



Wassermarkierversuch Bettenhöhle Ost – Stöckalp/Melchtal (Kerns OW)

Markierstoffeingabe am Samstag, 18. Mai 2013, Bettenalp/Melchsee-Frutt,
Gemeinde Kerns OW

Höhlenforscher-Gemeinschaft Unterwalden (HGU)
Fidel Hendry, Martin Trüssel, Beat Niederberger, Jörg Weyermann
www.hgu.ch

Ennetbürgen, im November 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	5
2	Zielsetzung	5
3	Übersicht.....	6
3.1	Geografische Übersicht	6
3.2	Geologische und hydrogeologische Übersicht	7
3.2.1	Tektonik	7
3.2.2	Stratigraphie	10
3.2.3	Morphologie	10
3.2.4	Hydrogeologische Situation	11
3.2.5	Grundwasserpumpwerk «Altes Militärspital» (heute Sportcamp Melchtal)	13
3.2.6	Seitenmoräne Hugschwendi.....	14
4	Wassermarkierversuch vom 18. Mai 2013	16
4.1	Methodik	16
4.2	Eingabestellen	17
4.3	Probenahmestellen.....	19
4.4	Durchführung.....	20
4.4.1	Wetterbedingungen	20
4.4.2	Einspeisung	22
4.4.3	Probenahmen	25
4.4.4	Visuelle Beobachtungen	25
4.4.5	Feldmessungen	29
4.5	Resultate.....	30
4.5.1	Labor.....	30
4.5.2	Fliessverbindungen	31
4.5.3	Durchgangskurven	33
4.5.4	Rückgewinnungsraten	34
5	Vergleich mit früheren hydrologischen Untersuchungen	37
5.1	Wassermarkierversuche in der ersten Hälfte des 20. Jahrhundert	37
5.1.1	Verbindung zur Cheselenquelle	37
5.1.2	Verbindung zur Hugschwendiquelle	37
5.1.3	Verbindung zur Stöckquelle.....	38
5.1.4	Verbindung zu den Quellen beim Quellenbord und zu den Allmendquellen.....	38
5.2	Markierversuch Grand-Canyon-Bach (Bettenhöhle) – Hugschwendiquelle.....	39
5.3	Hydrologische Betrachtungen zum Grundwasserhaushalt im Melchtal	40
6	Interpretation.....	42
7	Schlussfolgerungen	47
8	Dank	48
9	Literaturverzeichnis	49

Zusammenfassung

Am 18. Mai 2013 wurden im hinteren Melchtal auf der Melchsee-Frutt (Gemeinde Kerns OW) in der 30 km langen Bettenhöhle in zwei Höhlenbächen Markierstoffe eingegeben (jeweils um 11 Uhr MESZ). Im Bettenhöhlebach sind beim Biwak I (100 m unter der Erdoberfläche) 2 kg Fluorescein und im Via-Mala-Bach unterhalb der Verzweigung Via-Mala / Traumstrasse (ca. 120 m unter der Erdoberfläche) 3 kg Sulforhodamin B verwendet worden.

Gleichentags um 20.20 Uhr – knapp 9,5 h nach der Eingabe – wurde auf der Stöckalp im Hugschwendibach erstmals visuell der in den Via-Mala-Bach eingegebene Markierstoff festgestellt. Der zweite, in den Bettenhöhlebach eingespeiste Markierstoff traf mit nur kurzer Verzögerung um 21.00 Uhr an derselben Stelle aus. Die Austrittsstelle der beiden Markierstoffe befand sich aber nicht im Quelltopf der Hugschwendiquelle, sondern rund 150 m weiter Bach abwärts und knapp 30 m tiefer (1'079 m ü.M.) an einer unscheinbaren Stelle praktisch niveaugleich am Gewässerrand. Dieser bislang unbekannte und somit auch nicht inventarisierte Karstwasseraustritt (neu «Hugschwendi-Hangfussquelle» genannt) ist nur bei Tagesgang-Verhältnissen aktiv. Wegen der abnehmenden Schüttung im Laufe der Nacht versiegte diese Quelle. Es konnten somit keine weiteren Proben genommen werden, denn der weitere unterirdische Zufluss aus dem Hangfuss gelangte direkt in den Talschotter. Um 21.15 Uhr wurde mit 2'823 ppb die höchste Konzentration von Sulforhodamin B gemessen (Eingabeort: Via-Mala-Bach). Bemerkenswerterweise wurde mit einer fast gleich verlaufenden Durchgangskurve, aber mit deutlich tieferen Werten (max. 864 ppb), auch Fluorescein gemessen, das im Bettenhöhlebach eingegeben worden ist. Das praktisch gleichzeitige Auftreten mit vergleichbarem Verhalten beider Markierstoffe lässt sich nur bedingt erklären und lässt entsprechend Fragen offen. Aufgrund der Ergebnisse ist es aber plausibel, dass im Aufstaubereich der wassergesättigten Zone eine gut ausgebildete Karströhre abzweigt, in der Wasser freifliessend ausserhalb der gesättigten Zone in Richtung Hangfussquelle strömen kann. Sie wird bei erhöhtem Wasserandrang infolge Schneeschmelze oder Hochwasser gespiesen.

Am nächsten Morgen, am 19. Mai 2013, zeigte sich um 9.05 Uhr – 22 h nach der Markierstoffeingabe – bei der Hugschwendiquelle (1'108 m ü.M.) erstmals Fluorescein. Die Konzentration nahm im Laufe des Tages laufend zu und erreichte am Abend (17.22 Uhr) den höchsten Wert. Im Gegensatz zu der «Hugschwendi-Hangfussquelle» musste das Karstwasser, welches bei der Hugschwendiquelle austrat, offensichtlich eine wassergesättigte Zone durchqueren. Im Hugschwendi-Quelltopf traf zu keiner Zeit Sulforhodamin B aus der Via-Mala der Bettenhöhle ein.

In allen anderen beobachteten Quellen sowie im 100 m tiefen Grundwasserpumpwerk des ehemaligen Militärspitals (heute Sportcamp) liess sich kein Markierstoff mit Sicherheit nachweisen. Am ehesten wäre ein solcher bei der Stöckquelle zu erwarten gewesen. Da aber diese durch die Tagesgangwitterung zeitweise versiegte, sind bei ihr keine gesicherten Aussagen möglich. Für die Quellen weiter nördlich im Melchtal war die Verdünnung wohl zu hoch, zumal das Talgrundwasser von weiteren Karstwasserezutritten sowohl von der Ost- als auch von der Westflanke des Melchtals zusätzlich gespiesen wird. Hinzu kommt die Schwierigkeit, dass der Hugschwendibach je nach Schüttung der Quellen an verschiedenen Orten im Talschotter versickert und später wieder teilweise auftritt. Somit ist bei einem allfälligen Markierstoffnachweis



nicht mehr klar, ob es sich um einen primären Markierstoffnachweis oder nur um einen sekundären Wiederaustritt von versickertem Bachwasser handelt.

1 Ausgangslage

Im Karstgebiet zwischen der Melchsee-Frutt und der Stöckalp im hinteren Melchtal wurden zur Planung der beiden Stauanlagen Tannensee und Melchsee zwischen 1918 und 1936 mehrere Wassermarkierversuche durchgeführt. Sie alle betrafen die Entwässerung des westlichen Teils des sogenannten Schrattenkarstes mit Einspeisung der Markierstoffe beim Ausfluss des Melchsees (Stäubiloch als natürliche Wasserschwinde / Ponor). Bei all diesen Versuchen liess sich mehr oder weniger eindeutig eine unterirdische Fliessverbindung ins Melchtal zur Hugschwendiquelle (Hauptquelle/Überlaufquelle am Fuss des Schrattenkarstes) bei der Stöckalp und z.T. bei benachbarten Quellen nachweisen. Zugleich kann davon ausgegangen werden, dass ein wesentlicher Teil des Karstwasserleiters direkt ins Talgrundwasser im Gebiet der Stöckalp übergeht.

Während im westlichen Teil des Schrattenkarstes also zahlreiche Untersuchungen angestellt worden sind, fehlen hingegen jegliche hydrologische Entwässerungsnachweise vom östlichen Teil des Schrattenkarstes. Die ausgedehnteste Höhle in diesem Gebiet ist die Bettenhöhle mit bislang 30 km vermessenen Höhlengängen (Stand: Sept. 2016) samt mehreren vados fließenden Höhlenbächen und drei fossilen Karstniveaus (TRÜSSEL, 2003, 2013).

2 Zielsetzung

Mit einem Markierversuch mit Einspeisung in zwei verschiedenen Bächen in der Bettenhöhle sollen die unterirdischen Karstwasserverbindungen ins Melchtal nachgewiesen werden. Die Hauptfragestellung ist dabei, ob das Wasser des Bettenhöhlebachs ebenfalls in die Hugschwendiquelle mündet oder aber direkt ins Talgrundwasser übergeht. Denn der tiefste erforschte Höhlenabschnitt mit fossil-phreatischen Karströhren liegt nicht mehr direkt in der «Schrattenplatte» wie alle anderen bislang bekannten Höhlen der Melchsee-Frutt, sondern tektonisch tiefer in einer von Sperrschichten nach oben und unten grösstenteils abgedichteten Quintenkalk-Schuppe oder sogar im nächst tieferen Karststockwerk («Tannenstockplatte»). Der tiefste erforschte Punkt in der Bettenhöhle befindet sich an einem Siphon («Schöllenen-Siphon»; ohne Stauspuren) auf 1'285 m ü.M. und somit nur 185 m höher gelegen als die Hugschwendiquelle (1'108 m ü.M.), aber noch 1 km Luftlinie entfernt.

Zeitgleich mit der Markierstoff-Einspeisung des Bettenhöhlebachs soll der nur rund 150 m nordöstlich, parallel verlaufende Via-Mala-Bach mit einem zweiten Markierstoff eingefärbt werden. Hier handelt es sich um einen Höhlensektor, in dem der Wasserlauf sowie das Höhlensystem in die Tiefe noch unerforscht sind. Der vorläufige Vermessungsendpunkt befindet auf 1'469 m ü.M.

Aus den Ergebnissen der beiden Markierstoffeingaben sollen Erkenntnisse über die noch unerforschten Karstwasserwege und somit über das Karströhren-Potenzial bis zur heutigen Vorflut gewonnen werden. Insbesondere sind Antworten gesucht, ob die Höhlenbäche und Karst-

röhren im Bereich der 1 km entfernten Talquellen in einen weitläufigen rezenten Karstwasserspiegel eintauchen oder aber mehr oder weniger frei fließend in Richtung Hugschwendiquelle und allenfalls weitere Quellen (Stöckquelle, Klosterwaldquelle) gelangen.

3 Übersicht

3.1 Geografische Übersicht

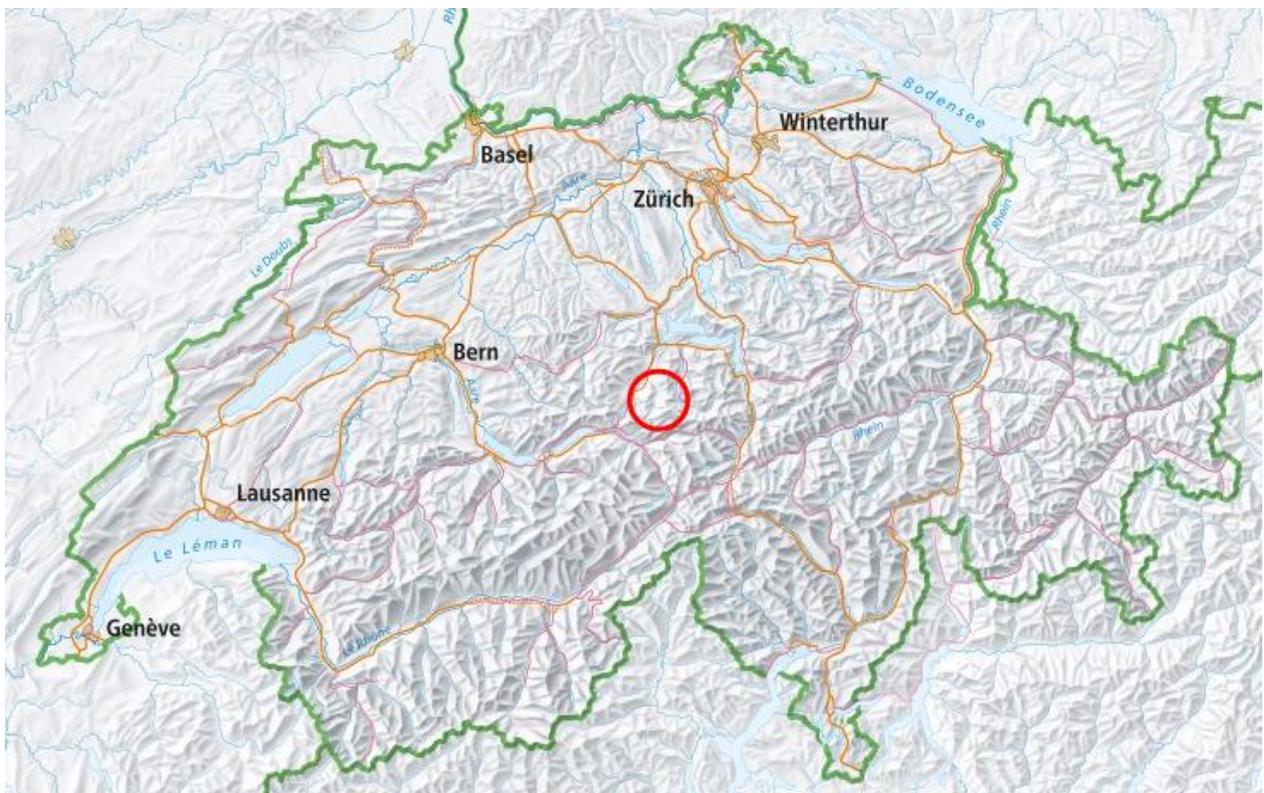


Abbildung 1: Lage des Melchtals (Karte: Bundesamt für Landestopografie, swisstopo; Darstellung: J. Weyermann).

Das Melchtal beginnt südlich von Kerns in St. Niklausen und führt über den Ort Melchtal zur Stöckalp. Gegen Süden wird das Melchtal von der Geländestufe zur Melchsee-Frutt hin abgegrenzt. Die Bettenhöhle liegt auf der Bettenalp. Diese befindet in nordöstlicher Richtung der Melchsee-Frutt.

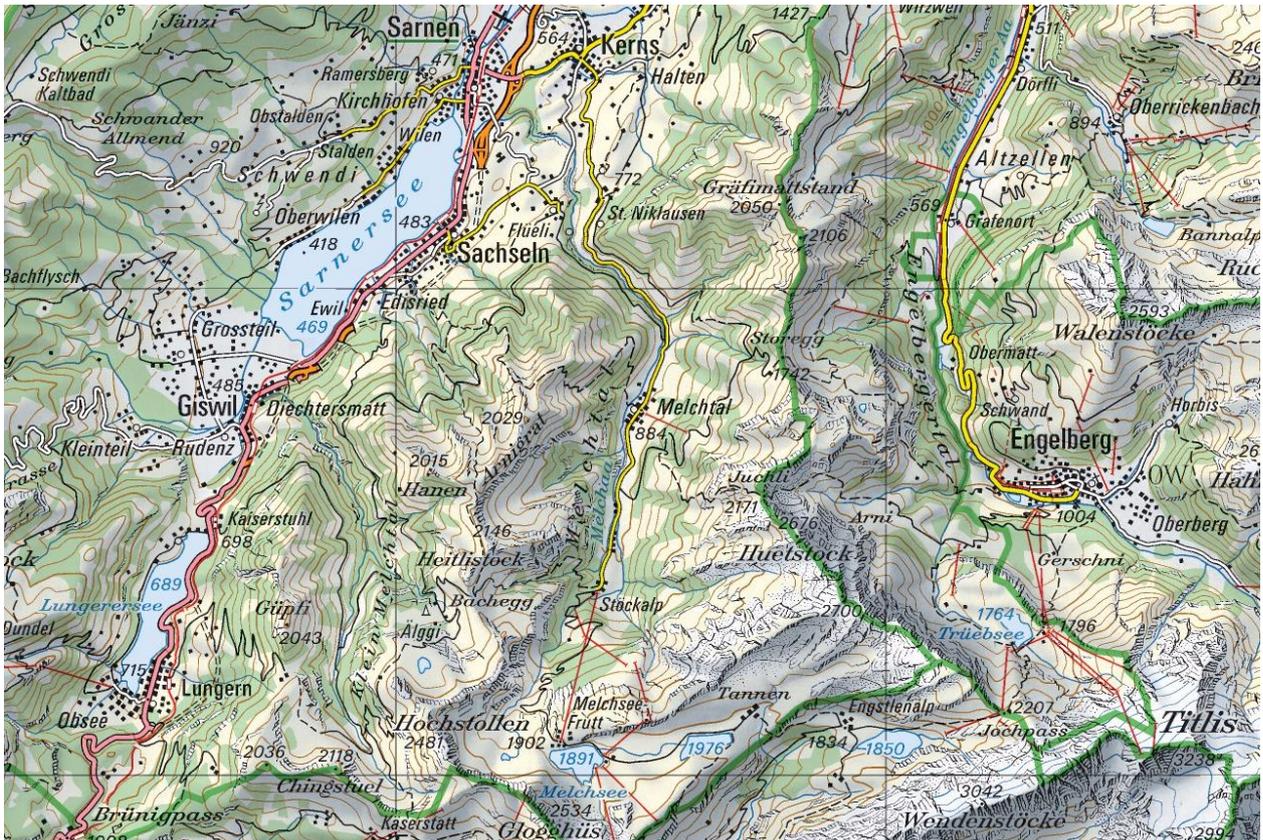


Abbildung 2: Übersicht auf das Melchtal (Kartenausschnitt: Bundesamt für Landestopografie, swisstopo).

3.2 Geologische und hydrogeologische Übersicht

Weite Teile der Quinten-Formation im hinteren Melchtal sind verkarstet und entwässern zu einem wesentlichen Teil unterirdisch (TRÜSSEL, 2007).

3.2.1 Tektonik

Der Untergrund ist im nördlichen Melchtal aus den Gesteinsformationen der Drusberg-Decke, im südlichen Melchtal aus denjenigen der Wildhorn-Decke aufgebaut. Von Norden nach Süden sind Kreide-, Malm- und Dogger-Einheiten anzutreffen. Jede dieser Einheiten bildet ein eigenes Stockwerk und zeichnet sich durch einen eigenen Deformationsstil aus (MÖRI, 1995).

