

BACHELORARBEIT

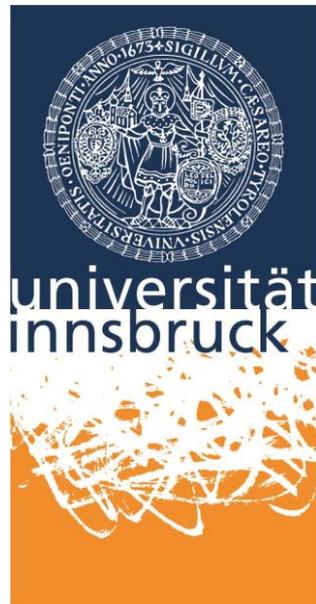
**HYDROGEOLOGISCHE UNTERSUCHUNG VON VIER AUSGEWÄHLTEN
QUELLEN AM FUSSE DES GUFFERT (BRANDENBERGER ALPEN, TIROL)**

SE/1 - 714.009

WINTERSEMESTER 2015/2016

INSTITUT FÜR GEOLOGIE

LEOPOLD-FRANZENS-UNIVERSITÄT INNSBRUCK



Betreuung:

Univ.-Prof. Mag. Dr. Christoph Spötl

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich beim Hydrographischen Dienst Tirol bedanken, welcher mir freundlicherweise die Daten zur Pulverermühl Quelle sowie die Niederschlagsdaten von Steinberg am Rofan zur Verfügung gestellt hat. Des Weiteren gilt mein Dank dem Labor der TU Graz für die chemische Analyse der Wasserproben. Einen ganz besonderen Dank möchte ich an Herrn Univ.-Prof. Mag. Dr. Christoph Spötl aussprechen, der mich bei den Geländebegehungen begleitet und bei der Datenerhebung sowie beim Verfassen der Bachelorarbeit unterstützt hat.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken (dazu zählen auch Internetquellen) entnommen sind, wurden unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Declaration of Originality

I hereby declare that this thesis and the work reported herein was composed by and originated entirely from me. Information derived from the published and unpublished work of others (including internet resources) has been acknowledged in the text and references are given in the list of sources.

Ort und Datum: Innsbruck, 22. Februar 2016

(Place and date)

Matrikelnummer: 1117459

(Matriculation number)

Vorname, Familienname: Markus Geier

(First name, surname)

Unterschrift: _____

(Signature)

Zusammenfassung

Das Guffertmassiv (Brandenberger Alpen) liegt nordöstlich des Achensees und ist Teil der Nördlichen Kalkalpen. Die vier Quellen befinden sich am West- bzw. Süden dieses Massivs und wurden im Zuge dieser Bachelorarbeit genaueren hydrogeologischen Untersuchungen unterzogen: Schüttung, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit sowie zweimalig (Oktober und Jänner) chemische Parameter der Quellwässer. Des Weiteren stand eine mehrjährige Datenreihe des Hydrographischen Dienstes Tirol zur Pulverermühl Quelle zur Verfügung.

Im gesamten Untersuchungsgebiet dominiert die Wettersteinformation, welche als überkippte Antiklinale (Guffert-Antiklinale) mit südfallender Faltenachse das Guffertmassiv aufbaut. Sie umfasst hauptsächlich den Wettersteinkalk, der in den Nördlichen Kalkalpen häufig als Grundwasserleiter fungiert.

Die Schüttungswerte der vier Quellen lagen zwischen 6 und 97 l/s und zeigten einen relativ starken Basisabfluss. Die elektrischen Leitfähigkeiten streuten alle im Bereich zwischen 200 und 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und blieben relativ konstant. Die Wassertemperaturen lagen relativ konstant zwischen 5 und 6,5 °C. Die Schüttungsquotienten (Q_{\min}/Q_{\max}) der Pulverermühl Quelle zeigten kleine Werte, was auf eine rasche Entleerung des Aquifers nach einem Niederschlagsereignis hinweist. Die quellenspezifischen Auslaufkoeffizienten der Pulverermühl Quelle ($\alpha = 0,2$ bis $0,3 \text{ d}^{-1}$) und die hydrologische Halbwertszeit ($t_{1/2} = 2,63 \text{ d}$) untermauern dies.

Die chemischen Analysen der Wasserproben zeigten, dass es sich ausschließlich um alkalische (basische) Wässer mit einem pH-Wert zwischen 8 und 8,4 handelt. Die Gesamthärte der Wasser konnte mit $< 8 \text{ }^\circ\text{dH}$ (bzw. $8,8 \text{ }^\circ\text{dH}$ für die Steinberg Ost Quelle) bestimmt werden. Es handelt sich also um weiche bis mittelharte Wässer. Das Verhältnis der Karbonathärte zur Gesamthärte betrug in allen Fällen 0,9. Die $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ -Verhältnisse streuten um 4:1. Das Verhältnis Erdalkalimetalle zu Hydrogenkarbonat betrug ca. 0,5:1, ein Indikator dafür, dass es zur Kalklösung durch CO_2 -Zufuhr gekommen sein muss. Die Wasserproben konnten allesamt als erdalkalisch-karbonatische Wässer, die während der Grundwasserneubildung im Aquifer überwiegend mit Ca-(Mg-)Karbonat in Kontakt standen, klassifiziert werden. Aufgrund leicht erhöhter Mg^{2+} -Gehalte wird teilweise dolomitierter Kalk im Aquifer vermutet.

Abstract

The Guffert massif (Brandenberger Alps) is located in the northwest of the Achen Lake and is part of the Northern Calcareous Alps. The four springs, located at the western and southern ends of the Guffert massif, were subjected to detailed hydrogeological analyses regarding discharge, temperature and electrical conductivity. In October and January the spring water was analysed chemically. Furthermore, there was a multi-year series of data of the Pulverermühl spring provided by the Hydrographischer Dienst Tirol.

The study area is dominated by the Wetterstein formation which functions as an overturned anticline (Guffert anticline) with a south-dipping fold axis. This formation mainly includes the Wetterstein limestone that often works as an aquifer in the Northern Calcareous Alps.

The discharge of the four springs was amounted to between 6 and 97 l/s and showed a relatively strong base flow. The electrical conductivity ranged from 200 to 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and remained relatively constant. The temperatures varied relatively constant between 5 and 6.5 $^{\circ}\text{C}$. The discharge ratios ($Q_{\text{min}}/Q_{\text{max}}$) of the Pulverermühl spring showed low values, which indicates a fast draining of the aquifer after a precipitation event. The spring-specific discharge coefficients of the Pulverermühl spring ($\alpha = 0.2$ to 0.3 d^{-1}) and the hydrological half-life ($t_{1/2} = 2.63 \text{ d}$) support this conjecture.

The chemical analyses of the water samples show that they are exclusively alkaline (basic) waters with pH values between 8 and 8.4. The total hardness of the samples could be determined with $< 8 \text{ }^{\circ}\text{dH}$ (except for the Steinberg Ost spring $8.8 \text{ }^{\circ}\text{dH}$). Therefore, they are soft to medium-hard waters. The ratio of carbonate hardness to total hardness was 0.9 in all cases; the ratio of Ca^{2+} to Mg^{2+} -ions ranged around 4:1. The ratio of alkaline-earth-ions to bicarbonate was about 0.5:1, which indicates lime solution by CO_2 . The water samples could all be classified as alkaline-earth-carbonate waters that interacted with Ca-(Mg)-carbonate during the groundwater recharge. Due to slightly elevated Mg^{2+} values partially dolomitized limestone is suspected in the aquifer.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	8
1.1. Ziel der Bachelorarbeit	8
1.2. Geographischer Überblick	8
1.3. Überblick über die geologische Situation	11
1.3.1. Die Nördlichen Kalkalpen	11
1.3.2. Geologie des Untersuchungsgebietes	16
2. Hydrogeologie	21
2.1. Quellenaufnahme	21
2.1.1. Die Untere Bergalm Quelle	21
2.1.2. Die Steinberg Ost Quelle	21
2.1.3. Die Pulverermühl Quelle	22
2.1.4. Die Schwarzbach Quelle	22
2.2. Die Wettersteinformation als Hauptaquifer	22
2.3. Klimatische Verhältnisse	24
2.4. Hydrophysikalische Parameter	25
2.4.1. Elektrische Leitfähigkeit	25
2.4.2. Schüttungsratenquotient & Trockenwetterfalllinie (TWL)	26
2.5. Hydrochemische Parameter	27
2.5.1. pH-Wert	27
2.5.2. Karbonathärte & Gesamthärte	27
2.5.3. Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht	28
2.5.4. Kationen und Anionen im Piper Diagramm	29
2.6. Hydrogeologisches Modell	30
2.6.1. Niederschlag	30
2.6.2. Verdunstung (Evapotranspiration)	30
2.6.3. Abfluss	31
3. Methodik	32
3.1. Allgemeines	32
3.2. Temperatur, Leitfähigkeit & Schüttung	33
3.3. pH-Wert	35
3.4. Karbonathärte	35
3.5. Wasserchemie	35

4.	Ergebnisse	36
4.1.	Untere Bergalm Quelle	36
4.1.1.	Hydrophysikalische Parameter	36
4.1.2.	Hydrochemische Parameter	37
4.2.	Steinberg Ost Quelle.....	39
4.2.1.	Hydrophysikalische Parameter	39
4.2.2.	Hydrochemische Parameter.....	40
4.3.	Pulverermühl Quelle.....	42
4.3.1.	Hydrophysikalische Parameter	42
4.3.2.	Hydrochemische Parameter.....	49
4.4.	Schwarzbach Quelle.....	51
4.4.1.	Hydrophysikalische Parameter	51
4.4.2.	Hydrochemische Parameter.....	52
4.5.	Sammelanalysen und Vergleich.....	54
4.5.1.	pH-Wert & elektrische Leitfähigkeit.....	54
4.5.2.	Äquivalentkonzentrationen bedeutender Ionen	55
4.5.3.	Ca-Mg-Verhältnisse	56
4.5.4.	Erdalkalimetalle-Hydrogenkarbonat-Verhältnis	57
4.5.5.	Wasserhärte (Gesamthärte & Karbonathärte)	57
4.5.6.	Die Wassertypen in der Übersicht	58
4.6.	Hydrogeologisches Modell	60
5.	Interpretation & Diskussion	62
6.	Literaturverzeichnis.....	67
7.	Abbildungsverzeichnis.....	70
8.	Anhang.....	71

1. Einführung

1.1. Ziel der Bachelorarbeit

Das Ziel dieser Bachelorarbeit war es zum einen, einen geologischen Überblick über das Untersuchungsgebiet zu erarbeiten. Zum anderen lag das Hauptaugenmerk darauf, vier ausgewählte Quellen am südwestlichen und südlichen Fuße des Guffert genaueren Beobachtungen zu unterziehen. Es wurde eine kurze Messreihe mit monatlichen Messungen zwischen Oktober und Jänner erstellt. Dabei wurde die Schüttung, die Temperatur, die elektrische Leitfähigkeit, sowie zweimalig (Oktober und Jänner) chemische Parameter der Quellen ermittelt. Anhand dieser Daten sowie einer mehrjährigen Datenreihe einer der Quellen, die vom Hydrographischen Dienst Tirol zur Verfügung gestellt wurde, sollte ein einfaches hydrogeologisches Modell erstellt werden.

1.2. Geographischer Überblick

Die untersuchten Quellen befinden sich südwestlich bzw. südlich des Guffert und sind in Abbildung 1 eingetragen. Der Guffert oder – wie in Abbildung 1 betitelt – die Guffertspitze ist ein Kalkmassiv mit einer Höhe von 2.194 m. Der Guffert ist Teil der Brandenberger Alpen, welche eine Untergruppe der Nördlichen Kalkalpen Tirols darstellen. Südlich des Guffert befindet sich die kleine Ortschaft Steinberg am Rofan. Sie liegt etwa 7 km westnordwestlich des Achensees und ist über das Achental und die Ortschaft Leiten über die Landesstraße L221 vom Nordwesten her zu erreichen und vom Osten über Brandenburg über eine Forststraße, die im Winter allerdings gesperrt ist.

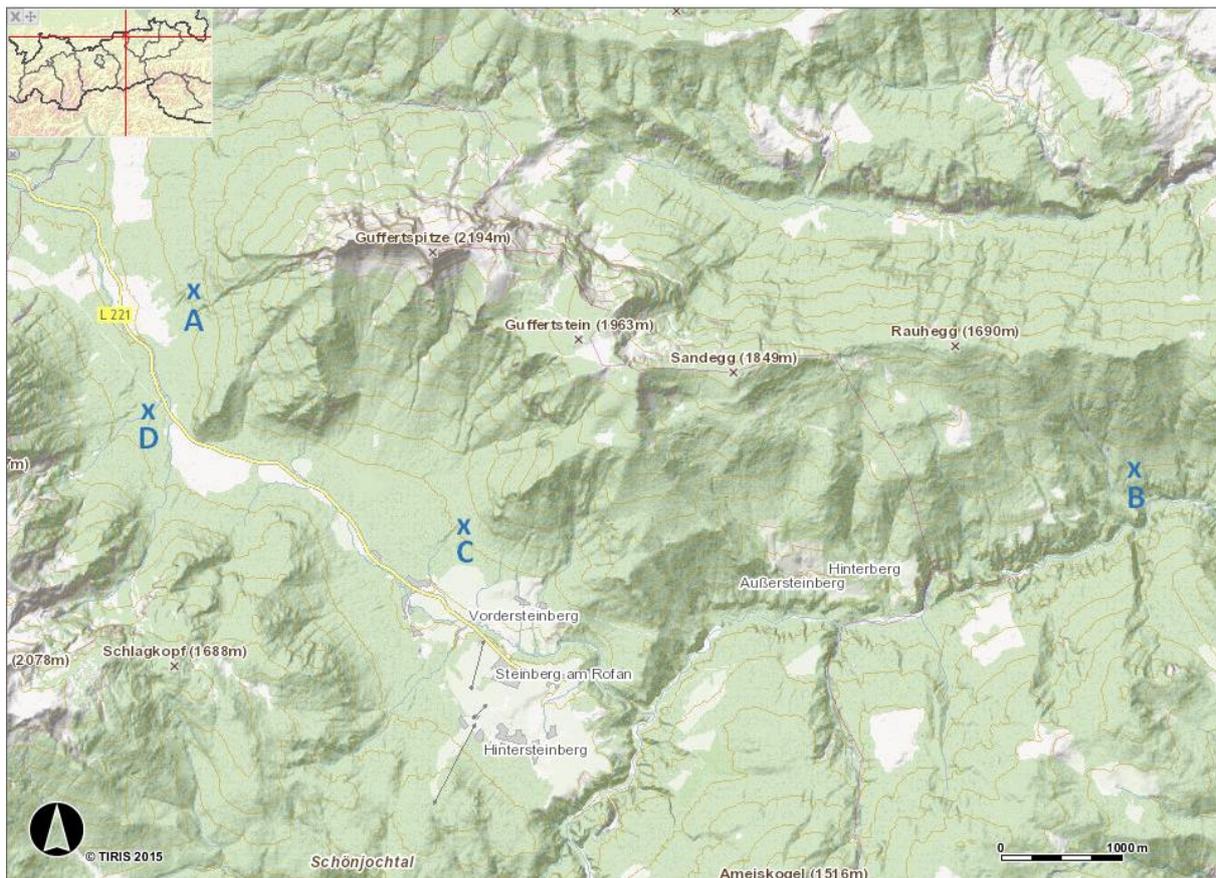


Abbildung 1: Lage der untersuchten Quellen südlich des Guffertmassivs. Links oben Lage des Untersuchungsgebietes im Fadenkreuz. Maßstab 1:40.000 (modifiziert nach tirisMaps 2.0, Land Tirol, 2016). Erklärung der Kürzel: A = Untere Bergalm Quelle, B = Steinberg Ost Quelle, C = Pulverermühl Quelle, D = Schwarzbach Quelle.

Insgesamt waren vier Quellen Gegenstand der Untersuchungen:

1. Untere Bergalm Quelle
2. Steinberg Ost Quelle
3. Pulverermühl Quelle
4. Schwarzbach Quelle

Die Untere Bergalm Quelle ist wie folgt zu erreichen: Direkt an der Landstraße L221 befindet sich das Haus Waldfrieden. Von hier aus erreicht man die Quelle, wenn man dem Forstweg etwa 350 m folgt und dann dem Wanderweg Richtung Guffertspitze etwa 10 min folgt.

Für die Untere Bergalm Quelle wurden folgende Koordinaten ermittelt (WGS84):

47° 32' 39" N 11° 45' 43" E (1.128 m)

Die Steinberg Ost Quelle ist die östlichste der untersuchten Quellen. Man erreicht sie von Steinberg aus über eine Forststraße, welche über Vorder Steinberg zur Gemeinde Brandenburg führt.

Für die Steinberg Ost Quelle wurden folgende Koordinaten ermittelt (WGS84):

47° 31' 47" N 11° 51' 59" E (939 m)

Zur Pulverermühl Quelle kommt man, wenn man beim Gasthaus Waldhäusl vorbei (Unterberg, Steinberg am Rofan) der Straße ca. 400 m nach Nord-Nordwest folgt. Hier kreuzen sich der Forstweg und der Bach, welcher ca. 100 m oberhalb entspringt (Pulverermühl Quelle). Wir finden hier neben der Quelfassung etwas unterhalb der Straße auch eine Messstation des Hydrographischen Dienstes.

Für die Pulverermühl Quelle wurden folgende Koordinaten ermittelt (WGS84):

47° 31' 27" N 11° 47' 22" E (1.052 m)

Die Schwarzbach Quelle ist die westlichste der untersuchten Quellen. Sie ist unmittelbar neben der Landstraße L221 zu finden.

Für die Schwarzbach Quelle wurden folgende Koordinaten ermittelt (WGS84):

47° 32' 5" N 11° 45' 27" E (1.030 m)

1.3. Überblick über die geologische Situation

Einführend wird ein kurzer Überblick über die geologische Situation (lokal, regional und überregional) gegeben. Alle im Kapitel 1.3. dargelegten Informationen entstammen der Literaturrecherche, da eine eigenständige geologische Kartierung im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgesehen war.

1.3.1. Die Nördlichen Kalkalpen

1.3.1.1. Allgemeines

Das Guffertmassiv gehört zu den Brandenberger Alpen, welche ihrerseits wiederum Teil der westlichen Nördlichen Kalkalpen sind. Die Nördlichen Kalkalpen werden zum Ostalpin, genauer zum Oberostalpin gezählt (Schmid et al., 2004). Das Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 1 markiert.

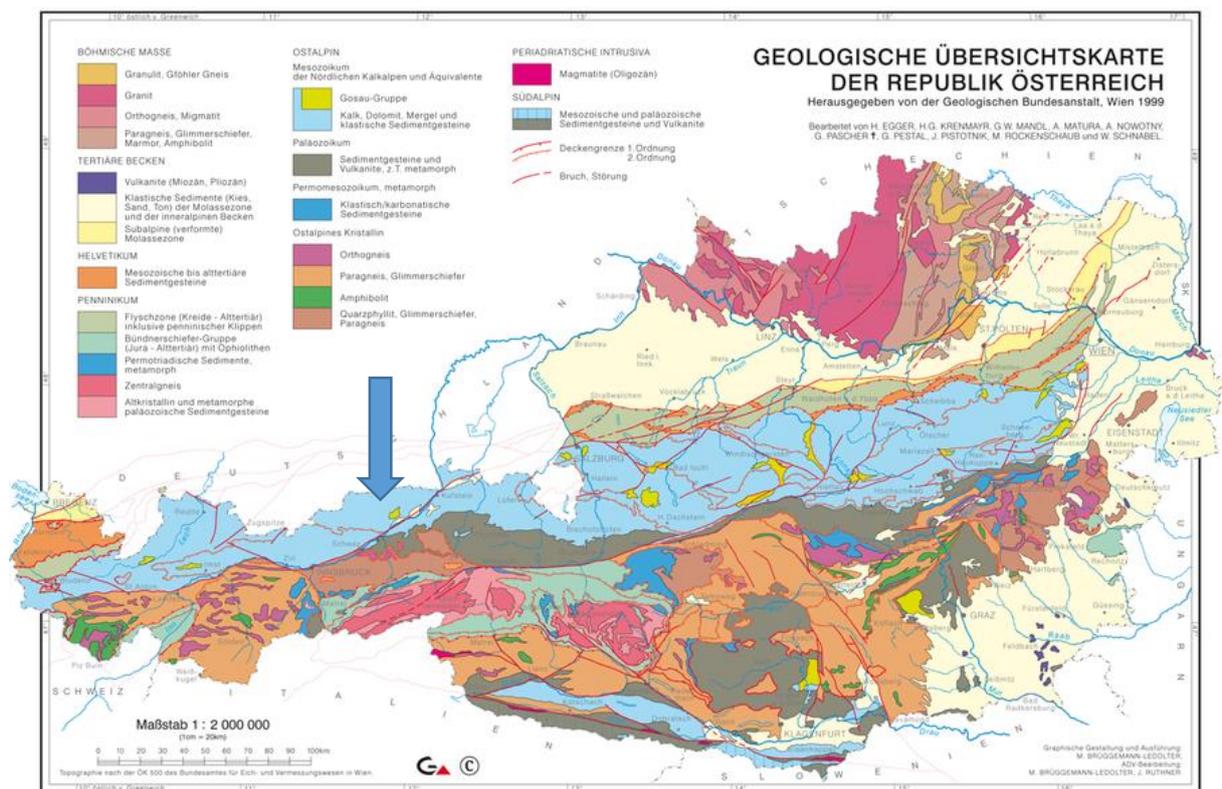


Abbildung 2: Geologische Übersichtskarte der Republik Österreich. Die Nördlichen Kalkalpen (und Äquivalente) sind an der hellblauen Farbe erkennbar. Das untersuchte Gebiet ist mit einem blauen Pfeil markiert. Maßstab 1:2.000.000 (modifiziert nach Geologische Bundesanstalt, 1999).

Die Nördlichen Kalkalpen überstrecken sich über ein 500 km langes und 20-50 km breites Gebiet vom Rheintal bis zum Wiener Becken. Die Zone der Nördlichen Kalkalpen liegt südlich des Alpenvorlandes und nördlich der Zentralalpen (Plöchinger, 1980). Im Osten wird sie vom Wiener Becken und dessen neogenen Sedimenten unterbrochen, findet allerdings östlich davon Fortsetzung in den Westkarpaten (Kröll et al., 1993). Die Nördlichen Kalkalpen fungieren als enormer Überschiebungsgürtel sedimentärer Gesteine, der im Norden auf die Rhenodanubische Flyschzone aufgeschoben wurde und im Süden auf dem variszischen Grundgebirge, der Grauwackenzone, auflagert (Mandl, 1999).

1.3.1.2. Kurzer Überblick der Stratigraphie

Die stratigraphische Abfolge reicht vom Perm bis in die untere Unterkreide. Danach treten größere Schichtlücken auf. Lediglich die Gosau-Sedimente, deren Ablagerungen nach einer Schichtlücke im Coniac beginnen und lokal bis ins untere Eozän reichen, und tertiäre Ablagerungen finden sich danach noch bisweilen (Tollmann, 1985). Die Nördlichen Kalkalpen sind eine Sedimentabfolge des passiven Kontinentalrandes am westlichen Schelf der Tethys (Tollmann, 1985; Mandl, 1999).

Die ältesten Ablagerungen der Nördlichen Kalkalpen können dem Perm zugeschrieben werden und gehen mit dem Zerbrechen von Pangäa einher. Die Gesteinsabfolge beginnt mit klastischen Serien im Perm, welche diskordant über dem variszisch überprägten Untergrund, der Grauwackenzone, liegen. Diese grob- bis feinklastischen Sedimente sind kontinentalen Ursprungs und verzahnen mit Evaporiten (Tollmann, 1985).

Den größten Beitrag zur stratigraphischen Abfolge der Kalkalpen lieferte die Trias. Die mächtigen Karbonatschichten prägen auch die heutige Morphologie. Während fein- und grobklastische Sedimente in den Hintergrund traten, wurden mächtige Karbonatplattformen gebildet. Das Ablagerungsmilieu der Trias-Karbonate war überwiegend flachmarin bis extrem seicht. Karbonatplattformablagerungen des Riff- und Lagunenbereichs sind die dominante Fazies der Trias. Felsbildend sind der Hauptdolomit und der Wettersteinkalk. Letzterer dominiert das Gebiet der im Zuge dieser Arbeit untersuchten Quellen und wird später noch genauer beschrieben. Das Ende der Riffbildung kann mit dem Ende der Trias datiert werden,

allerdings kam es im Jura nochmals zur Ausbildung von Riffen im Plassenkalk (Tollmann, 1985).

Mit dem Beginn der Kreide rückten die vorwiegend kalkigen Sedimente in den Hintergrund und mergelige sowie gröber-detritische Ablagerungen dominieren. Diese Ablagerungen gipfelten an der Kreide-Tertiärgrenze in einer flyschartigen höheren Gosau. Die Gosau-Serien sind noch in lokalen Becken erhalten, welche ursprünglich viel größer gewesen sein dürften. Die Kalkalpenkette war zu diesem Zeitpunkt nicht vollständig unter dem Meeresspiegel gesunken, sondern manifestierte sich durch Inselketten und tiefen Becken, die sich teilweise unterhalb der Karbonatkompensationstiefe befanden (Tollmann, 1985).

