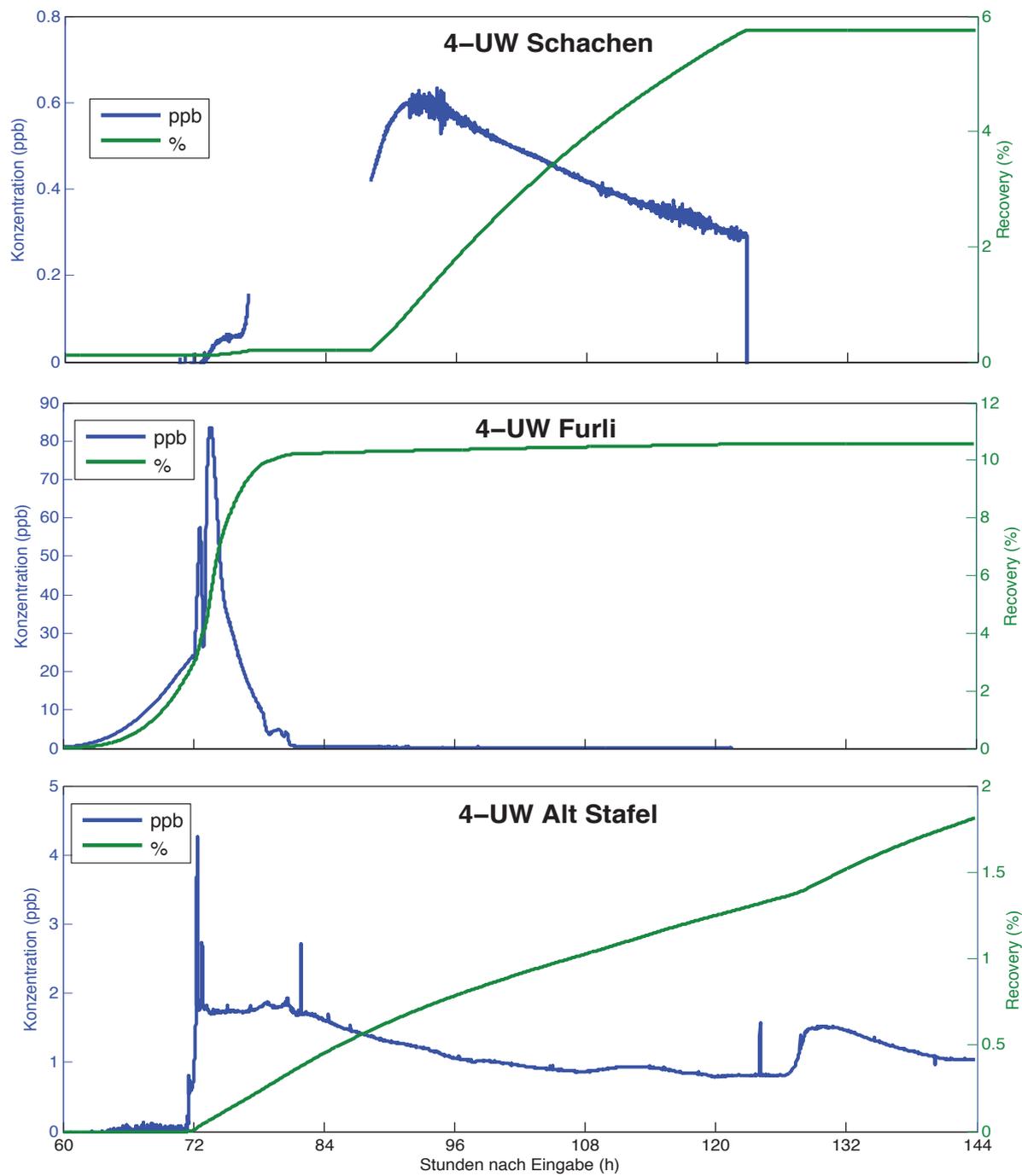


Abbildung 5.11: Konzentrationskurve und Wiedererhalt (Recovery) bei Schachen, Furli und Alt Stafel.

schen den Wiederholungen ist länger. Die Messintervalle waren bei beiden Versuchen gleich, es kann somit nicht an der Messanzahl liegen. Aus diesem Grund ist es unklar, ob bei beiden Daten die selben Ursachen für die Fluktuationen sorgten.

Die Form der Durchgangskurve von Alt Stafel ist untypisch für eine Tracerkurve mit Punktinjektion. Der Anstieg auf die Maximalkonzentration erfolgt in eineinhalb Stunden, also sehr schnell und fällt nach wenigen Maximalwerten mit bis zu 4.3 ppb auf ein leicht fluktuierendes Plateau von rund 1.8 ppb zurück. Das Konzentrationsmaximum besteht aus drei Blöcken mit je fünf Konzentrationsmessungen (also 2,5 Minuten) mit ungefähr gleicher Konzentration. Der erste Block hat eine Konzentration von 3.6, der Zweite von 4.2 und der Dritte von 2.7 ppb. Die ersten beiden Blöcken werden durch drei Messungen getrennt, zwischen dem zweiten und dritten Block liegen 22 Minuten. Das Plateau wird nach rund 10 Stunden durch einen weiteren Ausreisser beendet. Danach fällt die Konzentration langsam ab während den folgenden 40 Stunden. Nach einem weiteren Ausreisser steigt die Konzentration von 0.8 auf 1.5 ppb. Dieser zweite Anstieg gleicht in seiner Form mehr den sonst beobachteten Durchgangskurven. Nach dem Anstieg sinkt die Konzentration wieder, erreicht aber die Grundkonzentration nicht vor Abbruch der Messung.

Tabelle 5.3: Eckdaten und Resultate des vierten Markierngsversuchs. Bei der Messung in Alt Stafel ist die höchste Konzentration in Klammern geschrieben und die Plateau Konzentration als Maximalwert. Für Schachen ist der minimale Wiedererhalt angegeben, der aus der Kurve nach dem Unterbruch folgt. Der Zeitpunkt von 50% Wiedererhalt bleibt jedoch unbekannt

Versuch 4-UW			
Injektionsstelle	Unterweid	Abfluss [l/s]	0.5
Injektionszeit	15:00 10.10.2014		
Tracer	Uranin	Menge [g]	120
Resultate der Tracer Messungen			
	Schachen (907)	Furli R (902)	Alt Stafel (514)
Abfluss [l/s]	120	5-15 (10)	5-10 (7)
Luftdistanz [m]	1905	1598	1604
Erstes Signal	2d 23h 0'	2d 13h 50'	2d 22h 50'
Peak 1	3d 17h 30'	3d 0h 35'	3d 00h 20'
Peak 1 [ppb]	0.6	57.2	1.8 (4.2)
Peak 2	-	3d 1h 35'	3d 09h 40'
Peak 2 [ppb]	-	83.6	1.5
50 % Recovery	?	1d 13h 45'	4d 4h
Abbruch	5d 1h 20'	5d 1h 35'	5d 23h 35'
Abbruch [ppb]	0.3	83.7	1
Wiedererhalt [%]	min 6	5-16	1-3

Der gesamte Wiedererhalt entspricht maximal einem Fünftel der injizierten Masse. Furli zeigt den höchsten Wiedererhalt, bei Schachen ist er aufgrund des Messunterbruchs nicht bekannt.

Analytische Auswertung der Konzentrationskurven 4-UW

Für Schachen und Alt Stafel wurden keine DM oder MDM durchgeführt. Bei Schachen wurde dies aufgrund der Messlücke entschieden, bei Alt Stafel wegen der untypischen Form der Durchgangskurve. Der Konzentrationsverlauf bei Alt Stafel gleicht eher einer Durchgangskurve von einer kontinuierlichen Einspeisung (Injektion) als von einer Momentaneinspeisung. Für die Furli Quelle wurde ein MDM gewählt, um die verschiedenen Peaks und die Form nachbilden zu können. Der erste Versuch wurde mit 3 Kurven durchgeführt. Es zeigt sich aber, dass dies den verlangsamten Abfall nach dem zweiten Peak schlecht modelliert, weshalb eine vierte Kurve addiert wurde (Abbildung 5.12). Die Kurven 2 und 3 liegen sehr nahe beieinander, der Abstand zwischen den Maxima beträgt zwei Stunden (Tabelle 5.4). Die erste Kurve trägt zu über 50% des Rückerhalts bei. Die beiden Kurven, welche die beiden Peaks bilden, machen nur 2% respektive 13% des Rückerhalts aus. Beide Kurven sind durch einen extrem kleinen Dispersionsparameter geprägt, was zu ihrer schmalen Form führt. Die beiden Konzentrationsabnahmen am Ende der Kurve wurden mit dem MDM nicht simuliert, da aufgrund ihrer Form angenommen wird, dass sie nicht durch verschiedene Fließwege zustande kamen.

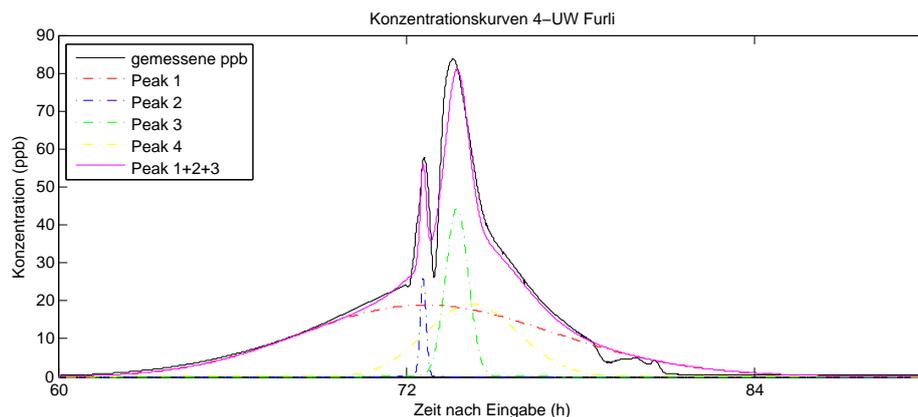


Abbildung 5.12: Gemessene Konzentration (schwarz) und modellierte Konzentration bei Furli. Die modellierte Konzentration (magenta) setzt sich aus der Überlagerung vier einzelner Durchgangskurven zusammen, hier Peaks genannt.

Tabelle 5.4: Fließparameter der Kurven des MDM von Furli

Versuch 4-UW: Resultate der analytischen Auswertung				
Furli R				
	Kurve 1	Kurve 2	Kurve 3	Kurve 4
t_0 [s]	263000	261300	265500	267500
t_0	3d 1h 5'	3d 0h 25'	3d 1h 45'	3d 2h 20'
v_m [m/h]	22	22	22	22
P_D [-]	0.0018	10^{-6}	$1.4 \cdot 10^{-5}$	0.00023
α_L [m]	4-12	0.002-0.006	0.003-0.009	0.5-1.5
%	62	2	13	23

Die Dispersivitäten aller Kurven liegen unter den typischen Karst Dispersivitäten (Tabelle 5.4). Die Dispersivität der ersten Kurve ist jedoch vergleichbar mit den bisher gemessenen Dispersivitäten bei Schachen. Sie liegt jedoch deutlich unter der berechneten Dispersivität bei Furli beim Versuch 3-Wa. Die Abstandsgeschwindigkeit ist ebenfalls kleiner (22 statt 38 m/h) als beim vorangegangenen Versuch.

5.2.4 Markierungsversuch 5-CA

Der fünfte Markierungsversuch soll untersuchen, ob das Wasser vom Chalberalpeleli zu den Töb-
lerenquellen fliesst (hier Krähloch), wie vom KARSYS Modell gedeutet, oder ob das Wasser zum
Kreuzloch fliesst, was den Beobachtungen der Höhlenforscher entspricht. Zudem wurde auch bei
Laueli ein Fluorometer installiert. Sowohl bei Kreuzloch als auch bei Krähloch konnte die hy-
draulischen Verbindung bestätigt werden. Ausserdem gibt es zu Laueli schwache Andeutungen
auf eine Verbindungen.

Konzentrationsmessungen 5-CA

Die Dauer zwischen Injektion und Konzentrationsanstieg ist beim fünften Versuch am kürzesten.
Ein Anstieg wird bei KLBS und Krähloch gleichzeitig nach 18 Stunden registriert (Tabelle 5.5). Bei
Krähloch ist jedoch nicht sicher, ob es zuvor einen weiteren Anstieg gab, da der Fluorometer erst
nach 18 Stunden installiert wurde und der Startwert von 13 ppm über dem Endwert von rund 10
ppb liegt (Abbildung 5.13).

Tabelle 5.5: Eckdaten und Resultate des fünften Markierungsversuchs.

Versuch 5-CA			
Injektionsstelle	Chalberalpeleli (südliche Schwinde)	Abfluss [l/s]	5
Injektionszeit	15:00 16.10.2014		
Tracer	Uranin	Menge [g]	120
Tracer Messungen			
	KLBS (514)	Krähloch (907)	Laueli (901 & 902)
Abfluss [l/s]	40-60 (50)	3	15-20 (18)
Luftdistanz [m]	1816	1515	2050
Erstes Signal	0d 18h 05'	0d 18h 00'	-
Peak 1	0d 20h 10'	0d 20h 40'	-
Peak 1 [ppb]	17	0.9	-
Peak 2	4d 14h 50'	-	-
Peak 2 [ppb]	0.6	-	-
50 % Recovery	0d 21h 05'	1d 16h 00'	-
Abbruch	6d 22h 05'	6d 18h 45'	6d 18h 35'
Abbruch [ppb]	0.7	0	0.1
Wiedererhalt [%]	7-10	0.2	-

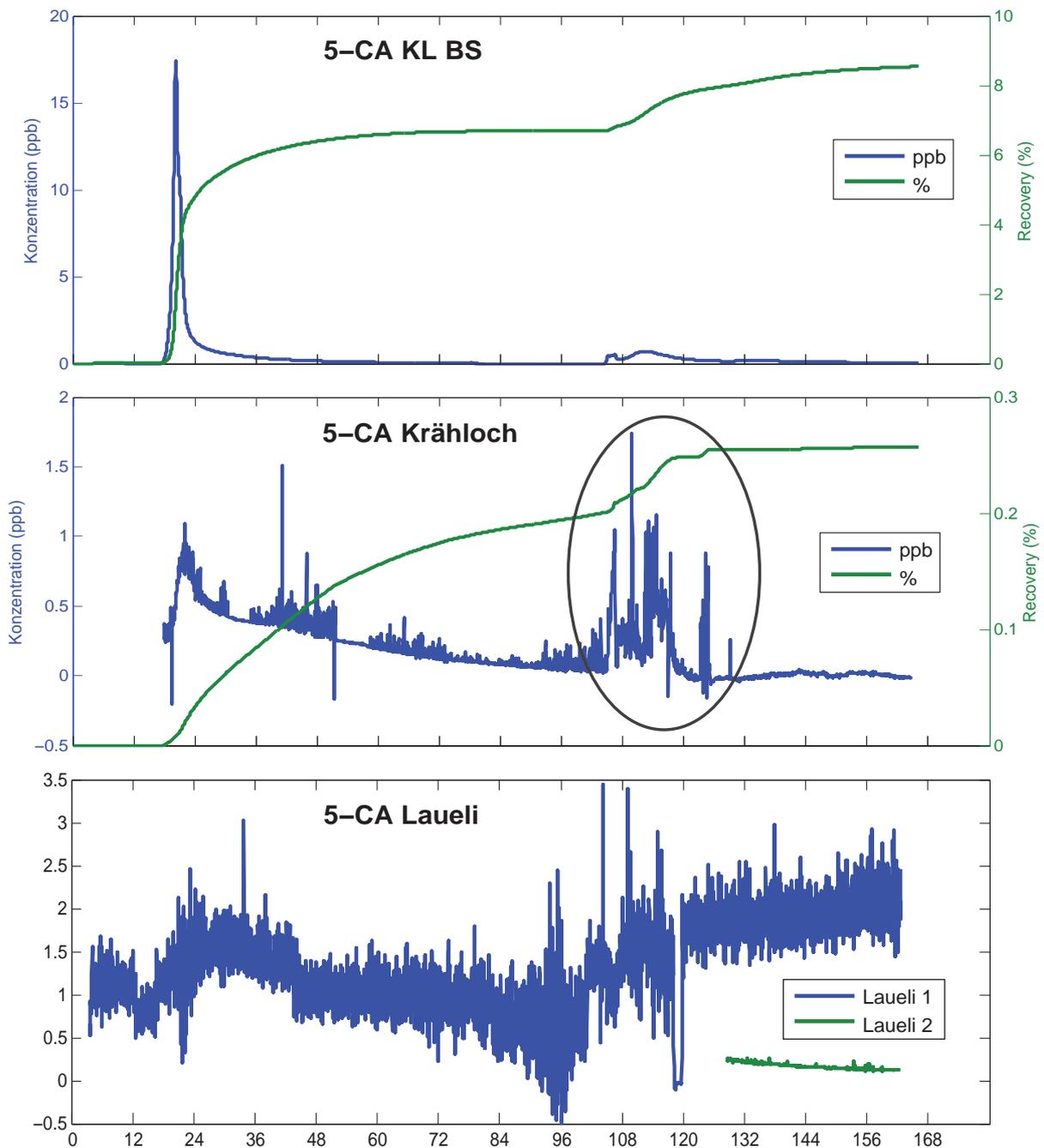


Abbildung 5.13: Konzentrationskurve und Wiedererhalt (Recovery) bei KLBS, Krähloch und Laueli. Der grau umkreiste Abschnitt bei Krähloch ist durch Luftbläschen im Fluorometer entstanden, welche die erhöhten Konzentrationsmessungen suggerieren. Bei Laueli wurde ein zweiter Fluorometer installiert, nachdem die Messstörung des Ersten bemerkt wurde.