Südlich des Dorfes Melchtal bis hinauf zur Hochalpe Tannen und zum Graustock liegt dachziegelartig übereinander gestapelt eine Reihe zum Teil etwas verfalteter, von Brüchen durchzogener, gegen Nordwesten geneigter Platten der Quinten- und Schilt-Formation (WILDBERGER,

1985). Die einzelnen Kalkplatten werden in der Regel von mergeligen Gesteinen (Schilt-Formation im Liegenden sowie Palfries-Formation im Hangenden) begleitet. Lokal können diese aber auch ausgequetscht oder im Gegenteil angehäuft sein. Von Bedeutung sind die «Schrattenplatte» sowie mindestens zwei weitere, darunter liegende Kalkplatten («Tannenstock- und Graustockplatte»).

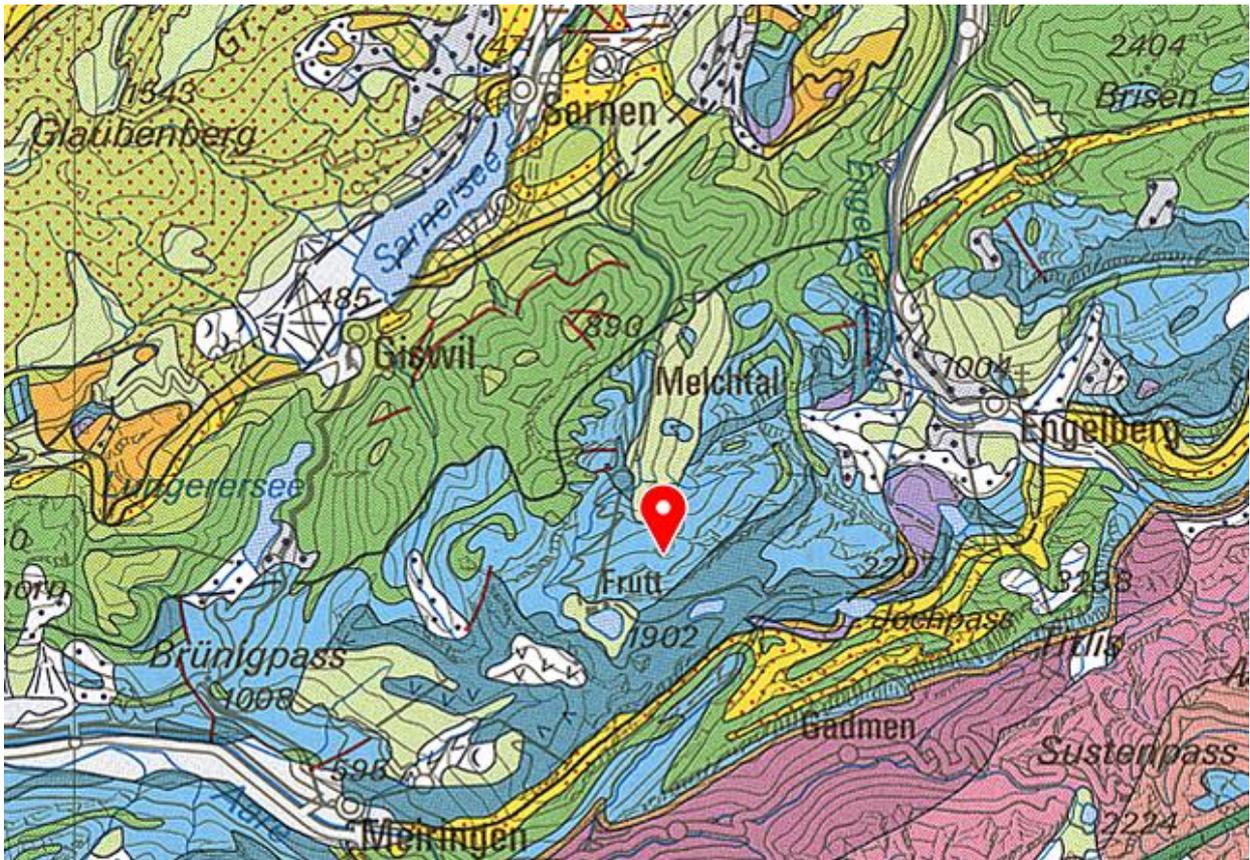


Abbildung 3: Ausschnitt aus der Geologischen Karte der Schweiz 1:500'000. Der rote Punkt zeigt auf die Bettenalp im Schratzenkarst, wo die beiden Markierstoffe im 30 km langen Bettenhöhle-System eingegeben worden sind. Blau = Malm (Quinten-Formation), graublau = Dogger, grün = Kreide). Der schwarze Linienvverlauf knapp nördlich von Melchtal quer durch die Grafik zeigt die Alpine Hauptüberschiebung und die Grenze zwischen der Drusbergdecke im Norden und der Wildhorndecke im Süden. (Kartenausschnitt: Bundesamt für Landestopografie, swisstopo).

Der Schratzenkarst («Schrattenplatte») ist der westliche Teil der Barglen-Einheit (BRUNNER, 1999). Er befindet sich zwischen der Melchsee-Frutt im Süden und der Stöckalp im Norden. Die südliche Begrenzung zieht sich vom Dorf Melchsee-Frutt (1'900 m ü.M.) über den Bonistock über den Tannenschild (2'182 m ü.M.) bis zum Chringen. Die nach Süden abfallenden Felswände sind bis zu 80 m mächtig; grösstenteils aus der Quinten-Formation und im Wandfussbereich streckenweise auch aus der Schilt-Formation aufgebaut. Nach Osten wird die «Schrattenplatte» durch ein glazial entstandenes Trogtal (Bettenalpbach-Einschnitt) begrenzt. In der Bettenhöhle konnte – bedingt durch den Bettenalpbach-Einschnitt – der unterbrochene fossiphreatische Karströhrenverlauf (Bobbahn, 1'648 m ü.M.) belegt werden.

Die «Schrattenplatte» fällt in Richtung Nordwesten 800 Höhenmeter von der Melchsee-Frutt bzw. 1'100 Höhenmeter ab dem Tannenschild zur Stöckalp ab (Horizontaldistanz: 3 km). Im

Abstand von jeweils wenigen hundert Metern sind Brüche und Verwerfungen mit meist wenigen Metern, vereinzelt aber auch mit 20 bis 40 m Versatz anzutreffen.

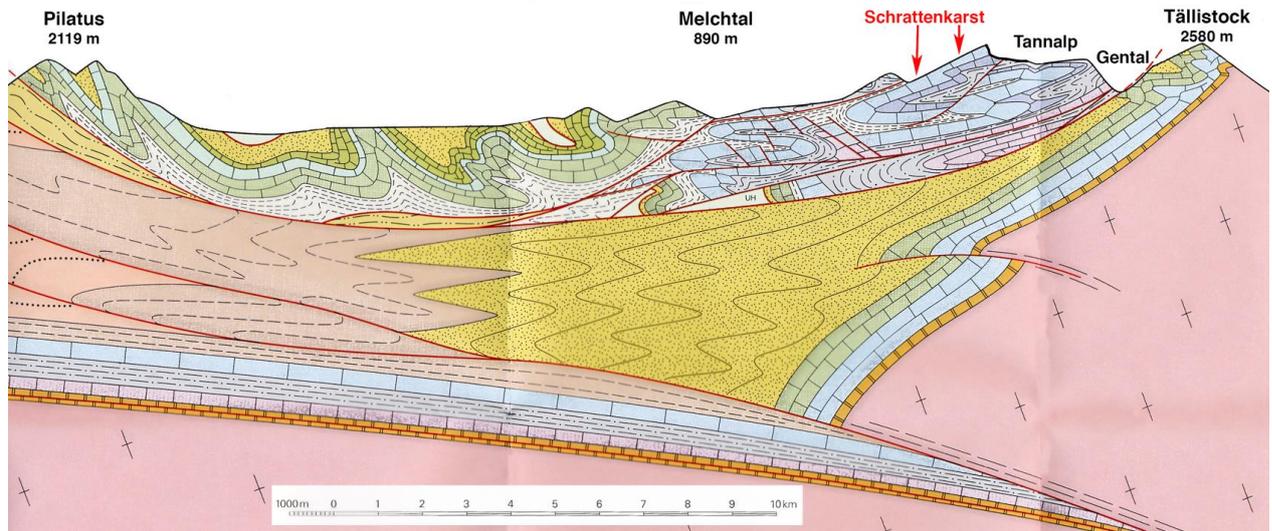
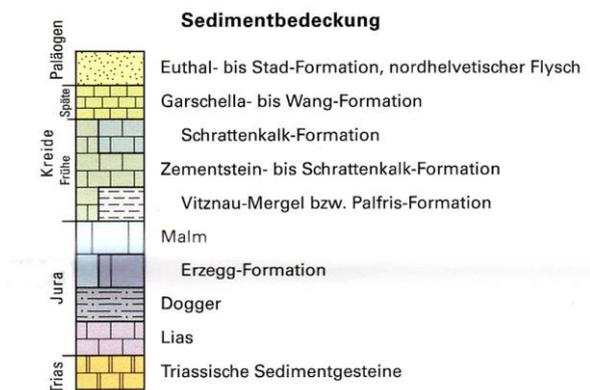


Abbildung 4: Tektonisches Profil durch den Alpennordrand der Zentralschweiz vom Pilatus übers Melchtal bis zum Tällistock. Darstellung: M. Trüssel (aus O. A. Pfiffner, 2013, in: Erläuterungen zu Blatt 1170 Alpnach – Tafel II).



3.2.2 Stratigraphie

Im hinteren Melchtal sind ausschliesslich mesozoische Sedimente vorhanden. Diese können der Südfazies der Helvetischen Schichtreihe der Zentralschweiz zugeordnet werden (MÖRI, 1995). Für die Verkarstung relevant ist die Quinten-Formation und das stratigrafisch nach unten anschliessende Mürtschen-Member der Schilt-Formation.

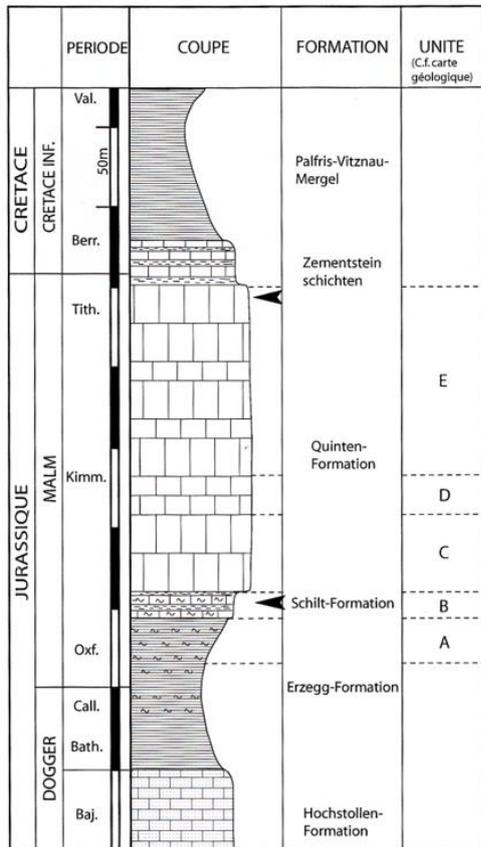


Abbildung 5: Stratigraphisches Profil Schrattenkarst, Melchsee-Frutt. (aus E. Weber, 2004, S. 21).

3.2.3 Morphologie

Das Untersuchungsgebiet ist glazial überprägt. Zwischen der Stöckalp und der Melchsee-Frutt haben sich insbesondere oberhalb der Waldgrenze ausgeprägte Karstflächen gebildet mit den typischen Makro- und Mikrokarstformen. Im Umfeld des Dorfes sind Rundhöcker und Findlinge anzutreffen. Im südlichen Karstteil kommen zahlreiche ehemalige Gletscherwasser-Schlucklöcher vor. Einige fossile Karströhren sind in den Felswänden angeschnitten. Weiter südlich, ausserhalb des Malm, öffnet sich das Tal zu einer ausgedehnten Hochebene mit ehemals natürlichem Melchsee und weiteren kleinen Seen sowie Flach- und Hochmooren.

3.2.4 Hydrogeologische Situation

Der Schrattenkarst wird nahezu vollständig unterirdisch entwässert. Die Grundfläche zwischen Melchsee-Frutt – Chringen – Stöckalp – Cheselen beträgt 5,7 km². Das Stäubiloch ist ein Ponor. Es war vor der Aufstauung des Melchsees der natürliche Abfluss (heute Hochwasserentlastung) der südlich des eigentlichen Karstes gelegenen Hochtals, sodass der Input in den Karst bis ca. Ende 1950er-Jahre über das Stäubiloch (und weitere Schlucklöcher) um 7,5 km² bzw. 1,5-mal grösser war als die eigentliche Karstfläche.

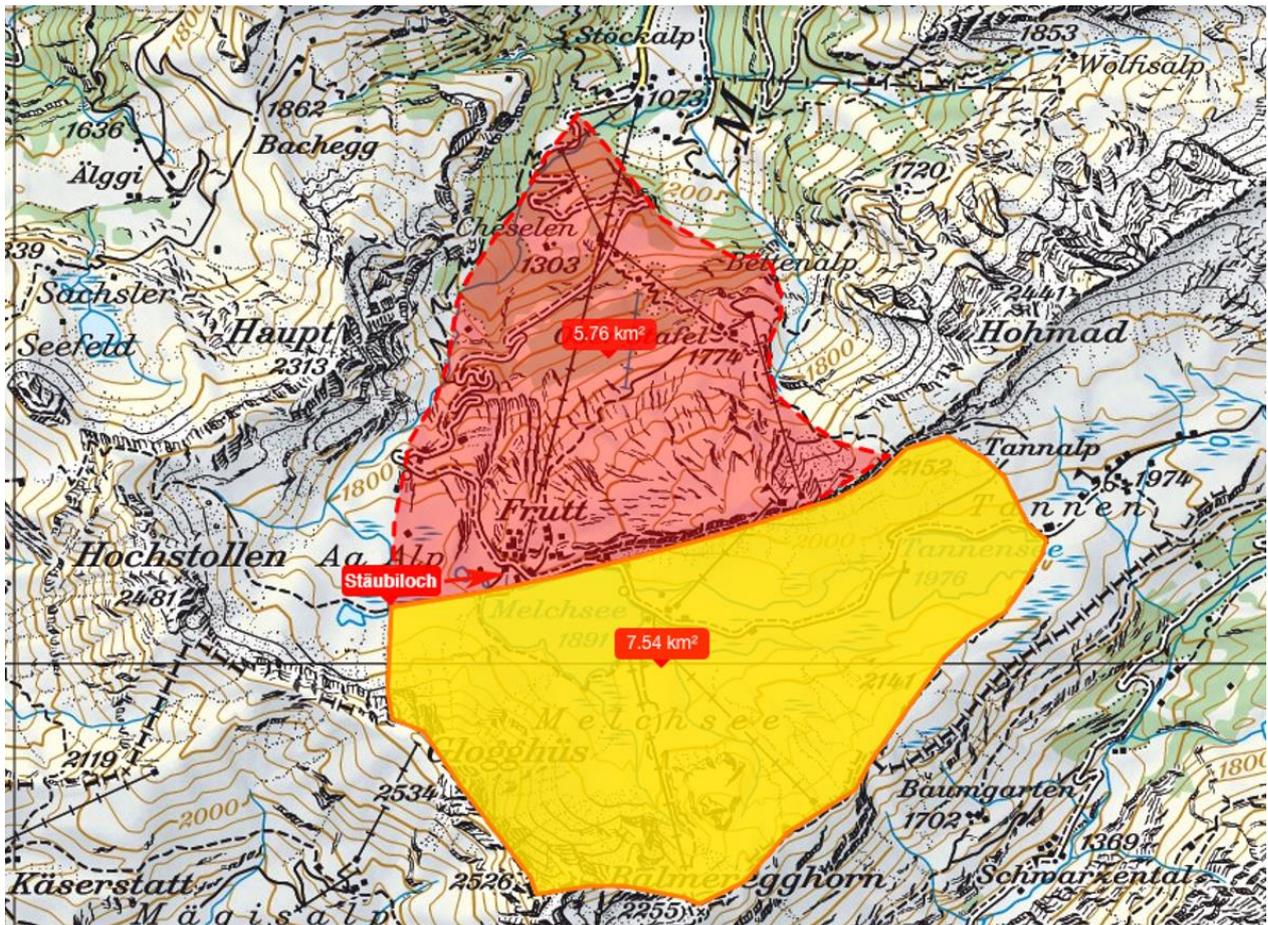


Abbildung 6: Das hydrologische Einzugsgebiet der Schrattenkarstes. Rot zeigt die eigentliche Karstfläche zwischen Melchsee-Frutt – Chringen – Stöckalp – Cheselen. Gelb kennzeichnet das ausserhalb des Karstes liegende Einzugsgebiet vor der Aufstauung des Melchsees. Bis Ende der 1950er-Jahre wurde dieses Gebiet durch das Stäubiloch entwässert (Kartenausschnitt: Bundesamt für Landestopographie, swisstopo; Darstellung: M. Trüssel).

Drei fossilphreatische Paläokarstniveaus (1'950 bis 2'020 m ü.M., 1'580 bis 1'750 m ü.M. und 1'300 bis 1'380 m ü.M.) konnten nachgewiesen werden (Trüssel, 2014). Die Entwässerung erfolgte beim höchsten bzw. ältesten Niveau von Ost nach West, im mittleren von Südwest nach Nordost und beim jüngsten fossilen Niveau von Südost nach Nordwest.

In den 58 km vermessenen Höhlengängen im Schratzenkarst (Trüssel, 2003, 2013) können mehrere permanent fließende Höhlenbäche angetroffen werden. Hinzu kommen noch weitere periodisch fließende unterirdische Wasserläufe. Ausgenommen des Bettenhöhle- bzw. Schöllenenbachs (siehe Abbildung 7) verlaufen alle anderen Höhlenbäche – soweit sie begangen werden können – unter vadosen Bedingungen wenig über oder direkt den Sperrschichten entlang in Richtung Melchtal. In der Schratzenhöhle gehören insbesondere der Kleine und Grosse Schratzenbach zu den permanenten Gewässern.

