

# Wasserbilanz von Karstquellen im Ybrig

Eine karsthydrologische Untersuchung der Einzugsgebiete  
und Quellen im Raum Chäseren und deren Wasserbilanz in  
den letzten 4 Jahren

GEO 511 Master's Thesis  
Geographisches Institut, Universität Zürich  
30.09.2021

**Autor:**

Marius Luder  
15-703-317

**Betreut durch:**

Dr. Martin Lüthi  
Dr. Ilja van Meerveld

**Verantwortliches Fakultätsmitglied:**

Prof. Dr. Jan Seibert



University of  
Zurich<sup>UZH</sup>

# Zusammenfassung

Aufgrund des Klimawandels und der daraus resultierenden höheren Temperaturen verändern sich die saisonalen Abflüsse der Gewässer in der Schweiz in Zukunft entscheidend. Fällt im Winter weniger Niederschlag in Form von Schnee, fehlt dieser Wasserspeicher im Sommer während längeren Trockenphasen, was verbreitet zu Wasserknappheit führen kann. Ein Grossteil des Grundwasservolumens ist in der Schweiz in Karst-Grundwasserleitern gespeichert. Diese Wasserspeicher könnten in Zukunft für die Wasserversorgung im Sommer an Relevanz gewinnen.

In dieser Arbeit wird die Wasserbilanz der letzten Jahre eines Karst-Einzugsgebiets berechnet, wodurch Rückschlüsse auf die unterirdischen Wasserspeicher gemacht werden können. Anhand der Jahre 2017 - 2020 werden Aussagen über Änderung der Wasserbilanz und Grösse der unterirdischen Speicher in dem Gebiet gemacht. Daraus resultieren weiter Angaben über die Wasserverfügbarkeit in Zukunft. Das Untersuchungsgebiet liegt am südlichen Ende des Waagtals in der Nähe von Einsiedeln in einer sehr niederschlagsreichen Gegend. Am Talboden und am Fussende der von Norden nach Südwesten hin abfallenden Felswand existieren verschiedene Karstquellen, welche ihre Einzugsgebiete auf den höher gelegenen Alpweiden haben. Von diesen Karstquellen führt die Kreuzloch-Quelle am meisten Wasser, weshalb der Abfluss dort schon seit mehreren Jahren gemessen wird. Dies ist der Grund, weshalb in dieser Arbeit die Wasserbilanz für das Einzugsgebiet dieser Quelle berechnet wird.

Neben der Abflussmenge sind Niederschlag und Evaporation im Einzugsgebiet notwendige Grössen zur Berechnung der Wasserbilanz. Anhand dieser Parameter lässt sich auch die Speicheränderung angeben. Zur Bestimmung des Niederschlags wurden 5 Niederschlagsmessgeräte im Gebiet installiert, sowie Daten von externen Quellen bezogen. Die Grenzen des Einzugsgebiet wurden anhand von Tracer-Versuchen mit den fluoreszierenden Farben Uranin und Rhodamin WT näher bestimmt. Die Evaporation wurde nicht gemessen sondern aus vorhandener Literatur abgeleitet; der Abfluss wurde aus der Korrelation von Druckkurven mit einzelnen Abflussmessungen hergeleitet. Die installierten Niederschlagsmessgeräte konnten den Schneefall nicht messen, was sich als erhebliches Problem für die Berechnung der Wasserbilanz herausstellte. Das Problem konnte durch Niederschlagsdaten aus einer anderen Quelle umgangen wer-

den.

Unterirdische Verbindungen ins Kreuzloch konnten von den Schwinden im Heuloch und Chalbentalpli, sowie im Raum der Chöplishütte nachgewiesen werden. Das Einzugsgebiet des Kreuzlochs konnte dadurch auf  $3.67\text{km}^2$  ( $\pm 0.24\text{km}^2$ ) eingegrenzt werden, wobei es tendenziell eher grösser ist. Die Abflussdaten der Kreuzloch-Quelle waren für die Jahre 2017 und 2018 leider unvollständig, weshalb die Wasserbilanz nur für die Jahre 2019 und 2020 berechnet werden konnte. Dies schmälerte die Aussagekraft bezüglich längerfristigen Veränderungen der Wasserbilanz und der unterirdischen Wasserspeicher erheblich, weil die untersuchte Zeitspanne zu kurz wurde. Die Berechnungen zeigen, dass das Speichervolumen des Kreuzlochs mindestens 1.7 Millionen Kubikmeter beträgt und die Quelle im Minimum 0.4 Liter Wasser pro Sekunde liefert.

Obwohl die Forschungsfragen nur teilweise beantwortet werden konnten, ergaben sich trotzdem wichtige Erkenntnisse über das Einzugsgebiet und es konnten einige mögliche Verbesserungen in der Vorgehensweise vorgeschlagen werden. In wenigen Jahren können, sofern alle Messungen kontinuierlich weitergeführt werden, die hier angewandten Methoden zur erneuten Berechnung der Wasserbilanz und Speicheränderung des Kreuzlochs-Einzugsgebiets verwendet werden. Dadurch werden Aussagen über die Veränderung der Speicher und deren Kapazität und somit generell über die Wasserverfügbarkeit in Zukunft möglich sein.

# Abstract

Due to climate change and the resulting higher temperatures, the seasonal runoff of water bodies in Switzerland will change decisively in the future. If there is less precipitation in the form of snow during winter, the water reservoir will be lacking in summer during longer dry phases, which then may lead to widespread water shortages. A large part of the groundwater volume in Switzerland is stored in karst aquifers. These water reservoirs could become more relevant for water supply during summer in the future.

In this thesis, the water balance of the last few years of a karst catchment is calculated, allowing conclusions to be drawn about the underground water reservoirs. Based on the years 2017 - 2020, statements are made about changes in the water balance and the size of the underground reservoirs in the area. This will also provide information on the availability of water in the future. The study area is located at the southern end of the Waagtal near Einsiedeln, in an area with very high precipitation. On the valley floor and at the foot of the rock face sloping down from the north to south-west, there are various karst springs which have their catchment areas on the higher alpine pastures. Concerning the karst springs, the Kreuzloch spring carries the most water, which is why the discharge has already been measured there for several years. Therefore, the water balance for the catchment area of this spring specifically is being calculated in this work.

In addition to the discharge, precipitation and evaporation in the catchment area are necessary variables for calculating the water balance. These parameters can also be used to indicate the change in storage. To determine precipitation, 5 precipitation gauges were installed in the area and further data was obtained from external sources. The boundaries of the catchment area were determined in more detail using tracer experiments with the fluorescent dyes uranine and rhodamine WT. Evaporation was not measured but instead derived from existing literature; runoff was derived from correlation of pressure curves with individual runoff measurements. The installed precipitation gauges could not measure snowfall, which turned out to be a significant problem for the calculation of the water balance. The problem could be circumvented by precipitation data from another source.

Underground connections to the Kreuzloch could be proven from the shrinks in the Heuloch and Chalberalpli, as well as in the area of the Chöplishütte. The catchment area of the Kreuzloch could thus be narrowed down to  $3.67\text{km}^2$  ( $\pm 0.24\text{km}^2$ ), although it tends to be larger. Unfortunately, the discharge data of the Kreuzloch spring was incomplete for the years 2017 and 2018, which is why the water balance could only be calculated for the years 2019 and 2020. This considerably reduced the informative value, with regard to long-term changes in the water balance and the underground water reservoirs, because the time span investigated in this thesis became too short. The calculations show that the storage volume of the Kreuzloch is at least 1.7 million cubic metres and that the spring supplies a minimum of 0.4 litres of water per second. Although the research questions were only partially answered, important insights into the catchment area were gained and some future improvements could be suggested. In a few years, provided that all measurements are pursued continuously, the methods applied here can be used to recalculate the water balance and storage change of the Kreuzloch catchment. This will allow statements to be made about the change in reservoirs, including their capacity and will thus generally improve knowledge concerning water availability in the future.

# Danksagung

Viele verschiedene Personen haben mich während dieser Arbeit auf unterschiedlichste Art und Weise unterstützt. Als allererstes möchte ich meinem Betreuer Martin Lüthi meinen riesigen Dank aussprechen. Er half mir bei allen Fragen, ob inhaltlicher oder technischer Natur, immer gerne und rasch weiter. Ebenso vermittelte er mir spannende Quellen und hilfreiche Kontakte, wenn er selbst nicht weiterhelfen konnte. Seine Begeisterung fürs Thema und für das Untersuchungsgebiet motivierte mich und steigerte mein Interesse am Thema langfristig. Er unterstützte mich auch bei der zeitaufwändigen Kalibrierung der Fluorometer und war bei sehr vielen Arbeiten im Feld tatkräftig mit dabei, bei welchen er mir jedes Mal viel über das Untersuchungsgebiet beibrachte. Weiter möchte ich seiner Familie für die Gastfreundschaft, sowie seinen Kindern fürs fleissige Mithelfen bei der Vorbereitung und Durchführung der Tracer-Versuche danken.

Als nächstes bedanke ich mich bei Ilja van Meerveld und Jan Seibert für die Unterstützung bezüglich hydrologischen Fragen und Problemen, sowie für die freundliche Ausleihe zweier Niederschlags-Messgeräte der Abteilung H2K der Universität Zürich.

Den Mitgliedern der Höhlengruppe Ybrig danke ich für die vielen interessanten Informationen zu den Karsthöhlen im Waagtal, ob per Mail, über Martin Lüthi oder im persönlichen Gespräch vor Ort.

Ebenfalls geht mein Dank an Felix Ziegler für die Bereitstellung weiterer Niederschlagsmesser und die Unterstützung bei Problemen mit ebendiesen. Auch Manfred Stähli und Florian Käslin von der WSL möchte ich für die bereitwillige und flexible Ausleihe der Fluorometer danken.

Fürs Korrekturlesen der Arbeit möchte ich mich bei Anna Meister und Lydia Gargiulo bedanken und bei Ruth Meister, sowie meinen Eltern für die flexible Ausleihe ihrer Privatautos für die häufigen Fahrten in den Ybrig.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>viii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>x</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Untersuchungsgebiet</b>	<b>4</b>
2.1. Geographische Lage . . . . .	4
2.2. Geologische Gegebenheiten und Tektonik . . . . .	5
2.3. Hydrologie . . . . .	8
2.4. Vegetation . . . . .	8
2.5. Klima . . . . .	9
2.6. Menschliche Einflüsse . . . . .	9
2.7. Untersuchungsstandorte . . . . .	10
2.7.1. Quellen . . . . .	10
2.7.2. Bachschwinden . . . . .	13
2.7.3. Niederschlagsstationen . . . . .	14
<b>3. Methoden und Datenquellen</b>	<b>16</b>
3.1. Karsthydrologie . . . . .	16
3.1.1. Tracerversuche . . . . .	17
3.1.2. Verwendete Tracer . . . . .	18
3.1.3. Eingesetzte Fluorometer . . . . .	19
3.2. Niederschlag . . . . .	21
3.2.1. Eingesetzte Niederschlagsmessgeräte . . . . .	22
3.2.2. Weitere Datenquellen . . . . .	24
3.3. Abfluss . . . . .	26
3.3.1. Abflussmessungen mit Verdünnungsmethode . . . . .	26
3.3.2. Eingesetzte Geräte zur Abflussmessung . . . . .	27

## *Inhaltsverzeichnis*

3.4. Feldaktivitäten . . . . .	28
3.4.1. Salztracer . . . . .	28
3.4.2. Farbtracer . . . . .	30
3.5. Datenauswertung und Berechnungen . . . . .	32
3.5.1. Evaporation . . . . .	33
<b>4. Resultate</b>	<b>37</b>
4.1. Karsthydrologie . . . . .	37
4.1.1. Farbtracer-Versuche . . . . .	37
4.1.2. Eingrenzung der Einzugsgebiete Kreuzloch und Laeli . . . . .	40
4.2. Niederschlag . . . . .	42
4.2.1. Niederschlagsmessungen im Untersuchungsgebiet . . . . .	42
4.2.2. Vergleich der Niederschlagsdaten mit externen Stationen . . . . .	44
4.3. Abfluss . . . . .	45
4.3.1. Punktuelle Abflussmessungen . . . . .	45
4.3.2. Berechnete kontinuierliche Abflusswerte . . . . .	49
4.4. Speicher . . . . .	51
<b>5. Diskussion</b>	<b>55</b>
5.1. Interpretation der Messresultate . . . . .	55
5.1.1. Farbtracer-Versuche . . . . .	55
5.1.2. Niederschlag . . . . .	58
5.1.3. Abfluss . . . . .	59
5.2. Unsicherheiten und mögliche Fehlerquellen . . . . .	60
5.2.1. Farbtracer-Versuche . . . . .	60
5.2.2. Niederschlag . . . . .	61
5.2.3. Abfluss . . . . .	62
5.3. Diskussion der Wasserbilanzrechnung . . . . .	63
5.3.1. Evaporation . . . . .	64
5.3.2. Speicher . . . . .	65
<b>6. Schlussfolgerung</b>	<b>66</b>
6.1. Beantwortung der Forschungsfragen . . . . .	66
6.2. Ausblick . . . . .	68
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>70</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>73</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1. Übersicht des Untersuchungsgebiets . . . . .	5
2.2. Das Untersuchungsgebiet im Winter . . . . .	6
2.3. Verwerfungen im Untersuchungsgebiet . . . . .	7
2.4. Temperatur und Niederschlag Wannenalp 2020 . . . . .	10
2.5. Standorte der Messungen . . . . .	11
3.1. Tracerversuche . . . . .	18
3.2. Fluorometer . . . . .	22
3.3. Kalibrierung Niederschlagsmesser . . . . .	24
3.4. Wasserhaushalt ausgewählter mittelgrosser Einzugsgebiete . . . . .	35
3.5. Evaporation in der Schweiz . . . . .	36
4.1. Durchgangskurve Uranin erster Versuch im Kreuzloch . . . . .	38
4.2. Durchgangskurve Rhodamin und Uranin im Laueli . . . . .	39
4.3. Durchgangskurve Rhodamin und Uranin dritter Versuch im Kreuzloch . . . . .	40
4.4. Bestätigte Verbindungen zwischen Bachschwinden und Quellen . . . . .	41
4.5. Einzugsgebiet des Laueli . . . . .	42
4.6. Gemessener Niederschlag der platzierten Messgeräte im Untersuchungsgebiet . . . . .	44
4.7. Niederschlagsereignisse an verschiedenen Standorten . . . . .	44
4.8. Kumulativer Niederschlag 2017-2020 . . . . .	46
4.9. Salztracer 7. Juli 2020 . . . . .	47
4.10. Salztracer 9. Oktober 2020 . . . . .	48
4.11. Salztracer 15. April 2021 Töbleren . . . . .	48
4.12. Salztracer 15. April 2021 Laueli . . . . .	49
4.13. Abfluss der Kreuzloch-Quelle . . . . .	50
4.14. Abfluss Kreuzloch 2017-2020 . . . . .	52
4.15. Speicheränderung CPC . . . . .	53
4.16. Speicheränderung im hydrologischen Jahr . . . . .	54

## Abbildungsverzeichnis

A.1. Quellen und Bachschwinden . . . . .	73
A.2. Niederschlag der wichtigsten Messstationen . . . . .	76
A.3. Niederschlag vs Abfluss . . . . .	77
A.4. Niederschlags-Messgeräte . . . . .	78
A.5. Minster- und Kreuzlochabfluss . . . . .	79
A.6. Klima 2017 - 2020 . . . . .	80
A.7. Bilder vom Chalberalpli . . . . .	80
A.8. Bilder vom Chäsloch . . . . .	80
A.9. Bilder der verwendeten Geräte . . . . .	81
A.10. Speicheränderung . . . . .	82

# Tabellenverzeichnis

3.1. Photo- Detektoren Fluorometer . . . . .	20
3.2. Messbare Konzentrationen Turner C3 . . . . .	20
3.3. Kalibrierung Fluorometer . . . . .	21
3.4. Kalibrierung Niederschlagsmesser . . . . .	25
3.5. Kalibrierungslösung Salztracerversuch 5.6.20 Laueli . . . . .	29
3.6. Jährlicher Niederschlag und Evaporation . . . . .	34
4.1. Prozentualer Niederschlagsvergleich . . . . .	43
4.2. Basisabfluss Kreuzloch . . . . .	51
A.1. Kalibrierungslösung Salztracerversuch 7.7.20 Riedhöhle . . . . .	74
A.2. Kalibrierungslösung Salztracerversuch 9.10.20 Laueli . . . . .	74
A.3. Kalibrierungslösung Salztracerversuch 15.4.21 Laueli . . . . .	75
A.4. Kalibrierungslösung Salztracerversuch 15.4.21 Töbleren . . . . .	75

# Einleitung

Die Schweiz hat bezüglich Wasserverfügbarkeit grundsätzlich eine sehr komfortable Lage, denn die vielen Gletscher, Seen und Flüsse sind hervorragende Süßwasserlieferanten. Zudem fällt ausreichend Niederschlag, welcher im Winter in Form von Schnee ebenfalls temporär gespeichert wird und im Sommer wieder abfließt, dann wenn das Wasser am meisten gebraucht wird. Besonders in Trockenjahren tragen Abflüsse aus Schnee- und Gletscherschmelze entscheidend zur Deckung des Wasserbedarfs bei (Brunner et al., 2019). Durch den Klimawandel werden nun aber nicht nur die Luft- und Wassertemperaturen höher, sondern auch der Wasserhaushalt; insbesondere die saisonalen Abflüsse verändern sich entscheidend. Die Relevanz dieses Wandels für die Schweiz ist nicht zu unterschätzen, wie beispielsweise folgende Zitate aus dem Magazin "die Umwelt" illustrieren: "Das Wasserschloss bekommt Risse" und "Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserhaushalt und Gewässer sind in der Schweiz grösser als bisher angenommen." (BAFU, 2020).

Der Grund für die saisonalen Verschiebungen ist, vereinfacht gesagt, folgender: Aufgrund der höheren Temperaturen wird im Winter der Niederschlag generell weniger in Form von Schnee fallen, wodurch die Winterabflüsse zunehmen. Gleichzeitig wird im Sommer weniger Wasser abfließen, da zum einen die Evaporation zunimmt (vgl. Schädler (1985)) und zum anderen weniger Schmelzwasser aus den Schneespeichern vorhanden ist. Obwohl sich der Abfluss über das gesamte Jahr gesehen nicht wesentlich verändern wird, können Trockenphasen im Sommer aufgrund der fehlenden Speicher schneller zu Wasserknappheit führen (Lanz, 2020). Das Bundesamt für Umwelt mahnt: "[Es könnte] im Sommer ohne Anpassungsmassnahmen regional vermehrt zu Engpässen kommen" (BAFU, 2021). Verschlimmert wird die Situation dadurch, dass die Trockenperioden in Zukunft womöglich an Dauer und Häufigkeit zunehmen. Infolgedessen wird Niedrigwasser in Zukunft mit hoher Wahrscheinlichkeit an mehr als 30 Tagen im Jahr im Mittelland vorkommen (Meyer et al., 2011).

Die Gletscher sind jedoch nicht der grösste Wasserspeicher der Schweiz, denn in Seen und im Grundwasser ist mehr als ein 4-faches des Wasservolumens der Gletscher vorhanden. Der mächtigste Wasserspeicher ist mit  $150 \text{ km}^3$  das Grundwasser, wovon 80% in Karst-Grundwasserleitern

## 1. Einleitung

eingelagert ist (Sinreich et al., 2012). Die Karstgebiete könnten in Zukunft sehr relevant für die Wasserversorgung in der Schweiz werden.

Charakteristisch für solche Gebiete ist, dass ein Grossteil des Niederschlags unterirdisch durch Karsthöhlen abfließt und bei längerer Trockenheit die oberirdischen Bäche schnell austrocknen. Dabei sind die Fliessgeschwindigkeiten im Untergrund deutlich grösser als beispielsweise im Grundwasser oder im Lockergestein. Fällt viel Niederschlag in einem Karstgebiet, so reagieren Karstquellen schnell mit erhöhtem Abfluss auf den Niederschlag (Dickert, 2015). Aufgrund des sich verändernden Niederschlags- und Abflussregimen, sowie der schlechten Wasserspeicherfähigkeit von Karstgebieten, kann es in diesen Gebieten in Zukunft schneller zu Wasserknappheit kommen. In dieser Arbeit wird versucht, das Volumen der unterirdischen Speicher für ein Einzugsgebiet einer Karstquelle in den Schweizer Voralpen zu berechnen. Somit sollten Aussagen darüber gemacht werden können, ob in dem Gebiet es in Zukunft zu Engpässen in der Wasserversorgung kommen kann.

Das untersuchte Gebiet liegt südöstlich von Einsiedeln und zählt zu den niederschlagsreichsten Gebieten der Schweiz. Dass es dort zu einer Wasserknappheit kommen kann, scheint zwar eher unrealistisch, für die lokalen Bäuerinnen und Bauern der Alpbetriebe ist dieses Szenario jedoch nicht so abwegig. Da es in dem Gebiet keine Gletscher gibt, ist jeweils nur das im Schnee gespeicherte Wasser als zusätzlicher Abfluss während der Schmelze verfügbar. Fällt im Winter weniger Schnee oder schmilzt er schon früher im Jahr, so fehlt dieses Wasser im Sommer. Zusätzlich sagen Niederschlags- und Klimaszenarien für das Gebiet einen hohen prozentualen Rückgang des Niederschlags in den kommenden Jahren voraus (NCCS, 2021). Da das Untersuchungsgebiet ein sehr niederschlagsreiches Gebiet ist, wird somit auch eine entsprechend grosse Menge an Wasser fehlen.

In der Vergangenheit gab es immer wieder Gespräche über die Nutzung der Karstquellen und deren Speicher zur Bewässerung der Alpen und zur Tränkung des Viehs (persönliche Kommunikation). Dafür müssen die genauen Speicherreserven sowie die verfügbaren Abflüsse bekannt sein. Ziel dieser Masterarbeit ist es, die Wasserbilanz und somit auch das Speichervolumen der unterirdischen Wasserspeicher im Gebiet der Chäseren genauer zu bestimmen. Dies ermöglicht Abschätzungen bezüglich Wasserknappheit in Zukunft, sowie bezüglich der Nutzbarkeit der Karstwasserspeicher für die Alpbetriebe. In der Arbeit wird exemplarisch die Wasserbilanz der Kreuzloch-Quelle berechnet, wofür zuerst das Einzugsgebiet der Quelle mit Hilfe von Farbtracer-Versuchen bestimmt werden muss. Es ergeben sich folgende Forschungsfragen:

## 1. Einleitung

- Wie gross sind die Einzugsgebiete der grossen Karstquellen im südlichen Teil des hinteren Waagtals?
- Wie verändert sich die jährliche Wasserbilanz im Einzugsgebiet der wichtigsten Karstquelle Kreuzloch?
- Hat das extreme Trockenjahr 2018 einen längerfristigen Einfluss auf das Karstsystem und dessen Abfluss?
- Wie gross sind die unterirdischen Wasserreserven im Kreuzloch?
- Wie schnell füllen sich diese Reserven wieder auf?
- Hat es im Untersuchungsgebiet genügend Wasser im Sommer?

Zu Beginn dieser Arbeit wird in Kapitel 2 das Untersuchungsgebiet näher vorgestellt: Die geologischen und tektonischen Begebenheiten, sowie die verschiedenen Schwinden und Quellen sind sehr relevant für die Hydrologie, welche ebenfalls genauer besprochen wird. Weitere thematisierte Faktoren sind Klima und menschliche Einflüsse. Die Untersuchungsstandorte werden genau beschrieben und deren Auswahl begründet.

Als nächstes werden in Kapitel 3 die verwendeten Methoden beschrieben und erläutert. Dies umfasst sowohl die Methoden der Feldmessungen mit Fluorometern, Niederschlagsmessern und Drucklogger inklusive Kalibrierung, sowie auch die verwendeten Methoden zur Beantwortung der anfangs gestellten Forschungsfragen, namentlich zur Bestimmung der Wasserbilanz des Einzugsgebiets, sowie des Speichervermögens der unterirdischen Wasserspeicher.

In Kapitel 4 werden die Resultate der Niederschlags-, Abfluss- und Tracermessungen besprochen. Weiter werden mit zusätzlichen Daten, die nicht im Rahmen der Arbeit erhoben, sondern von externen Quellen bezogen wurden, weiterführende Resultate generiert, die ebenfalls zentraler Bestandteil dieses Kapitels sind. Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Diskussion und Interpretation der zuvor besprochenen Resultaten und die Einschätzung derer Qualität, sowie der kritischen Hinterfragung der angewandten Methoden. Abschliessend wird in Kapitel 6 eine Schlussfolgerung aus den Resultaten und deren Interpretation gezogen und mit den gewonnenen Erkenntnissen werden die anfangs gestellten Forschungsfragen beantwortet. Zudem werden mögliche weiterführende Untersuchungen aufgeführt.

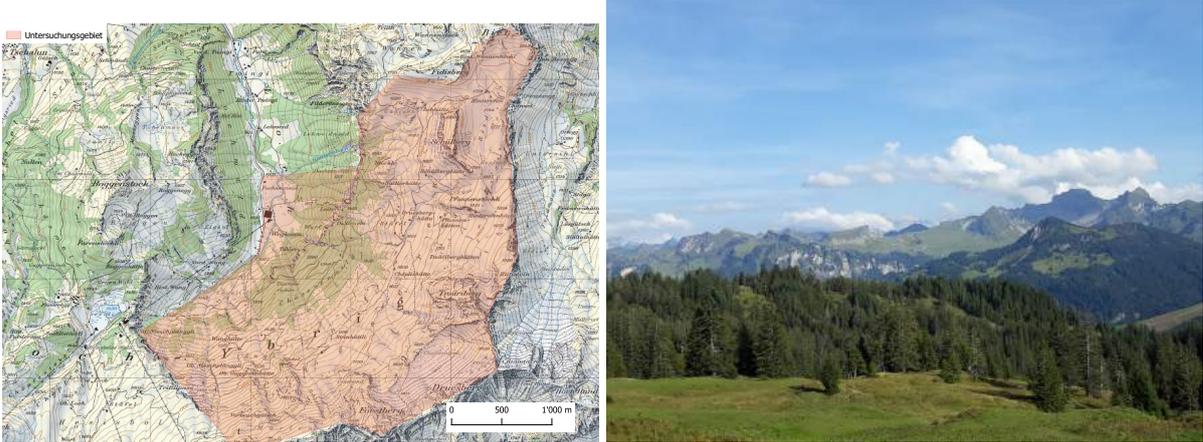
# Untersuchungsgebiet

## 2.1. Geographische Lage

Das Untersuchungsgebiet dieser Masterarbeit liegt im Kanton Schwyz, etwas mehr als 10 Kilometer südöstlich von Einsiedeln, in den politischen Gemeinden Unteriberg (Talboden) und Oberiberg. Es ist in etwa deckungsgleich mit dem Gebiet der Chäseren. Im Süden bildet die Bergkette zwischen Sternen und Drusberg die Grenze der Chäseren und auch des Untersuchungsgebiets, dahinter befindet sich das Muotathal. Westlich des Sternen beginnt das Skigebiet Hoch-Ybrig und im Osten fällt das Gebiet über eine Felswand ins parallel verlaufende Sihltal ab. Nördlich der Chäseren liegen Schülberg, Ried und Hinterofen, welche ebenfalls zum Untersuchungsgebiet dieser Masterarbeit gehören. Dahinter folgen Piet, Fidisberg und Wannenalp, welche die nördliche Grenze des Gebiets markieren. Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich von einer Höhe von ungefähr 1030 m.ü.M. im Tal bei Weglosen bis auf den über 2280 m.ü.M. hohen Drusberg. Ein Grossteil des Gebiets, speziell die Alpweiden der Chäseren, liegt zwischen 1400 und 1900 m.ü.M.

Das Tal verläuft auf dem ersten Kilometer vom Sternen zur Weglosen in nord-östlicher Richtung, danach ziemlich genau nach Norden. Die westliche Flanke ist sehr steil und wird nicht bewirtschaftet. Die östlichen Hänge sind flacher und werden landwirtschaftlich genutzt. Die Exposition der Alpweiden wechselt von westlich im Raum Schülberg zu nördlich unterhalb des Forstbergs. Am Anfang des Tals beim Sternen entspringt die Waag, welche das Untersuchungsgebiet durchfließt und nördlich davon bei Unteriberg mit der von Oberiberg kommenden Minster zusammenfließt. Wenig später mündet die Minster in den Sihlsee. Eine Übersicht über das Untersuchungsgebiet gibt Abbildung 2.1.

## 2. Untersuchungsgebiet



**Abbildung 2.1.:** Links: Ein Überblick über das Untersuchungsgebiet im Ybrig südöstlich von Einsiedeln. Quelle: (swisstopo, 2021). Rechts: Ansicht des Untersuchungsgebiets gesehen von Furgelenstock, ungefähr 7 Kilometer Nordwestlich. Bild: eigene Aufnahme

### 2.2. Geologische Gegebenheiten und Tektonik

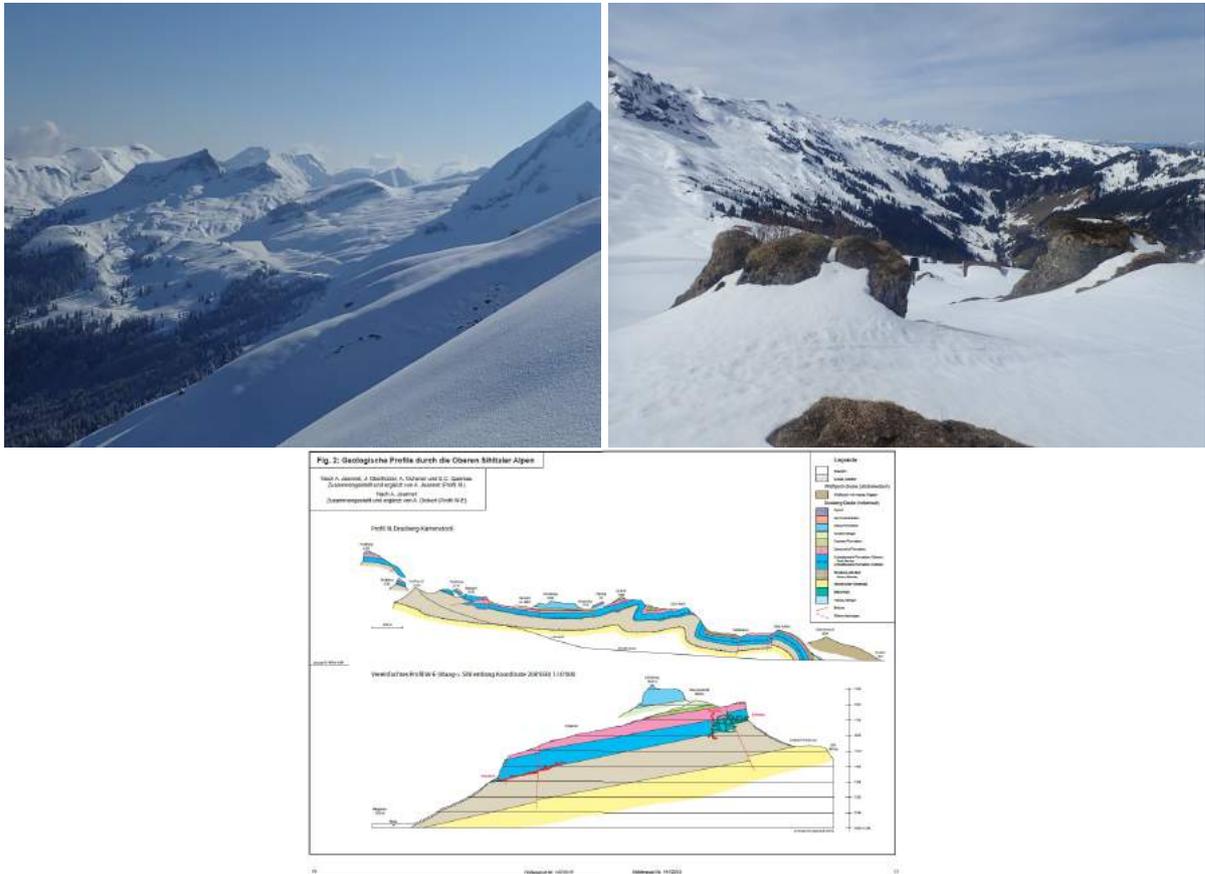
Von Süd bis Ost fällt das Untersuchungsgebiet gegen Nordwesten hinab, dazwischen liegen verschiedene Störungen und Brüche, welche die geneigte Topographie sichtbar durchbrechen. Im Süden steigt das Terrain stetig an, bis es über eine Felswand steil ins Muotathal abfällt. Auch im Osten steigt das Gelände an und fällt schlussendlich über eine Felswand ins Sihltal ab, hier jedoch gibt es zwei markante Hochtäler, das Chalberalpli und das Ried, die diesen Verlauf durchbrechen.

