Gewässer und Bodenschutzlabor Kanton Bern
Amt für Natur und Umwelt Kanton Graubünden
Amt für Umweltschutz des Kantons Uri
Pro Natura Kanton Graubünden

Schutz der Quell-Lebensräume
Conservation des milieux fontinaux

Projekt-Schlussbericht 2016

Empfindlichkeit von Quell-Lebensgemeinschaften gegenüber Klimaveränderungen in den Alpen

Quelle Q-Kl_44_BE
Sillere, Kiental BE

Daniel Küry, Dr. phil. Biologe
Verena Lubini, Dr. phil. Biologin
Pascal Stucki, lic. phil. biologiste

AG Schutz der Quell-Lebensräume
Life Science AG, Basel • Lubini Gewässerökologie, Zürich • Aquabug, Neuchâtel

Schutz der Quell-Lebensräume
Conservation des milieux fontinaux

Impressum

Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt BAFU, 3003 Bern Begleitung: Stephan Lussi
Projektpartner	Vinzenz Maurer, Gewässer- und Bodenschutzlabor, Kanton Bern Josef Hartmann Dr. phil., Amt für Natur und Umwelt, Kanton Graubünden Simone Jakob, Amt für Natur und Umwelt, Kanton Graubünden Alexander Imhof Dr. sc. nat., Amt für Umweltschutz Kanton Uri Jacqueline von Arx. Pro Natura Graubünden
Projektleitung	Daniel Küry, Dr. phil. Biologe • Life Science AG, Greifengasse 7 4058 Basel Verena Lubini, Dr. phil. Biologin • Eichalde 14, 8053 Zürich Pascal Stucki, lic.phil. biologiste • Aquabug, case postale 2001 Neuchâtel
Mitarbeit	Amélie Ritschl Kathrin Baumann Lucas Blattner Susanne Felder Manuel Freiburghaus Christian Imesch Michèle Plag Inès Röthele Helen Rutishauser Elmar Scheiwiller Remo Wüthrich

Ein Projekt im Rahmen des Pilotprogrammes zur Anpassung an den Klimawandel, gefördert durch das Bundesamt für Umwelt BAFU. Für den Inhalt des Berichts sind allein die Autoren verantwortlich.

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Kontakt Daniel Küry, Life Science AG, Greifengasse 7, 4058 Basel, tel. 061 686 96 96
E-Mail daniel.kuery@lifescience.ch

Gewässer und Bodenschutzlabor Kanton Bern
Amt für Natur und Umwelt, Kanton Graubünden
Amt für Umweltschutz des Kantons Uri
Pro Natura, Kanton Graubünden

Schutz der Quell-Lebensräume
Conservation des milieux fontinaux

Projekt-Schlussbericht 2016

Empfindlichkeit von Quell-Lebensgemeinschaften gegenüber Klimaveränderungen in den Alpen

September 2016

Daniel Küry, Dr. phil. Biologe
Verena Lubini, Dr. phil. Biologin
Pascal Stucki, lic.phil. biologiste

Inhalt

Zusammenfassung 7

1 Anlass, Ziele der Untersuchungen 8

2 Untersuchungsgebiet, Geologie, Quellen 10

3 Methoden, Vorgehen 13
- Temperaturmessungen 13
- Untersuchung der Struktur 13
- Untersuchung des Makrozoobenthos 13
- Statistische Auswertung 13

4 Resultate 14
- Struktur 14
  - Vegetation und Landnutzung 14
- Substrate, Fliesseigenschaften und besondere Quell-Strukturen 14
  - Beeinträchtigungen und Gesamtbewertung der Quellen 16
- Temperatur 17
  - Temperaturbereiche 17
  - Temperatur geologisch unterschiedlicher Aquifere 18
  - Einfluss von Exposition und Permafrost 19
  - Temperaturmuster der Quellen 21
- Makrozoobenthos: Eintagsfliegen, Steinfliegen, Köcherfliegen (EPT) 25
  - Zusammensetzung der Fauna 25
  - Thermisch wichtige Umweltparameter und Wasserinsekten-Taxa 27
  - Geologie und Exposition 31
  - Arten mit besonderer Bindung an kalte Gewässer 32
  - Ermittlung der Arten mit einer Bindung an extrem kalte Quellen 33