Bei KLBS wird mit 17 ppb die höchste Konzentration gemessen. Die Konzentrationskurve steigt relativ abrupt und schnell zum Maximum und fällt am Fuss der fallenden Flanke langsamer ab (Abbildung 5.13). Die fallende Flanke ist durch einen leichten Buckel geprägt, welcher

in Abbildung 5.14 besser sichtbar ist. Nach 4 Tagen wird ein zweiter, sehr kleiner Peak gemessen, der ein Maximum von 0.6 ppb erreicht.

Die Durchgangskurve von Krähloch wird durch mehr und weniger starke Fluktuationen gestört (Abbildung 5.13), welche mehrheitlich nach oben ausschlagen. Nach 100 Stunden werden die Fluktuationen stärker (grau umkreist) bis sie rund 22 Stunden später aufhören. Danach ist die Konzentration relativ konstant. Als das Gerät abmontiert wurde, floss kein Wasser mehr durch das Rohr in den Fluorometer. Die starken Fluktuationen gegen Ende der Messung wurden wahrscheinlich durch Luftbläschen im Wasser verursacht. Ab dem Punkt wo die Konzentration konstant ist, floss wahrscheinlich kein Wasser mehr durch das Gerät. Die Fluktuationen vor der Störung könnten ebenfalls von Luftbläschen stammen. Da die Ausschläge nur nach oben gehen, abgesehen von zwei Ausnahmen, wird für weitere Analysen angenommen, dass die tatsächliche Konzentrationskurve den Minimalwerten der Kurve folgt und nach rund 100 Stunden endet.

Der Fluorometer bei Laueli (902) hatte wahrscheinlich eine Messstörung. Während dem Versuch wurde bemerkt, dass die Konzentrationen stark fluktuierte, weshalb nach fünf Tagen ein zweiter Fluorometer (901) installiert wurde (grüne Linie in Abbildung 5.13). Die Messungen des zweiten Geräts fluktuieren weitaus weniger und haben tiefere Konzentrationswerte als die des Ersten. Fluorometer 901 verzeichnet in den zwei Messtagen eine deutliche Konzentrationsabnahme von 0.25 auf 0.13 ppb.

Analytische Auswertung der Konzentrationskurven 5-CA

Die beste Annäherung an die Durchgangskurve von KLBS wurde mit einer Überlagerung zweier Durchgangskurven erreicht (MDM)(Abbildung 5.14). Dabei wird der Grossteil der Rückgewinnung nicht durch die Kurve erzeugt, welche das Maximum prägt, sondern durch jene, welche den Buckel der fallenden Achse formt. Die ersten Versuche, die Durchgangskurve zu simulieren, bauten auf einer grossen ersten Kurve und einer kleineren Kurve für den Nachbuckel. Mit dieser Massenaufteilung war die Nachbildung des Nachbuckels und der fallenden Flanke jedoch unbefriedigend, weshalb die Proportionen geändert wurden. Die umgekehrten Proportionen ermöglichen kleinere Abweichungen zur gemessenen Kurve. Die Basis der Kurve wird jedoch breiter simuliert, der Buckel ist weniger klar ausgebildet und das Tailing nicht vorhanden.

Die Modellierung der Krähloch Kurve wird durch den verspäteten Messstart erschwert. Für die Modellierung wurde angenommen, dass die Konzentration bei Null beginnt. Die beschleunigte Konzentrationszunahme kann mit einer Kurve nicht modelliert werden, das ausgeprägte Tailing noch weniger. Aufgrund der fehlenden Kenntnisse der Anfangskonditionen wurde jedoch auf ein Nachbilden des Tailings durch weitere Kurven verzichtet. Der oberste Bereich der Kurve wird mit dem DM relativ gut simuliert.

Die fehlenden Prozente bei KLBS gehören zum Tailing, welches bei der Modellierung nicht berücksichtigt wurde (Tabelle 5.6. Peak 2 liefert 80% des Wiedererhalts, Peak 1 5%. Um die Kurve bei Krähloch an die Gemessene anpassen zu können, musste die zurückgewonnene Masse um fast das Doppelte erweitert werden. Mit diesen 180% wird jedoch nur die Kurve nachgebildet, für das Tailing wären weitere Kurven und mehr rückgewonnene Masse nötig.

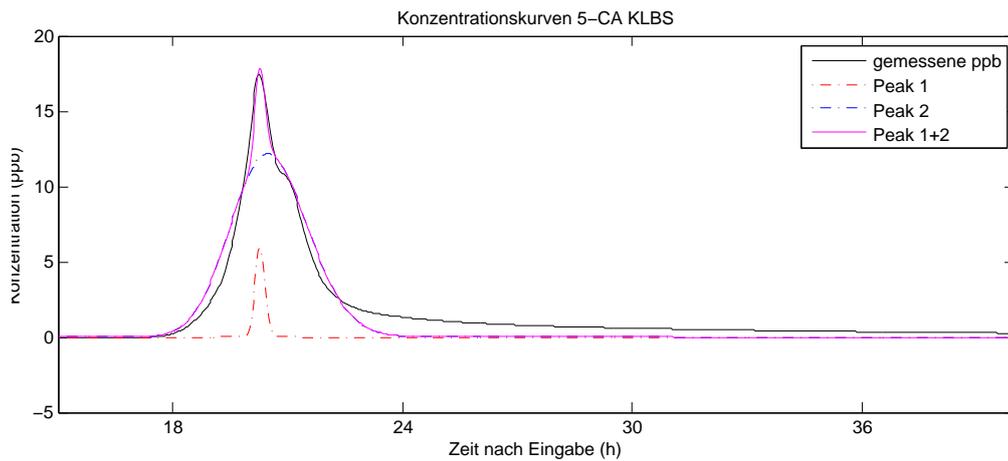


Abbildung 5.14: Gemessene Konzentration (schwarz) und modellierte Konzentration bei KLBS. Die Modellierte Konzentration (magenta) setzt sich aus der Überlagerung von zwei Durchgangskurven (Peaks) zusammen.

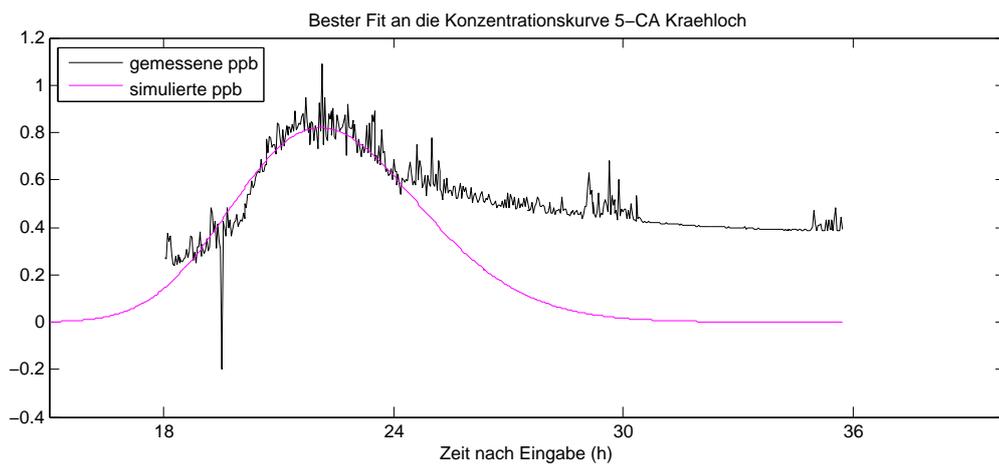


Abbildung 5.15: Gemessene Konzentration (schwarz) und modellierte Konzentration bei Krähloch.

Tabelle 5.6: Fließparameter der Dispersionsmodelle von KLBS und Krähloch

Versuch 5-CA: Resultate der analytischen Auswertung			
	KLBS (514)		Krähloch (907)
	Kurve 1	Kurve 2	Kurve 1
t_0 [s]	73000	74000	81000
t_0	0d 20h 15'	0d 20h 35'	0d 20h 35'
v_m [m/h]	116	115	67
P_D [-]	0.00002	0.0012	0.006
α_L [m]	0.05-0.15	2.8-8.7	12-36
%	5	80	180

Angenommen, die Grundkonzentration bei Krähloch ist 0 ppb, bedeutet dies, dass die Rückge-

winnung beim Krähloch ungefähr das Dreifache von Tabelle 5.5 beträgt, also 0.6%. Die Abstandsgeschwindigkeiten zwischen Chalberalpeli, KLBS und Krähloch sind die höchsten aller Markierungsversuche mit Uranin. Die Dispersivitäten sind vergleichbar mit den bisher gemessenen.

5.2.5 Markierungsversuch 6-RL

Der sechste Versuch wurde rund drei Monate nach dem fünften Versuch im Januar durchgeführt und widmet sich wieder dem Abfluss des Riedlochs, welcher bei den ersten beiden Versuchen nicht ermittelt werden konnte. In erster Linie sollte wieder die hydraulische Verbindung zum Kreuzloch untersucht werden. Um das Risiko von Messstörungen zu vermindern wurden an zwei KL-Standorten Fluorometer installiert (KLH und KLBS). Der dritte Fluorometer wurde bei Schachen installiert. Die Resultate bestätigen die hydraulische Verbindung zwischen dem Riedloch und allen drei Standorten.

Konzentrationsmessungen 6-RL

Tabelle 5.7: Eckdaten und Resultate des sechsten Markierungsversuchs. Die Zahl in Klammer (z.B. 907) ist die Seriennummer des Fluorometers. 50% Recovery ist die Zeit, nach der 50% des gesamthaft gemessenen Markierungsstoffes durch die Messstelle geflossen ist.

Versuch 6-RL			
Injektionsstelle	Riedloch	Abfluss [l/s]	1
Injektionszeit	10:40 26.01.15		
Tracer	Uranin	Menge [g]	160
Tracer Messungen			
	Schachen (902)	KLH (514)	KLBS (907)
Abfluss [l/s]	40	10-18 (14)	13-20 (17)
Luftdistanz [m]	2832	1522	2000
Erstes Signal	6d 06h 20'	5d 00h 35'	5d 06h 15'
Peak 1	7d 03h 45'	6d 20h 45'	7d 03h 50'
Peak 1 [ppb]	0.7	16.4	14.7
Peak 2	8d 0h 20'	-	-
Peak 2 [ppb]	1.4	-	-
Peak 3	8d 14h 35'	-	-
Peak 3 [ppb]	1.3	-	-
Peak 4	9d 12h 50'	-	-
Peak 4 [ppb]	0.8	-	-
50 % Recovery	8d 07h 45'	7d 03h 25'	7d 12h 55'
Abbruch	9d 23h 05'	10d 01h 20'	10d 06h 00'
Abbruch [ppb]	0.7	1.5	1.9
Wiedererhalt [%]	7.2	21.7-39.1	25.3-38.9

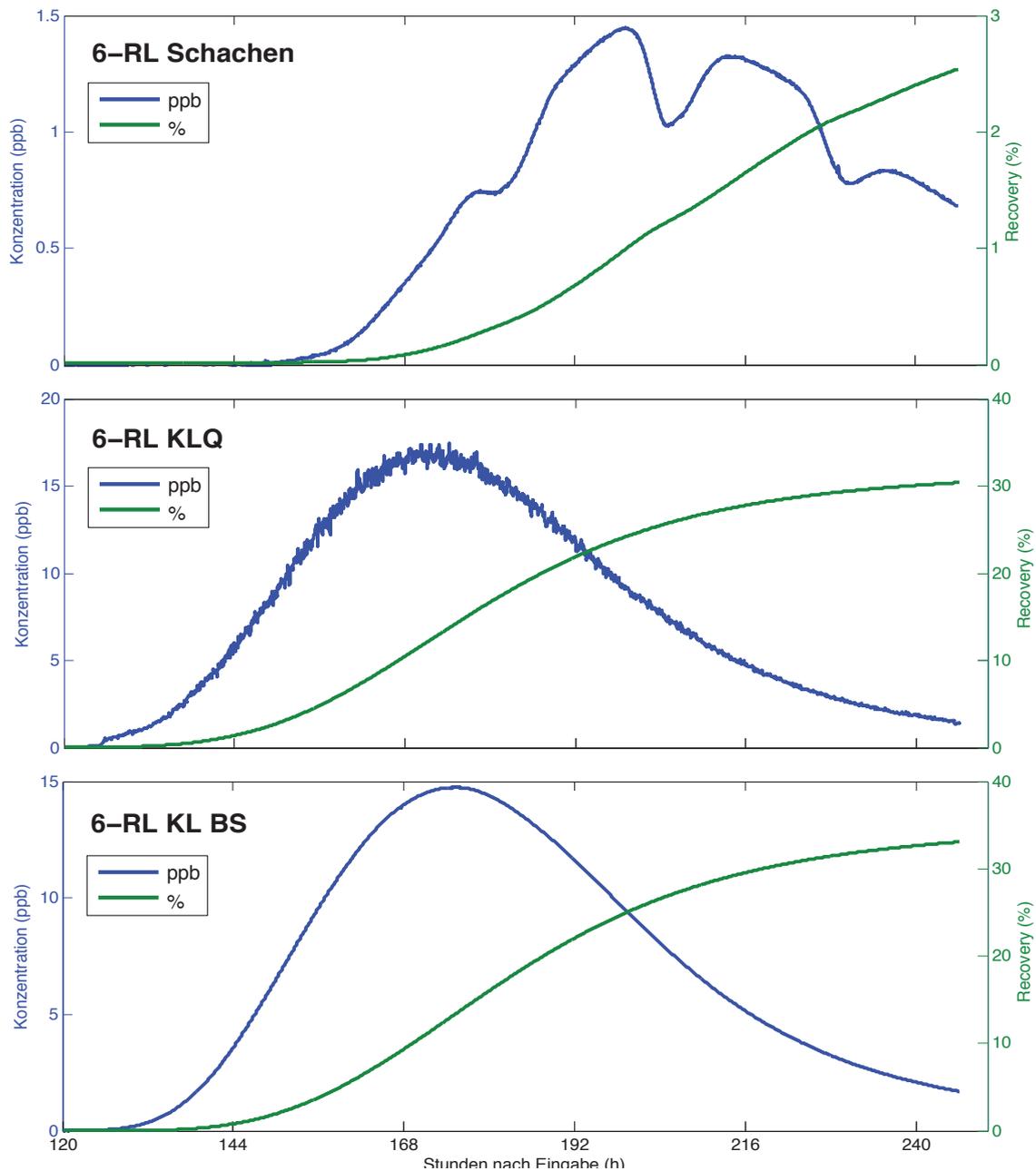


Abbildung 5.16: Konzentrationskurve und Wiedererhalt (Recovery) bei Schachen, KLH und KLBS.