1.3.1.3. Überblick über die Tektonik und die Deckengliederung

Die Nördlichen Kalkalpen sind allochthon, das heißt, dass sie sich nicht mehr am Ort ihrer Entstehung befinden und auch keine Verbindung zu diesem haben (Prey, 1980; Tollmann, 1985). Sie wurden als tektonische Großeinheit des Oberostalpins weit nach Norden transportiert und dabei auf den penninischen Flysch aufgeschoben und im Tertiär gemeinsam auf das Helvetikum und die Molasse auf- und überschoben. Die Bestätigung, dass hier stratigraphisch ältere Schichten auf jüngere Schichten auflagern, liefern mehrere tektonische Flysch-Helvetikum-Fenster (zum Beispiel im Wolfgangseegebiet (Plöchinger, 1973)) innerhalb der Nördlichen Kalkalpen (Tollmann, 1985).

Die Nördlichen Kalkalpen zeigen einen Deckenbau, der seit den 70er Jahren nach vielen wissenschaftlichen Diskursen als bewiesen gilt (Tollmann, 1985). Er stellt das Resultat zweier Gebirgsbildungsperioden, die auch als alpidische Orogenese bezeichnet wird, dar (Prey, 1980):

1. Die ältere Gebirgsbildungsperiode erreicht ihren Höhepunkt im Turon (Oberkreide). Sie wird auch als altalpidische (oder vorgosauische (Prey, 1978)) Gebirgsbildungsperiode bzw. Orogenese bezeichnet. Die Ablagerungen des Apt, Alb und Cenoman (obere Unterkreide bis untere Oberkreide) zeigen altalpidische Ereignisse. Die transgredierenden Gosauschichten des Senons bis Eozäns liefern die Indizien für den Höhepunkt dieser Periode im Turon. Während dieser Periode

wurden die Nördlichen Kalkalpen auf das Mittelostalpin und den Resten permomesozoischer Sedimentbedeckung als Decken aufgestapelt (Prey, 1980).

2. Die jüngere Gebirgsbildungsperiode erreichte ihren Höhepunkt im Oligozän, darauf weisen jüngere tertiäre Ablagerungen hin. Sie wird auch als jungalpidische Gebirgsbildungsperiode bzw. Orogenese bezeichnet. Im Rahmen dieser Periode wurden die Nördlichen Kalkalpen auf den Rhenodanubischen Flysch, das Helvetikum und Teile der Molasse überschoben (Prey, 1980).

Die Nördlichen Kalkalpen werden schematisch und von tiefsten zu höchsten Deckensystem wie folgt untergliedert (Prey, 1980; Plöchinger, 1980; Tollmann, 1985):

- Juvavikum
 - Hochjuvavikum
 - Tiefjuvavikum
- Tirolikum
- Bajuvarikum
 - Hochbajuvarikum
 - Tiefbajuvarikum

Der westliche und für diese Arbeit relevante Teil der Nördlichen Kalkalpen wird im Wesentlichen in folgende großtektonische Deckensystemen vom Liegenden zum Hangenden untergliedert (westlich des Inntals) (Tollmann, 1969, 1985; Eisbacher & Brandner, 1996; Abbildung 3):

- Inntaldecke
- Lechtaldecke
- Allgäudecke

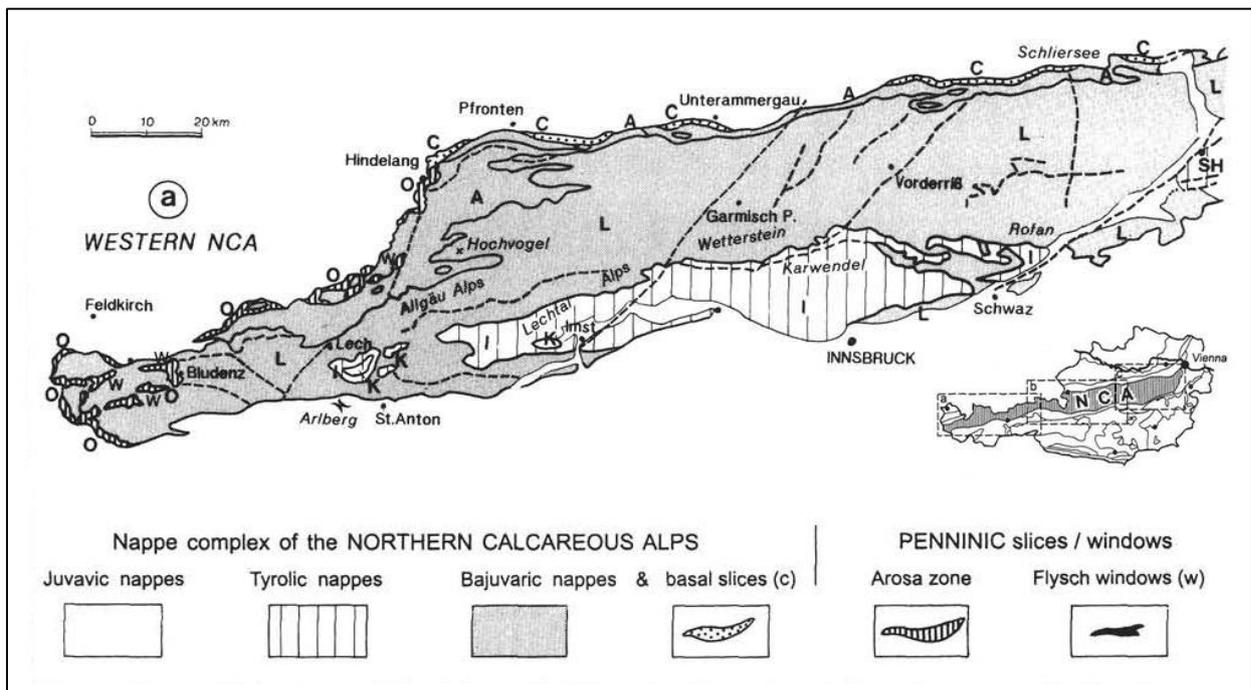


Abbildung 3: Der Westabschnitt der Nördlichen Kalkalpen (modifiziert nach Plöching, 1995). Erklärung der Kürzel: *Tirolikum*: K = Krabachjochdecke, I = Inntaldecke, SH = Stauffen-Höllengebirgsdecke, W = Warscheneckeinheit; *Bajuvarikum*: L = Lechtaldecke, A = Allgäudecke, C = Cenoman-Randschuppe, O = Arosazone (nach Mandl, 1999).

Die Allgäudecke (Tiefbajuvarikum) ist zusammen mit der Cenoman-Randschuppe (Tiefbajuvarikum) am nördlichen Rand der westlichen Kalkalpen aufgeschlossen. Sie zeigt eine relativ geringe Breite von 2,5 km. Die Lechtaldecke (Hochbajuvarikum) folgt südlich der Allgäudecke und manifestiert sich mit 30-40 km als mächtigste Einheit der westlichen Kalkalpen. Sie überlagert die Allgäudecke im Norden und tritt südlich mit der Grauwackenzone sowie der Landecker Phyllitzone und Phyllitgneiszone in Kontakt. Schüsselförmig eingelagert liegt die Inntaldecke (Tirolikum) und Krabachjochdecke (Tirolikum) auf die Lechtaldecke auf (Tollmann, 1969, 1985; Plöching, 1980).

1.3.2. Geologie des Untersuchungsgebietes

1.3.2.1. Geologische Karten

Die genaueste und aktuellste geologische Karte im Maßstab 1:25.000 ist die Karte „Geologie des nördlichen Achenseeraumes – ÖK 88 Achenkirch“, aufgenommen von Gruber et al. (2011; Abbildung 5). Allerdings umfasst dieses Kartenblatt lediglich den Bereich der Unteren Bergalm Quelle, die Pulverermühl Quelle und die Schwarzbachquelle. Für die Steinberg Ost Quelle wurde die GEOFAST Karte „89 Angath“ (Abbildung 4) im Maßstab 1:50.000 herangezogen, da eine genauere Karte für das Gebiet ÖK 89 nicht verfügbar ist.

Für die Untere Bergalm Quelle, die Steinberg Ost Quelle sowie für die Pulverermühl Quelle stellen die Gesteinseinheiten des Guffertmassivs den Aquifer dar, für die Schwarzbach Quelle die des Hinterunnutz. Daher soll kurz auf die Geologie dieser beiden Berge eingegangen werden.

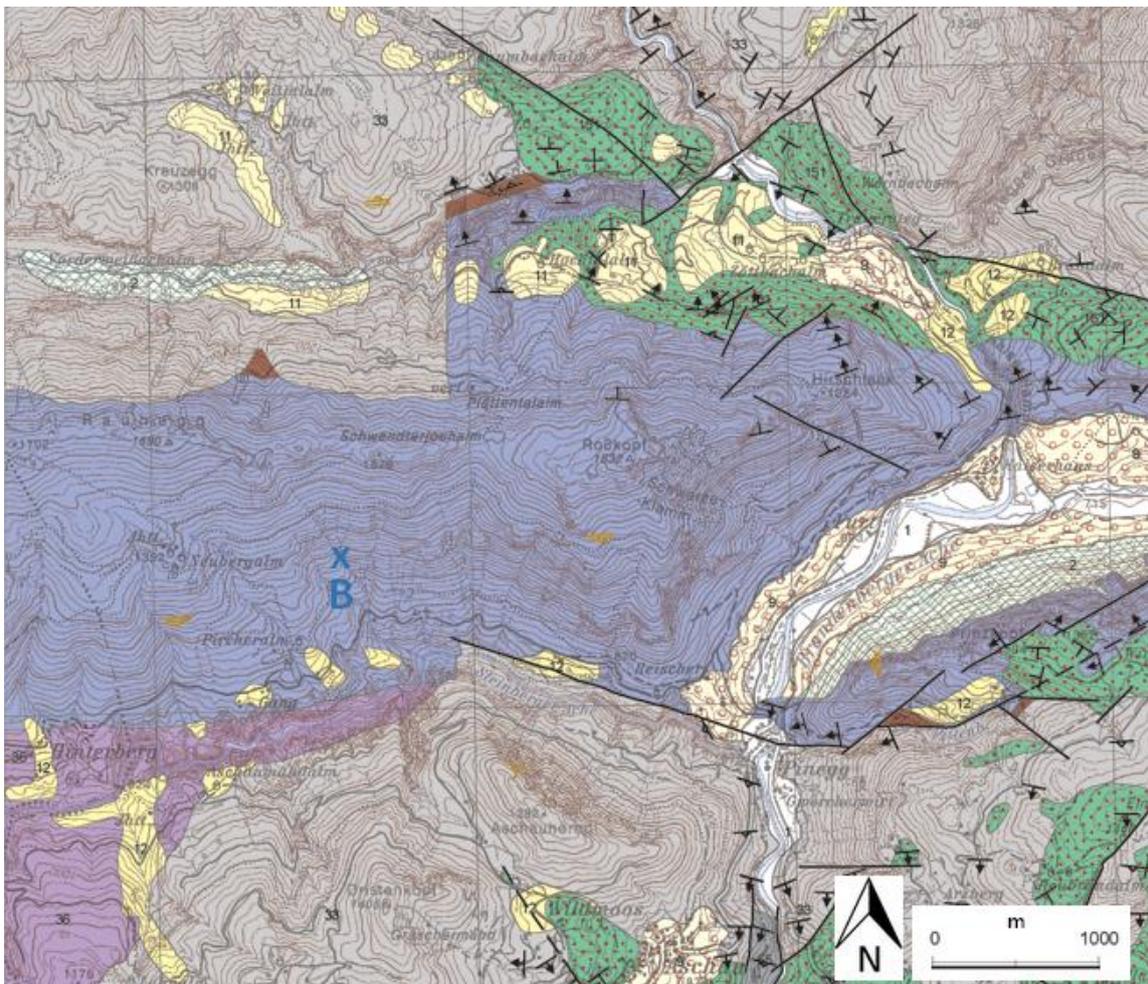


Abbildung 4: GEOFAST Karte „89 Angath“ im Maßstab 1:50.000 (modifiziert nach Geologische Bundesanstalt, 2007). B = Steinberg Ost Quelle. Legende im Anhang.



Abbildung 5: Geologische Karte des Untersuchungsgebiets. Ausschnitt aus „Geologie des nördlichen Achenseeraumes – ÖK 88 Achenkirch“. Maßstab 1:25.000 (modifiziert nach Gruber et al., 2011). Erklärung Kürzel: A = Untere Bergalm Quelle, C = Pulverermühlquelle, D = Schwarzbachquelle; Legende im Anhang.

1.3.2.2. *Stratigraphie*

Im Einzugsgebiet der vier untersuchten Quellen dominiert der Wettersteinkalk. Andere Formationen wie etwa die Raibl-Gruppe oder der Hauptdolomit treten zwar nördlich des Guffert bzw. des Hinterunnutz auf, dürften allerdings in keinem Falle als Aquifer oder Teilaquifer der Quellen fungieren. Daher wird kurz auf die Wettersteinformation eingegangen.

Wettersteinformation

Die Wettersteinformation stellt Riffe bzw. riffnahe Ablagerungen des Ladin bis Unterkarn dar. Es werden drei Fazies des Wettersteinkalkes unterschieden: Vorrifffazies, Rifffazies und Lagunenfazies.

Der Wettersteinkalk der Vorrifffazies verzahnt mit den Schichten der Reifling Formation und den Partnach Schichten, welche im Untersuchungsgebiet allerdings nicht auftreten. Diese Fazies ist gekennzeichnet durch gut ausgewaschene Riffschuttbrekzien. Die Kalke dieser Fazies sind gut gebankt bis massig und haben eine dunkelgraue bis fast schwarze Farbe, werden aber nach oben hin heller. Zum Hangenden hin folgt und verzahnt die Vorrifffazies mit dem meist ungeschichteten Wettersteinkalk der Rifffazies, welcher aus den Ablagerungen riffbildender Organismen besteht, und der gut gebankte Wettersteinkalk der Lagunenfazies (Tollmann, 1985). Bisweilen besitzt die Wettersteinformation einen erhöhten Magnesiumkarbonatanteil, wodurch sie dann als Wettersteindolomit auftritt. Die vorliegenden geologischen Karten unterscheiden nicht zwischen Wettersteinkalk und Wettersteindolomit. Bei den hydrochemischen Untersuchungen wurden allerdings leicht erhöhte Mg-Gehalte gemessen.

1.3.2.3. *Tektonik*

Die Achantaler Schubmasse ist eine komplexe Struktur in der Lechtal-Decke. Sie liegt auf der Achantaler Überschiebung, welche eine Transferzone zwischen der Karwendel-Synklinale im Westen und der Thiersee-Synklinale im Osten darstellt. Im Hangenden der Achantaler Überschiebung liegt die Guffert-Antiklinale im Osten sowie die Unnütz-Antiklinale im Westen (Abbildung 6) (Ortner & Gruber, 2011).

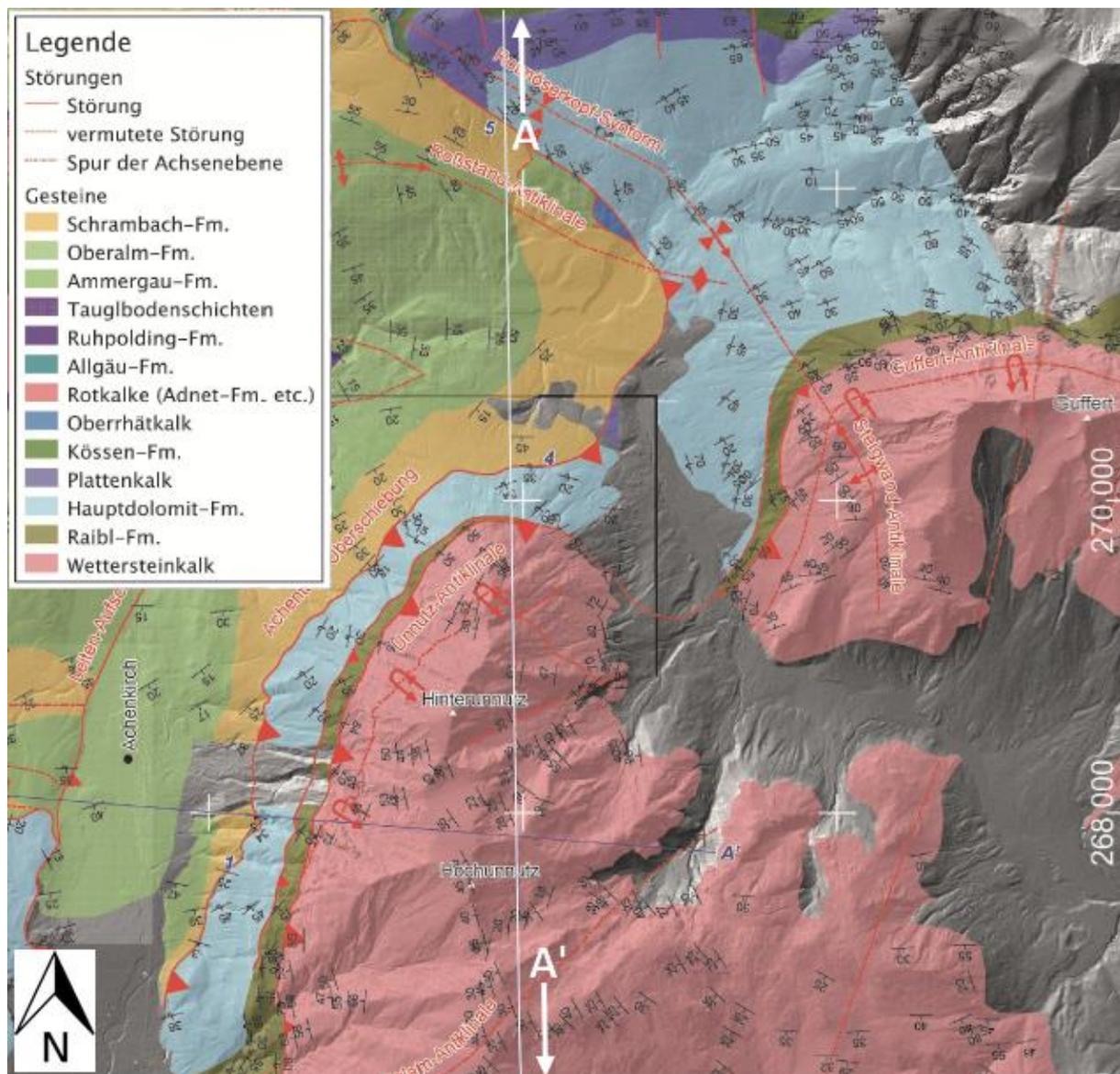


Abbildung 6: Ausschnitt aus der teilweise abgedeckten tektonischen Karte des Übergangsbereichs von der Karwendel-Synklinale zur Thiersee-Synklinale mit den Namen der wesentlichen Strukturen (modifiziert nach Ortner & Gruber, 2011; Laserscanning-Bilder Land Tirol (www.tirol.gv.at/tiris)) A-A' = Teil der Profilspur (Abbildung 7).

Die Achsenebene der Guffert-Antiklinale ist südfallend. Der größte Teil des aufgeschlossenen Wettersteinkalkes südlich des Guffert ist dem Hangendschenkel der Antiklinale zuzuordnen (Abbildung 7). Ein kleinerer, an der Nordwand des Guffert aufgeschlossener Bereich ist Teil des Liegendschenkels der Antiklinale. An der Nordwand befindet sich somit auch das Scharnier der Falte, knapp oberhalb der Raibl-Gruppe. Die Faltenachse ist subhorizontal ESE-streichend und dreht sich im Westen immer weiter Richtung NE. Am Westende des Guffert

gibt es einen tektonischen Kontakt zwischen Wettersteinkalk und Raibl-Gruppe. Die Raibl-Gruppe grenzt nördlich an den Hauptdolomit (Ortner, 2003; Ortner & Gruber, 2011).

Die Unnutz-Antiklinale liegt westlich der Guffert-Antiklinale und baut den gesamten Unnutzkamm auf (Abbildung 6 und 7). Im nördlichen Bereich (Hinterunnutz) fungiert die Antiklinale als liegende Falte, deren Achsenebene nach SE einfällt. Die Faltenachse taucht immer stärker nach SSW ab. Wie auf Abbildung 6 zu erkennen ist, ist an der Ostseite des Hinterunnutz im Norden der verkehrte Liegendschenkel der Unnutz-Antiklinale mit dem Wettersteinkalk aufgeschlossen. Der Hangendschenkel hingegen ist südlich und südöstlich des Hinterunnutz aufgeschlossen. Die Raibl-Gruppe wird vom Wettersteinkalk und vom Hauptdolomit tektonisch begrenzt, weshalb sie an der Nordostseite des Hinterunnutz nicht mehr zu finden ist (Ortner, 2003; Ortner & Gruber, 2011).

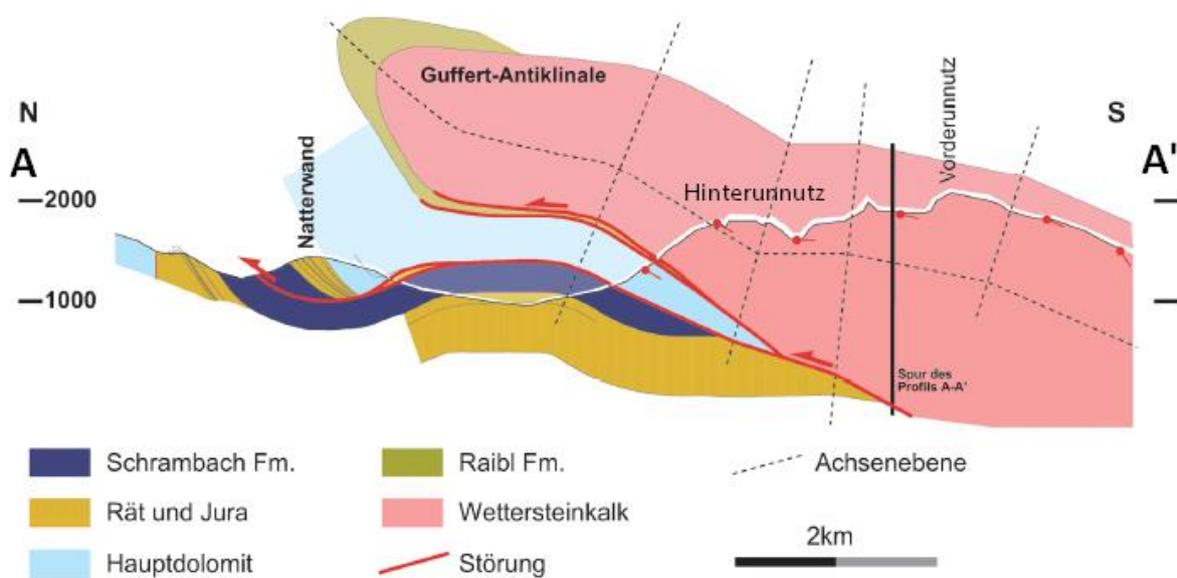


Abbildung 7: N-S-Profil durch die Natterwand, dem Hinterunnutz und dem Vorderunnutz. Da das Profil subparallel zur Faltenachse der Unnutz-Antiklinale verläuft, erscheint die Achsenebene der Guffert-Antiklinale im Profil sehr langgestreckt (modifiziert nach Ortner & Gruber, 2011).

2. Hydrogeologie

2.1. Quellenaufnahme

2.1.1. Die Untere Bergalm Quelle

Die Untere Bergalm Quelle tritt am Westende des Guffertmassivs auf einer Seehöhe von 1.128 m aus und ist nicht gefasst. Es handelt sich um mehrere kleinere Austritte, die in einem geschätzten Umkreis von ca. 3 m² streuen. Die Quelle befindet sich unmittelbar im Wald und ist markiert durch das leicht in die Landschaft eingeschnittene Gerinne des Baches. Der Oberlauf ist durch eine starke Verästelung im dm- bis m-Maßstab gekennzeichnet. Die einzelnen Äste des Baches tauchen bisweilen unter die Vegetation ab und anschließend wieder auf. Der Bach fließt nach West-Südwest. Nach etwa 500 m teilt er sich in zwei Äste, welche beide nach etwa 150 m in den Schwarzbach münden. Als dominierender Grundwasserleiter (Aquifer) konnte für die Untere Bergalm Quelle der Wettersteinkalk definiert werden (Kapitel 1.3.2.).

2.1.2. Die Steinberg Ost Quelle

Die Steinberg Ost Quelle befindet sich am östlichen Ende des Südhanges des Guffertmassivs auf einer Seehöhe von 939 m. Sie ist nicht gefasst. Es handelt sich hierbei um einen einastigen Austritt, der den Oberlauf des den steilen Südhang hinablaufenden Baches markiert. Im Gerinne des Baches wenige Meter unterhalb des Quellaustrittes konnten graubräunliche Quell- bzw. Kalktuffe beobachtet werden. Diese Besonderheit entsteht u.a., wenn Organismen wie die hier anzutreffenden Moosteppiche durch Photosynthese dem Wasser das Kohlenstoffdioxid entziehen. Dadurch steigt der pH-Wert des Wassers an, die Konzentration der Hydrogencarbonat-Ionen und die Löslichkeit von Kalk sinken. Es kommt zur Ausfällung von Kalk, dem sog. Quell- oder Kalktuff (Kempe et al., 2008). Er ist ein wichtiges Indiz für das Vorhandensein von Calcium- und Hydrogencarbonat-reichem Wasser (z.B. Karstwasser). Es gibt westlich und östlich der Steinberg Ost Quelle parallel weitere Austritte, einige fungieren als Zuflüsse zu diesem Bach. Etwa 140 m nach der Quelle unterschreitet der Bach die Forststraße und mündet weitere 280 m weiter in die Steinberger Ache. Als dominierender Grundwasserleiter konnte für die Steinberg Ost Quelle ebenfalls der Wettersteinkalk definiert werden (Kapitel 1.3.2.).