5 Diskussion 36
- Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften 36
- Thermisch wichtige Umweltparameter 36
- Auswirkungen des Klimawandels auf die EPT 36
- Kälteangepasste Arten in alpinen Quellen und Bewertung von deren Verletzlichkeit 37

6 Climate Change-Index Bewertung der Verletzlichkeit von Quell-Lebensgemeinschaften 39
- Ermittlung verletzlicher EPT 39
- Konzeption und Berechnung des Climate Change-Indexes 40

7 Schlussfolgerungen, Ausblick 43
Climate Change Verletzlichkeits-Index – Verletzlichkeit der Lebensgemeinschaften 43
Anwendung des CCV-Indexes in der Praxis 44
CCV-Index auch für tiefer gelegene Gewässer 44

8 Literatur 45

Anhang 51
CCV-Werte der nachgewiesenen Arten 51
CCV-Index der untersuchten Quell-Lebensräume 55
Rohtabelle Fauna Quantitative Beprobungen 57
Objektblätter 64

Zusammenfassung

Quellen sind Orte, an denen Grundwasser an die Oberfläche tritt. Ihre Wassertemperatur wird neben der Lufttemperatur von den Prozessen im Untergrund bestimmt, die zwischen der Versickerung des Niederschlags und dem Quellaustritt auf das Wasser einwirken. Als Folge des Klimawandels ist damit zu rechnen, dass sich diese temperaturbestimmenden Prozesse ändern und dadurch die aquatischen Lebensgemeinschaften der Quellen beeinflussen. Das Ziel des Projekts bestand in der Ermittlung jener Arten der Eintagsfliegen (Ephemeroptera), Steinfliegen (Plecoptera) und Köcherfliegen (Trichoptera), die ein tiefes Temperaturoptimum besitzen und der Entwicklung eines Indexes, der in einer differenzierten Art und Weise die Empfindlichkeit der verletzlichen Arten ausweist.

Um den Zusammenhang zwischen Temperatur und der Lebensgemeinschaft des Makrozoobenthos besser zu verstehen, wurden die Temperaturverhältnisse mit Temperaturloggern über einen längeren Zeitraum protokolliert. Mit Feldbegehungen wurden die Struktur in 61 Quellen erfasst und bewertet. Zudem wurde das Makrozoobenthos erfasst und möglichst bis zur Art bestimmt.

In den Quellen der Schweizer Zentralalpen waren folgende Faktoren relevant für die Temperatur: Meereshöhe, Geologie des Aquifers, Exposition des Geländes und Distanz zum Permafrost. Die Tiefe des Aquifers und die Auswirkungen von winterlichen Rückgängen der Abflussmenge konnten nicht direkt untersucht werden. Aufgrund der Temperaturmuster der einzelnen Quellen zeigte sich, dass Faktoren wie die Passage durch Blockschutt vor dem Zutage-Treten des Wassers die Temperatur ebenfalls beeinflussen.

Insgesamt wurden 99 Arten der Ephemeroptera, Plecoptera und Trichoptera (EPT) in den untersuchten Quellen nachgewiesen. Diese verteilten sich wie folgt: 11 Ephemeroptera, 40 Plecoptera, 48 Trichoptera. Mit hoher Stetigkeit kamen bei den Ephemeroptera und Plecoptera vor allem weiter verbreitete Arten vor. Bei den Trichoptera waren es hingegen Arten mit einer starken ökologischen Bindung an Quellen.

Die Anzahl der EPT- und die Trichoptera-Arten waren statistisch signifikant korreliert mit der Meereshöhe (negativ), der Distanz zum Permafrost (positiv) und mit der Jahresmitteltemperatur (positiv). Auch die Mitteltemperatur der beiden Halbjahre (Januar bis Juni und Juli bis Dezember) war jeweils signifikant positiv mit diesen faunistischen Parametern korreliert.

Die Anzahl krenobionter Arten sowie die Summe krenobionter und krenophiler Arten waren in den Kluftquellen signifikant höher als in den Karstquellen. In südexponierten Quellen lebten signifikant mehr Trichoptera-Arten und mehr krenophile Arten als in Quellen in Nordposition und in Westexposition.