Zwei markante Nord-Süd-Brüche durchtrennen quer das Untersuchungsgebiet. Sie verlaufen parallel zueinander mit einer Höhendifferenz von etwa 100 - 150 Meter. (schwach erkennbar auf dem Bild 2.2). An diesen zwei Hauptverwerfungen fließt das Wasser entlang in die Tiefe, bis es auf die nächste durchlässige Gesteinsschicht, die Drusbergsschichten, trifft (siehe Abbildung 2.3). Der Tektonische Bau ist, vereinfacht dargestellt, wie folgt: Zuerst liegen die undurchlässigen Garschella-Formation, darunter liegt die durchlässige Schrätkalk-Formation. Nach dieser folgt die wiederum undurchlässige Drusbergdecke (siehe Abbildung 2.2). Gelangt Wasser mittels Bachschwinden durch die undurchlässigen Garschella-Formation, läuft es durch die Schrätkalke hinunter, bis es auf die nächste undurchlässige Schicht, in diesem Fall die Drusbergdecke, trifft. Dieser fließt es dann entlang weiter bis zu einem Ausgang. Die grossen Karsthöhlen des Gebiets liegen mehrheitlich auf den Drusbergdecke, innerhalb der Schrätkalk-Formation. Die Verwerfungen auf der Chäseren sind Stellen, an welchen die undurchlässige Garschella-Formation aufgebrochen ist und somit das Wasser einen einfachen Weg in die Tiefe findet. Quellen: (Dickert, 2015), Persönliche Kommunikation.

Aufgrund der undurchlässigen Oberfläche, bestehend aus der Garschella-Formation, wird das

## 2. Untersuchungsgebiet

Gebiet von Dickert (oD) als "Halbkarst" bezeichnet, da es zwar sehr verkarstungsfähiges Gestein im Untergrund hat, dieses jedoch nicht grossflächig an der Oberfläche anzutreffen ist. Auch entwässert das Gebiet nur während niedrigen Abflüssen vollständig in die unterirdischen Karstsysteme. Bei normalen Abflusswerten oder während Hochwasser fliesst ein Teil des Wassers oberflächlich ab (Dickert, oD).

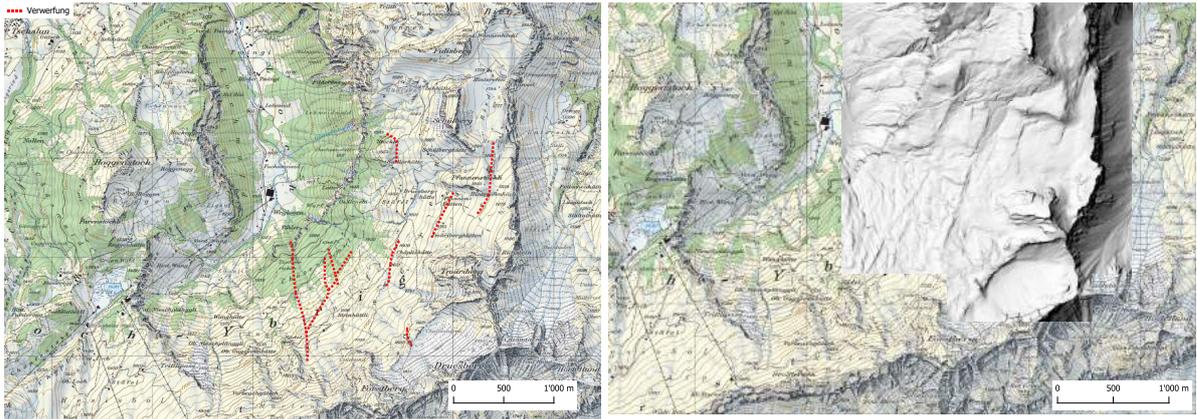


**Abbildung 2.2.:** Links: Blick von Süden über das Untersuchungsgebiet. In der Bildmitte ist der Bruch bei der Chöplishütte gut sichtbar, welcher die Grenze des Einzugsgebiets des Chäslochs bildet. Rechts: Sicht von der Schülberghütte Richtung Süden. Der Bruch ist nahe des linken Bildrandes schön erkennbar. Bilder: Martin Lüthi. Unten: der Tektonische Bau des Untersuchungsgebiet. Quelle: (Dickert, 2015).

### Grosshöhlen

Im Untersuchungsgebiet gibt es verschiedene Krasthöhlensysteme. Einige sind durch die Höhlengruppe Ybrig (HGY) und die Ostschweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung (OGH) schon in mehreren Kilometern Länge erforscht worden. Die relevanteste Höhle im Gebiet ist das Kreuzloch mit einer bekannten Länge von über 2100 Metern (Dickert et al., OD), es erschien

## 2. Untersuchungsgebiet



**Abbildung 2.3.:** Tektonische Verwerfungen im Untersuchungsgebiet. Die Verwerfungen sind auch auf dem digitalen Höhenmodell sichtbar. Quelle: (swisstopo, 2021)

in der "Höhlenpost" vor einigen Jahren ein ausführlicher Bericht der OGH über das Kreuzloch (Dickert, 2015). Geologisch liegt es an der Kontaktzone der durchlässigen Schrattekalk-Formation und der undurchlässigen Drusbergdecke. Es wird schon seit 2010 unter der Leitung von Martin Lüthi intensiv mit Messinstrumenten ausgestattet, welche viele wertvolle Informationen über Abfluss, Temperatur, Hochwasserverhalten und Herkunft des Wassers liefern. Teile des Einzugsgebiets sind bereits bekannt, die genauen Grenzen können jedoch noch nicht mit Bestimmtheit definiert werden. Es wird vermutet, dass im Einzugsgebiet des Kreuzlochs ein grossräumiger Wasserspeicher vorhanden sein, der sich nicht im Epikarst, sondern in porösem oder klüftigem Gestein befindet (Dickert, 2015).

Das Chäsloch als südlicher Nachbar des Kreuzlochs führt ebenfalls beträchtliche Wassermengen und es wurde wie das Kreuzloch schon vertieft von der HGY erforscht (Dickert et al., oD). Zwischen den beiden Höhlen gibt es einige Gemeinsamkeiten, beispielsweise sind beide das ganze Jahr hindurch aktiv. Unterschiede bestehen beim Verhalten während Hochwasser: im Kreuzloch sind Hochwasserwellen deutlich ausgeprägter als im Chäsloch, weshalb vermutet wird, dass die Bachschwinden, welche ins Chäsloch führen, nur eine bestimmte Menge Wasser schlucken können, welche das System nicht überlastet (Dickert, oD).

Das Einzugsgebiet des Chäslochs wird unterhalb desjenigen des Kreuzlochs vermutet, Versuche und bestätigte Verbindungen gibt es bis zum Verfassen dieser Arbeit erst wenige. Dickert (oD) geht davon aus, dass das Einzugsgebiet nicht sehr gross ist, jedoch trotzdem genügend Speicherkapazität enthalten muss, denn die Karstquelle ist das ganze Jahr über aktiv. Bucher (2015) fand eine Verbindung vom Chalberalpli ins Chäsloch, welche jedoch nur bei Hochwasser aktiv ist, ansonsten entwässert dieses Gebiet ins Kreuzloch.

Weitere grössere Höhlensysteme sind das Krähenloch, welches der südliche Nachbar des Chäsloches ist, gefolgt von den Töbleren-Höhlen. Diese beiden Höhlensysteme sind nur wenige dut-

## 2. Untersuchungsgebiet

zend bis maximal einige hundert Meter betretbar, sie führen weniger Wasser als die grösseren Nachbarn, weshalb die Einzugsgebiete eher kleinräumig sein dürften (Dickert, oD).

An der Ostgrenze des Untersuchungsgebiets befindet sich mit der Sihlhöhle ebenfalls eine weit erkundete Höhle. Für diese Arbeit ist sie aufgrund ihrer abgelegenen Lage weniger interessant. Weiter gibt es auf der Chäserenalp selbst ebenfalls Höhleneingänge, der Chöplishschacht oder die Riedhöhle, welche als Bachschwinden fungieren. Die Reidhöhle entwässert beispielsweise ins Kreuzloch (Dickert, 2015).

### 2.3. Hydrologie

Wie in Kapitel 2.2 thematisiert, gibt es im Gebiet viele unterirdische Abflüsse. Daneben gibt es aber auch Oberflächenbäche, die je nach Witterung viel bis gar kein Wasser führen. Die Bachschwinden sind oftmals diffus und erstrecken sich über mehrere Meter entlang eines Bachbetts. Vermögen diese Schwinden nicht alles Wasser zu schlucken, so fliesst das Wasser oberirdisch weiter ins Tal und stürzt teilweise in spektakulären Wasserfällen über die Felswand. Alle Bäche, sowohl unterirdische wie auch die Oberflächenbäche, münden im Tal in die Waag, welche das Untersuchungsgebiet von Westen nach Norden durchfliesst und weiter nördlich in die Mins-ter mündet, welche schlussendlich in den Sihlsee fliesst. Die Mehrheit dieser Bachschwinden liegen auf der Chäseren und in den höhergelegenen Teilen des Untersuchungsgebiets, wo die Bäche meistens einen Abfluss von einigen Litern pro Sekunde aufweisen. Bei Niederschlag erhöhen sich diese Abflüsse jedoch markant. Unten im Tal sind die Bäche deutlich grösser, aber auch dort gibt es noch vereinzelt Bachschwinden. Beispielsweise beim Zusammenfluss des Weglosenbachs mit den Töblerenbächen versickert das Wasser bei niedrigem Abfluss vollständig im Untergrund und weiter Talaufwärts in der Nähe der Laueliquelle verschwindet die Waag an einer Stelle bei niedrigem Abfluss komplett im Untergrund und tritt einige Meter später wieder hervor.

### 2.4. Vegetation

Das Untersuchungsgebiet ist überwiegend von Wiesen bedeckt, besonders am Talboden und an den weniger steilen Hängen im höhergelegenen Teil der Chäseren. Entlang der quer durch das Einzugsgebiet verlaufenden Felswand liegt das grösste zusammenhängende Waldstück des Gebiets, der Chäsrenwald. Der Wald beginnt im Tal an dem Ort, an welchem das Gelände steiler wird und endet auf einer Höhe von ca. 1400 m.ü.M. Am Süden-ende des Tals ist die Waldfläche nicht durchgehend. Einzelne kleinere Waldflächen und Bäume sind bis rund 1600 m.ü.M. zu be-

## 2. Untersuchungsgebiet

obachten, darüber dominieren Alpweiden und einzelne Büsche das Landschaftsbild. Der Wald ist in der Nähe des Talbodens ein Mischwald, wobei mehr Nadel- als Laubbäume vorhanden sind. Oberhalb des Felsbandes wachsen fast ausschliesslich Nadelbäume.

### 2.5. Klima

Die durchschnittliche Temperatur der letzten Jahre lag auf der Wannenalp zwischen 5°C und 5.5°C. Bei der im Untersuchungsgebiet vorhandenen Station Chöplishütte, ungefähr 100 Meter tiefer als die Wannenalp, war die Temperatur um 1° höher. Im Jahr 2020 wurde auf der Wannenalp 1600 Millimeter Niederschlag gemessen, wovon ein Grossteil in den Sommermonaten Juni-September fiel. Auf Abbildung 2.4 ist der Verlauf der Temperatur und des Niederschlags im Jahr 2020 auf der Wannenalp dargestellt. Im Vergleich mit den letzten Jahren war es anfangs Jahr eher warm und nicht ganz so feucht. Im Frühsommer (Mai, Juni) war es dann kälter und feuchter als in anderen Jahren, wohingegen es im Spätsommer (August, September) wärmer und trockener war. Im Herbst wurde es schnell kalt, es kam aber nochmals eine Phase mit wärmeren und trockenerem Wetter, bevor es im Winter wieder leicht kälter wurde als in den letzten Jahren.

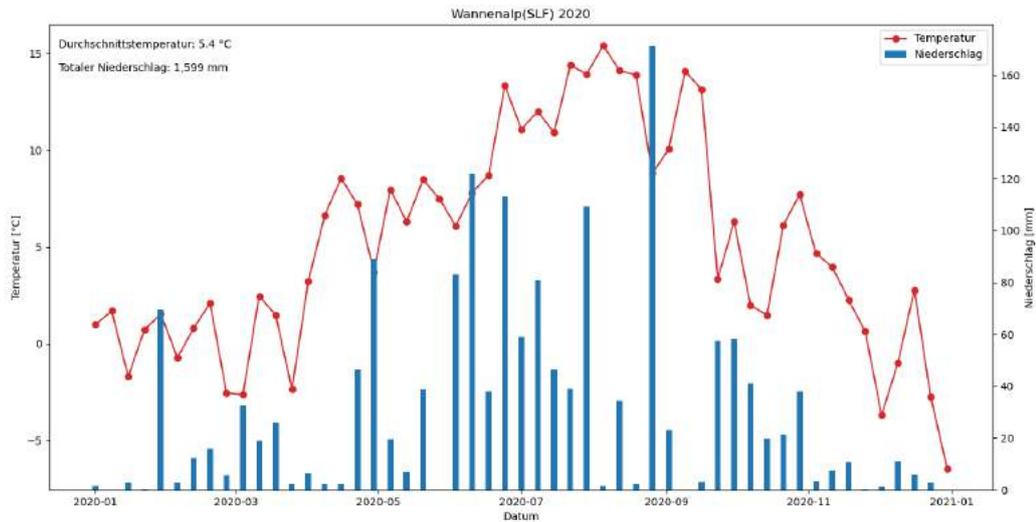
Aufgrund der Topographie bleiben die Wolken am südlichen Talende aber auch beim Chlabealpli und am Schülberg teilweise hängen, was nicht nur zu mehr Niederschlag führt, sondern auch dazu, dass der Schnee dort am längsten liegen bleibt. Im Winter ist besonders der Talboden sehr schattig, auf der nordwestlich exponierten Chäseren scheint die Sonne etwas häufiger.

### 2.6. Menschliche Einflüsse

Die Wiesen auf der Chäseren dienen zum grössten Teil als Weideflächen für Kühe und auch die Wiesen im Tal werden landwirtschaftlich genutzt. Dieser Umstand führt vor allem auf den Alpweiden dazu, dass die Topographie sich mit der Zeit verändert, da beispielsweise neue Wege zwischen den Alpen und den Weiden erschlossen werden. Zu dem Dutzend Alphütten führen Kiesstrassen und Trampelpfade verbinden die Hütten in der höher gelegenen Region.

Touristisch ist das Untersuchungsgebiet weniger stark frequentiert als das westlich gelegene Skigebiet Hoch Ybrig, jedoch trifft man an schönen Sommertagen einige Wanderinnen und Wanderer auf den Wanderwegen zwischen den Alphütten oder in der Drusberghütte, der einzigen Alpwirtschaft im Gebiet. Ausgangspunkt für die Mehrheit der touristischen Aktivitäten ist das grosse Parkhaus in Weglosen mit der Luftseilbahn in das Skigebiet, welche auch im Sommer betrieben wird.

## 2. Untersuchungsgebiet



**Abbildung 2.4.:** Der Temperatur- und Niederschlagsverlauf auf der Wannenalp im Jahr 2020. Die Temperatur wurde wöchentlich gemittelt, der Niederschlag wöchentlich aufsummiert.

## 2.7. Untersuchungsstandorte

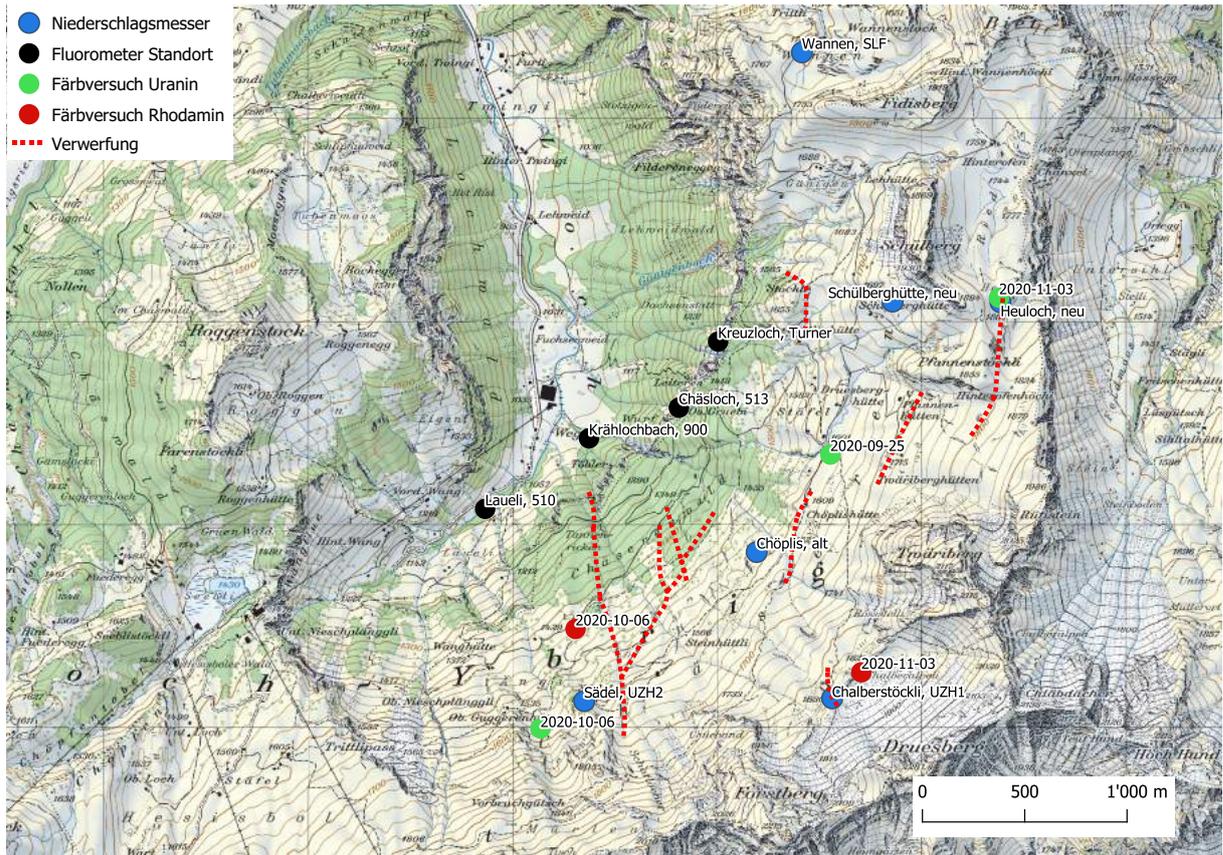
Mit den Fluorometern sollen mittels Farbtracern unterirdische Fliesswege nachverfolgt werden. Ist zudem die Menge des Farbstoffs bekannt, kann ausserdem die Abflussmenge berechnet werden. Dazu sollte der Standort des Messgeräts möglichst so gewählt werden, dass nur Wasser aus dem beprobten Gewässer beim Messgerät vorbeifliesst und sich dieses nicht mit Wasser aus anderen Quellen vermischt. Demnach wurden die Fluorometer jeweils möglichst nahe an der zu untersuchenden Quelle platziert, sodass sich die Oberflächenbäche nicht mit dem beprobten Gewässer vermischen konnten. Die zu untersuchenden Quellen wurden hauptsächlich nach deren Lage und Grösse (also geführte Wassermenge) ausgewählt und sind auf Abbildung 2.5 in rot dargestellt.

### 2.7.1. Quellen

#### Kreuzloch

Beim Kreuzloch handelt es sich wohl um das relevanteste Höhlensystem im untersuchten Gebiet (Dickert, 2015). Zudem wurde bei dieser Quelle schon in den Jahren 2014/2015 Messungen durchgeführt (Bucher, 2015) und seit 2010 wird der Abfluss mittels Druckloggern aufgezeichnet (Dickert, 2015). Das hier verwendete Messgerät ist ein Turner C3-Fluorometer (siehe Sektion 3.1.3), welches in einem kleinen See wenige Meter vor dem Austritt des Wassers aus der

## 2. Untersuchungsgebiet



**Abbildung 2.5.:** Die Messstandorte im Untersuchungsgebiet. In schwarz die Standorte der Fluorometer, in Blau die Niederschlagsmesser, die gefärbten Bachschwinden in grün (Uranin) und rot (Rhodamin) Quelle: (swisstopo, 2021)

Höhle installiert wurde und nahe bei den Druckloggern (siehe A.9 rechts). Es besteht bei diesem Messstandort keine Gefahr durch Vermischung durch Oberflächenbächen.

### Chäsloch

Das Fluorometer, ein GGUN FL30 mit der Nummer 513, wurde ungefähr 10 Meter nach dem spektakulären Wasserfall aus der Felswand, welcher die Quelle des Chäslochs bildet, in den Bach gelegt. Eine genauere Beschreibung der verwendeten Geräte ist in Sektion 3.1.3 zu finden. Wenige Meter weiter talwärts vermischt sich der Höhlenbach mit einem weiteren Wasserfall, welcher über die Felswand hinabfällt. Bei heftigem Niederschlag und Wind besteht hier die Möglichkeit, dass sich Wasser vom Oberflächenwasserfall sich mit dem Höhlenbach noch vor dem Messgerät vermischt. Das Fluoro wurde so platziert, dass es vollständig von Wasser bedeckt ist und das Wasser möglichst ungehindert durch das Gerät hindurch fließen kann. Es wurde an naheliegenden Felsbrocken mit einem Seil befestigt, sodass es bei Starkniederschlag nicht mitgerissen werden kann.

## 2. Untersuchungsgebiet

### **Krähloch**

Noch weiter südlich liegt das Krähloch, welches tendenziell weniger Wasser führt, als die vorherigen Quellen (Dickert, oD). Die Bestimmung der Abflussmenge war hier weniger interessant und ein reiner Nachweis des Farbstoffs genügte. Deshalb wurde das Fluorometer nicht nahe an der Felswand montiert, sondern in der Nähe des Talbodens, da dort der Zugang deutlich einfacher und kürzer ist und es keine Rolle spielt, wenn sich das Wasser bereits mit Wasser aus oberflächlichen Abflüssen vermischt hat. Das verwendete Gerät ist ein GGUN FL30 mit der Nummer 900 und wurde wie das Gerät beim Chäsloch mit einem Seil an einen Stein gebunden, sodass es nicht weggeschwemmt werden kann. Das Gerät liegt an einer ruhigeren Stelle im Weglosenbach, welcher vom Krähloch kommt, direkt vor dem Zusammenfluss mit dem Bach aus dem Töbleren-Quellgebiet und ist ebenfalls vollständig mit Wasser bedeckt.

### **Lauei**

Die Lauei-Quelle ist im Gegensatz zu den anderen genannten Messorten kein Höhlenausgang in der Felswand sondern eine diffuse Aufstossquelle im Talboden. Das Wasser tritt an verschiedenen Stellen aus dem Boden hervor und sammelt sich in einem Nebenbach der Waag, bevor es in ebendiese mündet. Es können zwei grössere Quellaufstösse ausgemacht werden, welche den Grossteil des Wassers im Lauei fördern, welche als obere und untere Quelle bezeichnet werden. Die Quellen liegen wenige Meter voneinander entfernt und speisen denselben Bach. Ungefähr 10 Meter unterhalb des zweiten Aufstosses wurde ein GNU Fluorometer mit Nummer 513 in den Bach gelegt und mit Seil an einem Baum befestigt. Neben den verschiedenen diffusen Quellen gibt es keinen Zufluss in den Bachabschnitt vor dem Messstandort, es sollte also noch keine Vermischung mit Wasser von Oberflächeabflüssen gegeben haben. Wenige Meter nach der ersten Quelle, sowie auf halber Strecke zwischen der tiefergelegenen grossen Quelle und dem Fluorometer-Standort ist jeweils ein Drucklogger montiert.

### **Töbleren**

Zwischen Lauei und Krähloch liegen die Töbleren-Quellen. Während den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurde der Abfluss aus den Töbleren-Quellen und somit deren allgemeine Relevanz für die Untersuchungen als zu gering eingeschätzt. Nach Abschluss der eigentlichen Messperiode wurde durch persönliche Kommunikation bekannt, dass der Abfluss möglicherweise doch höher ist, als anfänglich gedacht. Im Zuge dessen wurde im Frühling 2021 auch in den Töbleren-Quellen von Martin Lüthi ein Drucklogger für weitere Analysen installiert und im Rahmen dieser Masterarbeit eine erste Abflussmessung getätigt.

## 2.7.2. Bachschwinden

### Chöplishütte

Direkt bei der Chöplishütte verläuft ein gut sichtbarer Bruch von Südwest nach Nordost. Entlang des Bruches wurden bei einer Feldbegehung im Juni mehrere Bachschwinden entdeckt. Vier lagen nördlich der Hütte, 2 davon waren eher diffuse Schwinden auf offenem Feld nahe der Brücke zur Drusberghütte, die anderen 2 lagen unterhalb eines kleinen Felsbandes und waren deutlich auszumachen. Knapp südlich der Chöplishütte wurde auch noch eine diffuse Schwinde gefunden. Es wurde vermutet, dass Wasser entlang dem Bruch in die Tiefe gelangt und danach in eine der Karsthöhlen fliesst, höchstwahrscheinlich ins Kreuzloch.

### Riedhöhle

Die Riedhöhle liegt im Nordosten des Untersuchungsgebiets auf ca. 1750 m.ü.M. und bildet den einzigen Abfluss aus dem Ried, einer Hochebene östlich des Schülbergs. Verschiedene Flüsschen und Drainagen durchziehen die Wiese verschwinden alle in der Riedhöhle, welche ins Kreuzloch entwässert (Bucher, 2015) (Dickert, 2015). Die westliche Begrenzung der Ebene ist der über 1900 Meter hohe Schülberg, im Osten fällt das Gelände steil ab. Im Norden und Süden ist die grassbewachsene Ebene gut zu Fuss erreichbar, aber auch hier liegen die Zugänge mehrere Meter über dem Talboden und es gibt keinen sichtbaren oberirdischen Abfluss.

### Heuloch

Das Heuloch liegt anschliessend an das südliche Ende des Rieds und ist Teil des Sihlhöhlensystems, welches ansonsten nur vom östlich gelegenen Sihltal begangen werden kann. Ein Bach fliesst durch das Kreuzloch, der je nach Jahreszeit mehr oder weniger Wasser führt und entlang der Drusbergschichten verschwindet. Deshalb wird eine Verbindung ins Kreuzloch stark vermutet (Dickert, 2015).

### Chalberalpli

Genau im Südosten des Untersuchungsgebiets liegt hinter dem Chalbersöckli das tiefergelegene Chalberalpli, hinter welchem sich der Drusberg erhebt. Das Chalberalpli ist eine grassbewachsene Ebene von ungefähr der Grösse eines Fussballfeldes. In der Ebene fliessen meistens zwei kleine Bäche, welche an der nordwestlichen Grenze an unterschiedlichen Stellen im Boden verschwinden (siehe Anhang A.7). Das Chalberalpli liegt auf ungefähr 1820 m.ü.M. und das

## 2. Untersuchungsgebiet

Gelände steigt überall rundherum um mindesten 10 Meter an und es gibt keinen oberirdischen Abfluss aus dem Kessel. Die südliche Bachschwinde wurde im Rahmen dieser Arbeit mit einem Farbtracer beprobt, die Nördliche wurde bereits früher untersucht und eine Verbindung ins Kreuzloch konnte nachgewiesen werden, welche bei Starkniederschlag einen Überlauf ins Chäsloch besitzt (Bucher, 2015).

### **Raum Guggerenhütte**

Die Guggerenhütte liegt auf einer Höhe von 1500 m.ü.M. im südlichen Teil des Einzugsgebiets und somit in einem Gebiet, welches kaum durch frühere Arbeiten untersucht wurde. Die Bergflanke wird durch zwei, dem Gefälle folgende Rücken durchbrochen, ansonsten ist hier in der Region Sädel, Guggerenhütte und Wanghütte keine Brüche oder Verwerfungen zu sehen. Nur mit geringer Wahrscheinlichkeit ist dieses Gebiet Teil des Einzugsgebietes des Kreuzlochs sondern es gehört vermutlich zum Einzugsgebiet der Laueliquelle, welche direkt unterhalb dieser Region am Talboden entspringt. Zwei Bachschwinden wurden hier beprobt, eine diffuse Schwinde entlang eines Bachbetts südöstlich der Guggerenhütte und ein Schluckloch unterhalb von Sädel auf ca 1450 m.ü.M.

### **2.7.3. Niederschlagsstationen**

Im Rahmen der Masterarbeit von Domenika Bucher (2015) wurde nahe der Chöplishütte auf etwa 1600 m.ü.M. eine Messstation für Temperatur und Niederschlag montiert. Diese Station liegt zentral im Untersuchungsgebiet und liefert eine langjährige Datenreihe.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden vier weitere Messstationen installiert, um eine optimale Abdeckung der räumlichen Variation des Niederschlags im Untersuchungsgebiet zu erreichen. Zwei Stationen, inklusive der langjährigen Station bei der Chöplishütte, liegen auf etwa 1600 m.ü.M. und decken die Nordwest-Südost-Achse der offenen Flächen auf der Chäseren ab. Zwei weitere Stationen wurden im Raum des Schülbergs platziert, ebenfalls auf ähnlicher Höhe aber auf einer Ost-West-Achse, um allfällige Unterschiede im Niederschlag östlich und westlich des Schülbergs festzustellen. Kommt beispielsweise das Wetter von Osten vom Sihltal, so kommt es über den Grat ins Ried aber bleibt an den Bergen dahinter hängen. Es wird ein verstärkter und verfrühter Niederschlag beim Heuloch im Vergleich zu tieferen Lagen erwartet. Die 5. Station wurde beim Chalberalpli montiert, da dieses Gebiet aufgrund der speziellen Topographie möglicherweise deutliche Unterschiede im Niederschlag im Vergleich zum restlichen Gebiet aufweist. Bei der Montage der Geräte wurde darauf geachtet, dass keine Kühe an die Geräte herankommen, sowie dass die Geräte nicht im Windschatten von Bäumen oder Felsen stehen,

## *2. Untersuchungsgebiet*

was die Messungen verfälschen würde. Die Stationen sind auf Abbildung 2.5 in Blau markiert.

# Methoden und Datenquellen

In diesem Kapitel werden zuerst die für die Beantwortung der Forschungsfragen angewandten Methoden besprochen. Aufgeteilt nach Anwendungsbereich wird beginnend die Krasthydrologie thematisiert, gefolgt von den Niederschlagsmessungen und abschliessend die Abflussmessungen. Neben den theoretischen Grundlagen der Methoden werden auch alle verwendeten Messgeräte beschrieben. Danach behandelt das Kapitel die Aktivitäten im Feld und zum Schluss wird die Auswertung und Weiterverwendung der gemessenen Daten erläutert.

## 3.1. Karsthydrologie

Für eine adäquate Berechnung der Wasserbilanz muss die Grösse des zu untersuchenden Einzugsgebiets bekannt sein. Im vorliegenden Fall handelt es sich um das Einzugsgebiet einer Karst-Quelle, weshalb sich das Einzugsgebiet nicht rein anhand der Topographie herleiten lässt, da ein nicht unwesentlicher Teil der Wasserwege unterirdisch verläuft. Diese unterirdischen Fliesswege lassen sich rein anhand oberflächlichen Merkmalen nicht mit Bestimmtheit nachverfolgen. Um ein Einzugsgebiet mit solchen unterirdischen Abflusswegen genauer einzugrenzen und zu definieren, können Bachschwinden im vermuteten Einzugsgebiet mittels Farbtracer-Versuchen markiert, und somit deren Verlauf nachverfolgt werden. So kann für einzelne Punkte im Einzugsgebiet (und je nachdem ganze Bachläufe) bestimmt werden, ob sie zum untersuchten Einzugsgebiet einer Karst-Quelle dazugehören oder eben nicht, wie es im Rahmen dieser Masterarbeit für 5 Bachschwinden gemacht wurde.