2.1.3. Die Pulverermühl Quelle

Die Pulverermühl Quelle ist die einzige gefasste Quelle. Die Quelle ist perennierend und tritt an einem einzigen Punkt auf 1.052 m Seehöhe aus. Etwa 100 m nach der Quelle befindet sich das Reservoir; hier überschreitet der Mühlegger Bach die Forststraße. Weitere 100 m weiter fließt der Bach durch eine Holzrinne an einen Überlauf, der gleichzeitig die Messstelle des Hydrographischen Dienstes Tirol darstellt. Nach etwa 800 m mündet der Bach in den Mühlbach, der seinerseits ca. 2 km südöstlich in die Steinberger Ache mündet. Es wurden fünf Zuflüsse zum Mühlbach, von denen der Mühlegger Bach einen darstellt, beobachtet. Als dominierender Grundwasserleiter konnte für die Pulverermühl Quelle ebenfalls der Wettersteinkalk definiert werden (Kapitel 1.3.2.).

2.1.4. Die Schwarzbach Quelle

Bei der Schwarzbach Quelle handelt es sich ebenfalls um einen mehrästigen Quellaustritt, der auf 1.030 m Seehöhe zu finden ist. Sie ist nicht gefasst. Der hier entspringende Reichenlahnerbach fließt nach Nordosten und unterquert eine Langlaufstrecke, sowie die Landstraße, bevor er in den von Süd nach Nord fließenden Schwarzenbach mündet. Auch für die Schwarzbach Quelle konnte der Wettersteinkalk als dominierender Grundwasserleiter definiert werden (Kapitel 1.3.2.).

2.2. Die Wettersteinformation als Hauptaquifer

Für alle vier Quellen konnte anhand der geologischen Karten und Profile die Wettersteinformation als Hauptaquifer definiert werden. Die Wettersteinformation besteht überwiegend aus dem Wettersteinkalk, kann allerdings teilweise sekundär dolomitisiert sein und als Wettersteindolomit unregelmäßig mit dem Wettersteinkalk verzahnen (Tollmann, 1985). Die vorliegenden geologischen Karten unterscheiden nicht zwischen Wettersteinkalk und –dolomit, allerdings zeigen die hydrochemischen Laboranalysen der aus dem Aquifer austretenden Wässer leicht erhöhte Mg-Werte. Dies lässt auf das zumindest teilweise Vorhandensein von Dolomit im Aquifer schließen.

Recherchen zur Tektonik im Untersuchungsgebiet zeigten, dass die Guffert-Antiklinale das Guffertmassiv aufbaut. Es handelt sich hierbei um eine überkippte Antiklinale, wobei sowohl

der Schenkel im Hangenden als auch der Schenkel im Liegenden nach Süden einfällt. Da das Grundwasser dazu tendiert an Schichtgrenzen entlangzulaufen und auszutreten (Mattheß & Ubell, 2003), wird das unterirdische Grundwasser größtenteils gegen Süden des Guffertmassivs entwässert.

Karbonatgesteine zeigen ursprünglich ein eher geringes Kluftvolumen. Durch Lösungs- und Bruchvorgängen bei der Verkarstung sowie durch tektonische Vorgänge kann dieses Kluftvolumen allerdings stark erweitert werden und bisweilen sogar Werte von > 10 % erreichen. Die unter Umständen hohe Porosität der Kalksteine ist indes für die Grundwasserleitung nicht nutzbar (Mattheß & Ubell, 2003). Ein Vergleich der nutzbaren Hohlraumanteile mit anderen Lithologien ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Hohlraumanteile und nutzbare Hohlraumanteile von Festgesteinen (Mattheß & Ubell, 2003).

	Porosität %	Nutzbare Porosität %	Nutzbares Kluftvolumen
Psephitische-psammitische Gesteine	0,4 – 37	0 – 32	< 0,1 – 5
Ton- und Mergelsteine	-	0 – 13	0,5 – 4,7
Kalksteine	0,1 – 66,6	-	0,7 – 13
Kreide	30,5 – 44	1 – 2	-
Gipssteine	< 4,8	-	-
Salzgesteine	< 1	-	-
Vulkanite	0,1 – 50	-	2,3 – 8
Pyroklastite	6 – 87,3	2 – 33	-

Das Grundwasser kann eine geringe Aufenthaltsdauer in den verkarsteten Kalken zeigen. Dolomite hingegen zeigen einen langsameren Durchfluss des Grundwassers und größeres Speichervolumen (Hölting & Coldeway, 2013). Grund dafür ist die geringere Löslichkeit von Dolomit gegenüber Kalk und das spröde Verhalten von Dolomit während tektonischer Verformung (Mattheß & Ubell, 2003; Hölting & Coldeway, 2013).

2.3. Klimatische Verhältnisse

Das Einzugsgebiet der Quellen ist bis 1.500 bis 1.600 m Seehöhe zum Großteil mit Vegetation, hauptsächlich mit Wald, bedeckt. Oberhalb der Waldgrenze sind bis etwa 1.900 m noch größere Grasflächen und einzelne Bäume und Sträucher zu finden. Ab ca. 1.900 m ist keine Vegetation mehr vorhanden.

Das Untersuchungsgebiet weist aufgrund der Höhenlage Besonderheiten der klimatischen und hydrologischen Verhältnisse auf. Es zeigt relativ hohe Niederschlagswerte. Aufgrund der tiefen Temperaturen in höheren Lagen kommt es in den kälteren Monaten zur Akkumulation des Niederschlags in Form von Schnee. Der Abfluss ist daher stark von den saisonalen Gegebenheiten abhängig und zeigt Maximalwerte hauptsächlich während der Schneeschmelze im Frühsommer.

Für die Berechnung der Niederschlagswerte wurden die öffentlich zugänglichen Daten des Hydrographischen Dienstes Tirol herangezogen (www.ehyd.gv.at). Der Datensatz umfasst die Niederschlags-Tagessummen vom 01.01.1971 bis 31.12.2012 bei Steinberg am Rofan auf 1.020 m Seehöhe. Das Jahresmittel des Niederschlags dieser 42 Jahre umfassenden Messreihe ergab einen Wert von 1.445 mm/a. Die berechneten Monatsmittelwerte des Niederschlags sind im Diagramm 1 dargestellt.

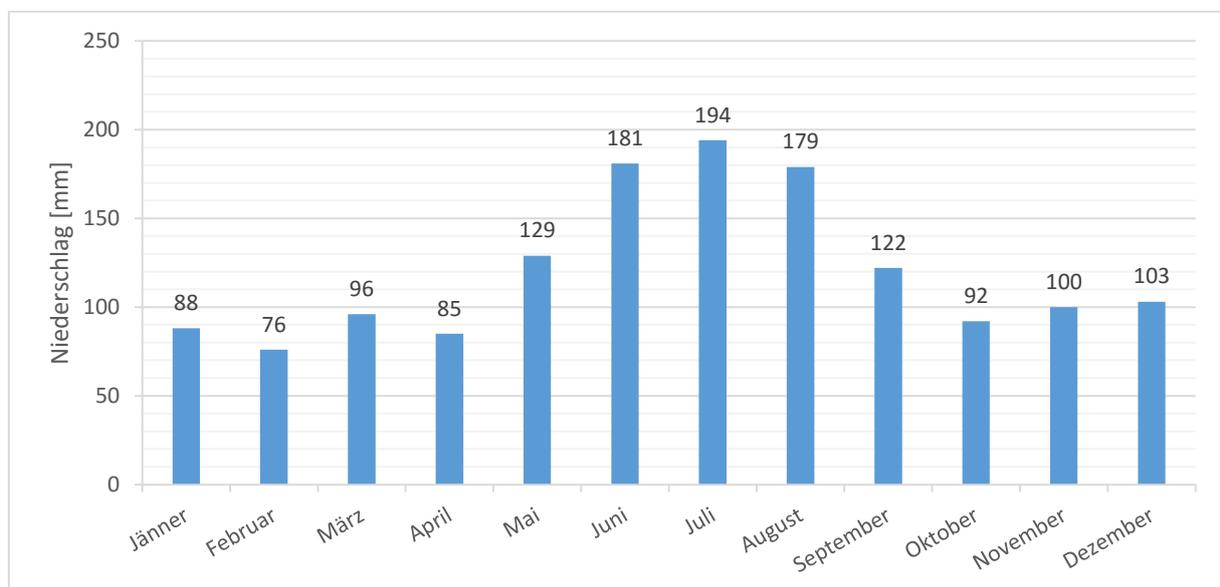


Diagramm 1: Monatsmittel des Niederschlags bei der Messstelle Steinberg am Rofan von 1971 bis 2012 (berechnet aus dem Datensatz des Hydrographischen Dienstes Tirol).

Die gemessenen Niederschlagswerte für die Ortschaft Steinberg am Rofan im Zeitraum der Untersuchungen von Oktober bis Jänner wurden im Diagramm 2 dargestellt.

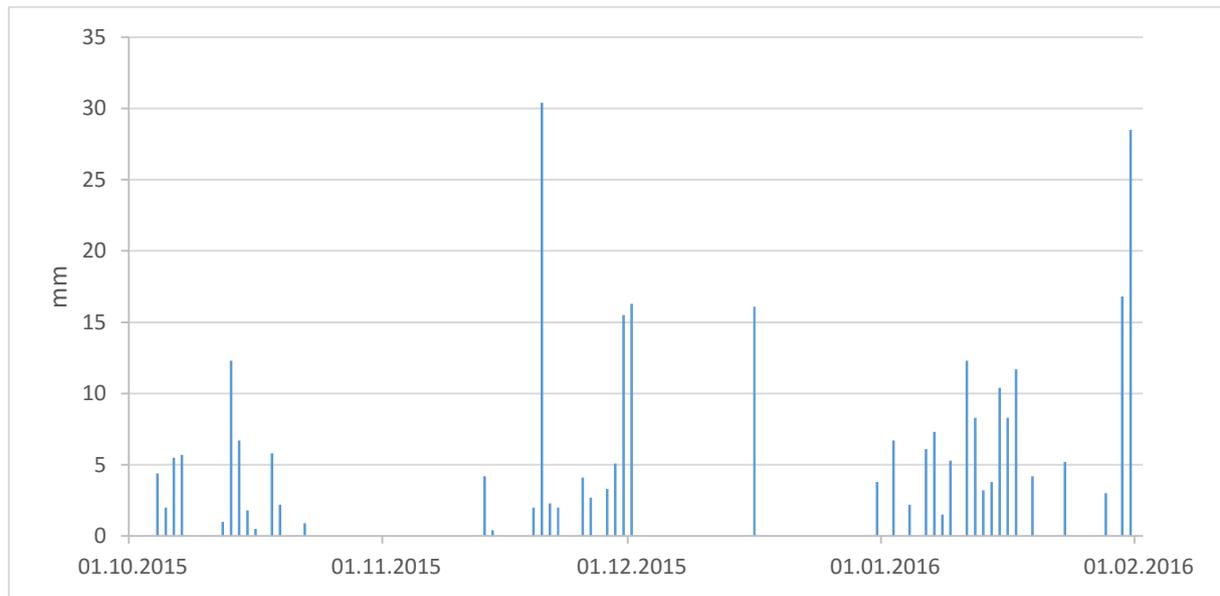


Diagramm 2: Niederschlagswerte bei Steinberg am Rofan im Zeitraum Oktober 2015 bis Jänner 2016 (Datenquelle: Hydrographischer Dienst Tirol)

2.4. Hydrophysikalische Parameter

2.4.1. Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Stoffes, elektrischen Strom zu leiten. Wenn Elektrolyte in einer wässrigen Lösung dissoziieren, entstehen Ionen, welche die Lösung elektrisch leitfähig machen. Der elektrische Leitwert G wird in Siemens ($S = 1/\Omega$) angegeben und stellt den Kehrwert des elektrischen Widerstandes R (Ω) dar. Die elektrische Leitfähigkeit stellt die Widerstandsmessung einer Wasserprobe zwischen Elektroden mit der Fläche A und dem Abstand l dar und ist wie folgt definiert (Hölting & Coldewey, 2013):

$$K = \frac{l}{A * R}$$

K = elektrische Leitfähigkeit (S/cm)

l = Elektrodenabstand (cm)

A = Elektrodenquerschnittsfläche (cm²)

R = elektrischer Widerstand ($\Omega = 1/S$)

Normalerweise beträgt die Elektrodenquerschnittsfläche 1 cm² und der Elektrodenabstand 1 cm. Es ergibt sich als Einheit also S/cm bzw. aufgrund der sehr geringen Leitfähigkeit von natürlichem Wasser die Einheit μS/cm (Hölting & Coldewey, 2013).

2.4.2. Schüttungsratenquotient & Trockenwetterfalllinie (TWL)

Der Schüttungsratenquotient bzw. Schüttungsquotient ist definiert als Quotient zwischen niedrigster bekannter Schüttungsrate Q_{min} und höchster bekannter Schüttungsrate Q_{max} (Hölting & Coldewey, 2013):

$$Schüttungsquotient = \frac{Q_{min}}{Q_{max}}$$

Je kleiner der Schüttungsquotient, desto größer der Unterschied zwischen minimaler und maximaler Schüttung. Anhand des Schüttungsquotienten lassen sich grobe Aussagen über den Grundwasserspeicher treffen.

Die Trockenwetterfalllinie (TWL) beschreibt die Entleerung des Aquifers nach einem Niederschlagsereignis. Je steiler der Verlauf der TWL, desto schneller die Entleerung des Grundwasserleiters (stärkerer Klüftung, Verkarstung, geringeres Rückhalte oder Retentionsvermögen). Je flacher der Verlauf der TWL, desto größer das Speichervolumen des Aquifers bzw. desto höher das Retentionsvermögen. Die Trockenwetterfalllinie folgt folgendem exponentiellen Gesetz nach Maillet (1905) (Hölting & Coldewey, 2013):

$$Q_t = Q_0 * e^{-\alpha * \Delta t}$$

Q_t = Schüttungsrate nach einer Zeit t in l/s

Q_0 = Schüttungsrate zum Anfangszeitpunkt t_0 in l/s

α = quellenspezifischer Koeffizient in 1/d

Δt = Zeitspanne zwischen Q_0 und Q_t in d

Aufgrund des geringen Datenvolumens der restlichen Quellen, konnten lediglich Trockenwetterfalllinien der Pulverermühl Quelle berechnet werden.

2.5. Hydrochemische Parameter

2.5.1. pH-Wert

Der pH-Wert fungiert als Maßzahl für die Acidität bzw. Basizität einer Lösung. Er stellt den negativen dekadischen Logarithmus der Wasserstoffionen-Aktivität in einer Lösung dar und ist eine dimensionslose Zahl (Hölting & Coldewey, 2013):

$$pH = -\lg a(H^+)$$

Für verdünnte Lösungen wird anstelle der Wasserstoffionen-Aktivität die molare Stoffmengenkonzentration der Oxoniumionen eingesetzt (Hölting & Coldewey, 2013):

$$pH = -\lg c(H_3O^+)$$

Der pH-Wert von neutralem reinen Wasser ist 7,0, d.h. $c_{H_3O^+} = c_{OH^-}$

Der pH-Wert sauer reagierender Lösungen ist $< 7,0$, d.h. $c_{H_3O^+} > c_{OH^-}$

Der pH-Wert basisch reagierender Lösungen ist $> 7,0$, d.h. $c_{H_3O^+} < c_{OH^-}$

2.5.2. Karbonathärte & Gesamthärte

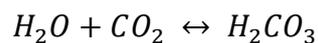
Die Karbonathärte stellt den Anteil an Ca- und Mg-Ionen dar, für den eine äquivalente Konzentration an Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) und – falls vorhanden – Karbonat (CO_3^{2-}) sowie Hydroxid (OH^-) vorliegt. Multipliziert man den Wert der Äquivalentkonzentration der Karbonathärte (mmol/l) mit dem Faktor 2,8, erhält man die Karbonathärte in der Einheit deutsche Härtegrade °dH (Hölting & Coldewey, 2013).

Die Gesamthärte ist definiert als die Summe der Äquivalentkonzentrationen aller im Wasser gelösten Ionen der Erdalkalimetalle. Im Normalfall sind alle Ionen außer Ca^{2+} und Mg^{2+} vernachlässigbar, da sie nur in sehr geringen Mengen auftreten. Durch die Multiplikation der Summe der Äquivalentkonzentration aller Ionen der Erdalkalimetalle mit dem Faktor 2,8 erhält man die Gesamthärte des Wassers in der Einheit deutsche Härtegrade °dH (Hölting & Coldewey, 2013).

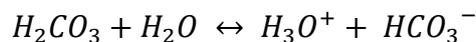
2.5.3. Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht

Für das Verständnis der Lösung von Karbonatgesteinen ist das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht unabdingbar. Durch die Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Grundwasserleiter kommt es zur Lösung bzw. Auflösung von Mineralen (Hölting & Coldewey, 2013).

Das Kohlenstoffdioxid (CO_2), welches aus der Atmosphäre stammt und mit dem Niederschlag eingetragen wird, welches aus organischen Abbauprodukten der Biosphäre im Einzugsgebiet stammt oder welches aus der Tiefe aufsteigt, löst sich, sobald es in das Wasser (H_2O) geleitet wird (Hölting & Coldewey, 2013). Die Löslichkeit des Kohlenstoffdioxids ist dabei von Druck und Temperatur abhängig, d.h. je niedriger die Temperatur und je höher der Gasdruck, desto höher die Löslichkeit (Ford & Williams, 2007). Die wässrige Lösung von CO_2 reagiert sauer, wobei sich ein Teil des gelösten CO_2 in Kohlensäure H_2CO_3 umsetzt (Hölting & Coldewey, 2013):



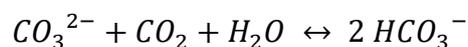
Bedingt durch die erste Dissoziationsstufe bildet sich Hydrogencarbonat HCO_3^- :



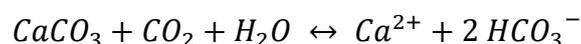
Bedingt durch die zweite Dissoziationsstufe bildet sich das Anion CO_3^{2-} :



Das Anion CO_3^{2-} bildet sich im Grundwasser nur bei einem pH-Wert von $> 8,2$. Hydrogencarbonat HCO_3^- entsteht auch bei der direkten Reaktion von Kohlensäure mit Karbonaten (Hölting & Coldewey, 2013):



Calcit (CaCO_3) ist nur gering wasserlöslich, allerdings steigt die Löslichkeit mit steigender Kohlenstoffdioxid-Konzentration. Es stellt sich das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht ein (Hölting & Coldewey, 2013):



2.5.4. Kationen und Anionen im Piper Diagramm

Die Ergebnisse der hydrochemischen Analyse der Wasserproben geben Aufschluss über den Wassertypus. Die Kationen und Anionen werden dafür in ihrer Äquivalentkonzentration in das Piper-Diagramm (Piper, 1944) eingetragen. Das Piper-Diagramm kombiniert ein Anionen- und ein Kationen-Dreieck mit einem Viereckdiagramm. Die Klassifizierung der Wässer erfolgt nach Furtak & Langguth (1967) wie folgt (Abbildung 8):

- Erdalkalische Wässer ($\text{Ca} + \text{Mg} > 80 \%$; $\text{Na} + \text{K} < 20 \%$)
 - 1 - Erdalkalisch-karbonatisch
 - 2 - Erdalkalisch karbonatisch – sulfatisch
 - 3 - Erdalkalisch – sulfatisch
- Erdalkalisch – Alkalische Wässer ($\text{Ca} + \text{Mg} 50 - 80 \%$; $\text{Na} + \text{K} 20 - 50 \%$)
 - 4 - Erdalkalisch – alkalisch – karbonatisch
 - 5 - Erdalkalisch – alkalisch – sulfatisch
- Alkalische Wässer ($\text{Ca} + \text{Mg} < 50 \%$; $\text{Na} + \text{K} > 50 \%$)
 - 6 - Alkalisch – karbonatisch
 - 7 - Alkalisch – sulfatisch
- Weitere Unterteilung von erdalkalisch – karbonatischen Wässern in:
 - 8 - Überwiegend Ca-Karbonat
 - 9 - Überwiegend Ca-Mg-Karbonat
 - 10 - Überwiegend Dolomit

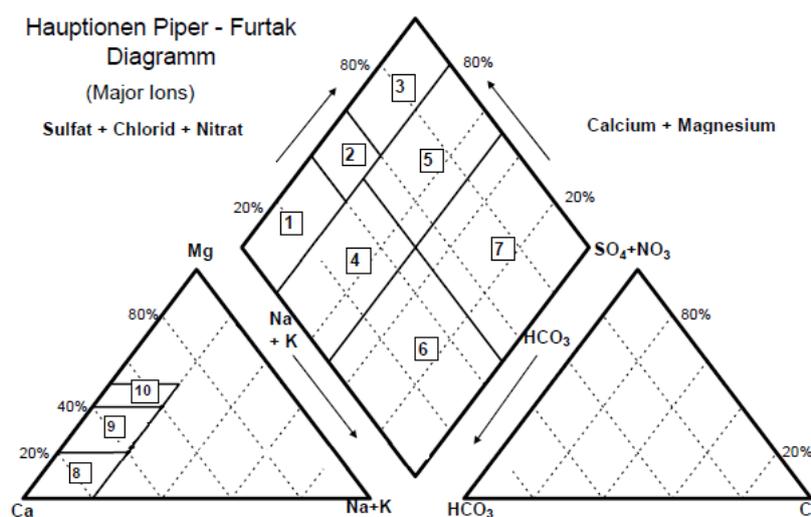


Abbildung 8: Klassifizierung von Wassertypen nach Furtak & Langguth (1967) (modifiziert nach Kralik et al., 2005).

2.6. Hydrogeologisches Modell

Zur Erstellung eines einfachen hydrogeologischen Modells zur Grundwasserneubildung bedarf es dreier Faktoren, die berücksichtigt werden müssen und anhand derer der hydrogeologische Zyklus beschrieben werden kann: Niederschlag, Verdunstung und Abfluss. Diese drei Parameter stehen in folgender Beziehung:

$$N = V + A + \Delta S$$

N = Niederschlagsrate (mm/a)

V = Verdunstungsrate/Evapotranspiration (mm/a)

A = Abflussrate (mm/a) bestehend aus $A_{\text{oberirdisch}} + A_{\text{unterirdisch}}$

ΔS = Änderung des Speichervolumens ($\Delta S = \text{Rücklage} - \text{Aufbrauch}$)

2.6.1. Niederschlag

Der Niederschlag kann in unterschiedlichen Formen fallen, wobei im Untersuchungsgebiet hauptsächlich Regen und Schnee vorkommen. Es wurden zur Bestimmung der Niederschlagssummen die Niederschlagsdaten des Hydrographischen Dienstes Tirol herangezogen und im Kapitel „2.3. Klimatische Verhältnisse“ dargelegt.

2.6.2. Verdunstung (Evapotranspiration)

Die Evapotranspiration umfasst sowohl die Evaporation (Boden-, See- und Interzeptionsverdunstung) als auch die Transpiration (Verdunstung von Pflanzenoberflächen aufgrund biotischer Vorgänge). Die Bestimmung der potentiellen, also der höchstmöglichen Evapotranspiration kann nach Haude (1954) erfolgen:

$$ETp = x * p_{14} * (1 - \phi_{14})$$

ETp = potenzielle Evapotranspiration (mm/d)

x = Haude Monatskoeffizient (mm/d*hPa)

p_{14} = Sättigungsdampfdruck der Luft um 14 Uhr (hPa)

ϕ_{14} = relative Luftfeuchte um 14 Uhr

Der Sättigungsdampfdruck p_{14} der Luft um 14 Uhr ist definiert nach Magnus (1844):

$$p_{14} = 6,03hPa * 10^{\frac{7,45 * \theta_{14}}{235^{\circ}C + \theta_{14}}}$$

θ_{14} = Lufttemperatur um 14 Uhr Ortszeit °C

Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration ist die empirische Seehöhen-abhängige Gleichung für den österreichischen Alpenraum nach HAÖ (2007):

$$ET_{pot} = 690,6 - (0,068 * h) - (1,581 * 10^{-8} * h^3)$$

h = Seehöhe (m)

Es wurde des Weiteren ein Vergleich des Untersuchungsgebiets mit den Verdunstungswerten in den Hohen Tauern, den Berchtesgadener Alpen sowie dem Tennengebirge (Baumgartner & Reichel, 1975) aufgestellt. Vergleichbare Einzugsgebiete in diesen Gebirgszügen zeigen abhängig von der Höhenlage eine potentielle Evapotranspiration von 300 bis 400 mm/a, wobei gilt: Je höher die Lage, desto geringer die potentielle Evapotranspiration.