Der erste Konzentrationsanstieg wurde in KLH gemessen. Nach 5 Tagen steigt die Konzentration langsam an, bis nach fast 7 Tagen das Maximum mit 16.4 ppb erreicht wird (Tabelle 5.7, Abbildung 5.16). Die Konzentrationskurve besteht aus einem einzigen Peak und hat ein leichtes Tailing. Auffallend sind die leichten Fluktuationen, welche sich mit zunehmender Konzentration verstärken. Die Fluktuationen werden als Artefakt behandelt, da solche Fluktuationen beim Fluorometer 514 häufig beobachtet wurden.

Die Kurve bei KLBS gleicht stark der Kurve von KLH. Sie ist jedoch um rund 7 Stunden verschoben und erreicht eine leicht tiefere Konzentration von 14.7 ppb (Tabelle 5.7). Das Tailing ist bei beiden KL-Standorten gleich ausgeprägt.

Die Schachenquelle erreicht das Uranin zuletzt nach über sechs Tagen. Die Kurve enthält vier Maxima, wobei das erste Maximum zur selben Zeit wie der Peak bei KLBS gemessen wird. Die Konzentration ist bei Schachen jedoch um einiges tiefer als bei den anderen beiden Quellen und steigt nicht über 0.7 ppb. Der erste und der vierte Peak bewegen sich ungefähr auf derselben Höhe. Die mittleren Peaks werden durch einen schärferen Einschnitt getrennt. Ihre Form entspricht nicht der Idealform einer Durchgangskurve nach dem DM. Die Messung wurde abgebrochen, bevor die Grundkonzentration erreicht wurde. Es ist unbekannt, ob weitere Peaks folgten. Bis zum Abbruch wurden bei Schachen rund 7% des injizierten Uranins wiedererhalten. Bei den KL-Standorten liegt der Anteil an wiedererhaltenem Uranin bei über 21%.

Analytische Auswertung der Konzentrationskurven 6-RL

Für die Auswertung der beiden KL-Standorten wurde das DM verwendet, für Schachen das MDM. Sowohl bei KLH als auch bei KLBS steigt die Konzentration schneller an als durch das DM simuliert. Die Annäherung an die Konzentrationskurve von Schachen mit dem MDM gestaltet sich schwierig. Durch die Überlagerung von vier Kurven kann die Durchgangskurve nicht gut nachgebildet werden (Abbildung 5.19). Besonders die mittleren beiden Maxima haben eine Form, welche nicht einer typischen Durchgangskurve entsprechen. Durch das Hinzufügen von weiteren Kurven könnte die Konzentrationskurve besser nachgebildet werden. Es ist jedoch nicht sicher, dass die Form der Durchgangskurve aus mehreren Kurven besteht, die auf verschiedene Fließwege hinweisen würden. Aus diesem Grund wurde darauf verzichtet, die Annäherung an die Durchgangskurve von Schachen weiter zu verbessern. Die aktuelle Annäherung widerspiegelt ungefähr den Charakter der gemessenen Kurve.

Tabelle 5.8: Fließparameter der Dispersionsmodelle KLBS und Schachen

Versuch 6-RL: Resultate der analytischen Auswertung						
	KLH	KLBS	Schachen			
	Kurve	Kurve	Kurve 1	Kurve 2	Kurve 3	Kurve 4
t_0 [s]	615000	650000	614000	683000	748000	828000
t_0	7d 02h 50'	7d 12h 35'	7d 2h 35'	7d 21h 45'	8d 15h 45'	9d 14h
v_m [m/h]	8.9	11.1	17	15	14	12
P_D [-]	0.0085	0.01	0.001	0.0006	0.0006	0.0015
α_L [m]	19-58	23-72	4-11	2-7	2-7	6-17
%	100	100	17	27	25	31

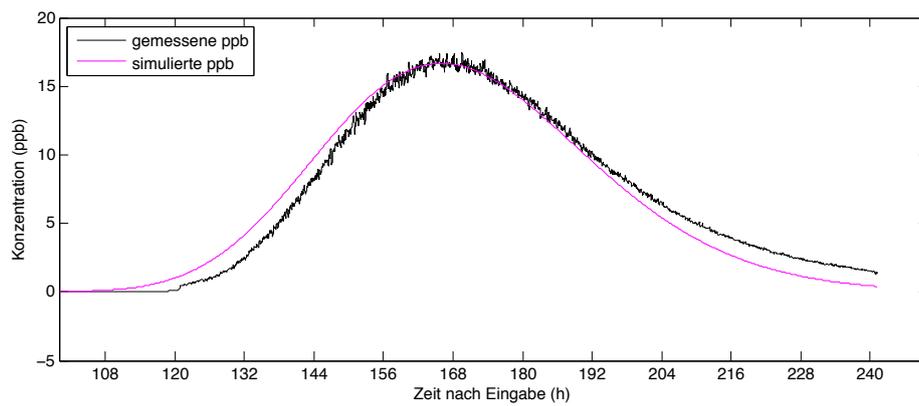


Abbildung 5.17: Gemessene Konzentration (schwarz) und modellierte Konzentration (magenta) bei KLH.

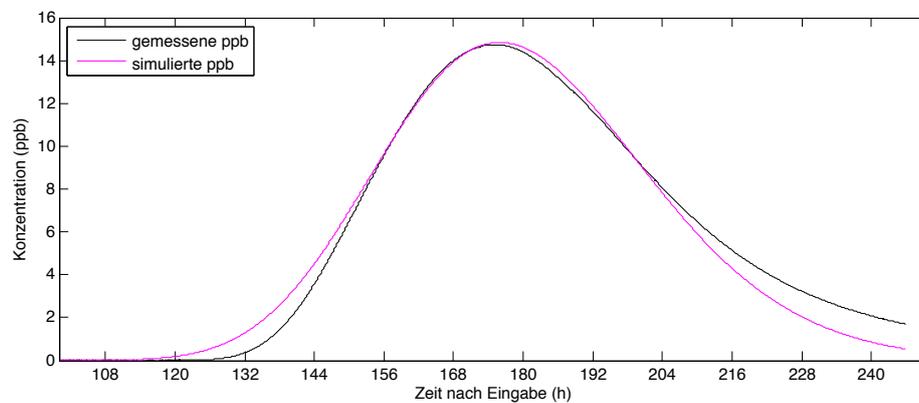


Abbildung 5.18: Gemessene Konzentration (schwarz) und modellierte Konzentration (magenta) bei KLBS.

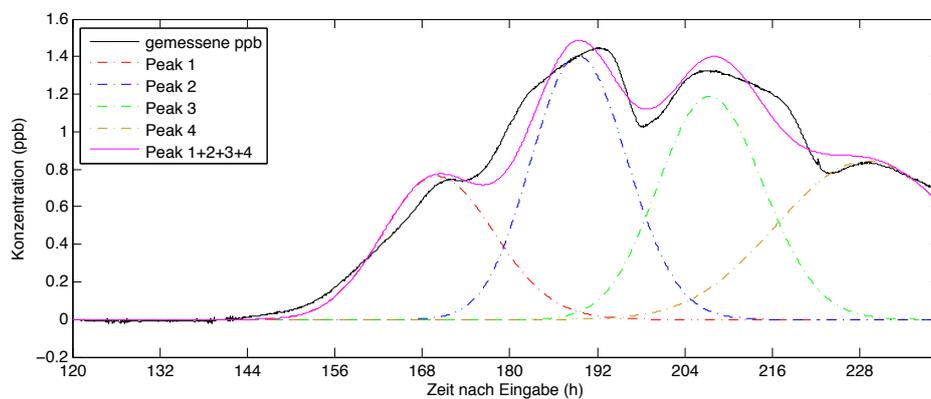


Abbildung 5.19: Gemessene Konzentration (schwarz) und modellierte Konzentration bei Schachen. Die Modellerte Konzentration (magenta) setzt sich aus der Überlagerung vier einzelner Durchgangskurven zusammen, hier Peaks genannt.

5.2.6 Markierungsversuche 7-KL und 8-KL

Die letzten beiden Markierungsversuche mit Salz wurden durchgeführt, um eine mögliche Verbindung zwischen dem Bach von KLH und KLBS zu untersuchen. Der Tracerversuch vom Chaberalpeli bzw. dessen Interpretation geht davon aus, dass das Wasser, welches in die Brunnstube des Kreuzlochbrunnens fließt, dasselbe ist wie jenes, welches den Kreuzlochsee füllt. Beim Versuch 6-RL wird ebenfalls davon ausgegangen. Bei den Wasserprobennahmen arbeitete man von Anfang her mit der Annahme, dass zumindest für die EL und für die Isotope Proben am Kreuzlochbrunnen stellvertretend für das Wasser im Kreuzloch genommen werden können. Diese Annahmen sprachen für einen weiteren Markierungsversuch zwischen KLH und KLBS. Da es von der Kreuzloch Höhle zwei Abflüsse gibt, wurde für jeden Abfluss ein Versuch durchgeführt mit einem zeitlichen Abstand von zwei Wochen.

Konzentrationsmessungen bei KLBS

Tabelle 5.9: Eckdaten und Resultate des siebten und achten Markierungsversuchs. 50% Recovery ist die Zeit, nach der 50% des gesamthaft gemessenen Markierungsstoffes durch die Messstelle geflossen ist. Beim ersten Versuch kann aufgrund der Messlücke der Wiedererhalt nur geschätzt werden. Der geschätzte Wiedererhalt ist kursiv in der Tabelle vermerkt.

Salz-Tracer Versuch 7-KL & 8-KL		
	7-KL	8-KL
Injektionszeit	09:45 09.03.15	08:35 23.03.15
Injektionsstelle	KLH Seeabfluss	KLH Unterabfluss
Abfluss [l/s]	1	10
Pegel See	7.2 cm	10 cm
Salzmenge[kg]	5	7.3
Tracer Messungen bei KLBS		
	7-KL	8-KL
Abfluss [l/s]	15	15
Luftdistanz [m]	520	520
Grundkonzentration [mg/l]	270	266
Erstes Signal	3h 6'	3h
Peak 1	3h 55'	4h 25'
Peak 1 [mg]	274	287
Peak 2	5h 7'	-
Peak 2 [mg]	279	-
50 % Recovery	?	4h 45'
Abbruch	8h 5'	8h
Abbruch [ppb]	272	268
Wiedererhalt [%]	23	25

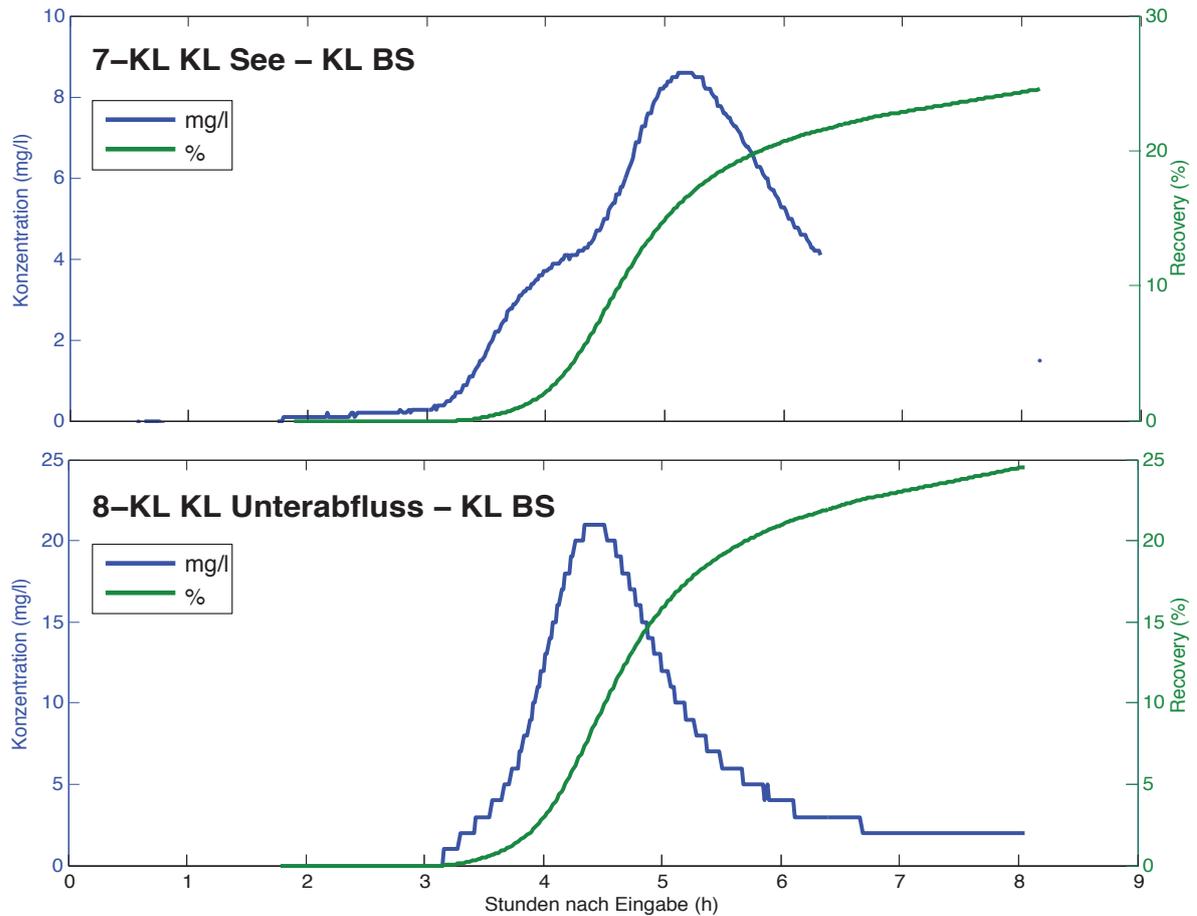


Abbildung 5.20: Konzentrationskurve und Wiedererhalt (Recovery) bei KLBS von beiden von beiden Salzinjektionen. Die Konzentration ist die gemessene Konzentration abzüglich der Grundkonzentration.

Der Anstieg erfolgt bei beiden Versuchen ungefähr drei Stunden nach Injektion (Abbildung 5.20). Beim ersten Salzversuch (Injektion über den See Abfluss) steigt die Konzentration in zwei Etappen. Die Durchgangskurve hat beim Aufstieg einen Vorbuckel, der rund 4 Stunden nach Injektion mit rund 4 mg/l erreicht wird. Danach steigt die Konzentration wieder schneller, bis sie rund 5 Stunden nach Injektion das Maximum von 9 mg/l erreicht. Während der Konzentrationsabnahme wurde um 16:00 unbeabsichtigt die Messung gestoppt. Der Fehler wurde erst vor dem Abmontieren des Messgeräts bemerkt, als die Konzentration nochmals gemessen wurde. Die Endkonzentration betrug rund 1 mg/l mehr als die Grundkonzentration. Trotz Lücke in der Messung ist die Abnahme der Leitfähigkeit bis zur letzten Messung erkennbar. Es ist jedoch möglich, dass die Konzentrationsabnahme nicht einer idealen Kurve folgt. Aufgrund der Messlücke ist der Wiedererhalt und die Zeit, bei der 50% des Wiedererhalts gewonnen wurde, nicht bekannt. Bis zum Messunterbruch wurden 927g zurückgewonnen (19 %). Aufgrund der letzten Messung wird angenommen, dass die fehlende Rückgewinnung einen Fünftel bis einen Viertel der bereits zurückgewonnenen Masse ausmacht. Der geschätzte Wiedererhalt liegt somit bei ca. 1230g (23 %) und wird in der Tabelle 5.9 kursiv hervorgehoben. Beim zweiten Salzversuch (Injektion in den

Unterabfluss) steigt die Konzentration schneller an als beim ersten Versuch und erreicht nach 4 Stunden und 25 Minuten das Maximum (Tabelle 5.9). Die maximale Konzentration ist mit einer Differenz zur Grundkonzentration von 21 mg/l deutlich höher als beim ersten Salzversuch.