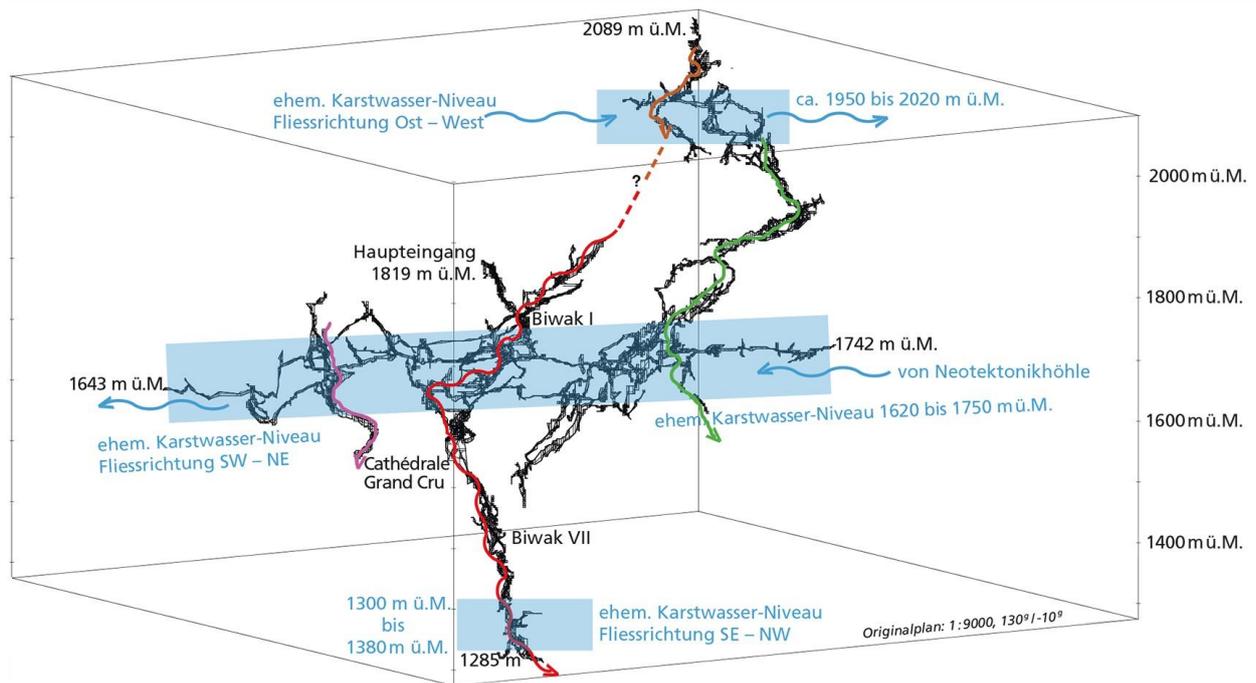


Abbildung 7: Die Bettenhöhle mit den drei nachgewiesenen fossilen Karstwasserniveaus und den heutigen permanenten Höhlenbächen. Beim höchsten und ältesten ehemaligen Karstwasserniveau floss das Wasser von Ost nach West, beim mittleren von Südwest nach Nordost und das unterste von Südost nach Nordwest. Via Mala (violett), Bonibach (orange), Bettenhöhle-/Schöllenenbach (rot), Loreleybach/Grand-Canyon-Bach (grün). Vermessungsstand: 31. Dezember 2015 (Darstellung: M. Trüssel).

In der Bettenhöhle (von West nach Ost) sind die wichtigsten permanent fließenden Höhlenbäche der Grand-Canyon-Bach, der Bettenhöhlebach/Schöllenenbach und der Via-Mala-Bach. Beim Grand-Canyon-Bach ist die hindernislose Schachtfortsetzung in die Tiefe (1'645 m ü.M.) noch unerforscht. Der Schöllenenbach – als direkte Fortsetzung des Bettenhöhlebachs zu verstehen (für eine kurze Strecke physisch nicht begehbar) – taucht ohne nennenswerte Rückstauspuren auf 1'285 m ü.M. in einen lokalen Siphon ein (nur ca. 180 m über der Vorflut im Melchtal, aber noch knapp 1 km entfernt). Der Via-Mala-Bachlauf ist ebenfalls nicht bis ans Ende erforscht. Der letzte/tiefste Messpunkt befindet sich in der Via Mala auf 1'469 m ü.M. (ca. 360 m über der Vorflut und 1,2 km entfernt).

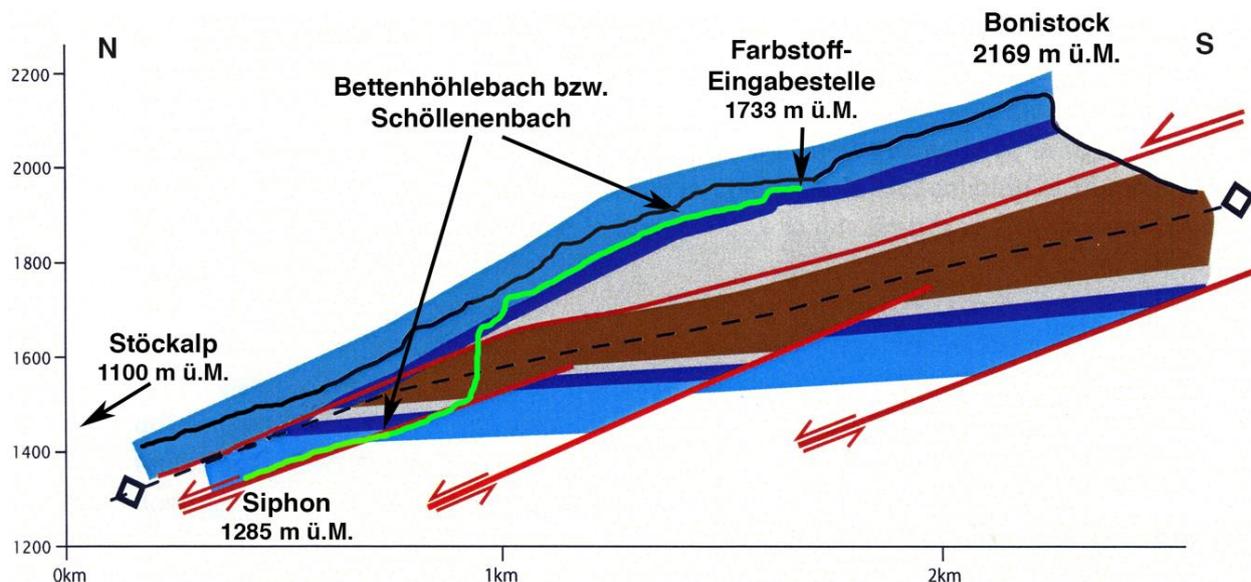


Abbildung 8: Nach aktuellem Kenntnisstand verlässt der Bettenhöhle- bzw. Schöllenenbach (grüne Linie) als einziger Höhlenbach die «Schrattenplatte» im Tiefsystem der Bettenhöhle und dringt in eine tiefer liegende Schuppe der Quinten-Formation ein. Der «Quintenkalk» ist in dieser Schuppe nur ca. 40 m mächtig und wird nach oben wie nach unten durch Sperrschichten vermutlich der Schilt-Formation eingegrenzt. Quinten-Formation (hellblau), Schilt-Formation (dunkelblau), Erzegg-Formation (grau), Hochstollen-Formation (braun) (in Anlehnung an WEBER, 2004, modifiziert und ergänzt M. Trüssel).

Die grössten Karstquellen am Fuss des Schrattenkarstes sind die Hugschwendiquelle (oberster temporärer Quelltopf auf 1'108 m ü.M.) und die Stöckquelle (höchste Austrittsstelle auf 1'120 m ü.M.). Als typische Karstquellen sind sie nur periodisch aktiv. Ein beträchtlicher Teil des Karstwassers – in Trockenphasen des Sommerhalbjahres sowie im Winter sogar vollständig – geht direkt ins Grundwasser des Melchtaler Talbodens über.

Die Cheselenquelle liegt am Nordwestrand des Karstes auf rund 1'300 m ü.M. mitten in einem Bach- und Gehängeschuttkegel. Sie ist gemäss Literatur aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts oft aktiv gewesen. Ganz anders die Beobachtungen der letzten zwanzig Jahre: Die Quelle scheint nur noch als «Hungerbrunnen» aktiv zu sein, sie springt also nur noch bei überdurchschnittlichen Niederschlagsereignissen an. Beim Starkniederschlagsereignis im August 2005 haben im Gebiet der Cheselen Quellaustritte (höchster Quellaustritt ca. 200 Höhenmeter über der eigentlichen Cheselenquelle) die ausgetretenen Wassermassen zu Flur- und Infrastrukturschäden geführt (TRÜSSEL, 2013).

3.2.5 Grundwasserpumpwerk «Altes Militärspital» (heute Sportcamp Melchtal)

Bei einer Ende der 1960er-Jahre ausgeführten, 98 m tiefen Bohrung zur Trinkwasserfassung östlich der Einmündung des Innenbachs in die Melchaa (950 m ü.M.) wurde bis zuunterst eine durchgehende Lockergesteinsfüllung angetroffen. Die Lockergesteinsfüllung beträgt hier mehr als 100 m. Gemäss WILDBERGER (1985) ist stellenweise eine glaziale Übertiefung bis unter 800 m ü.M. denkbar.

Gemäss den Planunterlagen (unpubliziert) lag der Grundwasserspiegel im Hochwinter in einer Tiefe von rund 45 m. Im Laufe der Grundwasserüberwachung wurden – je nach Jahreszeit

und Wasserführung der Melchaa – Grundwasserspiegel-Schwankungen zwischen - 6,5 m (Niveau der Melchaa-Infiltration) und - 46,5 m gemessen. Aus dem Profil nach WILDBERGER (1985) ist auch ersichtlich, dass an den Talflanken als anstehendes Gestein mindestens zwei nach Nordwesten geneigte Kalkplatten bzw. -schuppen auftreten.

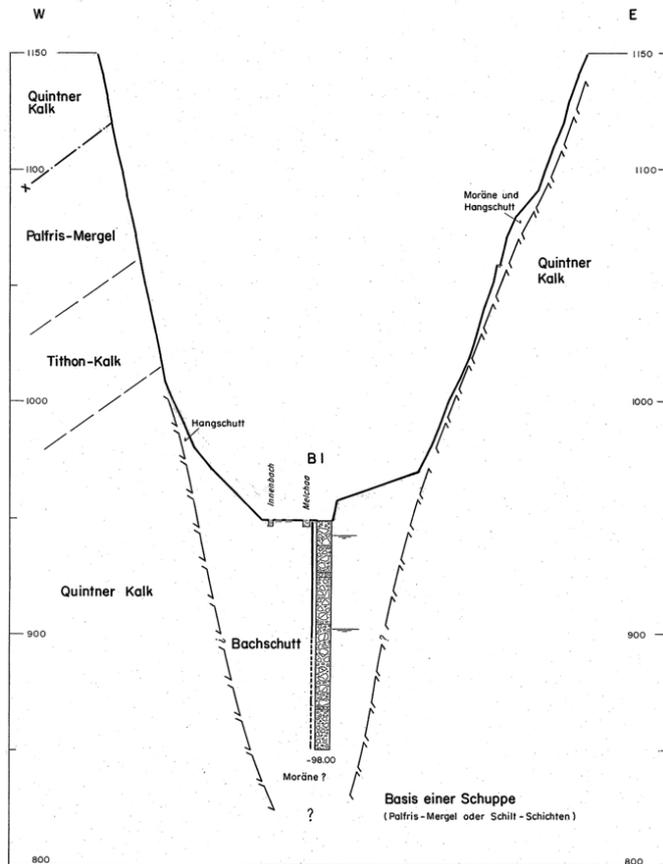


Abbildung 9: Geologisches Profil durch das Melchtal auf der Höhe Balm Matt (Westseite) und Oberhusen (Ostseite). Darin enthalten ist das Profil der 98 m tiefen Bohrung im Lockergestein von 950 m ü.M. bis auf 852 m ü.M. hinunter (aus Wildberger, 1985).

3.2.6 Seitenmoräne Hugschwendi

Moränenablagerungen sind auf der Cheselenalp, entlang des Bettenalpaches und im Gebiet Hugschwendi anzutreffen. Im Bereich der neu nachgewiesenen Hugschwendi-Hangfussquelle ist zehn Tage nach dem Wassermarkierungsversuch nach einem Starkniederschlagsereignis ein Hangrutsch niedergegangen. Dabei wurde der Moränenboden lokal aufgeschlossen. Der Aufbau des Untergrundes ist hier von Interesse, weil die Quelle nicht im Bereich des anstehenden Felsens liegt. Das Felsband der nach Norden ausgebissenen und von Verwerfungen durchsetzten «Schrattenplatte» liegt etwa 120 m höher (Luftlinie 200 m, Neigung durchschnittlich 20°). Es ist anzunehmen, dass bei einer der Verwerfungen das Karstwasser in das Lockergestein übertritt. Dieses besteht aus einem Moränenschleier und weiter westlich aus Bergsturzmaterial. Über dem Moränenmaterial hat sich eine etwa 50 cm mächtige Decklehmbraunerde ausgebildet. Das Muttergestein des Bodens ist also nicht das Moränenmaterial, sondern der darüber liegende Hanglehm (WERNLI, 2013). Die Bodenart ist sandiger Lehm. Der B-Horizont ist gleichmässig verbraunt und gut durchwurzelt, was auf einen ausgeglichenen Wasser- und

Lufthaushalt hinweist. Das Solum ist für diese Hanglage aussergewöhnlich mächtig, was sich nur durch denudative Prozesse im Mittel- und Oberhang erklären lässt.



Abbildung 10: Anrissstelle eines Erdrutsches nach einem Starkniederschlagsereignis am 1. Juni 2013. Der Rutsch liegt praktisch in der Falllinie der Hugschwendi-Hangfussquelle (Foto: 16. Juni 2013, M. Trüssel).

4 Wassermarkierungsversuch vom 18. Mai 2013

4.1 Methodik

Der Einsatz von künstlichen Fluoreszenztracern (im Folgenden: Markierstoff) stellt heute die häufigste Methode dar, um die Eigenschaften unterirdischer Wasserwegsamkeiten abzuklären. Das Prinzip ist einfach: der Markierstoff wird an einer Stelle in das Wasser gegeben und an den Austrittsstellen durch Probenahmen wieder eingefangen. Aufgrund der Nachweise sowie dem Verlauf der Markierstoff-Konzentrationen können Aussagen über die Fließverbindungen unter den herrschenden meteorologischen und hydrologischen Bedingungen gemacht werden.

Zu den häufigsten Fragestellungen von Wassermarkierungsversuchen zählen:

- Wohin fließt das Wasser?
- Woher kommt das Wasser?
- Besteht zwischen zwei Punkten eine Verbindung?
- Wie breiten sich Markierstoffe im Wasser aus?

In Karstgebieten wie auf der Melchsee-Frutt wird die Tracertechnik insbesondere für die regionale Erkundung der Grundwasserzirkulation und die Erstellung konzeptioneller Modelle von Karstsystemen eingesetzt. Mithilfe der Markierstoffe werden Karstwasserwege nachgewiesen oder die Einzugsgebiete von Karstquellen abgegrenzt. Wie auch im vorliegenden Versuch werden heutzutage fast ausschliesslich für die Umwelt ungefährliche Markierstoffe verwendet, da sich diese im Labor bis zu kleinsten Konzentrationen nachweisen lassen. Ein erfolgreicher Markierungsversuch bedingt aber auch eine klare Zielsetzung, eine gute Versuchsvorbereitung, die richtigen Witterungsverhältnisse sowie ein sehr sorgfältiger Umgang mit den Markierstoffen.

Der Wassermarkierungsversuch vom 18. Mai 2013 wurde vorgängig der Koordinationsstelle INFO-TRACER des Bundesamtes für Umwelt gemeldet. Diese koordiniert und archiviert Angaben zu Markierungsversuchen im Grundwasser der Schweiz.

Mit dem Wassermarkierungsversuch Bettenhöhle Ost – Stöckalp sollte nachgewiesen werden, wohin das Wasser zweier Bäche der Bettenhöhle fließt. Dazu wurden zwei verschiedene Markierstoffe in die Bäche eingegeben (siehe Kap. 4.2) und im Anschluss die möglichen Austrittsstellen (siehe Kap. 4.3) während mehrerer Monaten überwacht.

Für den Nachweis der Markierstoffe wurden die beiden folgenden, gängigen Methoden angewandt:

- Im Wasser ausgelegte Aktivkohle, eingepackt in kleine Stoff-Säckchen, nimmt durchströmenden Markierstoff auf. Der Markierstoff kann später im Labor herausgelöst und damit nachgewiesen werden. Mit der Aktivkohle kann der genaue Zeitpunkt des Markierstoffaustrittes nicht bestimmt werden. Hingegen ist der Personalaufwand gering.
- Mittels Wasserproben, die bei den Austrittsstellen entnommen werden, kann die Markierstoffkonzentration im Labor direkt im Wasser gemessen werden. Im Gegensatz zur Aktivkohle liefern Wasserproben deshalb genaue Angaben zum Austrittszeitpunkt, was für die Interpretation des Versuches einen grossen Mehrwert erbringt. Besonders in einer anfänglich intensiven Beprobungsphase ist der Personalaufwand aber beträchtlich.

4.2 Eingabestellen

Die beiden Eingabestellen befinden sich in der Bettenhöhle auf der Bettenalp (Melchsee-Frutt OW).

Eingabestelle	m ü.M	Messpunkt	Markierstoff	Gewicht	Bemerkung
Bettenhöhlebach bei Biwak I	1'733	MP 20/8	Fluorescein (Färbung grün)	2 kg	100 m unter Terrain
Via Mala (Sektor Stafelhöhle)	1'635	MP 200/35	Sulforhodamin B (Färbung rot)	3 kg	ca. 120 m unter Terrain

Tabelle 1: Übersicht auf die Eingabestellen (Darstellung: J. Weyermann).

Zwischen den beiden Eingabestellen sowie der Hauptquelle Hugschwendi liegen folgende geographische Distanzen:

Eingabestelle	Schrägdistanz	Horizontaldistanz	Höhendifferenz
Bettenhöhlebach bei Biwak I	1.7 km	1.5 km	650 m
Via Mala (Sektor Stafelhöhle)	1.55 km	1.4 km	535 m

Tabelle 2: Übersicht auf die geographischen Distanzen (Darstellung: J. Weyermann).