Über viele Jahre hinweg haben Martin Lüthi und weitere Mitglieder der Höhlengruppe Ybrig Bachschwinden in der Chäseren bemerkt und kartiert (Abbildung im Anhang A.1). Anhand dieser hervorragenden Datengrundlage, sowie zwei weiteren Feldbegehungen im Rahmen dieser Masterarbeit, während welchen explizit nach weiteren Bachschwinden gesucht wurde, wurden die zu markierenden Schwinden ausgewählt (Siehe Abbildung 2.5). Die Kriterien waren dabei folgende: Der Abfluss des Baches darf nicht zu niedrig sein, da es ansonsten zu lange dauern

### 3. Methoden und Datenquellen

würde, bis alle Tracerfarbe beim Messgerät am Quellaufstoss vorbeigeflossen ist. Die Geräte haben, je nach Messintervall, eine Batterielaufzeit von knapp 3 Tagen. Weiter sind diffuse Bachschwinden weniger geeignet als deutliche, da bei den diffusen die Möglichkeit besteht, dass Tracerfarbe länger an der Erdoberfläche verweilt und in der Erde hängen bleibt. Die Schwinden sollten möglichst in einem Gebiet liegen, für welches die zugehörige Quelle noch nicht bekannt ist oder nahe eines vermuteten Grenzgebietes zweier Einzugsgebiete. Auch wurde die Verteilung der Bachschwinden berücksichtigt. Oftmals liegen einige Bachschwinden sehr nahe beieinander und es ist stark davon auszugehen, dass sie zum selben Einzugsgebiet gehören. In diesen Fällen wurde nur eine, nämlich die grösste und deutlichste Schwinde beprobt.

#### 3.1.1. Tracerversuche

Der Verlauf eines Baches oder Flusslaufs kann an der Erdoberfläche problemlos nachverfolgt werden. Befindet sich der Fliessweg jedoch unter der Erde, wie es in einem Karstgebiet häufig der Fall ist, kann man dem Verlauf nur selten folgen und es ist unklar, wohin das Wasser fliesst. Dieses Problem kann gelöst werden, indem das Wasser mit einer Substanz markiert wird, welche sich leicht nachverfolgen lässt. Seit über 100 Jahren werden Farben und andere Substanzen zu diesem Zweck verwendet (Ford and Williams, 2007). Es ist darauf zu achten, dass die als Tracer verwendete Substanz sich eindeutig von anderen Eigenschaften des Wassers unterscheiden lässt, sich aber trotzdem gut mit dem Wasser vermischt aber wenig Tendenz zur Sorption besitzt und für Pflanzen, Menschen und Tiere unbedenklich ist (Schudel et al., 2002). Dabei wird zwischen natürlichen und künstlichen Tracern unterschieden.

In die Kategorie natürliche Tracer gehören alle Substanzen die von Natur aus in einem Einzugsgebiet vorkommt, zum Beispiel chemische Verbindungen oder Isotope (Benischke, 2021). Eigenschaften des Wassers wie Temperatur, elektrische Leitfähigkeit oder Druck können ebenfalls als Tracer verwendet werden, was im Untersuchungsgebiet dieser Masterarbeit schon früher mit Temperatur gemacht wurde (Siehe Lüthi (2019)).

Künstliche Tracer kommen nicht natürlich in der Umwelt vor sondern werden von aussen hinzugefügt. Neben fluoreszierende Farben gehören auch Partikel oder Salze zu dieser Gruppe. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden zwei fluoreszierende Farben als Tracer verwendet, um die Fliesswege der Bachschwinden auf der Chäseren bis ins Tal nachzuverfolgen. Salz (NaCl) wurde ebenfalls verwendet, jedoch nicht primär als Tracer um eine Verbindung nachzuweisen sondern um den Abfluss verschiedener Bäche zu bestimmen. Deswegen wird im Folgenden nur die beiden verwendeten Farben, Uranin und Rhodamin WT genauer besprochen.



**Abbildung 3.1.:** Uranin-Tracerversuche bei der Guggerenhütte (links) und beim Heuloch (rechts). Bilder: Martin Lüthi

#### 3.1.2. Verwendete Tracer

##### Uranin

Natrium-Fluorescein, oder gebräuchlicher Uranin, gilt als am besten geeigneter Fluoreszenztracer und wird sehr häufig eingesetzt. Uranin ist auch in sehr niedrigen Konzentrationen noch nachweisbar (bis  $0.001 \mu\text{g/L}$  bei klarem Wasser), neigt nur schwach zur Sorption (ausser bei pH-Werten unter 5.5) und ist verhältnismässig günstig (Schudel et al., 2002). Das Emissionsmaximum von Uranin liegt bei 513 Nanometer und das Absorptionsmaximum bei 492 Nanometer (Ford and Williams, 2007).

Zerstört wird Uranin durch Oxidationsmittel wie beispielsweise Chlor oder Ozon, welche in der Trinkwasseraufbereitung zum Einsatz kommen. Zudem ist Uranin lichtempfindlich, es wird durch UV-Strahlung zersetzt und sollte deswegen hauptsächlich in unterirdischen Bächen oder im Grundwasser eingesetzt werden. Uranin gilt als toxikologisch unbedenklich (Schudel et al., 2002). Aus diesen Gründen wurde Uranin für diese Masterarbeit als Haupttracer ausgewählt.

##### Rhodamin WT

Weil Uranin unter Sonneneinstrahlung schnell zersetzt wird, wurde für Markierungsversuche in Oberflächengewässer zuerst Rhodamin B und später, wegen dessen Neigung zur Sorption in Sedimenten, durch Rhodamin WT entwickelt (Smart, 1977). Nachweisbar ist Rhodamin WT bis zu  $0.01 \mu\text{g/L}$  und Absorptions- sowie Emissionsmaxima liegen bei 558 respektive 583 Nanometer (Schudel et al., 2002). Über die Toxizität von Rhodamin WT existieren verschiedene Angaben. Smart (1977) schreibt, dass Rhodamin WT wie Uranin relativ niedrige Toxizität haben, während Schudel et al. (2002) den Einsatz von Rhodamin WT aufgrund der toxikologischen Bewertung als "nicht zu empfehlen" einstuft und Goldscheider et al. (2008) Rhodamin

WT genotoxische Eigenschaften zuschreibt. Rhodamin WT wurde im Rahmen dieser Masterarbeit ergänzend zu Uranin als Tracer verwendet, da dessen Emissions- und Absorptionsspektrum sich kaum mit dem von Uranin überlappt. So können die beiden Farbstoffe problemlos voneinander unterschieden werden und man kann sie deswegen gleichzeitig an verschiedenen Stellen im gleichen Untersuchungsgebiet ohne Verwechslungsgefahr verwenden.

#### 3.1.3. Eingesetzte Fluorometer

##### GGUN FL30

Für die Messung der verschiedenen Farb-Tracern wurden 3 Fluorometer des Typs GGUN FL30 der Firma Albillia Co aus Neuchâtel eingesetzt (Siehe Bild 3.2). Die Geräte sind für den Einsatz im Feld konzipiert und sind dementsprechend wasserdicht und robust. Sie bestehen aus einem Mini-Computer mit Display und zwei Knöpfen zum Einstellen der Parameter, welcher in einer wasserdichten Box platziert wird. Durch ein Kabel ist die Box mit dem Messgerät selbst verbunden. Dieses ist zylinderförmig mit einem Loch in der Mitte, welches von zwei Kappen mit einem kleinen seitlichen Loch abgedeckt wird. Das Wasser fließt durch das Loch in der Mitte des Geräts, wo die eigentliche Messung stattfindet. Die Geräte sind mit vier Lampen und drei Photo-Detektoren ausgestattet, mit welchen bis zu drei unterschiedliche Tracer gleichzeitig gemessen werden können (Schnegg, 2002). Pro Detektor kann jeweils nur ein Farbstoff gleichzeitig zuverlässig gemessen werden, weshalb nicht jede Kombination an Farbstoffen möglich ist. Tabelle 3.1 zeigt, welcher Detektor welche Farben messen kann. Gemessen wird die Reflexion der Farbstoffe in mV bis zu einem Sättigungslevel von 2500 mV. Der Wert für elektrisches Rauschen wird vom Hersteller als 0.01 mV angegeben (Albillia, oD).

Mit Hilfe der Kalibrierung kann davon auf die Konzentration geschlossen werden. Das Messintervall beträgt mindestens 2 Sekunden, wobei dann nur ein Detektor aktiviert werden kann. Ab einem Intervall von 10 Sekunden sind immer alle Photo-Detektoren aktiv. Zusätzlich zur Konzentration der Farbtracer wird die Trübung und die Temperatur gemessen, weil diese Parameter die Messung beeinflussen. Die Trübung in einem Bereich von 0.02 – 400 NTU, die Temperatur ab 2°C mit einer Genauigkeit von 0.01°C (Albillia, oD). Bucher (2015) spricht von einer Abweichung von 20% zwischen gemessener Konzentration und Realwert ohne Kalibrierung der Geräte. Eine Kalibrierung vor der Messung mit exakt denselben Bedingungen (gleicher Tracer, gleiches Wasser, gleiche Temperatur) sollte diese Abweichung auf 2% reduzieren (Bucher, 2015). Die Kalibrierung der Geräte ist in Sektion 3.1.3 erläutert. Um den Abfluss anhand der gemessenen Konzentration des Farbtracers zu ermitteln, muss die Anfangskonzentration genauestens bekannt und die Geräte müssen präzise kalibriert sein. Für den Nachweis einer Verbindung zwischen Messort und Injektionsstelle spielt die genaue Konzentration des Tracers

### 3. Methoden und Datenquellen

keine Rolle, es genügt ein sichtbarer Ausschlag in den Messwerten.

Detektor	Farbstoff
I	Uranin, Pyranin, Eosin, Chlorophyll A
II	Amidorhodamin G, Sulforhodamin B, Rhodamin WT, Resorufin
III	Tinopal CBS-X, CBS-CL, Amino-G-Acid , Photin CU

**Tabelle 3.1.:** Die mit dem GGUN 30FL messbaren Farbstoffe und der entsprechende Photo-Detektor

#### Turner C3

Zusätzlich zu den GGUN FL30 wurde ein C3 submersible Fluorometer der Firma Turner Designs für die Farbtracer-Versuche verwendet. Diese Geräte werden entsprechend den Wünschen des Kunden in unterschiedlichen Ausführungen hergestellt, beispielsweise können bis zu drei optische Sensoren im Bereich von Ultraviolett bis Infrarot integriert werden. Mit dem verwendeten Gerät konnten die Farbstoffe Fluorescein (Uranin) und Rhodamin, die Trübheit und die Temperatur gemessen werden. Die messbaren Konzentrationen sind in Tabelle 3.2 aufgelistet. Der Messbereich der Temperatur ist von  $-2^{\circ}\text{C}$  bis  $50^{\circ}\text{C}$  und die Genauigkeit ist laut Hersteller  $0.5^{\circ}\text{C}$ . Das minimale Messintervall ist 1 Sekunde für alle Messungen. (TURNER DESIGNS, 2020).

Farbstoff	Minimale Konzentration	Messbereich
Fluorescein	0.01 ppb	0-500 ppb
Rhodamin	0.01 ppb	0-1,000 ppb
Trübheit	0.05 NTU	0-1,500 NTU

**Tabelle 3.2.:** Die mit dem Turner C3 messbaren Farbstoffe, sowie minimal messbare Konzentration und Messbereich. Quelle: TURNER DESIGNS (2020)

#### Kalibrierung Fluorometer

Zur Kalibrierung der Geräte wurden mehrere Lösungen mit unterschiedlichen aber bekannten Konzentrationen der verwendeten Farb-Tracern angemischt, welche anschliessend mit den Geräten gemessen wurden. Da die Farbstoffe in sehr hohen Konzentrationen vorliegen, müssen sie

### 3. Methoden und Datenquellen

für die Kalibrierung zuerst sehr stark verdünnt werden, damit die Konzentrationen ungefähr denen entsprechen, welche später im Feld gemessen werden. Als Ausgangslösung wurde jeweils eine Verdünnung von  $10^{-6}$  angemischt. Im Fall von Uranin wurde 0.10 Gramm des Farbpulvers mit destilliertem  $H_2O$  bis auf 100 Gramm ergänzt. Von dieser Lösung wurde wiederum 1.01 Gramm abgewogen und mit destilliertem  $H_2O$  bis auf 1000 Gramm verdünnt. Für den Farbstoff Rhodamin WT war das Vorgehen etwas anders, da dieser Farbstoff nicht als Pulver, sondern bereits als Lösung geliefert wird. Von der gelieferten 20% Lösung wurde 0.18 Gramm abgewogen und mit destilliertem  $H_2O$  auf 200 Gramm ergänzt wovon erneut 1.02 Gramm genommen und mit exakt einem Liter Wasser gemischt wurde, woraus erneut eine Verdünnung von  $10^{-6}$  entstand. Anhand dieser Ausgangslösungen mit der Verdünnung  $10^{-6}$  wurden weitere Verdünnungslösungen erstellt, welche dann von den Geräten gemessen wurden (Siehe Tabelle 3.3).

$10^{-6}$ Lösung Uranin	Leitungswasser	Verdünnung
1ml	999ml	$1e^{-9}$
10ml	990ml	$1e^{-8}$
20ml	980ml	$2e^{-8}$
40ml	960ml	$4e^{-8}$
70ml	930ml	$7.5e^{-8}$
100ml	900ml	$1.1e^{-7}$
200ml	800ml	$2.5e^{-7}$

**Tabelle 3.3.:** Die Kalibrierungslösungen für Uranin der Fluorometer GGUN FL30. Für Rhodamin WT war das Vorgehen dasselbe aber es wurden 10ml, 30ml, 70ml, 100ml und 200ml als Verdünnungsschritte genommen.

## 3.2. Niederschlag

Der Niederschlag ist ein zentraler Bestandteil der Wasserbilanz eines Gebiets und musste deswegen möglichst genau bekannt sein. Für die Beantwortung der Forschungsfragen wurden in dieser Arbeit verschiedene Niederschlagsdaten verwendet, welche zum Teil von eigens installierten Niederschlagsmessern, aber auch von externen Stationen bezogen wurden. Beobachtungen von Martin Lüthi und weiteren Mitgliedern der Höhlengruppe Ybrig sowie von Bäuerinnen

### 3. Methoden und Datenquellen



**Abbildung 3.2.:** Links: GGUN FL30 Fluorometer von Albillia. 3 dieser Geräte wurden im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt. Zu sehen ist das Messgerät ganz rechts, daneben auf der Box der Computer/Logger sowie die wasserdichte Box. Links ist die angeschlossene 12V Batterie zu sehen. Rechts: Truner C3, an einer Stange montiert für den Einsatz im Kreuzloch. Bilder: Martin Lüthi, eigene Aufnahme

und Bauern auf der Chäseren lassen vermuten, dass die Niederschlagsmenge im Untersuchungsgebiet sehr heterogen verteilt ist. Speziell um den Schülberg und beim Chalberalpi soll sich der Niederschlag erheblich vom Rest des Untersuchungsgebietes unterscheiden. Um die räumliche Verteilung des Niederschlags möglichst genau zu erfassen, wurden im Rahmen dieser Masterarbeit 4 Kippschafel-Regenmesser (tipping-bucket rain gauges) installiert, welche von Juli und August 2020 bis Ende Jahr kontinuierlich den Niederschlag gemessen haben. Ein weiterer Niederschlagsmesser mit gleicher Funktionsweise ist seit der Masterarbeit von Domenika Bucher Bucher (2015) im Jahr 2015 im Gebiet installiert und misst seit dann regelmässig Niederschlag und Temperatur.

#### 3.2.1. Eingesetzte Niederschlagsmessgeräte

##### Chöplishütte

Im Rahmen der Masterarbeit von Domenika Bucher wurde nahe der Chöplishütte auf etwa 1600 m.ü.M. eine Messtation montiert, welche Temperatur und Niederschlag halbstündlich aufzeichnet und per Funk übermittlelt. Der Niederschlag wird anhand einer Kippschafel gemessen. Das Gerät registriert jeden Kippvorgang und daraus kann die gefallene Menge Niederschlag in  $mm/m^2$  ermittelt werden. Bei Schneefall liefert diese Station keine Niederschlagsdaten, da der Messtrichter nicht beheizt ist und durch den Schnee verstopft wird (vgl. Bucher (2015)).

##### Schülberghütte und Heuloch

Die Geräte auf der Ost-West-Achse beim Schülberg, beides neuere Versionen der Messtation

### 3. Methoden und Datenquellen

bei der Chöplishütte mit den gleichen Funktionen, wurden am 7. Juli 2020 montiert. Für die Montage der Geräte wurden Halterungen in Steine gebohrt, an welchen die Geräte auf robusten Stahlrohren befestigt werden konnten. Nahe der Schülberghütte wurde ein Gerät seitlich an einem Felsblock auf einer Weide jedoch ausserhalb der Reichweite von Kühen befestigt, beim Heuloch wurde die Station seitlich an einen überhängenden Felsvorsprung fixiert.

#### **Sädel und Chalberalpli**

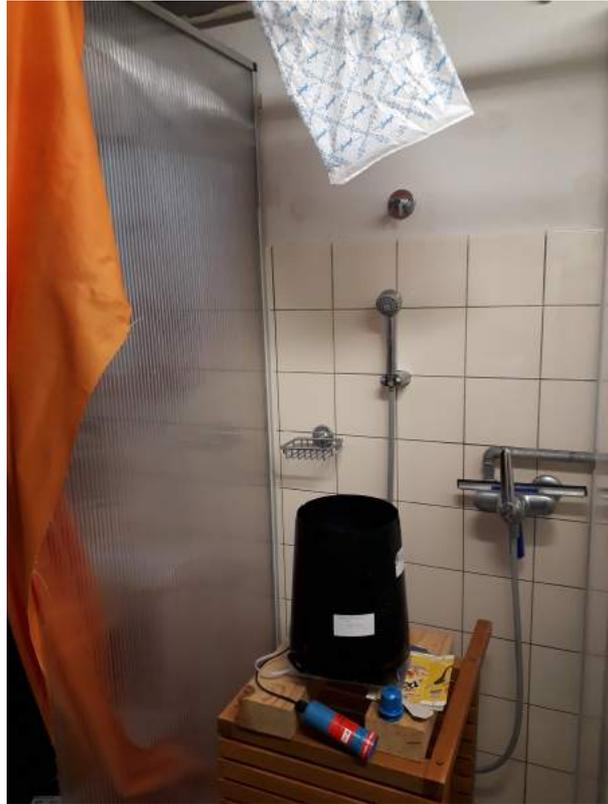
Die beiden Geräte beim Sädel und beim Chalberalpli messen den Niederschlag auf die gleiche Art wie die anderen Geräte, können aber die Daten nicht drahtlos übertrage und haben kein Sensor zur Temperaturmessung. Die Daten wurden deswegen erst nach Ende der Messperiode ausgelesen. Zudem besaßen die Geräte keine so stabile Montagevorrichtung wie die Geräte beim Schülberg. Sie wurden mittels Winkel und Metallplatten an Holzpfosten festgeschraubt. Dabei musste darauf geachtet werden, dass die Geräte sauber waagrecht ausgerichtet sind, was mittels verstellbaren Schrauben an der Unterseite der Metallplatten sichergestellt wurde. Am 21. August wurde beim Sädel auf einem Holzpfahl in einer abschüssigen Wiese, welche nicht als Weidefläche genutzt wird, eine weitere Station montiert und am selben Tag wurde auf dem Chalberstöckli, einem kleinen Hügel welcher zur talseitigen Begrenzung des Chalberalplis gehört, ebenfalls auf einem Holzpfahl ausserhalb der umzäunten Weidefläche die letzte Station befestigt.

#### **Kalibrierung der Niederschlagsmesser**

Zur Kalibrierung der Niederschlagsmesser genügt es grundsätzlich, über einen bestimmten Zeitraum eine bekannte Menge Wasser in den Sammeltrichter geben. Das Gerät misst automatisch die Anzahl Kippvorgänge der Waage. Zudem muss die Öffnungsfläche des Trichters bekannt sein, welche im vorliegenden Fall  $0.02217\text{m}^2$  beträgt. Mit diesen Angaben lässt sich berechnen, wie viele Millimeter Niederschlag einer Kippbewegung entspricht, indem das zugegebene Volumen des Wassers (in l) durch die horizontale Öffnungsfläche des Trichters (in  $\text{m}^2$ ) geteilt wird. Die nun erhaltenen Einheit  $l/\text{m}^2$  entspricht des Niederschlags in Millimeter.

Kalibriert wurden die beiden Geräte der UZH mit jeweils 3 Durchläufen an 50, 100, 200 und 400 Milliliter. Mithilfe der durchschnittlichen Anzahl an Kippvorgängen wurde berechnet, wie viele Millimeter Niederschlag uns somit Liter pro Quadratmeter einer Kippbewegung entsprechen. Die Resultate wurden mit den Angaben des Herstellers (Persönliche Kommunikation,  $0.2\text{mm/Kipp}$ ) verglichen (Siehe Tabelle 3.4). Bei den kleineren Testmengen (50 und 100 Milliliter) an Wasser stimmen die Herstellerangaben mit den Messungen überein. Mit 11, beziehungsweise 22 Kippvorgänge sollten 2.26, beziehungsweise 4.51 Millimeter Niederschlag gemessen werden, was im Schnitt  $0.20$  Millimeter pro Kippbewegung entspricht. Durch eine Verdoppe-

### 3. Methoden und Datenquellen



**Abbildung 3.3.:** Der Aufbau der Niederschlagsmesser für die Kalibrierung. Ein Plastiksack mit kleinen Löchern wurde über das Messgerät gehängt, sodass das Wasser langsam in den Sammeltrichter tropfen kann. Bild: eigene Aufnahme.

lung der Wassermenge sollte sich auch die Anzahl an benötigten Kippvorgängen verdoppeln, jedoch ist die gemessene Anzahl Kippungen bei den grösseren Mengen (200 und 400 Milliliter) tiefer, wodurch sich ein höherer Wert in Millimeter pro Kippvorgang ergibt. Zusätzlich sind die Kippzahlen der selben Wassermengen für die beiden Messgeräte und für die verschiedenen Durchgänge teilweise recht unterschiedlich. Eine Übersicht ist in Tabelle 3.4 zu sehen. Weil die Messungen mit den geringeren Wassermengen aber sehr gut mit den Angaben des Herstellers übereinstimmen, wird im weiteren Verlauf der Arbeit die vom Hersteller angegebene Menge von 0.2 Millimeter Regen pro Kippbewegung verwendet.

#### 3.2.2. Weitere Datenquellen

##### **Wannenalp, SLF, extern**

Auf der Wannenalp, welche direkt nördlich an das Untersuchungsgebiet grenzt, betreibt das Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF eine automatische Messstation, welche seit 2006

### 3. Methoden und Datenquellen

Messgerät 1	mm	# Kippen 1,2,3, Durchschnitt	# mm/Kipp	# Kippen mit 0.2mm/Kipp
50ml	2.26	11, 12, 11, 11.3	0.20	11.3
100ml	4.51	22, 23, 20, 21.7	0.21	22.5
200ml	9.02	37, 39, 36, 37.3	0.24	45.1
400ml	18.04	70, 72, 75, 72.3	0.25	90.2
Messgerät 2	mm	# Kippen 1,2,3, Durchschnitt	# mm/kipp	# Kippen mit 0.2mm/Kipp
50ml	2.26	11, 11, 12, 11.3	0.20	11.3
100ml	4.51	23, 23, 23, 23	0.20	22.5
200ml	9.02	45, 43, 41, 43	0.21	45.1
400ml	18.04	79, 81, 78, 79.3	0.23	90.2

**Tabelle 3.4.:** Die Kalibrierung der Niederschlagsmesser der UZH. Pro Messgerät wurde 3 Mal 4 verschiedene, bestimmte Wassermengen in den Sammeltrichter gegeben und die Anzahl Kippvorgängen notiert. Die Spalte mm zeigt den des Wasservolumens entsprechenden Niederschlag in Millimeter an. Anhand der Kippvorgänge und des Niederschlag in mm wurde berechnet, wie viel ml einem Kippvorgang entsprechen (#ml/Kipp). In der letzten Spalte wurde die Anzahl Kippvorgänge berechnet, wenn ein Kipp 0.2mm entspricht.

Temperatur, Niederschlag, Schneehöhe und weitere Parameter misst. Die Station liegt auf 1701 m.ü.M. in flachem Gelände und die Daten liegen in halbstündlichen Mittelwerten vor.

#### **Einsiedeln, SwissMeteo, extern**

Von der Messstation in Einsiedeln von SwissMeteo konnten ebenfalls Niederschlags- und Temperaturdaten bezogen werden. Die Station liegt auf einer Wiese im Siedlungsgebiet auf 910 m.ü.M. und die zeitliche Auflösung beträgt 10 Minuten.

#### **CombiPrecip-Radarprodukt, SwissMetNet, extern**

Weiter wurde auch Niederschlagsdaten von CombiPrecip verwendet. Hierbei wird der Niederschlag als stündlich gemittelter Wert aus Niederschlagsmessungen von SwissMetNet Stationen und Niederschlagsschätzungen von Radarmessungen berechnet (MeteoSwiss, oD). Die räumliche Auflösung beträgt 1 km<sup>2</sup> und es wurden nur diejenigen Quadrate verwendet, welche mehrheitlich über dem Einzugsgebiet liegen.

## 3.3. Abfluss

Wie schon der Niederschlag ist auch der Abfluss eines Gebiets sehr entscheidend für die Wasserbilanz. Im Kreuzloch wird seit bald 10 Jahren der Abfluss anhand von Druckmessungen, welche Martin Lüthi installiert hatte, aufgezeichnet. Weil der Standort im Laufe der Jahre verschoben wurde und es zeitweise längere Unterbrüche in der Messreihe gab, werden in dieser Arbeit die Abflussdaten erst ab 2017 verwendet. Anhand automatischer Drucklogger wird im Kreuzloch, im Riedloch, im Laueli und im chlaberalpli alle 4 Sekunden der Wasserdruck aufgezeichnet. Weiter wurden 6 punktuelle Abflussmessungen an unterschiedlichen Standorten im Untersuchungsgebiet durchgeführt. Wenige Abflussmessungen reichen oftmals schon aus, um den Abfluss eines Einzugsgebits relativ genau anzugeben (Seibert and Beven, 2009). Diese Messungen wurden mit der Salz-Verdünnungs-Methode (salt dilution method) durchgeführt. Die Versuche mit Farb-Tracern können anhand des gleichen Prinzips wie bei der Verdünnungsmethode auch dazu verwendet werden, den Werten der Druckmessungen entsprechende Abflussmengen zuzuweisen. Dabei ist es wichtig, dass die Abflussmessungen zu möglichst unterschiedlichen Pegelständen und somit Abflussmengen durchgeführt werden. Zudem muss vom gemessenen Wasserdruck immer noch der aktuelle Luftdruck abgezogen werden.

Die verwendeten Abflussdaten der Minster stammen von einer Messstation kurz vor der Mündung der Minster in den Sihlsee, welche vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) betrieben wird.

### 3.3.1. Abflussmessungen mit Verdünnungsmethode

Der Abfluss eines Gewässers kann auf verschiedene Arten bestimmt werden. In Bergbächen, welche oftmals turbulent und in unwegsamem Gebiet sind, wird von verschiedenen Autoren die Verdünnungsmethode mit Salz empfohlen (beispielsweise Moore (2005) oder Merz and Doppmann (2006)). Dabei wird eine bekannte Menge in Wasser gelöstes Salz in einen Bach gekippt und weiter Bachabwärts, sobald sich das Salzwasser mit dem Bachwasser vollständig vermischt hat, wird die Konzentration des Salzes als elektrische Leitfähigkeit gemessen. Die Vorteile dieser Methode sind, dass nur wenig und leichtes Material zur Anwendung benötigt wird und sie nicht sehr komplex ist. Die Methode basiert auf dem Prinzip, dass eine bekannte Menge eines Stoffes von mehr Wasser stärker verdünnt wird als von weniger Wasser. Bezogen auf den Abfluss bedeutete dies, dass ein höherer Abfluss zu einer stärkeren Verdünnung des Stoffes führt (Merz and Doppmann, 2006). Salz eignet sich sehr gut als Markierstoff, da es günstig ist, die Messung der elektrischen Leitfähigkeit mit einfachen Geräten genau gemessen werden kann und weil es in den verwendeten Konzentrationen nicht toxisch für die Organismen im Wasser ist (Moore, 2003).

### 3. Methoden und Datenquellen

Es gilt zu beachten, dass der Abfluss, sowie die Hintergrund-Leitfähigkeit des Gewässers während der Messung konstant ist, sowie dass alles Salz am Ort der Messung vorbeifliesst. Damit von den gemessenen Leitfähigkeiten auf ein Volumen geschlossen werden kann, muss im Vorfeld eine Kalibrierungskurve erstellt werden. Von der Salzlösung wird eine kleine Menge, etwa 10 Milliliter, entnommen und mit einem bekannten Volumen an Bachwasser (beispielsweise 1 Liter) gut vermischt. Von dieser Sekundärlösung wird mehrmals schrittweise 10 ml einem bekannten Volumen an Bachwasser hinzugegeben. Dabei wird immer die elektrische Leitfähigkeit gemessen, inklusive der Grundleitfähigkeit des Baches. Somit kann von der im Bach gemessenen elektrischen Leitfähigkeit auf die Konzentration und das Mischverhältnis des Salzes im Bach gefolgert werden, woraus sich das Volumen und schlussendlich, anhand der verstrichenen Zeit, der Abfluss berechnen lässt. Die Herleitung der Formel und das genaue Vorgehen zur Kalibrierung stammt von Moore (2005) und kann dort nachgelesen werden. Anhand der Kalibrierung lässt sich der Faktor  $k$  bestimmen, welcher dann in die Formel zur Abflussberechnung eingefügt wird.

$$Q = \frac{V}{k \Delta t \sum_n [EC(t) - EC_{bg}]}$$

#### 3.3.2. Eingesetzte Geräte zur Abflussmessung

Für die kontinuierlichen Druckmessungen wurden Logger des Typs RBRduet T.D der Firma RBR verwendet. Diese Logger messen Temperatur und Druck mit sehr hoher Genauigkeit ( $\pm 0.002^\circ\text{C}$  für Temperatur und für Druck  $\pm 0.05\%$  des gesamten Messbereich) (RBR-Global, 2019). Die Logger wurden in Metallröhrchen befestigt, um sie gegen Beschädigungen und andere externe Einflüsse zu schützen. Die Daten müssen per USB-Kabel von den Geräten heruntergeladen werden, es gibt keine kabellose Übertragungsmöglichkeit. Da sich nicht nur der Druck im Wasser aufgrund von unterschiedlichen Abflussmengen ändert, sondern auch der ständig ändernde atmosphärische Druck Einfluss auf die Druckmessungen hat, wurde zusätzlich ein Drucklogger an der Luft platziert. Somit konnte von den Messungen im Wasser der korrespondierende Atmosphärendruck abgezogen werden, wodurch nur die Druckschwankungen im Wasser aufgrund von Abflussänderungen übrig bleiben.

Zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers während der Salzverdünnungsmethode wurde ein 912 Conductometer von Metrohm verwendet. Die Leitfähigkeit kann im Bereich von  $0.1 \mu\text{S}$  -  $500 \text{ mS}$  gemessen werden, wobei die Genauigkeit von  $0.1 \mu\text{S}$  -  $1 \text{ mS}$  bei  $\pm 0.5\%$  und von  $1 \text{ mS}$  -  $500 \text{ mS}$  bei  $1\%$  liegt (Metrohm Schweiz AG, oD).

## 3.4. Feldaktivitäten

Im Folgenden werden alle relevanten Aktivitäten vor Ort im Untersuchungsgebiet aufgeführt. Dazu zählen die Installation/Montage der Niederschlags-Messgeräte sowie der Fluorometer jeweils vor einem Färbversuch und alle Tracer-Versuche. Weggelassen wurden die Suche nach Bachschwinden, welche für Färbversuche genutzt werden können und das Einsammeln der Geräte nach den Messungen.

### 3.4.1. Salztracer

Für die Salztracer-Versuche wird eine genauestens abgewogenen Menge an Salz in einer ebenfalls bekannten Menge des zu beprobenden Wassers gelöst, was die sogenannte Primärlösung ergibt. Meistens wurde in dieser Arbeit 50 Gramm Salz auf 5 Liter Wasser verwendet; bei niedrigen Abflüssen wurde weniger, beispielsweise nur 20 Gramm Salz genommen. Für die Sekundärlösung wird 10 Milliliter von der Primärlösung mit einem Liter des Bachwassers vermischt. Von der Sekundärlösung werden dann schrittweise 10 Milliliter einem bekannten Volumen Bachwasser hinzugegeben (in dieser Arbeit 100 oder 200 Milliliter), bis ungefähr die Salzkonzentration im Wasser erreicht wird, welche auch beim Versuch selbst zu erwarten ist. Die Kalibrierung wurde nach dem Versuch selbst durchgeführt, somit war die höchste gemessene Konzentration jeweils bekannt.