Bei beiden Versuchen fällt die Konzentration innerhalb der Messzeit nicht auf die Grundkonzentration zurück, sondern wird durch ein Tailing länger hoch gehalten. Die stufenartigen Konzentrationsänderungen der zweiten Messung entstanden, weil das Messgerät automatisch auf ganzzahlige Werte rundete.

Die maximale Konzentrationsdifferenz ist beim zweiten Versuch mehr als doppelt so gross wie beim ersten. Trotzdem ist der prozentuale Wiedererhalt bei beiden Versuchen ungefähr gleich, da die Kurve des ersten Versuchs breiter ist und beim zweiten Versuch 2.3 kg Salz mehr eingespiessen wurden.

Analytische Auswertung der Salzmessungen

Für die Annäherung an die Konzentrationskurve des ersten Versuches wurde ein MDM verwendet mit einer Überlagerung von drei verschiedenen Kurven (Abbildung 5.21). Die erste Kurve bildet den Vorbuckel beim Konzentrationsanstieg. Er beinhaltet 13 % der wiedererhaltenen Masse (Tabelle 5.10) und hat zu KLBS eine mittlere Fließzeit von 4 Stunden. Der mittlere Peak formt das Maximum der Durchgangskurve und beinhaltet knapp mehr als die Hälfte der wiedergewonnenen Masse. Seine mittlere Fließzeit beträgt rund 2h 15min. Die letzte Kurve simuliert das Tailing, welches anhand der letzten Messung angenommen wird. Die simulierte Kurve überschneidet damit den letzten Messpunkt. Durch die Überlagerung der drei Kurven wird die gemessene Durchgangskurve relativ gut nachgebildet. Eine Ausnahme bildet die Messlücke, wo keine Aussage darüber gemacht werden kann. Die letzten Messungen deuten aber auf ein flacheres Tailing hin als modelliert wurde.

Tabelle 5.10: Fließparameter der Dispersionsmodelle beider Salzversuche

Versuch 7-KL und 8-KL: Resultate der analytischen Auswertung				
	7-KL (See)			8-KL
	Kurve 1	Kurve 2	Kurve 3	(Unterabfluss)
t_0 [s]	14260	18990	26400	16340
t_0	4h 00'	5h 15'	7h 20'	4h 30'
v_m [m/h]	127	95	69	115
P_D [-]	0.0045	0.007	0.022	0.009
α_L [m]	3-9	5-14	14-44	6-18
%	13	53	34	100

Die Konzentrationskurve des zweiten Versuchs wurde mit nur einer Kurve nachgebildet. Im oberen Bereich ist die simulierte Kurve leicht breiter als die gemessene. Nach der Hälfte der fallenden Achse trennen sich beide Kurven, da das Dispersionsmodell das gemessene Tailing nicht simuliert. Ansonsten simuliert das DM die Konzentrationskurve gut. Die mittlere Fließzeit für die gemessene Kurve beträgt 4h 30min und liegt damit zwischen der ersten und zweiten Kurve

des ersten Salzversuchs.

Den höchsten Dispersionsparameter hat die dritte Kurve des ersten Versuchs. Die Parameter des zweiten Versuchs und der mittleren Kurve des ersten Versuchs sind sich relativ ähnlich. Die erste Kurve des ersten Versuchs hat den kleinsten Dispersionsparameter. Die mittleren Fließzeiten sind kürzer als die angenommene mittlere Fließzeit, welche aufgrund des Versuchs 6-RL auf 8 Stunden geschätzt wurde.

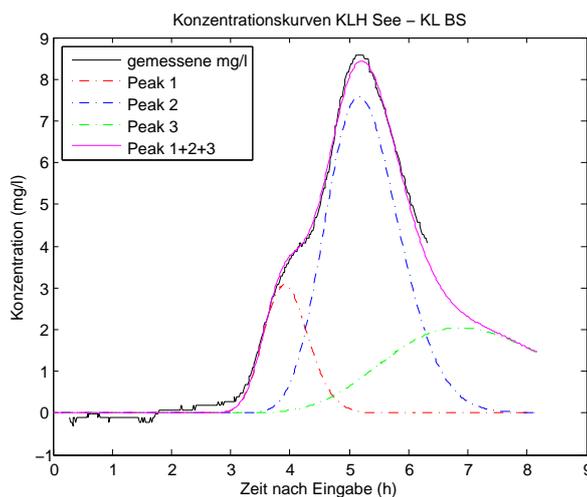


Abbildung 5.21: Gemessene Konzentration (schwarz) und modellierte Konzentration (magenta) des ersten Salzversuchs. Die Modellierte Konzentration setzt sich aus der Überlagerung drei einzelner Durchgangskurven zusammen, hier Peaks genannt.

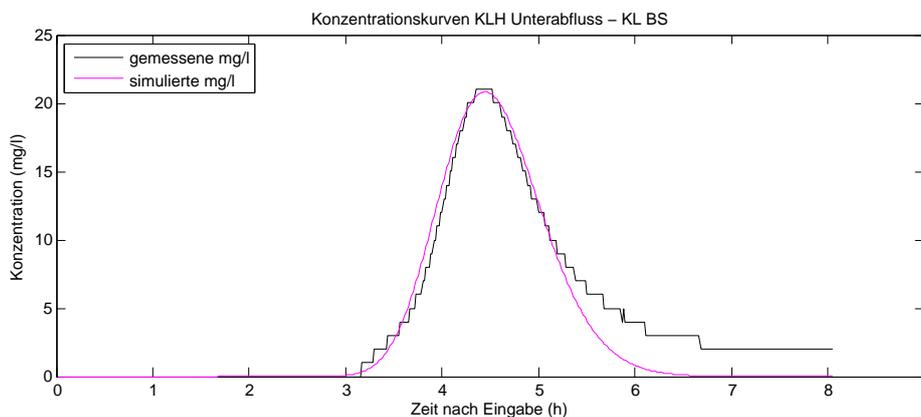


Abbildung 5.22: Gemessene Konzentration (schwarz) und modellierte Konzentration (magenta) des ersten Salzversuchs.

Kapitel 6

Diskussion

6.1 Interpretation der Resultate

6.1.1 Interpretation der hydrochemischen Daten

Wassertemperatur

Das Sinken der Wassertemperaturen im Herbst geht mit dem Sinken der Lufttemperaturen einher. Die tiefsten Wassertemperaturen korrelieren zeitlich mit einer kalten Periode, bei welcher zwischen dem 20.01.15 und dem 10.02.15 vorwiegend negative Lufttemperaturen auf Wannern verzeichnet wurden.

Die saisonale Konstanz der Wassertemperaturen in Studen bedeutet, dass das Wasser einen längeren unterirdischen Fliessweg ohne starken Austausch mit den Aussenbedingungen hinter sich hat.

Der Grund für die deutlich geringere Temperaturstreuung zwischen den Quellen im Sommer als im Winter kann daran liegen, dass im Sommer bei KLH und KLBS noch keine Messungen durchgeführt wurden. KLH hat im Frühherbst die tiefsten Wassertemperaturen um die 6°C und trägt dadurch zu einer Zunahme der Temperaturstreuung bei.

Die stärksten saisonalen Differenzen der Wassertemperatur, welche bei Laueli gemessen wurden, können durch zwei verschiedenen Gründe hervorgerufen werden. Entweder kann sich die Wassertemperatur nach der Infiltration nicht an die Bodentemperatur anpassen, weil die Distanz zu klein, die Schüttung zu gross und/oder die Fliessgeschwindigkeit zu schnell ist. Oder der Temperaturexaustausch mit der Oberfläche ist vor dem Quellaustritt so stark, dass sich die Wassertemperatur an die Aussentemperatur anpasst. Für die erste Erklärung könnte sprechen, dass Laueli die Quelle mit der grössten Basisschüttung nach Studen und Schachen ist. Die Schüttung bei KLH ist jedoch nicht viel geringer und trotzdem scheint die Wassertemperatur beim KLH deutlich konstanter zu sein. Die Auswirkung der Schüttung wird hier deshalb als vernachlässigbar angenommen. Über die Fliessgeschwindigkeit kann keine Aussage gemacht werden, da Laueli nicht aus einer begehbaren Höhle tritt. Eine kürzere Fliessdistanz ist zumindest für ein Bruchteil der Gesamtschüttung gut denkbar, da diffuse Infiltration oberhalb von Laueli plausibel scheint. Dieser Bereich besteht aus Schuttmasse (Hantke 2009), welcher eine höhere Durchlässigkeit hat. Die Stärke der Durchlüftung vor dem Quellaustritt bei Laueli ist schwer einzuschätzen. Die Luftzirkulation wird aber kaum stärker sein als bei KLH.

Nach Laueli verzeichnen die Messungen bei Chäsloch die stärksten Temperaturschwankungen. Als mögliche Gründe kommen dieselben wie bei Laueli in Frage. Eine besonders starke Durchlüftung, welche die Wassertemperaturdifferenz zwischen Chäsloch und KLH erklären könnte, wurde jedoch bei bisherigen Höhlentouren nicht beobachtet. Eine kürzere Fließdistanz, z.B. durch diffuse Infiltration ist ein möglicher Grund. Zudem kann auch die Messstelle bei Chäsloch einen signifikanten Einfluss auf die Wassertemperatur haben, da das Wasser ausserhalb der Höhle gemessen wurde. Bis zur Messstelle hat das Wasser 4-6 m in der Luft oder über Moospolster und Geröll zurückgelegt. Die Kontaktfläche zur Luft oder Oberfläche ist relativ hoch, da die Quelle eine geringe Schüttung hat.

Die stärkere Wassertemperaturschwankung bei Schachen als bei Studen weist darauf hin, dass Schachen nicht nur von tiefem Grundwasser gespiesen werden kann, sondern vorwiegend durch Zuflüsse gespiesen wird, welche höhere Fließgeschwindigkeiten haben und stärker dem saisonalem Einfluss unterliegen. Die höheren Wassertemperaturen im September und Oktober in Schachen gehen einher mit relativ warmen und vor allem trockenen Tagen.

Dass die Wassertemperaturen der KLH meist tiefer sind als die von KLBS liegt wahrscheinlich daran, dass die Messstelle von KLBS 300 m tiefer im Tal liegt. Die mittlere Lufttemperatur ist so bei KLBS höher. Dadurch ist die Lufttemperatur - welche die Wassertemperatur beeinflusst - im unterirdischen Bereich bei KLBS höher .

Elektrische Leitfähigkeit

Die tiefen EL-Werte im Juni sind wahrscheinlich durch die Schneeschmelze und dadurch erhöhte Abflüsse bedingt. Aufgrund des Messstops im März konnte leider nicht beobachtet werden, ob und wie sich dieses Muster im Jahr 2015 wiederholt. Auch wäre es spannend zu sehen, ob das EL-Minimum mit dem Schmelzmaximum übereinstimmt und ob alle Quellen zur gleichen Zeit mit dem Anstieg beginnen. Die letzten zwei EL-Messungen im März 2015 zeigen jedoch bereits eine leichte Abnahme. Diese ist aber zu kurz und zu gering, um mit Sicherheit als die erwartete Abnahme durch Schneeschmelze gedeutet werden zu können.

Die EL-Zunahme während dem Sommer kann verschiedene Gründe haben. Höhere Lufttemperaturen könnten die Lösung von Ionen nahe der Versickerungsstelle verstärken, weniger Schmelzwasser erhöhten den prozentualen Ionenanteil. Eine weitere Ionenquelle könnten die Alpwirtschaft sein. Während der Markierungsversuche im September und Oktober wurde beobachtet, dass auf einigen Alpweiden gedüngt wurde. Das Ausmass des Einflusses auf die Leitfähigkeitswerte ist unklar, da keine chemische Wasseranalysen gemacht wurden.

Die tiefere EL bei Studen ist wahrscheinlich durch das Gestein bzw. Talsedimente bedingt, welche vom Grundwasser durchflossen werden. Diese bestehen nicht aus Kalkgesteinen.

Die hohen EL-Werte bei Chäsloch im September könnte durch das trockene und wärmere Wetter entstanden sein. Bei den anderen Quellen ist jedoch ein Anstieg in diesem Zeitabschnitt nicht sichtbar, was die genannte Annahme schwächt. Möglich sind auch anthropogene Ursachen für die hohen EL-Werte bei Chäsloch. Im September wurden mehrere Alpweiden gedüngt. Zudem wurde im Sommer 2014 oberhalb der Druesberghütte ein neues Haus konstruiert. Dünger, Kuh-

mist, Abwasser und Stoffe aus der Konstruktion könnten ins Chäslochwasser gelangt sein und die EL erhöht haben. Evaporite im Fliessweg könnten die EL ebenfalls erhöhen. Es sind jedoch keine Vorkommen von Evaporiten im Chäsloch bekannt. Ein weiterer möglicher Grund wäre eine grössere Verfügbarkeit von gelöstem CO_2 im Wasser. Dies könnte durch Wurzelrespiration des oberliegenden Chäserenwaldes und durch stärkere Durchlüftung der Höhle begünstigt werden. Eine genauere Untersuchung des Wassers auf z.B. Nitrat, Ammonium und Calcium könnte Aufschlüsse über die Ionenquelle geben.

Ein möglicher Grund für die höheren EL-Werte bei Laeli und Schachen könnte die Tallage der beiden Quellen sein. Dadurch sind die Fliesswege zu den Quellen länger, was den Kontakt mit dem Gestein und somit stärkere Ionenlösung erhöht. Zudem ist die Nutzung des Talbodens durch Weiden intensiver als auf den Alpweiden über dem Felsband, was ebenfalls zu höheren Ionenkonzentration führen würde.

Isotopen Analyse

Der Grund der ^{18}O -Zunahme im durchschnittlichen Jahresverlaufs im Juni liegt wahrscheinlich an einem tiefen $\delta^{18}\text{O}$ -Wert, welcher im April, Mai und Juni durch Schneeschmelze bedingt wird. Die gemessene ^{18}O -Abnahme im März 2015 wird wahrscheinlich ebenfalls durch beginnende Schneeschmelze hervorgerufen. Durch die Abnahme des Schmelzanteils im Abfluss im Frühsommer gleicht sich das Isotopenverhältnis im Wasser jenem im Niederschlag an und steigt. Die ^{18}O -Zunahme im Juni wird zudem durch höhere Lufttemperaturen und höherem ^{18}O -Anteil im Niederschlag verstärkt. Das ^{18}O -Maximum, welches um einen Monat nach hinten verschoben ist, ist wahrscheinlich durch den kalten und regnerischen Juli bedingt.

Der Unterschied in der Steigung der LMWL von Studen zu den restlichen Quellen und der LMWL von der Messstation Chöplis deutet auf darauf hin, dass Studen durch ein anderes Niederschlagsregime gespiesen wird als die Quellen im Waagtal. Studen hat weniger Streuung in den Isotopenverhältnissen, weil das Wasser langsamer fliesst und sich stärker vermischt. Das Wasser vom Winter, welches mit weniger ^{18}O angereichert ist, mischt sich mit dem Sommerniederschlag, welches stärker mit ^{18}O angereichert ist, wodurch ein Ausgleich stattfindet. Das antizyklische Verhalten des saisonalen Musters von Studen widerspiegelt wahrscheinlich die Fliesszeit des Wassers vom Niederschlag zur Quelle. Zwischen dem ^{18}O -Maximum der Waag Quellen und dem ^{18}O -Maximum von Studen liegen vier bis sechs Monate. Die mittlere Fliesszeit bis zur Studen-Quelle liegt wahrscheinlich auch in diesem Bereich. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass Studen nicht oder nur gering durch ein Karstwasserkörper gespiesen wird, sondern hauptsächlich durch Porengrundwasser.

Die tieferen ^{18}O -Verhältnisse bei den KL-Standorten und Chäsloch sind ein Indiz dafür, dass das Einzugsgebiet beider Quellen durchschnittlich höher liegt als das der anderen Quellen. Laeli und Schachen werden demzufolge durch die durchschnittlich tiefsten Einzugsgebiete gespiesen, da bei diesen beiden Quellen die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte meistens am höchsten sind.