2.6.3. Abfluss

Der Abfluss ist definiert als Summe des oberirdischen und unterirdischen Abflusses. Der oberirdische Abfluss stellt dabei den Abfluss dar, der direkt vom Niederschlag kommt und als sog. Vorfluter oberirdisch abfließt, ohne vorher in den Untergrund gelangt zu sein. Der unterirdische Abfluss stellt die Grundwasseraustritte (Quellen) dar. Die Trennung von oberirdischen und unterirdischen Abfluss ist abhängig von den geologischen Gegebenheiten im Einzugsgebiet, also dem Speichervermögen des Grundwasserspeichers.

3. Methodik

3.1. Allgemeines

Im Zuge der Untersuchungen der vier Quellen wurden folgende Parameter ermittelt:

- Schüttung
- Temperatur
- Elektrische Leitfähigkeit
- pH-Wert
- Karbonathärte
- Im Labor: Wasserchemie

In insgesamt fünf Geländebegehungen wurden folgende Messungen unternommen:

1. 21.10.2015: Elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, Schüttung, pH-Wert, Karbonathärte und Probennahme für die Wasseranalytik
2. 25.11.2015: Elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, Schüttung
3. 03.12.2015: Überprüfung der Genauigkeit der Leitfähigkeitsmessgeräte
4. 21.12.2015: Elektrischen Leitfähigkeit, Temperatur, Schüttung
5. 22.01.2016: Elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, Schüttung, pH-Wert, Karbonathärte und Probennahme für die Wasseranalytik

Es ist anzumerken, dass bei der Pulverermühlquelle lediglich die Leitfähigkeit und die Temperatur gemessen und Proben für die chemische Analyse genommen wurden. Diese Quelle ist Bestandteil des Messnetzes des Hydrographischen Dienstes Tirol, der uns freundlicherweise die mehrjährigen Daten zur Quellschüttung, Temperatur und Leitfähigkeit zur Verfügung gestellt hat.

Die Steinberg Quelle Ost war am 22.01.2016 aufgrund der Schneelage nicht erreichbar.

3.2. Temperatur, Leitfähigkeit & Schüttung

Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und Schüttung wurden mit dem TQ-System der Firma Sommer Messtechnik ermittelt. Das TQ-System besteht aus zwei TQ-Amps (Leitfähigkeitssonde A und B) mit Bluetoothverbindung sowie der Software „TQ-Commander“ (Version 1.1.1.1). Die Auflösung liegt laut Hersteller bei 0,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ für die Leitfähigkeit und 0,1 $^{\circ}\text{C}$ für die Temperatur. Die Leitfähigkeitssonde A wurde während der Untersuchung immer in der Mitte des Gerinnes platziert, die Leitfähigkeitssonde B eher randlich.

Als Tracer für die Salzverdünnungsmethode wurde stets Kochsalz (NaCl) verwendet, wobei je Quelle 0,5 kg bzw. 1 kg eingespeist wurde. Die Durchmischungsstrecke betrug ca. Gerinnebreite \times 50. Ziel war ein Leitfähigkeitsanstieg von 100 % der Grundleitfähigkeit zu erreichen, mindestens aber von 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Für jede Quelle fand im Vorfeld eine Kalibrierung der LF-Sonden statt. Dafür wurden 250 ml Quellwasser entnommen und bei wiederholtem Messen jeweils 0,5 ml der Kalibrationslösung (10 g/l NaCl) dazupipettiert, so dass der Korrelationskoeffizient $> 0,9998$ betrug.

Da diese Geräte neu vom Institut für Geologie angekauft wurden, sollte auch eine Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messungen erfolgen. Dafür wurden mehrere Versuche mit der Salzverdünnungsmethode bei der Pulverermühl Quelle unternommen und die Ergebnisse mit den Daten des Hydrographischen Dienstes verglichen (Tabelle 2).

Die Messungen 1 bis 3 wurden im Rückstaubereich bei der Holzrinne unternommen, was stark verzerrte Graphen bei der Messung des Leitfähigkeitsanstieges zur Folge hatte. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass eine Einspeisung des Tracers oberhalb der Straße (Messung 1, 2, 4 und 5), welche vom Bach der Pulverermühl Quelle überquert wird, einen Leitfähigkeitsanstieg von $<100\%$ bedeutete. Es muss also ein Teil des Tracers in der Nähe der Straße verloren gegangen sein. Die Messungen 4 bis 14 wurden im fließenden Bereich ohne Rückstau genommen (Abbildung 9), bei den Messungen 6 bis 14 wurde der Tracer knapp unterhalb der Straße eingespeist, der Leitfähigkeitsanstieg betrug dann wie erwartet $\geq 100\%$ (bei z.T. gleicher Tracermenge). Das Diagramm 1 zeigt, dass die Messungen mit dem TQ-System kaum von den Messungen des Hydrographischen Dienstes abweichen. Lediglich Messung 2 weicht etwas stärker ab, was aber auf das Platzieren der Sensoren im Rückstaubereich zurückzuführen sein könnte.

Tabelle 2: Messreihe vom 03.12.2015 bei der Pulverermühl Quelle. Tracer = eingespeistes Kochsalz in kg, Strecke = Durchmischungsstrecke in m, T = Temperatur in °C, T (HD) = Temperatur in °C gemessen vom Hydrographischen Dienst Tirol (Hydrographischer Dienst Tirol, 2015), GLF = Grundleitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$, GLF (HD) = Grundleitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$ gemessen vom Hydrographischen Dienst Tirol, LF Peak = Maximalanstieg der Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$ nach Tracereinspeisung, Q (A) = Schüttung ermittelt von Sensor A in l/s, Q (B) = Schüttung ermittelt von Sensor B in l/s, Q (HD) = Schüttung ermittelt vom Hydrographischen Dienst Tirol in l/s.

Nr.	Zeit	Tracer	Strecke	T	T (HD)	GLF	GLF (HD)	LF Peak	Q (A)	Q (B)	Q (HD)
1	11:00	0,5	100	5,9	6,1	230	231	284	62	62	62
2	11:19	0,5	100	5,9	6,1	231	231	282	65	66	62
3	11:51	0,5	50	6,0	6,1	231	232	348	61	61	61
4	12:20	0,5	55	6,1	6,1	231	233	335	61	62	61
5	12:51	1	100	6,1	6,1	231	232	354	59	60	60
6	13:42	1	50	6,1	6,1	232	233	653	59	58	59
7	14:05	0,5	50	6,1	6,1	232	234	441	57	58	58
8	14:23	0,5	50	6,1	6,1	232	233	450	58	57	58
9	14:36	0,5	50	6,1	6,1	233	234	470	57	57	58
10	14:45	0,5	50	6,1	6,1	234	234	478	57	57	58
11	14:54	0,5	50	6,1	6,1	234	233	473	58	58	58
12	15:02	0,5	50	6,1	6,1	235	233	476	57	57	58
13	15:12	0,5	50	6,0	6,1	234	234	470	56	56	58
14	15:24	0,5	50	6,0	6,1	234	234	466	57	57	58

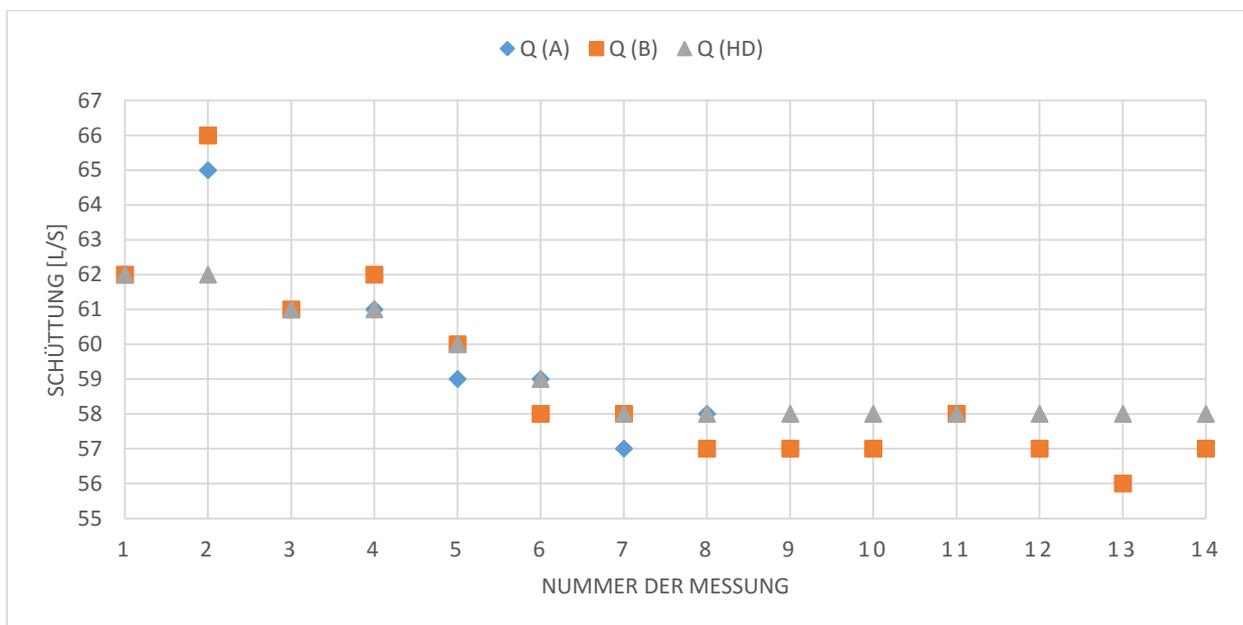


Diagramm 3: Die Schüttungswerte der Tabelle 2. Q (A) = Schüttung ermittelt von Sensor A in l/s, Q (B) = Schüttung ermittelt von Sensor B in l/s, Q (HD) = Schüttung ermittelt vom Hydrographischen Dienst Tirol in l/s.



Abbildung 9: Messungen 4 bis 14 erfolgten im nicht-rückstauenden Bereich. Auf der unteren Bildhälfte sind die Leitfähigkeitssonden (TQ-Amps) zu sehen. In der oberen Bildhälfte die Messstation des Hydrographischen Dienstes Tirol direkt an der Holzrinne.

3.3. pH-Wert

Die pH-Werte wurden mit dem pH-Messgerät „pH 330“ der Firma WTW gemessen. Die Kalibration erfolgte durch Pufferlösungen mit einem pH-Wert von 7 und 9. Die pH-Werte der Quellproben wurden vor Ort bei der Temperatur der Quellwässer gemessen.

3.4. Karbonathärte

Die Karbonathärte wurde mithilfe von Titration noch vor Ort mit dem Aquamerck Testsatz ermittelt.

3.5. Wasserchemie

Eine hydrochemische Analyse der genommenen Wasserproben erfolgte durch das Labor der TU Graz. Die Proben wurden auf Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , F^- , Cl^- , Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , HCO_3^- und untersucht. Die stabile Isotopenwerte ($\delta^{18}\text{O}$) wurden am hiesigen Geologischen Institut bestimmt, sind allerdings nicht Teil dieser Bachelorarbeit.

4. Ergebnisse

4.1. Untere Bergalm Quelle

4.1.1. Hydrophysikalische Parameter

Bei der Unteren Bergalm Quelle wurden Wassertemperaturen zwischen 5,4 und 5,6 °C gemessen, wobei die Messung im November und Dezember direkt am Plastikrohr des Quellaustrittes gemessen wurde. Die Temperatur liegt somit ca. 0,8 °C unter der der Steinberg Ost Quelle und ca. 0,6 °C unter der der Pulverermühl Quelle.

Die elektrische Grundleitfähigkeit lag zwischen 221 und 225 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und war lediglich im November mit 213 $\mu\text{S}/\text{cm}$ etwas niedriger (Diagramm 2, Tabelle 2). Sie zeigt somit deutlich niedrigere Leitfähigkeitswerte als die Steinberg Ost Quelle und die Pulverermühl Quelle. Der Anstieg der Leitfähigkeit beim Einspeisen von 0,5 kg Kochsalz variiert relativ stark zwischen 397 und 490 $\mu\text{S}/\text{cm}$, korreliert aber eindeutig mit der Quellschüttung und der Fließgeschwindigkeit. Je geringer die Schüttung, desto konzentrierter der Tracer und je höher die Fließgeschwindigkeit, desto schneller trifft der Tracer bei den Leitfähigkeitssonden ein. Beide Umstände bedeuten einen höheren Peak bei der Leitfähigkeitsmessung.

Die Schüttungsmessung der Unteren Bergalm Quelle zeigt, dass im Oktober und Dezember mit 15,4 und 14,5 l/s relativ zum November und Jänner mit 6,5 und 6 l/s deutlich höhere Schüttungswerte ermittelt werden konnten (Diagramm 4, Tabelle 3). Der Schüttungsquotient beträgt für den Zeitraum Oktober bis Jänner 0,39.

Tabelle 3: Daten der Unteren Bergalm Quelle. T = Temperatur, GLF = Grundleitfähigkeit, LF Peak = Maximalanstieg der Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$ nach Tracereinspeisung, Q = Schüttung, KH = Karbonathärte, GH = Gesamthärte.

Datum	T (°C)	GLF ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	LF-Peak	Q (l/s)	pH	KH (°dH)	GH (°dH)
21.10.2015	5,5	225	397	15,4	8,09	6,3	7
25.11.2015	5,4	213	460	6,5	-	-	-
21.12.2015	5,5	221	405	14,5	-	-	-
22.01.2016	5,6	223	490	6	8,18	6,2	6,8

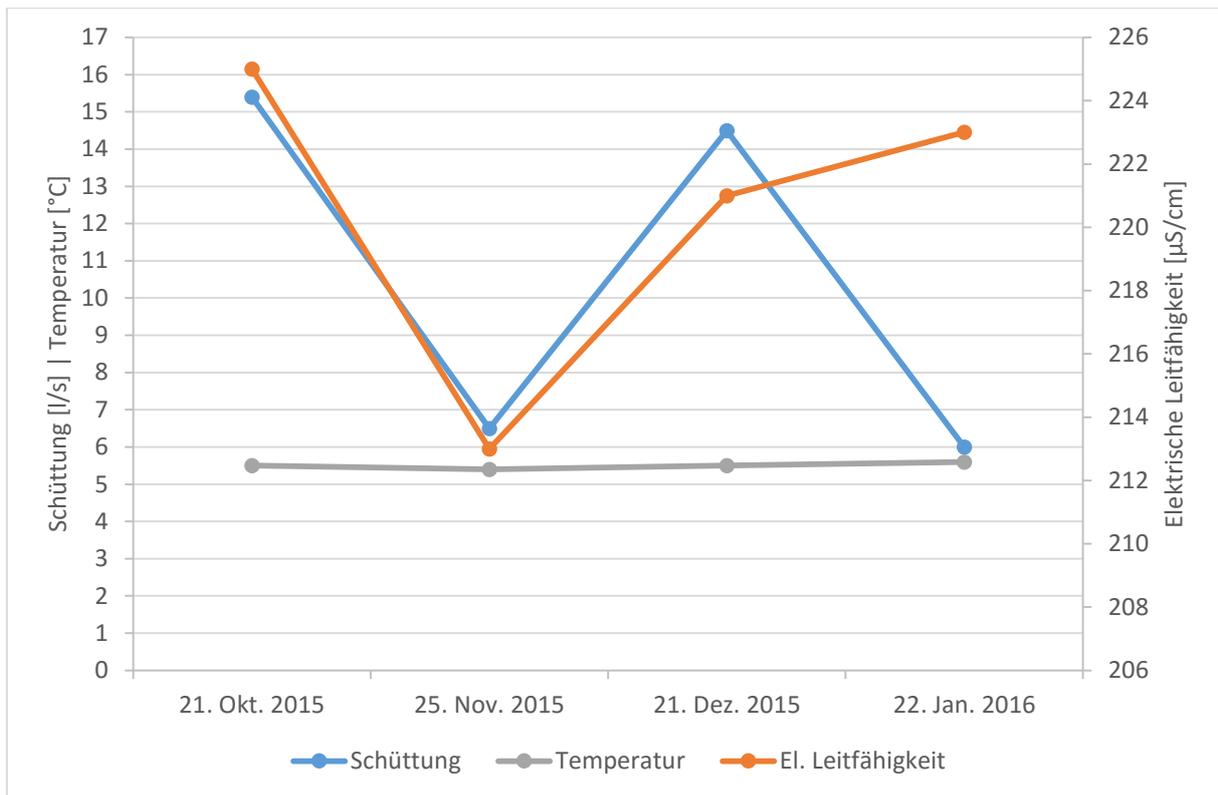


Diagramm 4: Schüttung in l/s, Temperatur in °C und elektrische Leitfähigkeit in µS/cm der Unteren Bergalm Quelle im Zeitraum Oktober bis Jänner.

4.1.2. Hydrochemische Parameter

Der pH-Wert wurde mit 8,1 im Oktober und 8,2 im Jänner gemessen (Tabelle 3).

Für die Karbonathärte konnte ein Wert von 6,3 °dH im Oktober und 6,2 °dH im Jänner ermittelt werden. Die Gesamthärte des Wassers der Unteren Bergalm Quelle betrug im Oktober 7,0 °dH und lag im Jänner mit 6,8 °dH leicht darunter (Tabelle 3).

Die Wasseranalyse der Unteren Bergalm Quelle zeigt einen hohen Ca-Gehalt von rund 41 mg/l im Oktober und 39 mg/l im Jänner. Die Quelle liegt damit im Vergleich zu den anderen Quellen im Mittelfeld. Sie weist allerdings den geringsten Mg-Gehalt von 5,6 mg/l bzw. 5,8 mg/l. Der Na-Gehalt stieg von 0,18 mg/l im Oktober auf 0,46 mg/l im Jänner an. Ebenso der Cl-Gehalt, der im Oktober noch 0,26 mg/l betrug und im Jänner dann 0,73. Der Gehalt an Nitrat im Wasser der Unteren Bergalm Quelle blieb relativ konstant bei rund 4 mg/l. Auch der Sulfatgehalt schwankte kaum um die 0,7 mg/l. Der Gehalt an Hydrogencarbonat konnte mit 137 mg/l im Oktober und 135 mg/l im Jänner gemessen werden (Tabelle 4).

Tabelle 4: Ergebnisse der chemischen Wasseranalyse der Unteren Bergalm Quelle in mg/l, mmol/l und meq/l.

		Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
21.10.2015	mg/l	0,18	5,59	41,02	0,26	4,04	0,66	137,29
	mmol/l	0,01	0,23	1,02	0,01	0,07	0,01	2,25
	meq/l	0,01	0,46	2,05	0,01	0,07	0,01	2,25
22.01.2016	mg/l	0,46	5,81	39,04	0,73	3,98	0,73	135,11
	mmol/l	0,02	0,24	0,97	0,02	0,06	0,01	2,21
	meq/l	0,02	0,48	1,95	0,02	0,06	0,02	2,21

Die Äquivalentkonzentration der gemessenen Kationen- und Anionenwerte der Unteren Bergalm Quelle sind im Piper-Diagramm (Diagramm 5) dargestellt. Nach der Klassifizierung des Wassers nach Furtak & Langguth (1967) handelt es sich bei diesem Wassertypus um erdalkalisch-karbonatisches Wasser mit überwiegend Ca-Karbonat. Aufgrund des hohen Hydrogenkarbonatanteil des Wassers kann die Untere Bergalm Quelle auch als Calciumhydrogenkarbonatquelle klassifiziert werden.

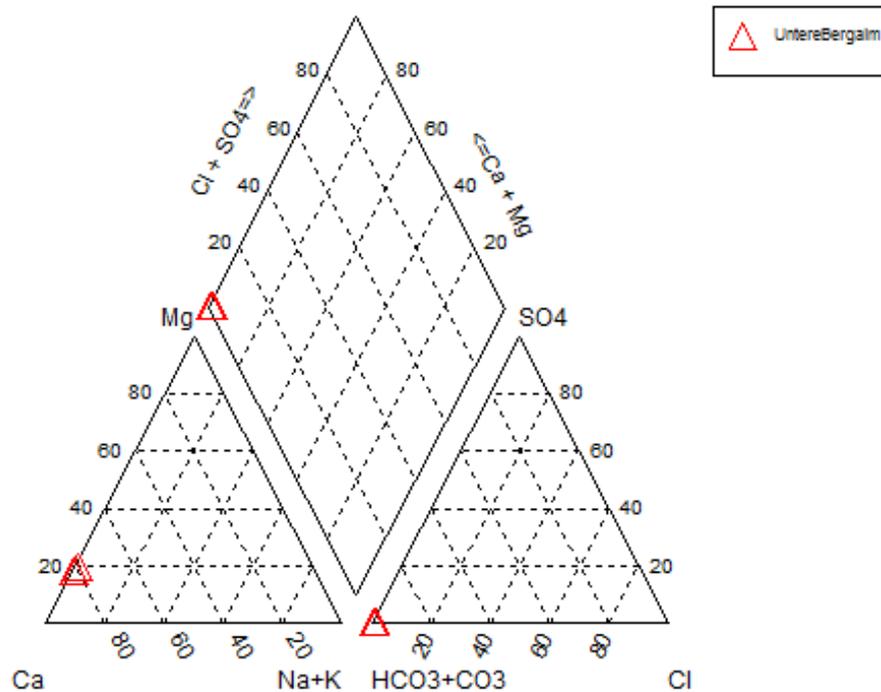


Diagramm 5: Ergebnisse der hydrochemischen Analyse der Unteren Steinalm Quelle im Piper-Diagramm.

4.2. Steinberg Ost Quelle

4.2.1. Hydrophysikalische Parameter

Bei der Steinberg Ost Quelle betrug die Wassertemperatur konstant 6,3 °C. Es sei hier nochmals angemerkt, dass im Jänner aufgrund der Schneelage die Quelle nicht erreicht werden konnte.

Die elektrische Grundleitfähigkeit wurde mit konstant $276 \pm 1 \mu\text{S/cm}$ gemessen (Diagramm 6). Der Leitfähigkeitsanstieg nach der Einspeisung von 0,5 kg Kochsalz betrug zwischen 480 und 530 $\mu\text{S/cm}$, wobei bei der Messung im Dezember ein deutlicher Unterschied der Leitfähigkeit zwischen Sensor B (480 $\mu\text{S/cm}$) und Sensor A (525 $\mu\text{S/cm}$) festgestellt werden konnte.

Die Quellschüttung zeigt bei der Messung im Oktober einen Höchstwert von 18,6 l/s. Die Werte im November und Dezember lagen mit 14,2 l/s und 15,3 l/s etwas darunter (Diagramm 6), allerdings ist der Unterschied zwischen den monatlichen Messungen nicht so gravierend wie bei der Unteren Bergalm Quelle oder der Schwarzbach Quelle (Tabelle 5). Der Schüttungsquotient wurde mit 0,76 errechnet.

Tabelle 5: Daten der Steinberg Ost Quelle. T = Temperatur, GLF = Grundleitfähigkeit, LF Peak = Maximalanstieg der Leitfähigkeit in $\mu\text{S/cm}$ nach Tracereinspeisung, Q = Schüttung, KH = Karbonathärte, GH = Gesamthärte.

Datum	T (°C)	GLF ($\mu\text{S/cm}$)	LF-Peak	Q (l/s)	pH	KH (°dH)	GH (°dH)
21.10.2015	6,3	276	500	18,6	7,99	7,6	8,8
25.11.2015	6,3	275	530	14,2	-	-	-
21.12.2015	6,3	277	480 bzw. 525	15,3	-	-	-

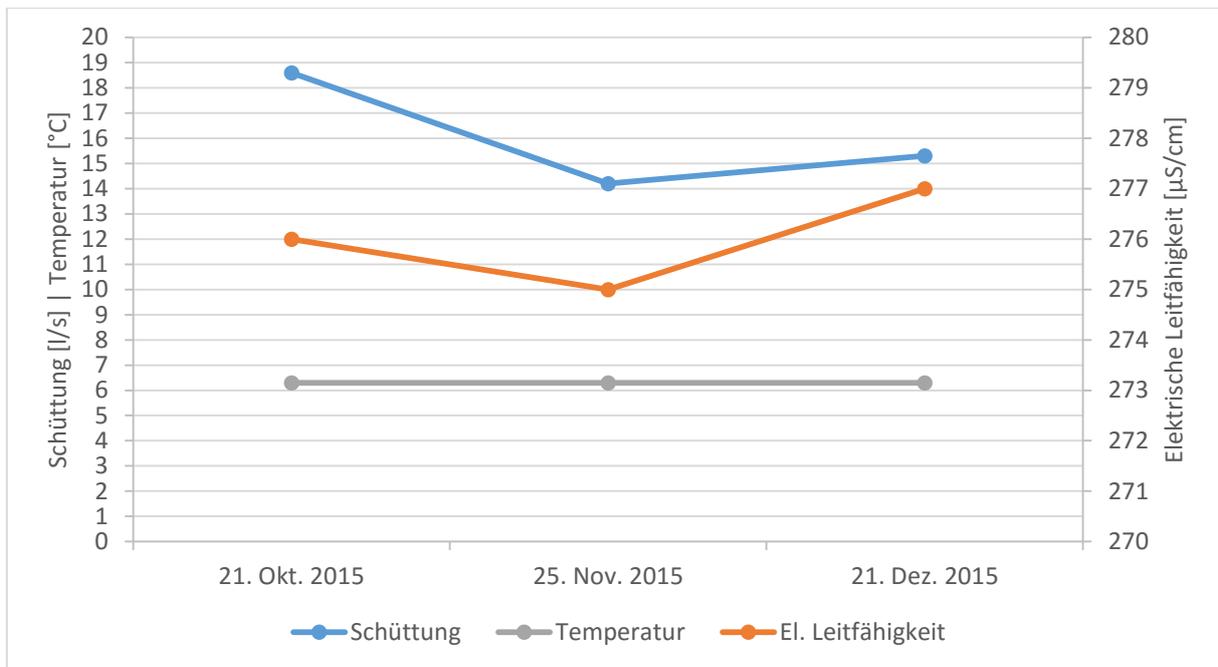


Diagramm 6: Schüttung in l/s, Temperatur in °C und elektrische Leitfähigkeit in µS/cm der Steinberg Ost Quelle im Zeitraum Oktober bis Dezember.