Mit Hilfe der kanonischen Korrespondenzanalyse (CCA) wurden 27 Plecoptera- und Trichoptera-Arten abgetrennt, deren Larven bevorzugt Quellen in grosser Höhe und mit besonders kaltem Wasser besiedeln. Da sich in der vorliegenden Untersuchung der Quell-Lebensräume weitgehend die gleichen Arten als kälteangepasst herausstellten, wie die Ansätzen auf der Basis der ökologischen Eigenschaften (ecological traits), wurden diese spezifischen Eigenschaften für die Konzeption eines gewichteten Indexes verwendet, der die Verletzlichkeit gegenüber dem Klimawandel abbildet.

Insgesamt 126 schweizerische EPT-Arten, die einerseits gemäss Literatur aufgrund ihrer ökologischen Eigenschaften als sensitiv gegenüber dem Klimawandel gelten und andererseits in den untersuchten Quellen vorkamen, wurde der neu entwickelte Climate Change Verletzlichkeits-Wert (CCVW) zugeordnet. 17 Arten (13,5%) erwiesen sich als hochverletzlich und 37 Arten (29,4%) als verletzlich. Die artspezifischen CCV-Werte wurden für jede Quelle zum neuen CCV-Index verrechnet. Dabei erwiesen sich 5 Quellen aufgrund des Klimawandels als hochverletzlich und 20 als verletzlich. Im Rahmen einer Erweiterung soll der CCV-Wert für alle aquatischen EPT-Arten der Schweiz berechnet werden, sodass auch Gewässer tieferer Lagen nach dem gleichen Verfahren eingestuft werden können.

1 Anlass, Ziele der Untersuchungen

Quellen gehören zu den am stärksten gefährdeten aquatischen Lebensräumen (Cantonati et al. 2006, Zollhöfer, 1997). In den Alpen sind zwar noch relativ viele natürliche Quellen vorhanden, doch werden diese zunehmend bedroht durch Wasserfassungen für Trinkwassernutzung und Beschneiungsanlagen, Energiegewinnung, Erschliessungen für Tourismusprojekte und die Intensivierung der Landwirtschaft (Brown et al. 2009, Scarsbrook et al. 2007). Im Zusammenhang mit der Erarbeitung der Roten Listen haben Untersuchungen gezeigt, dass Quellen Lebensräume für seltene und stark bedrohte Steinfliegen- und und Köcherfliegenarten sind (Lubini et al. 2012). Viele dieser Arten sind endemisch weshalb die Schweiz eine besondere Verantwortung für deren Schutz und Förderung trägt. Aufgrund der Kleinflächigkeit und der kaum vorhandenen Wiederherstellung- uns Revitalisierungsmöglichkeiten der Quell-Lebensräume sind auch die Lebensgemeinschaften der Quellen sehr verletzlich.

Die Temperatur in Quellen ist relativ stabil und wird bestimmt durch die unterirdischen thermischen Prozesse zwischen der Versickerung des Niederschlags und dem Austritt des Quellwassers (Küry et al. 2016). Sie bestimmt in gewissen Fällen auch die Intaktheit der Quellhabitate. In Karstquellen wurde gezeigt, dass die Temperatur den grösseren Einfluss auf die Tiergemeinschaft hat als die Strukturen (Smith et al., 2013). Mit dem Klimawandel wird erwartet, dass die Temperatur sowohl im Grundwasser als auch in den Oberflächengewässern ansteigt und Gletscher sowie Permafrost kontinuierlich schmelzen werden (CH-2014-Impacts, 2014; EEA, 2012, Beniston, 2006). Im Grundwasser wurden seit 1980 bereits Temperaturerhöhungen zwischen 0,5 und 0,7 °C pro Dekade gemessen (Figura et al., 2013). Es gibt wenige Arbeiten, in denen die Temperatur in Quellen untersucht wurde (Wigger et al., 2015; Cantonati et al., 2006; Cantonati et al., 2007). Im Untergrund kann eine Erwärmung der Wärmeleitung oder Konvektion erfolgen (Luhmann et al. 2011; Manga & Kirchner, 2004). Ein rascher Transport von Wasser in Karstgebieten führt zu kurzfristigen relativ starken Temperaturschwankungen, während in Kluftgrundwasserleitern nur geringe saisonale Schwankungen auftreten (Luhmann et al., 2011; Benderitter et al., 1993; Prier, 1985). Wasser, das aus Schneefeldern, Gletschern, Peramfrostgebieten oder aus Grundwasser stammt, ist durch unterschiedliche Temperaturmuster charakterisiert (Nickus et al., 2015; Geiger et al., 2014, Burgherr et al., 2002).