#### **NaCl-Tracerversuch im Laueli am 05. Juni 2020**

In der Laueli Quelle hat Martin Lüthi an zwei verschiedenen Orten Drucklogger im Bach montiert, welche kontinuierlich den Wasserdruck messen. Wie in Abschnitt 3.3 erklärt, werden einzelne Abflussmessungen benötigt, um aus diesen Messungen eine kontinuierliche Abflusskurve zu erstellen. Der obere Drucklogger ist direkt nach dem Quellaufstoss montiert, damit möglichst keine äusseren Einflüsse die Messung verfälschen können. Wenige Meter bachabwärts ist ein weiterer Quellaufstoss, welcher nochmals mehr Wasser als die erste Quelle liefert. Deswegen wurde hier ein weiterer Drucklogger installiert. Bei diesem unteren Drucklogger wurde am 5.6.2020 eine Abflussmessung mittels Salztracer durchgeführt. Zur Messung wurden 50 Gramm NaCl in 5 Liter Bachwasser aufgelöst, die Kalibrierung wurde mit 200 Milliliter Bachwasser durchgeführt und es wurde 7 Mal 10 Milliliter der Sekundärlösung hinzugegeben. Die Werte der Leitfähigkeit sind in Tabelle 3.5 aufgelistet. Für die weiteren Abflussmessungen mit der Salzverdünnungsmethode sind die Wertetabellen im Anhang.

Das Wetter war an dem Tag bewölkt bei ungefähr 10°C an der Messstelle und es hatte am frühen

### 3. Methoden und Datenquellen

Volumen Bachwasser [ml]	Zugabe Sekundärlösung [ml]	elektrische Leitfähigkeit [mS/cm]
200	0	21.8
200	10	22.7
200	20	23.5
200	30	24.3
200	40	25.0
200	50	25.6
200	60	26.2
200	70	26.8

**Tabelle 3.5.:** Mischungsverhältnis und elektrische Leitfähigkeit der Kalibrierungslösung im Laeli am 5.6.2020

Morgen leicht geregnet, danach blieb es trocken. Der Abfluss wurde auf 50 Liter pro Sekunde geschätzt.

#### **NaCl-Tracerversuch bei der Riedhöhle am 07. Juli 2020**

Die Abflussmessung im Ried wurde als einzelne unabhängige Messung gemacht, hier gibt es keine kontinuierlichen Abfluss-Datenreihe. Die Messung wurde im Bach, kurz bevor das Wasser in der Riedhöhle verschwindet durchgeführt. Es wurden 20 Gramm NaCl wurden in 5 Liter Wasser gelöst; die Kalibrierung ist in Tabelle A.1 aufgeführt. An dem Tag war es sehr sonnig mit wenig Wolken bei 12°C im Ried.

#### **NaCl-Tracerversuch im Laeli am 9. Oktober 2020**

Am selben Ort wie schon am 5. Juni wurde erneut eine Abflussmessung durchgeführt. Anhand dieser Messung konnten Abflussdaten zu einem anderen Wasserstand als bei der Messung im Juni erhoben und mit den Druckdaten verknüpft werden, was die langzeitliche Abflussmessung präziser macht. 50 Gramm Salz wurden in 5 Liter Bachwasser aufgelöst. Tabelle A.2 zeigt die Kalibrierungswerte. Das Wetter war sonnig, trocken und 14°C warm.

#### **Salztracer in Laueli und Töbleren am 15. April 2021**

An den beiden Drucklogger-Standorten im Laueli wurden wiederholt Abflussmessungen durchgeführt, an dem selbem Grund wie oben aufgeführt. Bei der oberen Quelle wurde ein Abfluss von 10 Liter pro Sekunde geschätzt, weiter unten dann 30 Liter pro Sekunde. Für die beiden Messungen wurde nur eine Kalibrierung (siehe Tabelle A.3) durchgeführt, da die Standorte sehr nahe beieinander liegen und angenommen werden kann, dass sich die elektrische Leitfähigkeit des Bachwassers in dieser Distanz nicht wesentlich verändert. Für die Messung wurde 50 Gramm NaCl in 5 Liter Wasser gelöst. An dem Tag war es trocken aber nur knapp über 0°C und es lag vereinzelt noch Schnee im Tal.

Bei den Töblerenquellen ist seit kurzem ebenfalls ein Drucklogger installiert. Da diese Quelle nur wenig Wasser liefert und der Bach eine sehr geringe Tiefe hat, musste eine Stelle gefunden werden, an welcher der Drucklogger ständig unter Wasser ist. Nahe der Quelle wurde kein geeigneter Ort gefunden und deshalb ist dieser Messstandort etwas weiter von der Quelle entfernt. Die Abflussmessung wurde direkt beim Drucklogger durchgeführt. Es wurden 50 Gramm NaCl in 5 Liter Wasser gelöst. Die Kalibrierung ist in Tabelle A.4 aufgelistet. Der Abfluss wurde auf 1 Liter pro Sekunde geschätzt und es lag noch etwa 5 Zentimeter Schnee.

#### **3.4.2. Farbtracer**

##### **Farbtracer-Versuch nahe Chöplishütte am 25. September 2020**

Trotz der starken Vermutung, dass die Bachschwinden bei der Chöplishütte mit dem Kreuzloch verbunden sind wurden auch an anderen Quellen Fluorometer installiert. So konnte zudem überprüft werden, ob es Verbindungen zu weiteren Quellen gibt. Beim Kreuzloch wurde das Turner C3 am 24.09. montiert, damit am Tag der Messung genügend Zeit zur Verfügung stand. Am 25.09. wurden dann bei den anderen Quellen 3 GGUN FL30 Geräte in Betrieb genommen. Die exakten Messstandorte und Geräte sind in Sektion 2.7.1 genauer beschrieben und erklärt. Am Tag der Messung war es nur noch knapp 5°C warm und in der Nacht hatte es etwa 8 Millimeter geregnet. Ab 1400 m.ü.M. schneite es und es lag ungefähr 10-20 Zentimeter Schnee. Dieser Umstand erschwerte die Messung, da die Bachschwinden unter dem Schnee nur schwer zu finden waren und wenig Wasser floss. Die favorisierten Bachschwinden 3 und 4 bei der Chöplishütte waren zu fest unter dem Schnee und es schien kein Wasser zu laufen. In der Umgebung von Schwinde 1 und 2 gab es ein Loch im Schnee, in welchem man Wasser verschwinden sah. Obwohl auch hier geschätzt nur etwa 0.5 Liter Wasser pro Sekunde lief, wurde mangels Alternative diese Schwinde zur Beprobung ausgewählt. 101g Uranin wurde gelöst und um 14:45

### 3. Methoden und Datenquellen

UTZ in das Loch gekippt. Wenige Meter unterhalb der Einspeisestelle färbte sich der Schnee auf einer 10 Meter langen Strecke grün, bevor alles Wasser in der diffusen Schwinde verschwunden war. Die Fluorometer machten alle 30 Sekunden eine Messung und am 29. September wurden die Geräte entfernt. Die Resultate sind in Sektion 4.1.1 aufgeführt.

#### **Farbtracer-Versuch nahe Guggerenhütte am 6. Oktober 2020**

Der zweite Farbtracer-Versuch wurde im südlichen Teil des Untersuchungsgebiets durchgeführt. Oberhalb der Guggerenhütte ist bei einer früheren Feldbegehung ein interessantes Bachbett mit diffuser Schwinde entdeckt worden, welches nun mit Uranin gefärbt werden sollte. Obwohl durch das flache Gefälle und die hohe Distanz zum Kreuzloch eine unterirdische Verbindung unwahrscheinlich ist, war trotzdem unklar, ob das Wasser direkt ins Tal zum Laueli oder einem Bruch entlang weiter nordwärts fliesst und bei einer Quelle unterhalb der Felswand wieder zum Vorschein kommt. Deshalb wurde für die Messung alle Fluorometer, also im Kreuzloch, Laueli, Weglosenbach und Chäsloch, in Betrieb genommen.

Das Wetter an dem Tag war warm und hauptsächlich trocken. Es war 12°C warm und es fiel im Verlauf des Tages 2 Millimeter Regen, in der Nacht gab es nochmals 10 Millimeter dazu. Es floss etwa 1 Liter Wasser pro Sekunde im Bachbett, welches zur diffusen Schwinde führt. So konnte eine optimale Stelle zur Einspeisung der Farbe, nur wenig oberhalb der Schwinde gefunden werden. Um 14:25 UTZ wurde 101.76 Gramm im Wasser gelöstes Uranin in den Bach gekippt. Nach 10 Meter Fliessweg war alles Wasser im Untergrund verschwunden.

Beim Abstieg wurde zufällig noch ein interessantes Schluckloch in der Kurve oberhalb des Kreuzes an der Strasse zur Guggeren- und Forstberghütte gefunden. Ungefähr 0.5 Liter pro Sekunde liefen in dieses Loch und verschwanden sofort im Boden. Um 14:52 UTZ wurde 100 Milliliter Rhodamin WT direkt in die Schwinde gekippt. Die zeitliche Auflösung der Messungen war 30 Sekunden und am 9. Oktober wurden alle Fluorometer ausgelesen.

#### **Farbtracer-Versuch beim Heuloch und im Chalberalpli am 3. November 2020**

Da die Inbetriebnahme der Fluorometer zeitaufwändig ist und durch den letzten Versuch gute Erfahrungen mit verschiedenen Tracern gleichzeitig gemacht wurden, wurde an diesem Tag geplant, wieder zwei Bachschwinden gleichzeitig zu beproben. Zum Einen wurde im Chalberalpli die südliche Schwinde mit Rhodamin geimpft und zum Andern wurde im Heuloch oberhalb der Schülberghütte Uranin in die Schwinde gegeben. Das Heuloch liegt südlich des Rieds und somit im bereits bekannten Einzugsgebiet des Kreuzlochs. Diese Messung sollte die Verbindung nochmals bestätigen aber auch Auskunft über die Fliessdauer der Verbindung geben. Auch vom Chalberalpli wurde bereits eine Verbindung ins Kreuzloch sowie ins Chäsloch nachgewiesen

### 3. Methoden und Datenquellen

(Bucher, 2015), jedoch wurde nur die nördliche Bachschwinde untersucht. Zwar liegen beiden Schwinden am Fuss der gleichen, kurzen Felswand, sind aber mindesten 50 Meter voneinander entfernt, könnten also theoretisch in unterschiedliche, unterirdische Wassersysteme entwässern. Das Bächlein, welches in die nördliche Schwinde fliesst, kommt von Nordosten und entwässert das Gebiet des Chalberalpli nahe des Twäribergs im Norden. In die südliche Schwinde fliesst ein Bächlein von Südwesten her, welches sein Einzugsgebiet zwischen Chalberstöckli und Drusberg hat.

Es war an dem Tag neblig aber es fiel kein Niederschlag und die Temperaturen lagen zwischen 14 und 18°C. Beim Heuloch lief 10 Liter Wasser pro Minute in die Schwinde, beim Chalberalpli 5 Litern pro Sekunde. Aus personellen Gründen wurde beim Heuloch nicht wie bisher das Uranin-Pulver vor Ort im Wasser gelöst, sondern es wurde bereits vorher angemischt. Um 11:12 UTZ wurde 100 Milliliter Rhodamin im Chlaberalpli in die südliche Schwinde gegeben und um 11:25 UTZ wurde 82.28 Gramm gelöstes Uranin ins Heuloch gekippt. Das Zeitintervall der FLuorometermessungen war 30 Sekunden und die Daten wurden am 6. November ausgelesen.

### 3.5. Datenauswertung und Berechnungen

Die Wasserbilanz eines Gebiets wird definiert als das Gleichgewicht zwischen allem Wasser was hineinkommt und allem Wasser was wieder hinausgeht. Als Input zählt nur der Niederschlag (P). Abfluss und Evaporation sind die Faktoren, welche aus dem System hinausfliessen. Der Unterschied zwischen Niederschlag auf der einen und Abfluss und Evaporation auf der andren Seite ist Speicheränderung im Grundwasserspeicher des Einzugsgebiets. Aus der Formel für die Wasserbilanz (1) lässt sich somit einfach die Formel zur Berechnung des Speichers (2) herleiten.

$$P = Q + Et + \Delta S \quad (1)$$

$$\Delta S = P - Et - Q \quad (2)$$

Wobei P der Niederschlag, Q Abfluss, Et Evaporation und  $\Delta S$  die Speicheränderung ist. Für Niederschlag und Abfluss liegen erhobene Datenreihen vor, die Evaporation wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht gemessen sondern wurde anhand verschiedener Quellen abgeschätzt.

#### 3.5.1. Evaporation

Für das Einzugsgebiet der Minster bei Euthal gibt es bereits detaillierte Angaben zur Wasserbilanz (Siehe Abbildung 3.4 und Barben et al. (2010)). Dieses Einzugsgebiet kann in zwei kleinere Teileinzugsgebiete unterteilt werden, zum einen das grössere, westliche Einzugsgebiet der Minster im Raum Oberiberg und zum andern das kleinere, östliche Einzugsgebiet der Waag im Raum Weglosen, Chäseren und Waag, bevor die beiden Flüsse bei Unteriberg zusammenfliessen. Das Untersuchungsgebiet macht einen grossen Teil des Einzugsgebiets der Waag aus, weshalb die angegebene Wasserbilanz des Minster-Einzugsgebiet von Barben et al. (2010) eine gute Annäherung der Wasserbilanz des Untersuchungsgebiets darstellt.

Während (Menzel et al., 1999) eine durchschnittliche Evaporation von ca 320 mm pro Jahr angibt, gibt (Barben et al., 2010) um die 400mm als jährliche Evaporationswerte an, was ungefähr 20% vom gesamten jährlichen Niederschlag entspricht. Dabei muss gesagt werden, dass letztere das Einzugsgebiet der Minster bei Euthal, vor dem Zufluss in den Shilsee betrachten. Das Untersuchungsgebiet der Masterarbeit liegt innerhalb des Einzugsgebiet der Minster, macht aber weniger als die Hälfte dessen aus. Auch (Menzel et al., 1999) bezieht sich auf ein grösseres Gebiet als in der Arbeit untersucht wurde, nämlich wurden Evaporationswerte für die gesamte Schweiz angegeben. Aufgrund der relativ guten räumlichen Auflösung (siehe Karte) wurde diese Quelle trotzdem berücksichtigt. Mit rund 15% des gesamten Niederschlags sind die Evaporationswerte laut (Menzel et al., 1999) 5% tiefer als (Barben et al., 2010) angibt.

Auf Abbildung 3.4 ist zu sehen, dass in Euthal (Gebiet 12, obere Grafik) etwas mehr als 2100mm pro Jahr gemessen wird. Davon verlässt 1700mm das Einzugsgebiet wieder als Abfluss; die restlichen 400mm verdunsten. Diese jährlich 400mm Evaporation entsprechen ungefähr 20% des jährlichen Niederschlags. Im unteren Teil der Grafik sind die Werte für Niederschlag, Abfluss und Evaporation monatlich aufgeschlüsselt. In Tabelle 3.6 sind die aus der Grafik herausgelesenen Werte aufgeführt. Es ergibt sich ein Durchschnittlicher Wert von 18% des jährlichen Niederschlags, welcher wieder evaporiert. Frei et al. (2018) nennt für die Niederschlagsmenge der Minster bei Unteriberg jährlich 2219mm und 429mm Evaporation, was ebenfalls etwa 20% des Niederschlags entspricht. Auf Abbildung 3.5, nach Menzel et al. (1999), ist die jährliche Verdunstung im Gebiet ungefähr 330 mm. Dieser Wert ist deutlich niedriger als derjenige der anderen beiden Quellen.

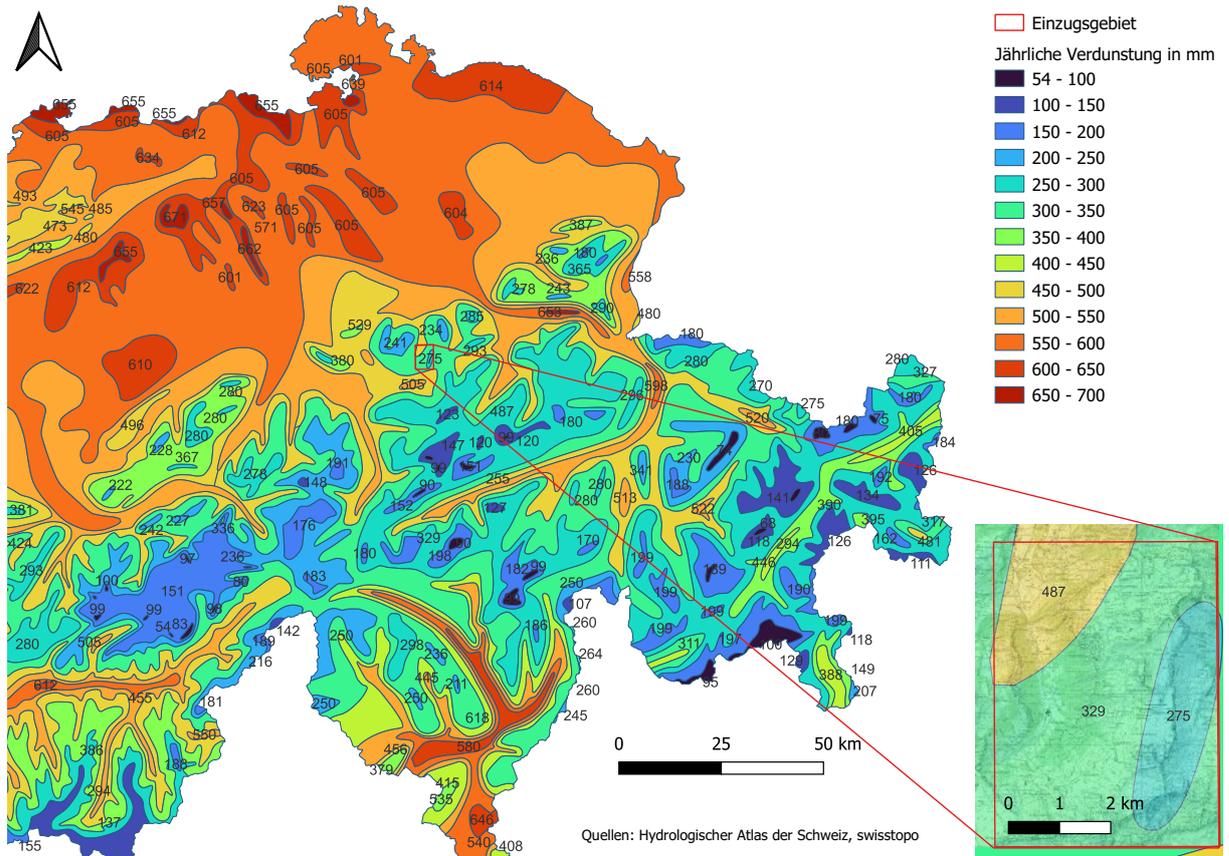
### 3. Methoden und Datenquellen

Monat	Niederschlag [mm]	Evaporation [mm]	Prozentsatz
Januar	130	2	1
Februar	160	5	3
März	170	10	5
April	160	25	15
Mai	170	60	35
Juni	210	75	35
Juli	220	80	36
August	190	70	36
September	160	40	25
Oktober	130	25	19
November	160	10	6
Dezember	160	5	3
Durchschnitt	168	34	18

**Tabelle 3.6.:** Aus Grafik 3.4 heraus gelesene Niederschlags- und Evaporationswerte. Dazu berechneter Prozentsatz der Evaporation am Gesamtniederschlag.



### 3. Methoden und Datenquellen



**Abbildung 3.5.:** Jährliche Evaporationswerte in der Schweiz, zoom aufs Einzugsgebiet. Daten von 1973-1992. Quellen: (swisstopo, 2021), (Menzel et al., 1999)

# Resultate

## 4.1. Karsthydrologie

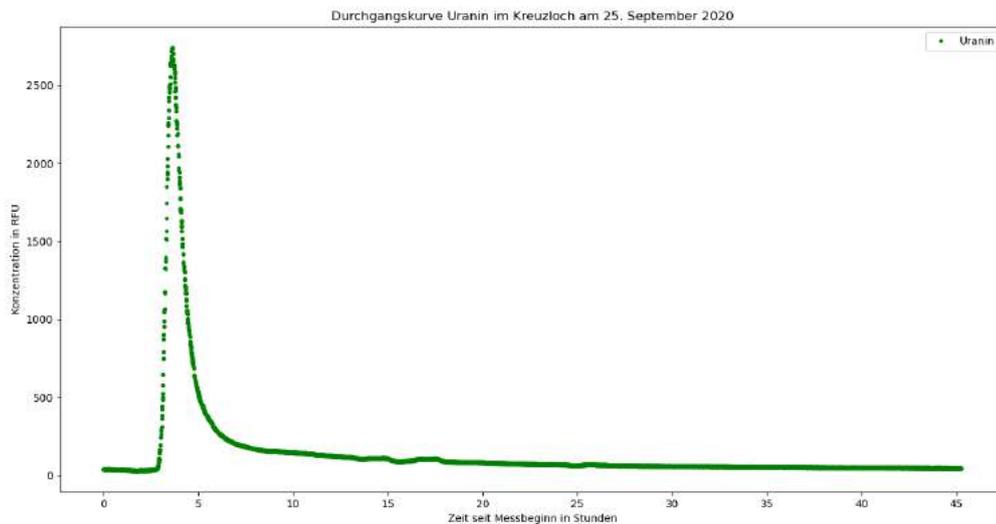
### 4.1.1. Farbtracer-Versuche

Im Folgenden werden die mit fluoreszierenden Farben durchgeführten Tracer-Versuche einzeln besprochen. Es wird jeweils nur die Durchgangskurve der Farbstoffe bei einer Quelle angeschaut, da bei jedem Versuch nur eine Quelle einen Ausschlag in der Konzentration verzeichnete, obwohl bei Versuchen 2 und 3 mehrere Schwinden mit verschiedenen Farben gleichzeitig markiert wurden. Auch in den anderen relevanten Quellen wurden Messgeräte in Betrieb genommen, welche aber keinen Anstieg der Konzentration der verwendeten Tracern festgestellt hatten. Welche Bachschwinden beprobt und wo genau die Fluorometer installiert wurden, ist in Sektionen 2.7.2 und 2.7.1 aufgeführt und das genaue Vorgehen der Versuche ist in Sektion 3.4.2 dokumentiert. Zur Berechnung der Fliessgeschwindigkeit wurde der direkteste Weg an der Oberfläche als minimale Distanz angenommen und durch die zwischen Einspeisung der Farbe und erstem Ausschlagen der Messgeräte vergangene Zeit dividiert.

#### **Versuch bei der Chöplishütte am 25. September 2020**

Nach etwa 3 bis 3.5 Stunden nach der Einspeisung des Uranins bei der Chöplishütte erreicht das gefärbte Wasser das Turner C3 Fluorometer im Kreuzloch. Kein anderes FLuorometer zeigte einen Anstieg der Konzentration. Die Durchgangskurve des Uranins (siehe Abbildung 4.1) zeigt einen raschen Anstieg der Konzentration in weniger als einer Stunde auf 2750 RFU und einen etwas langsameren Rückgang innerhalb von zwei Stunden. Danach sinkt die Konzentration nur sehr langsam weiter ab, mit einer kleinen Störung nach 15 Stunden seit Messbeginn, und am Ende der Messperiode von insgesamt fast 2 Tagen liegt die Konzentration noch 10 RFU über dem Anfangswert. Bei einer minimalen Fliessdistanz von etwa 900 Meter beträgt die Fliessgeschwindigkeit dieser Verbindung zwischen 4.3 und 5 Meter pro Minute.

## 4. Resultate



**Abbildung 4.1.:** Der Durchgang des Uranins (grün) von der diffusen Schwinde oberhalb der Chöplishütte. Gemessen mit dem Turner-Fluorometer welches im Kreuzloch nahe des Ausgangs montiert wurde.

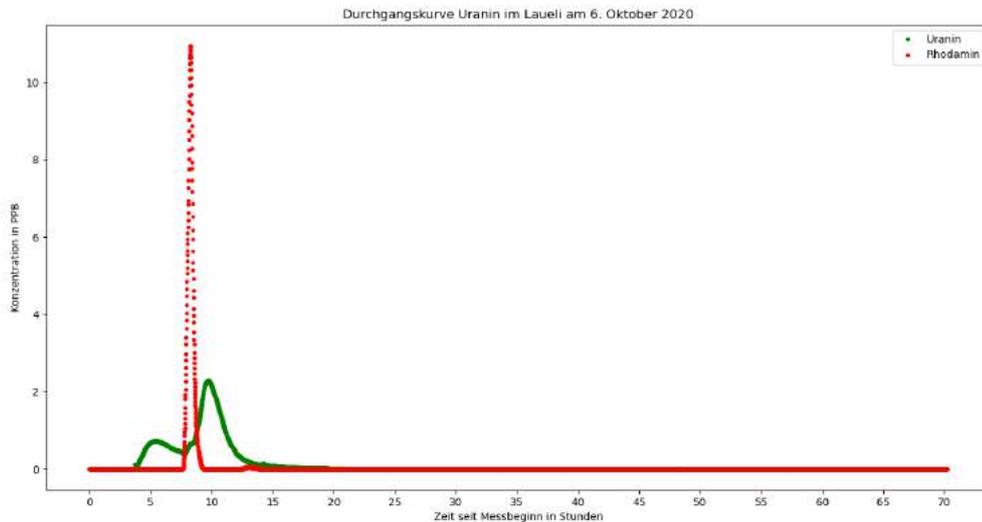
### Versuch bei der Guggerenhütte und beim "Kreuz" am 6. Oktober 2020

Nur das Fluorometer im Bach bei der Laueliquelle registrierte erhöhte Konzentrationen der verwendeten Farben, bei den anderen Geräten wurde kein Anstieg der Konzentrationen gemessen. Die Messung im Laueli wurde erst nach Einspeisung der beiden Tracer gestartet und zwar genau eine Stunde nach dem Uranin und 33 Minuten nach dem Rhodamin WT. Somit brauchte das Uranin knapp 5 Stunden bis es unten im Tal ankam und das Rhodamin WT hatte über 8 Stunden für eine, zumindest an der Oberfläche, kürzere Distanz (siehe Abbildung 4.2). Der Durchgang des Rhodamin WT verläuft innerhalb 1.5 Stunden und es zeigt sich ein rascher Anstieg mit einem kaum sichtbaren Knick nach einer Viertelstunde und ein ziemlich gleich schneller Rückgang der Konzentration, welche maximal knapp 11 PPB beträgt. Etwa 4 Stunden später ist erneut ein sehr schwacher Anstieg der Konzentration (0.05 PPB) von Rhodamin WT gemessen worden. Die minimale Distanz der Verbindung beträgt 1300 Meter, was zusammen mit der Durchflusszeit eine Fliessgeschwindigkeit von 4.3 Meter pro Minute ergibt.

Der Verlauf der Konzentration des Uranin sieht deutlich anders aus. Nach einem ersten, 1.5 Stunden dauernden Anstieg auf ungefähr 0.7 PPB fällt die Konzentration langsam über 2.5 Stunden hinweg bis auf 0.4 PPB ab, bleibt aber deutlich über dem Anfangswert. Danach steigt sie plötzlich wieder an und es bildet sich ein zweiter Peak, der mit fast 2.3 PPB die dreifachen Konzentrationswerte des vorherigen erreicht und steiler wieder abfällt. Beim zweiten Anstieg ist

#### 4. Resultate

ein Knick nach etwa einer halben Stunde zu sehen, etwa zur gleichen Zeit wie auch ein Knick in der Kurve des Rhodamin sichtbar ist. Der zweite Peak dauert etwa 5 Stunden und danach sinkt die Konzentration für nochmals 4 Stunden nur noch langsam. Der gesamte Durchgang des Uranins dauert knapp 13 Stunden. Diese Verbindung ist mindestens 850 Meter lang, woraus sich eine Fließgeschwindigkeit von 1.7 Meter pro Minute ergibt.



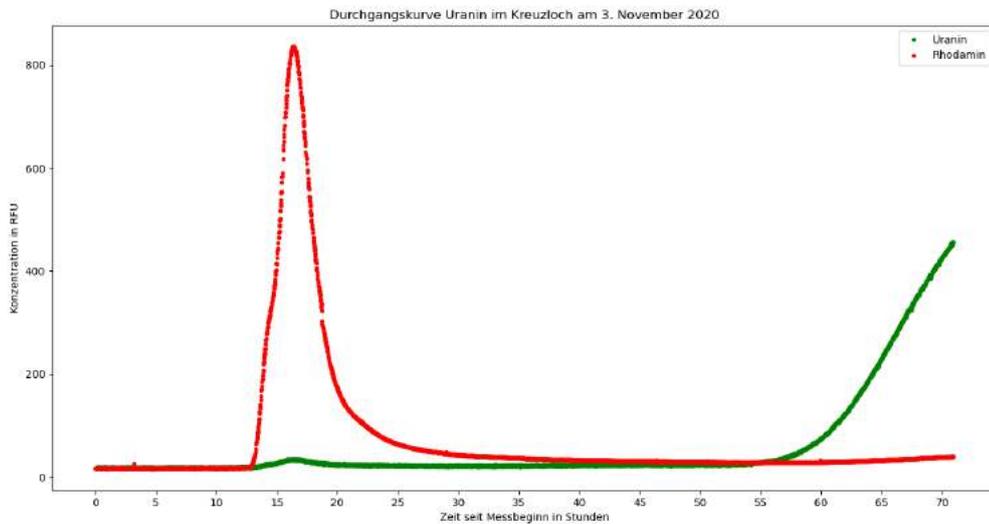
**Abbildung 4.2.:** Der Durchgang des Uranins (grün) von der diffusen Schwinde oberhalb der Guggerenhütte und Rhodamin (rot) von der Schwinde beim Kreuz. Gemessen mit dem Fluorometer 510 von der WSL welches in der Laueli-Quelle montiert wurde.

#### Versuch im Heuloch und im Chalberalpli am 2. November 2020

Das Rhodamin WT vom Chalberalpli trifft nach etwa 14 Stunden beim Kreuzloch ein (siehe Abbildung 4.3). Die Konzentration steigt bis auf ein Maximum von etwa 800 RFU stark an und fällt etwa gleich schnell wieder ab, bis sie nach etwa 10 Stunden seit dem ersten Anstieg langsamer abfällt und auch nach fast drei Tagen nicht mehr so tief wird wie vor der Messung. Beim Anstieg der Konzentration ist ein leichter Knick nach einer knappen Stunde in der Kurve zu bemerken. Vom Heuloch floss das Uranin deutlich langsamer in Richtung Kreuzloch und erst nach beinahe 60 Stunden wird es vom Fluorometer registriert. Die Konzentration steigt danach stetig an und war nach 3 Tagen, als die Messgeräte entfernt wurden, immer noch am Steigen. Der Anstieg war dabei deutlich flacher als jener des Rhodamins vom Chalberalpli. Die restlichen Fluorometer massen keine erhöhten Konzentrationen der Farbstoffe. Die minimale Fließdistanz beträgt für das Heuloch etwa 1600 Meter, woraus sich eine Fließgeschwindigkeit von 0.4 Meter pro Minute ergibt. Vom Chalberalpli sind es mindestens 1900 Meter bis ins

## 4. Resultate

Kreuzloch, was auf eine Fliessgeschwindigkeit von 2.3 Meter pro Minute schliessen lässt.