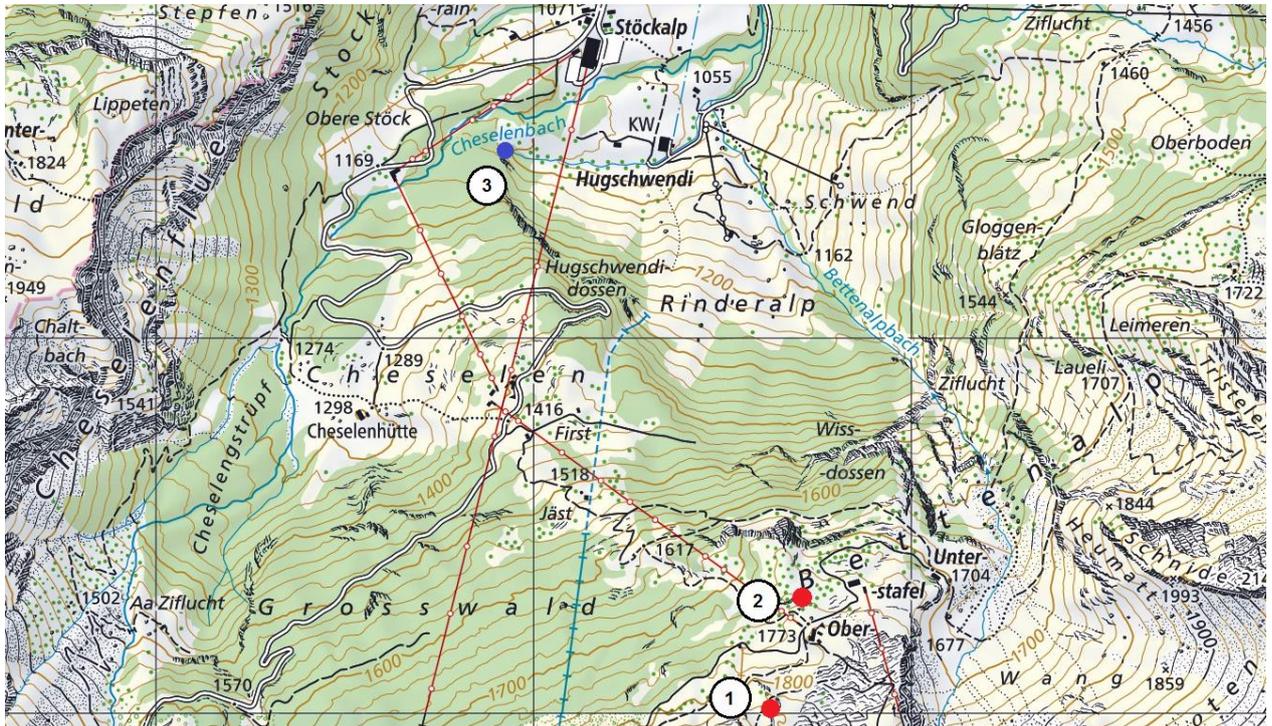
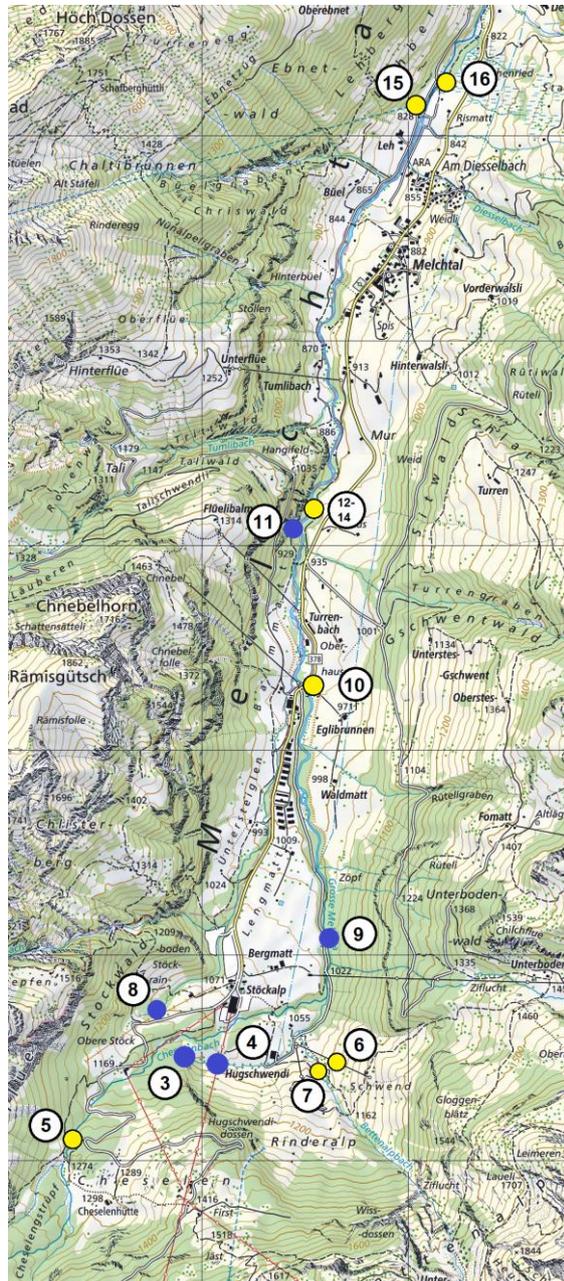


Abbildung 11: Übersicht auf die Eingabestellen Biwak I (1) und Via Mala (2) sowie die Hauptquelle Hugschwendi (3), (Kartenausschnitt: Bundesamt für Landestopographie, swisstopo, Darstellung: J. Weyermann).

4.3 Probenahmestellen

Genauere Beschreibungen zu den Probenahmestellen können aus den Anhängen A1 und A2 entnommen werden.



Nr.	Name	Kurz-Bez.	Beprobung
16	Allmendquellen	ALL	AK
15	Melchaa (Fassung/Ableitung EWO)	MEWO	AK
14	Quellbord 3	QB1	AK
13	Quellbord 2	QB2	AK
12	Quellbord 1	QB3	AK
11	Chlosterwaldquelle	CHL	WP / AK
10	Grundwasserpumpwerk ehem. Militärspital Stöckalp	DUR	AK
9	Höhle H1	HH1	WP / AK
8	Stöckquelle	STO	WP / AK
7	Bachlauf Rinderalp	BRU	AK
6	Trinkwasserf. Schwand	SCHW	AK
5	Cheselenbach	CHES	AK
4	Hugschwendi-Handfussquelle	HUGF	WP
3	Hugschwendiquelle	HUG	WP / AK

Abbildung 12: Übersicht der Probenahmestellen von Süd nach Nord. Blau: Wasserproben (WP), gelb: Aktivkohle (AK), (Kartenausschnitt: Bundesamt für Landestopographie, swisstopo; Darstellung: J. Weyermann).

Für den Markierversuch wurden insgesamt 16 Probenahmestellen bestimmt. Aus fünf Probenahmestellen wurden jeweils auch Wasserproben entnommen. Die restlichen Quellen / Bachläufe wurden nur mit Aktivkohle beprobt.

Je nach Beprobungsintervall und Beprobungsart (Wasserprobe oder Aktivkohle) können die Probenahmestellen in Hauptquellen (Quellen Nr. 3 und 4) sowie Nebenquellen (Quellen Nr. 5 bis 16) unterschieden werden.

4.4 Durchführung

4.4.1 Wetterbedingungen

Die Monatsmitteltemperaturen im Mai 2013 lagen in der Schweiz 1,5 bis 3,5 °C unter der Norm 1981-2010. Es war der kühlfte Mai seit 1991. Zugleich war er im ganzen Land nass. Verbreitet wurden 130 bis 200 % der Niederschlagsnorm gemessen, dies vor allem auch als Folge des Unwetters am Monatsende, das regional Rekordniederschläge brachte. Der Monat war auch ungewöhnlich sonnenarm. Im Norden wurden verbreitet weniger als zwei Drittel der normalen Sonnenscheindauer gemessen.

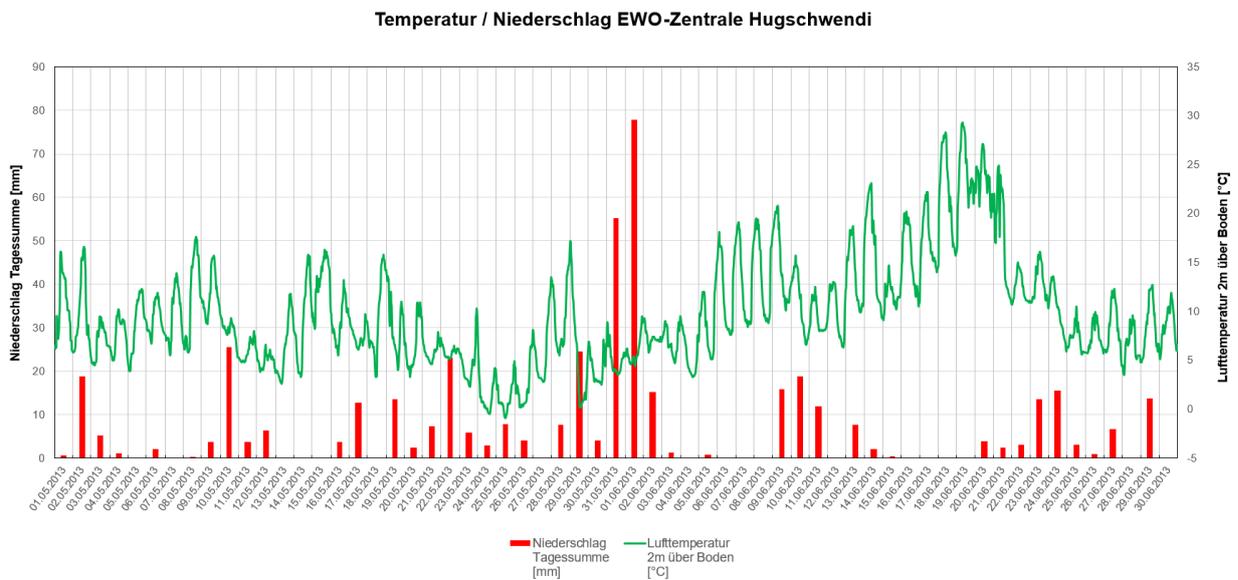


Abbildung 13: Niederschlag (Tagessummen 0 bis 24 Uhr) und Temperaturverlauf vom 1. Mai bis 30. Juni 2013 der Messstation Hugschwendi, Stöckalp (auf 1'100 m ü.M), (Daten: EWO und MeteoSchweiz, Darstellung: J. Weyermann).

4.4.1.a Im Vorfeld des Wassermarkierungsversuchs (1. bis 17. Mai 2013)

In den ersten Mai-Tagen herrschte eine labile Witterung mit lokal heftigen Gewittern, die aber im Schrattenkarst nur wenig Niederschlag brachten und in der Folge die Schneefallgrenze gegen 2'100 m ü.M. sinken liess. Im Einzugsgebiet oberhalb von ca. 1'800 m ü.M. war eine weitgehend geschlossene Altschneedecke (> 1m) vorhanden. Die nächsten Tage blieben kühl, aber meist trocken. Ab dem 10. Mai setzte eine weitere Abkühlung ein, anfänglich begleitet von Niederschlägen (Schnee vorübergehend bis 1'600 m ü.M., im Mittelland z.T. Bodenfrost), die bis zum 13. Mai anhielt. Am 15. Mai tobte – begleitet von einer spürbaren Erwärmung – ein Föhnsturm mit bis zu 102 km/h auf der Melchsee-Frutt. Die beiden Tage vor dem Start des Wassermarkierungsversuchs waren zeitweise nass mit einer Schneefallgrenze bei 2'400 m ü.M.

4.4.1.b Während des Wassermarkierungsversuchs (18. bis 20. Mai 2013)

In der Nacht auf den 18. Mai klarte es auf. Der Tag zeigte sich schön und warm bei aufkommendem Föhn. Im Einzugsgebiet herrschte vorübergehend starker bis stürmischer, im Melchtal am Nachmittag zeitweise böig-starker Föhn. Aufgrund der seit Anfang Mai vorangehend kühlen Witterung lag noch immer oberhalb von 1'800 m ü.M. eine mehr oder weniger geschlossene Schneedecke. Die eintretende Erwärmung sorgte für eine deutliche Durchnässung und zu einem markanten Tagesgang bezüglich Schüttung der Höhlenbäche der Melchsee-Frutt (was sich mit entsprechend zeitlicher Verzögerung gegen Abend auch in den Quellschüttungen zeigte). Um Mitternacht brach der Föhn zusammen und es setzte zuerst leichter, später mässiger Regen ein. Gegen Abend des 19. Mai sinkt die Schneefallgrenze auf 1'900 m ü.M. Auch am 20. Mai blieb es nass bei weiter sinkender Schneefallgrenze bis auf 1'700 m ü.M.

4.4.1.c Im Nachgang des Wassermarkierungsversuchs (ab 21. Mai bis Anfang Juni 2013)

Das nasskalte Wetter hielt noch bis am 26. Mai an. Dabei fiel am 22. Mai über 20 l/m² Niederschlag. In den folgenden Tagen sank die Schneefallgrenze sogar bis auf 1'300 m ü.M. Danach setzte kurzzeitig eine Föhnphase ein, die die Nullgradgrenze kurzzeitig auf 2'800 m ü.M. steigen liess. Doch schon am 29. Mai fiel bis 1'200 m ü.M. Schnee.

Per Ende Mai setzte eine Starkniederschlagsphase ein. Zwischen dem 31. Mai bis 2. Juni fielen auf der Stöckalp 140 l/m² Niederschlag. Die Schneefallgrenze schwankt dabei zwischen 1'500 und 1'900 m ü.M. Aufgrund der tiefen Schneefallgrenze führten in den südlichen OW-Tälern nur die tieferliegende Seitenbäche Hochwasser. Das Einzugsgebiet der grossen Karstquellen lag im Neuschnee. Die Schüttung der Karstquellen war deshalb nur wenig oder gar nicht erhöht. In tieferen Lagen ereigneten sich jedoch diverse Hangrutsche (z.B. oberhalb der Hugschwendi-Hangfussquelle, siehe Kap. 3.2.6).

4.4.2 Einspeisung

Insgesamt vier Personen bildeten die beiden Eingabeteams. Als Eingabedatum wurde aufgrund der Wetterprognose der Samstag, 18. Mai 2013 gewählt.

Team 1, Bettenhöhle-Bach Biwak I: Diomira Uebelmann, Hubert Blättler

Team 2, Via-Mala-Bach Thomas Breu, Simon Berger

Kurz vor der Markierstoffeingabe wurden durch die Eingabeteams die Schüttungen der Höhlenbäche geschätzt (mittels Wassereimern):

Eingabestelle	Datum	Zeit	Schüttung
Bettenhöhle-Bach bei Biwak I	18. Mai 2013	10.30 Uhr MESZ	ca. 80 l/min
Via-Mala-Bach (Sektor Stafelhöhle)	18. Mai 2013	10.50 Uhr MESZ	ca. 160 l/min

Tabelle 3: Schüttungen während der Markierstoffeingabe (Darstellung: J. Weyermann).

Von der Hauptquelle Hugschwendi liegen für den 18. Mai 2013, 11 Uhr keine Schüttungsdaten vor. Die Einspeisung konnte pünktlich um 11 Uhr vollzogen werden. Nach der Einspeisung verliessen beide Eingabeteams umgehend die Bettenhöhle sowie das Beprobungsgebiet, um eine Kontamination durch verschleppte Markierstoffe zu vermeiden.



Abbildung 14: Hubert Blättler bei der Eingabe von Fluorescein beim Biwak I in der Bettenhöhle (Foto: 18. Mai 2013, D. Uebelmann).



Abbildung 15: Thomas Breu bei der Eingabe von Sulforhodamin B in der Via Mala (Foto: 18. Mai 2013, S. Berger).

4.4.3 Probenahmen

Zeitgleich mit der Markierstoffeingabe starteten die Entnahmen der Wasserproben (am 18. Mai 2013, 11 Uhr MESZ). Die Hugschwendiquelle (HUG, Nr. 3) wurde als Hauptquelle stündlich, alle anderen Wasserproben wurden in Intervallen von zwei bis acht Stunden beprobt. Bei Markierstoffaustritt wurde das Probeintervall kurzzeitig auf 15 Minuten verkürzt. Von jeder Probenahmestelle wurden einige Tage vor dem Markierversuch Nullproben entnommen. Während eines zweiwöchigen Intervalls wurden die Aktivkohle-Säckchen zweimal ausgewechselt. Damit sollten Markierstoffe, welche zu einem späteren Zeitpunkt an der Probenahmestelle durchfliessen, nachgewiesen werden können. Beim Austausch des Aktivkohle-Säckchens an der Hugschwendi-Hangfussquelle am 2. Juni 2016 zeigte sich, dass viel Glück im Spiel war. Durch das Starkniederschlagsereignis am Vortag löste sich oberhalb der Quelle ein Murgang und hat das Aktivkohle-Säckchen nur um wenige Meter verfehlt. Die Melchaa hat das Ufer, an welchem das Aktivkohle-Säckchen befestigt war, bereits stark erodiert. Glücklicherweise konnte die Aktivkohle dennoch geborgen werden.

Die Hugschwendi-Hangfussquelle (HUGF, Nr. 4) wurde erst beim Markierstoffaustritt entdeckt. In aller Eile musste eine Probenahmestelle eingerichtet werden. Eine Besonderheit stellte auch das Grundwasserpumpwerk «Altes Militärspital» (DUR, Nr. 10, heute Sportcamp Melchtal) dar. Das Aktivkohle-Säckchen wurde an einem dünnen Seil auf eine Tiefe von -75 Metern im Bohrloch abgesenkt.

Insgesamt wurden während des Markierversuchs gegen 100 Wasserproben entnommen und 45 Aktivkohle-Säckchen ausgelegt.

4.4.4 Visuelle Beobachtungen

4.4.4.a Samstag, 18. Mai 2013

Gespannt warteten alle Mitwirkende des Markierversuchs auf den ersten Markierstoffaustritt. Bei einer geschätzten Abstandsgeschwindigkeit von 200 m/h wurde der Markierstoffaustritt bei der Hugschwendiquelle am 18. Mai 2013 um ca. 19.30 Uhr erwartet.