Aufgrund der groben Zeitauflösung der Proben sind die Unsicherheit zu gross, um aus feinen Unterschieden zwischen den Quellen auf unterschiedliche Einzugsgebiete und Fliesswege zu schlies-

sen. Mit Sicherheit kann aus den Daten geschlossen werden, dass sich die mittlere Verweildauer und Vermischung aller Quellen - bis auf Studen - im gleichen Rahmen bewegen. Der Standort Studen zeigt somit, wie sich Karst- von Porenrundwasserquellen unterscheiden können.

6.1.2 Interpretation der Markierungsversuche

Die Resultate werden nach Markierungsversuchen diskutiert, da die Vergleichbarkeit der Fließparameter zwischen den Versuchen aufgrund verschiedener Abflusspegel beschränkt ist.

3-WA

Kurz vor dem Erreichen des ersten Konzentrationsmaximums von Schachen und zur Zeit des Nachbuckels wurde auf Wannan relativ starker Niederschlag registriert. Es ist jedoch unklar, ob dieser Niederschlag zu einem erhöhten Abfluss bei Schachen führte und inwiefern die Durchgangskurve davon beeinflusst wird.

Die zwei Peaks bei Schachen könnten durch zwei unterschiedliche Fließwege mit unterschiedlichen Fließzeiten entstanden sein. Eine weitere Ursache könnte aber auch eine Retention (Reduktion und Wiederanstieg der Konzentration) sein, da es kurz vor dem ersten Maximum starker Niederschlag auf Wannan verzeichnet wurde. Die Erklärung mit zwei verschiedenen Fließwegen deckt sich mit den von Gobat & Malard (2013) gemachten Annahmen. Das Wasser würde demzufolge einen Weg über Furli und einen über Norden nehmen.

Das bei KLH kein Uranin gemessen werden konnte bedeutet nicht gleich, dass keine hydraulische Verbindung besteht. Sicher ist nur, dass innerhalb der gemessenen Zeit (siehe Tabelle 5.1) bei den gegebenen Abflussverhältnissen das Wasser nicht von Wannan zu KLH fließt.

Der zeitliche Versatz zwischen Furli und Schachen ist mit der Distanz zur Injektionsstelle vereinbar. Nimmt man bei einer hypothetischen hydraulischen Verbindung zwischen Wannan und Kreuzloch eine ähnliche Abstandsgeschwindigkeit wie bei Furli an, hätte das Messgerät bei KLH mindestens fünf Stunden länger messen müssen, um einen Anstieg zu erkennen.

Bei Schachen ist der Dispersionskoeffizient bei der ersten Kurve am grössten (Tabelle 5.2) und führt zur gängigsten Dispersivität für Karst unter den vier Kurven. Die restlichen Dispersionskoeffizienten sind relativ tief. Dies könnte daran liegen, dass die Furliquelle nicht direkt aus einem Felsen tritt, sondern der Fließweg die letzten 100 m durch Alluvione führt, und nicht durch Kluft- und Karstgänge. Es ist möglich, dass dies die tieferen Dispersionsparameter verursacht. Weitere mögliche Gründe für die tiefen Dispersionsparameter sind allgemein falsche Interpretationen der Durchgangskurve durch das MDM. Es ist beispielsweise möglich, dass die dritte und vierte Kurve überschätzt sind, oder als Fließwege nicht existieren, sondern nur ein durch Niederschlag verstärktes Tailing sind.

Die Abstandsgeschwindigkeit zu Furli ist höher als zu Schachen. Dies mag daran liegen, dass Wasser von der Furli Höhle durch ein Rohr zur Messstelle geleitet wird. Dies erlaubt eine höhere Fließgeschwindigkeiten und direkterer Fließweg.

Beim dritten Versuch wurde an Furli und Schachen maximal die Hälfte des eingespiessenen Uranins gemessen. Es gibt verschiedene Erklärungsansätze für die fehlenden rund 60%. Ein möglicher

Grund ist eine Unterschätzung des Abflusses. Zudem kann durch die Niederschläge während den Messungen der Abfluss zusätzlich angestiegen sein. Besonders bei Furli konnte keinen Abfluss beobachtet werden, weshalb bei dieser Quelle die Unsicherheit verstärkt wird. Bei Schachen kann der Abfluss zwar gut geschätzt werden, doch der Abfluss wurde von einer Stelle entnommen, die erst von einer Quelle gespeist wird. Der Abfluss der anderen beiden Nebenquellen wird dabei ignoriert. Wäre der Abfluss von allen Schachenquellen verwendet worden, wäre der Rückerhalt grösser gewesen. Es ist jedoch möglich, dass Schachen zu einem Teil durch Wasser von Furli gespeist wird. Dies würde bedeuten, dass der Rückerhalt überschätzt wird, wenn der Rückerhalt beider Quellen addiert wird. Als eher unwahrscheinlich wird die Sorption oder Abbau vom Uranin auf dem Weg angenommen, da der Fliessweg unterirdisch verläuft und im Kalkgestein kaum genug tiefe pH Werte erreicht werden für die Sorption von Uranin. Ein tieferer pH Wert bei den Quellen als im Kalibrierwasser würde ebenfalls zu einer allgemeinen Unterschätzung des Rückerhalts führen, sofern sich dieser unter acht befindet. Angenommen diese Möglichkeiten könnten ausgeschlossen werden, müsste das Uranin zu einem späteren Zeitpunkt aus den Quellen oder zu anderen Quellen geflossen sein. Am wahrscheinlichsten scheint eine Kombination der möglichen Ursachen, wobei eine Verbindung zu KLH besonders interessant für weitere Forschung wäre.

4-UW

Die zwei Peaks bei Furli sind schwierig zu verstehen. Sie könnten einerseits als ein Peak mit einem Einschnitt gesehen werden, der durch eine plötzliche, extrem kurze und starke Abflusszunahme, welche eine Verdünnung verursachen würde, oder durch einen kurzfristigen Wechsel der Herkunft des Abflusses hervorgerufen werden. Kurz vor dem ersten Peak bei Furli ereignete sich ein kurzer aber starker Niederschlag auf Wannan mit 16 mm in 3 h. Da bei Furli in der Vergangenheit sehr schnelle Reaktionen auf Niederschlag beobachtet wurden, ist ein Einfluss nicht auszuschliessen. Ein Messfehler ist unwahrscheinlich, da die Kurve ansonsten keine auffälligen Störungen zeigt. Die beiden Peaks könnten mit zwei verschiedenen Fliesswegen und unterschiedlichen Fließzeiten getrennt werden. Diese hätten nach dem MDM eine extrem kleine Dispersivität, welche in sandigen Wasserleitern typisch ist. Möglich ist auch, dass das Wasser durch Klüfte und Gänge fliesst, welche mit Sand und Silt gefüllt sind. Die Resultate dieses MDM sind jedoch mit so vielen Unsicherheiten behaftet, dass mehr Fragen aufkommen, als ein klarer Schluss möglich ist.

Zu Schachen ist die Verbindung von UW bestätigt. Aufgrund der Messunterbrechung kann jedoch leider nicht gesagt werden, ob das Wasser wie dabei 3-WA zwei verschiedene Wege nimmt, was basierend auf dem KARSYS-Modell nicht auszuschliessen wäre.

Die Form der Konzentrationskurve, welche bei Alt Stafel gemessen wurde entspricht nicht der typischen Form einer gaussischen Verteilung, sondern eher einem Hochplateau. Der Anstieg ist plötzlich und die Abnahme sehr gering und fast linear. Die Ausreiser zu Beginn des Hochplateaus sind wahrscheinlich Messfehler. Beim Vergleich mit den Niederschlagsmessungen auf der Alp Wannan fällt auf, dass die beiden Konzentrationsanstiege der Kurve mit den Starkniederschlagsereignissen vom 13.10.14 übereinstimmen. 69 Stunden nach Injektion wurde auf Wannanalp intensiver Niederschlag (bis zu 7mm/h) gemessen. Wo also eine Konzentrationsabnahme

aufgrund stärkeren Abflüssen zu erwarten wäre, wurde das Gegenteil gemessen. Dies erhebt den Verdacht, dass die Konzentrationerhöhung nicht durch Uranin bedingt ist, sondern durch Jauche oder Ähnlichem. Eine weitere Möglichkeit ist, dass es sich um Uranin handelt, welches in den Markierungsversuchen 2-KL oder 3-UW eingespiessen und in einem Wasserkörper gespeichert wurde, welches nur bei höheren Abflüssen aktiv wird. Eine hydraulische Verbindung ist nach dem KARSYS-Modell von Hinterhofen oder von Unterweid zu Alt Stafel unwahrscheinlich. Da die Konzentration innerhalb einer Stunde auf den Niederschlag bei Wannan reagiert, müsste sich der theoretische Speicher nahe von Alt Stafel befinden.

Bei diesem Versuch wurden nach Berechnungen nur rund 20% des Uranins wiedergewonnen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Abflüsse aufgrund der Niederschläge unterschätzt wurden. Zudem wird der Abfluss bei Schachen aufgrund der Messstelle ebenfalls unterschätzt. Basierend auf dem KARSYS-Modell kann sich ein grosser Teil des Uranins über den Karstwasserkörper bei der Siedlung Waag verteilt haben. Um das ganze Uranin zu messen, hätte demnach ein Fluorometer in der Waag nach der Siedlung Waag installiert werden müssen.

5-CA

Die Abstandsgeschwindigkeit zwischen CA und KLBS ist die schnellste, welche bei den Markierungsversuchen gemessen wurde. Sie deutet auf einen relativ direkten Fliessweg hin, könnte aber auch durch den höheren Wasserstand begünstigt sein. Die Form des ersten Peaks mit dem Nachbuckel wurde für die Analyse als Überlagerung zweier Kurven betrachtet. Die kleine, peakformende Kurve hat dabei eine vergleichbare Dispersivität wie bei 4-UW bei Furli berechnet wurden. In diesem Fall scheint eine solche Dispersivität gepaart mit einer so hohen Abstandsgeschwindigkeit etwas unwahrscheinlich. Plausibler wäre eine beschleunigte und dann verlangsamte Konzentrationsabnahme durch Verdünnung, da während dem Peak auf Wannan Niederschlag gemessen wurde. Dass bei dieser Messung die grösste Dispersivität berechnet wurde, hängt wahrscheinlich mit der Fliesszeit zusammen.

Der zweite Peak bei KLBS 108 Stunden nach der Injektion fällt zeitlich mit einem Niederschlagsereignis zusammen, das sechs Stunden anhält und knapp 40 mm Niederschlag bringt. Der zweite Peak wurde wahrscheinlich durch den erhöhten Abfluss ausgelöst, welche Uraninrückstände aus den Höhlengängen wischt. Die Uraninrückstände haben sich vielleicht in Becken gesammelt, welche nicht oder kaum ausgespült werden.

Mit dem zweiten Fluorometer bei Laueli wird eine Konzentrationsabnahme festgestellt. Es ist natürlich auch bei Laueli möglich, dass die erhöhte Fluoreszenz von Jauche erzeugt wird, da die gemessene Konzentration noch sehr tief ist. Zudem wurde ein Tag bevor der zweite Fluorometer installiert wurde, knapp 40 mm Niederschlag bei Wannan gemessen. Ein vergleichbarer Regen bei Laueli hätte im oberen Talbereich ebenfalls Nährstoffe mobilisieren können, welche zu einem Konzentrationsanstieg und folgender Abnahme geführt hätten. Angenommen aber, es handelt sich um Uranin, so könnte der Farbstoff auch von einer früheren Injektion stammen. Denkbar neben dem fünften Versuch wäre der zweite, bei dem am 20.09.14 120 g Uranin in das Riedloch eingespiessen wurden. Dies würde eine Fliesszeit von bis zu 30 Tage bedeuten. In Anbetracht

der ermittelten Fliesswege scheint aber die Herkunft Riedloch eher unwahrscheinlich. Am wahrscheinlichsten (neben der Dünger-Theorie) ist die Annahme, dass die erhöhte Fluoreszenz bei Laueli durch Uranin von Chalberalpeli hervorgerufen wurde. Zusammengefasst kann man bei Laueli sagen, dass die Messung zu viele Unsicherheiten hat, als dass man die Einzugsgebiete von SISKa widerlegen könnte.

Da das Krähloch nahe dem Chäsloch liegt, und beim Chäsloch die Vermutung besteht, dass die hohen EL durch Dünger bedingt sind, stellt sich beim Krähloch die Frage, ob der Peak oder die hohe Startkonzentration teilweise durch organischen Abfall bedingt wurde, der durch den Niederschlag mobilisiert wurde. Bei der Installation des Fluorometers am 17.10.14 wurde beim Krähloch eine EL von 299 $\mu\text{S}/\text{cm}$ gemessen. Dieser Wert ist im unteren Bereich der gemessenen EL. Deshalb wird die Vermutung, die Konzentration widerspiegeln nur zum Teil die Uraninkonzentration, verworfen. Das Krähloch scheint ein anderes Wasser zu haben als das Chäsloch.

Bei diesem Versuch wurde der kleinste Rückerhalt gemessen, rund 10%. Es ist wahrscheinlich, dass der Abfluss leicht unterschätzt wurde, da die Schätzungen vor dem Niederschlag gemacht wurden. Dies würde aber nur ein sehr geringer Teil des Rückerhalts kompensieren. Dasselbe gilt für einen tieferen pH bei den Quellen. Es scheint am wahrscheinlichsten, dass das Wasser vom Chalberalpeli über die vielfältigen Brüche auf verschiedenen Quellen zwischen KLH und Laueli verteilt wird.

6-RL

Bei dieser Färbung wurde die langsamste Abstandsgeschwindigkeit gemessen. Dies kann einerseits daran liegen, dass der Wasserstand winterbedingt sehr tief lag. Es ist auch möglich, dass der effektive Fliessweg bei diesem Wasserstand relativ zur Luftdistanz länger ist als bei den anderen gemessenen hydraulischen Verbindungen.

Die Ähnlichkeit der Durchgangskurven beider KL Standorte verstärkt die Annahme, dass das Wasser von KLH zu KLBS fliesst. Bei diesen Bedingungen beträgt die Fliesszeit rund 7 Stunden. Die tiefere Konzentration bei KLBS wird wahrscheinlich durch Zuflüsse zwischen beiden Standorten bedingt.

Die Form der Durchgangskurve von Schachen könnte auch aus einer einzigen Kurve bestehen, welche drei Einschnitte hat. Die Einschnitte könnten durch stärkere Verdünnung durch höheren Abfluss entstehen. Während der sechsten Messung lag Schnee im Tal, welches nachmittags schmelzen und zu höheren Abflussraten führte. Die Minima wurden jeweils um 21:25, 00:20 und 02:15 erreicht. Die Schmelze muss weiter unten stattgefunden haben als KLBS, da diese Quelle laut Kurve noch nicht von der Schmelze betroffen ist. Die Zeiten der Minima sind später als erwartet für das Schmelzwasser (maximal um 18:00 plus minus eine Stunde). Gegen die Theorie der Einschnitte durch Schmelzwasser spricht, dass die Lufttemperaturen bei Wannen immer unter Null waren, während den Konzentrationszunahmen sogar unter -6°C . Strahlung kann tagsüber im Tal trotzdem zu Schmelze geführt haben. Für die Theorie der einzigen Durchgangskurve sprechen die kleinen Dispersivitäten. Da die Dispersion mit der Distanz zunimmt, wäre anzunehmen, dass die Dispersivität der Kurven bei Schachen mindestens gleich gross ist wie bei den KL

Standorten.

Für die neue Schachen Modellierung wurde statt mit einer Recovery von 7.4% mit einer von 9.5% gerechnet. Die Recovery wurde wahrscheinlich unterschätzt, da die Senkungen aufgefüllt werden müssen und die Kurve nicht zu Ende gemessen wurde. Die Zeiten des besten Fits bewegten sich zwischen 740000s und 750000s, die passendsten Dispersionskoeffizienten liegen zwischen 0.008 und 0.012.

Tabelle 6.1: Zeiten der Wendepunkte auf der Durchgangskurve von Schachen, welche den Beginn und das Ende der Konzentrationslöcher bilden. Die Zeiten sind auf 15 Minuten gerundet.