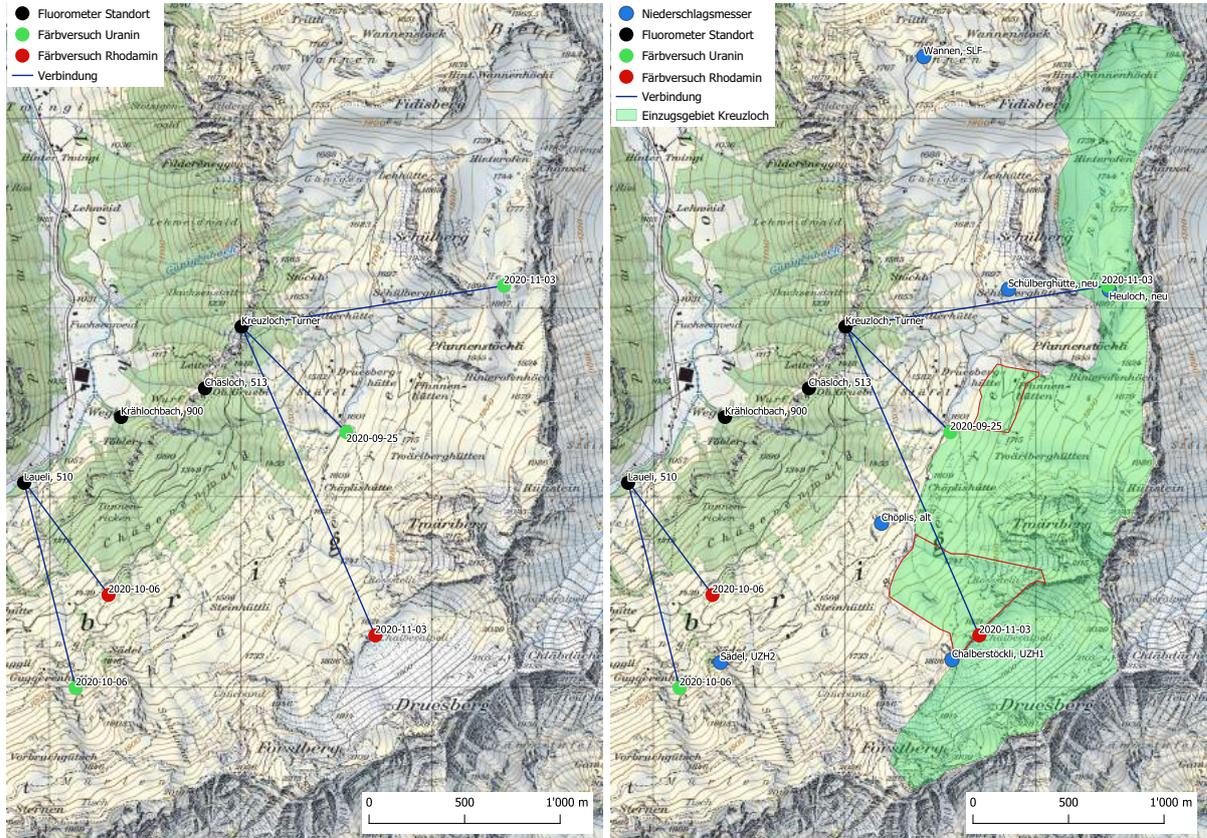
**Abbildung 4.3.:** Der Durchgang des Uranins (grün) von der Schwinde beim Heuloch und Rhodamin (rot) von der Schwinde im Chalberalpli. Gemessen mit dem Turner-Fluorometer welches im Kreuzloch montiert wurde.

### 4.1.2. Eingrenzung der Einzugsgebiete Kreuzloch und Laeli

Mithilfe der Tracerversuche konnten wichtige Verbindungen zwischen Bachschwinden auf der Chäseren und den Karstquellen bestätigt und neue gefunden werden. Abbildung 4.4 liefert eine Übersicht über die markierten Bachschwinden und deren unterirdischen Verbindungen zu den Karstquellen, sowie des vermuteten Einzugsgebiet des Kreuzlochs inklusive Unsicherheiten. Bereits vor den durchgeführten Tracerversuchen war bekannt, dass Ried und Chalberalpli eine Verbindung ins Kreuzloch besitzen und hauptsächlich dorthin entwässern aber durch den Farbtracer-Versuch bei der Chöplishütte konnte in diesem Gebiet das Einzugsgebiet deutlich talwärts erweitert werden. Die nördlich und südlich an die Chöplishütte angrenzenden Gebiete sind mit Unsicherheit behaftet, da die Zuweisung zum Einzugsgebiet des Kreuzlochs dort nicht mit Farbtracer-Versuche bestätigt, sondern nur anhand von tektonischen Strukturen durchgeführt wurde. Mehr dazu in Kapitel 5.1.1. Das Einzugsgebiet wurde im Programm QGIS auf Kartendaten von swisstopo (2021) eingezeichnet, weshalb die Fläche direkt aus dem Programm herausgelesen werden konnte. Das vermutete Einzugsgebiet ist mindestens  $3.43\text{km}^2$  gross, inklusive der beiden unsicheren Flächen ( $0.38\text{km}^2$  und  $0.11\text{km}^2$ ) bis zu  $3.91\text{km}^2$ . Dieser Fehlerbereich von fast  $0.5\text{km}^2$  hat bei der Berechnung des Niederschlags im Einzugsgebiet einen grossen Einfluss, was sich wiederum auf die Wasserbilanz und auf die Speicheränderung aus-

## 4. Resultate

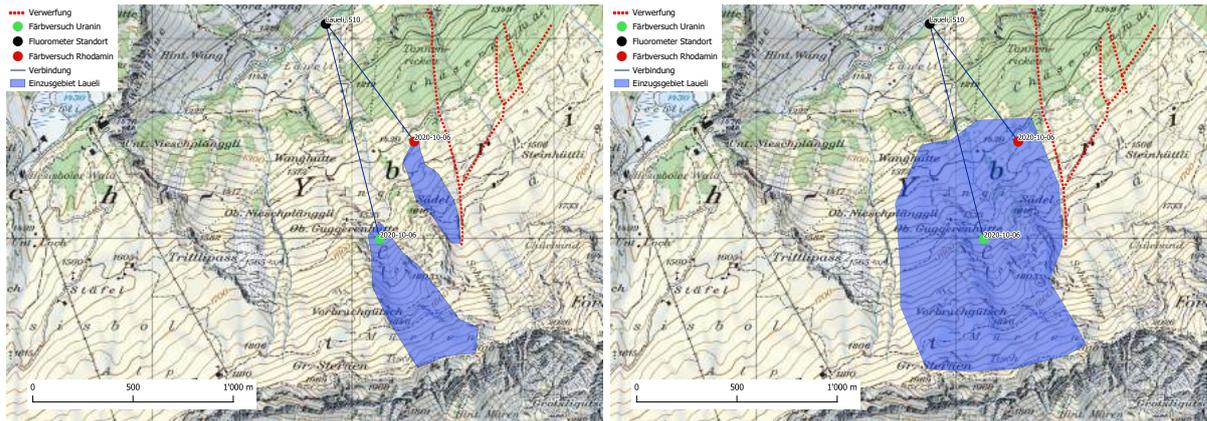
wirkt, weswegen für alle folgenden Berechnungen der Wert von  $3.67\text{km}^2$  ( $\pm 0.24\text{km}^2$ ) für das Einzugsgebiet des Kreuzlochs verwendet wurde.



**Abbildung 4.4.:** Die durch Farptracer-Versuche gefundenen und bestätigten Verbindungen zwischen den beprobten Bachschwinden in den Einzugsgebieten und den Karstquellen (links). Anhand der Erkenntnisse der Färbversuche und der Tektonik eingegrenztes Einzugsgebiet des Kreuzlochs (rechts). Rot umrandet sind die Gebiete, welche nicht mit Sicherheit dem Einzugsgebiet des Kreuzlochs zugewiesen werden können.

Die beiden Tracerversuche im Raum der Guggerenhütte bewiesen, dass dieses Gebiet ins Laueli entwässert. Bis zu dem Zeitpunkt gab es noch keine gesicherten Beweise dafür, wo das Einzugsgebiet der Laueli-Quellen genau liegt. Anhand dieser ersten zwei Versuche konnten zwei Teileinzugsgebiete mit Sicherheit dem Laueli zuweisen (Abbildung 4.5 links). Die Grösse dieser zwei Gebiete beträgt  $0.19$  und  $0.06\text{km}^2$ . Höchstwahrscheinlich ist das gesamte Einzugsgebiet des Laueli deutlich grösser und umfasst weitere Teile unterhalb und westlich der durchgeführten Tracerversuche. Abbildung 4.5 rechts zeigt eine mögliche Ausdehnung des Laueli-Einzugsgebiets mit einer Fläche von gesamthaft  $1.35\text{km}^2$ . Die östliche Grenze wurde aufgrund einer Verwerfung an dieser Stelle gesetzt.

## 4. Resultate



**Abbildung 4.5.:** Links: Die aufgrund der Farbtracer-Versuche bestätigten Teileinzugsgebiete des Laueli. Rechts: Eine Abschätzung des möglichen Einzugsgebiet des Laueli basierend auf Topographie und Tektonik.

## 4.2. Niederschlag

Zu Beginn dieses Abschnitts werden die Resultate der Niederschlagsmessungen aufgeführt, welche im Rahmen dieser Masterarbeit von Juli bis Dezember 2020 durchgeführt wurden. Die Standorte dieser Messgeräte sind auf Abbildung 2.5 markiert und die Wahl der Standorte ist in Sektion 2.7.3 erklärt. Danach folgen die Niederschlagsdaten von externen Quellen, welche für die langjährigen Vergleiche bezogen wurden.

### 4.2.1. Niederschlagsmessungen im Untersuchungsgebiet

Der Verlauf der kumulativen Niederschlagswerte ist für alle im Untersuchungsgebiet durchgeführten Messungen grundsätzlich sehr ähnlich (Siehe Abbildung 4.6). Bei fast allen Niederschlagsereignissen messen die Geräte den Niederschlag zeitgleich oder mit wenigen Minuten Verzögerung, selten dauert es bei einzelnen Stationen länger bis zum Start des Niederschlags. Grössere Unterschiede zwischen den Stationen gibt es hauptsächlich bei der gesamthaft gefallenen Menge an Niederschlag. Beispielsweise wurde zwischen dem 21. August und dem 21. November auf der Wannenalp fast 450 Millimeter Regen gemessen, was 40% mehr ist, als die Station bei der Chöplishütte registrierte. Um diese Unterschiede in der Menge an Niederschlag wurde ausgehend von der Station Chöplishütte die anderen Datenreihen durch Multiplikation mit verschiedenen Faktoren möglichst genau aneinander angenähert, was ausser für die Station bei der Schülberghütte gut funktioniert hat (Abbildung 4.6 rechts). Durch diese Angleichung konnte der prozentual gefallene Niederschlag ausgehend von 100% bei der Station Chöplishütte für alle anderen Stationen angegeben werden (Vergleiche Tabelle 4.1).

#### 4. Resultate

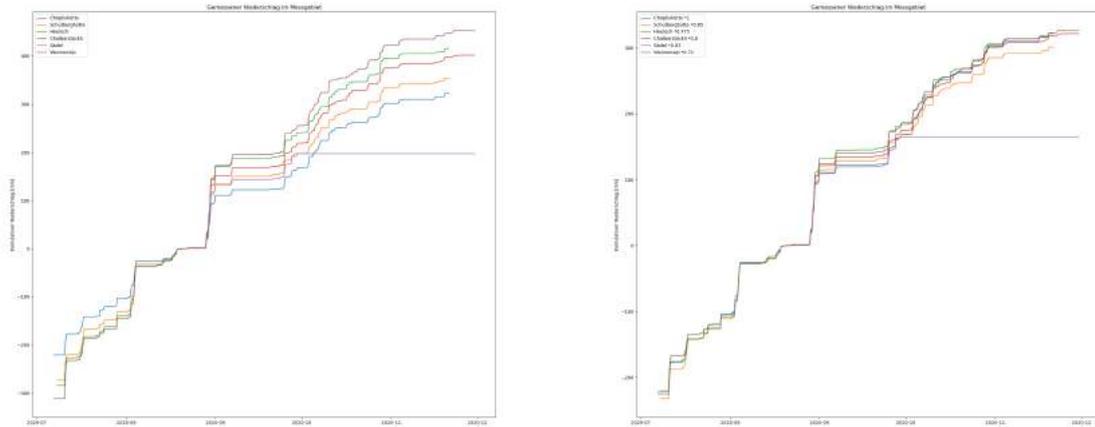
Für langjährige Vergleiche des Niederschlags und somit der Berechnung der Wasserbilanz werden jeweils die Daten der Station bei der Chöplishütte verwendet, da diese die einzige Station ist, welche seit mehreren Jahren dort steht. Alle anderen Stationen im Gebiet wurden nur für einen Sommer dort montiert und können nicht für langzeitliche Analysen verwendet werden. Beim Vergleich aller Niederschlagsstationen im Gebiet fällt auf, dass die Station bei der Chöplishütte deutlich weniger Niederschlag verzeichnet als die neu montierten Stationen (Siehe Abbildung 4.6). Deswegen wurden für die langzeitlichen Auswertungen und Berechnungen der Wasserbilanz die Werte der Station bei der Chöplishütte an die Werte der anderen Stationen angeglichen, speziell an die Stationen beim Heuloch und beim Chalberalpli, da diese den Niederschlag im vermuteten Einzugsgebiet des Kreuzlochs am genauesten wiedergeben (Siehe Abbildung 4.4). Diese beiden Stationen, Chalberstöckli und Heuloch, verzeichnen im Durchschnitt 127% des Niederschlags bei der Chöplishütte, weshalb für die Berechnung der Wasserbilanz der letzten Jahre die Messwerte der Station Chöplishütte mit dem Faktor 1.27 multipliziert wurden.

Stationsname	Höhe [m.ü.M.]	Niederschlag [mm]	Niederschlag [%]
Chöplishütte	1570	322	100.0
Sädel	1610	198	120.5
Wannenalp	1701	445	138.9
Schülberghütte	1740	355	116.3
Heuloch	1780	415	129.0
Chalberstöckli	1875	398	125.0

**Tabelle 4.1.:** Die verschiedenen Niederschlags-Messstationen und deren Niederschlag als Prozentsatz verglichen.

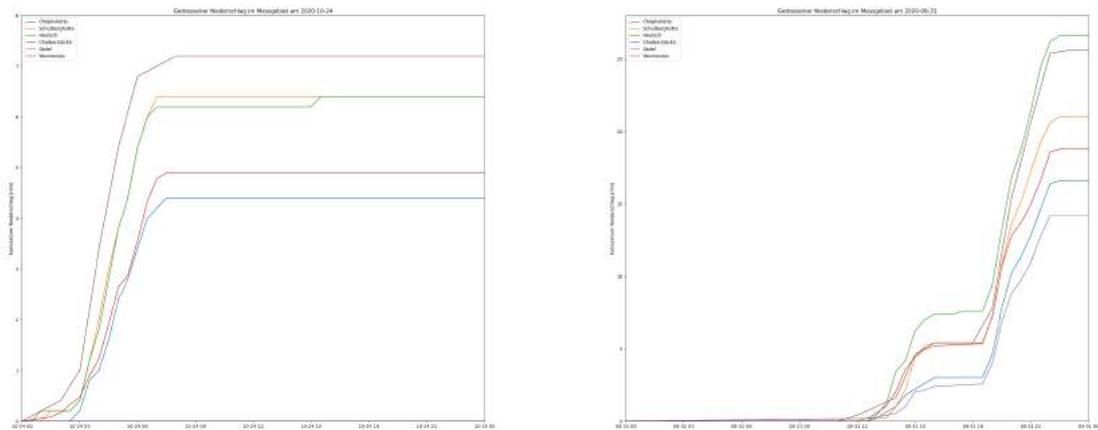
Bei der Betrachtung einzelner Niederschlagsereignisse fällt auf, dass zwischen den verschiedenen Standorten erhebliche Unterschiede in Zeit und Menge des Regens existieren. Bewegt sich der Regen von Norden nach Süden, so misst zuerst die Station auf der Wannenalp, gefolgt von Schülberghütte und Heuloch etwa gleichzeitig, danach folgt die Chöplishütte und zum Schluss Sädel und Chalberalpli (Siehe Abbildung 4.7 links). Je nach Geschwindigkeit des vorbeiziehenden Niederschlags sind die zeitlichen Verzögerungen zwischen den Stationen natürlich unterschiedlich. Beispielsweise am 24. Oktober 2020 misst die Station bei der Schülberghütte erst eine Stunde nach der Station Wannenalp Niederschlag und bis der Regen bei der Chöplishütte ankommt, vergehen sogar über zwei Stunden. Die zeitlichen Unterschiede können aber auch sehr gering sein, wie zum Beispiel am 31. August 2020 (Abbildung 4.7 rechts). Bei diesem Niederschlagsereignis messen alle Stationen gleichzeitig Regen, jedoch variiert die gemessene Menge stark zwischen den Stationen. Bei Sädel wird während diesem Event etwa 14 Millimeter

## 4. Resultate



**Abbildung 4.6.:** Kumulierter Niederschlag im Untersuchungsgebiet während der Messperiode. Vergleich von allen vor Ort installierten Niederschlagsmessern ohne (links) und mit (rechts) Korrekturfaktoren.

Regen gemessen, wohingegen beim Heuloch mit über 26 Millimeter Regen fast das Doppelte verzeichnet wird.



**Abbildung 4.7.:** Zwei exemplarische Niederschlagsereignisse an allen Messstandorten.

### 4.2.2. Vergleich der Niederschlagsdaten mit externen Stationen

Für die langjährigen Vergleiche und Berechnung der Wasserbilanz im Einzugsgebiet wurden neben den Niederschlagsdaten von der Messstation Chöplishütte auch noch Daten von der SLF Station Wannental, sowie kombinierte Niederschlagsdaten von Radar- und Feldmessungen

## 4. Resultate

(CombiPrecip-Produkt) verwendet. Diese Datenquellen sind in Abschnitt 3.2.2 beschrieben. Weiter wurden der Niederschlag aus den verschiedenen Quellen mit den Niederschlagswerten der Messstation von MeteoSchweiz in Einsiedeln verglichen. In Abbildung 4.8 sind die Niederschlagswerte der verschiedenen Datenquellen für die letzten Jahre dargestellt. Generell wird bei der Chöplishütte am wenigsten Niederschlag gemessen, gefolgt vom CPC und am meisten Niederschlag misst die SLF-Station Wannenalp. Im Jahr 2017 wird bei der Chöplishütte total 1750 mm Niederschlag gemessen, das CPC gibt 1800 mm an und auf der Wannenalp sind es 1950 mm. 2018 sind es 1300 mm bei der Chöplishütte, 1425 mm im CPC und 1500 mm auf der Wannenalp. Im Jahr 2019 sind die Werte auf der Wannenalp deutlich geringer mit knapp 900 mm, wohingegen bei der Chöplishütte über 1300 mm und über 1600 mm im CPC gemessen werden. 2020 sind von der Chöplishütte die Daten nur bis ende November vorhanden, zu dem Zeitpunkt lagen die Niederschlagswerte mit 1400 mm etwa 75 mm tiefer als beim CPC und 170 mm tiefer als auf der Wannenalp mit 1570 mm.

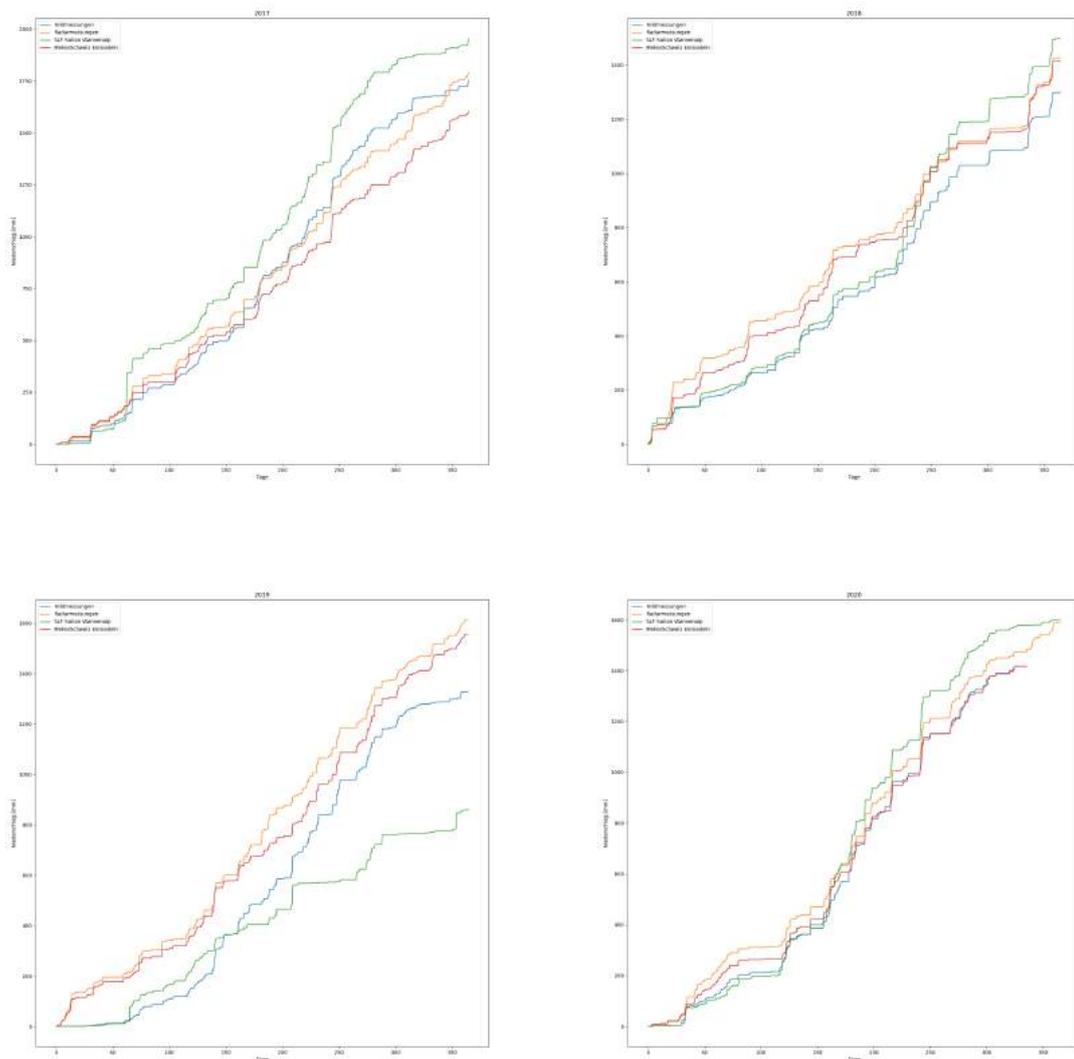
Der Niederschlagsverlauf an den 4 besprochenen Stationen sieht bei allen im Grossen und Ganzen ähnlich aus; auffällige Abweichungen der Verläufe gibt es in den Jahren 2018 und 2019. Von Februar 2018 ist der gemessene Niederschlag bei der Chöplishütte und auf der Wannenalp deutlich niedriger als die Werte Radarmessungen im CPC. Anfangs des Jahres 2019 wird auf der Wannenalp und bei der Chöplishütte kaum Niederschlag registriert, wohingegen im CPC bedeutende Mengen an Niederschlag verzeichnet. Die Werte des CPC decken sich in beiden Fällen sehr gut mit den Niederschlagsmessungen der Meteostation in Einsiedeln. Das Jahr 2018 verzeichnet bei allen Stationen am wenigsten Niederschlag, abgesehen von dem extrem niedrigen Wert bei der Wannenalp. Die Diskrepanz auf der Wannenalp ist generell sehr hoch. Die Jahre 2019 und 2020 sind in etwa gleich Niederschlagsreich, jedoch nicht so feucht wie das Jahr 2017 (Abbildung im Anhang A.2).

### 4.3. Abfluss

#### 4.3.1. Punktuelle Abflussmessungen

Für alle Salztracer-Versuche wurde eine Kalibrierungslösung erstellt (alle Werte im Anhang). Anhand der somit gemessenen Konzentrationswerte für bekannte Mischungsverhältnisse wurde der Kalibrierungskoeffizient  $k$  berechnet. Die Formel und das genaue Vorgehen zur Berechnung ist beschreiben in Moore (2005). Die Formel für die Berechnung des Abflusses ist im Abschnitt 3.3.1 beschrieben und wird für alle Salztracer-Versuche verwendet.

## 4. Resultate



**Abbildung 4.8.:** Der kumulative Niederschlag verglichen an unterschiedlichen Stationen.

### NaCl-Tracerversuch im Laeli am 05. Juni 2020

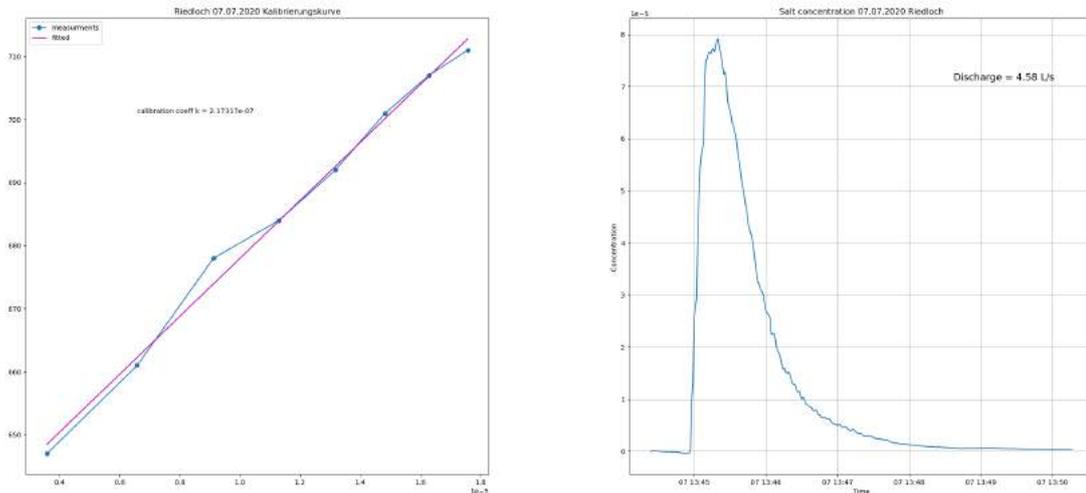
Die gemessenen Daten der Salzkonzentration sind leider nicht mehr auffindbar, deshalb konnte zu dieser Messung keine Grafik erstellt werden. Der berechnete Wert für den Abfluss war noch vorhanden und beträgt 33.7 Liter pro Sekunde.

### NaCl-Tracerversuch bei der Riedhöhle am 07. Juli 2020

Die elektrische Leitfähigkeit steigt zu Beginn der Messung innerhalb weniger Sekunden rapide an, wobei kurz vor dem Maximum der Anstieg deutlich langsamer wird. Die Leitfähigkeit sinkt

## 4. Resultate

danach kontinuierlich und nur wenig langsamer wieder ab, wobei die Abnahme immer langsamer wird, je näher die Konzentration der Anfangskonzentration kommt. Etwa 5 Minuten nach dem Anstieg der Konzentration sinkt sie nicht weiter und die Ausgangskonzentration ist fast wieder erreicht. Es wird ein Abfluss von 4.58 Liter pro Sekunde berechnet.



**Abbildung 4.9.:** Kalibrierungskurve und Konzentrationsverlauf Riedloch 7.7.20

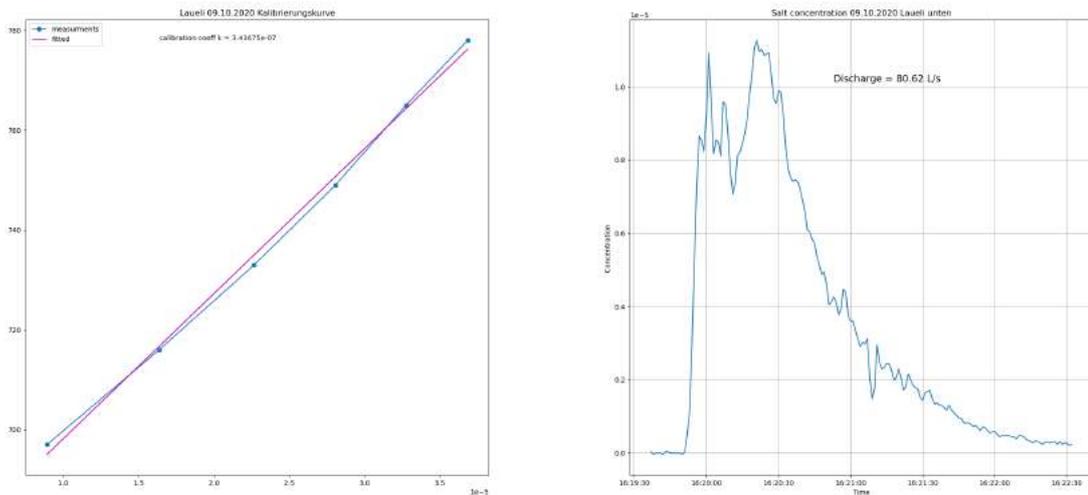
### NaCl-Tracerversuch im Laueli am 9. Oktober 2020

Bei der Messung im unteren Bachabschnitt des Laueli treten nach einem raschen Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit für etwa 30 Sekunden starke Schwankungen auf. Danach steigt die Leitfähigkeit nochmals kontinuierlich aber nicht mehr ganz so rasch an, bis ein Maximum etwa 1 Minute nach dem ersten Anstieg erreicht wird. Danach sinkt die Leitfähigkeit zuerst stark, dann immer langsamer wieder ab, wobei erneut teilweise starke Schwankungen bemerkbar sind. Nach knapp 3 Minuten wurde die Messung beendet, der Anfangswert der elektrischen Leitfähigkeit wurde noch nicht ganz erreicht. Der berechnete Abfluss liegt bei 80.62 Liter pro Sekunde.

### Salztracer in Laueli und Töbleren am 15. April 2021

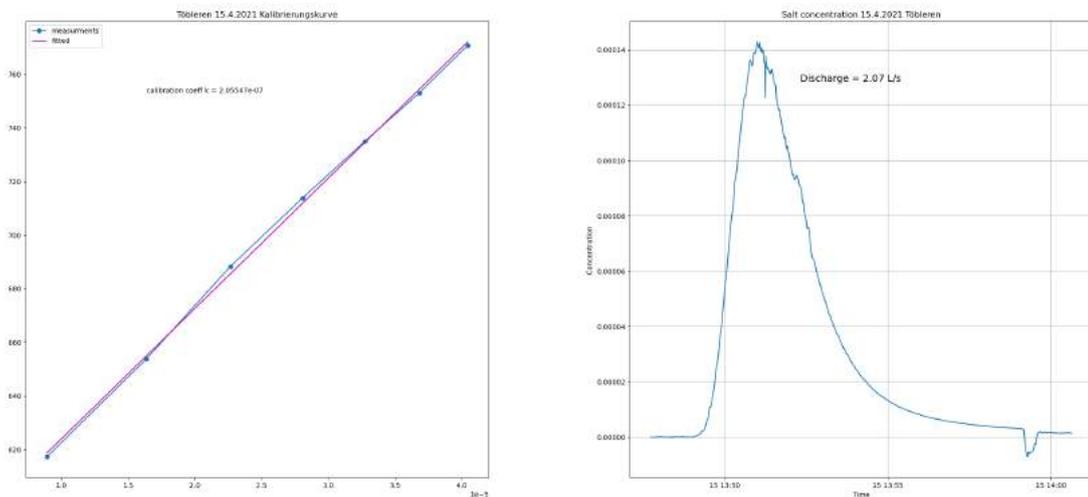
Die elektrische Leitfähigkeit steigt zu Beginn der Messung in den Töbleren-Quellen etwa eine Minuten lang kontinuierlich an bis ein Maximum erreicht wird, woraufhin sie ebenfalls kontinuierlich über 2 Minuten hinweg wieder absinkt. Ab dem Zeitpunkt sinkt die Leitfähigkeit über weitere 6 Minuten immer langsamer, bis die Messung nach etwa 12 Minuten beendet wird,

## 4. Resultate



**Abbildung 4.10.:** Kalibrierungskurve und Konzentrationsverlauf Laeli 9.10.20

obwohl die Leitfähigkeit noch über der Anfangsleitfähigkeit liegt. Das Maximum selbst weist einige Schwankungen in der Leitfähigkeit auf, ansonsten ist der Verlauf sehr glatt, ausser einem Einbruch der Leitfähigkeit kurz vor Ende der Messung. Aus den Daten berechnet sich ein Abfluss von 2.07 Liter pro Sekunde.