Überraschend trat am 18. Mai 2013 und 20.20 Uhr an einer unscheinbaren Stelle im rechten Bachufer zwischen EWO-Zentrale und altem Mastfundament roter Markierstoff aus. Ohne Markierstoff wäre diese Stelle nie als Quelle ausgemacht worden, zumal im Wasserlauf zwischen Quellaustritt und Hugschwendizentrale augenfällig Wasser versickert, was sich bei Niederwasser jeweils deutlich zeigt. Sofort wurde eine Beprobungsstelle (Hugschwendi-Hangfussquelle) eingerichtet und die Beprobung im 15-Minuten-Takt gestartet. Der rote Markierstoff färbte den Hugschwendibach tiefrot. Bereits gegen 23 Uhr begann der Wasseraustritt merklich zu versiegen und die Färbung des Wassers wechselte von rot zu einer gelblich-grünen Färbung. Gleichzeitig nahm die Quellschüttung rapide ab.



Abbildung 16: Der überraschende Austritt von Sulforhodamin B bei der Hugschwendi-Hangfussquelle (Foto: 18. Mai 2013, R. Pfüller).



Abbildung 17: Detailaufnahme der Hugschwendi-Hangfussquelle mit dem markanten Austritt von Sulforhodamin B (Foto: 18. Mai 2013, J. Weyermann).

4.4.4.b Sonntag, 19. Mai 2013

Um 09.05 Uhr wurde unterhalb des Hugschwendi-Quelltopfs erstmals grüner Markierstoff festgestellt. Sofort wurde für einige Stunden das Beprobungsintervall auf 15 Minuten erhöht. Der Hugschwendibach färbte sich kurz darauf auch im Quelltopf grün. Die Konzentration des Markierstoffes stieg darauf visuell weiter an, bis der Bach tiefgrün gefärbt war.

An den anderen Probenahmestellen konnte während des Markierversuchs kein Markierstoffaustritt visuell festgestellt werden.



Abbildung 18: Pia Fleischlin entnimmt am Quelltopf der Hugschwendiquelle eine Wasserprobe. Gut sichtbar ist die intensive Grünfärbung des Quellwassers (Foto: 19. Mai 2013, J. Weyermann).

4.4.5 Feldmessungen

Anlässlich der Entnahme von Wasserproben und den weniger häufigen Auswechslungen von Aktivkohle-Proben wurden vor Ort auch Feldmessungen durchgeführt. Bei den grossen Hauptquellen (Hugschwendiquelle, Stöckquelle, Chlosterwaldquelle) wurden z.T. zur kontinuierlichen Aufzeichnung auch Messgeräte installiert. Diese können neben den Erkenntnissen, welche aus den Markierstoffnachweisen gewonnen werden, wichtige Zusatzinformationen zur Interpretation des Wassermarkierversuches liefern.

Bei den Quellaustritten wurden die Wassertemperatur und die Leitfähigkeit gemessen. Nach Möglichkeit wurde auch der Wasserstand mittels Pegel abgelesen. Wo dies nicht möglich war, wurde die Schüttung geschätzt. Bei den Hauptquellen wurde zur Bestimmung der Schüttung bei verschiedenen Wasserständen Abflussmessungen mittels der Salzverdünnungsmethode vorgenommen. In Kombination mit einer kontinuierlichen Wasserstandmessung konnte so insbesondere für die Hugschwendiquelle eine Schüttungskurve berechnet werden.

In der Grundwasserfassung «Militärspital» wurden mit einem Kabellichtlot regelmässig der Grundwasserspiegel und die Wassertemperatur in zwei verschiedenen Tiefen (14 m und 50 m) gemessen. Aus diesen Informationen lassen sich Erkenntnisse zur Grundwasserneubildung durch die Melchaa gewinnen.

Bei der Zentrale des Kraftwerkes Hugschwendi betreibt das Elektrizitätswerk Obwalden (EWO) eine meteorologische Messstelle, bei der die Lufttemperatur und die Niederschlagsmengen aufgezeichnet werden. Die Messdaten wurden der HGU für den Zeitraum des Wassermarkierversuches zur Verfügung gestellt (siehe Kap. 4.4.1).

4.5 Resultate

4.5.1 Labor

Die Auswertung der Proben erfolgte im Auftrag der HGU in zwei Spezial-Labors. In einem ersten Durchgang wurden die erste Serie der Aktivkohle-Proben sowie eine kleine Auswahl an Wasserproben der Hugschwendiquelle (HUG, Nr. 3) sowie der Hugschwendi-Hangfussquelle (HUGF, Nr. 4) eingeschickt. Damit sollte erstens ein Überblick über die Austrittsstellen geschaffen werden. Zweitens konnte so bei den Hauptquellen einerseits der Nachweis erbracht werden, ob nur ein oder beide Markierstoffe ausgetreten sind und andererseits der Zeitraum der Markierstoffaustritte eingegrenzt werden. Im zweiten Durchgang wurden die restlichen Aktivkohle-Proben und ergänzende Wasserproben ausgewertet.

4.5.1.a Aktivkohle-Proben

Die Aktivkohle-Proben wurde allesamt im Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie de l'Université de Neuchâtel (CHYN) ausgewertet. Die positiven Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Probenahmestelle		Zeitraum	Konzentrationsäquivalent [ppb]	
			Fluorescein	Sulforhodamin B
BETG	Bettenhöhlebach (Kathedrale Grand Cru, MP 86/25)	03.04. – 28.12.2013	3'889	-
BETS	Bettenhöhlebach / «Schöllenenbach» (Anfang Schöllenen, MP 718/8)	03.04. – 28.12.2013	1'699	-
HUG	Hugschwendiquelle	18. – 20.05.2013	140.5	-
		20.05. – 02.06.2013	3.79	-
		02. – 16.06.2013	Spuren	-
CHL	Chlosterwaldquellen	17.05. – 02.06.2013	0.88	3.87
		02.06. – 16.06.2013	-	Spuren
ALL	Allmendquellen	17.05. – 02.06.2013	0.07	0.32
		02. – 16.06.2013	Spuren	Spuren

Tabelle 4: Markierstoff-Nachweise in Aktivkohle-Proben (Darstellung: F. Hendry).

4.5.1.b Wasserproben

Auch die Wasserproben wurden zum grossen Teil durch das CHYN ausgewertet. Zusätzlich wurden ausgewählte Wasserproben der Klosterwaldquelle (CHL, Nr. 11) sowie zwei Wasserproben der Hugschwendi-Hangfussquelle durch die Nano Trace Technologies (Martin Otz) aus Jens analysiert. Damit war auch ein Quervergleich gewährleistet. Die positiven Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Probenahmestelle		Zeitpunkt	Konzentration [ppb]	
			Fluorescein	Sulforhodamin B
HUG	Hugschwendiquelle	19.05.2013 07:00	0.5	-
		19.05.2013 09:05	6.85	-
		19.05.2013 10:30	11.58	-
		19.05.2013 12:00	32.29	-
		19.05.2013 13:00	38.85	-
		19.05.2013 14:00	37.51	-
		19.05.2013 15:00	51.25	-
		19.05.2013 16:00	63.00	-
		19.05.2013 17:22	49.53	-
		19.05.2013 20:06	9.25	-
		19.05.2013 23:49	3.49	-
		20.05.2013 07:40	1.27	-
		HUGF	Hugschwendi- Hangfussquelle	18.05.2013 20:35
18.05.2013 21:00	12.18			511.30
18.05.2013 21:15	225.38			2'823.4
18.05.2013 21:45	785.97			644.76
18.05.2013 22:00	864.14			1'645.8
18.05.2013 23:15	318.30			496.92
18.05.2013 23:30	348.46			143.31
19.05.2013 00:00	136.58			273.15
19.05.2013 02:00	1.46			2.66
19.05.2013 03:30	0.24			0.49
CHL	Klosterwaldquellen	18.05.2013 23:10	0.008	0.019
		19.05.2013 06:45	0.080	0.102
		20.05.2013 12:48	0.037	0.018

Tabelle 5: Markierstoff-Nachweise in den Wasserproben (Darstellung: F. Hendry).

4.5.2 Fliessverbindungen

Die mithilfe der Laboranalysen nachgewiesenen Fliessverbindungen im unterirdischen Karstsystem sind in Tabelle 6 aufgeführt. Die maximale Abstandsgeschwindigkeit errechnet sich anhand des Erstrnachweises bei den Quellen. Die dominierende Abstandsgeschwindigkeit bezeichnet die Geschwindigkeit, mit der die mengenmässig am meisten eingefärbten Wasseranteile zur Austrittsstelle geflossen sind. Bei der Berechnung der Geschwindigkeiten wurden die bekannten Höhlenverläufe sowie die Höhenunterschiede mitberücksichtigt. Für die Untergrundstrecken in denen der genaue Bachverlauf nicht bekannt ist, wurde die Distanz nicht entlang des kürzesten Abstands, sondern entlang einer leicht gekrümmten, speläologisch-hydrogeologisch plausiblen Linienführung gemessen (siehe Abbildung 24).

Eingabestelle	Probenahmestelle		Dauer bis zum Erstauf-treten [h]	Dauer bis zum höchsten Peak [h]	maximale Abstandsge-schwindigkeit [m/h]	dominierende Ab-stands-geschwindigkeit [m/h]
Bettenhöhlebach (Fluorescein)	Hugschwendiquelle	HUG	20	29	105	70
	Hugschwendi-Hangfuss-quelle	HUGF	10	11	210	190
Via-Mala-Bach	Hugschwendi-Hangfuss-quelle	HUGF	9.5	10.25	180	165

Tabelle 6: Übersicht Fliessverbindungen (Darstellung: F. Hendry).

Weitere Markierstoffaustritte wurden bei den Klosterwaldquellen (CHL, Nr. 11) und den Allmendquellen (ALL, Nr. 16) festgestellt. Dabei handelt es sich aber nicht um direkte unterirdische Zuflüsse. Die Markierstoffe gelangten via Melchaa in die Nähe der Quellen, welche anscheinend zumindest teilweise durch Bachinfiltrat gespiesen werden. Bei den Klosterwaldquellen sind beide Markierstoffe erstmals in der Wasserprobe vom 18.05.2016 um 23.10 Uhr nachgewiesen, also rund 2.5 Stunden nachdem das Sulforhodamin B (Via-Mala-Bach) bei der Hugschwendi-Hangfussquelle angekommen ist. Bei einer Fliessstrecke via Hugschwendibach in die Melchaa von 3.3 km bedeutet dies eine Geschwindigkeit von 1'320 m/h, was hydrologisch plausibel ist. Bei den Allmendquellen können die Markierstoffaustritte zeitlich nicht genau eingeordnet werden, da keine Wasserproben entnommen worden sind. Da es sich bei den Nachweisen in den Klosterwald- und Allmendquellen um Sekundäreffekte handelt, werden sie im Folgenden nicht weiter kommentiert.

4.5.3 Durchgangskurven

Anhand der Markierstoff-Konzentrationen in den Wasserproben können für die einzelnen Markierstoffe und Austrittsstellen Durchgangskurven gezeichnet werden. Anhand des Verlaufs der Kurven können Informationen über die unterirdischen Fließverhältnisse gewonnen werden. Die Abbildungen 19 und 20 zeigen die Durchgangskurven der Markierstoffkonzentrationen bei der Hugschwendiquelle (HUG, Nr. 3) und der Hugschwendi-Hangfussquelle (HUGF, Nr. 4). Beim Vergleich der beiden Abbildungen ist zu berücksichtigen, dass bei der Hugschwendiquelle die Durchgangskurve gegenüber derjenigen der Hangfussquelle fast 20-fach überhöht ist. Bei der Hugschwendi-Hangfussquelle sind die Markierstoff-Konzentrationen deutlich höher, was aber nicht heisst, dass auch mengenmässig mehr Markierstoff ausgetreten ist (siehe Kap. 4.5.4).

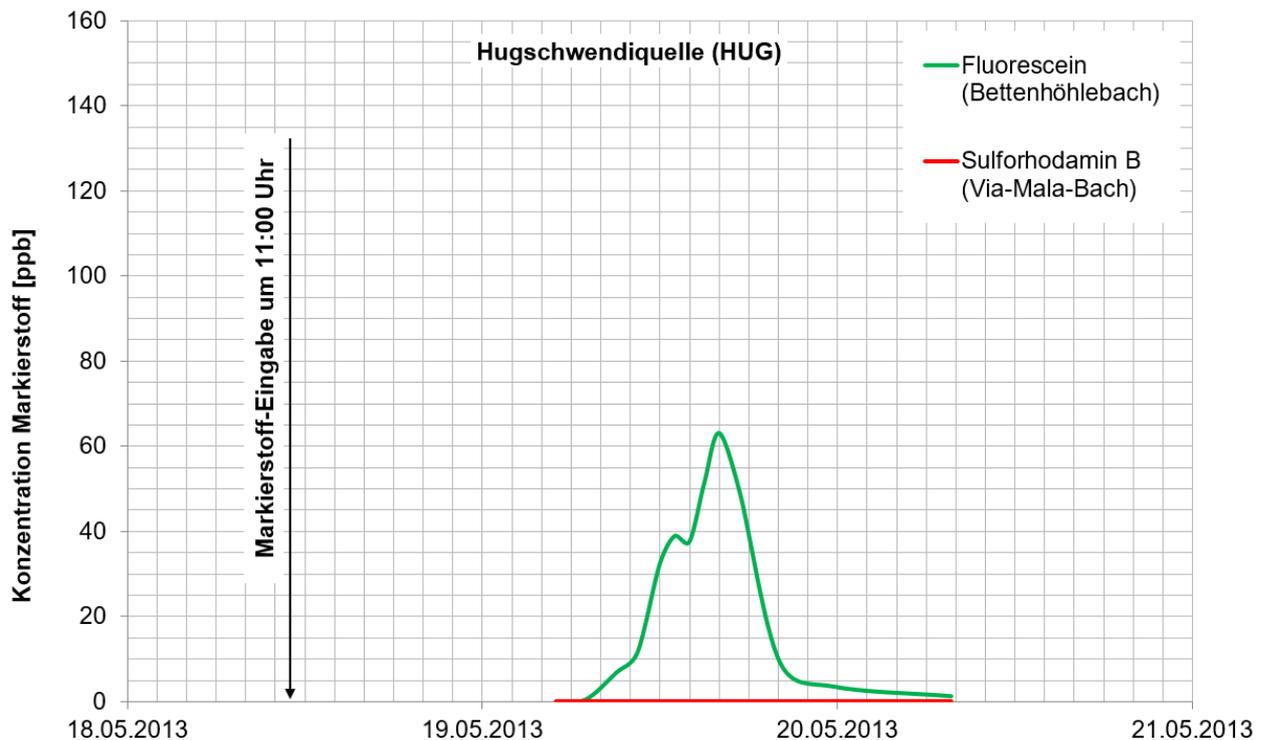


Abbildung 19: Durchgangskurve des Markierstoffes Fluorescein, welcher in den Bettenhöhlebach eingegeben worden ist, bei der Hugschwendiquelle. Der Markierstoff Sulforhodamin B (Via-Mala-Bach) wurde weder in den Wasserproben noch den Aktivkohle-Proben nachgewiesen (Darstellung: F. Hendry).

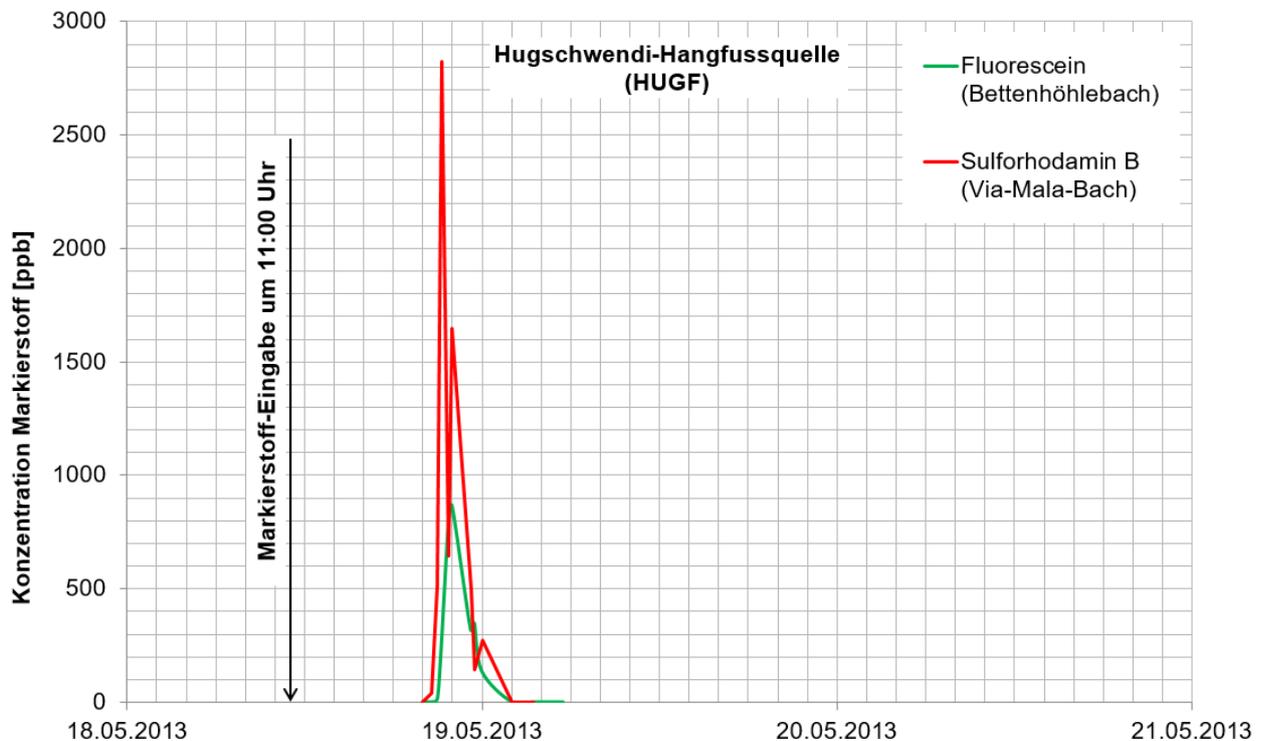


Abbildung 20: Durchgangskurven der Markierstoffe Fluorescein (Bettenhöhlebach) und Sulforhodamin B (Via-Mala-Bach) bei der Hugschwendi-Hangfussquelle (Darstellung: F. Hendry).