	Min 1		Min 2		Min 3	
	Start	Ende	Start	Ende	Start	Ende
Tageszeit	11:30	00:00	07:45	01:00	10:00	04:00

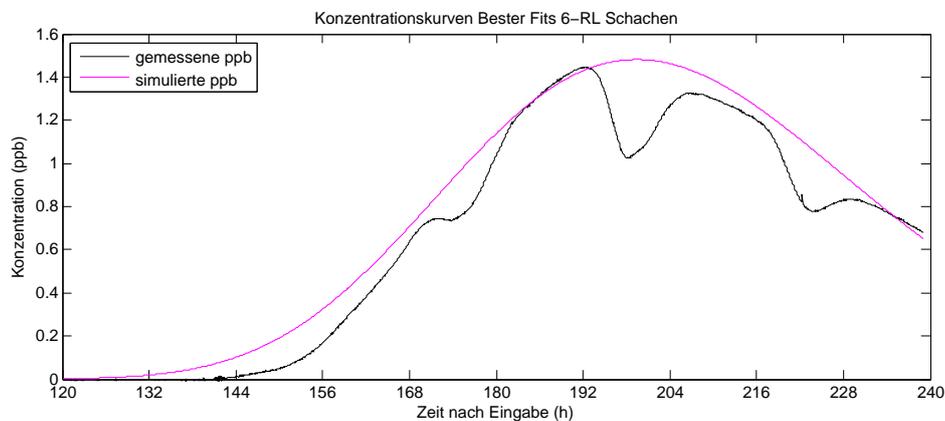


Abbildung 6.1: Gemessene Konzentration (schwarz) und modellierte Konzentration bei Schachen. Bei diesem Dispersionsmodell wird angenommen, dass die drei Einschnitte durch verstärkte Verdünnung aufgrund von Schneeschmelze entstanden. Die Durchgangskurve wird deshalb nicht durch die Überlagerung mehrerer Kurven gebildet, sondern nur aus einer.

Tabelle 6.2: Fließparameter des Dispersionsmodells von Schachen vom Versuch 6-RL. Für dieses Modell wird angenommen, dass die Durchgangskurve von Schachen aus einer Kurve mit drei Einschnitten durch verstärkte Verdünnung besteht.

Wiedererhalt [%]	t_0	v_m [m/h]	P_D	α_L [m]
9.5	8d 13h 30'	13.8	0.01	37-113

Bei dieser Messung wurde nach 3-WA mit rund 40% den grössten Rückerhalt erreicht. Es ist möglich, dass bei dieser Messung der Abfluss weniger unterschätzt wurde als bei den vorherigen Versuchen. Die fehlenden rund 60% könnten sich noch im System befinden. Der tiefe Wasserpegel würde eine längere Speicherung in Zwischenbecken fördern, zum Beispiel in einem Karstwasserkörper wie vom KARSYS-Ansatz modelliert wurde. Wenn der Fließweg von Hinterhofen unter dem Heuloch durch führt, könnte ein Teil des Wassers den Weg ins Sihltal nehmen. Hantke zeichnete in dieser Zone mehrere Ost-West verlaufende Brüche ein.

Salzversuche 7-KL und 8-KL

Beim sechsten Tracerversuch wurde im XL See und in der Brunnstube dieselbe Uraninkonzentration gemessen. Beim Salz-Versuch ist das Signal aber um 75% abgeschwächt. Grund dafür könnte einerseits eine Verdünnung durch Zufluss sein und andererseits die Eigenschaften von Salzlösungen als Tracer. Über so weite Distanzen ist Salz nicht so konservativ wie Uranin. Für den Zufluss spricht, dass der Abfluss bei KLBS höher geschätzt wird als bei KLH. Der Zufluss könnte von weiteren, nahegelegenen Karstquellen stammen oder von den Waldflächen unterhalb des Felsbandes. Ein weiterer möglicher Grund für die tiefe Recovery könnte sein, dass ein Teil des Wassers nicht bei KLBS austritt, sondern weiter unterirdisch verläuft. Aufgrund der grösseren Dichte ist anzunehmen, dass höhere Salzlösungen den unterirdischen Fließwegen folgen.

Die beiden Salzversuche bestätigen eine hydraulische Verbindung zwischen KLH und KLBS. Die hydraulische Verbindung gilt für beide Abflüsse aus der KL Höhle, dem Ausfluss aus dem ersten See und dem unteren Abfluss. Dies bedeutet, dass es zwischen KL Ausgang und KLBS eine Konfluenz beider Abflüsse gibt.

Der Vorbuckel könnte durch unterschiedliche Fließwege entstanden sein oder durch eine plötzliche Abflusszunahme, was zu diesem Zeitpunkt (13:15) nicht unpassend ist. Es lag noch relativ viel Schnee und der Himmel war wolkenlos. Eine Abflusszunahme konnte zwar von Augen nicht beobachtet werden, ist aber denkbar.

Die mittleren Fließgeschwindigkeiten zwischen den Standorten KLH und KLBS sind während den Salzversuchen mehr als doppelt so schnell wie beim Versuch 6-RL. Dies wird wahrscheinlich durch höhere Abflüsse bedingt.

Dispersivität wird zwischen den beiden Quellen erwartungsgemäss grösser beim Versuch 6-RL. Dies passiert, weil durch die grössere Distanz die Fließgeschwindigkeiten stärker variieren können. Bei den Salzversuchen wurde eine Dispersivität von 6-18 m für den Unterabfluss und 3-44 m für die verschiedenen Kurven des Seeabflusses berechnet. Diese Dispersivitäten ähneln den sonst berechneten Dispersivitäten. In diesem Bereich unterscheidet sich der Fließweg zwischen KLH und KLBS nicht.

Der Vorbuckel der Durchgangskurve beim Versuch 7-KL könnte durch einen zweiten Fließweg geformt werden, der kürzere Fließzeiten hat als der zweite. Die dritte Kurve könnte falsch interpretiert sein und das Tailing nachbilden, welches mit dem DM nicht modelliert werden kann. Es ist jedoch auch möglich, dass der Vorbuckel nicht durch einen zweiten Fließweg, sondern durch eine Verdünnung geformt wird. Dafür spricht, dass der Vorbuckel zur Mittagszeit geformt wurde. Dagegen spricht jedoch, dass beim Versuch 8-KL diese Form nicht beobachtet wurde.

6.2 Schlüsse auf das Karstsystem

Die eben besprochenen Interpretationsmöglichkeiten der Messungen führen zu Interpretationen der unterirdischen Fliesswegen zu den Quellen. Ebenfalls formen sie die Annahmen betreffend dem räumlichen Ausmass der Einzugsgebiete.

Eine grosse Schwierigkeit in der Charakterisierung des Systemes bilden die Unsicherheiten in der Vergleichbarkeit der berechneten Fliessparameter. Während den vier geglückten Uranin Versuchen herrschten unterschiedliche Abflusspegel. Durch Pegeländerung verändern sich die Charakteristiken der Fliesswege und die Fliesswege selbst. Die Fliessparameter der Versuche können deshalb nur begrenzt miteinander verglichen werden. Ein Vergleich ist eher innerhalb der Versuche möglich, z.B. zwischen der Durchgangskurve von Krähloch und KLBS beim Versuch 5-CA.

6.2.1 Unterirdische Fliesswege und Einzugsgebiete

Schachen

Die Schachen-Quelle wird wahrscheinlich von zwei verschiedenen Richtungen gespiesen. Ein Weg führt über den Waagbach und der andere über Mittelwald und Düsselplangg. Die beiden Fliesswege würden die beiden Uraninmaxima bei 4-UW erklären. Beide Zuflüsse basieren jedoch auf Annahmen und müssten mit Tracerversuchen bekräftigt werden. Die Infiltration vom Waagbach wird durch die Uraninmessungen bei 6-RL bestärkt. Das Einzugsgebiet von Schachen würde in diesem Fall fasst das ganze Gebiet umfassen, welches oberhalb der Schachenquelle in die Waag entwässert oder sich westlich von Tierfäderenegg liegt. Dadurch liegt die durchschnittliche Höhe des Einzugsgebietes von Furli tiefer als die der anderen Einzugsgebiete, was die höhere $\delta^{18}\text{O}$ -Konzentration erklärt.

Furli

Bei Furli unterscheiden sich die berechneten Dispersivitäten von den beiden Versuchen 3-WA und 4-UW stark, wobei bei 4-UW die Dispersivität, besonders bei den kleinen Kurven, deutlich geringer war. Dies könnte daran liegen, dass bei Unterweid das Wasser durch mehr geologische Schichten durchsickern muss als bei Wannan. Denn bei Wannan befindet sich die Schwinde im Schrattenkalk, wogegen bei Unterweid die Quelle im darüberliegenden Seewerkalk liegt. Die Dispersivitäten können auch bedeuten, dass von Wannan zu Furli die Fliesswege älter und die Gänge ausgeprägter sind, wohingegen bei Unterweid die Fliesswege durch jüngere und somit kleinere Brüche und Spalten führen.

Kreuzloch

Das Einzugsgebiet von Kreuzloch erstreckt sich den Markierungsversuchen zufolge mindestens von Riedloch zu Chalberalpe. Es könnte ein weit aus grösseres Einzugsgebiet sein als durch KARSYS-Ansatz modelliert, wegen Chalberalpe. Die hydraulische Verbindung zu Riedloch scheint jedoch weniger schnell zu sein als angenommen, besonders wenn die Fliesszeiten zwischen 5-CA und 6-RL verglichen werden. Die tiefe Fliessgeschwindigkeit von 6-RL wird wahrscheinlich

durch den tiefen Wasserstand reduziert. Das Wasser von KLH muss jedoch von weiteren Zuflüssen gespiesen werden, da der Abfluss in der Höhle grösser ist als bei Riedloch und Chalberalpeli zusammengerechnet.

Chäsloch

Die Chäslochquelle hat aufgrund der starken Temperaturschwankungen wahrscheinlich eine kürzere Fliessdistanz. Deren Durchschnitt könnte jedoch auch durch nahe, diffuse Infiltration reduziert werden. Möglicherweise kommt ein grosser Prozentsatz des Wassers von Stäfel (unter Drusberghütte).

Das Chäsloch hat wahrscheinlich kein oder nur wenig Wasser von KLH. Ein grosser Teil des Wassers muss einen anderen Ursprung haben, da die EL sehr viel höher ist. Die hohe EL könnte unter anderem durch Dünger von Stäfel verursacht werden. Andreas Dicker (aus den Feldnotizen) äussert ebenfalls die Annahme, dass Chäsloch und Kreuzlochbach wahrscheinlich nicht dieselbe Herkunft haben, da bei Chäsloch deutlich höhere EL- und Wassertemperaturwerte gemessen wurden. Damit verwirft auch er die Annahme, dass der Chäslochbach ein Ableger vom KL Hauptgang ist. Das Einzugsgebiet von Chäsloch konnte jedoch mit Markierungsversuchen nicht bestätigt werden.

Krähloch

Das Krähloch wird teilweise vom Chalberalpeli gespiesen. Die Rückgewinnung in Bezug auf den Abfluss an der Quelle bedingt jedoch weitere Zuflüsse. Denkbar ist ein Einzugsgebiet oberhalb der Quelle bis zum Chalberalpeli.

Lauei

Aufgrund der starken Temperaturschwankungen nehme ich an, dass zumindest ein Teil des Wassers der Quelle einen kurzen unterirdischen Fliessweg hat von wenigen 100m. Diffuse Infiltration im oberen Bereich der Quelle ist gut denkbar. Das Einzugsgebiet von Lauei bleibt nach den Markierungsversuchen unklar. Die Messung 5-CA deutet jedoch darauf hin, dass das Lauei auch von Wasser aus Ost- Nordost gespiesen wird.

Studen

Die Studen-Quelle hat definitiv die längste Fliesszeit von mehreren Monaten (4-8). Dies kann angenommen werden, weil das Maximum von $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalt im März statt im September liegt. Wegen unterschiedlicher LMWL-Neigung hat die Quelle eine andere Wasserherkunft als die anderen Quellen. Das Wasser stammt wahrscheinlich weniger oder gar nicht vom Niederschlag beim Bietrücken, dafür aber vom Sihltal-Niederschlag.

6.2.2 Charakterisierung des Karstsystems

Die eher langsamen Fließzeiten und die für Karstsysteme kleine Dispersivitäten deuten auf eher poröse Fließwege. Diese folgen nicht einem Höhlenbach, sondern gehen durch feine Gänge, Frakturen und Sedimenten in den Gängen. Es sind somit eher neue Fließwege, welche noch nicht weit ausgeprägt sind. Über ihnen befinden sich wahrscheinlich ältere Fließwege mit breiteren Gängen, welche bei Hochwasser aktiv werden.

Die Einzugsgebiete der Quellen können nicht klar voneinander getrennt werden. Im System gibt es wahrscheinlich mehrere Diffluenzen, z.B. von Chalberalpeli nach KLH und Krähloch bei der Messung 5-CA. Die Einzugsgebiete der Quellen können somit überlappen. Der prozentuale Zufluss zu den verschiedenen Quellen variiert wahrscheinlich mit dem Wasserstand, wobei neue Quellen hinzu kommen können.

Die Dispersivität aller Markierungsversuche liegt eher im unteren Bereich der für Karst- und Kluftwasser typisch wäre (10 - 1000m). Da die Dispersivität unter anderem durch die Variationen an Fließgeschwindigkeiten bzw. durch die Inhomogenität der Fließwege verstärkt wird, kann dies für die untersuchten Fließwege bedeuten, dass sie relativ homogen sind.

Das Gebiet ist durch sehr viele Brüche geprägt. Dies ist zum Beispiel in der geologischen Karte von Hantke aber auch im Feld beobachtbar. Beim Chäsloch wurde beobachtet, dass die Höhle den Bruchstrukturen folgt (A. Dickert). Es ist gut möglich, dass das Wasser an mehreren Stellen den Brüchen folgt, womit die Fließrichtung nicht immer der geologischen Topographie folgen muss.

6.3 Quervergleich zum KARSYS-Modell

Die Resultate der Markierungsversuche entsprechen zum Teil den Annahmen des KARSYS-Modells oder der SSKA. Manche Annahmen konnten nicht bestätigt werden und einige wurden verworfen. Bestätigt wurde die hydraulische Verbindung von Wannan zu Furli wie auch jene von Riedloch zu Kreuzloch. Die Verbindung von Riedloch zu KLH scheint jedoch weniger stark zu sein als durch das Modell gezeichnet. Zudem muss nach dem berechneten Wiedererhalt ein Teil des Wassers in einer anderen Quelle austreten. Die Messungen bestärken die Annahme, dass das Wasser von Unterweid über die nördliche Antiklinale über Mittelwald nach Schachen fließt.

Es bleibt jedoch offen, ob das Wasser von Wannan auch nach KLH fließt, was nach dem KARSYS-Modell ebenfalls möglich wäre. Da die Wasserschwinden bei Schönbühl nicht beprobt wurden, kann nicht bestätigt werden, dass das Einzugsgebiet von Furli dieses Gebiet umfasst. Ebenfalls offen bleibt, ob Schachen auch durch die Waag gespeisen wird.

Die Konzentrationsmessung bei Laueli beim Versuch 5-CA lässt auf eine hydraulische Verbindung zwischen Chalberalpeli und Laueli schliessen. Eine solche Verbindung würde dem KARSYS-Modell widersprechen, kann jedoch nicht bestätigt werden, da die Konzentrationsänderung sehr gering ist.