Die Wassertemperatur steuert und kontrolliert bei den aquatischen Insekten nicht nur die Verbreitung sondern greift in fast alle Lebensbereiche, angefangen bei der Entwicklung bis zum Verhalten (Dallas & Ross-Gillespie, 2015; Vannote & Sweeney, 1980; Ward & Stanford, 1982; Zwick & Zwick, 2010).

Jede Art hat ein durch die Evolution optimiertes Temperaturfenster, das die Körpergrösse der Adulten, die Fekundität und die Abundanz maximiert (Dallas & Ross-Gillespie, 2015). Die Dauer der Larvenentwicklung wird durch eine artspezifische Temperatursumme (degree days) bestimmt (Brittain, 2008; Elliott, 1987; Frutiger & Imhof, 1997; Lillehammer et al., 1989; Markarian, 1980; Okland, 1991; Ward & Stanford, 1982). Höhere Temperaturen beschleunigen in der Regel das Wachstum und ermöglichen so eine frühere Emergenz im Jahr (Harper & Pecharsky, 2006; Wagner, 1986). Damit ergeben sich Verschiebungen in der Phänologie und im Extremfall auch die Ausbildung mehrerer Generationen pro Jahr (Everall et al., 2015; Lillehammer, 1985).

In vielen Fällen sind die typischen Quellarten kaltstenotherm, d.h. sie besitzen optimale Lebens- und Entwicklungsbedingungen bei tiefen Temperaturen. Wärmere Temperaturen als Folge des Klimawandels führen zu einer höheren Mortalität von aquatischen Stadien kaltstenothermer Arten.

Auf klimatisch bedingte Temperaturveränderungen reagieren die Arten mit Anpassung, Ab- resp. Zuwanderung, Arealveränderung (Muhfeld et al., 2011; Giersch et al., 2014) oder mit Aussterben (Tierno de Figueroa et al., 2010), wobei das Risiko auszusterben für kaltstenotherme, seltene Arten besonders gross ist (Hering et al., 2009; Rivers-Moore et al., 2013; Urban, 2015). Als verletzlich gelten stenotherme Arten mit kurzer, synchroner Entwicklungszeit von Ei und Larve, und einem einjährigen Entwicklungszyklus (Brittain & Saltveit, 1989). Umgekehrt sind eurytherme Arten mit lang dauernder Ei- und Larvenentwicklung sowie mehreren Generationen im Jahr im Vorteil (Brittain, 1991).

Auf die aktuell stattfindende Erwärmung können kälteliebende Quellbewohner auf verschiedene Weise reagieren: (1) Sie können sich an die neuen Bedingungen anpassen und weiterhin im gleichen Lebensraum leben. (2) Sie können lokal aussterben, weil eine Anpassung nicht möglich ist und andere Arten können ihren Platz in der Lebensgemeinschaft einnehmen. (3) Sie können in vergleichbare Lebensräume in grösserer Höhe ausweichen und dort bei günstigen Bedingungen weiterexistieren.

Diese Wanderung in höher gelegene Quellen birgt aber einige Probleme. So nimmt die Zahl der Quellen mit zunehmender Höhe ab, weil die Einzugsgebiete gegen die Gipfelnähe hin kleiner werden. Zudem nimmt mit einem kleiner werdenden Einzugsgebiet auch die Wasserführung ab. Quellen hoher Lagen drohen periodisch auszutrocknen, was viele nicht angepasste Arten vor Probleme stellt.

Zu dieser Probematik der Temperaturveränderung und -anpassung wurden nur wenige Untersuchungen durchgeführt. Hershkovitz et al. (2015) und Conti et al. (2014) haben die Frage der Verletzlichkeit der Arten auf der Basis der ökologischen Eigenschaften der europäischen Wasserwirbellosen aller Höhenstufen untersucht und ein Liste von Arten vorgestellt, die vom Klimawandel besonders bedroht sind. Um diese Untersuchungen im Feld zu überprüfen, wurden in der vorliegenden Untersuchung die Eintagsfliegen, Steinfliegen und Köcherfliegen (EPT) in Quellen der oberen subalpinen und alpinen Stufe und ihre Beziehung zur Temperatur untersucht.