Die Durchgangskurven der Hugschwendi-Hangfussquelle sind sehr kurz und spitz. Die Konzentrationen steigen unmittelbar nach Eintreffen des Markierstoffes innert kurzer Zeit schnell auf die höchsten gemessenen Werte an. Die Schüttung der Hangfussquelle war zum Zeitpunkt des ersten beprobten Markierstoffaustrittes (18.05.2013 20.35 Uhr) aufgrund der Aufzeichnungen vermutlich bereits rückläufig. Gesichert ist das nicht, da die Hangfussquelle am Rand des Hugschwendibachs vor den Markierstoffaustritten gar nie aufgefallen ist und entsprechend auch nicht überwacht wurde. Rund 7 Stunden nach dem Eintreffen versiegte die Quelle (19.05.2013 03.30 Uhr), wobei die Markierstoffkonzentrationen zu diesem Zeitpunkt bereits wieder sehr klein waren. Im Gegensatz dazu erstreckt sich die Durchgangskurve der Hugschwendiquelle über mehr als 24 Stunden. Die höchsten Konzentrationen werden erst 9 Stunden nach dem Eintreffen des Markierstoffes erreicht, wobei das Maximum des Fluorescein bei der Hugschwendiquelle mehr als zehnmals kleiner ist als bei der Hangfussquelle. Das im Bettenhöhlebach eingefärbte Wasser (Fluorescein) trifft 10 Stunden später bei der Hugschwendiquelle als bei der Hangfussquelle ein. Das eingefärbte Via-Mala-Bachwasser trifft sogar noch rund eine halbe Stunde früher bei der Hangfussquelle ein.

4.5.4 Rückgewinnungsraten

Mithilfe des Abflusses können aus den Konzentrationen die bei den Quellen austretenden Markierstoff-Mengen (Frachten) berechnet werden. Die Abbildungen 21 und 22 zeigen die

Durchgangskurven der Stofffrachten bei der Hugschwendiquelle (HUG, Nr. 3) und der Hugschwendi-Hangfussquelle (HUGF, Nr. 4). Diesmal sind die vertikalen Achsen identisch. Die Fläche unter der Kurve, also die Summe der Stofffrachten pro Zeiteinheit, entspricht der rückgewonnenen Markierstoffmenge. Aus den Kurven wird ersichtlich, dass bei der Hugschwendiquelle dank des viel grösseren Abflusses und der längeren Austrittsdauer deutlich mehr Markierstoff ausgetreten ist als bei der Hangfussquelle, nämlich rund 560 g der ursprünglich eingegebenen 2 kg Fluorescein.

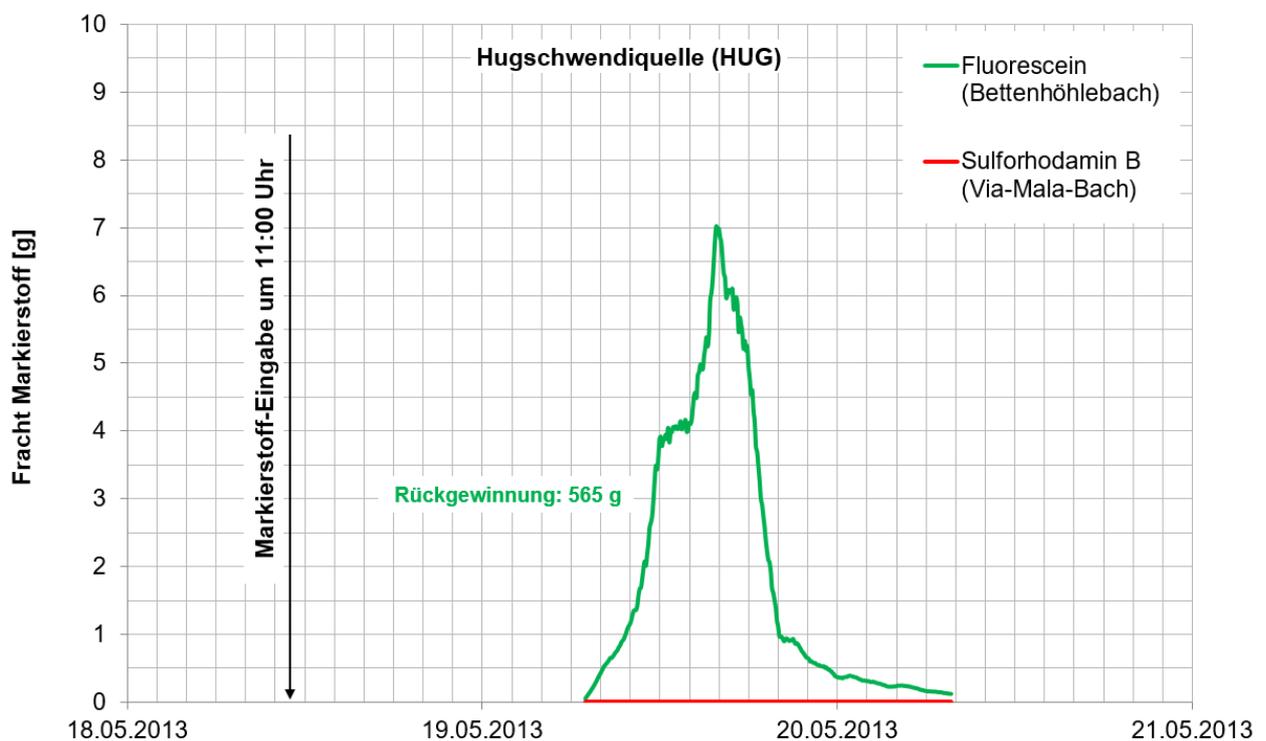


Abbildung 21: Fracht-Durchgangskurve des Markierstoffes Fluorescein, welcher in den Bettenhöhlebach eingegeben worden ist, bei der Hugschwendiquelle (Darstellung: F. Hendry).

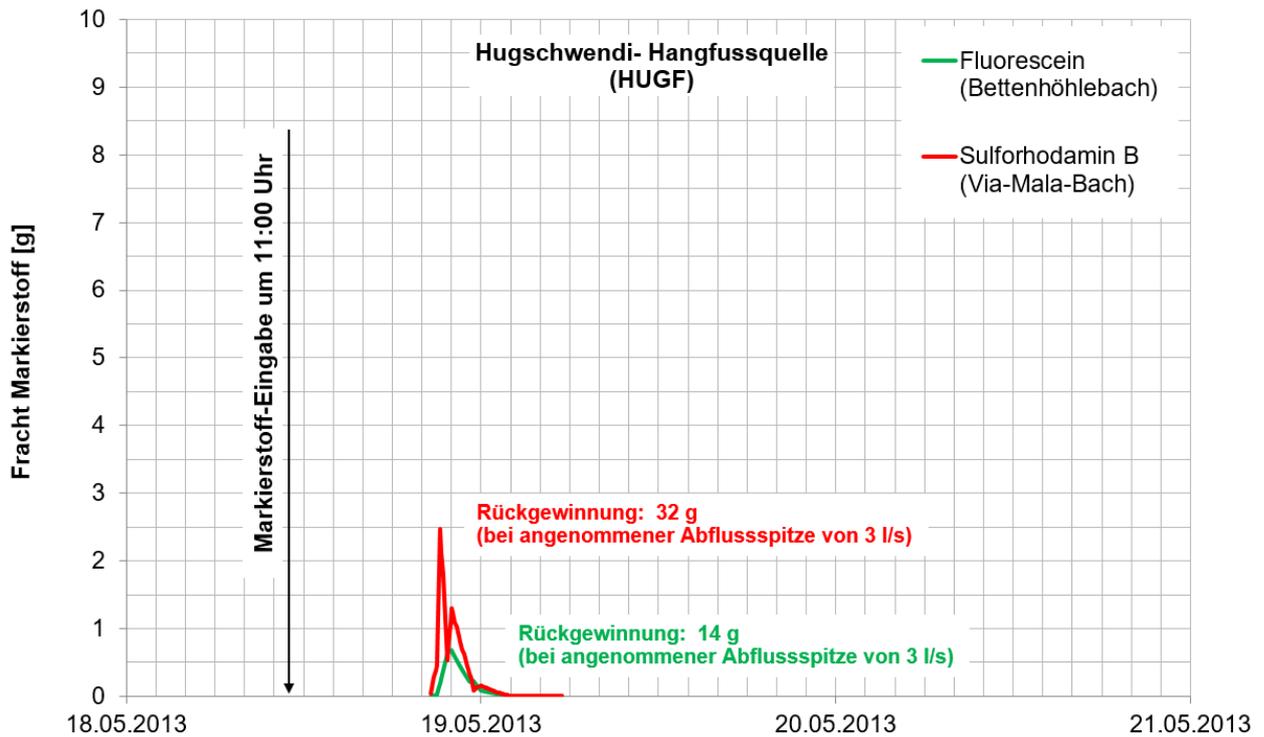


Abbildung 22: Fracht-Durchgangskurven der Markierstoffe Fluorescein (Bettenhöhlebach) und Sulforhodamin B (Via-Mala-Bach) bei der Hugschwendi-Hangfussquelle (Darstellung: F. Hendry).

Bei der Hugschwendiquelle konnte der Abfluss über eine kontinuierliche Pegelmessung relativ gut bestimmt werden. Bei der Hangfussquelle, die bis zum Austritt des Markierstoffes unbekannt war und nur dank des erhöhten Wasserzufflusses infolge Tagesgang überhaupt entdeckt werden konnte, wurde die Abflussspitze nachträglich anhand von Videoaufzeichnungen auf 3 l/s geschätzt. Bei der Hangfussquelle traten basierend auf dieser Annahme lediglich ungefähr 14 g Fluorescein und 32 g Sulforhodamin B aus (bei der Annahme einer Abflussspitze von 10 l/s wären 46 g Fluorescein und 108 g Sulforhodamin B ausgetreten).

5 Vergleich mit früheren hydrologischen Untersuchungen

Bereits vor über hundert Jahren wurde das hintere Melchtal hydrologisch untersucht. Es handelte sich dabei um Vorstudien für die hydroelektrische Nutzung des Melchsees und des Tannensees, u.a. in Verbindung mit dem benachbarten Klein Melchtal.

5.1 Wassermarkierungsversuche in der ersten Hälfte des 20. Jahrhundert

Im Stäubiloch wurden in den Jahren 1908/09, 1918, 1933 und 1936 Wassermarkierungsversuche mit Fluorescein und grossen Mengen Kochsalz zur Erkundung der unterirdischen Fliesswege durchgeführt (ARBENZ, 1937 und MEYER, 1952). Dabei wurden ab dem Stäubiloch (ca. auf 1'890 m ü.M.) die unterirdischen Fliesswegverbindungen durch den «Schrattenkarst» nachgewiesen. Nicht immer konnten die Versuche unter optimalen Bedingungen durchgeführt werden oder mussten sogar abgebrochen werden. Nachfolgend sind in der Reihenfolge der durchgeführten Versuche die Ergebnisse zusammengefasst (TRÜSSEL, 2007):

5.1.1 Verbindung zur Cheselenquelle

(ca. 1'300 m ü.M., Luftlinie ca. 2,1 km, Höhendifferenz ca. 590 m)

- Laufzeit: ca. 11 h → 190 m/h. 8 kg Fluorescein vom 30. Juni 1918, (ungenau Angaben), nach ARBENZ (1937) könnte auch eine schnellere Laufzeit möglich gewesen sein (vergl. ARBENZ, 1937 und MEYER, 1952). Die Beobachtung des Wiederaustritts von grünlich schimmerndem Fluorescein in den Gewässern erfolgte lediglich von Auge.
- Laufzeit: ca. 5 h → 420 m/h. Gemäss Markierungsversuch der CKW mit 2 kg Fluorescein vom 9. Juni 1933 (ungenau Angaben vorhanden, vergl. ARBENZ, 1937) bei «starker Wasserführung» ins Stäubiloch. Beobachtung nur von Auge erfolgt.
- Kein Wasseraustritt bei der Cheselenquelle beim Markierungsversuch vom 10. Januar 1936.
- Kein Wasseraustritt bei der Cheselenquelle beim Markierungsversuchen vom 10./11. Februar 1936.

5.1.2 Verbindung zur Hugschwendiquelle

(1'110 m ü.M., Luftlinie 3 km, Höhendifferenz 780 m)

- Laufzeit: ca. 13 h → 230 m/h. 8 kg Fluorescein vom 30. Juni 1918, ohne Angabe zur ins Stäubiloch fliessenden Seewasser-Menge. Beobachtung der Quellenverhältnisse nur von Auge.
- Keine Farbe von Auge erkennbar mit 2 kg Fluorescein vom 9. Juni 1933, bei starker Wasserführung ins Stäubiloch. Beobachtung der Quellenverhältnisse nur von Auge (ungenau Angaben vorhanden).
- Laufzeit: 19 h oder weniger → min. 155 m/h oder schneller. Ausgeführt im Januar/Februar 1936 mit 5 kg Fluorescein bei einem Wasserzufluss von lediglich 25

l/s ins Stäubiloch. Dazu folgende Details: Starttermin am 10. Januar 1936, ca. 15 Uhr. Die Hugschwendiquelle war zuerst nach einer Frostperiode ohne Wasserführung. Doch am Nachmittag des 10. Januar 1936 setzte plötzlich ein unerwarteter, starker Warmlufteinbruch ein mit Tauwetter bis über die Waldgrenze und zuletzt mit Regen bis über die Melchsee-Frutt hinaus, das erst am folgenden Vormittag bei +5 °C bis +6 °C auf 1'900 m ü.M. ausklang und eine deutliche Schneeschmelze bis auf 1'200 bis 1'400 m ü.M. hatte einsetzen lassen. Die Hugschwendiquelle sprang am 11. Januar 1936 (Zitat: «wohl um 6 Uhr morgens») an und war an diesem Tag um 10.20 Uhr deutlich grün gefärbt (vergl. ARBENZ, 1937).

- Kein Wasseraustritt bei anhaltendem Winterwetter beim Markierversuchen vom 10./11. Februar 1936.

5.1.3 Verbindung zur Stöckquelle

(1'120 m ü.M., Luftlinie ca. 3,2 km, Höhendifferenz ca. 770 m)

- Laufzeit: 36 h oder weniger → min. 89 m/h. Starttermin per 10. Januar 1936, ca. 15 Uhr. Wetter- und Versuchsbedingungen wie oben bei der Hugschwendiquelle beschrieben. Um welche Zeit die Stöckquelle dabei zu fließen begonnen hatte, lässt sich nicht nachlesen (vergl. ARBENZ, 1937). Mit diesem Markierversuch wurde erstmals eine hydrologische Verbindung vom Stäubiloch zu der Stöckquelle nachgewiesen (durch Auswertung der Wasserproben im Labor).
- Kein Wasseraustritt bei anhaltendem Winterwetter beim Markierversuchen vom 10./11. Februar 1936.

5.1.4 Verbindung zu den Quellen beim Quellenbord und zu den Allmendquellen

Die diversen Quellen des so genannten Quellbords im Südwesten des Dorfes Melchtal links und rechts der Melchaa sind 5,6 bis 6,6 km (Luftlinie) bzw. 980 bis 1'020 Höhenmeter vom Stäubiloch entfernt. Mit 7,9 km bzw. ca. 1'060 Höhenmeter sind die Allmendquellen (auch Wehrquellen genannt; etwa 700 m vor der Melchaaschlucht) noch weiter vom Stäubiloch entfernt.

Das Melchaa-Bachbett führt erst ab den weitläufigen Quellflur des Quellenbords, zu der auch einzelne Quellen wie die Chlosterwaldquelle gehören, ganzjährig Wasser. Im Gegensatz zu der Hugschwendi- wie auch der Stöckquelle, die trockenfallen, führen die Quellaufstösse des Quellbords, die teilweise direkt im Bachbett entspringen, ganzjährig Wasser.

Die Allmendquellen entspringen direkt über wassersperrendem, schiefrigem Gestein der Palfries-Formation. Mit den Wassermarkierungen ab «Stäubiloch» vom Januar und Februar 1936 konnte ARBENZ (1937) folgendes aufzeigen:

- Wenn das Wasser von Aabach oder Melchaa im Bereich Stöckalp, wo diese Bäche sich in den Südteil der Talschotter eingefressen haben, einen Tracer beigemischt er-

halten (z.B. durch bereits auf der Frutt im Stäubiloch markiertes Wasser aus der Hugschwendiquelle), so können nach genügend langer Wartezeit wegen der Infiltration in die Schotter Spuren von Wassermarkierstoffen zumindest bei den obersten Quellen des Quellenbordes auftreten.

- Bei mindestens je einer Quelle des Quellenbordes und der Allmendquellen konnten Spuren von Fluorescein nachgewiesen werden, ohne dass in bestimmten Fällen eine Infiltration von der Melchaa in Betracht kommen konnte. Dabei handle es sich «um Beteiligung von gefärbtem Grundwasser, dessen Farbe aus dem Talhintergrund stammt, sei es direkt unterirdisch oder durch Vermittlung der Hugschwendiquelle» (ARBENZ, 1937). Mit der modernen Analytik sollte es heute möglich sein (TRÜSSEL, 2007), diese Schlussfolgerung bei einer neuen, erweiterten Untersuchung der unterirdischen Fliesswege sowie bei der Erarbeitung einer Wasserbilanz zum Grossraum Melchtal zu verifizieren.

5.2 Markierversuch Grand-Canyon-Bach (Bettenhöhle) – Hugschwendiquelle

Mit einem einfachen Punkt-zu-Punkt-Wassermarkierversuch und durch das Auslegen von zusätzlichen Aktivkohle-Säckchens konnte durch einen Wassermarkierversuch der Höhlenforscher-Gemeinschaft Trüssel (HGT) im September 2001 der Nachweis erbracht werden, dass nicht nur das Wasser vom Stäubiloch zur Hugschwendiquelle fliesst, sondern auch das Karstwasser aus dem Zentrum der «Schrattenplatte» (rund 1,5 km weiter östlich als das Stäubiloch). Als Tracer wurde dabei 0,5 kg Sulforhodamin verwendet. Eingabezeit: 8. September 2001, 17 Uhr.

Eingespeist wurde der Tracer in der «Loreley» im Boniloch (erst durch einen speläologischen Zusammenschluss im März 2002 zum südöstlichsten bzw. obersten Sektor der Bettenhöhle geworden). Der Loreleybach/Grand-Canyon-Bach verläuft – für den Schrattenkarst typisch – grösstenteils als tief eingeschnittener Mäander im Übergang der Quinten-Formation zur Schilt-Formation (überwiegend im Mürtschen-Member, z.T. aber auch vollständig in den Schilt-schichten liegend).