**Abbildung 4.11.:** Kalibrierungskurve und Konzentrationsverlauf Töbleren-Quelle 15.04.21

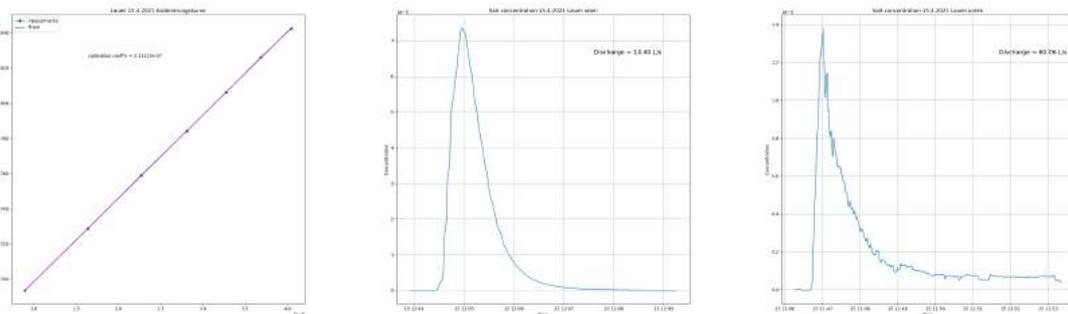
Am 15. April 2021 wurden in der Laeli-Quelle 2 Messungen durchgeführt, eine im oberen Abschnitt vor dem Zufluss des Wassers der unteren Quelle und eine zweite im unteren Bachabschnitt, am selben Ort wie das Fluorometer installiert wurde. Da beide Messungen sehr nahe

## 4. Resultate

beieinander lagen und kein zusätzliches Wasser zwischen den beiden Messstandorten in den Bach fließt, wurde nur eine Kalibrierung für beide Messungen durchgeführt.

Im oberen Bach steigt die elektrische Leitfähigkeit bei genauer Betrachtung nicht kontinuierlich, sondern teilweise leicht sprunghaft innerhalb 30 Sekunden bis auf ein Maximum an. Während den nächsten 3 Minuten fällt die Leitfähigkeit zunächst stark, dann wird die Kurve des Rückgangs immer flacher bis zuletzt die Anfangsleitfähigkeit langsam wieder erreicht wird. Es wird ein Abfluss von 14.4 Liter pro Sekunde berechnet.

Die Durchgangskurve der Salztracer-Messung im Bach nach der unteren Laeli-Quelle zeigt einen rapiden Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit innerhalb 20 Sekunden. Nach dem Maximum fällt die Leitfähigkeit wieder ab, jedoch sind viele Schwankungen während dem Rückgang der Leitfähigkeit zu bemerken, welche teilweise erheblich sind und die Kurve sehr unstetig wirken lassen. Nach 7 Minuten wird die Messung beendet; die Leitfähigkeit liegt dabei noch deutlich über dem Anfangswert. Der berechnete Abfluss liegt bei 60.1 Litern pro Sekunde.



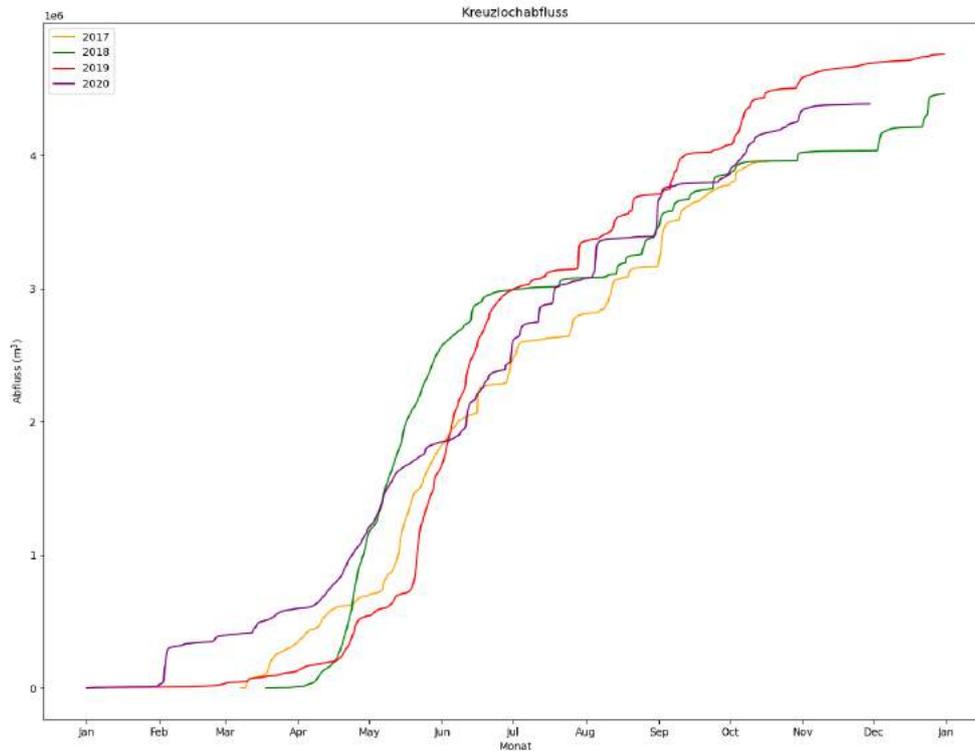
**Abbildung 4.12.:** Kalibrierungskurve und Konzentrationsverlauf Laeli 15.04.21

### 4.3.2. Berechnete kontinuierliche Abflusswerte

Im Untersuchungsgebiet dieser Masterarbeit wurde und wird weiterhin an verschiedenen Standorten der Abfluss anhand von Druckloggern aufgezeichnet. Zum Auslesen der Daten auf diesen Geräten müssen sie abmontiert und mittels eines Kabels an ein Computer angeschlossen werden. Da für diese Masterarbeit hauptsächlich die Daten aus dem Kreuzloch für die Berechnung dessen Wasserbilanz benötigt wurden, sind von den anderen Datenloggern keine Daten vorhanden, weil die Logger deswegen nicht extra ausgebaut wurden. Die Abflussdaten des Kreuzlochs konnten ferner mit Daten der Minster von der Messstation bei Euthal, welche vom Bundesamt für Umwelt betrieben wird, verglichen werden.

Der kumulierte Jahresabfluss des Kreuzlochs ist in Grafik 4.13 visualisiert. Auffällig ist jeweils der starke Anstieg der Abflussmenge im Frühsommer. 2017 und 2019 beginnt der Anstieg Mitte

## 4. Resultate



**Abbildung 4.13.:** Der gemessene Abfluss an der Kreuzloch-Quelle während den letzten Jahren.

Mai, 2018 schon Ende April und im Jahr 2020 ist der Anstieg generell weniger markant, dafür gibt es im Februar erste Abflussspitzen. Der Gesamtabfluss Ende Jahr beträgt in den dargestellten Jahren zwischen 4 und 5 Millionen Kubikmeter, wobei die Datenreihen der Jahre 2017 und 2018 unvollständig sind. Im Jahr 2018 in den Monaten Juli und August ist der Abfluss extrem niedrig, ein Anstieg des Gesamtabflusses ist kaum bemerkbar.

Grafik 4.14 zeigt den momentanen Abfluss im Jahresverlauf. Im Frühling und im Frühsommer sind in jedem Jahr viele Schwankungen des Abflusses zu sehen und der Abfluss ist dauerhaft deutlich über dem Basisabfluss. Nach dieser Periode steigt der Abfluss jeweils nur für kurze Zeit sehr stark an und fällt, teils langsamer, teils schneller, wieder auf ein relativ tiefes Niveau zurück. In den Wintermonaten sind die Abflussspitzen generell tiefer und weniger häufig als in anderen Jahreszeiten. Im Jahr 2018 fällt auf, dass der Abfluss im Sommer und Herbst sehr rasch jeweils wieder auf ein tiefes Niveau abfällt. Aus dieser Grafik wurden zudem Werte für den Basisabfluss, also die Menge Wasser, welche die Quelle immer liefert, auch wenn das Einzugsgebiet sehr trocken ist, herausgelesen. Dazu muss es über längere Zeit im Einzugsgebiet nicht geregnet haben und es darf kein Wassereintrag durch Schneeschmelze geben, weshalb der

## 4. Resultate

Basisabfluss beispielsweise im Winter vor der ersten Schmelze oder während einer längeren Dürreperiode einfach bestimmbar ist. In Tabelle 4.2 sind die Basisabflusswerte übersichtlich dargestellt.

Jahr	2017	2018	2019	2020
Abfluss	0.5 [l/s]	0.4 [l/s]	0.5 [l/s]	0.3 [l/s]
Datum	März	November	Januar	Januar

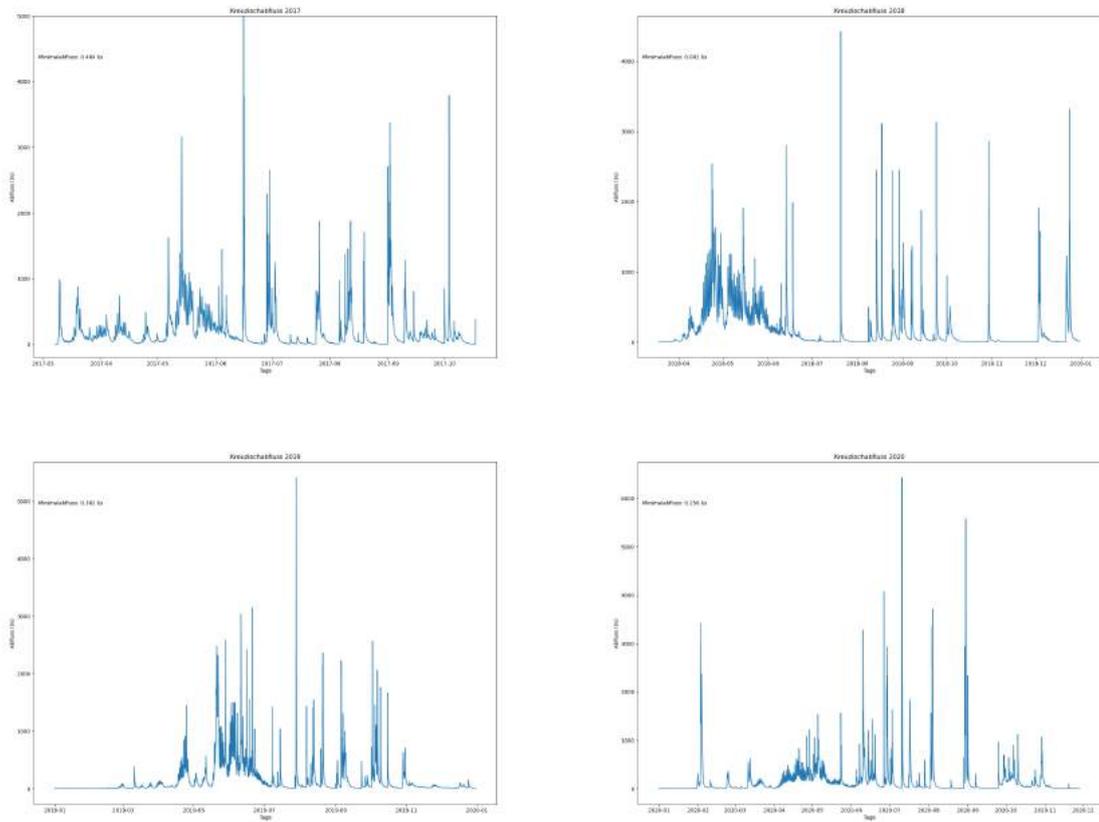
**Tabelle 4.2.:** Der Basisabfluss im Kreuzloch während den letzten Jahren.

### 4.4. Speicher

Die Berechnung der jährlichen Speicheränderung erfolgte über die Wasserbilanz des Einzugsgebiets anhand der Formel  $\Delta S = P - Et - Q$ . Für die Jahre 2017 und 2018 ergab dies sehr stark negative Werte für die Speicheränderung (Abbildung 4.15). Da diese Datenreihen nicht das gesamte Jahr umfassen, wurden nur die Jahre 2019 und 2020 betrachtet. In den Monaten Januar und Februar ist der Abfluss meistens sehr niedrig, der Niederschlag leicht höher und die Speicheränderung ist positiv. Im Frühling steigt der Abfluss stark an und die Speicheränderung wird deutlich negativ. Im restlichen Verlauf des Jahres nimmt der Abfluss wieder langsam ab während die Niederschlagswerte ungefähr gleich bleiben, wodurch sich die Speicheränderung wieder ins Positive bewegt.

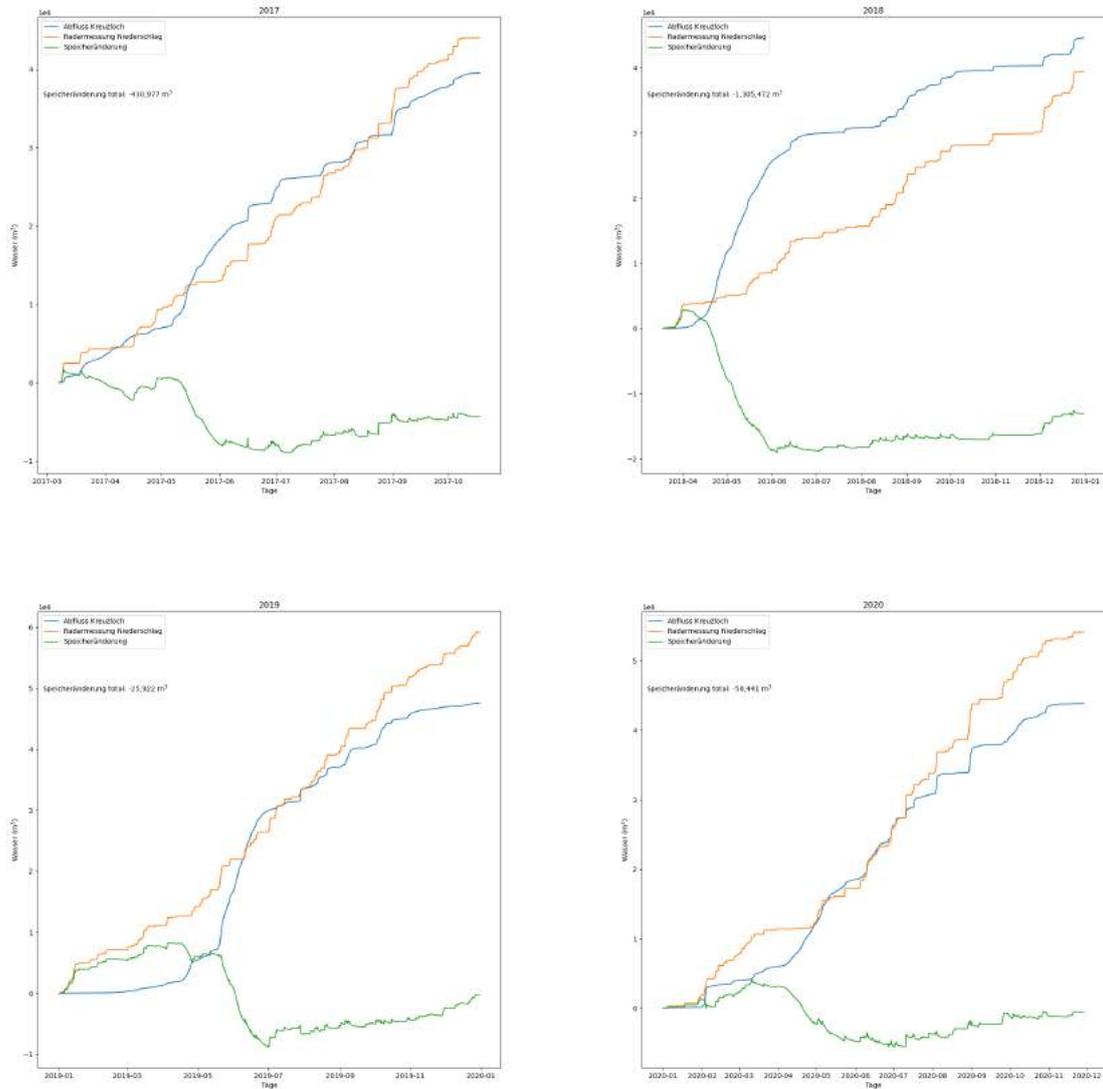
Bei der Betrachtung des hydrologischen Jahres vom 1. Oktober bis 30. September des Folgejahres, verschiebt sich der Speicherzuwachs an den Anfang der Grafik. In den Wintermonaten nimmt er am meisten zu, im Frühling wieder stark ab, jedoch werden nicht so stark negative Werte wie bei der Betrachtung des Kalenderjahres erreicht.

## 4. Resultate



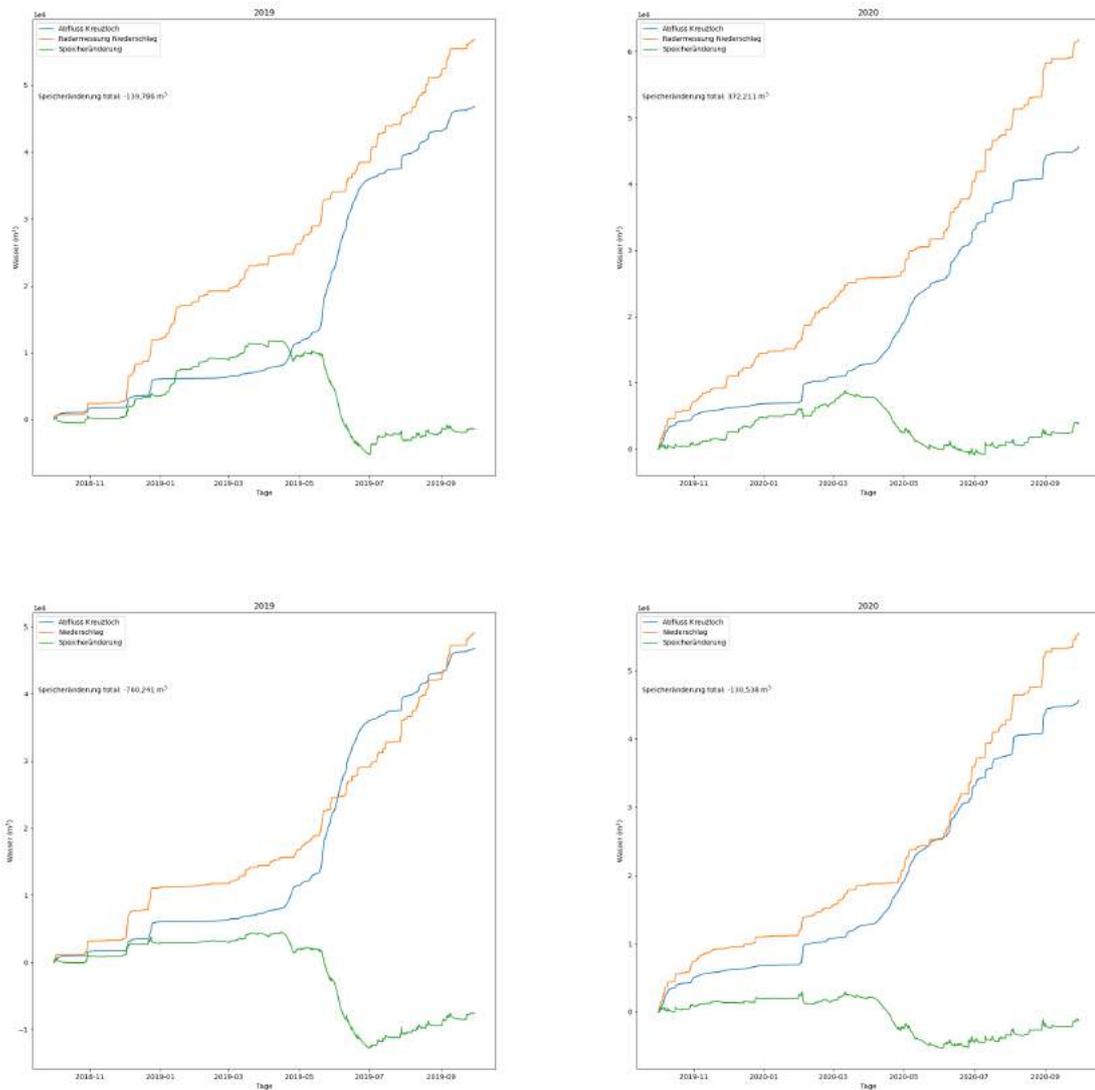
**Abbildung 4.14.:** Der Abfluss beim Kreuzloch von 2017 - 2020. Der Spitzenabfluss im Jahr 2017 beträgt  $13'930 m^3/s$ , die y-Achse wurde aufgrund einer besseren Lesbarkeit auf  $5'000 m^3/s$  begrenzt.

## 4. Resultate



**Abbildung 4.15.:** Der Abfluss beim Kreuzloch sowie der Niederschlag vom CPC hochgerechnet auf das vermutete Einzugsgebiet vom Kreuzloch inklusive der berechneten Speicheränderung.

## 4. Resultate



**Abbildung 4.16.:** Der Abfluss beim Kreuzloch sowie der Niederschlag vom CPC (oben) und von der Station Chölshütte (unten) hochgerechnet auf das vermutete Einzugsgebiet vom Kreuzloch inklusive der berechneten Speicheränderung für die hydrologischen Jahr 2018/2019 und 2019/2020.

# Diskussion

Im folgenden Kapitel werden zuerst die Resultate der Messungen interpretiert und deren Bedeutung für das Untersuchungsgebiet wo nötig erläutert. Es werden Probleme und Limits der einzelnen Messungen thematisiert sowie Möglichkeiten zur Verbesserung angesprochen. In einem zweiten Teil wird die Berechnung der Wasserbilanz und der Speicheränderung diskutiert, insbesondere die angenommenen Evaporationswerte. Abschliessend wird Kritik an den verwendeten Methoden geübt und allgemeine Verbesserungsvorschläge und weiterführende Untersuchungen genannt.

## 5.1. Interpretation der Messresultate

### 5.1.1. Farbtracer-Versuche

Die bei der Chöplishütte eingespeiste Farbe wurde nur vom Fluorometer im Kreuzloch gemessen, zu den anderen Quellen besteht keine aktive Verbindung, zumindest nicht bei den korrespondierenden Abflusswerten. Die Durchgangskurve zeigt einen einzelnen, rasch ansteigenden und wieder abfallenden Peak der Uranin-Konzentration. Das Konzentrationslevel sinkt relativ schnell wieder auf einen sehr tiefen Wert ab und auch wenn dieser über dem Anfangslevel bleibt kann davon ausgegangen werden, dass die untersuchte Verbindung relativ direkt verläuft und dass, zumindest unter den Abflussbedingungen während der Messung, nur wenig Wasser längere Zeit im Untergrund bleibt.

Die Verbindung vom Kreuz ins Laueli scheint sehr direkt und ohne Rückhaltebecken zu sein, da die Konzentrationskurve des Rhodamin rasch ansteigt und ebenso rasch wieder auf das Anfangsniveau absinkt. Die Durchgangskurve des Uranin von der diffusen Bachschwinde weiter Hang aufwärts zeigt zwei unterschiedliche Peaks, einen ersten kleineren und einen zweiten, etwa 3-mal so hohen Peak. Da es in der Nacht auf den 7. Oktober 2020, sowie am Mittag dieses Tages regnete, und sich die beiden Niederschlagsereignisse zeitlich mit den beiden Peaks

## 5. Diskussion

nahezu decken, wird davon ausgegangen, dass die Verbindung zur Zeit der Messung sehr langsam fliessend war und durch den zusätzlichen Abfluss aufgrund des Regens der Tracer schneller vorwärts transportiert wurde. Während der Trockenphase zwischen den Regenevents wurde vermutlich ein Teil des Farbtracers in Retentionsbecken zurückgehalten, bis der Abfluss erneut anstieg. Eine weitere mögliche Erklärung der beiden Peaks wäre, dass es zwei unterschiedliche Fliesswege gibt, wobei der Zusammenhang mit dem Niederschlag jedoch plausibler zu sein scheint.

Im Chalberalpli wurde die südliche Bachschwinde beprobt; die nördliche wurde schon früher untersucht und eine Verbindung ins Kreuzloch nachgewiesen (Bucher, 2015). Dass die südliche Schwinde auch ins Kreuzloch abfliesst und nicht in eine andere Quelle führt, ist zwar aufgrund der Topografie nicht überraschend, aber trotzdem eine wertvolle Erkenntnis. Der Konzentrationsverlauf des Rhodamins lässt erneut auf eine relativ direkte und konstante Verbindung schliessen, da die Konzentration ebenfalls rasch wieder fast auf das Anfangsniveau zurückgeht. Wenige Stunden nach der Zugabe des Rhodamins in die südliche Chalberalpli-Schwinde beginnt es zu regnen. Einen Einfluss auf die Fliessgeschwindigkeit des Farbtracers kann nicht ausgeschlossen werden. Der Knick im Anstieg der Konzentration liesse sich im Zusammenhang mit dem Niederschlag dadurch erklären, dass der Niederschlag zu dieser Zeit abnahm, wodurch sich der Abfluss und somit die Fliessgeschwindigkeit verringerte.

Da die Messung im Chalberalpli bei verhältnismässig niedrigem Abfluss durchgeführt wurde und während der Schneeschmelze ein Vielfaches durch diese Verbindung abfliesst, können weitere Verbindungen, welche nur bei Hochwasser aktiv sind, nicht ausgeschlossen werden. Für die nördliche Chalberalpli-Schwinde bestätigt Bucher (2015) einen Überlauf ins Chäsloch, weshalb vermutet wird, dass auch die südliche Schwinde einen solchen Überlauf besitzt. Eine unterirdische Verbindung zwischen Chalberalpli und Laueliquelle, welche nur bei Hochwasser aktiv ist, könnte ebenfalls bestehen; nachgewiesen wurde bis zum Verfassen dieser Arbeit noch keine. Da sich während der Schneeschmelze oftmals ein See im Chalberalpli bildet (persönliche Kommunikation), ist zu vermuten, dass beide Schwinden keine grossen Mengen an Wasser schlucken können.

Über die Durchgangskurve des Versuchs beim Heuloch kann leider nur wenig gesagt werden, da die Uranin-Konzentration noch immer am steigen war, als die Messung nach 70 Stunden beendet wurde. Der langsame Anstieg und der Fakt, dass sehr viel Zeit bis zum ersten Anstieg der Konzentration verstrichen ist, lässt vermuten, dass das Wasser auf mehr Widerstand trifft als in anderen Verbindungen und sich seinen Weg durch die Klüfte suchen muss. (??)

### **Eingrenzung der Einzugsgebiete**

Die bepropte Schwinde bei der Chöplishütte ist eine von mehreren Schwinden, welche sich entlang einer Nord-Süd-Verwerfung befinden. Es wird vermutet, dass auch die anderen Schwinden entlang dieser Verwerfung ins Kreuzloch entwässern. Das grossräumige Gebiet oberhalb der Chöplishütte wurde deswegen zum Einzugsgebiet des Kreuzloch gezählt, auch wenn rein topografisch eine Verbindung ins Chäsloch ebenfalls denkbar wäre. Das Gebiet unterhalb der Verwerfung bei der Chöplishütte konnte noch keiner Quelle zugeordnet werden, da dort keine Tracerversuche durchgeführt wurden. Womöglich entwässert dieses Gebiet ins Chäsloch, es könnte aber auch noch Teil des Einzugsgebiets des Kreuzlochs sein. Weiter talwärts sind noch mehr Brüche (siehe Abbildung 4.4), welche vermutlich die Einzugsgebiete von Kreuzloch, Chäsloch und den Töbleren-Quellen voneinander abgrenzen. Um das Einzugsgebiet des Kreuzlochs genauer zu bestimmen und abzugrenzen, wären weitere Farbtracer-Versuche notwendig. Der Fokus sollte dabei auf dem Gebiet unterhalb der Chöplishütte liegen, aber auch im Raum der Schülberghütte, nördlich des Twäribergs und unterhalb des Chalberalplis könnten möglicherweise noch wertvolle Erkenntnisse gemacht werden.

Dass die Gebiete Ried, Heuloch, Hinterofen und Chalberalpli zum Einzugsgebiet des Kreuzloch gehören, war schon zu Beginn dieser Arbeit bekannt. Durch den Farbtracer-Versuch bei der Chöplishütte wurde bewiesen, dass auch dieses tiefergelegene Gebiet ins Kreuzloch entwässert, wodurch das Einzugsgebiet des Kreuzloch um eine beträchtliche Fläche erweitert werden konnte. Die vertikale Ausdehnung war aufgrund des Versuchs einfach festzulegen, die horizontale erwies sich aber als deutlich schwieriger, nicht zuletzt weil keine weitere Tracer-Versuche auf dieser Höhe gemacht wurden. Da diese Anhaltspunkte fehlten, wurden tektonische Strukturen und Oberflächenbäche als Grenzen angesehen. Diese unsicheren Teile des Einzugsgebiet sind in Grafik 4.4 rechts rot umrandet.

Anhand der Versuche im bisher eher unerforschten Gebiet rund um die Guggerenhütte im südlichen Teil des Einzugsgebiets konnte dieses definitiv als Einzugsgebiet des Laueli charakterisiert werden und ist getrennt von den Einzugsgebieten der restlichen untersuchten Quellen Kreuzloch, Chäsloch und Töbleren-Quellen.

Auf der Karte (siehe Abbildung 2.3) ist das Gebiet oberhalb des Laueli deutlich durch einen senkrecht zur Hangneigung verlaufenden Bruch zwischen Sädel und Töbleren von den weiter westlich liegenden Einzugsgebieten abgetrennt. Um das Einzugsgebiet des Laueli und auch der anderen Karstquellen am südlichen Ende des Waagtales genauer zu bestimmen, müssten im Raum der Wang- und Guggerenhütte, sowie entlang der vertikal verlaufenden Verwerfung weitere Tracer-Messungen durchgeführt werden.

Allgemein ist das Gebiet der Chäseren unterhalb etwa 1400 m.ü.M. erst vereinzelt karsthydrologisch untersucht und durch Tracer-Versuche den Karstquellen zugeordnet worden. Für eine Eingrenzung der Einzugsgebiete von Chäsloch, Krähloch und Töbleren-Quellen könnte eine bessere Untersuchung dieses Gebiets entscheidend sein. Im Rahmen dieser Masterarbeit konnten für keine dieser Quellen eindeutige Gebiete ausfindig gemacht werden, welche definitiv zu deren Einzugsgebiet gehören. Beim Chäsloch und im Bach unterhalb des Krählochs war während jedem der Tracer-Versuche ein Fluorometer installiert, welches jedoch nie erhöhte Konzentrationen der fluoreszierenden Farben gemessen hatte. Die Geräte wurden vor und nach der Messperiode kalibriert, sie funktionierten einwandfrei. Die Töbleren-Quellen wurden nicht untersucht, da deren Relevanz als zu gering eingeschätzt wurde. Diese Einschätzung änderte sich aufgrund zusätzlicher Informationen aus persönlichen Quellen, jedoch erst nach Ende der Messperiode. Für kommende Untersuchungen in dem Gebiet wäre es sicher sehr sinnvoll, diese Quellen ebenfalls mit einem Fluorometer zu versehen.

### 5.1.2. Niederschlag

Die unterschiedlichen Niederschlagssummen an den verschiedenen Messstationen im Untersuchungsgebiet sind womöglich auf die geographische Höhe der Stationen, sowie auf die spezielle Topografie einiger Standorte zurückzuführen. Wie in Abbildung 4.6 links zu sehen ist, verzeichnet die Station bei der Chöplishütte am wenigsten Niederschlag, gefolgt von Sädel, Schülberghütte, Chalberstöckli, Heuloch und mit dem höchsten Niederschlag Wannenalp. Nach Höhe über Meer sortiert, ergibt sich ein ähnliches Bild: Die Station Chöplishütte liegt am tiefsten, danach folgt Sädel, Wannenalp, Schülberghütte, Heuloch und am höchsten liegt das Chalberstöckli. Die Stationen Wannenalp und Chalberstöckli tanzen etwas aus der Reihe; die Wannenalp hat aussergewöhnlich viel Niederschlag für diese Höhe und am Chalberstöckli wird weniger Niederschlag, als aufgrund der Höhe zu erwarten, gemessen.