4.2.2. Hydrochemische Parameter

Der pH-Wert der Steinberg Ost Quelle betrug im Oktober 7,99.

Für die Karbonathärte konnte - ebenfalls im Oktober - ein Wert von 7,6 °dH ermittelt werden. Die Gesamthärte des Wassers betrug 6,8 °dH (Tabelle 5).

Die chemische Analyse der Wasserproben ergab die höchsten Werte an Ca (48 mg/l) und Mg (8,5 mg/l) relativ zu den anderen Quellen. Auch die Menge an Nitrat war mit einem Wert von rund 5,2 mg/l der höchste der untersuchten Proben, ebenso wie die Menge an Hydrogenkarbonat mit 165,62 mg/l. Die Werte von Na mit 0,16 mg/l und Cl mit 0,29 mg/l sind ähnlich hoch wie die der restlichen Quellen. Sulfat konnte rund 1 mg/l gemessen werden (Tabelle 6).

Tabelle 6: Ergebnisse der chemischen Wasseranalyse der Steinberg Ost Quelle in mg/l, mmol/l und meq/l.

		Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
21.10.2015	mg/l	0,16	8,49	48,70	0,29	5,19	1,08	165,62
	mmol/l	0,01	0,35	1,22	0,01	0,08	0,01	2,71
	meq/l	0,01	0,70	2,43	0,01	0,08	0,02	2,71

Die Äquivalentkonzentration der gemessenen Kationen- und Anionenwerte der Steinberg Ost Quelle sind im Piper-Diagramm (Diagramm 7) dargestellt. Das Wasser dieser Quelle wurde nach Furtak & Langguth (1967) als erdalkalisch-karbonatisch mit überwiegend Ca-Mg-Karbonat eingestuft. Auch hier sind hohe Hydrogenkarbonatwerte zu verzeichnen, weshalb die Quelle als Calcium-Magnesium-Hydrogenkarbonatquelle klassifiziert werden kann.

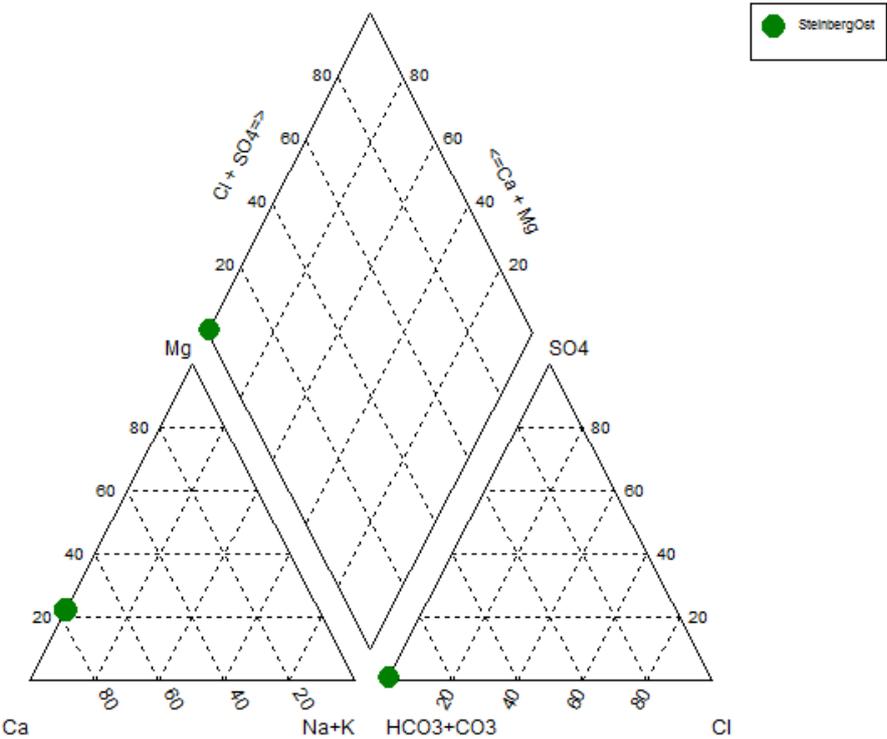


Diagramm 7: Ergebnisse der hydrochemischen Analyse der Steinberg Ost Quelle im Piper-Diagramm.

4.3. Pulverermühl Quelle

4.3.1. Hydrophysikalische Parameter

Für die Pulverermühl Quelle liegen Daten des Hydrographischen Dienstes Tirol vor. Sie umfassen die Temperatur, die elektrische Leitfähigkeit sowie die Schüttung. Es handelt sich um kontinuierlich registrierte Daten, welche mit 24-Stunden- bzw. 15-Minuten-Intervallen erhoben werden. Der vorhandene Datensatz beginnt mit 16.09.1999 00:00 Uhr. Dennoch wurden die Temperatur und die Leitfähigkeit wie bei den restlichen Quellen gemessen und mit den Werten des Hydrographischen Dienstes verglichen.

Die Temperatur bei der Pulverermühl Quelle lag im Oktober bei 6,2 °C, sank im November auf 6,0 °C ab und stieg im Dezember wieder auf 6,1 °C. Diese Werte decken sich mit den Messungen des Hydrographischen Dienstes. Im Jänner wurde eine Temperatur von 4,8 °C gemessen, was damit zu erklären ist, dass die Messung einige hundert Meter unterhalb der Quelle gemacht wurde. Die Außentemperatur lag um die -5 °C, daher wurde das Wasser noch deutlich abgekühlt. Die Pulverermühl Quelle ist nur leicht kühler als die Steinberg Ost Quelle, aber deutlich wärmer als die Untere Bergalm Quelle und die Schwarzbach Quelle.

Die elektrische Leitfähigkeit wurde im Oktober und Jänner mit 244 µS/cm gemessen und lag somit im Vergleich zum November und Dezember mit 241 µS/cm etwas höher (Diagramm 8).

Die Schüttungswerte zeigten im Oktober den Höchstwert von 44 l/s. Im November fiel dieser Wert auf 33 l/s ab, stieg dann im Dezember wieder auf 39 l/s an und fiel im Jänner erneut auf 30 l/s ab (Tabelle 7, Diagramm 8).

Tabelle 7: Daten der Pulverermühl Quelle. T = Temperatur, LF = Leitfähigkeit, Q = Schüttung (Hydrographischer Dienst Tirol), KH = Karbonathärte, GH = Gesamthärte.

Datum	T (°C)	LF (µS/cm)	Q (l/s)	pH	KH (°dH)	GH (°dH)
21.10.2015	6,2	244	44	8,18	6,5	7,6
25.11.2015	6,0	241	33	-	-	-
21.12.2015	6,1	241	39	-	-	-
22.01.2015	4,8	244	30	8,33	6,7	7,5

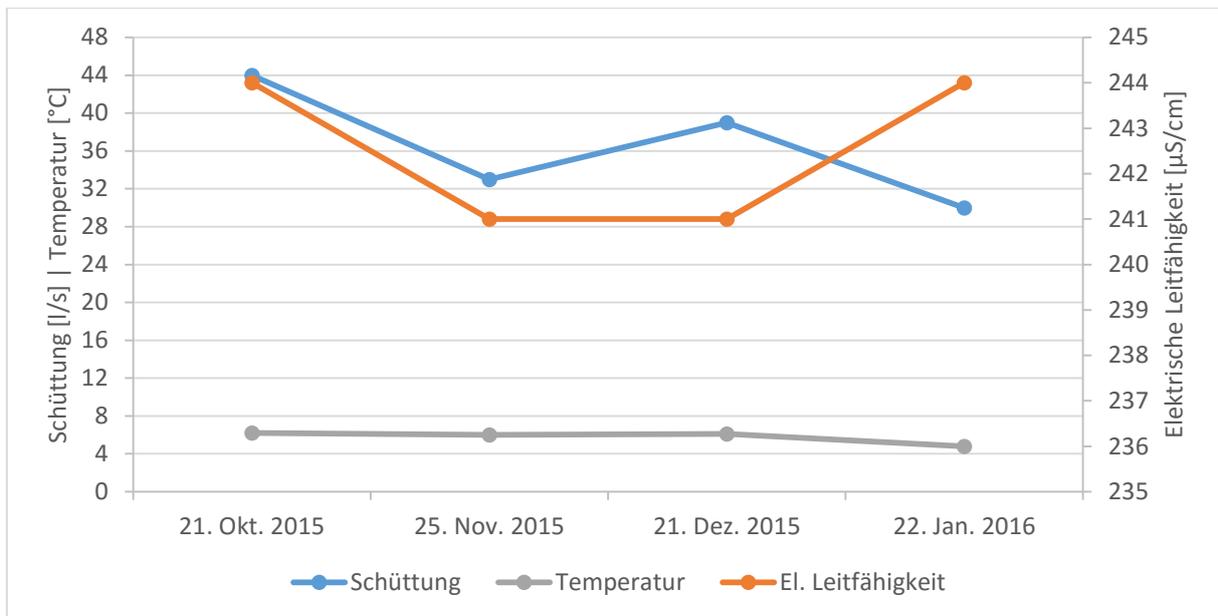


Diagramm 8: Schüttung in l/s, Temperatur in °C und elektrische Leitfähigkeit in µS/cm der Pulverermühl Quelle im Zeitraum Oktober bis Jänner.

Beobachtungszeitraum 1999-2016

Die Auswertung der Daten des Hydrographischen Dienstes Tirol im Zeitraum 16. September 1999 bis 01. Februar 2016 zeigt die jährlichen Schwankungen der physikalischen Parameter der Pulverermühl Quelle. Die Maximaltemperatur des Quellwassers lag in diesem Zeitraum bei 6,9 °C. Das Minimum wurde mit 5,1 °C gemessen. Das arithmetische Mittel aus allen gemessenen Temperaturen dieses Zeitraums wurde mit 6,0 °C errechnet. Während die mittlere Temperatur in den Jahren 1999 bis 2006 konstant blieb, konnte 2006 bis heute ein gradueller Anstieg von ca. 0,3 °C verzeichnet werden.

Für die Quellschüttung konnte in dieser knapp 16-jährigen Periode ein Maximum von 1.172 l/s erfasst werden. Das Minimum lag bei 18,6 l/s. Das arithmetische Mittel ergab eine durchschnittliche Quellschüttung von 83,6 l/s. Der Schüttungsquotient für diesen Zeitraum beträgt 0,016.

Die elektrische Leitfähigkeit blieb mit kleineren Schwankungen innerhalb eines Jahres über den Zeitraum hinweg relativ konstant. Das Leitfähigkeitsmaximum wurde mit 265 µS/cm gemessen, das Minimum bei 166 µS/cm. Die durchschnittliche Leitfähigkeit betrug 239 µS/cm (Diagramm 9).

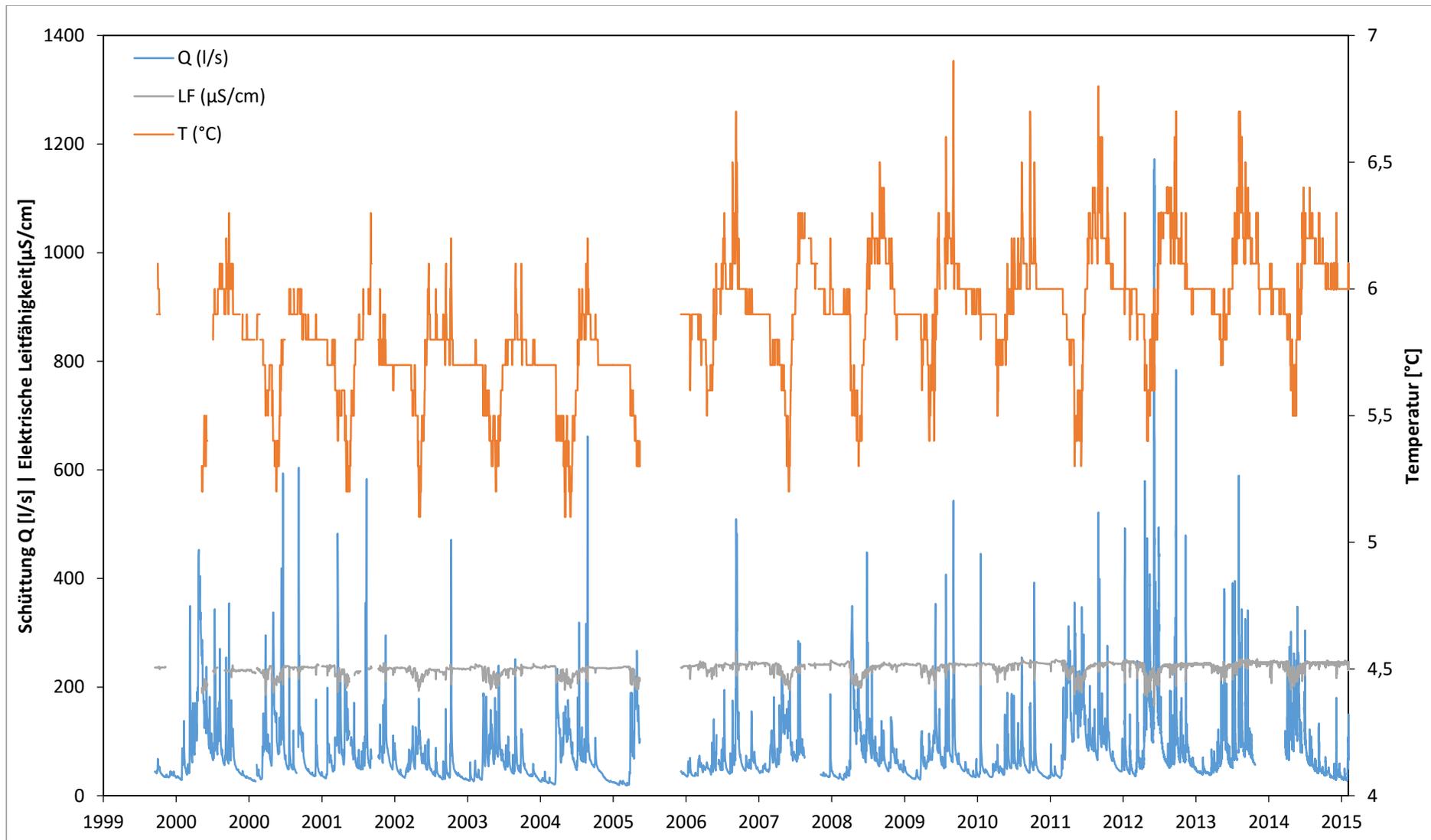


Diagramm 9: Schüttung Q, elektrische Leitfähigkeit LF und Temperatur T der Pulverermühl Quelle im Zeitraum 1999-2015 (Daten: Hydrographischer Dienst Tirol).

Beobachtungszeitraum 2013-2015

Es wurde eine Auswertung der Daten des Hydrographischen Dienstes Tirol für den Zeitraum 01. Jänner 2013 bis 31. Dezember 2015 unternommen.

Für die Temperatur konnte in diesem Zeitraum ein Maximalwert von 6,7 °C ermittelt werden. Das Temperaturminimum lag bei 5,4 °C. Es zeigt sich, dass die Wassertemperatur nicht mit der Lufttemperatur korreliert. In den Wintermonaten (November bis März) herrschten relativ konstante Temperaturen um die 6,0 °C. Ein Abfallen der Temperaturen kann dann in den Monaten darauf (April bis Juni) beobachtet werden. In den Sommermonaten (Juni bis September) erreichte das Wasser der Pulverermühl Quelle die Höchsttemperaturen.

Das Schüttungsmaximum in diesem Zeitraum betrug 1.172 l/s, das Schüttungsminimum lag bei 29 l/s. Die durchschnittliche Schüttung wurde anhand des arithmetischen Mittels mit 85 l/s errechnet. Dieser Wert liegt etwas höher als der Gesamtdurchschnitt der Messreihe 1999 bis 2015. Der Schüttungsquotient wurde mit 0,025 berechnet.

Die elektrische Leitfähigkeit in diesem Zeitraum lag bei durchschnittlich 239,7 µS/cm. Der Maximalwert betrug 251 µS/cm, der Minimalwert lag bei 166,0 µS/cm (Diagramm 10).

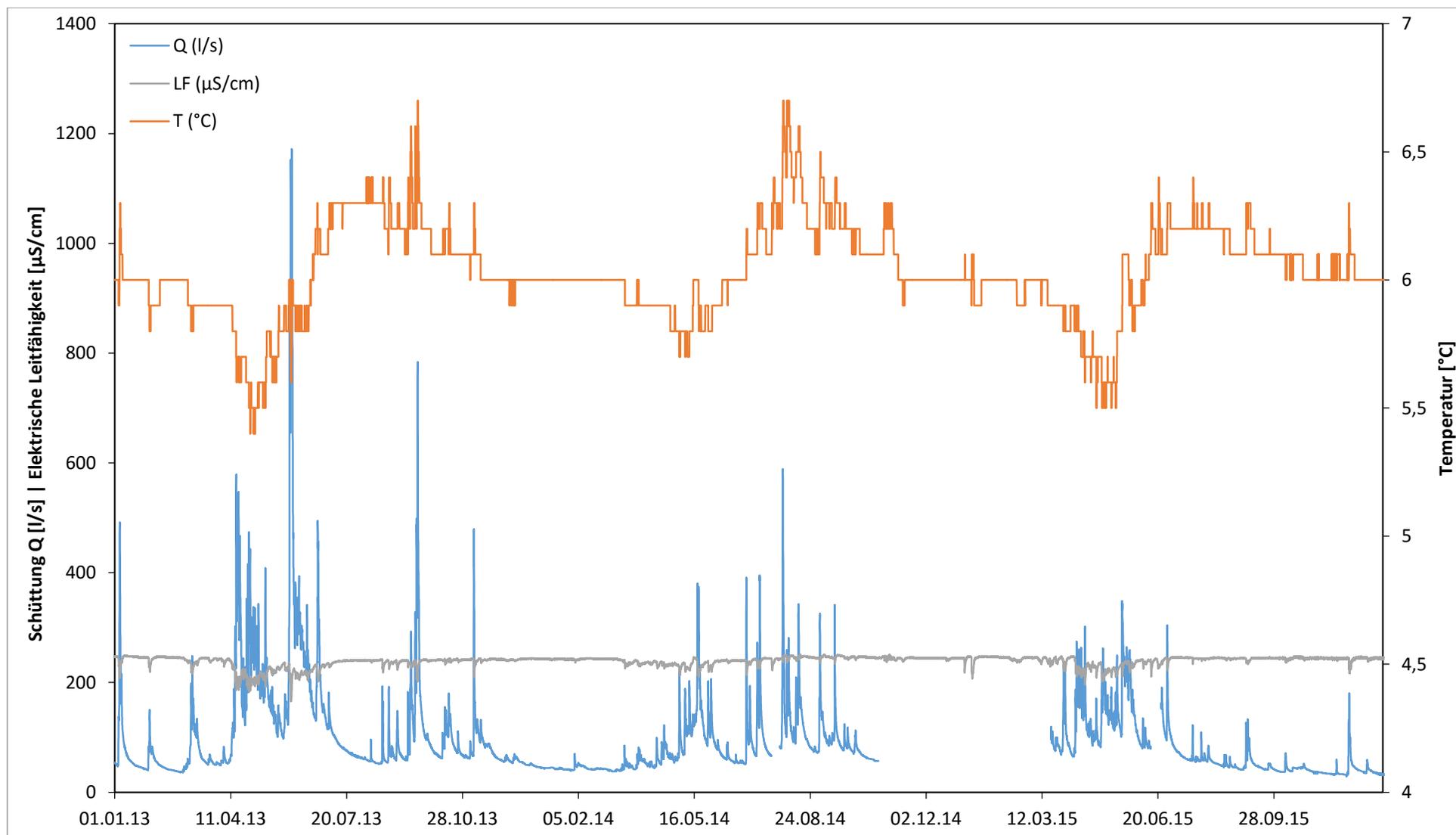


Diagramm 10: Schüttung Q, elektrische Leitfähigkeit LF und Temperatur T der Pulverermühl Quelle im Zeitraum 2013-2015 (Daten: Hydrographischer Dienst Tirol).

Beobachtungszeitraum Oktober 2015 bis Jänner 2016

Die Temperaturänderung innerhalb dieses Zeitraumes war sehr gering, sodass sie im Diagramm 11 vernachlässigt wurde ($6,0\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$).

Das Schüttungsmaximum im Zeitraum Oktober bis Jänner lag bei 180 l/s. Dem gegenüber steht ein gemessenes Schüttungsminimum von 28 l/s. Der Mittelwert der Schüttung wurde mit 41 l/s errechnet. Es ergibt sich für diesen Zeitraum ein Schüttungsquotient von 0,16.

Die elektrische Leitfähigkeit erreichte zwischen Oktober und Jänner einen Höchstwert von 248 $\mu\text{S/cm}$. Das Leitfähigkeitsminimum lag bei 217 $\mu\text{S/cm}$. Es ergibt sich zwischen Oktober und Jänner ein Leitfähigkeitsdurchschnitt von 244 $\mu\text{S/cm}$.

Die Niederschlagstagesmittel zeigen für diesen Zeitraum einen Maximalwert von 30 mm, das Minimum liegt bei 0 mm. Durchschnittlich fielen in diesen vier Monaten 2,1 mm/d.

Es zeigt sich deutlich, dass die elektrische Leitfähigkeit direkt mit der Schüttungsrate korreliert. Nach größeren Niederschlagsereignissen steigt die Schüttung an, gleichzeitig fällt die elektrische Leitfähigkeit ab. Dabei gilt, je größer der Schüttungsratenanstieg, desto mehr nimmt die elektrische Leitfähigkeit ab. Sobald die Quelle wieder durchschnittliche Werte erreicht, nimmt auch die Leitfähigkeit wieder den durchschnittlichen Wert an.

Des Weiteren ist deutlich zu erkennen, dass die Schüttung sehr schnell auf Niederschlagsereignisse reagiert. Zum Beispiel gab es am 20. November 2015 ein starkes Niederschlagsereignis mit 30 mm. Am 19., 21. und 22. November fielen lediglich ca. 2 mm/d. Am 20. November stieg die Schüttung bereits ab 20:00 Uhr an und erreichte den Peak bei 59 l/s am 21. November um 00:15 Uhr. Um ca. 08:00 Uhr am 21. November erreichte die Pulverermühl Quelle wieder den Ausgangwert. Das deutet auf eine relativ schnelle Entleerung des Grundwasserleiters hin.

Ein enormer kurzzeitiger Schüttungsanstieg von 35 l/s auf 180 l/s wurde zwischen 30. November und 04. Dezember verzeichnet (Diagramm 11).