Bei einsetzendem kräftigen Regen (35 l/m² in 12 h) und somit stark anschwellendem Höhlenbach konnte zwischen der Loreley und dem Grand Canyon in der Nacht vom 8. auf den 9. September 2001 eine Laufzeit von ca. 180 m/h ermittelt werden (Luftlinie 600 m, Höhendifferenz 185 m). Das stark gefärbte Wasser liess sich augenfällig erkennen (TRÜSSEL, 2003).

Zusätzlich waren sowohl im Bettenhöhlebach (beim Biwak I) sowie bei der Hugschwendiquelle je ein Aktivkohle-Säckchen ausgelegt. Die Analyse ergab, dass zum rund 250 m weiter nordöstlich verlaufenden Bettenhöhlebach erwartungsgemäss keine Fliessverbindung besteht, hingegen aber ganz klar zur Hugschwendiquelle. Hier folgender Messwert (Entnahme der Aktivkohle am 9. September 2001, 18 Uhr): 7,95 mg/m³ (ppb).

**Übersichtsplan
Bettenhöhle-Boniloch**
Wassermarkierungsversuch
Loreley – Grand Canyon
8. Sept. 2001

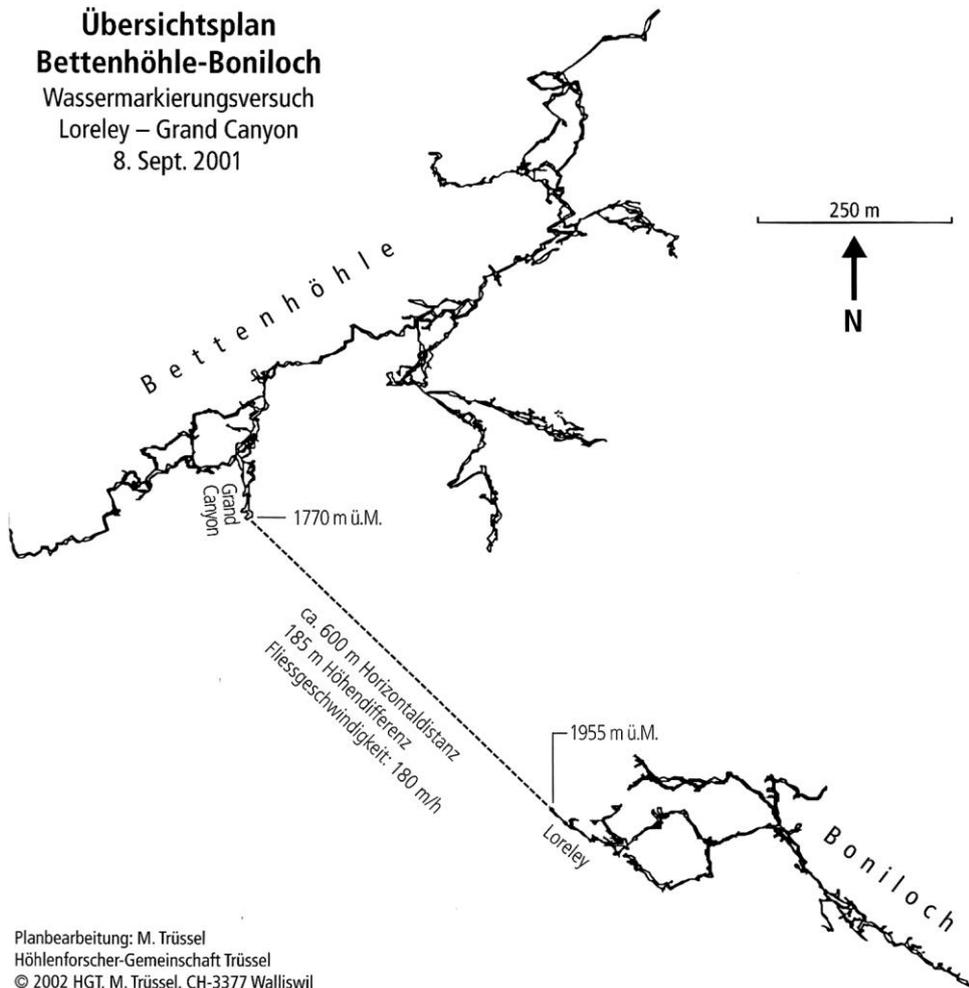


Abbildung 23: Mit Markierstoff nachgewiesene Fließverbindung zwischen den beiden 2001 noch nicht verbundenen Höhlen Boniloch und Bettenhöhle. Der Wassermarkierungsversuch bestätigte die These, dass der Loreleybach und der Grand-Canyon-Bach der gleiche Wasserlauf sind (Darstellung aus: *Vom Fuchsloch zur Schratzenhöhle*, Bd. III, Trüssel, 2003, S. 863).

5.3 Hydrologische Betrachtungen zum Grundwasserhaushalt im Melchtal

Das Geologiebüro Dr. von Moos erstellte 1985 einen Bericht (WILDBERGER, 1985) zur hydrogeologischen Situation im Melchtal. Dazu gehört eine hydrologische Karte mit einem Perimeter von der Cheselenalp/Stöckalp im Süden bis zum Eingang der Melchaaschlucht im Norden. Dabei wurden folgende Quellen und Quellgruppen genannt bzw. zusammengefasst: Cheselenquelle, Hugschwendiquelle und Stöckquelle (alle in nachweisbarem Kontakt zum Schratzenkarst). Die als Zöpfquellen benannten Objekte befinden sich am Osthang des Melchtals auf der Höhe der Lengmatt (zwischen Sportcamp und Stöckalp). Hierzu gehörte auch die Höhle H1 (TRÜSSEL, 1999), die als Überlaufquelle fungiert. Ein Zusammenhang mit dem Karstgebiet am Melchsee ist zwar möglich, das Haupteinzugsgebiet wird aber eher im Raum Huetstock bis Hohmad liegen (WILDBERGER, 1985).

Tal abwärts treten am linken Ufer weitere Quellen auf, die WILDBERGER (1985) nicht benennt. Dazu würde namentlich die Chlosterwaldquelle gehören. Diese verhält sich wie eine Überlauf-Karstquelle mit rasch und stark schwankender Schüttung, vergleichbar mit der Hugschwendi- und Stöckquelle (TRÜSSEL, 2013). Die anschliessenden Quellen des Quellbordes mit Schüttung links und rechts sowie direkt im Melchaa-Bachbett nennt WILDBERGER (1985) «Quellreihen von Melchtal». Diese Quellen ziehen sich bis zum Übergang der Quintenkalk-Schuppen zu den Kreide-Falten. Die nächste Quellgruppe (Allmendquellen) befinden sich etwas unterhalb des Melchaa-Wehrs. Es handelt sich um die tiefst gelegenen Quellen und haben daher permanente Austritte des Grundwasserstroms in der Lockergesteinsfüllung des Tales. Die Schüttung des Quellbachs inklusive einiger Oberflächenzuflüsse von Osten her wurde am 17. Juni 1985 zu 190 l/s bestimmt. Die Quellen selbst liefern wohl im Jahresablauf zwischen etwa 30 l/s (nach ARBENZ, 1937) bis vielleicht maximal 200 l/s.

Gemäss Bericht des Geologiebüros von Moos lieferten Mitte Mai 1985 die auf einer Strecke von etwa 1,4 km am Melchaa-Bord aus dem Bachschutt austretenden Wässer schätzungsweise 300 l/s, über drei Viertel davon jene oberhalb der Kote 890 m ü.M. Bei Trockenheit bzw. lang andauernden Frostperioden gehen die Quellerträge stark zurück. Viele Austritte versiegen zudem vollständig. Oberhalb der «Quellreihe von Melchtal» liegt die Melchaa grosse Teile des Jahres trocken. Selbst dann, wenn die Melchaa von der Hugschwendiquelle an durchgehend fliesst, infiltriert im Oberlauf vermutlich ein beträchtlicher Teil des Bachwassers, wie dies auch bei den meisten anderen Seitenbächen im Schuttkegel vor ihrer Einmündung in den Talbach der Fall ist.

Zusammenfassend wird im Bericht des Büros Dr. von Moos angeführt: Ob Wasser aus dem orographischen Einzugsgebiet der Melchaa in andere Täler fliesst, konnte durch die diversen Wassermarkierversuche nicht eindeutig festgestellt werden; eine gewisse Möglichkeit besteht aus geologischen Gründen für Abflussbahnen in Richtung Klein Melchtal (Wägiswald-Quellen), Lungern (Lopp) oder Aaretal (Funtenen). Untersuchungen über die Karstwasserhältnisse im Gebiet Brünig-Aaretal weisen darauf hin, dass kleinere Wassermengen in den Funtenenquellen im Haslital bei Meiringen aus dem Melchtal stammen könnten. Sicher entwässern die Karstgebiete im Melchtal aber zum überwiegenden Teil zur Grossen Melchaa, wie der spezifische Abfluss von ca. 50 l/s pro m² für diesen Fluss bei der bestehenden Wasserableitungsfassung nahelegt.

6 Interpretation

Die gemessenen maximalen Abstandsgeschwindigkeiten von rund 100 – 200 m/h passen grundsätzlich gut zu den Ergebnissen der früheren im Schrattenkarst durchgeführten Markierversuchen (siehe Kapitel 5). Betrachtet man nur diesen Markierversuch isoliert, ist die Spannweite der Abstandsgeschwindigkeit aber dennoch relativ gross. Zusammen mit den im Verlauf sehr unterschiedlichen Durchgangskurven deutet dies auf verschiedene Fliessverhältnisse hin. Bei der Hugschwendi-Hangfussquelle zeigen die gemessenen Konzentrationen einen scharfen Peak über wenige Stunden. Bei der Hugschwendiquelle hingegen ist die Durchgangskurve länger gezogen und die Markierstoff-Konzentrationen sind deutlich kleiner. Im Vergleich ist klar erkennbar, dass die Markierstoffe deutlich früher bei der Hangfussquelle eintreffen. Das bei der Hangfussquelle austretende Wasser hat die unterirdische Fliessstrecke insgesamt also deutlich schneller zurückgelegt als das der Hugschwendiquelle zufließende Karstwasser.

Die deutlichen Unterschiede lassen sich dadurch erklären, dass das Karstwasser vor dem Austritt bei der Hugschwendiquelle im Untergrund eine wassergesättigte Zone durchqueren muss. Diese liegt mutmasslich im Bereich einer lokal in der «Schrattenplatte» vorhandenen Trogstruktur. Auch die Stöckquelle wird über diese gesättigte Zone gespiesen, allerdings mutmasslich nicht mit Wasser des Bettenhöhlebachs. Da diese durch die Tagesgangwitterung zeitweise versiegelt, ist dies nicht mit letzter Sicherheit belegbar. Aufgrund der Durchquerung der gesättigten Zone wäre bei einer Fliessverbindung aber der Markierstoff Fluorescein mit grosser Wahrscheinlichkeit zumindest in der Aktivkohle nachweisbar gewesen. In der gesättigten Zone wird die Fliessgeschwindigkeit langsamer und der Markierstoff stark verteilt. Dadurch wird der Austritt des Markierstoffes verzögert und die Durchgangskurve der Markierstoffkonzentrationen gedämpft. Die schnellen und ungedämpften Markierstoffaustritte der Hugschwendi-Hangfussquelle sprechen hingegen klar dafür, dass ihr das Karstwasser freifliessend, also ohne wassergesättigte Zone, zufließt.

Bei den Durchgangskurven der Hangfussquelle schwanken die Konzentrationen wie auch die daraus errechneten Frachten relativ stark. Diese können bei Karstwasserwegen durch turbulente Strömungsverhältnissen und Pools, in denen das Wasser zirkuliert, verursacht werden. Auffallend ist aber auch, dass sich die beiden Markierstoffe bzw. die damit eingefärbten Karstwässer im Zufluss zu konkurrenzieren scheinen. Bei relativ erhöhten Werten für Fluorescein sinken diejenigen des Sulforhodamin B und umgekehrt.

Aufgrund der Frachtberechnungen wurden bei der Hugschwendiquelle und der Hangfussquelle insgesamt immerhin rund 30 % des in der Bettenhöhlebach eingegebenen Fluorescein, jedoch lediglich 1 – 2 % des Sulforhodamins B aus dem Via-Mala-Bach zurückgewonnen. Der Rest ist unbeobachtet vermutlich zum grössten Teil direkt unterirdisch dem Talgrundwasser zugeflossen.

Die Hugschwendiquelle stellt zusammen mit der Stöckquelle sowie den unterirdischen Zuflüssen in den Talgrundwasserleiter die Basisentwässerung des Schrattenkarstes dar. Die Hugschwendi-Hangfussquelle scheint hingegen nur bei erhöhten Zuflüssen aus dem Karst aktiviert zu werden (z.B. wegen Hochwasser nach Niederschlagsereignissen oder ausgeprägtem Tagesgang infolge Schneeschmelze). Bevor das Karstwasser bei der Hangfussquelle austreten

kann, muss es aus dem verkarsteten Fels austreten und die am Hang abgelagerten, quartären Lockergesteine durchfliessen. Die Lage der Hangfussquelle wird vermutlich durch präferentielle Fliesswege im Quartär bestimmt. Insbesondere das westlich der Hangfussquelle abgelagerte Bergsturzmaterial mit hoher Durchlässigkeit dürfte dabei eine wichtige Rolle spielen. Die grosse Durchlässigkeit im Bereich des grobblockigen Hugschwendibachs zeigt sich auch dadurch, dass im Gewässerabschnitt zwischen der Hugschwendiquelle und der EWO-Zentrale aufgrund der durchgeführten Abflussmessungen beträchtliche Bachwassermengen in den Untergrund einsickern. Die sehr tiefe Rückgewinnungsrate für das Sulforhodamin B spricht dafür, dass ein sehr grosser Teil des in der Via-Mala eingefärbten Karstwassers direkt dem Talgrundwasser zufliesst, die Hangfussquelle also quasi nur der je nach Wasserandrang sichtbare Überlauf ist. Wahrscheinlich ist auch, dass die Wasserführung im Hugschwendibach nicht nur von der Schüttung der Hugschwendiquelle, sondern auch von dem im Untergrund verbleibenden Karstwasserzustrom beeinflusst wird. Bei grossem unterirdischem Zufluss kann mutmasslich weniger Bachwasser einsickern.

Das eingefärbte Via-Mala-Bachwasser gelangt aufgrund der Nachweise erstaunlicherweise weder in die Hugschwendiquelle noch in die Stöckquelle. Es scheint in einer Karströhre, die über der wassergesättigten Zone bleibt, in Richtung der Hangfussquelle zu fliessen. Noch bemerkenswerter ist, dass das Wasser des Bettenhöhlebachs sowohl über die gesättigte Zone der Hugschwendiquelle zufliesst, aber zumindest teilweise viel schneller über eine freifliessende Verbindung auch die Hangfussquelle speist. Die Laborresultate sind konsistent (Quervergleiche Laboratorien, Doppelbeprobung mit Aktivkohle und Wasserproben, Verlauf Durchgangskurven) und müssen daher nicht angezweifelt werden. Die Nachweise sind deutlich und Fehler bei der Markierstoffeingabe können ausgeschlossen werden. Daher stellt sich die Frage, wo und weshalb sich das Wasser des Bettenhöhlebachs vor der gesättigten Zone auftrennt, um auf verschiedenen Wegen an die Oberfläche zu gelangen.

Der Bettenhöhlebach ist im erforschten Teil abgesehen von einem kurzen Abschnitt, der im Karstwasser-Niveau 1'620 – 1'750 m ü.M. liegt, durchgehend begehbar. Oberhalb und unterhalb des unbekanntes Bachabschnittes wurden Aktivkohle-Proben in den Bach gelegt. Beide zeigten deutliche Nachweise an Fluorescein, wobei die Äquivalentkonzentration in der Probe «oberhalb» doppelt so hoch war wie in derjenigen «unterhalb». Dies ist plausibel, da im unbekanntes Bachabschnitt von Westen her ein Höhlenbach zufliesst, was eine Verdünnung der Markierstoffkonzentration bewirkt. Aufgrund der Entstehungsgeschichte der Höhlengänge ist es unwahrscheinlich, dass gleichzeitig auch Wasser aus dem Bach wegfliesst.

Die Stelle, bei der sich die Fliesswege trennen, muss somit unter dem «Schöllenen»-Siphon auf 1'285 m ü.M. liegen. Unterhalb des Siphons ist der Höhlenverlauf unbekannt. Der Siphon weist keine Rückstauspuren auf und liegt knapp unter dem Labyrinth des jüngsten fossilen Karstniveaus (1'300 – 1'350 m ü.M.) mit Entwässerung in Richtung Nordwest. Nach der Absenkung des Talbodens wurde das Labyrinth durch einen unter vadosen Bedingungen entstandenen Gang in gleichbleibender Entwässerungsrichtung durchschlagen.

Die Höhe des Wasserspiegels der wassergesättigten Zone ist nicht bekannt. Aufgrund der Ergebnisse des durchgeführten Wassermarkierversuches ist es aber plausibel, dass im Aufstaubereich der wassergesättigten Zone eine gut ausgebildete Karströhre abzweigt, in der Wasser freifliessend ausserhalb der gesättigten Zone in Richtung Hangfussquelle strömen

kann. Sie wird bei erhöhtem Wasserandrang infolge Schneeschmelze oder Hochwasser ausgespiesen.