Ziele des Projekts waren die aktuellen Temperaturverhältnisse in diesen Quellen zu messen, die Temperaturmuster zu charaktierisieren sowie die Zusammensetzung der EPT-Fauna in möglichst unbeeinflussten Quell-Lebensräumen der Schweizer Alpen zu untersuchen. Mit statistischen Auswertungen wird ermittelt, welche Arten ein tiefes Temperaturoptimum besitzen und voraussichtlich von den Klimaveränderungen am stärksten bedroht sind.

Auf der Grundlage der Auswertungen wird eine Liste der von den Klimaveränderungen besonders bedrohten Quell-Arten erstellt. Unter Verwendung dieser Arten wird ein Index entwickelt, mit dem die Verletzlichkeit der Quell-Lebensgemeinschaften gegenüber dem Klimawandel ermittelt werden kann.

2 Untersuchungsgebiet, Geologie, Quellen

Aus einer während einer Vorevaluation erstellten Liste mit über 300 Objekten wurden aufgrund von Luftbildern, Angaben in den Geografischen Informationssystemen der Kantone und eines Augenscheins vor Ort 61 Fliessquellen (Rheokrene) ausgewählt (Abb. 1 und Anhang).

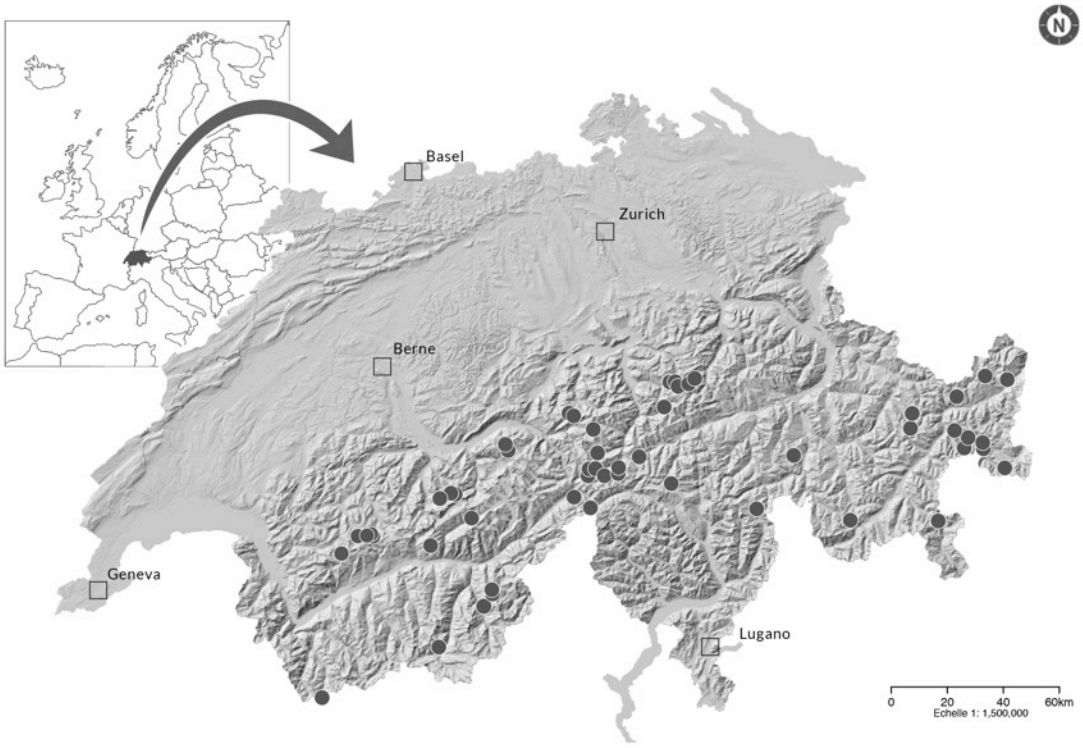


Abb. 1: Lage der 61 Quell-Lebensräume, die in den Jahren 2014 und 2015 untersucht worden sind.

Sie waren über den gesamten Schweizer Alpenraum zwischen Grossem Sankt Bernhard bis dem Unterengadin verteilt und befanden sich in unbewaldeten Gebieten in verschiedener Exposition in Höhen zwischen 1720 und 2515 m ü. M.. Die 61 untersuchten Objekte befanden sich in 5 Kantonen: Bern (n=14), Uri (n=18), Graubünden (n=16), Wallis (n=11) und Tessin (n=2) und lagen in den vier biogeographische Regionen Alpennordflanke (n=26), westliche Zentralalpen (n=11), östliche Zentralalpen (n=19) und Alpensüdflanke (n=5).