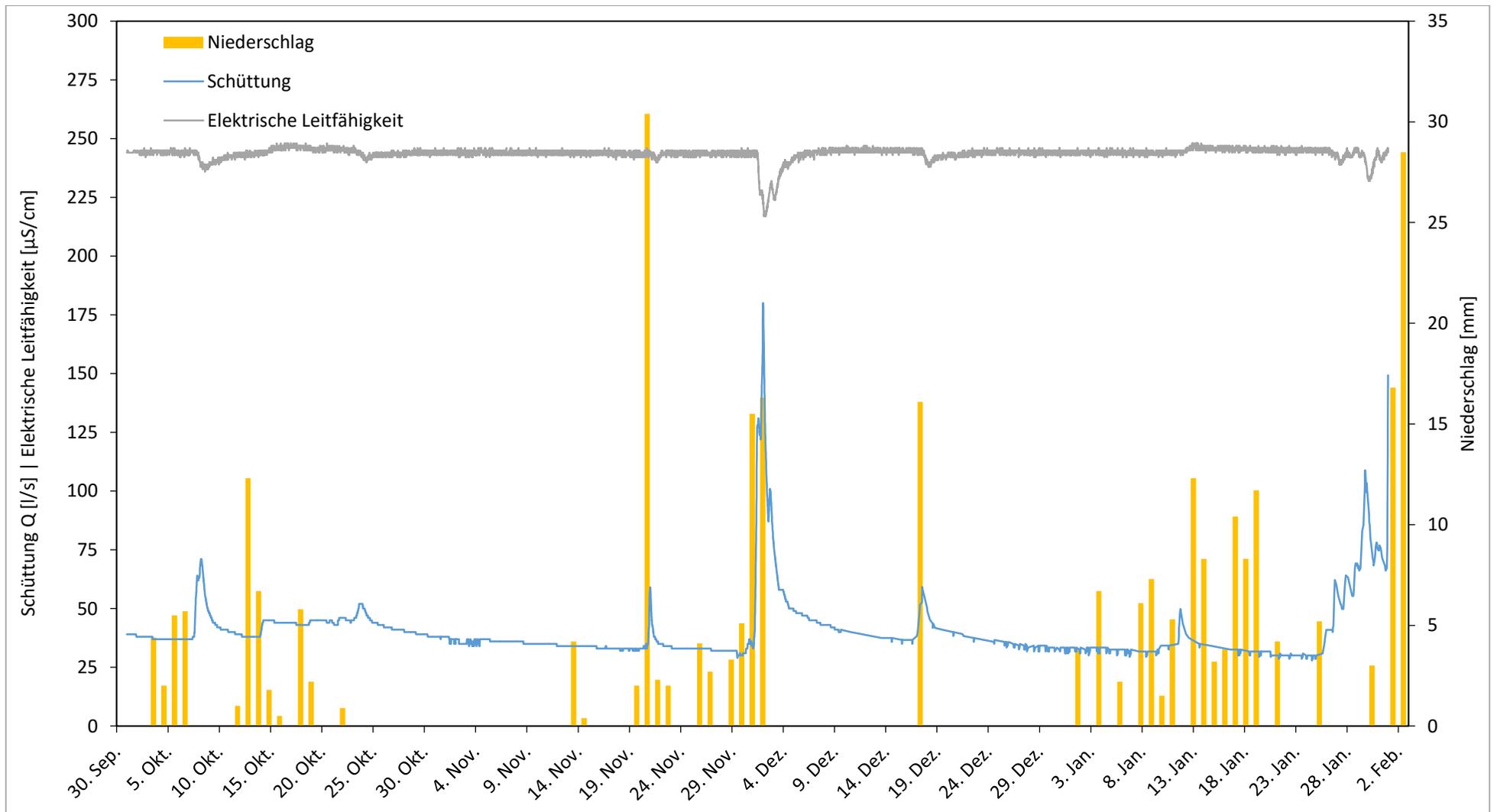


Diagramm 11: Schüttung Q und elektrische Leitfähigkeit LF der Pulverermühl Quelle und Niederschlag (Steinberg am Rofan) im Zeitraum Oktober 2015 bis Jänner 2016 (Daten: Hydrographischer Dienst Tirol).

Trockenwetterfalllinien (TWL)

Es wurden anhand der oben gezeigten Diagramme einige Niederschlagsereignisse mit anschließendem Trockenwetter ausgewählt und der quellspezifische Koeffizient (Auslaufkoeffizient) α für anhand folgender Zeiträume berechnet:

- Zeitraum 08.10.2015 06:30 Uhr bis 10.10.2015 20:30 Uhr: $\alpha = 0,211 \text{ d}^{-1}$
- Zeitraum 21.11.2015 01:00 Uhr bis 23.11.2015 01:00 Uhr: $\alpha = 0,276 \text{ d}^{-1}$
- Zeitraum 02.12.2015 19:00 Uhr bis 05.12.2015 06:00 Uhr: $\alpha = 0,293 \text{ d}^{-1}$
- Zeitraum 17.12.2015 13:00 Uhr bis 18.12.2015 19:00 Uhr: $\alpha = 0,272 \text{ d}^{-1}$

Das arithmetische Mittel aller quellspezifischen Koeffizienten beträgt $\alpha = 0,263 \text{ d}^{-1}$.

Daraus ergibt sich eine hydrologische Halbwertszeit von $t_{1/2} = 2,63 \text{ d}$.

4.3.2. Hydrochemische Parameter

Der pH-Wert wurde im Oktober mit 8,18 ermittelt, im Jänner lag er mit 8,33 etwas höher.

Für die Karbonathärte konnte im Oktober ein Wert von 6,5 °dH ermittelt werden, im Jänner lag dieser Wert etwas höher bei 6,7 °dH. Die Gesamthärte des Wassers betrug im Oktober 7,6 °dH, im Jänner hingegen 7,5 °dH (Tabelle 7).

Die chemische Wasseranalyse lieferte auch hier hohe Werte an Ca mit 43,4 mg/l im Oktober und 41,50 mg/l im Jänner. Der Gehalt von Mg im Wasser nahm von Oktober (6,86 mg/l) auf Jänner (7,26 mg/l) leicht zu, bleibt aber im Vergleich zu den restlichen Quellen im Mittelfeld. Die Menge an Nitrat nahm von Oktober mit 2,64 mg/l auf Jänner mit 2,39 mg/l leicht ab. Die gemessenen Werte von Na und Cl blieben sehr niedrig bei rund 0,2 mg/l. Auch der Sulfatwert änderte sich kaum und blieb bei rund 0,6 bis 0,7 mg/l. Der Hydrogenkarbonatgehalt stieg von Oktober (142 mg/l) auf Jänner (146 mg/l) leicht an (Tabelle 8).

Tabelle 8: Ergebnisse der chemischen Wasseranalyse der Pulverermühl Quelle in mg/l, mmol/l und meq/l.

		Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
21.10.2015	mg/l	0,17	6,86	43,40	0,24	2,64	0,64	141,65
	mmol/l	0,01	0,28	1,08	0,01	0,04	0,01	2,32
	meq/l	0,01	0,56	2,17	0,01	0,04	0,01	2,32
22.01.2016	mg/l	0,14	7,26	41,50	0,21	2,39	0,68	146,00
	mmol/l	0,01	0,30	1,04	0,01	0,04	0,01	2,39
	meq/l	0,01	0,60	2,07	0,01	0,04	0,01	2,39

Die Äquivalentkonzentrationen der ermittelten Kationen und Anionen der Pulverermühl Quelle wurden im Piper-Diagramm (Diagramm 12) dargestellt. Auch hier wurde eine Klassifizierung des Wassers nach Furtak & Langguth (1967) vorgenommen. Es handelt sich hierbei um erdalkalisch-karbonatisches Wasser mit überwiegend Ca-(Mg-)Karbonat. Aufgrund des sehr hohen Hydrogenkarbonatanteils kann auch die Pulverermühl Quelle als Calcium-(Magnesium-)hydrogenkarbonatquelle klassifiziert werden. Die Analyse der Probe, welche im Oktober genommen wurde, qualifiziert das Wasser als erdalkalisch-karbonatisches Wasser mit überwiegend Ca-Karbonat. Die im Jänner genommene Probe weist leicht höhere Mg-Gehalte auf, wodurch das Wasser in den erdalkalisch-karbonatischen Bereich mit überwiegend Ca-Mg-Karbonat fällt.

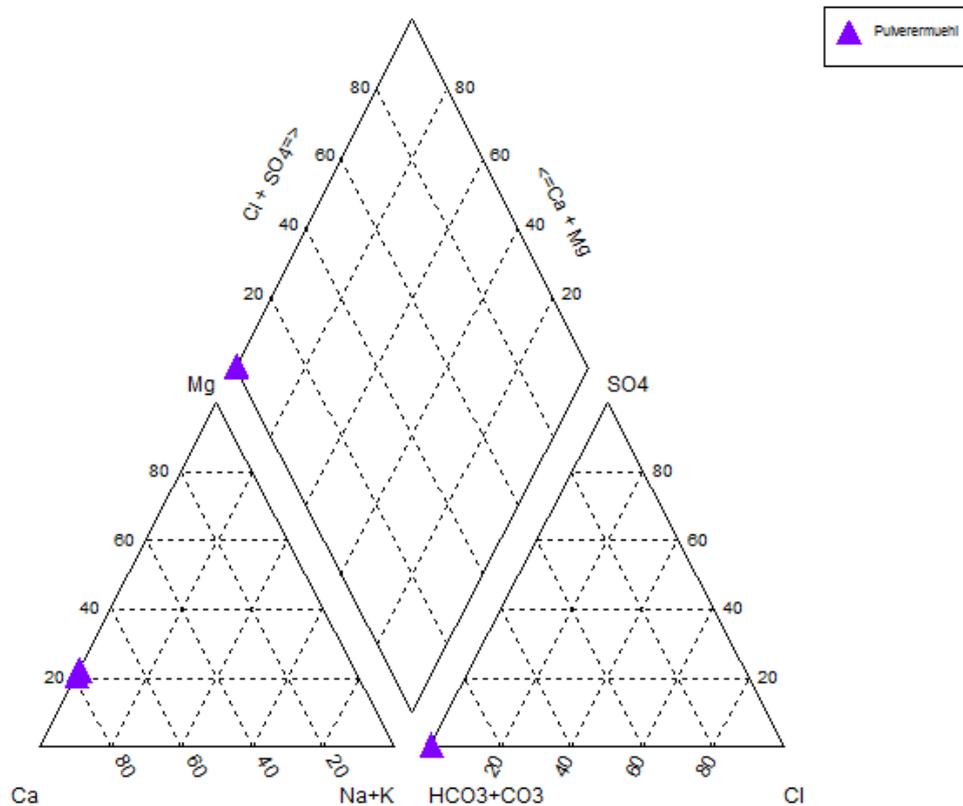


Diagramm 12: Ergebnisse der hydrochemischen Analyse der Pulverermühl Quelle im Piper-Diagramm.

4.4. Schwarzbach Quelle

4.4.1. Hydrophysikalische Parameter

Die Temperatur der Schwarzbach Quelle betrug konstant 5,6 °C. Lediglich im Jänner wurde eine Temperatur von 5,4 °C gemessen, allerdings erfolge die Messung etwas quellferner als die restlichen Messungen und bei Außentemperaturen von -5 °C dürfte der Bach nach ca. 100 m durchaus um 0,2 °C abgekühlt haben.

Die elektrische Leitfähigkeit konnte mit nahezu konstanten 217 $\mu\text{S}/\text{cm} \pm 1 \mu\text{S}/\text{cm}$ gemessen werden (Diagramm 13). Die Salzverdünnungsmethode wurde mit 1 kg Kochsalz durchgeführt, was einen konstanten Leitfähigkeitsanstieg auf 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zur Folge hatte. Nur die Messung des Sensors B im Jänner ergab einen Wert von 425 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Im Dezember wurde die Messung mit nur 0,5 kg Kochsalz durchgeführt, der Leitfähigkeitsanstieg erreichte nur einen Wert von 305 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Sensor A) bzw. 325 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Sensor B).

Die Untersuchungen der Quellschüttung der Schwarzbach Quelle ergaben sehr unterschiedliche Werte. Während im Oktober noch ein Wert von 97 l/s erfasst werden konnte, lag die Schüttung im November mit 75 l/s wesentlich darunter. Im Dezember stieg die Schüttung wieder auf 88 l/s an, wobei hier anzumerken ist, dass der Mittelwert aus 86,4 l/s (Sensor A) und 88,6 l/s (Sensor B) genommen wurde. Im Jänner wurde dann mit 68 l/s der tiefste Wert erreicht (Diagramm 13, Tabelle 9). Der Schüttungsquotient dieser Quelle betrug im Zeitraum Oktober bis Jänner 0,7.

Tabelle 9: Daten der Schwarzbach Quelle. T = Temperatur, GLF = Grundleitfähigkeit, LF Peak = Maximalanstieg der Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$ nach Tracereinspeisung, Q = Schüttung, KH = Karbonathärte, GH = Gesamthärte.

Datum	T (°C)	GLF ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	LF-Peak	Q (l/s)	pH	KH (°dH)	GH (°dH)
21.10.2015	5,6	217	400	97	8,23	6,2	6,8
25.11.2015	5,6	217	400	75	-	-	-
21.12.2015	5,6	216	305 bzw. 325	88	-	-	-
22.01.2015	5,4	218	400 bzw. 425	68	8,31	6,0	6,6

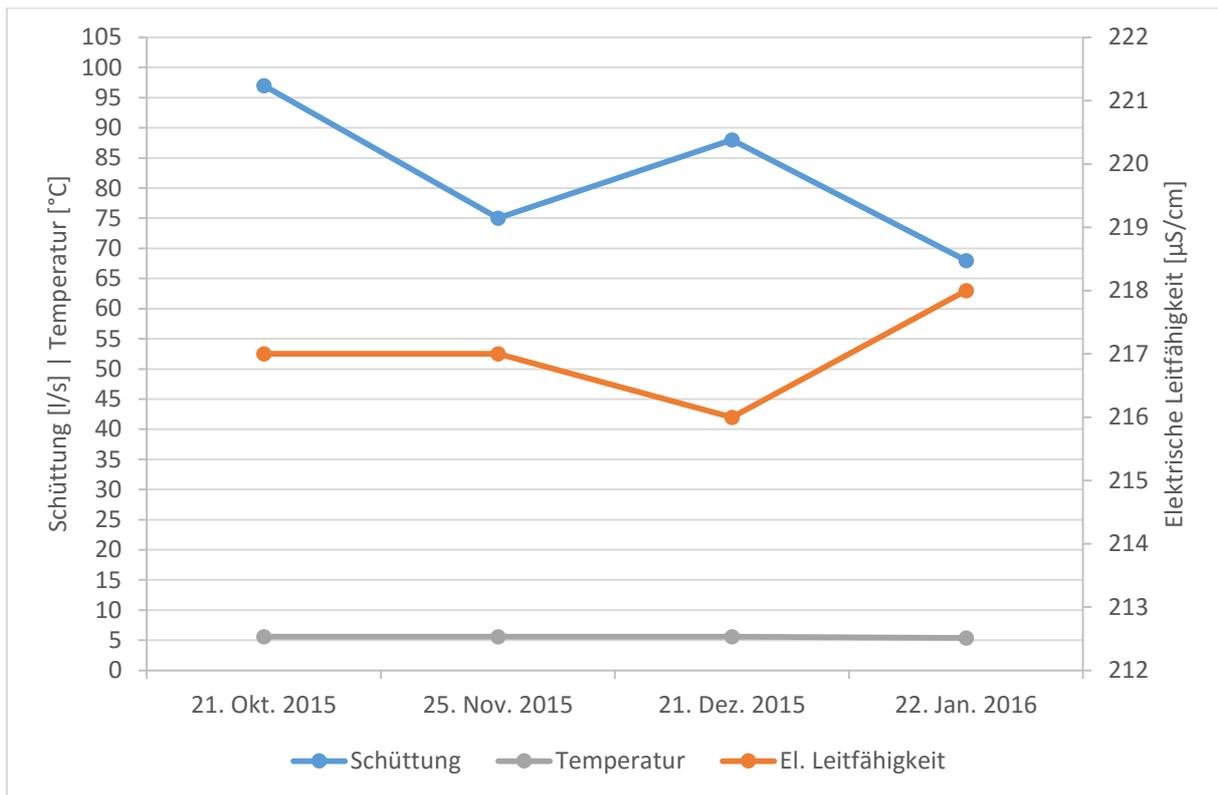


Diagramm 13: Schüttung in l/s, Temperatur in °C und elektrische Leitfähigkeit in µS/cm der Schwarzbach Quelle im Zeitraum Oktober bis Jänner.

4.4.2. Hydrochemische Parameter

Der pH-Wert liegt im Vergleich zu den restlichen Quellen mit 8,23 im Oktober und 8,31 im Jänner am höchsten.

Die Karbonathärte konnte im Oktober mit 6,2 °dH und im Jänner mit 6,0 °dH bestimmt werden. Die Gesamthärte des Wassers betrug im Oktober 6,8 °dH und im Jänner etwas weniger mit 6,6 °dH (Tabelle 9).

Die hydrochemische Analyse der Proben ergab in Relation zu den restlichen Quellen relativ niedrigere Ca-Gehalte von rund 36 mg/l im Oktober und 34 mg/l im Jänner. Die Mg-Werte hingegen liegen mit 7,6 mg/l und 7,9 mg/l im oberen Mittelfeld. Die Konzentration an Nitrat nahm von Oktober bis Jänner mit einem Wert von rund 3 mg/l kaum ab. Ebenso blieben die Na- und Cl-Werte relativ niedrig bei 0,1 bis 0,2 mg/l. Die Konzentration an Hydrogenkarbonat nahm von Oktober (135 mg/l) zu Jänner (130 mg/l) leicht ab. Die Menge an Sulfat blieb relativ konstant bei rund 0,6 mg/l (Tabelle 10).

Tabelle 10: Ergebnisse der chemischen Wasseranalyse der Schwarzbach Quelle in mg/l, mmol/l und meq/l.

		Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
21.10.2015	mg/l	0,15	7,64	36,34	0,24	3,06	0,64	135,11
	mmol/l	0,01	0,31	0,91	0,01	0,05	0,01	2,21
	meq/l	0,01	0,63	1,81	0,01	0,05	0,01	2,21
22.01.2016	mg/l	0,13	7,93	34,33	0,19	2,91	0,59	130,75
	mmol/l	0,01	0,33	0,86	0,01	0,05	0,01	2,14
	meq/l	0,01	0,65	1,71	0,01	0,05	0,01	2,14

Die Äquivalentkonzentrationen der ermittelten Kationen und Anionen der Schwarzbach Quelle wurden im Piper-Diagramm (Diagramm 14) dargestellt. Nach der Klassifizierung des Wassers nach Furtak & Langguth (1967) handelt es sich bei diesem Wassertypus um erdalkalisch-karbonatisches Wasser mit überwiegend Ca-Mg-Karbonat. Wie die restlichen Quellen weist auch diese Quelle hohe Hydrogencarbonatwerte auf. Daher kann auch diese Quelle als Calcium-Magnesium-Hydrogencarbonatquelle typisiert werden.

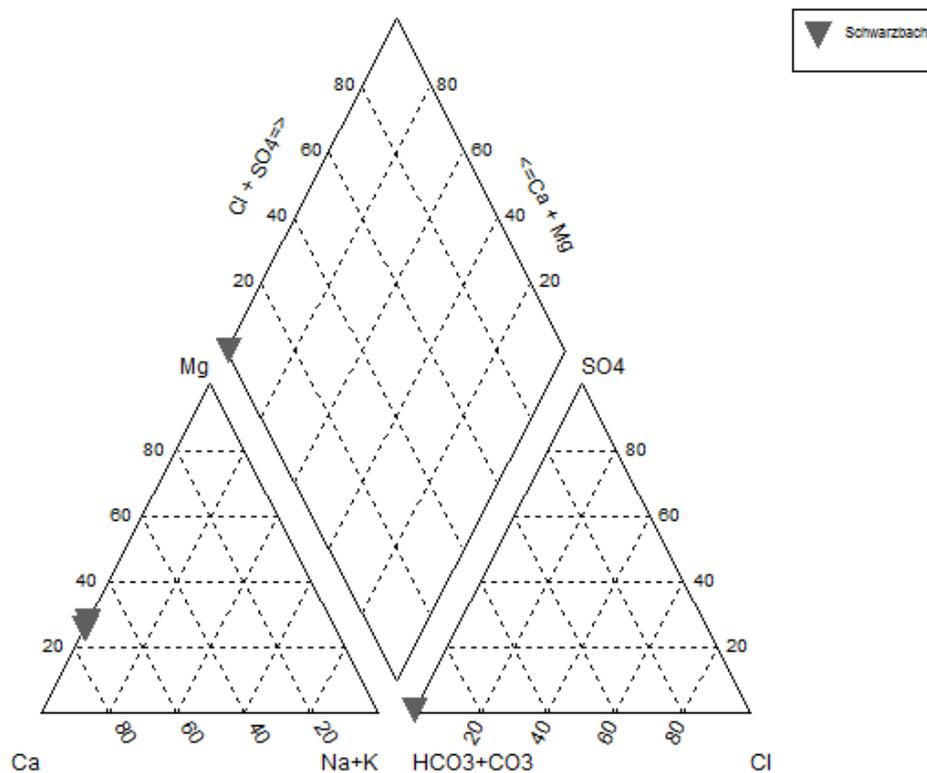


Diagramm 14: Ergebnisse der hydrochemischen Analyse der Schwarzbach Quelle im Piper-Diagramm.

4.5. Sammelanalysen und Vergleich

4.5.1. pH-Wert & elektrische Leitfähigkeit

Die pH-Werte der analysierten Quellwässer streuen im Bereich zwischen 7,99 und 8,33. Es handelt sich also um ausschließlich alkalische (basische) Wässer. Die elektrischen Leitfähigkeiten fallen in den Bereich zwischen 217 bis 244 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Lediglich das Wasser der Steinberg Ost Quelle zeigt eine deutlich höhere elektrische Leitfähigkeit von 276 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Diagramm 15).

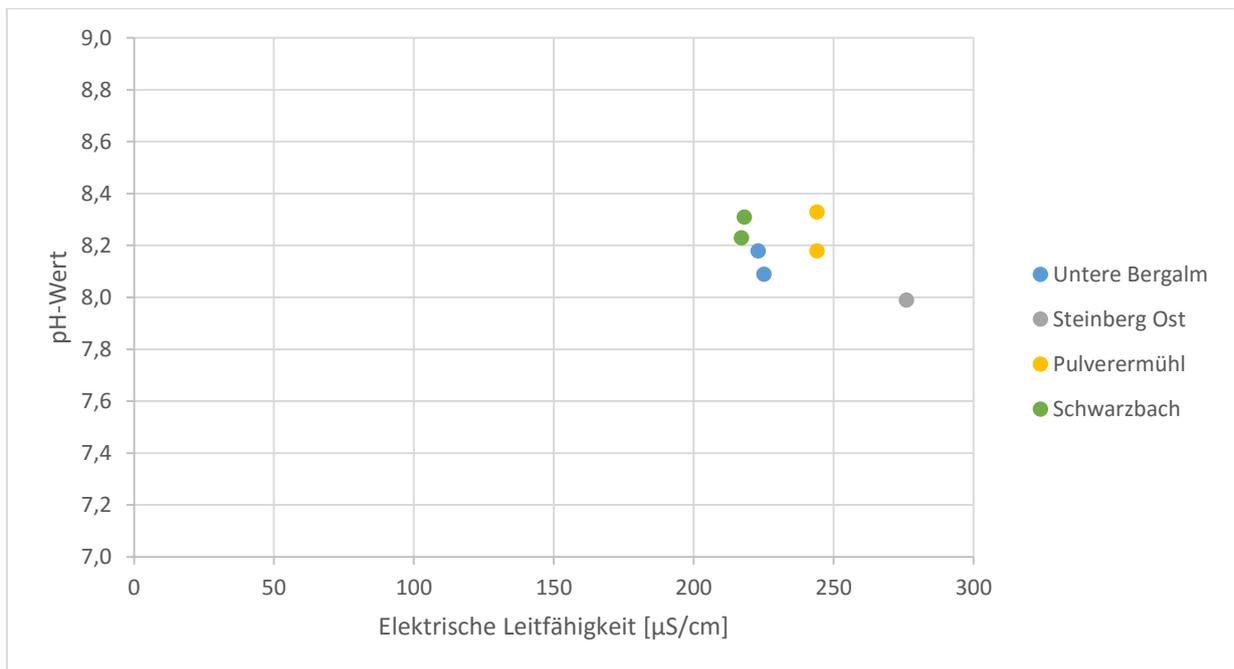


Diagramm 15: Elektrische Leitfähigkeiten und pH-Werte der vier Quellen. Die elektrische Leitfähigkeit wurde in $\mu\text{S}/\text{cm}$ angegeben.

4.5.2. Äquivalentkonzentrationen bedeutender Ionen

Die wichtigsten Ionen der hydrochemischen Analyse wurden im Diagramm 16 nach Schoeller (1956) dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass sich die Äquivalentkonzentrationen der gelösten Ionen der vier untersuchten Quellen nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Dies lässt Rückschlüsse auf Gemeinsamkeiten der hydrogeologischen Bedingungen im Einzugsgebiet zu.

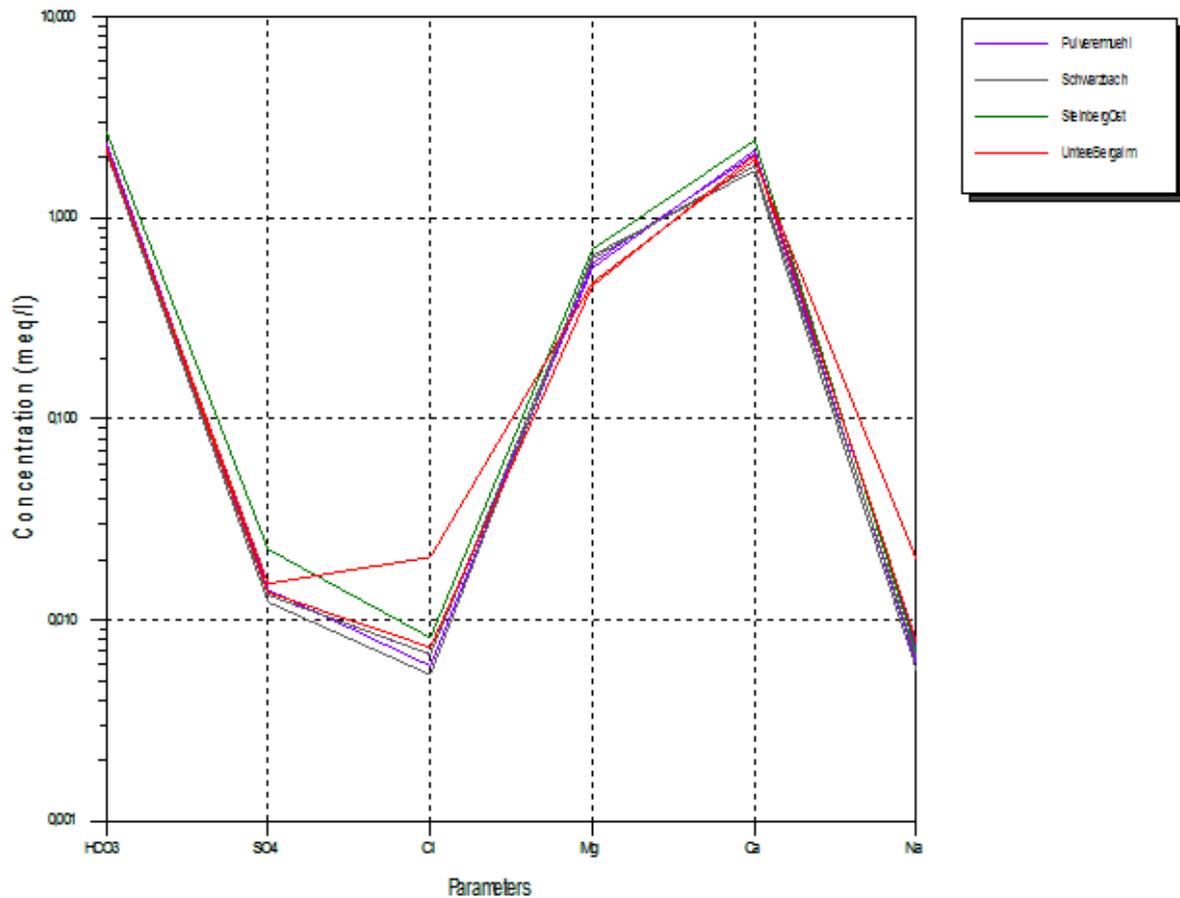


Diagramm 16: Darstellung bedeutender Ionen in ihren Äquivalentkonzentrationen (meq/l) im semilogarithmischen Diagramm nach Schoeller (1956).