Die Herkunft des Chäslochwassers bleibt auch nach den Untersuchungen unklar. Das KARSYS-Modell leitet zur Vermutung, das Wasser stamme vom Kreuzlochbach. Nach den EL-Messungen kann aber angenommen werden, dass zumindest ein grosser Teil des Wassers von Chäsloch nicht

vom Kreuzlochbach stammt. Gegen das KARSYS-Modell spricht auch die erhöhte mV-Messung bei Alt Stafel, denn das Modell sieht keine Entwässerung Richtung Osten vor. Die erhöhten mV Messungen sind jedoch wahrscheinlich nicht Uranin bedingt, wodurch dieser Widerspruch verworfen werden kann. Durch den KARSYS-Ansatz nicht modelliert aber von Gobat & Malard (2013) vermutet ist der Abfluss von Unterweid nach Furli. Dieser wurde durch den Versuch 4-UW bestätigt. Grund für die falsche Modellierung ist wahrscheinlich ein Fehler in der geologischen Karte, welche die Drusbergschicht bei Furli höher zeichnet als in der Realität (Gobat & Malard 2013). Der auffallendste Fehler der KARSYS-Modellierung ist der Abfluss vom Chalberalpeli. Entgegen den Berechnungen fliesst ein Teil des Wassers zu KLH und zu Krähloch. Da bei den Töblerenquellen nicht gemessen wurde kann die Verbindung zu ihnen weder bestätigt noch verworfen werden.

Diese Unterschiede zwischen den Resultaten der Markierungen und dem KARSYS-Modell rühren wahrscheinlich daher, dass das Modell keine Diffusionen zulässt und dass Brüche nicht genügend beachtet werden können.

Bei allen Markierungsversuchen wurde nur ein Bruchteil des injizierten Uranins gemessen. Sollte das Uranin sich in allen Fällen konservativ verhalten haben und sollten die Abflussschätzungen ungefähr der Realität entsprochen haben, so könnten weitere, nicht bekannte Quellen und Wasserkörper die Rückgewinnung geprägt haben.

6.4 Unsicherheiten in der Interpretation

Die Interpretation der Resultate wird durch verschiedene Unsicherheiten und Ungenauigkeiten erschwert. Um ein klareres Bild dieser Herausforderung zu vermitteln, werden die wichtigsten Punkte hier aufgeführt.

Unsicherheiten und Ungenauigkeiten betreffend Markierungsversuche

Ungenauere mV Messungen aufgrund ungenauer Kalibrierung: Temperatur, Wasserunterschied und pH Unterschied haben Einfluss auf die mV-Messung. Für eine maximale Genauigkeit hätte jeder Fluorometer vor Ort mit dem Wasser der entsprechenden Quelle kalibriert werden müssen. Dies hätte aber einen grossen Mehraufwand bedeutet. Diese Unsicherheit wirkt sich weiter auf die berechnete Recovery aus.

Der Abfluss wurde grob mit Fliessgeschwindigkeit, hydraulischem Radius und Gewässerbreite berechnet. An manchen Stellen mussten diese Grössen grob geschätzt werden, da das Wasser nicht einem einzigen Strom folgte oder ein weiterer unterirdischer Abfluss möglich war. Besonders von dieser Ungenauigkeit betroffen waren Chäsloch, und die KL-Standorte. Die Unsicherheiten der Abflussmessungen wirken sich ebenfalls auf die Recovery aus.

Während den Uraninmessungen wurde der Abfluss nicht kontinuierlich gemessen. Das bedeutet, dass genaue Kenntnisse über allfällige Abflussschwankungen fehlen. Die verwendete Methode geht davon aus, dass der Abfluss während den Markierungsversuchen konstant war. Kenntnisse über Abflussschwankungen würden Unsicherheiten in der Analyse der Durchgangskurve und in

der Berechnung der Recovery reduzieren.

Mit dem DM konnte das Tailing nicht nachgebildet werden. Dies kann zu einer Verzerrung der modellierten Kurve und so zu einer falschen Parameterwahl geführt haben. Besonders bei komplexeren Kurven mit mehreren Maxima, wo das MDM zum Zug kommt, besteht die Gefahr, dass das Tailing zum Teil mit weiteren Kurven nachgebildet wird und so die Hauptkurve mit den stimmigsten Parametern verzerrt.

Die Parameter des DM gelten für den gesamten Fliessweg. Die Fliesswege im Untergrund können aber sehr heterogen sein mit grossen Variationen der Fliessparameter. Dies kann mit dem DM in diesem Fall nicht ermittelt werden. Mit dem DM wird der Fliessweg jedoch als homogen betrachtet. Die Fitparameter der DM entsprechen somit nicht den realen Fliessparametern.

Dispersivität und hydraulische Leitfähigkeit sind nur in idealen Systemen Fliesskonstanten. Im untersuchten System muss aber davon ausgegangen werden, dass die Fliesswege mit steigendem Pegel durch ältere und breitere Gänge erweitert werden. Aus diesem Grund können die Fliesskonstanten und der prozentuale Wiedererhalt der Färmversuche schwer verglichen werden.

Unsicherheiten und Ungenauigkeiten betreffend Messreihe

Die Unregelmässigkeit in der die Quellen beprobt wurden, wie auch die Periodizität von zwei oder mehr Wochen reduziert die Vergleichbarkeit der Temperatur, EL und Isotope der Quellen. Eine kürzere Messwiederholung, z.B. von einer Woche, würde diesen Mangel reduzieren, der Aufwand wäre dafür doppelt so gross. Es ist fraglich, ob die zusätzlich gewonnenen Erkenntnisse diesen Aufwand entschädigen würden.

Die Messstellen der Quellen sind nicht immer dieselben. Besonders bei Chäsloch und Kreuzloch kann dies zum Temperaturunterschied der beiden Quellen beitragen.

Die Repräsentativität der Temperatur und Leitfähigkeitsmessungen ist fraglich. Ein Karstsystem zeichnet sich häufig durch eine schnelle Reaktionszeit aus. Auch dieses System hat relativ kurze Durchflusszeiten von einem Tag (siehe Kapitel 5.2.4) gezeigt. Dies bedeutet, dass der Niederschlagsinput relativ schnell und ungefiltert zu den Quellen kommt. Ein spezielles Niederschlagsereignis hätte demnach einen grossen Einfluss auf eine Messung, welche gleich danach vorgenommen würde. Zudem können Schwankungen im Wochenbereich noch relativ gross sein. Die Messungen sind deshalb nicht unbedingt repräsentativ für den saisonalen Zeitpunkt, an dem sie aufgenommen wurden.

6.5 Methodenkritik

Für ähnliche Fragestellungen mit andern Quellen oder für weitere Untersuchungen im Gebiet kann die hier angewandte Methode verbessert werden. Im Folgendem werden die wichtigsten Punkte aufgelistet, welche meines Erachtens zu verbessern wären.

Eine grosse Unsicherheit bei der Interpretation der Tracermessungen stellte die ungenaue und diskrete Abflussschätzungen dar. Gezielte Installationen von Druckloggern bei den Fluorometer hätte besonders bei Messungen mit Niederschlägen bei der Interpretation helfen können. Eine

solche Massnahmen hätte nur geringen Mehraufwand bedeutet.

Allgemein genauere Abflussmessungen z.B. mit Salztracer hätten geholfen, die Wasserbilanz genauer zu berechnen. Dafür hätte aber mindestens eine zusätzliche Woche verwendet werden müssen.

Die Messstandorte für Wassertemperaturmessungen hätten etwas sorgfältiger gewählt werden müssen. Dadurch wären die Unsicherheiten durch die verschiedenen Messstandorte erspart geblieben, sowie auch die nutzlosen Messungen bei z.B. Kreuzloch. Für weitere Messungen sollte für die KL-Standorte die Wassertemperatur nur von KLH und evt. auch von KLBS gemessen werden. Bei Furli wäre abzuklären, ob sich der Weg lohnt, oder ob nicht gleich die Temperaturmessungen von Logger kalibriert und verwendet werden sollen. Für Kreuzloch bestünde dieselbe Möglichkeit, da in dieser Höhle ebenfalls Logger installiert sind.

Bei Studen hätte der Abfluss von allen Quellen gemessen werden müssen, vor allem bei den Färbungen. Dafür hätte jedoch ein geeigneter Standort für den Fluorometer unterhalb der Konfluenz aller Quellen gefunden oder konstruiert werden müssen.

Für die Ermittlung der Dispersion und anderer Fliessparameter wurde das Dispersionsmodell verwendet. Dieses zeigte jedoch bei allen Kurven das Unvermögen ein Tailing nachzubilden. Die Parameter für die Kurven können dadurch nicht optimal gesetzt werden. Eine Dispersionskurve, welche das Tailing besser nachbilden kann, wäre für die nächste Analyse empfehlenswert.

Die Verwendung von nur einem Tracer ist für die langen Markierungsversuche problematisch. Das Uranin könnte im System gespeichert werden und dann zu einem späterem Zeitpunkt mobilisiert werden und aus der Quelle austreten. Bei den Versuchen war meistens klar, dass die Durchgangskurve von der gefragten Injektion ist, da das Signal meist relativ klar war und die Peaks in diesen Fällen weniger mit Niederschlagsereignissen korrelierten. Trotzdem sollten für spätere Versuche Multi-Tracer-Tests ins Auge gefasst werden, zumal die Fluorometer mehrere Tracers gleichzeitig messen können und so mehrere Ponore bei gleichem Wasserstand untersucht werden können.

Bei den Tracerversuchen sollten Wasserproben von den Quellen entnommen und auf Nährstoffe geprüft werden. So kann untersucht werden, ob der Konzentrationsanstieg vom Tracer durch den Tracer selber oder durch organische Verschmutzung bedingt ist. Einige wenige (2-3) Proben während erhöhter mV Messungen sollten dafür reichen.

Für den Fliessweg bringt die Tracer Methode am meisten Informationen. Die regelmässigen Messungen von EC, Temperatur und Isotopen lassen viele Fragen unbeantwortet. Die Fleisszeit können schon mit den Tracerversuchen gemessen werden. Mit den Isotopen wäre dies mit einer regelmässigen Messung während und nach einem Niederschlagsereignis ebenfalls möglich. Die regelmässigen Messungen bedeuten mehr Aufwand und weniger klare Resultate als die Tracer Messungen. Für weitere Untersuchungen sind Tracermessungen zu bevorzugen.

Für die Gemeinde als Planer ist wahrscheinlich der Ursprung des Wassers (Grundwasserschutzzonen), die Grösse des Einzugsgebietes bei Starkniederschlägen und die Reaktion bei solchen Ereignissen spannend. Mit meiner Methode können nur Aussagen zum Ursprung gemacht werden. Weitere Untersuchungen könnten einen Schwerpunkt auf die Wasserbilanz und die Reaktion der Abflüsse bei Niederschlägen setzen.

Kapitel 7

Schlussfolgerung

Antworten auf die Forschungsfragen

Der Abfluss vom Chalberalpeli konnte teilweise geklärt werden. Ein Markierungsversuch ergab, dass das Wasser des Chalberalpeli entgegen den Modellierungen vom KARSYS-Ansatz zum Kreuzloch und Krähloch fliesst. Eine Verbindung zu den Töblerern Quellen wurde nicht geprüft. Es bleibt deshalb offen, ob das Chalberalpeli auch dorthin entwässert. Da bei Kreuzloch und Krähloch nur ein kleiner Teil des Uranins wiedererhalten wurde, scheint ein Zufluss zu Töblern sehr wahrscheinlich.

Die hydraulische Verbindung zwischen Riedloch und Kreuzloch konnte bestätigt werden. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die beiden erforschten Höhlengänge eine passierbare Verbindung haben. Die Fliesszeit von Injektionsstelle zu Messstelle ist mit Abstand die längste der Messreihe. Dies könnte jedoch am winterlich bedingten tiefen Wasserstand liegen. Der berechnete Wiedererhalt gehört mit rund 25% zu den grössten.

Die Herkunft des Chäslochwassers konnte nicht ermittelt werden. Einzig die Vermutung, dass das Wasser vom Kreuzlochbach stammt wird durch die EC-Messungen stark in Frage gestellt. Die Wassertemperaturen lassen zudem eine partiell kurze Fliesszeit vermuten.

Eine hydraulische Verbindung von Wannan zu Kreuzloch konnte nicht bestätigt werden. Wannan als Wasserscheide zwischen den Einzugsgebieten von Furli und Kreuzloch bleibt somit unerforscht.

Die Markierungsversuche bestätigen grösstenteils die modellierten Einzugsgebiete des KARSYS-Ansatzes. Verworfen wird jedoch die Grenzziehung zwischen den Einzugsgebieten Töblern und Kreuzloch-Chäsloch. Der Markierungsversuch 5-CA zeigte, dass das Wasser vom Chalberalpeli auch zum Kreuzloch fliesst. Unsicher bleibt, ob das Wasser von Unterweid über die nördliche Antiklinale direkt zu Schachen fliesst oder einen Umweg über Furli nimmt. Die Markierungsversuche sprechen jedoch für zwei Fliesswege, die zu Schachen führen. Neben dem Einzugsgebiet von Chäsloch bleiben jene der Töblerenquellen und von Laueli ungewiss mit den Markierungsversuchen.

Die Wassertemperatur, EL und der Isotopengehalt der Quellen zeigen alle einen relativ ähnlichen Jahresverlauf. Ausnahme bildet Studen Quelle, welche bei der Wassertemperatur und der EL relativ konstante Messwerte ergab. Beim Isotopengehalt ist das saisonale Muster von Studen stark abgeschwächt und antizyklisch, was auf eine Fliesszeit von vier bis sechs Monate schliessen lässt. Die Fliesszeiten der Waagquellen hingegen betragen etwas zwischen einem Tag und einer

Woche.

Zwischen den Quellen im Waagtal können zum Teil verschiedene Muster im Jahresverlauf unterschieden werden. Diese können jedoch nur als Tendenzen diskutiert werden und geben keine klare Aufschlüsse über den Fliessweg der einzelnen Quellen. Klarere Unterschiede zwischen den Quellen hätten möglicherweise mit häufigeren Messungen (z.B. mit wöchentlicher Frequenz) beobachtet werden können.

Ausblick

Die durchgeführten Markierungsversuche und Messungen konnten einen Teil der Forschungsfragen beantworten und Aufschlüsse über das Karstsystem im Ybrig bieten. Es bleiben aber noch viele Fragezeichen, welche vor allem durch weitere Markierungsversuche beantwortet werden können. Folgende hydraulische Verbindungen sollten noch untersucht werden: Wannen zu Kreuzloch; Chalberalpeli zu Chäsloch, Töbleren und Laueli; Riedloch zu Chäsloch; und Chöplishütte zu Chäsloch, Krähloch, Kreuzloch und Töbleren. Wenn möglich, sollten diese Verbindungen durch einen Multi-Tracer-Versuch getestet werden, bei dem verschiedene Markierungsstoffe in die verschiedenen Schwinden injiziert werden. Empfohlen für Markierungsversuche im Karst sind Uranin, Eosin und Pyranin (Schudel et al. 2002). Es müsste jedoch geprüft werden, ob diese Tracer gleichzeitig mit einem Fluorometer gemessen werden können. Vorteil von einem Multi-Tracer-Tests ist, dass die Resultate besser vergleichbar sind, da ähnlichere Konditionen herrschen. Um ein vielschichtigeres Bild des Systems zu erlangen sollte derselbe Multi-Tracer-Versuch bei verschiedenen Wasserständen durchgeführt werden. Dies könnte aufzeigen, wie sich die Fliesswege mit den verschiedenen Wasserständen verändern. Bei späteren Markierungsversuchen sollte der Abfluss genauer geschätzt und bei möglichen Veränderungen auch genauer beobachtet werden. Für die kontinuierliche Beobachtung des Abflusses eignen sich die bisher verwendeten Drucklogger.

Die Verbindung zwischen Waag und Schachen wird nach den Markierungsversuchen angenommen, sollte aber noch untersucht werden. Durch eine Injektion in die Waag oberhalb von Furli und Abflussmessungen in der Waag und Schachen, sowie Konzentrationsmessungen in Schachen und Waag kann überprüft werden, ob und wieviel Wasser von der Waag zur Schachenquelle infiltriert.

Der Abfluss von Oberweid wurde bisher nicht untersucht. Weitere Markierungsversuche sollten dieses Gebiet miteinschliessen, da es ungefähr die Hälfte des angenommenen Einzugsgebietes von Furli ausmacht und typische Karstformen aufweist.

Fliesswege vom Bietrücken zum Shiltal wurden bei den bisherigen Methoden aufgrund der Geologie nicht angenommen. Da jedoch leichter Zweifel unter den Speleologen herrscht, könnte ein Fluorometer in der Sihl beim nächsten grossen Tracer-Versuch aufklärend sein.