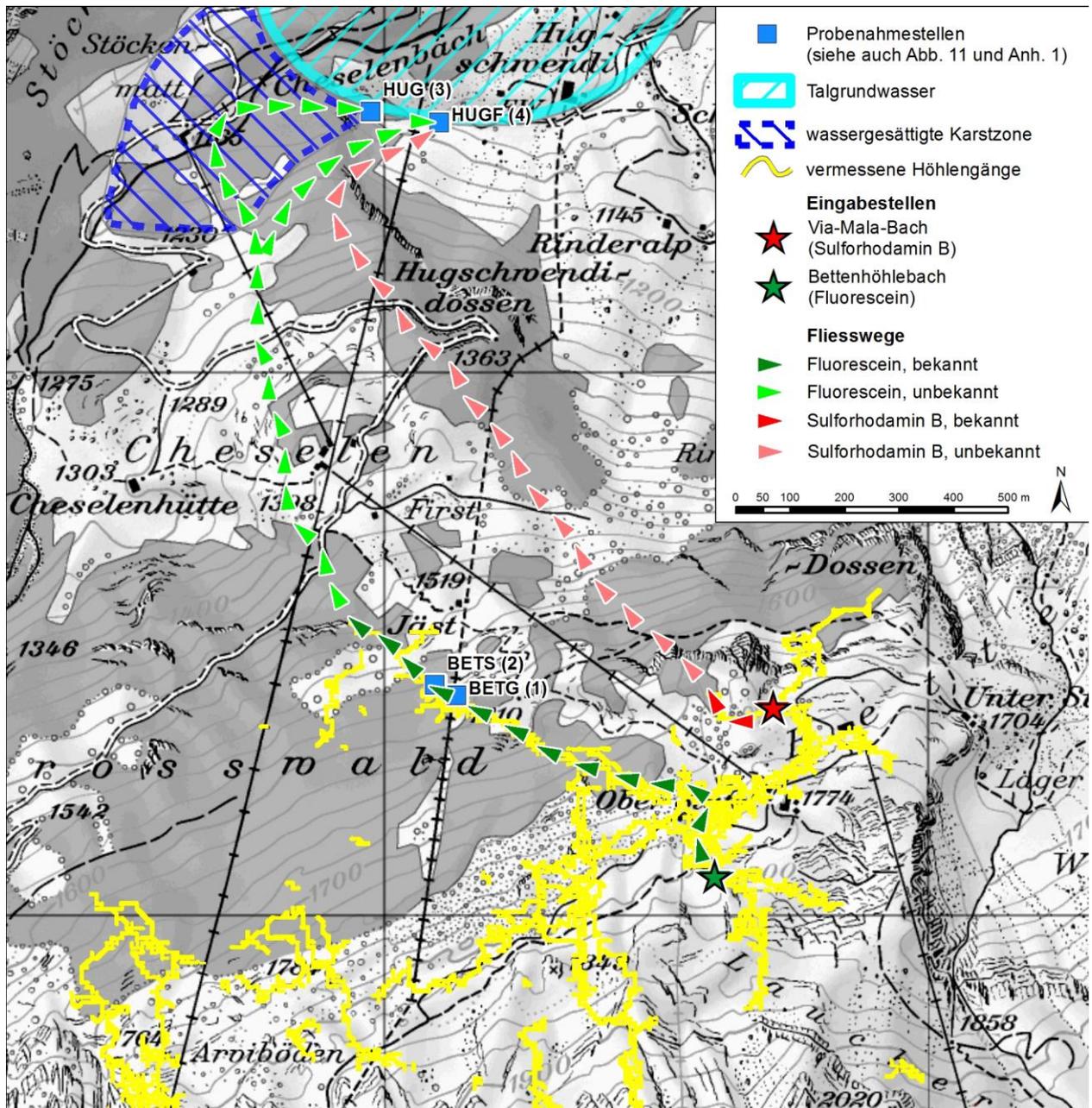


Abbildung 24: Ergebnisse aus dem Markierversuch: Das in der Via-Mala markierte Höhlenbachwasser konnte nur bei der Hugschwendi-Hangfussquelle beobachtet werden. Das Wasser des Bettenhöhlebachs trat einerseits über eine freifliessende Verbindung bei der Hugschwendi-Hangfussquelle, andererseits nach Durchströmen einer wassergesättigten Karstzone verzögert auch bei der Hugschwendiquelle aus. Ein grosser Teil des Karstwassers ist mutmasslich unterirdisch direkt dem Talgrundwasser zugeflossen (Kartenausschnitt: Bundesamt für Landestopographie, swisstopo; Darstellung: F. Hendry).

Aufgrund der Feldmessungen im Hugschwendibach wenige Meter unterhalb der Hugschwendiquelle können Überlegungen zu der gesättigten Zone angestellt werden (siehe Abbildung 25 und 26). Am Abend des 18. Mai 2013 (17.30 bis 20.30 Uhr) steigt der Abfluss im Hugschwendibach infolge erhöhten Karstwasserzuflusses aus dem Untergrund. In diesem Zeitraum sind die Wassertemperatur und die Leitfähigkeit leicht erhöht, da das in den Höhlengängen zuströmende Schmelzwasser das in der gesättigten Zone bereits vorhandene Wasser verdrängt. Die Schwankungen in der Leitfähigkeit deuten möglicherweise darauf hin, dass bereits zu diesem Zeitpunkt Tagesgang-Wasser zuströmt. Um 20.30 Uhr beginnen die Leitfähigkeit und die Wassertemperatur zu sinken, um ab 02.00 Uhr des 19. Mai 2013 für neun Stunden ziemlich konstant zu bleiben. In diesem Zeitraum trifft auch das markierte Wasser des Bettenhöhlebachs zu, welches die gesättigte Zone durchquert hat. Da die Messwerte bereits tief sind, scheint vorher bereits Schmelzwasser aus näheren Teilen des Einzugsgebietes zuzufliessen, was plausibel ist, da die Schneeschmelze am 18.0 Mai 2013 insbesondere in den tiefen Lagen aktiv war.

Unter der Annahme, dass das Wasser im Bettenhöhlebach gleich schnell fliesst wie im Via-Mala-Bach (210 m/h), hat der Markierstoff Fluorescein die gesättigte Zone rund 8.5 Stunden nach der Markierstoffeingabe erreicht (angenommene Schrägdistanz bis zur gesättigten Zone: 1'700 m). Dies bedeutet, dass der Markierstoff ungefähr 11.5 Stunden zur Verfügung hatte, um die gesättigte Zone zu durchqueren. Der Zeitpunkt, bei dem das gefärbte Wasser auf die gesättigte Zone trifft (18. Mai 2016 20.00 Uhr), entspricht dem zweiten Tagesgang-Maximum der Abflussmessung. Wie oben ausgeführt übt zuströmendes Wasser einen Wasserdruck aus, welches die Quellschüttung ansteigen lässt.

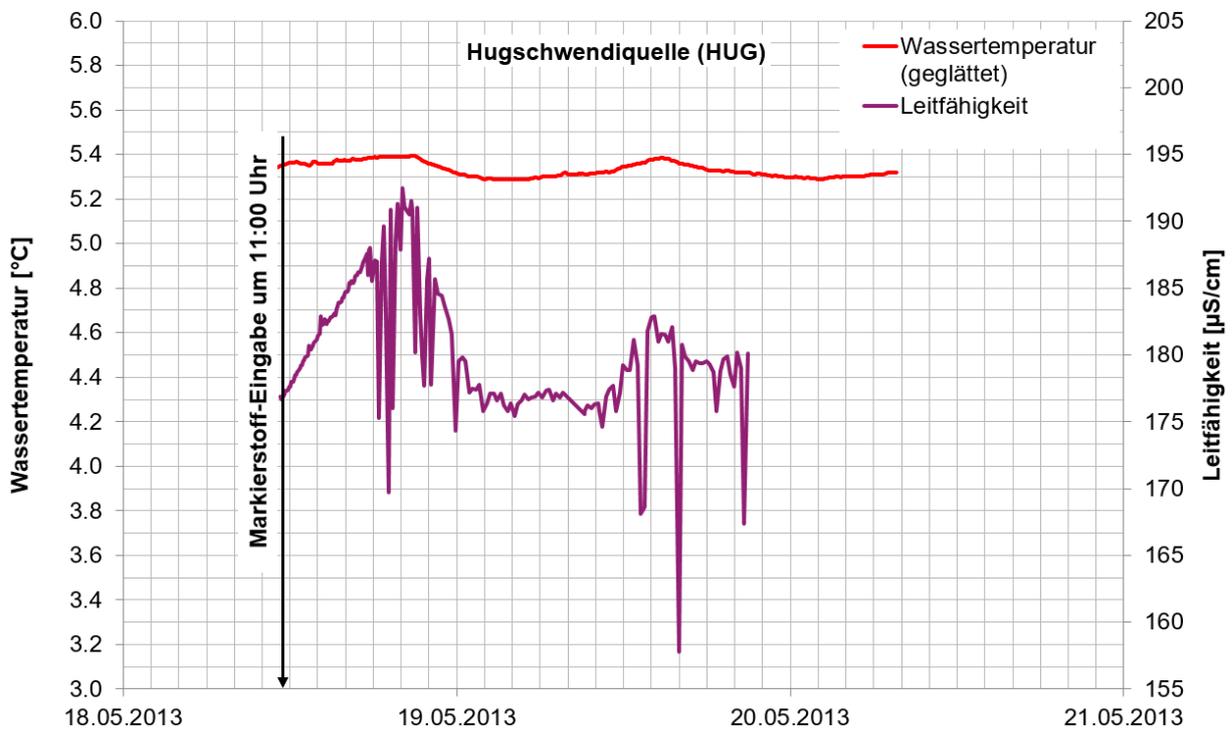
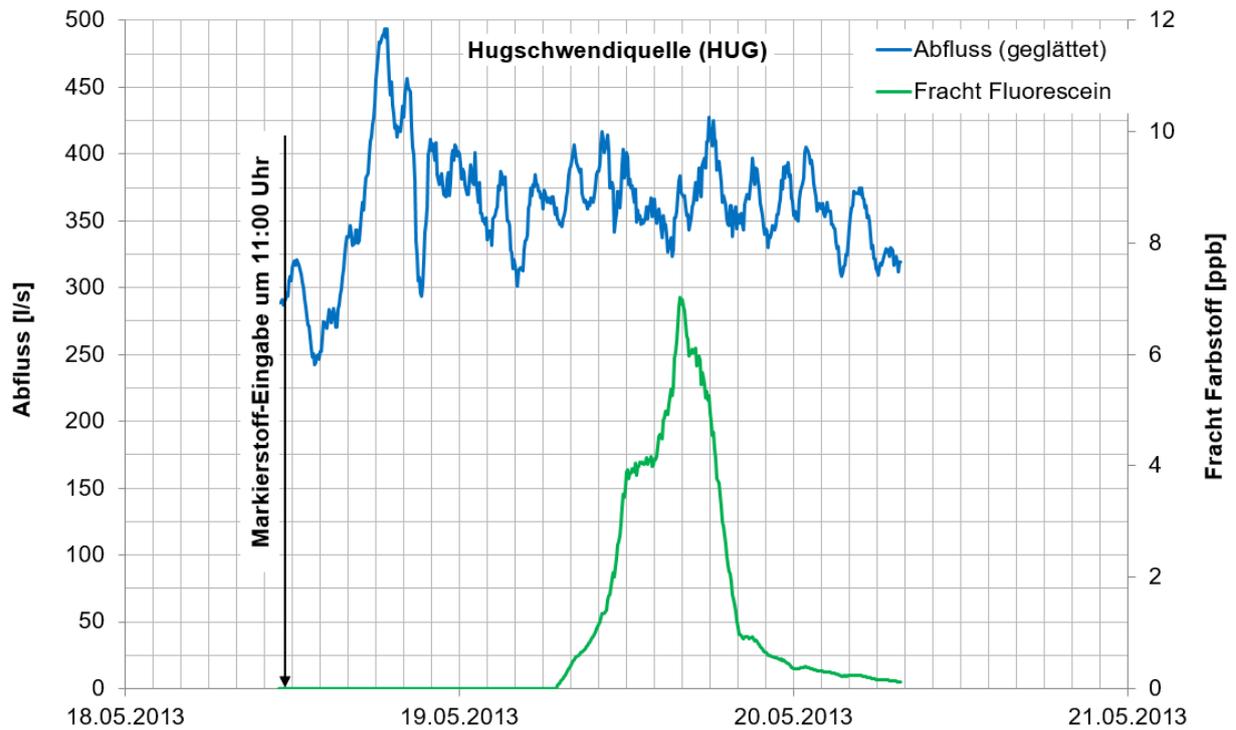


Abbildung 25 und 26: Der Vergleich der verschiedenen Messreihen bei der Hugschwendiquelle zeigt teilweise gegenseitige Abhängigkeiten (Darstellung: F. Hendry).

7 Schlussfolgerungen

Die Zielsetzungen des Wassermarkierversuches sind erreicht (siehe dazu Kap. 2). Folgende Erkenntnisse konnten gewonnen werden:

- Das Wasser des Bettenhöhlebachs mündet in die Hugschwendiquelle, geht teilweise aber auch direkt ins Talgrundwasser über. Das Karstwasser steigt von der tieferen Quintenkalk-Schuppe wieder in die darüber liegende «Schrattenplatte» auf.
- Die angetroffenen Fliesswege in Richtung der Hugschwendi-Hangfussquelle sind freifliessend. Im Gegensatz dazu muss das Karstwasser, welches bei der Hugschwendiquelle austritt, eine wassergesättigte Zone durchqueren. Der Via-Mala-Bach sowie zumindest teilweise auch der Bettenhöhlebach scheinen in Gängen relativ schnell zur Stöckalp zu fliessen, die zwar zeitweise wasserführend sind, die aber ausserhalb des gesättigten Bereichs liegen und daher zumindest temporär grundsätzlich frei begehbar sind.
- Ausser dem zumindest lokal vorhandenen gesättigten Bereich konnten aus dem Markierversuch keine Hinweise auf ein weitläufiges, rezentes Karstniveau gefunden werden. Jedoch kann es auch nicht ausgeschlossen werden, zumal grössere Anteile der eingegebenen Markierstoffe nicht zurückgewonnen worden sind und auch in der tiefen Grundwasserfassung im Talgrundwasser kein Markierstoffnachweis erfolgte.

Der Markierversuch steuert weitere Erkenntnisse zum Verständnis des Gesamtsystems zu, wirft gleichzeitig aber auch wieder weitere Fragen auf, denen u.a. die zukünftige Höhlenforschung mit weiteren Untersuchungen auf die Spur gehen kann.

8 Dank

- HGU-Mitglieder, Ennetbürgen, die erst die Feldarbeit vor, während und nach dem Wassermarkierungsversuch ermöglicht haben (zeitweise in Rund-um-die-Uhr-Einsätzen): Hubert Blättler, Simon Berger, Rolf Boller, Thomas Breu, Katharina Fischer, Pia Fleischlin, Fidel Hendry, Beat Niederberger, Christoph, Clemens, Martin und Pankraz Trüssel, Franziska Spahr, Diomira Uebelmann, Jörg Weyermann
- Weitere Helferinnen und Helfer, die im Feldeinsatz waren: Ruth Aregger, Luzern; Bernhard Niederberger, Stans; Rainer Pfüller, Kriens; Patrick Trüssel, Wilen b. Sarnen; Roger Wernli, Basel, Therese Wüthrich, Thörigen
- Elektrizitätswerk Obwalden (EWO), John Sieber, Kerns: Zurverfügungstellung der Infrastrukturen (Zentrale Hugschwendi); Datenarchiv; Auswertung von Niederschlags- und Melchaa-Schüttungsmessungen
- Stiftung Naturerbe Karst und Höhlen Obwalden (NeKO), Alpnach: Mitfinanzierung; Datenarchiv; personelle Unterstützung
- Kommission für wissenschaftliche Speläologie der SGH & SCNAT, Bern: Mitfinanzierung
- Roger Wernli, Basel: Feldbeobachtungen und Kurzbericht Moränenböden Stöckalp
- Centre d'hydrogéologie et de géothermie (CHYN) der Universität Neuenburg, Forschungsabteilung Hydrochemie und Verunreinigungen unter der Leitung von Prof. Daniel Hunkeler: Analysen Wasser- und Aktivkohle-Proben
- Kanton Nidwalden, Amt für Umwelt: Zur Verfügungstellung Messgeräte (Leitfähigkeit, Temperatur, Pegel)
- Nano Trace Technologies, Martin Otz, Jens: Markierstoffuntersuchungen; Beratung/Interpretation
- Geotest AG, Stefan Spichtig, Filiale Horw: Zur Verfügungstellung Messgerät (Salzverdünnungsmessgerät für Abflussmessung)
- Sportcamp Melchtal, Thomas Ettlin und Gusti Berchtold, Stöckalp/Melchtal: Zugang Grundwasserpumpwerk; technische Informationen/Planmaterial

9 Literaturverzeichnis

ARBENZ P. (1937): Studien Melchtal – Färbung und Salzung Melchsee-Abluss 1936.

BRUNNER, B. (1999): Geologische Untersuchungen im Gebiet Tannalp – Rotsandnollen – Jochpass – Engstlenalp, Diplomarbeit am Geologischen Institut der ETH Zürich.

MEYER H. (1952): Geologische Betrachtungen zum Bericht des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft über die Speichermöglichkeiten des Melchsees.

MÖRI, A. (1995): Geologische Untersuchungen im Melchtal. Diplomarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, Bern.

PIFFNER, O. A. (2013): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000. Tektonisches Profil durch den Alpennordrand der Zentralschweiz, Erläuterungen zu Blatt 1170 Alpnach (Nr. 137) – Tafel II, Bundesamt für Landestopografie (swisstopo), Wabern.

TRÜSSEL, M. (1999): Vom Fuchsloch zur Schrattenhöhle, Forschungschronik der Höhlenforscher-Gemeinschaft Trüssel (HGT), Bd. I und II, HGT-Verlag, c/o M. Trüssel, Alpnach.

TRÜSSEL, M. (2003): Vom Fuchsloch zur Schrattenhöhle, Forschungschronik der Höhlenforscher-Gemeinschaft Trüssel (HGT), Bd. III, HGT-Verlag, c/o M. Trüssel, Alpnach.

TRÜSSEL, P. (2007): Inventar der Schweizer Geotope von nationaler Bedeutung – Karstlandschaft Melchsee-Frutt. 33 S. unpubl. HGU, Ennetbürgen

TRÜSSEL, M. (2013): Vom Fuchsloch zur Schrattenhöhle, Obwaldner Karst- und Höhlenforschung 2003 bis 2012: Bd. IV und V, HGT-Verlag, c/o M. Trüssel, Alpnach.

TRÜSSEL, M. (2014): nagra-Arbeitsbericht NAB 14-73. Nachweis von fünf Karstniveaus in Obwalden und Nidwalden mit ersten radiometrischen U/Th-Datierungen von Stalagmiten in den beiden jüngsten fossilen Karstniveaus. 53 S. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (nagra), Wettingen.

WEBER, E. (2004): Etude des mouvements récents dans le karsts de Melchsee-Frutt (OW). Travail de fin d'étude pour l'obtention du diplôme en science de la terre BeNeFri, Universität Neuchâtel.

WERNLI, R. (2013): Seitenmoräne «Hugschwendi» – petrographische und pedologische Begutachtung. unpubl.

WILDBERGER, A. (1985): Hydrogeologische Untersuchungen betreffend Konsequenzen für den Grundwasserhaushalt (inkl. Melchtal). Konzessionsgesuch des EWO für den Ausbau des Lungerersee-Kraftwerks. Dr. von Moos AG, Zürich, unveröffentlicht.