4.5.3. Ca-Mg-Verhältnisse

Das Verhältnis der Ca-Ionen zu den Mg-Ionen der untersuchten Wässer streut um das 4:1 Verhältnis. Für die Untere Bergalm Quelle konnte im Oktober ein Ca-Mg-Verhältnis von 4,45 berechnet werden. Im Jänner war dieses Verhältnis mit 4,07 etwas kleiner. Trotzdem zeigt die Untere Bergalm Quelle die größten Ca-Mg-Verhältnisse. Bei der Steinberg Ost Quelle betrug dieses Verhältnis im Oktober lediglich 3,48. Etwas größer war das Verhältnis der Ca-Mg-Ionen der Pulverermühl Quelle im Oktober mit 3,48. Im Jänner betrug es lediglich 3,47. Das Wasser der Schwarzbach Quelle zeigte die geringsten Ca-Mg-Verhältnisse mit 2,88 im Oktober und 2,63 im Jänner. Die Ca-Mg-Verhältnisse wurden in Diagramm 17 dargestellt.

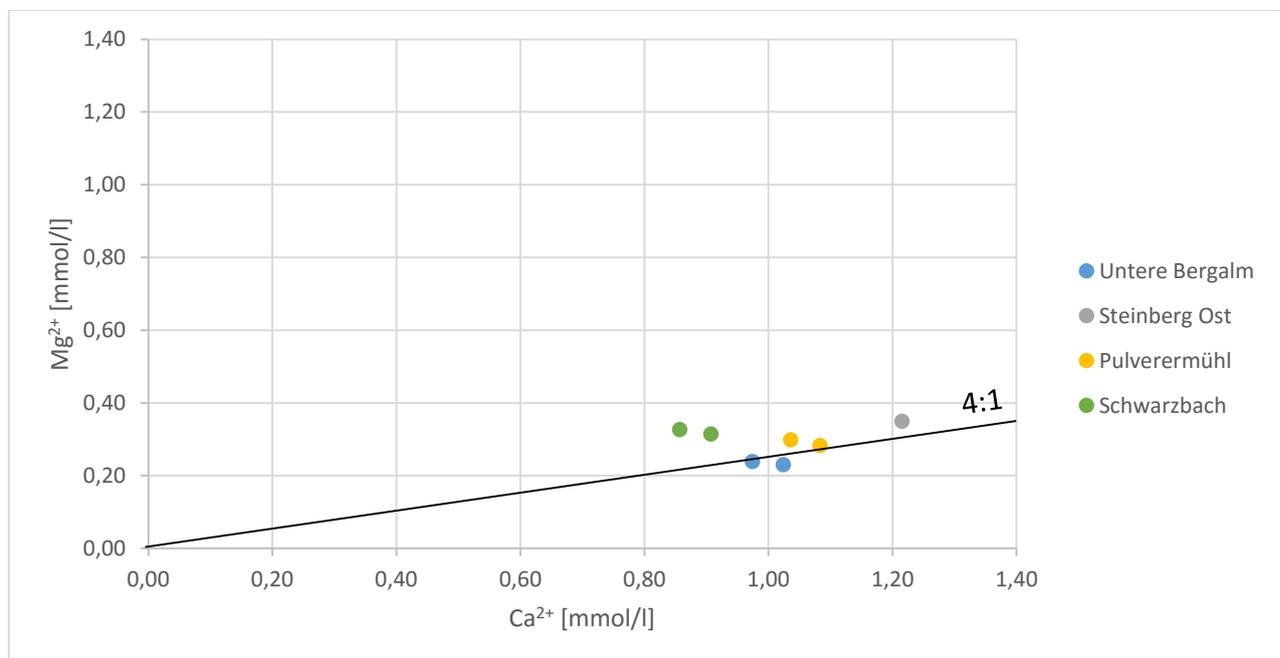


Diagramm 17: Verhältnis der Ca-Mg-Ionen der Wässer der vier Quellen. Alle Angaben in mmol/l.

4.5.4. Erdalkalimetalle-Hydrogenkarbonat-Verhältnis

Das Verhältnis der Erdalkalimetalle Ca^{2+} und Mg^{2+} zu Hydrogenkarbonat HCO_3^- liegen alle zwischen 0,5:1 und 0,6:1 (Diagramm 18). Solche Verhältnisse sind typisch für Wässer, bei denen Kalklösung durch CO_2 -Zufuhr aus dem Boden stattgefunden hat.

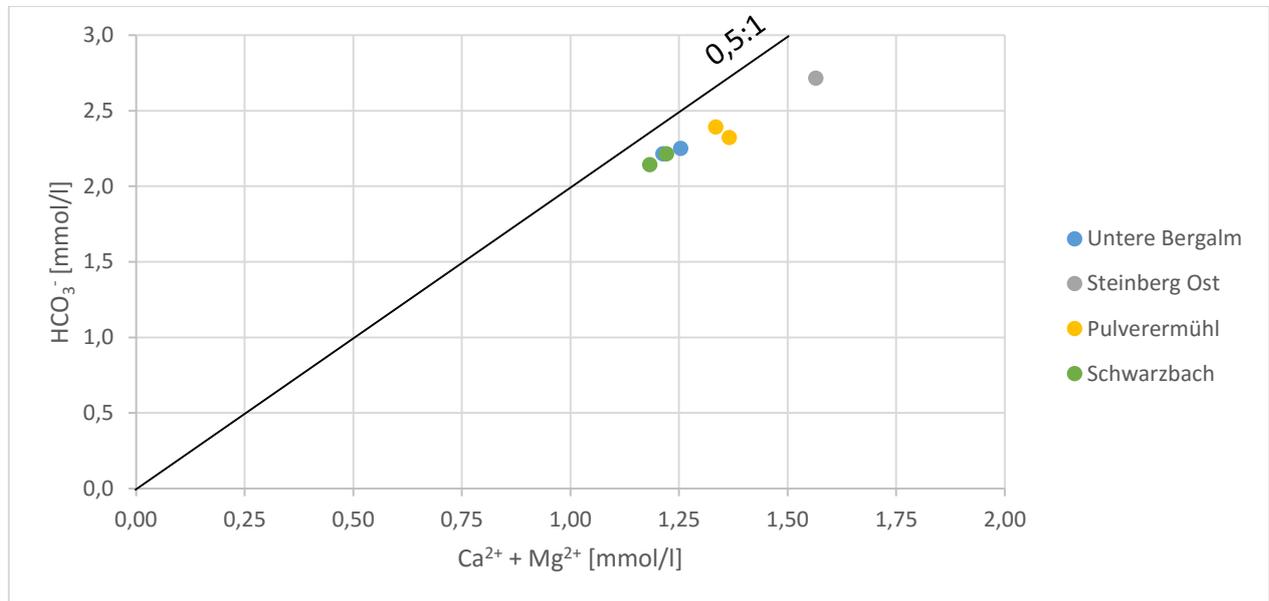


Diagramm 18: Verhältnis der Erdalkali-Ionen zu den Hydrogenkarbonationen der Wässer der vier Quellen. Alle Angaben in mmol/l.

4.5.5. Wasserhärte (Gesamthärte & Karbonathärte)

Die Gesamthärten der Wässer liegen alle < 8 °dH, lediglich die Steinberg Ost Quelle zeigt deutlich höhere Härtewerte von 8,8 °dH. Nach der Klassifizierung der Härtestufen nach Klut & Olszewski (1945), handelt es sich bei den Wässern der Unteren Bergalm Quelle, der Pulverermühl Quelle und der Schwarzbach Quelle um weiche Wässer (4-8 °dH) und bei dem Quellwasser der Steinberg Ost Quelle um ein mittelhartes Wasser (8-12 °dH) (Hölting & Coldewey, 2013). Die Verhältnisse von Karbonathärte zu Gesamthärte betrug bei allen Proben 0,9 (Diagramm 19).

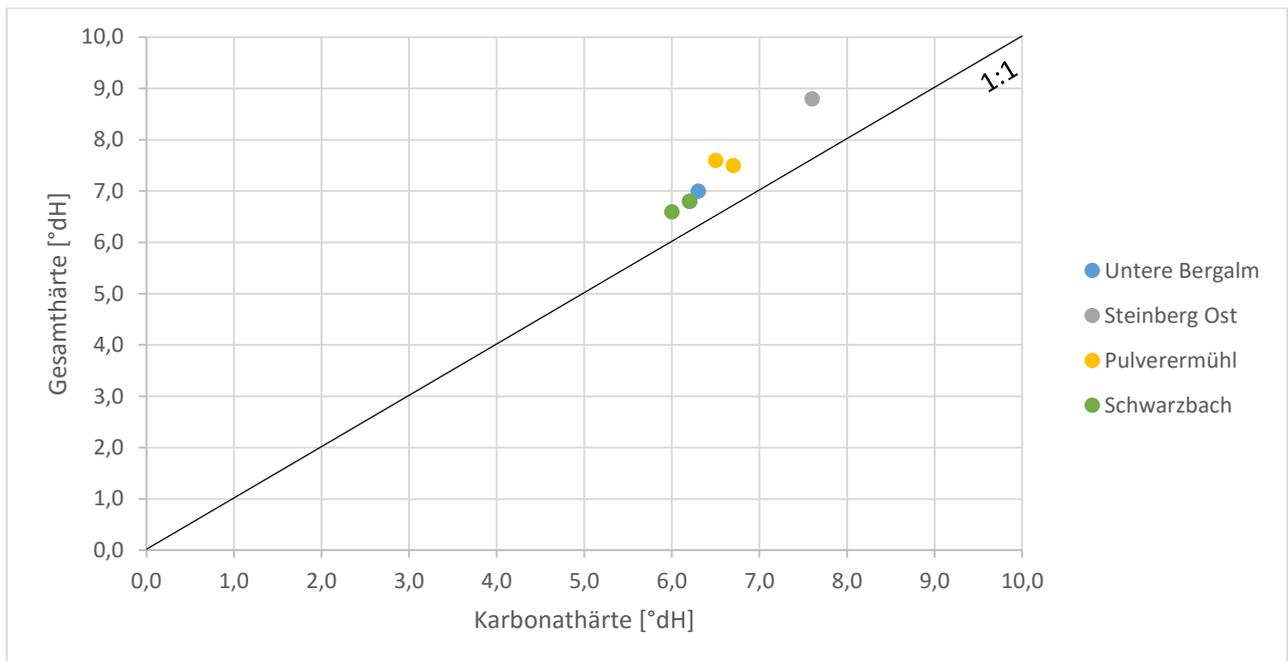


Diagramm 19: Verhältnis der Karbonathärte zur Gesamthärte der einzelnen Proben. Alle Angaben in °dH.

4.5.6. Die Wassertypen in der Übersicht

Die Darstellung der Äquivalentkonzentrationen der Kationen und Anionen in den Wasserproben der vier Quellen im Piper-Diagramm zeigt deutlich, dass sich die Wässer in ihrer chemischen Zusammensetzung kaum unterscheiden. Bei den Proben handelt es sich ausschließlich um erdalkalisch-karbonatische Wässer. Das Wasser der Unteren Bergalm Quelle und der Pulverermühl Quelle (Probe vom Oktober) wurde im Aquifer überwiegend von Ca-Karbonat (Kalk) beeinflusst. Das Wasser der Steinberg Ost Quelle, der Pulverermühl Quelle (Probe vom Jänner) sowie der Schwarzbach Quelle stand im Aquifer hauptsächlich mit Ca-Mg-Karbonat (Kalk & Dolomit) in Kontakt (Diagramm 20).

Es handelt sich bei den Quellen um Calcium-(Magnesium-)Hydrogencarbonatquellen. Die Äquivalentkonzentrationen von Sulfat und Chlorid fallen in Relation zum Hydrogencarbonat nicht ins Gewicht.

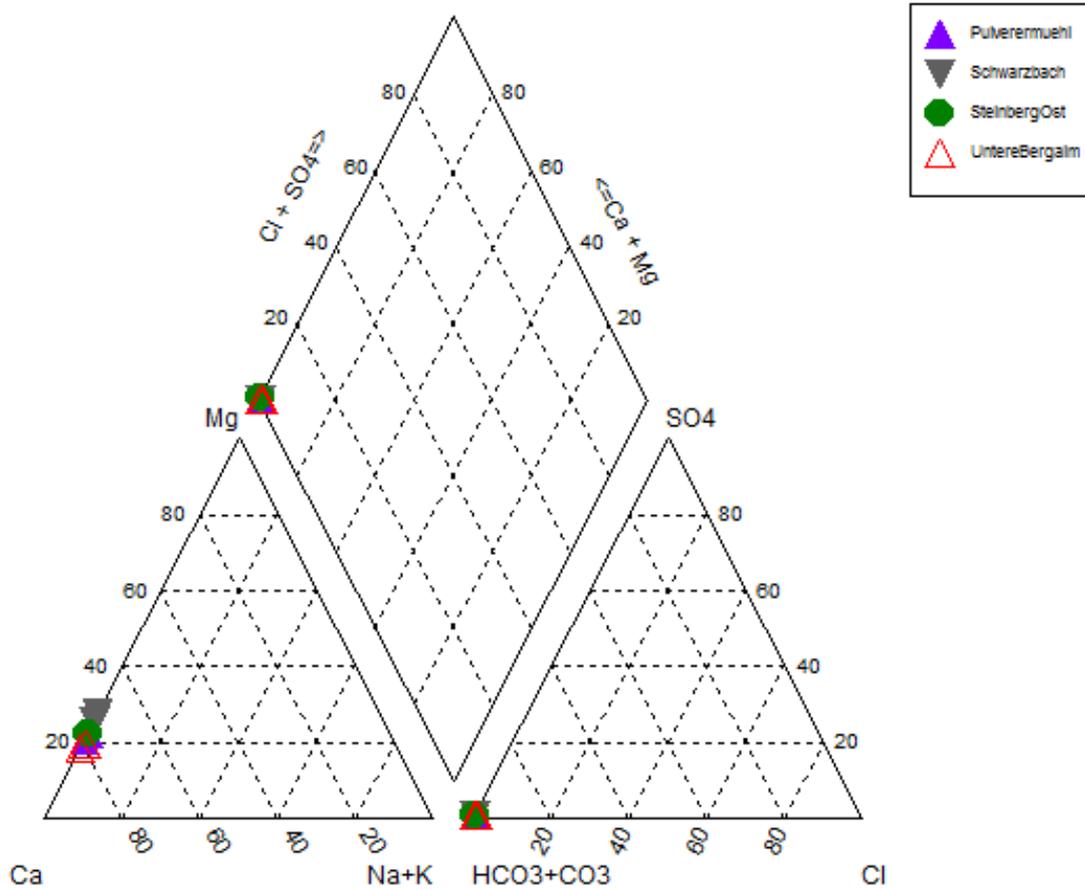


Diagramm 20: Ergebnisse der hydrochemischen Analyse der vier Quellen im Piper-Diagramm.

4.6. Hydrogeologisches Modell

Zur Erstellung des hydrogeologischen Modells wurden neben den Daten zur Pulverermühl Quelle auch die Daten der Pegelmessstation des Mühlbaches, die uns ebenfalls freundlicherweise vom Hydrographischen Dienst Tirol zur Verfügung gestellt wurden, aufbereitet. Es sei vorausgeschickt, dass es sich bei den in diesem Kapitel verwendeten Werten um grobe Richtwerte, Vergleichswerte aus der Literatur und Schätzungen handelt. Es wird kein Anspruch auf Korrektheit der Berechnungen erhoben, es sollten vielmehr Größenordnungen ermittelt werden.

Niederschlag

Das Jahresmittel des Niederschlags bei Steinberg am Rofan ergab im Zeitraum 1971 bis 2012 einen Wert von 1.445 mm/a. Diese Wetterstation auf ca. 1.030 m Seehöhe liegt allerdings deutlich tiefer als das untersuchte Einzugsgebiet (ca. 1.000 bis 2.000 m Seehöhe) und da der Niederschlag mit der Höhe steigt, wurde dieser Wert nach Tirol Atlas (2007) nach oben korrigiert. Es wurde für die weiteren Berechnungen ein Wert von 1.700 mm/a angenommen.

Verdunstung (Potentielle Evapotranspiration)

Die potentielle Evapotranspiration wurde für die Seehöhen im Einzugsgebiet zwischen 1.000 und 2.000 m in 50-m-Schritten nach HAÖ (2007) berechnet. Der Mittelwert dieser Werte ergab eine potentielle Evapotranspiration von 525 mm/a. Ein Vergleich mit den Verdunstungsraten ähnlicher Gebiete der Hohen Tauern, Berchtesgadener Alpen und des Tennengebirges (300 bis 400 mm/a) zeigt, dass die Berechnung nach HAÖ (2007) etwas höher liegt. Für die weiteren Berechnungen wurde der abgerundete Mittelwert von 400 mm/a verwendet. Dies entspricht rund 25% der Niederschlagsrate und ist somit durchaus realistisch.

Abfluss

Der oberirdische Abfluss ist im Einzugsgebiet nicht stark ausgeprägt. Es wurde daher ein oberirdischer Abfluss von 200 mm/a angenommen.

Das meiste Wasser des Mühlbaches wird vom unterirdischen Abfluss, der aus Quellen an der Südseite des Guffert und der Ostseite des Vorderunnutz zutage tritt, gespendet. Es konnten anhand Fernerkundungsmethoden ca. fünf Zuflüsse zum Mühlbach identifiziert werden, bevor dieser die Pegelstation passiert. Ein Teil eines dieser Zuflüsse stellt die Pulverermühl Quelle dar. Sie schüttet im Jahresmittel rund 2.600.000 m³/a. Das entspricht rund 19 % des mittleren Jahresabflusses des Mühlbaches (rund 13.800.000 m³/a).

Speicheränderung ΔS

Da im Einzugsgebiet weder Vergletscherung noch größere Seen anhand von Fernerkundungsmethoden beobachtet werden konnten und die Schneerücklage nur in den Wintermonaten ausgeprägt ist, wurde die Speicheränderung ΔS in der Wasserbilanzgleichung zur Vereinfachung vernachlässigt.

Für den Mühlbach ergibt sich daraus folgende Wasserbilanzgleichung:

$$A_u = 1700 \frac{mm}{a} - 400 \frac{mm}{a} - 200 \frac{mm}{a}$$

Der unterirdische Abfluss des Mühlbaches ergibt also einen ungefähren Wert von 1.100 mm/a.

Einzugsgebiet Mühlbach

Die Datenreihe zum Mühlbach umfasst die Tagesmittelwerte des Durchflusses (m³/s) an der Pegelmessstation vom 01.01.1981 bis 30.09.2015. Des Weiteren liegen für den Zeitraum 01.01.2013 bis 30.09.2015 Daten zur Abflussspende (l/s*km⁻²) vor.

Das Einzugsgebiet des Mühlbaches wurde nach folgender Gleichung berechnet:

$$Einzugsgebiet = \frac{Abfluss}{Abflussspende}$$

Einzugsgebiet in km²

Abfluss in l/s

Abflussspende in l/s*km⁻²

Es ergibt sich daraus ein Einzugsgebiet für den Mühlbach von 13,6 km².

5. Interpretation & Diskussion

Quellen tendiert dazu, an tektonischen Störungen oder Schichtgrenzen geknüpft zu sein. Bei Betrachtung der lokalen Geologie (Kapitel 1.4.2.) fällt auf, dass sich die Untere Bergalm Quelle direkt an einer Störung austritt. Es befindet sich hier der tektonische Kontakt zwischen Wettersteinformation im Hangenden und der Raibl Formation im Liegenden. Es könnte sich daher bei der Unteren Bergalm Quelle um eine Störungsquelle handeln. Die Steinberg Ost Quelle und die Pulverermühl Quelle hingegen befinden sich im Süden des Guffertmassiv, dessen Südhang die Schichtgrenzen innerhalb der überkippten Antiklinale aufschließt. Aufgrund dieser Überkipfung fallen sowohl die Schichten des Schenkels im Hangenden als auch die Schichten des Schenkels im Liegenden nach Süden ein. Ähnlich verhält es sich auch bei der Schwarzbach Quelle. Das Grundwasser könnte sich beim Durchfließen des Aquifers entlang dieser Schichten bewegt haben und schließlich im Süden ausgetreten sein. In diesem Falle würde es sich bei diesen Quellen um Schichtquellen handeln. Das Auftreten von Quelltuff, eine typische Erscheinung bei Schichtquellen, stützt diese Annahme. Für eine Bestätigung dieser These bedarf es allerdings einer genauen (hydro)geologischen Kartierung der Quellen.

Die Wassertemperaturen der Quellen zeigen im Untersuchungszeitraum zwischen Oktober 2015 und Jänner 2016 kaum Schwankungen. Dies zeigt, dass die Lufttemperatur keinen direkten Einfluss auf die Wassertemperatur hat. Die Untere Bergalmquelle zeigt mit rund 5,5 °C die tiefsten Temperaturen und ist gleichzeitig mit 1128 m Seehöhe die höchste Quelle. Die Steinberg Ost Quelle liegt mit 939 m Seehöhe am tiefsten und zeigt mit rund 6,3 °C die höchsten Temperaturen. Dies ist vermutlich auf die Verweildauer des Wassers im Untergrund zurückzuführen, da die Höhenlagen der Einzugsgebiete der Quellen ähnlich sind. Das Wasser der Quellen höherer Lagen verweilt weniger lang im Aquifer und zeigt niedrigere Temperaturen.

Die Betrachtung der elektrischen Leitfähigkeiten stützt diese Annahme. Die Steinberg Ost Quelle zeigt als tiefste Quelle die höchsten Leitfähigkeiten. Die Untere Bergalm Quelle als höchste Quelle die tiefsten Leitfähigkeiten. Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Indikator für die Menge an gelösten Mineralen im Wasser. Je länger sich das Wasser im Aquifer befand,

desto mehr Mineralisationen konnten gelöst werden, desto höher ist die elektrische Leitfähigkeit beim Grundwasseraustritt. Dies ist insofern ein wichtiger Vergleichsparameter im Untersuchungsgebiet, da die Einzugsgebiete der Quellen sowohl geologisch (Wettersteinformation) als auch geomorphologisch (Höhenlagen) vergleichbar sind. Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich das Grundwasser der Steinberg Ost Quelle am längsten im Aquifer aufhält und daher die höchsten Leitfähigkeiten und Temperaturen aufweist, während die Untere Bergalm Quelle (sowie die Schwarzbach Quelle, bei der allerdings nicht das Guffertmassiv als Einzugsgebiet fungiert) schneller entwässert und somit geringere Leitfähigkeiten und Temperaturen zeigt. Die Leitfähigkeiten und Temperaturen der Pulverermühl Quelle liegen dazwischen.

Die Schüttungsquotienten der Quellen streuen zwischen 0,01 und 0,7. Es sei hier angemerkt, dass die Schüttungsquotienten der Unteren Bergalm Quelle (0,39), der Steinberg Ost Quelle (0,76) und der Schwarzbach Quelle (0,7) aufgrund der geringen Anzahl an Messungen kaum repräsentativ sind. Die Schüttungsquotienten der Pulverermühl Quelle hingegen (0,016; 0,025; 0,16) entstammen einer mehrjährigen Datenreihe und sind repräsentativ. Die enorm kleinen Quotienten deuten auf eine zumindest leichte Verkarstung im Einzugsgebiet hin, da Karstgebiete ein sehr geringes Retentionsvermögen besitzen, d.h. das eingespeiste Wasser durchfließt den Aquifer relativ schnell, was große Schwankungen in der Schüttungsrate bedeutet. Die Schüttungsquotienten von nicht-Karstquellen sind meist deutlich größer, z.B. Quellen aus sandigem Kies $\approx 0,7$ (Hölting & Coldewey, 2013).