Bei Chäsloch könnte mit einem Logger der tiefer in der Höhle montiert wird überprüft werden, ob dort die Wassertemperaturen ebenfalls so stark schwanken wie bei der Quelle. Sollte dies der Fall sein, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Temperaturschwankungen durch diffuse Infiltration bedingt sind. Je nach dem könnte ein Markierungsversuch unternommen werden, der an

verschiedenen Stellen im Chäserenwald prüft, ob das Wasser in das Chäsloch fliesst. Neben weiteren Tracer Versuchen würden genauere Abflussmessungen zu einem klareren Bild des Wasserbudgets führen. An den Standorten wo Drucklogger installiert sind, kann mit Abflussmessungen bei unterschiedlichem Pegel eine Gleichung zwischen beiden Grössen berechnet werden. Eine Weiterführung der Messungen von Wassertemperatur, Leitfähigkeit und Isotope werden wahrscheinlich keine Erkenntnisse bringen, für welche sich der Aufwand lohnt. Eine Untersuchung der Wasserinhaltsstoffe der verschiedenen Quellen würde sich jedoch durchaus lohnen, da so geprüft werden könnte, ob die höheren EL-Werte bei Chäsloch, Laueli und Schachen tatsächlich durch die Viehwirtschaft erzeugt werden.

Persönliche Quellen

Andreas Dickert
Sekretär der OHG
Spezialist für Höhlenvermessung
8820 Wädenswil

Beat Hediger
Präsident der HGY seit 2015
8842 Unteriberg

Edwin Fuchs
Engagiertes Mitglied der HGY
8842 Waag

Pierre-André Schnegg
Leiter Albillia Sarl
2000 Neuchâtel

Literaturverzeichnis

- Baker, A. (2001), 'Fluorescence excitation – emission matrix characterization of some sewage impacted rivers', *Environ. Sci. Technol* **35**(5), 948–953.
- Baker, a. & Genty, D. (1999), 'Fluorescence wavelength and intensity variations of cave waters', *Journal of Hydrology* **217**, 19–34.
- Bear, J. (1972), *Dynamics of fluids in porous media*, elsevier edn, Elsevier, New York.
- Benischke, R., Goldscheider, N. & Smart, C. (2007), 8: Tracer techniques, in N. Goldscheider & D. Drew, eds, 'Methods in Karst Hydrogeology', Taylor & Francis Group, London, pp. 147–170.
- Clark, I. D. & Fritz, P. (1997), *Environmental isotopes in hydrogeology*, 3 edn, Lewis, Boca Raton.
- Climate-Data Org. (2015), 'Klima Wannen'.
URL: <http://de.climate-data.org/location/417220/>
- Craig, H. (1961), 'Isotopic variations in meteoric waters', *Science* **133**, 1702–1703.
- Dansgaard, W. (1964), 'Stable isotopes in precipitation', *Tellus A* **16**(4), 436–469.
- Dickert, A. (2012), Karte der Quellen, Schwinden Höhlen und angenommenen Fließwegen im Ybrig, *Unpubliziert*.
- Dickert, A., Graf, R. & Hediger, B. (2012), Karsthydrologische Untersuchung zwischen Waag- und Sihltal, Region Ybrig (Kt. Schwyz), in 'Akten des 13. Nationalen Kongresses für Höhlenforschung', pp. 205–208.
- Einsiedl, F., Maloszewski, P. & Stichler, W. (2009), 'Multiple isotope approach to the determination of the natural attenuation potential of a high-alpine karst system', *Journal of Hydrology* **365**(1-2), 113–121.
- Field, M. S. (2003), 'A review of some tracer-test design equations for tracer-mass estimation and sample-collection frequency', *Environmental Geology* **43**, 867–881.
- Ford, D. & Williams, P. (2007), *Karst geomorphology and hydrogeology*, Chichester j. Wiley.
- Gobat, J. & Malard, A. (2013), 'Anwendung des KARSYS-Ansatzes zur Injektionsstandortbestimmung Ybrig -SZ'.
- Goldscheider, N. & Drew, D. (2007), *Methods In Karst Hydrogeology*, Taylor & Francis Group, London.

- Haering, C., Jäckli, H., Kobel, M., Kündig, R., Lienert, O., Philipp, R., Starck, P. & Wyssling, L. (1994), 5: Toggenburg, in Schweizerische Geotechnische Kommission, ed., 'Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100000', Schweizerische Geotechnische Kommission, Zürich.
- Hantke, R. (2009), Geologische Karte 492 A, *Unpubliziert*.
- Hantke, R. & Thomas, E. A. (1961), 'Tektonik der helvetischen Kalkalpen zwischen Obwalden und dem St. Galler Rheintal', *Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich* **106**(1), 210.
- Hunkeler, D. & Mudry, J. (2007), 6: Hydrochemical methods, in N. Goldscheider & D. Drew, eds, 'Methods in Karst Hydrogeology', Taylor & Francis Group, London, pp. 93–121.
- Jeannet, A. (1941), 'Geologie der oberen Sihltaler-Alpen', *Berichte der Schwyzerischen Naturforschenden Gesellschaft* **3**, 24.
- Jeannin, P.-Y. (1991), 'Températures dans la zone vadose du karst', *Actes du 9e Congrès national de spéléologie* **9**(9), 71–76.
- Jeannin, P.-Y., Eichenberger, U., Sinreich, M., Vouillamoz, J., Malard, a. & Weber, E. (2013), 'KAR-SYS: A pragmatic approach to karst hydrogeological system conceptualisation. Assessment of groundwater reserves and resources in Switzerland', *Environmental Earth Sciences* **69**(3), 999–1013.
- Käss, W. (2004), Markierungsstoffe, in G. Matthess, ed., 'Geohydrologische Markierungstechnik', Gebrüder Borntraeger, Berlin - Stuttgart.
- Kreft, A. & Zuber, A. (1978), 'On the physical meaning of the dispersion and its solutions for different initial and boundary conditions', *Chemical Engineering Science* **33**, 1471–1480.
- Leibundgut, C., Maloszewski, P. & Külls, C. (2009), *Tracers in Hydrology*, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Leutscher, M. & Jeannin, P.-y. (2004), 'Temperature distribution in karst systems: the role of air and water fluxes', *Terra Nova* **16**(6), 344–350.
- Luhmann, A. J., Covington, M. D., Peters, A. J., Alexander, S. C., Anger, C. T., Green, J. a., Runkel, A. C. & Alexander, E. C. (2011), 'Classification of thermal patterns at karst springs and cave streams', *Ground water* **49**(3), 324–335.
- Lüthi, M. (2012a), Interpretation von kurzzeitigen Druck- und Temperaturschwankungen eines Höhlenbaches: Kreuzloch (Unteriberg, SZ), in 'Akten des 13. Nationalen Kongresses für Höhlenforschung: Muotathal, Schweiz, Speleodiversity', Unteriberg (SZ), p. 6.
- Lüthi, M. (2012b), 'Nachweis der Verbindung Siphon zu Zwillingssdom - Salztracer-Versuch am 15.12.2012 im Kreuzloch'.

- Malard, a. & Jeannin, P.-Y. (2013a), 'Characterisation of karst aquifers in Switzerland: the KARSYS approach', *European Geologist* **35**(May), 59–63.
- Malard, A. & Jeannin, P.-Y. (2013b), 'Estimation des ressources en eau (volume annuel écoulable) des aquifères karstiques suisses'.
- Maloszewski, P., Benischke, R. & Harum, T. (1992), 'Mathematical modelling of tracer experiments in the karst of Lurbach-System', *Steirische Beiträge zur Hydrogeologie* **43**, 116–136.
- Mance, D., Hunjak, T., Lenac, D., Rubinić, J. & Roller-Lutz, Z. (2014), 'Stable isotope analysis of the karst hydrological systems in the Bay of Kvarner (Croatia)', *Applied radiation and isotopes : including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine* **90**, 23–34.
- Mazor, E. (1997), *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*, 2 edn, Marcel Dekker, New York.
- Mohammadi, Z. & Field, M. (2009), 'On the temporal behavior of karst aquifers, zagros region, Iran: A geostatistical approach', *Journal of Cave and Karst Studies* **71**(3), 210–226.
- Ostschweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung (2015), 'Hydrologieprojekt Hoch-Ybrig'.
URL: <http://ogh.ch/hydrologieprojekt-hoch-ybrig>
- Ozyurt, N. N. & Bayari, S. C. (2008), 'Temporal variation of chemical and isotopic signals in major discharges of an alpine karst aquifer in Turkey: Implications with respect to response of karst aquifers to recharge', *Hydrogeology Journal* **16**(2), 297–309.
- Picarro (2012), 'PICARRO L2130-i: $\delta D/\delta^{18}O$ Ultra High-Precision Isotopic Water Analyzer'.
URL: http://www.picarro.com/sites/default/files/L2130-i_Datasheet.pdf
- Ravbar, N., Engelhardt, I. & Goldscheider, N. (2011), 'Anomalous behaviour of specific electrical conductivity at a karst spring induced by variable catchment boundaries: The case of the Podstenjšek spring, Slovenia', *Hydrological Processes* **25**(13), 2130–2140.
- Sahra (2005), 'Oxygen Isotopes'.
URL: <http://web.sahra.arizona.edu/programs/isotopes/oxygen.html>
- Schenker Korner & Partner GmbH (2011), 'Bericht zu den Grundwasseruntersuchungen in Ort, 8845 Studen'.
- Schnegg, P.-A. & Doerfliger, N. (1997), 'An inexpensive flow-through field fluorometer', *6th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media* pp. 1–4.
- Schudel, B., Biaggi, D., Dervej, T., Kozel, R., Müller, I., Ross, J. H. & Schindler, U. (2002), 'Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie - Praxishilfe'.
- Schulz, H. D. (2004), 4: Auswertung von Markierungsversuchen, in G. Matthess, ed., 'Geohydrologische Markierungstechnik', Gebrüder Borntraeger, Berlin - Stuttgart, pp. 290–334.

Siegenthaler, U. & Oeschger, H. (1980), 'Correlation of ^{18}O in precipitation with temperature and altitude', *Nature* **285**, 314–317.

Sinreich, M., Kozel, R., Lützenkirchen, V., Matousek, F., Jeannin, P.-y., Löw, S. & Stauffer, F. (2012), 'Grundwasserressourcen der Schweiz - Abschätzung von Kennwerten', *Aqua* **9**, 16–28.

SLF (2015), 'Meteodaten der Messstation Wannen zwischen 2011 und 2014'.

Werner, A. (1997), Hydraulische Charakterisierung von Karstsystemen mit künstlichen Tracern, PhD thesis, Universität Karlsruhe.

Wernli, H. R. (2011), 'Einführung in die Tracerhydrologie - Skript zum Hydrologischen Praktikum'.

White, W. B. (2002), 'Karst hydrology: Recent developments and open questions', *Engineering Geology* **65**, 85–105.

Wieland, E. (1919), 'Erläuterungs-Bericht zur hydro-elekt. Licht- und Kraftanlage "Elektra Unter-Iberg"'.
http://www.wieland-berlin.de/

Worthington, S. R. H. & Smart, C. C. (2003), Empirical equations for determining tracer mass for sink to spring tracer testing in karst, in B. F. Beck, ed., 'Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst', Geotechnical Special Publication No 122, American Society of Civil Engineers, pp. 287–295.

WTW (2012), 'Messtechnik für Labor & Umwelt'.

URL: http://www.wtw.de/fileadmin/upload/Kataloge/Labor/WTW_Laborkatalog_2012_Deutsch_lowres.pdf

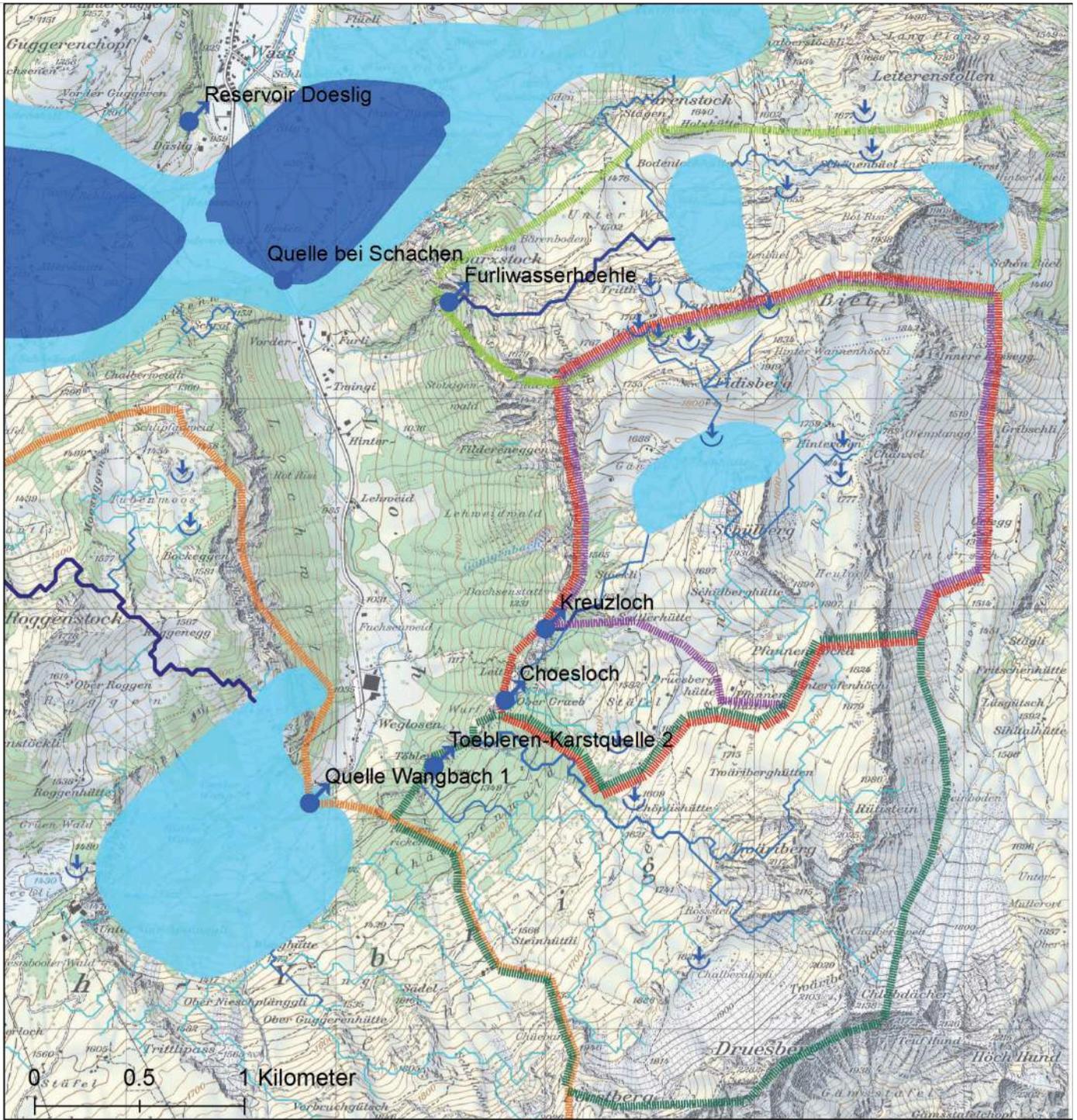
Anhang

I Einzugsgebiete nach dem KARSYS-Modell

II Karte des Untersuchungsgebietes

III Karte mit Resultaten der Markierungsversuche

I Einzugsgebiete nach dem KARSYS-Modell (Gobat 2013)



Hauptquellen

Hauptquellen

Karstwasserkörper

Gespannter Spiegel
 Freier Spiegel

Ponore

Fliesslinien

Drainierte Fläche (km²)

0.06-0.52
 0.52-1.75
 1.75-3.40
 3.40-5.70
 5.70-10.70

Unterirdische Einzugsgebiete

Quelle
 Chäsloch
 Furliwasser
 Kreuzloch
 Töbleren
 Wangbach

Persönliche Erklärung:

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solch kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum:

Unterschrift:

Domenika Bucher