Erklären lässt sich dies vermutlich anhand der topographischen Charakteristiken der beiden Standorte: Das Chalberstöckli ist Richtung Norden, Osten und Süden hin von Felswänden abgeschirmt. Bei westlicher Windrichtung bleiben die Wolken im Kessel hängen, was zu einem erhöhten Niederschlag führen kann. Bläst der Wind aus einer anderen Himmelsrichtung, können die Berge die Wolken etwas zurückhalten, wodurch es insgesamt zu weniger Niederschlag kommt. Die Wannenalp hat in den Grundzügen eine ähnliche topographische Struktur wie das Chalberalpli, jedoch grundsätzlich etwas offener und der Höhenunterschied zwischen "Talboden" und den Bergen rundherum ist geringer. Dies könnte dazu führen, dass die Winde aus allen Richtungen auf der Wannenalp weniger fest ausgesperrt werden, die Wolken aber trotzdem an den umliegenden Gipfeln hängen bleiben und es so zu mehr Niederschlag kommt. Dies sind jedoch nur Spekulationen und mögliche Erklärungen für die vorliegenden Werte; Beweise liegen

keine vor.

Eine weitere Erklärung für die Unterschiede in den Niederschlagssummen wäre, dass die Datenerhebung möglicherweise fehlerbehaftet ist. Da die Daten der Station Wannenalp nicht eigenständig erhoben wurden, könnten weitere Faktoren die Messwerte beeinflusst haben, von welchen der Autor keine Kenntnis hat. Der auffällig tiefe Niederschlag im Jahr 2019 auf der Wannenalp, lässt vermuten, dass es möglicherweise ein Problem bei dieser Messstation gab. Auch bei der Chöplishütte ist das Jahr 2019 deutlich trockener als in Einsiedeln oder als das CPC berichtet. Dieser Unterschied ist auf den langen kalten Winter zurückzuführen, da in dieser Zeit die Station Chöplishütte keinen Niederschlag messen kann, weil er in Form von Schnee fällt.

### 5.1.3. Abfluss

Der hohe Abfluss im Frühsommer jedes Jahres ist auf das Einsetzen der Schneeschmelze zurückzuführen. Im Jahr 2020 steigt der Abfluss schon im Februar an, was aufgrund der verhältnismässig hohen Temperaturen zu dieser Jahreszeit nicht verwunderlich ist. Im Jahr 2019 ist es länger kalt, wodurch auch die Schmelze später beginnt (Klimadiagramme im Anhang A.6). Für die Jahre 2017 und 2018 fehlen leider Abflussdaten aus dem Frühjahr bis Ende März. Es ist zu erwarten, dass in dieser Zeit der Abfluss relativ gering ist, da der Niederschlag in fester Form fällt und die Temperaturen zu niedrig sind, sodass noch keine Schmelze stattfindet. Somit gibt es keinen Abfluss in den Einzugsgebieten, welcher die Fördermenge der Quellen steigern würde, es fließt nur der Basisabfluss.

Betrachtet man den Abfluss nicht kumulativ sondern in  $m^3/s$  (siehe Abbildung 4.14), sticht das Jahr 2018 wegen seiner langen Phasen mit niedrigem Abfluss hervor. In den anderen Jahren sinkt der Abfluss nach einem Niederschlagsereignis nicht so schnell wieder auf den Basisabfluss ab und meistens folgt bald darauf das nächste Ereignis, wodurch sich keine längere Phase mit niedrigem Abfluss abzeichnet. Dass der Abfluss nicht so schnell zurückgeht, liegt an den noch gefüllten unterirdischen Wasserspeichern. Im extremen Trockenjahr 2018 sind diese Speicher praktisch leer, weshalb sich der Abfluss kurz nach jedem Niederschlagsereignis wieder auf den Basiswert absenkt. Im Jahr 2020 wird der tiefste Basisabfluss der Messperiode registriert. Es ist unklar, ob dies eine langfristige Folge des Trockenjahres 2018 ist oder ob vielleicht sogar eine Veränderung im Karstsystem diesen Unterschied verursacht hat.

## 5.2. Unsicherheiten und mögliche Fehlerquellen

### 5.2.1. Farbtracer-Versuche

Die Farbtracer-Messungen wurden in erster Linie dazu verwendet, Verbindungen zwischen Bachschwinden auf der Chäseren und den Karstquellen zu identifizieren. Zu diesem Zweck reicht es, dass die Geräte eine erhöhte Konzentration des verwendeten Farbstoffs, im vorliegenden Fall Uranin oder Rhodamin WT, messen. Die genauen Werte der Konzentration sind in dem Fall nicht nötig. Unsicherheiten bezüglich des Nachweises der Farbstoff-Konzentration können praktisch nur durch eine fehlerhafte Platzierung der Geräte in den Quellen entstehen, denn die durchgeführte Kalibrierung zeigte, dass alle Geräte die Konzentrationen messen können. Nur falls ein Fluorometer nicht im Wasser lag, könnte es sein, dass es den Durchgang eines Farbstoffs verpasste, was jedoch nie der Fall war. Es wird davon ausgegangen, dass während den Farbtracer-Versuchen nur diejenigen Verbindungen aktiv waren, welche auch gefunden und aufgeführt wurden.

Im Kreuzloch und im Laueli wurden die gemessenen Konzentrationsverläufe zusätzlich zur Bestimmung des Abflusses verwendet. Dies erfolgte nach dem selben Prinzip wie bei der Salzverdünnungsmethode und wurde freundlicherweise von Martin Lüthi übernommen. Wie bei den Salztracer-Versuchen bräuchte es für eine sehr hohe Genauigkeit zu jeder Messung eine eigene Kalibrierung mit Wasser aus dem zu untersuchenden Gewässer, da Temperatur und pH-Wert einen Einfluss auf die Konzentration haben. Für die Fluorometer wäre dies aber sehr aufwändig und kaum umsetzbar, weshalb nur vor und nach der Messperiode jeweils eine Kalibrierung aller verwendeter Geräte durchgeführt wurde. Die berechneten Abflusswerte sind dementsprechend mit Vorsicht zu behandeln; insbesondere die erhaltenen Werte der Uranin-Messung am 6.10.2020 im Laueli, da dort zwei verschiedene Maxima gemessen wurden.

### Eingrenzung Einzugsgebiet

Bei den Bächen war es schwierig abzuschätzen, in welchem Umkreis sie entwässern oder ob es gar diffuse Schwinden im Bachbett hat, welche fortlaufend einen Teil des Abflusses ins unterirdische Karstsystem ableiten. Führen die Bäche wenig Wasser sind solche Schwinden bemerkbar, bei höherem Abfluss und wenn die Schwinden nur wenig Wasser schlucken, sind sie nur schwer erkenntlich. Der Weglosenbach verläuft nahe der Bachschwinde bei der Chöplishütte und überquert vermutlich eine Verwerfung. Ein Farbtracer-Versuch unter- und oberhalb der Brücke zwischen Drusberg- und Chöplishütte könnten weitere Erkenntnisse über das Einzugsgebiet des Kreuzloch liefern.

Eine der beprobten Schwinden im Gebiet der Guggerenhütte liegt in einem Bachbett. Ob es

entlang des gesamten Bachverlaufes immer wieder diffuse Schwinden hat, ist schwer zu sagen aber durchaus möglich. Wie weit ins Tal das Einzugsgebiet des Laueli reicht, kann deswegen aktuell nicht mit Bestimmtheit gesagt werden, es dürfte sich aber mit hoher Wahrscheinlichkeit noch einige Meter tiefer als die beprobte Schwinde oberhalb der Guggerenhütte erstrecken. Im Westen hat es weitere Bachläufe unterhalb des Grossen Sternens, welche nicht untersucht wurden. Auch hier könnte es Schwinden geben, welche ins Laueli entwässern.

### 5.2.2. Niederschlag

Die Niederschlagsmessgeräte können Niederschlag nur bis maximal 240mm pro Stunde aufzeichnen, da die Kippbewegung nur alle 3 Sekunden registriert werden können (Angaben des Herstellers, persönliche Quelle). Gerade bei einem Gewitter können Fliessraten von mehr als 4 Milliliter alle 3 Sekunden durchaus erreicht werden. Es ist demnach gut möglich, dass die Messungen den tatsächlichen Niederschlag unterschätzten. Wie gross diese Abweichung sein könnte, lässt sich nur schwer abschätzen. Im Vergleich mit den Niederschlagsdaten aus anderen Quellen, CPC und SLF Station Wannenalp, sind die Werte der Station Chöplishütte jährlich um 100 bis 300 Millimeter zu tief.

Die Montage der Geräte kann ebenfalls zu ungenauen Messresultaten führen. Das Gerät muss möglichst waagrecht befestigt werden, damit die integrierte Kippwaage problemlos funktioniert und sollte mindestens 1 Meter über dem Boden sein. Falls kein Pfosten eingeschlagen werden kann, können die Geräte auch in Bodennähe montiert werden, sofern sie fixiert werden können (persönliche Kommunikation). Dies wurde so für alle installierten Niederschlagsmesser umgesetzt (Fotos im Anhang, A.4), jedoch ist der Pfosten, an welchem die Station Sädel befestigt war, in Schräglage geraten. Dies ist höchstwahrscheinlich der Grund, warum diese Station seit 28. September 2020 um 15:30 keine Messwerte mehr lieferte (siehe Bild A.4 im Anhang).

Das Hauptproblem der Kalibrierung der Niederschlags-Messgeräte bestand darin, dass das Wasser sehr langsam in den Trichter hineingegeben werden muss, weil die Geräte nur alle 3 Sekunden eine Kippbewegung registrieren können. Zudem ist die Kippwaage im Gerät eher klein und fasst nur zwischen 4 und 5 Milliliter, bevor sie kippt. Es braucht also entsprechend tiefe Fliessraten. Um diese zu erreichen wurde ein Plastiksack über den Messgeräten aufgehängt und mit einer Nadel sehr kleine Löcher hineingestochen (siehe Bild 3.3). Ein weiteres Problem war, dass unterschiedliche Mengen Wasser getestet werden sollen, aber durch die unterschiedlichen Druckverhältnisse im Plastiksack das Wasser bei grösseren Mengen und somit höheren Druck zu schnell in den Trichter geflossen ist. Um dies zu verhindern wurden weniger und kleinere Löcher in den Plastiksack gestochen. Nun floss das Wasser bei den grösseren Wassermengen (400 Milliliter) in einem guten Tempo, jedoch sobald die Wassermenge im Plastiksack abnahm, reichte der Wasserdruck nicht mehr aus, das verbleibende Wasser aus dem Beutel zu pressen.

## 5. Diskussion

Deswegen wurden in der Folge wieder etwas grössere Löcher verwendet.

Die wahrscheinlichste Erklärung für die Abweichung bei den grösseren Wassermengen ist, dass trotz der getroffenen Massnahmen die Fliessgeschwindigkeiten durch den höheren Druck zu hoch waren, sodass mehr als 4 Milliliter pro 3 Sekunden in die Waagschale floss und als Folge einige Kippvorgänge nicht gemessen werden konnten. Beeinflusst hat dies die Messwerte zum Glück nicht, da die vom Hersteller angegebene Menge von 0.2mm pro Kippvorgang für die Umrechnung verwendet wurde.

Die Genauigkeit des Radarprodukts wird dadurch gemindert, dass die räumliche Auflösung  $1\text{km}^2$  beträgt, wodurch eine leichte Ungenauigkeit entsteht. Diese Ungenauigkeit wird kleiner als die Abweichungen der anderen Niederschlagsquellen eingeschätzt, weshalb das CPC hauptsächlich zur Speicherberechnung verwendet wurde.

### 5.2.3. Abfluss

Die Abflussmessungen selbst sind sehr präzise, da die eingesetzten Geräte mit hoher Präzision und geringem Fehlerbereich messen. Es besteht aber die Möglichkeit, dass aufgrund des Messstandortes nicht der gesamte Abfluss gemessen wurde. Beispielsweise kann in einer Höhle nur ein begrenztes Volumen durchfliessen, falls mehr Wasser in die Höhle hineinfliesst, wird es gestaut und es könnte ein Überlauf in ein anderes System entstehen und somit Wasser an dem Messgerät vorbei abfliessen. Die Abflussmessung im Kreuzloch liegt in einer solchen Höhle. Weiter können durch die Umrechnung von Druck zu Abflusswerten Fehler entstehen. Die Abflusskurven stimmen grundsätzlich sehr gut mit denen der Minster bei Euthal überein (siehe Anhang A.5), weshalb davon ausgegangen werden kann, dass allfällige Fehler keinen nennenswerten Einfluss auf die Daten hätten. Die Übereinstimmung ist in den Sommer- und Herbstmonaten sehr hoch, im Frühling während der Schmelzperiode ist sie geringer, da der Abfluss während dieser Zeit weniger vom Niederschlag, sondern mehr von der verfügbaren Menge an Schnee abhängig ist.

Die durchgeführten Abflussmessungen anhand der Salzverdünnungsmethode sind essenziell für eine korrekte Umrechnung von den gemessenen Druckwerten zum Abfluss. Der Knick in der Kalibrierungskurve des Versuchs beim Riedloch am 7.7.2020 kann verschiedene Gründe haben. Möglich ist, dass eine etwas grössere Menge der Sekundärlösung bei diesem Kalibrierungsschritt hinzugefügt wurde. Da die Kurve nachher jedoch wieder fast linear weiter läuft, müsste im nächsten Schritt um gleichviel weniger Sekundärlösung hinzugefügt worden sein. Eine weitere Erklärung ist, dass die Lösung nicht genügend gut vermischt wurde, zum Zeitpunkt als der Wert der elektrischen Leitfähigkeit abgelesen wurde. Wird danach die Lösung jedoch gut umgerührt, so liegen die folgenden Werte trotzdem wieder auf einer Gerade. Die Durchgangskurve

## 5. Diskussion

und der berechnete Abfluss für diesen Versuch sehen plausibel und realistisch aus.

Die Messung im Laeli am 9.10.2020 scheint fehlerhaft zu sein, denn die Durchgangskurve enthält sehr viele Schwankungen. Mögliche Erklärungen dafür sind, dass sich das Salzwasser noch nicht vollständig mit dem Bachwasser vermischt hatte, als es den Sensor passierte, oder dass ein Teil der Salzlösung in stillen Becken zurückgehalten wurde. Weiter könnten Luftblasen beim Sensor oder ruckartige Positionsänderungen des Sensors die grossen Schwankungen verursacht haben. Falls dadurch der grösste Peak verpasst oder abgeschwächt wurde, hat dies sicher einen Einfluss auf die Abflussberechnung und der angegebene Wert von 80 Litern pro Sekunde ist vermutlich zu tief.

Die am 15.04.2021 durchgeführten Abflussmessungen sehen im Grossen und Ganzen vertrauenswürdig und plausibel aus. Der Knick im Konzentrationsverlauf der Messung in den Töblere-Quellen könnte durch Luftblasen beim Sensor oder kurzzeitiges Entfernen des Sensors aus dem Wasser entstanden sein, die Auswirkungen auf den Abflusswert sind aber gering. Die Kurve der Messung im unteren Laelibach weist, wie schon einige Monate früher, teilweise beträchtliche Schwankungen auf, dieses Mal ist der Peak jedoch recht gut eingefangen worden. Wie oben erwähnt lassen sich die Schwankungen auf Luftblasen beim Sensor oder ruckartige Bewegungen, beispielsweise durch Zittern, erklären. Der angegebene Wert von 60 Litern pro Sekunde ist deshalb mit Vorsicht zu behandeln. Da in dieser Arbeit jedoch nur die Abflusswerte des Kreuzlochs für die Berechnungen der Wasserbilanz verwendet wurden, haben diese Ungenauigkeiten im Laelibach keinen Einfluss auf die Qualität der Wasserbilanz- und Speicherberechnung.

### 5.3. Diskussion der Wasserbilanzrechnung

Die zur Berechnung der Wasserbilanz angewandte Formel  $P = Q + Et + \Delta S$  ist einfach und vernachlässigt weitere Faktoren, wie beispielsweise Grundwasserflüsse. Nichtsdestotrotz ist sie eine gute Näherung und anhand der erhaltenen Werte können recht präzise Aussagen über ein Einzugsgebiet gemacht werden, sofern die Variablen möglichst genau bekannt sind. Dazu wurde in dieser Arbeit der Niederschlag grossflächig im Raum des vermuteten Einzugsgebiets und der Abfluss direkt in der Karstquelle gemessen. Wie weiter oben in diesem Kapitel besprochen, sind die vorhandenen Abflussdaten sicher vertrauenswürdig, leider sind im Jahr 2017 nur Abflusswerte zwischen März und Oktober, und im Jahr 2018 erst ab April vorhanden. Obwohl in dieser Zeit der Abfluss meistens sehr niedrig ist, stellt dies trotzdem ein erhebliches Problem für die Speicherberechnung dar. In dieser fehlenden Zeitspanne fällt nämlich der Niederschlag meistens in Form von Schnee, welcher längere Zeit liegen bleibt. Ohne die Abflussdaten können die Niederschlagsdaten während dieser Zeit auch nicht genutzt werden, ausser man würde einen Wert für den Abfluss annehmen, was in diesem Fall nicht gemacht wurde. Während der Schnee-

## 5. Diskussion

schmelze entleert sich dieser angesammelte Schneespeicher und der Abfluss steigt stark an. Die Wasserbilanz ist während dieser Phase stark negativ, weil deutlich mehr Wasser abfließt, als es gleichzeitig regnet. Da der als Schnee gefallene Niederschlag nicht in der Wasserbilanzrechnung auftaucht, ist die Speicheränderung sehr negativ. Die Jahre 2019 und 2020 sind zum Glück vollständig ohne Datenlücken vorhanden.

Bei den Niederschlagswerten enthalten die Daten der Stationen Chöplishütte und Wannenalp möglicherweise kleine Ungenauigkeiten. Zudem fehlen in diesen Datenreihen Niederschlagswerte für Schneefall, weil mit den verwendeten Messgeräten nur flüssiger Niederschlag gemessen werden kann. Schnee verstopft den Trichter der Niederschlagsmesser und kein Wasser passiert die Kippwaage. Schmilzt der Schnee im Trichter, verzeichnet der Logger dann zum Zeitpunkt der Schmelze etwas Niederschlag. Diese Menge entspricht aber in keiner Weise dem gesamten Schneefall, sondern nur dem Schnee, welcher im und auf dem Trichter liegen geblieben ist. Es wurde kurzzeitig versucht, anhand der gemessenen Schneehöhe an der SLF-Station Wannenalp die verlorene Menge an Niederschlag zu rekonstruieren. Dies wurde bald wieder aufgegeben, denn obwohl dies sicher irgendwie möglich gewesen wäre, hätte es den zeitlichen und auch inhaltlichen Rahmen dieser Masterarbeit gesprengt. Als zuverlässigste Quelle für den Niederschlag im Einzugsgebiet wird das Radarprodukt CPC angesehen.

Zur Hochrechnung des gemessenen Niederschlags auf das Einzugsgebiet musste dieses ebenfalls möglichst genau bekannt sein. Anhand der durchgeführten Farbracer-Versuche konnte dieses weiter präzisiert werden. Der Wert von  $3.67\text{km}^2$  ( $\pm 0.24\text{km}^2$ ) ist mit hoher Wahrscheinlichkeit sicher nicht zu tief. Es besteht aber durchaus die Möglichkeit, dass das Einzugsgebiet des Kreuzlochs noch grösser ist, als bisher angenommen. Die Evaporation wurde anhand verschiedener Quellen abgeschätzt und auf 20% des Niederschlags festgesetzt.

Die Wasserbilanzrechnung anhand des Niederschlags vom CPC für die Jahre 2019 und 2020 ist demzufolge das präziseste und zuverlässigste Resultat. Wird eine andere Datenquelle für den Niederschlag verwendet, so ist das Resultat ungenauer, da der Niederschlag unterschätzt wird. Die erhaltenen Werte für die Wasserbilanz der Jahre 2017 und 2018 sind leider kaum zu gebrauchen.

### 5.3.1. Evaporation

Die Evaporation zu messen war im Rahmen dieser Masterarbeit nicht möglich, weshalb verschiedene Literaturwerte für Evaporation im Untersuchungsgebiet verglichen und daraus ein Wert abgeleitet wurde. Barben et al. (2010), wie auch Frei et al. (2018) geben unabhängig voneinander ungefähr 20% des jährlichen Niederschlags als Evaporation an, wenn auch für ein leicht grösseres Einzugsgebiet als das Untersuchungsgebiet. Dadurch entsteht vermutlich eine geringe Abweichung zum tatsächlichen Wert der Evaporation. Menzel et al. (1999) hingegen gibt nur

15% des Niederschlags als Evaporation an. Da letztere Quelle deutlich älter als die ersten zwei ist und in der Studie die Evaporation schweizweit betrachtet wurde, wurde in dieser Arbeit der Wert von 20% des jährlichen Niederschlags als Evaporation festgesetzt. Eine in situ Messung würde sicher genauere Werte liefern als diese Annahme bieten kann. Da die gefundenen Quellen zwischen 10 und 20 Jahren alt sind, ist es durchaus möglich, dass sich die Evaporation über die Zeit verändert hat.

### 5.3.2. Speicher

Es wurden im Verlauf der Arbeit verschiedene Ansätze und Daten für die Berechnung des Speichers verwendet und lange machten die Ergebnisse keinen Sinn, da die Speicheränderungen für alle Jahre stark negativ ausfiel. Dadurch sind die unterschiedlich starken Einflüsse der verschiedenen Parameter auf die Berechnung deutlich geworden. Als erstes wurden die Niederschlagswerte der Station Chöplishütte verwendet (Abbildung A.10), was extrem negative Speicheränderungen ergab und sinnlos erschien. Daraufhin wurden die verschiedenen Parameter einzeln abgeändert, um herauszufinden, welcher den grössten Einfluss hat. Wird für das Einzugsgebiet den minimalen Wert genommen, ist die berechnete Speicheränderung noch negativer, mit dem maximalen Einzugsgebiet fürs Kreuzloch waren die Werte aber immer noch für alle Jahre negativ. Dann wurde der Niederschlag angepasst, indem die absoluten Werte der Station Chöplishütte wie beschrieben in 4.2.1 mit Faktor 1.27 multipliziert wurden, um den Niederschlag im Einzugsgebiet des Kreuzlochs besser zu entsprechen. Da dies auch nicht positive Speicheränderungen ergab, wurde kurzzeitig versucht, die fehlenden Winterniederschläge anhand der Schneehöhe gemessen an der SLF Station Wannenalp zu berechnen. Dies wurde rasch als zu aufwändig abgebrochen und das Radarprodukt CPC, welches den Winterniederschlag erfasst, wurde fortlaufend verwendet. Nun viel auf, dass die Datenreihen der Jahre 2017 und 2018 keine Abflusswerte im Winter enthalten. Somit verschob sich der Fokus auf die Jahre 2019 und 2020. Die erhaltenen Werte für die Speicheränderung sind in diesem Resultat nur noch knapp negativ (Abbildung 4.15). Wird die Berechnung nicht über das Kalenderjahr, sondern über das hydrologische Jahr (1. Oktober bis 30. September in der Schweiz) durchgeführt, wird die Berechnung noch etwas genauer (Abbildung 4.16). Bei der Berechnung über das Kalenderjahr kann es sein, dass Niederschlag im November oder Dezember, welcher bereits als Schnee fällt und somit zum Abfluss erst im nächsten Frühling beiträgt, nicht im korrekten Jahr miteinbezogen. Die Werte für die Speicheränderung der hydrologischen Jahre 2018/2019 und 2019/2020 anhand der Niederschlagsdaten vom CPC werden deswegen als am zutreffendsten angesehen. Der Verlauf der Speicheränderung stimmt mit dem Schneespeicher überein: im Herbst und Winter nimmt das Speichervolumen zu, während der Schmelzperiode im Frühling nimmt es dann stark ab und wird im Verlauf des Sommers langsam wieder aufgefüllt.

# Schlussfolgerung

Im Folgenden wird als erstes anhand der gewonnen Erkenntnisse auf die anfangs gestellten Forschungsfragen geantwortet. Wo die Beantwortung dieser nur teilweise möglich ist, wird anschliessend besprochen, wie diese Lücken geschlossen werden könnten. In Zusammenhang damit werden weitere Ausblicke für zukünftige Untersuchungen im Gebiet der Chäseren vorgeschlagen.

## 6.1. Beantwortung der Forschungsfragen

Die Einzugsgebiete der Karstquellen im hinteren Teil des Waagtals, welche hauptsächlich auf der Chäseren liegen, wurden anhand von Farbtracer-Versuchen genauer bestimmt. Vom Gebiet der Chöplishütte wurde eine Verbindung ins Kreuzloch nachgewiesen und es wurde festgestellt, dass der Raum um die Guggerenhütte ins Laueli entwässert. Weiter konnte von der südlichen Bachschwinde im Chalberalpli eine Verbindung ins Kreuzloch nachgewiesen werden und die bereits bekannte Verbindung vom Heuloch ins Kreuzloch wurde nochmals untersucht. Bei keinem der durchgeführten Versuche wurde eine Verbindung in eine der anderen untersuchten Quellen, Chäsloch und Krähloch, festgestellt.

Die Grösse der Karstquellen-Einzugsgebiete konnte nur im Fall des Kreuzlochs relativ genau angegeben werden. Für die Laueli-Quellen war es möglich, erste Teileinzugsgebiete zu erkennen. Das gesamte Einzugsgebiet des Laueli ist vermutlich noch viel grösser als die beiden gefundenen Teileinzugsgebiete (siehe Abbildung 4.5). Das Einzugsgebiet beträgt mindestens  $0.25\text{km}^2$ , könnte aber ohne Probleme auch  $1.35\text{km}^2$  oder noch grösser sein. Für das Kreuzloch liess sich ein Einzugsgebiet von  $3.67\text{km}^2$  ( $\pm 0.24\text{km}^2$ ) relativ genau eingrenzen.

Die Wasserbilanz wurde anhand der Formel  $P = Q + Et + \Delta S$  berechnet, wobei P der Niederschlag, Q der Abfluss, Et die Evaporation und  $\Delta S$  die Speicheränderung ist. Als zuverlässigste Niederschlagswerte wurden die Daten des Radarproduktes CPC eingeschätzt, da die anderen Quellen, namentlich die Station im Untersuchungsgebiet bei der Chöplishütte und die SLF Sta-

## 6. Schlussfolgerung

tion Wannenalp kleine Ungenauigkeiten enthalten und den Schneefall im Winter nicht akkurat messen können. Als Evaporationswert wurde, basierend auf Literatur, 20% des Niederschlags verwendet. Die Abflusswerte sind von hoher Genauigkeit aber leider lückenhaft: Für die Jahre 2017 und 2018 fehlen in den Wintermonaten Daten, weil der Sensor zu dieser Zeit nicht in Betrieb war. Die Wasserbilanz fürs Einzugsgebiet der Kreuzloch-Quelle konnte deswegen leider nur für die hydrologischen Jahre 2018/2019 und 2019/2020 zuverlässig berechnet werden. Aufgrund der kurzen Zeitspanne ist keine aussagekräftige Angabe zur Veränderung der Wasserbilanz möglich.

Auch der Einfluss des Trockenjahres 2018 auf das Karstsystem kann nur schwer abgeschätzt werden, da keine Werte aus der Zeit vor 2018 bekannt sind. Betrachtet man die gefundenen Werte des Basisabflusses (siehe 4.2), so scheint der Einfluss der Trockenphase kaum Einfluss auf den Abfluss im Jahr 2019 zu haben. Auch kumulativ gesehen liegt der Abfluss im Jahr 2019 über demjenigen von 2018 (siehe Abbildung 4.13).

Über die Grösse der unterirdischen Wasserspeicher kann eine Mindestangabe gemacht werden, auch wenn leider keine Aussagen über die langfristige Speicheränderung der letzten Jahre oder über die genaue Grösse gemacht werden kann. Dazu ist die Datengrundlage zu kurz und lückenhaft. Die Wasserbilanzrechnung für die hydrologischen Jahre 2018/2019 und 2019/2020 (Abbildung 4.16) zeigt Schwankungen des Speichervolumens von - 0.5 Millionen Kubikmeter bis zu + 1.2 Millionen Kubikmeter im Jahr 2019, was bedeutet, dass mindestens ein Volumen von 1.7 Millionen Kubikmeter Wasser im Einzugsgebiet des Kreuzloch zwischengespeichert werden kann, was 1.7 Milliarden Liter entspricht.

Weil die Grösse der Wasserspeicher nicht genau bekannt ist, ist eine konkrete Aussage, wie schnell sich die Speicher wieder auffüllen, nicht möglich. Stimmen die berechneten Werte der Speicheränderung, so zeigt das Jahr 2018/2019 eine Abnahme des gespeicherten Volumens aufgrund der Trockenheit im Sommer 2018 und im Jahr 2019/2020 beginnen sich die Speicher wieder aufzufüllen. Weitere Daten aus den kommenden Jahren sind notwendig, um die gesamte Dauer bis zur vollständigen Auffüllung der Speicher zu erfassen.

Aussagen über eine allfällige Wasserknappheit auf der Chäseren und ob das Quellwasser zur Abschwächung dieser verwendet werden kann sind schwierig. Einerseits ist die untersuchte Zeitspanne zu kurz um langzeitige Veränderungen zu erkennen. Andererseits ist sehr schwer abzuschätzen, wie viel Wasser die Alpen verbrauchen. Während Trockenperioden führt das Kreuzloch zurzeit ungefähr 0.4 Liter pro Sekunde, was einem Volumen von 34'560 Liter Wasser pro Tag entspricht. Mit einem hydraulischem Widder könnte das Wasser effizient von der Quelle auf die Alp befördert werden. Ob diese Menge Wasser ausreicht und ob sich das finanziell lohnt, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden.

## 6.2. Ausblick

Die Einzugsgebiete der Karstquellen, speziell des Kreuzlochs konnten anhand der durchgeführten Farbtracer-Versuche genauer eingegrenzt werden. Über die Einzugsgebiete von Chäsloch, Krähloch, Töbleren und Laueli ist noch sehr wenig bekannt. Entlang der Verwerfungen bei der Chöplishütte und bei Sädel können die Grenzen der Einzugsgebiete genauer definiert werden und vermutlich grosse Flächen mit wenigen Versuchen den Quellen zugeordnet werden. Das Gebiet unterhalb des Chalberalpli konnte noch keiner Karstquelle zugeordnet werden. Tracer-Versuche in den verschiedenen Trockenrinnen in dem Gebiet könnten wertvolle Erkenntnisse liefern. Eine Untersuchung des Weglosenbachs scheint ebenfalls vielversprechend. Auch das Gebiet unterhalb der Drusberghütte könnte noch unbekannte unterirdische Verbindungen beispielsweise ins Chäsloch besitzen.

Um die lokalen Unterschiede des Niederschlags besser einzufangen, bräuchte es weitere Messgeräte im Untersuchungsgebiet. Vorgeschlagene Standorte wären Ried, beim Twäriberg, unterhalb des Grossen Sternen, bei der Guggerenhütte und auf dem Stöckli im Norden. Zudem müssten die Geräte über eine längere Zeit, beispielsweise während 2-3 Saisons in Betrieb sein. Durch die Messung des Schneefalls könnte die Datenlücke in den Niederschlagsdaten während den Wintermonaten adressiert werden. Alternativ kann auf das Radarprodukt zurückgegriffen werden, welches als zuverlässigste Quelle angesehen wird, auch wenn es aufgrund der räumlichen Auflösung eine leichte Unsicherheit enthält. Eine Messung der Evaporation an verschiedenen Standorten im Gebiet würde diesen Wert auf jeden Fall präzisieren, wodurch schlussendlich die Wasserbilanz genauer bestimmt werden kann.

Mit den oben genannten zusätzlichen Messungen kann die Qualität der Wasserbilanz sicher nochmals verbessert werden. Die in dieser Arbeit verwendeten Geräte können grundsätzlich weiter verwendet werden. Die Drucklogger, EC-Meter und Fluorometer überzeugten in ihrer Funktion. Falls eine verlässliche Quelle für Schneefallvolumen gefunden wird, wodurch dieser mit in die Wasserbilanz aufgenommen werden kann, können auch die Niederschlagsmessgeräte weiterhin verwendet werden. Sollte es eine kostengünstige Alternative geben, welche auch den Schneefall messen kann, so wäre dies für zukünftige Messungen sicher in Erwägung zu ziehen. Der Hauptgrund, warum in dieser Arbeit nur wenige Aussagen bezüglich Speicher und Veränderungen gemacht werden konnten, sind jedoch nicht ungenaue oder fehlerhafte Daten, sondern die lückenhaften Abflussdaten. Werden die bisherigen Messungen nahtlos weitergeführt, so werden in wenigen Jahren genügend Daten vorhanden sein, um die Wasserbilanz des Kreuzlochs längerfristig zu analysieren und Veränderungen sowie Trends zu beobachten. Somit könnte auch die Speicherkapazität genauer angegeben werden und zutreffendere Aussagen über Wasserknappheit und -verfügbarkeit auf der Chäseren werden machbar.