Die Quellen zeigen alle einen recht starken Basisabfluss, auch während der Wintermonate, wo der Niederschlag größtenteils als Schnee liegen bleibt und erst im Frühsommer als Schmelzwasser in den Aquifer gelangt. Der starke Basisabfluss weist auf starke und feine Zerklüftung im Aquifer hin, d.h. das Wasser benötigt relativ lange um den Aquifer zu durchfließen. Die Untere Bergalm Quelle, die Steinberg Ost Quelle und die Schwarzbach Quelle reagieren zudem nicht so extrem auf Niederschlagsereignisse, wie man es von Karstquellen kennt.

Das Diagramm 11 (Zeitraum Oktober 2015 bis Jänner 2016 der Pulverermühl Quelle) zeigt einen enorm hohen Schüttungsanstieg, bei gleichzeitigem Fallen der elektrischen Leitfähigkeit zwischen 30. November und 04. Dezember. Es geht diesem Schüttungsanstieg ein Niederschlagsereignis voraus, allerdings kein so intensives, das einen solchen Anstieg

rechtfertigen würde. Es müssen hier also noch weitere Faktoren eine Rolle gespielt haben. Da keine Klimadaten (Lufttemperatur, etc.) vorliegen, wurde das News-Archiv der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG (www.zamg.ac.at) als Informationsquelle herangezogen. Es wurde berichtet, dass im Dezember die Temperaturen 2,5 °C über dem langjährigen Mittel von 1981-2010 lagen. Generell war der Dezember gekennzeichnet von extremen Temperaturwerten. In den Bergen wurden bisweilen Temperaturen von 6,6 °C über dem Jahresmittel gemessen. Es wird daher vermutet, dass die Lufttemperaturen im Untersuchungsgebiet so hoch waren, dass Niederschlag in Form von Regen anstatt – wie in den Wintermonaten sonst üblich – in Form von Schnee gefallen sein muss. Das relativ warme Regenwasser könnte gemeinsam mit der ohnehin schon warmen Lufttemperatur für eine vorzeitige, teilweise Schneeschmelze gesorgt haben. Der Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit spricht für diese Annahme. Sie fällt während des extremen Schüttungsanstieges stark ab. Da die elektrische Leitfähigkeit von den im Wasser gelösten Mineralen abhängt, kann gesagt werden, dass das Wasser den Grundwasserleiter erst während dieses Ereignisses geflutet hat, sich vorher also noch nicht im Untergrund aufgehalten hat. Dadurch konnten weniger Mineralisationen gelöst werden, was das Abfallen der Leitfähigkeit in Abhängigkeit zum Schüttungsanstieg erklärt.

Des Weiteren zeigt das Diagramm 11, dass es am 20. November ein extremes Niederschlagsereignis gab (30,4 mm), das Tagesmittel der Schüttung allerdings nicht extrem ansteigt. Dies liegt vermutlich an den tieferen Temperaturen im November, wodurch ein Teil des Niederschlags als Schnee akkumuliert wurde und nicht in den Aquifer gelangte, anders als beim o.g. Ereignis.

Der Jänner (Diagramm 11) ist geprägt von mittelstarken Niederschlägen. Auffallend ist, dass die Pulverermühl Quelle kaum auf diese Niederschlagsereignisse reagiert. Das ist dadurch erklärbar, dass der Niederschlag fast ausnahmslos als Schnee gefallen ist. Dies deutet auf tiefe Temperaturen im Jänner hin. Am Ende des Monats steigt die Schüttung plötzlich wieder stark an, ohne dass ein direktes Niederschlagsereignis vorausging. Auch hier wird eine vorzeitige, teilweise Schneeschmelze vermutet, die vermutlich durch verstärkten Föhn Ende Jänner angetrieben wurde.

Die Trockenwetterfalllinien der Pulverermühl Quelle zeigen steile Verläufe, d.h. der Grundwasserleiter wird relativ schnell entleert. Es kann daher von einer leichten Verkarstung und starken Zerklüftung des Grundwasserleiters ausgegangen werden.

Die hydrochemischen Analysen zeigen keine größeren Unterschiede der Quellwässer. Die pH-Werte liegen alle deutlich im alkalischen (basischen) Bereich. Dies ist ein Indiz dafür, dass es sich um Karstwässer handeln könnte. Karstwässer weisen einen pH-Wert auf, der deutlich über 7,0 liegt (Ford & Williams, 2007; Hiscock & Bense, 2014). Die elektrischen Leitfähigkeiten sind im Vergleich zu anderen Karstquellen, bei denen Werte von $> 400 \mu\text{S}/\text{cm}$ vorkommen (z.B. Thriemer, 2004), nicht ganz so hoch, allerdings ist eine relativ niedrige elektrische Leitfähigkeit kein Disqualifikationsgrund der Quelle als Karstquelle, da auch Quellen mit niedrigeren Leitfähigkeiten durchaus als Karstquellen identifiziert werden konnten (z.B. Lechner, 2015; Hiscock & Bense, 2014; Ford & Williams, 2007, Thriemer, 2004). Auffallend ist allerdings, dass die elektrischen Leitfähigkeiten über den Untersuchungszeitraum hinweg relativ konstant blieben. Karstquellen zeigen in der Regel extreme Schwankungen der Leitfähigkeiten.

Auch die Äquivalentkonzentrationen der in den Wässern gelösten Ionen unterscheiden sich nicht wesentlich voneinander. Die Ca-Mg-Verhältnisse der Wässer liegen alle im 4:1 Bereich. Daraus lässt sich annehmen, dass das Grundwasser im Aquifer überwiegend mit Ca-Karbonat (Kalk) in Kontakt stand. Es ist dennoch ein gewisser Anteil an Mg gemessen worden. Bei Betrachtung des Piper-Diagramms (Diagramm 20) wird deutlich, dass im Einzugsgebiet nicht nur Ca-Karbonat, sondern auch Ca-Mg-Karbonat auftreten muss. Es kann also davon ausgegangen werden, dass das Grundwasser im Aquifer bisweilen auch mit Dolomit in Kontakt stand. Es könnte sich hierbei um den (teilweise) dolomitisierten Wettersteinkalk handeln, der innerhalb der Wettersteinformation auftreten kann.

Für das hydrogeologische Modell wurden aufgrund mangelnder Datenlage teils grobe Schätzwerte angenommen. Der berechnete unterirdische Abfluss des Mühlbaches von $1.100 \text{ mm}/\text{a}$ repräsentiert die Schüttungen der fünf Zuflüsse, denen ca. 30 Quellen zugeordnet werden konnten. Zur genaueren Bestimmung der hydrologischen Parameter bedarf es einer Schüttungsmessung oder –abschätzung dieser Quellen. Ein Schwachpunkt der Berechnung ist die Vernachlässigung der Speicheränderung ΔS . Wären die Schüttungswerte aller Quellen

bekannt, könnte die Speicheränderung berücksichtigt werden und Aussagen über den Grundwasserspeicher getroffen werden.

Es wurden nun sowohl die hydrophysikalischen Parameter als auch die hydrochemischen Parameter der vier Quellen interpretiert und diskutiert. Es gibt eine Vielzahl an Indizien, die auf eine zumindest teilweise Verkarstung im Einzugsgebiet der Pulverermühl Quelle schließen lassen. Diese Annahme deckt sich auch mit anderen Gebieten der Nördlichen Kalkalpen, in denen der Wettersteinkalk als Karstaquifer fungiert. Das Einzugsgebiet der Unteren Bergalm, der Steinberg Ost und der Schwarzbach Quelle dürfte hauptsächlich als Kluftsystem fungieren, wobei Verkarstung wenn überhaupt nur eine untergeordnete Rolle spielen dürfte. Für eine Bestätigung dieser Annahmen bedarf es weiterer geologischer und hydrologischer Untersuchungen am Fuße des Guffert.

6. Literaturverzeichnis

- Baumgartner, A.; Reichel, E. (1975): Die Weltwasserbilanz. Niederschlag, Verdunstung und Abfluß über Land und Meer sowie auf der Erde im Jahresdurchschnitt. Ouldenbourg München. 179 S.
- Eisbacher, G. H.; Brandner, R. (1996): Superposed fold-thrust structures and high-angle faults, Northwestern Calcareous Alps, Austria. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 89, 553-572.
- Ford, D., & Williams, P. D. (2007): Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons. 562 S.
- Furtak, H., & Langguth, H. R. (1967): Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen. Mem. IAH-Congress, 7, 89-96.
- Gruber, A.; Sausgruber, T.; Spieler, A.; Brandner, R.; Gruber, J.; Lotter, M.; Ortner, H. (2011): Geologie des nördlichen Achenseeraumes – ÖK 88 Achenkirch. 1:25.000. Beilage zum Tagungsband der Geol. Bundesanstalt. Arbeitstagung d. Geol. Bundesanstalt.
- HAÖ (2007): Hydrologischer Atlas Österreich. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW). Österreichischer Kunst- und Kulturverlag Wien.
- Haude, W. (1954): Zur praktischen Bestimmung der aktuellen und potentiellen Evaporation und Evapotranspiration. *Mitt. D. Deutsch. Wetterd.*, 8.
- Hiscock, K. M.; Bense, V. F. (2014): Hydrogeology: principles and practice. John Wiley & Sons. 519 S.
- Hölting, B., & Coldewey, W. G. (2013): Hydrogeologie: Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie. Springer-Verlag. 438 S.
- Kempe, S.; Rosendahl, W. (2008): Höhlen: verborgene Welten. Primus Verlag. 168 S.
- Klut, H.; Olszewski, W. (1945): Untersuchung des Wassers an Ort und Stelle, seine Beurteilung und Aufbereitung. Springer Berlin. 281 S.

- Kralik, M.; Zieritz, I.; Grath, J.; Vincze, G.; Philippitsch, R.; Pavlik, H. (2005): Hydrochemische Karte Österreichs, Berichte, 269, 19 S.
- Kröll, A.; Gnojek, I.; Heinz, H.; Jiricek, R.; Meurers, B.; Seiberl, W.; Steinhauser, P.; Wessley, G.; Zych, D. (1993): Wiener Becken und angrenzende Gebiete. Geologische Themenkarten der Republik Österreich 1:200000 mit Erläuterungen, 22. Geol. Bundesanstalt.
- Lechner, K. (2015): Karstgeomorphologie und Karsthydrogeologie am Kitzsteinhorn (Hohe Tauern, Salzburg). Unveröff. Masterarbeit. Universität Innsbruck. 141 S.
- Magnus, G. (1844): Versuche über die Spannkraft des Wasserdampfes. Annalen der Physik und Chemie, 61, 225-247.
- Mandl, G. W. (1999): The Alpine sector of the Tethyan shelf - Examples of Triassic to Jurassic sedimentation and deformation from the Northern Calcareous Alps. Mitt. Österr. Geol. Ges., 92, 61-77.
- Mattheß, G., & Ubell, K. (2003): Allgemeine Hydrogeologie: Grundwasserhaushalt. Borntraeger. 575 S.
- Ortner, H. (2003): Cretaceous thrusting in the western part of the Northern Calcareous Alps (Austria) – evidences from synorogenic sedimentation and structural data. Mitt. Österr. Geol. Ges., 94, 63-77.
- Ortner, H., & Gruber, A. (2011). 3D-Geometrie der Strukturen zwischen Karwendel-Synklinale und Thiersee-Synklinale. Achenkirch Beiträge. Arbeitstagung d. Geol. Bundesanstalt.
- Piper, A. M. (1944): A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. Trans. Am. Geophys. Union, 25, 914-928.
- Plöchl, B. (1973): Erläuterungen zur geologischen Karte des Wolfgangseegebietes (Salzburg, Oberösterreich); 1:25000. Geol. Bundesanstalt.
- Plöchl, B. (1980): Die Nördlichen Kalkalpen. In: Der geologische Aufbau Österreichs. (Ed. Von Oberhauser, R.). Springer Verlag, 218-264.
- Plöchl, B. (1995): Tectonics of the Northern Calcareous Alps: a review. Mem. Sci. Geol. Padova, 47, 73-86.
- Prey, S. (1978): Rekonstruktionsversuch der alpidischen Entwicklung der Ostalpen. Mitt. österr. geol. Ges., 69, 1-25.

- Prey, S. (1980): Die Geologie Österreichs in ihrem heutigen geodynamischen Entwicklungsstand sowie die geologischen Bauteile und ihre Zusammenhänge. In: Der geologische Aufbau Österreichs. (Ed. Von Oberhauser, R.). Springer Verlag, 79-118.
- Thriemer, F. (2004): Hydrogeologische und karsttektonische Untersuchung inklusive Kartierung im Gebiet zwischen Neuhaus/Pegnitz und Auerbach/Oberpfalz. Veröff. Diplomarbeit. 229 S.
- Tirol Atlas (2007):
http://tirolatlas.uibk.ac.at/kids/areas/teachers/pdf/map_klima_de.pdf (abgerufen am 18. Februar 2016).
- Tollmann, A. (1969): Tektonische Karte der Nördlichen Kalkalpen - 3. Teil: Der Westabschnitt. Mitt. Österr. Geol. Ges., 62, 78-170.
- Tollmann, A. (1985): Die Nördlichen Kalkalpen. In: Geologie von Österreich. Band 2. Franz Deuticke Wien, 1-239.
- Schmid, S. M.; Fügenschuh, B.; Kissling, E.; (2004): Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogeny. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 97, 93-117.
- Schoeller, H. (1956): Geochimie des eaux souterraines. Application aux eaux du gisement de pétrole. *Rev. Inst. Pétrole et Ann. Des combustibles liquides*, 10, 181-8123.

7. Abbildungsverzeichnis

- **Abbildung 1:** tirisMaps 2.0, Land Tirol (2016):
https://portal.tirol.gv.at/weboffice/tirisMaps/login_pvp.jsp?user=guest&project=tmap_master (abgerufen am 03.01.2016)
- **Abbildung 2:** Geologische Bundesanstalt Österreich (1999): Geologische Übersichtskarte der Republik Österreich. <https://www.geologie.ac.at/forschung-entwicklung/kartierung-landesaufnahme/geologie/geologische-karte-12000000/> (abgerufen am 10.01.2016)
- **Abbildung 3:** Mandl, G. W. (1999): The Alpine sector of the Tethyan shelf - Examples of Triassic to Jurassic sedimentation and deformation from the Northern Calcareous Alps. Mitt. Österr. Geol. Ges., 92, 61-77.
- **Abbildung 4:** Geologische Bundesanstalt Österreich (2007): GEOFAST Karte „89 Angath“: <http://www.geologie.ac.at/images/karten/GEOFAST/089.png> (abgerufen am 15.01.2016)
- **Abbildung 5:** Gruber, A.; Sausgruber, T.; Spieler, A.; Brandner, R.; Gruber, J.; Lotter, M.; Ortner, H. (2011): Geologie des nördlichen Achenseeraumes – ÖK 88 Achenkirch. 1:25.000. Beilage zum Tagungsband der Geol. Bundesanstalt. Arbeitstagung d. Geol. Bundesanstalt.
- **Abbildung 6, 7:** Ortner, H., & Gruber, A. (2011). 3D-Geometrie der Strukturen zwischen Karwendel-Synklinale und Thiersee-Synklinale. Achenkirch Beiträge. Arbeitstagung d. Geol. Bundesanstalt.
- **Abbildung 8:** Kralik, M.; Zieritz, I.; Grath, J.; Vincze, G.; Philippitsch, R.; Pavlik, H. (2005): Hydrochemische Karte Österreichs, Berichte, 269, 19 S.

Alle restlichen Abbildungen stammen vom Verfasser.

8. Anhang

Anhang 1 (Geologische Bundesanstalt Österreich, 2007): Legende zu Abbildung 4

Quartär

-  1 Talboden, jüngste Ablagerungen, rezenter Talboden, Talalluvion (Schluff, Sand, Kies)
-  5a Hangschutt und Verwitterungsschutt
-  2 Schuttkegel, Hangschutt (Vegetationsverdeckungen), Gehängeschutt
-  5 Schuttkegel
-  8 Bergsturz, Blockwerk (Blockschutt)
-  4 Schwemmkegel
-  8 Postglaziale Schotter (Sand und Schotter)
-  8 Seeablagerungen
-  8 spät- bis postglaziale (Stau)schotter (Kies), im Inntal z.T. Sand, Terrassensedimente
-  10 spätglazialer Terrassenrand oder Erosionskante
-  11 Lokalmoräne, Moränen der kleineren Lokalgletscher
-  12 Fernmoräne, Jüngere Grundmoräne

Holozän

Würm

Pleistozän

Alpidische Molasse

Inneralpine Molasse

Unterinntal Tertiär

-  13 Unterangerberg Formation (turbiditischer Sandstein, Mergel; Rupelium - Chattium)
-  14 Häring Formation (Basalbrekzie, Mergel, Bitumenmergel, Kohle, Kalksandstein, Konglomerat; Rupelium)

Ostalpin

-  15 Sandsteine, Mergel, Kalke, Brekzien (mittleres Turonium - oberes Santonium)
-  16 Kohlen & Bitumenmergel (Coniacium - Maastrichtium)

Gosau-Gruppe

Bajuvarikum

Lechtal-Decke

-  17 Tannheim Formation (grauer bis bunter Tonmergel, z.T. sandig, Sandstein; Aptium - Albium)
-  15a Schrambach Formation, Neokom Aptychenschichten, Graue Aptychenschichten, Neokommargel (Fleckenmergel, Kalkmergel, Mergel, Kalk; Berriasium - Albium)
-  20a Malm Aptychenschichten, untere Ammergau Formation (Kalk, Kalkmergel; Kimmeridgium - Berriasium)
-  20 Biancone, weißer Aptychenkalk, graue Aptychenschichten (heller dichter Kalkstein; Kimmeridgium - Tithonium)
-  23 Steinmühlkalk, Haßbergkalk, Dyphiakalk, Haselbergkalk, Tithonflaserkalk (roter Knollenflaserkalk; Kimmeridgium - Berriasium)
-  22 Ruhpolding Formation (roter, grüner Radiolarit, Kieselkalk, Hornsteinkalk; Oxfordium)
-  26 Chiemgau Formation, schwarzer Doggerkieselkalk (dünnbankiger kieseliger Spatkalk; Mitteljura)
-  27 Kirchstein- - Scheibelbergkalk, Liaskieselkalk, Kiesel- und Hornsteinkalk, Kalke und Kieselknollenkalke (grauer, tw. roter Kieselkalk, Hornsteinkalk, Spatkalk; Unterjura - Mitteljura)
-  28 Rotkalk, roter Basiskalk (bunter, grauer Kalkstein, tw. grauer Hornsteinkalk, z.T. kondensiert; Unterjura - Mitteljura)
-  29 Hierlatzkalk und Adneter Kalk, roter Basiskalk (bunter Flaserkalk, bunter Echinodermenspatkalk, z.T. kondensiert; Unterjura - Mitteljura)
-  30 Oberrhätalk - Rhatoliaskalk ungliedert (Riff- bis Riffschuttalk, Ooidkalk; Oberes Rhaetium)
-  31 Kössen Formation ungliedert (dunkler Mergel bis Kalkmergel; Oberes Norium - Rhaetium)
-  32 Plattenkalk (gut gebankter bis plattiger laminierter graubrauner Kalk; Oberes Norium)
-  55 Dachsteinkalk ungliedert (massiger bis gebankter heller Kalk und Dolomit; Oberstes Karnium - Rhaetium)
-  33 Hauptdolomit (grauer bis graubrauner gebankter Dolomit; Oberstes Karnium - Norium)
-  34 Raibl Gruppe ungliedert (Tonstein, Mergel, Sandstein, Kalkstein, Dolomitstein; Karnium)
-  35 Wettersteinkalk (gebankter bis massiger Kalkstein; Oberes Oberanisium - Unterstes Karnium)
-  36 Wettersteindolomit - Ramsaudolomit (weißer bis grauer zuckerkörniger Dolomit; Oberes Oberanisium - Unterstes Karnium)
-  900 Kataklasit

Anhang 2 (Gruber et al., 2011): Legenden zu Abbildung 5

BAJUVARIKUM	
Lechtal-Decke	
47	Schrambach-Formation (Berriasium – Aptium)
48	Ammergau-Formation (Kimmeridgium – Berriasium)
49	Barnstein-Formation (Kimmeridgium – Berriasium)
50	Tauglboden-Formation (Oberes Oxfordium – Unteres Kimmeridgium)
51	Ruhpolding-Formation (Ruhpolder Radiolarit) (Callovium – Kimmeridgium)
52	Allgäu-Formation undifferenziert (Untere, Mittlere, Obere Allgäu-Schichten) (Sinemurium – Callovium)
53	Sachrang-Formation (Bächentaler Bitumenmergel) (Toarcium)
54	Rotkalk-Gruppe (Adnet-Formation, Klaus-Formation) (Sinemurium – Callovium)
55	Resedimente (Debrite, Brekzien)
56	Hieratzkalk (Sinemurium – Pliensbachium)
57	Scheibelberg-Formation (Sinemurium – Toarcium)
58	Kendlbach-Formation (Oberstes Rhaetium – Hettangium)
59	Oberhättkalk (Rhaetium)
60	Kössen-Formation (Rhaetium)
61	Plattenkalk (Sevatium)
62	Hauptdolomit undifferenziert (Tuvium – Sevatium)
63	Seefeld-Formation (Alaunium)
64	Nordalpine Raibler Schichten (Zirl-Formation) (Karnium)
65	Rauwacken
66	Kalke, Dolomite
67	Tonschiefer, Sandsteine, Rauwacken
68	Wettersteinkalk / Wettersteindolomit (Oberes Ladinium – Karnium)
69	Rückseitenriff, Riff

QUARTÄRE SEDIMENTE UND FORMEN

-  Anthropogene Ablagerung: Deponien, Halden, Dämme, Pistenaufschüttungen
-  Vernässungszone
-  Nieder- und Hochmoor
-  Abschwemmmassen von Lockergesteinen (Moränen, Kiese, Sande, Schluffe) und Bodenschichten in Tälern, Senken, Mulden und auf Hängen
z.T. zementiert (östl. Achenkirch)
-  Jüngste Flussablagerungen/Auenablagerungen im Tal der Seeache und des Ampelsbaches (Kies, Sand, Schluff)
-  Ablagerungen in Rinnen und Talkerben (Kies, Sand, Schluff, Wildbachschutt)
-  Muren- und Schwemmkegel
-  Trockental (Köglboden)
-  Erosionskante, Terrassenkante
-  Hangschutt, Sturzschnitt, Lawinenschutt, als Halden und Kegel; teilweise fluvial umgelagert
-  Grobblockiger Hang- und Sturzschnitt (Blockwerk), z.T. in Kegel- und Haldenform
-  Felssturzschnitt
-  Bergzerreißung, tiefgreifend aufgelockerter Fels, teils mit auflagerndem Lockermaterial, teils in Schollen zerrissen bzw. zerglitten; Verband zum Anstehenden noch erkennbar
-  Tiefgreifende Massenbewegung (Gleitung, Rutschung) im Fest- und Lockergestein; teils mit großen Felsblöcken in der Gleit-/Rutschmasse
-  teils mit großen Felsblöcken in der Gleit-/Rutschmasse
-  teils mit großen Felschollen (schematisiert)
-  - aus Rotkalk-Gruppe
-  - aus Oberrhätkalk
-  - aus Plattenkalk
-  teils mit großen Felschollen (natürliche Größe)
-  - aus Ammergau-Formation
-  - aus Ruhpolding-Formation
-  - aus Allgäu-Formation
-  - aus Rotkalk-Gruppe
-  - aus Scheibelberg-Formation
-  - aus Oberrhätkalk
-  - aus Kössen-Formation
-  - aus Plattenkalk
-  - aus Hauptdolomit
-  Rutschmasse, Erdstrom, Schuttstrom, zumeist flachgründig
-  teils mit großen Felschollen (aus Kössen-Formation) in der Rutschmasse
-  Abrisskante einer Massenbewegung im Fels und im Lockergestein / Ausbruchsnische eines Fels- und Bergsturzes
-  Zerrspalte, Zerrgraben, Nackental
-  Blockgletscherablagerung (Spätglazial, Demeijoch)
-  Staukörper am Eisrand (Blöcke, Kies, Sand, Schluff), Kamestrassen
-  Schlufflagen (spätglazial), im Bächental
-  Sturz-, Hang- und Murschuttsedimente (Blöcke, Kies, Sand, Schluff); Westhänge der Schreckenspitze; spätglazial oder älter
-  Grund-, Seiten- und Endmoräne der Lokalgletscher (spätglazial), mit Wallform
-  Grundmoräne, z.T. Kristallin führend (hochglaziales Inngletschersystem)
-  Moränenstreu (hochglazial und spätglazial)
-  Erratische Blöcke
-  Sedimente der Vorstoßphase (Steine, Kiese, Sande) undifferenziert
-  Steine, Kiese, Sande, kristallinführend (Ampelsbach, Grundache)
-  einzelne Blocklagen (Ampelsbach)
-  Schluffe, z.T. Kiessandlagen
-  Kiese, Sande, geschichtet, z.T. zementiert, kalkalpines Material (Grundache)
- Hang- und Murschuttsedimente, teils konglomeriert (Blöcke, Steine, Kiese, Sande); am West- und Südabhang des Guffert

Holozän

Spätglazial

Hochglazial

Pleistozän (Würm)