# Persönliche Quellen

Pierre-André Schnegg Leiter Albillia Sarl 2000 Neuchâtel

Felix Ziegler Schönau CH - 8825 Hütten Leiter Ingenieurbüro Ziegler

# Literaturverzeichnis

Albillia (o.D.). *GGUN-FL Fluorometer Users Manual*.

BAFU (2020). “Wird in der Schweiz das Wasser knapp? Warum der Klimawandel unseren Umgang mit dem blauen Gold verändert.” *Die Umwelt. Natürliche Ressourcen in der Schweiz*.

BAFU (2021). “Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft.” *Umwelt-Wissen*.

Barben, M., Hänggi, P., and Viviroli, D. (2010). “Wasserhaushalt ausgewählter mittelgrosser Einzugsgebiete 1961-2007.” *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Bundesamt für Umwelt, BAFU.

Baumgartner, A. (1983). *Der Wasserhaushalt der Alpen Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Gletscherspende im Gesamtgebiet der Alpen im Jahresdurchschnitt für die Normalperiode 1931-1960*. Oldenbourg, München.

Benischke, R. (2021). “Review: Advances in the methodology and application of tracing in karst aquifers.” *Hydrogeology Journal*.

Brunner, M. I., Björnsen Gurung, A., Zappa, M., Zekollari, H., Farinotti, D., and Stähli, M. (2019). “Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes.” *Science of the Total Environment*.

Bucher, D. (2015). “Karsthydrologie im Ybrig (SZ) Untersuchung der Bachschwinden und Quellen zwischen Waag- und Sihltal.” M.S. thesis, Universität Zürich,

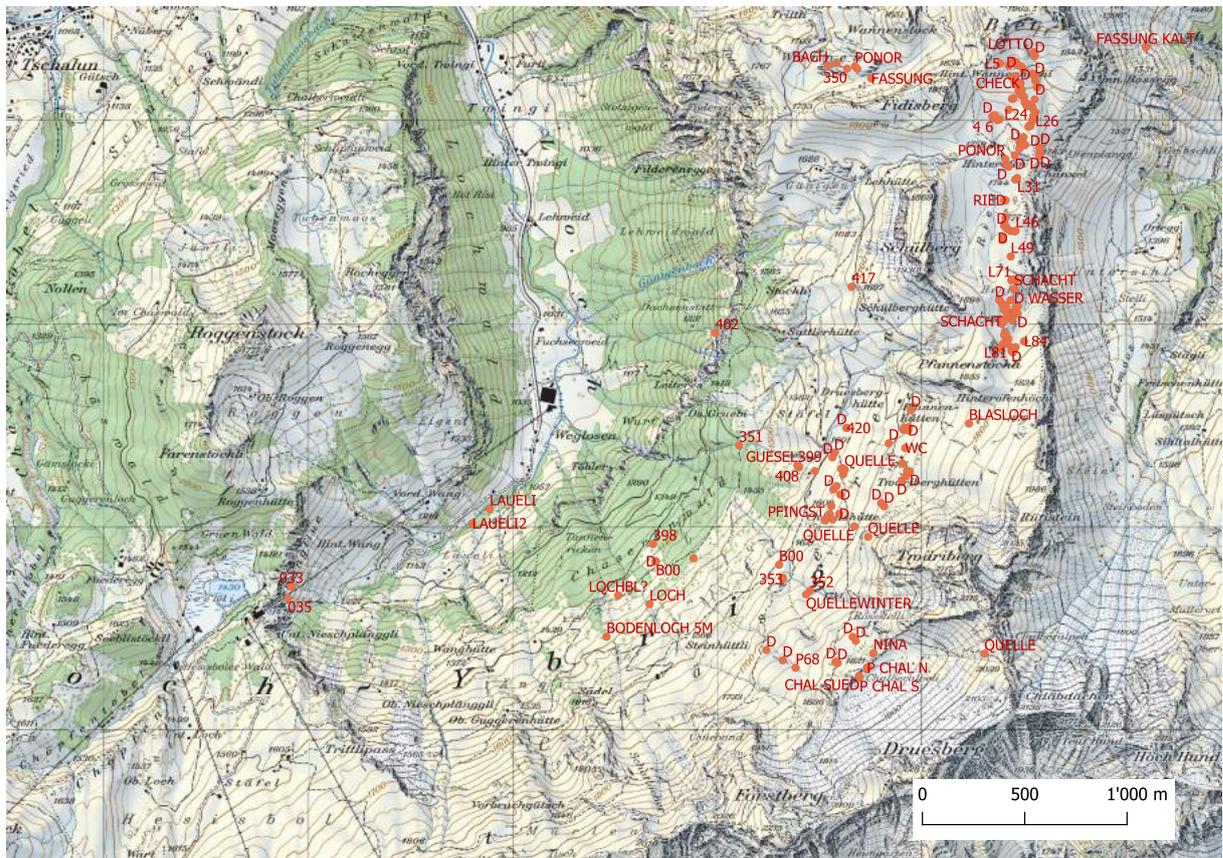
Chen, Z., Hartmann, A., Wagener, T., and Goldscheider, N. (2018). “Dynamics of water fluxes and storages in an alpine karst catchment under current and potential future climate conditions.” *Hydrology and Earth System Sciences*.

Dickert, A. (2015). “Kreuzloch (Unteriberg, Kt. SZ).” *Höhlenpost*.

- Dickert, A. (o.D.). “Chäsloch-dokumentation.
- Dickert, A., Weidmann, Y., and Lüthi, M. (O.D.). “Auf den Spuren der unterirdischen Wasserwege im Ybrig.
- Ewald, M. and Weidmann, Y. (O.D.). “Kurznachrichten Stalaktit 2021, keine Neuigkeiten aus dem Kräheloch.
- Ford, D. and Williams, P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley.
- Frei, C., Isotta, F. A., and Schwanbeck, J. (2018). “Mittlere Niederschlagshöhen 1981–2010.” *Daten- und Analyseplattform*, Hydrologischer Atlas der Schweiz.
- Goldscheider, N., Meiman, J., Pronk, M., and Smart, C. (2008). “Tracer tests in karst hydrogeology and speleology.” *International Journal of Speleology*.
- Käss, W. (2004). *Geohydrologische Markierungstechnik*. Borntraeger, Stuttgart, Germany (07).
- Lanz, K. (2020). “Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz.” *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz*, 43.
- Lüthi, M. P. (2019). “Stream Gauge Calibration of a Cave Stream Using Water Temperature Variability as a Tracer.” *Water Resources Research*, 5.
- Menzel, L., Lang, H., and Rohmann, M. (1999). “Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973-1992.” *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Bundesamt für Umwelt, BAFU.
- Merz, J. and Doppmann, G. (2006). *Measuring Mountain Stream Discharge Using the Salt Dilution Method*.
- MeteoSwiss (o.D.). *Hourly Precipitation Estimation through Rain-Gauge and Radar: Combi-Precip.*
- Metrohm Schweiz AG (o.D.). “912 Conductometer.” *Metrohm Homepage*, <<https://www.metrohm.com/de-ch/products-overview/ph-ionmeasurement/912-913-914-ph-condmeters/29120010>>. Aufgerufen am 15.8.2021.
- Meyer, R., Schädler, B., Viviroli, D., and Weingartner, R. (2011). “Klimaänderung und Niedrigwasser: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Niedrigwasserverhältnisse im Schweizer Mittelland für 2021-2050 und 2070-2099.” *Schlussbericht CCHydro*.
- Moore, R. (2003). “Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement: Part 1.” *Streamline Watershed Management Bulletin*, 7.

- Moore, R. (2005). "Slug injection using salt in solution." *Streamline Watershed Management Bulletin*, 8.
- NCCS (2021). "Schweizer Gewässer im Klimawandel." *National Centre for Climate Services, Zürich*.
- on Climate Change, C. F. E.-M. C. (2021). "Here comes the new generation of climate models: The future of rainfall in the alps." *phys.org*.
- RBR-Global (2019). *Small Two Channel Recorder: Temperature and depth, tides and waves*.
- Schnegg, P.-A. (2002). "An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with tracers and turbidity measurement." *Groundwater and Human Development*.
- Schudel, B., Biaggi, D., Dervev, T., Kozel, R., Müller, I., Ross, J. H., and Schindler, U. (2002). "Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie - Praxishilfe." *Berichte des BWG, Serie Geologie*, 3.
- Schädler, B. (1985). *Der Wasserhaushalt der Schweiz*. Landeshydrologie.
- Seibert, J. and Beven, K. J. (2009). "Gauging the ungauged basin: how many discharge measurements are needed?." *Hydrology and Earth System Sciences*.
- Sinreich, M., Kozel, R., Lützenkirchen, V., Matousek, F., Jeannin, P.-Y., Löw, S., and Stauffer, F. (2012). "Grundwasserressourcen der Schweiz - Abschätzung von Kennwerten." *Aqua & Gas*, 9, 16 – 28.
- Smart, P. L.; Laidlaw, I. M. S. (1977). "An evaluation of some fluorescent dyes for water tracing." *Water Resources Research*.
- Spreafico, M.; Weingartner, R. (2005). "The hydrology of Switzerland. selected aspects and results." *Water Series*.
- swisstopo (2021). "Kartenmaterial." *Bundesamt für Landestopografie*.
- Tagesanzeiger (2021). "2100 Jahre im Vergleich: Europa ist so trocken wie noch nie." *Tagesanzeiger*.
- TURNER DESIGNS (2020). *C3 and C6P Submersible Fluorometers User's Manual*.
- Zappa, M., Liechti, K., Deller, M., and Barben, M. (2017). "Wasserhaushalt der Schweiz 2.0." *Wasser Energie Luft*.

# Anhang



**Abbildung A.1.:** Von der Höhlengruppe Ybrig gefundene und kartierte Quellen, Bachschwinden, Blaslöcher und weitere interessante Strukturen

## A. Anhang

Volumen Bachwasser [ml]	Zugabe Sekundärlosung [ml]	elektrische Leitfähigkeit [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
100	0	630
100	10	647
100	20	661
100	30	678
100	40	684
100	50	692
100	60	701
100	70	707
100	80	711

**Tabelle A.1.:** Mischungsverhältnis und elektrische Leitfähigkeit der Kalibrierungslösung bei der Riedhöhle am 07.07.2020

Volumen Bachwasser [ml]	Zugabe Sekundärlosung [ml]	elektrische Leitfähigkeit [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
200	0	676
200	10	697
200	20	716
200	30	733
200	40	749
200	50	765
200	60	778

**Tabelle A.2.:** Mischungsverhältnis und elektrische Leitfähigkeit der Kalibrierungslösung im Laueli am 9.10.2020

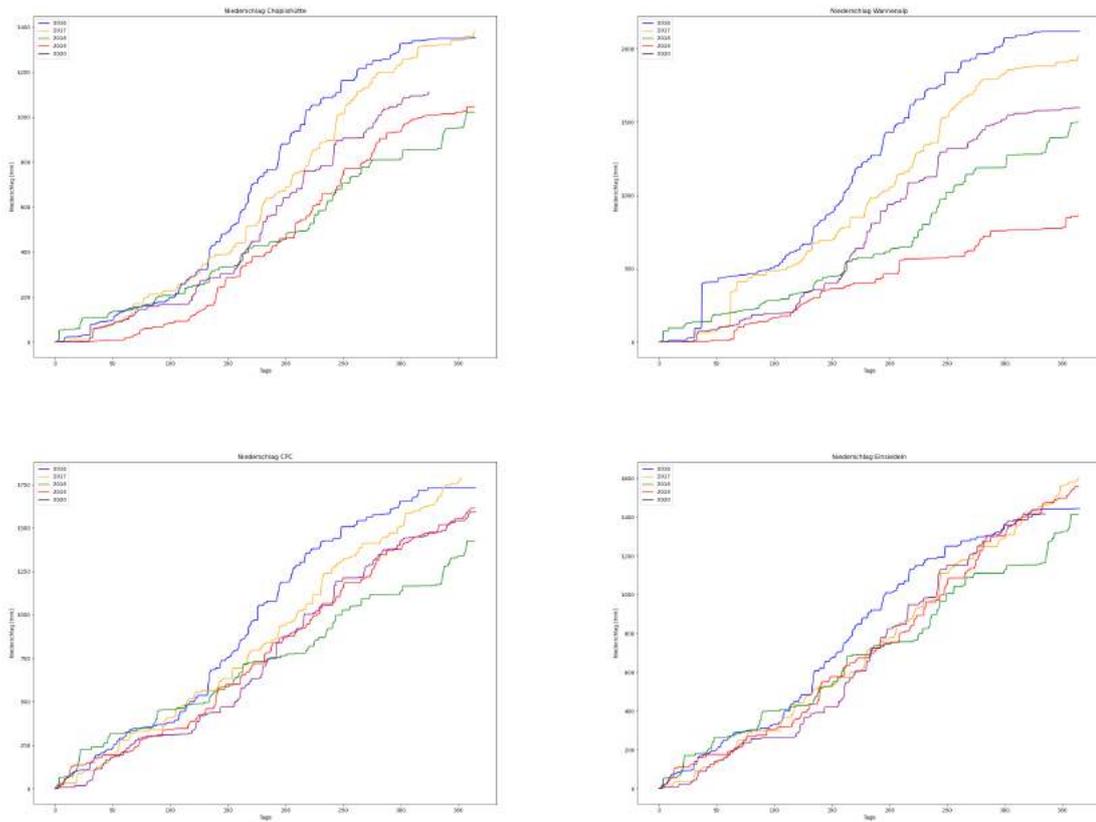
## A. Anhang

Volumen Bachwasser [ml]	Zugabe Sekundärlosung [ml]	elektrische Leitfähigkeit [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
100	0	694
100	10	729
100	20	759
100	30	784
100	40	806
100	50	826
100	60	842

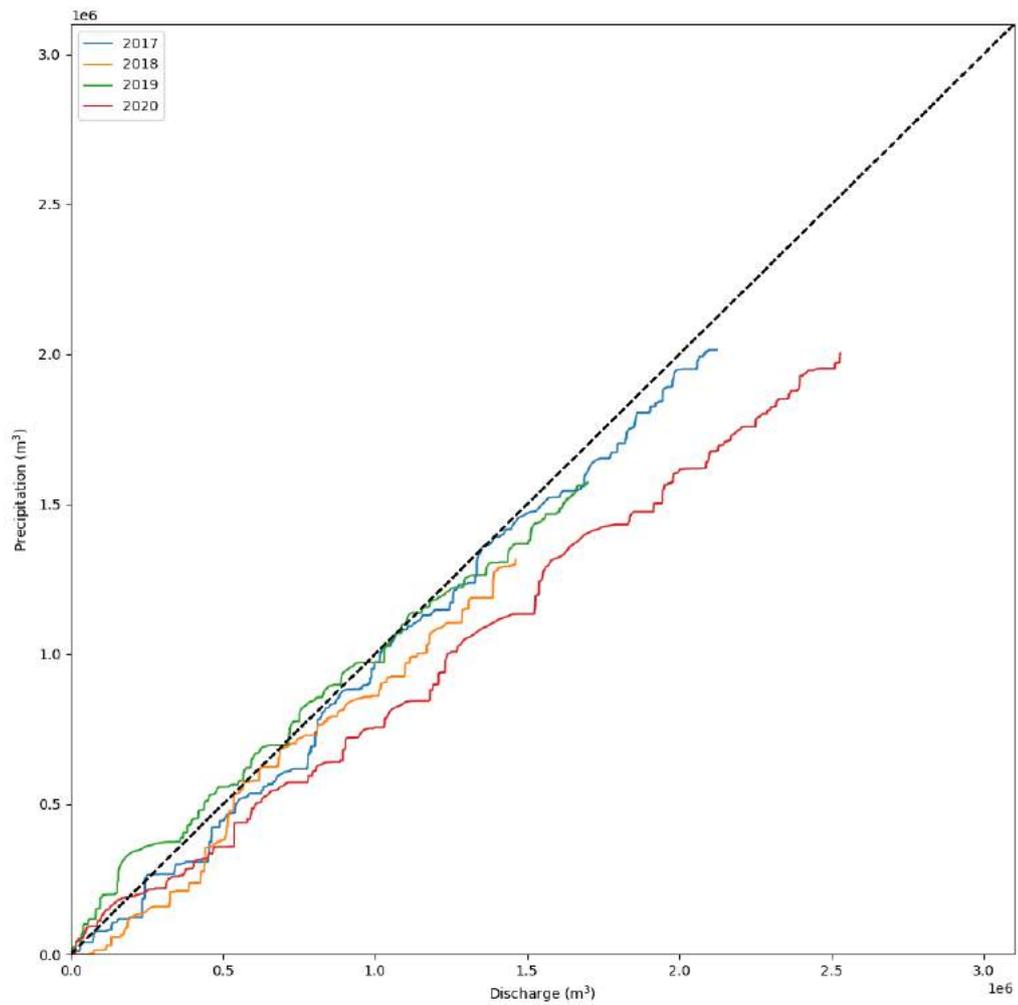
**Tabelle A.3.:** Mischungsverhältnis und elektrische Leitfähigkeit der Kalibrierungslösung im Laueli am 15.4.2021

Volumen Bachwasser [ml]	Zugabe Sekundärlosung [ml]	elektrische Leitfähigkeit [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
100	0	617
100	10	654
100	20	688
100	30	714
100	40	735
100	50	753
100	60	771

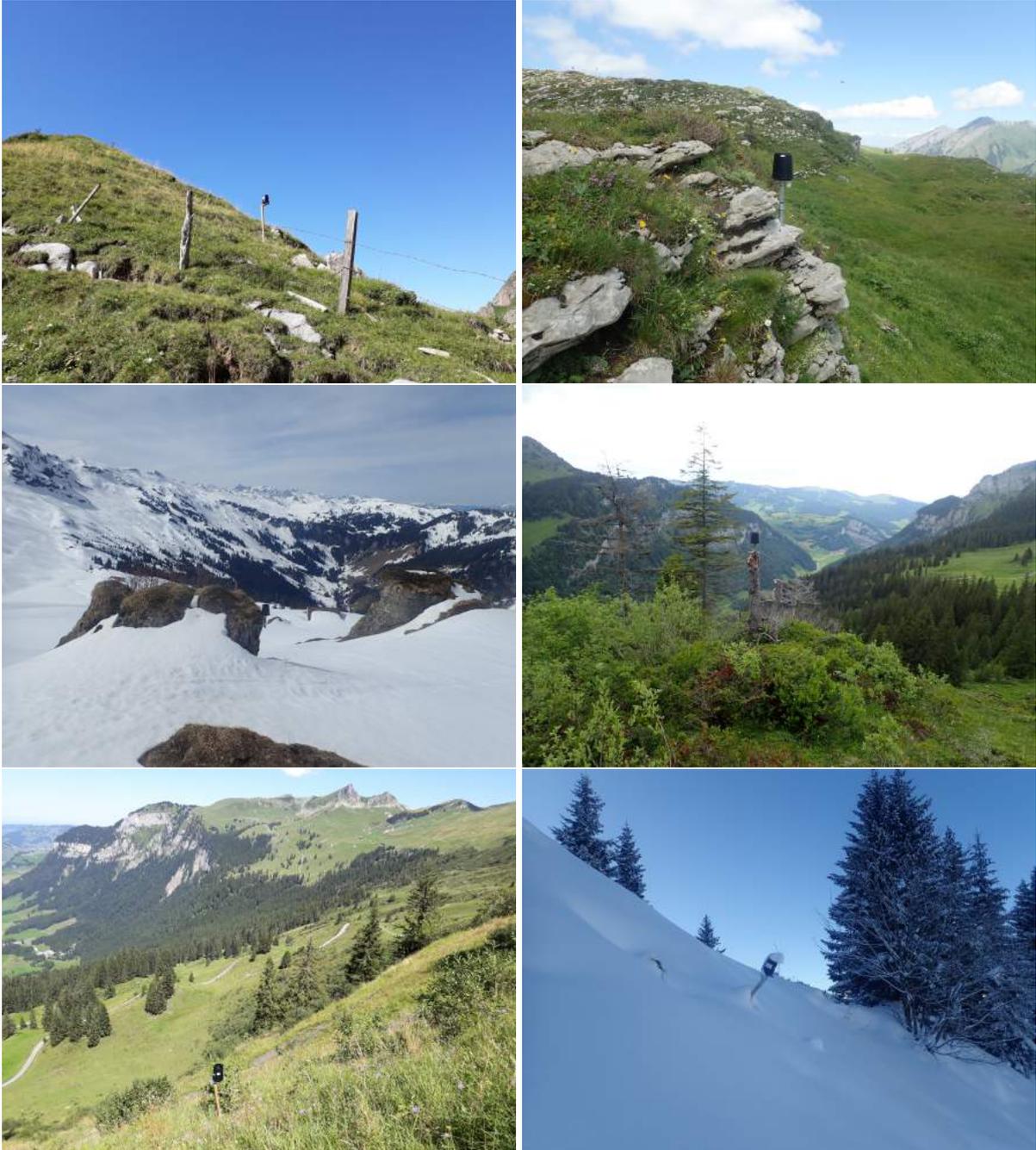
**Tabelle A.4.:** Mischungsverhältnis und elektrische Leitfähigkeit der Kalibrierungslösung bei der Töble-  
renquelle am 15.4.2021



**Abbildung A.2.:** Niederschlag im Untersuchungsgebiet gemessen an der Messtation CHAL bei der Chöplishütte, an der SLF Station Wannenalp sowie das Satelitenprodukt CPC. Die Jahre 2017-2020 im Vergleich.

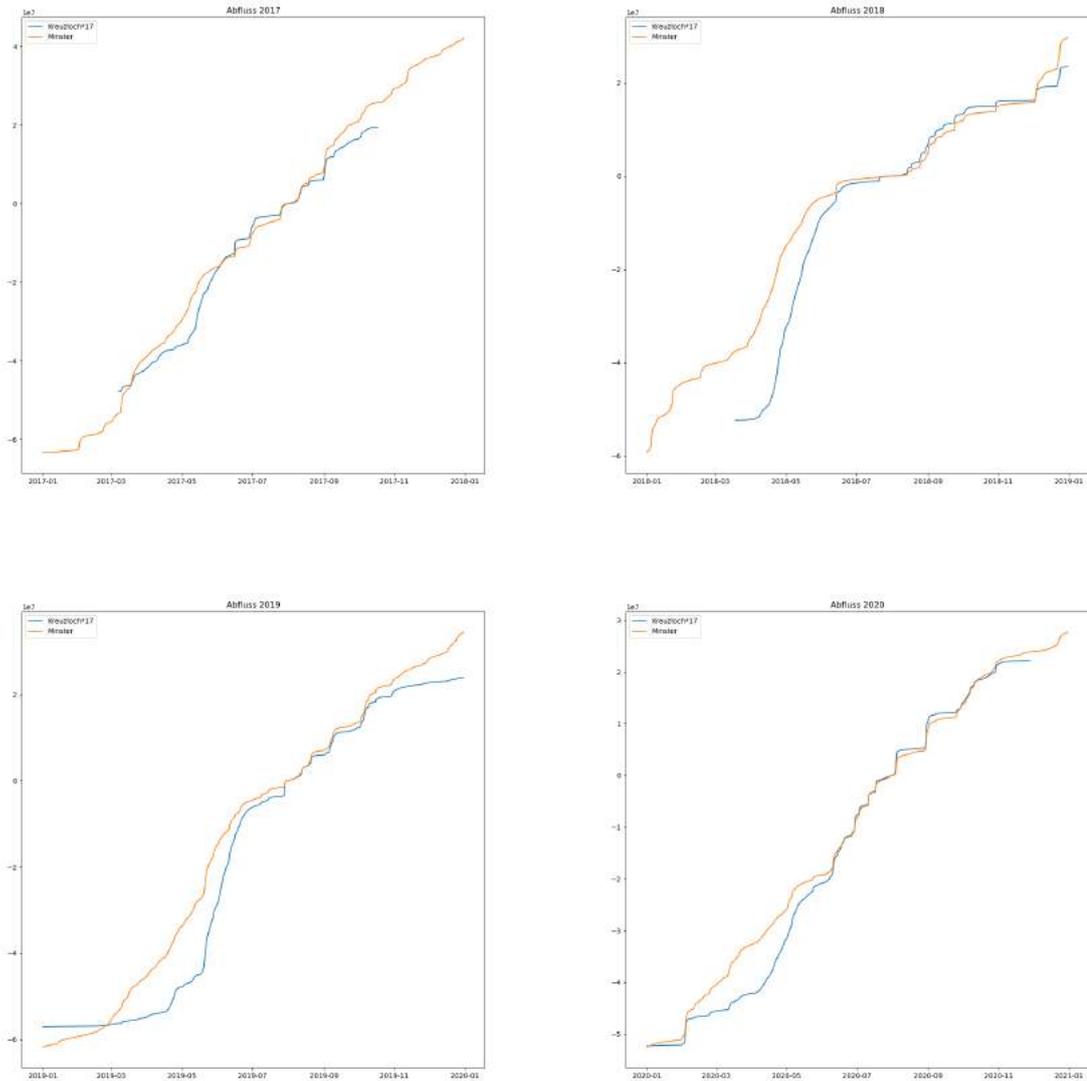


**Abbildung A.3.:** Niederschlag im Untersuchungsgebiet versus den Abfluss des Kreuzlochs, verglichen über die letzten Jahre.



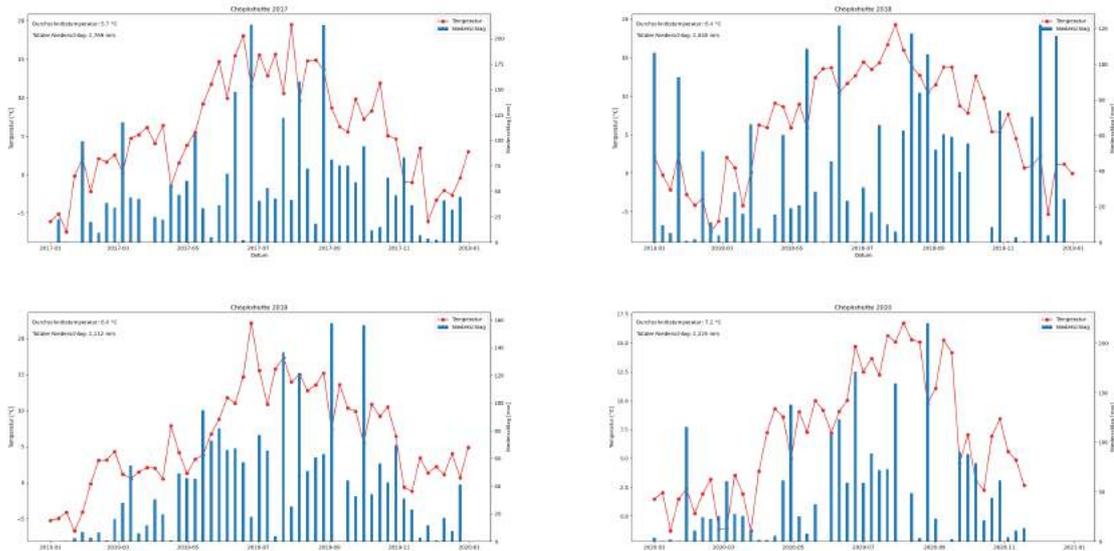
**Abbildung A.4.:** Alle im Untersuchungsgebiet installierten Neiderschlagsmesser. Oben links: Chalberstöckli, Oben rechts: Heuloch, Mitte links: Schülberghütte, Mitte rechts Chöplishütte, Unten links: Sädel, Unten rechts: Sädel in schräglage. Bilder von Martin Lüthi und eigene Aufnahmen.

## A. Anhang



**Abbildung A.5.:** Summierter Abfluss des Kreuzlochs und der Minster über die Jahre im Vergleich. Kreuzlochabfluss um das 17-fache erhöht.

## A. Anhang



**Abbildung A.6.:** Klimadiagramme der letzten 4 Jahre bei der Chöplishütte.



**Abbildung A.7.:** Bilder aufgenommen beim Chalberlapli. Bilder: Martin Lüthi

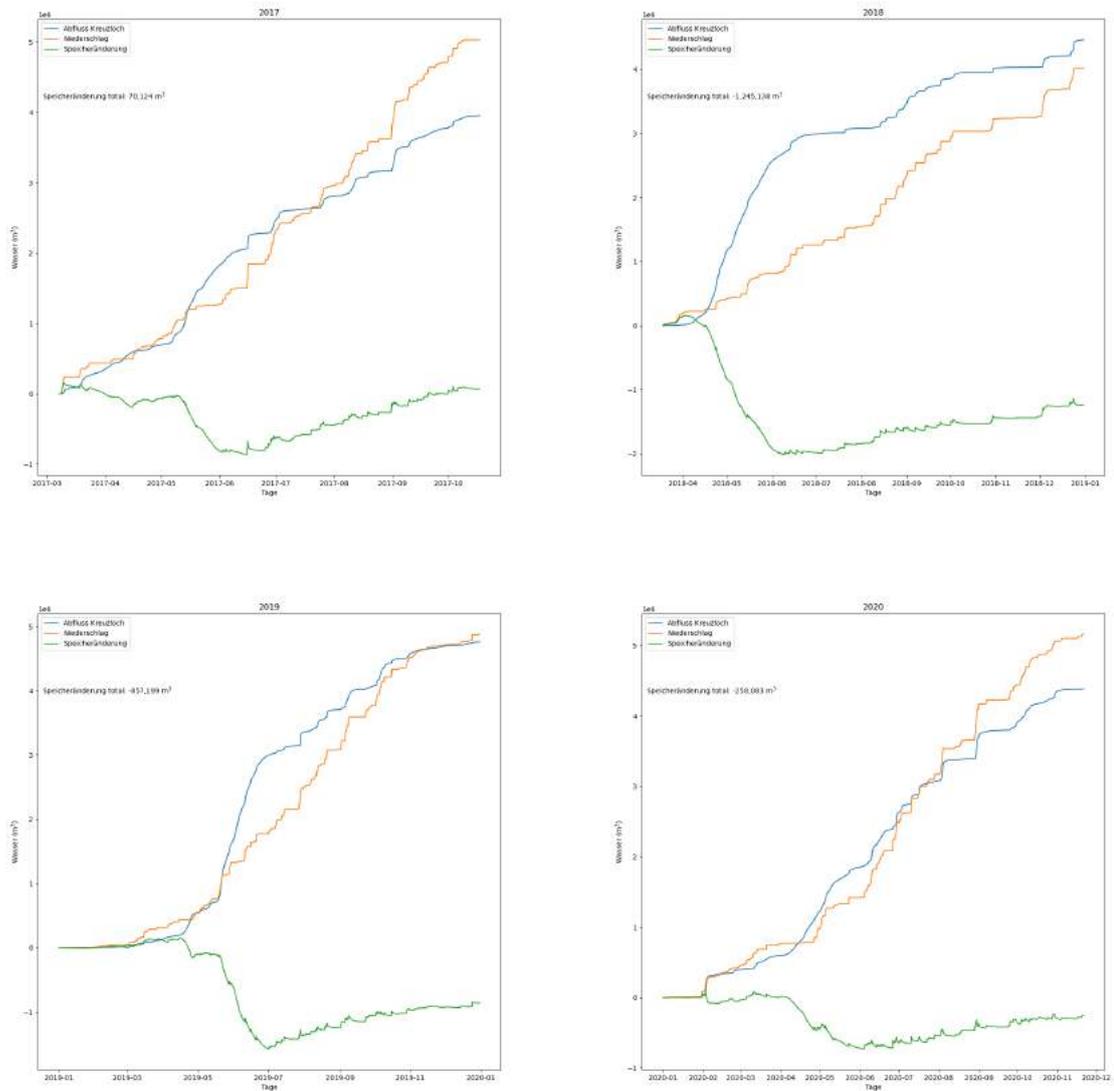


**Abbildung A.8.:** Unterschiedlicher Abfluss vom Chäsloch. Bilder: Martin Lüthi, eigene Aufnahme.



**Abbildung A.9.:** *Blinks: RBR Drucklogger, rechts: Turner C3 Fluorometer, montiert im Kreuzloch. Bilder: Martin Lüthi*

## A. Anhang



**Abbildung A.10.:** Der Abfluss beim Kreuzloch sowie der Niederschlag der Station Chöplishütte hochgerechnet auf das vermutete Einzugsgebiet vom Kreuzloch inklusive der berechneten Speicheränderung.

## Persönliche Erklärung:

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



Marius Luder

Zürich, 30. September 2021