Die grösstenteils ganzjährig schüttenden Quellen befanden sich in zwei Typen von Grundwasserleitern: Karstaquifere, die hauptsächlich aus Kalksteine und Mergelschiefer entspringen, sowie Kluftaquifere, die in verschiedensten anderen Gesteinsformationen entspringen wie kristalline oder Sedimentgesteine (u.a. Silte, Gerölle, Glimmerschiefer, Gneisse, Granite, Dolomite, Konglomerate) und so die Vielfalt der Geologie der Alpen widerspiegeln (Abb. 3). Quellen aus Porengrundwasserleiter, solche die im Sommer austrocknen sowie Sicker- und Sumpfquellen wurden nicht berücksichtigt. Die Exposition variierte und betrug 26 und 33% bei den nord- und südexponierten sowie 21 resp. 20% bei den ost- und westexponierte Quell-Lebensräumen.

Q-Kl_02_BE, Q Engstlensee 2

Q-Kl_03_BE, Q Cholischwand

Q-Kl_26_GR, Q Alp Clastra

Q-Kl_27_UR, Q Spiessenälpetli

Abb. 2: Beispiele untersuchter Quellen in den Kantonen Bern (BE), Graubünden (GR) und Uri (UR).

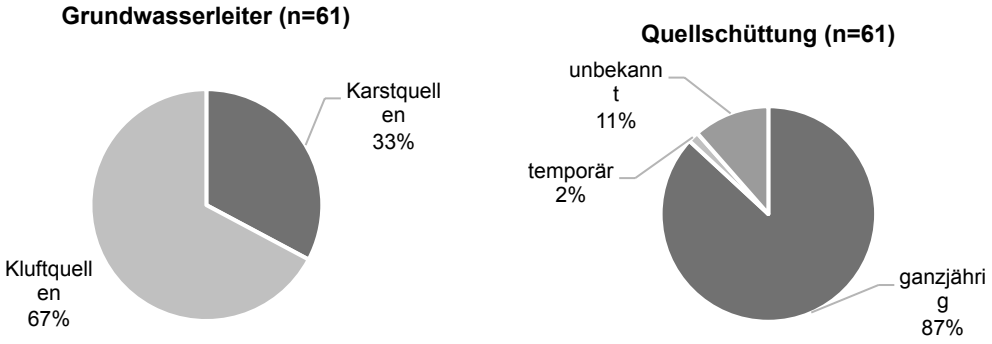
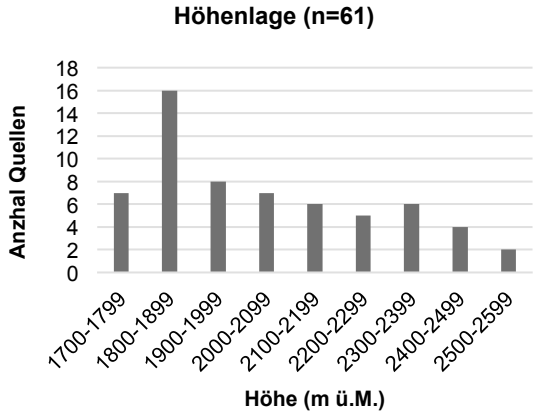


Abb. 3a: Eigenschaften und Lage der 61 untersuchten Quellen (Geologie der Grundwasserleiter, Quellschüttung).



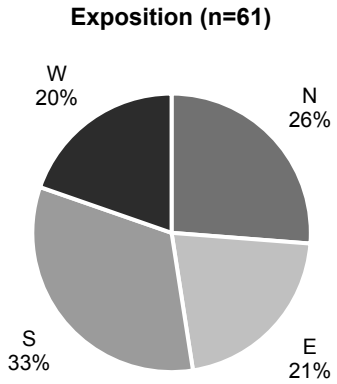


Abb. 3b: Eigenschaften und Lage der 61 untersuchten Quellen (Höhenverteilung und Exposition/Abflussrichtung).

3 Methoden, Vorgehen

Temperaturmessungen

In insgesamt 61 Quellen wurden die Temperaturmuster im Jahresverlauf untersucht. Von diesen wurden 41 Quellen mit permanenter Schüttung für eine statistische Auswertung herbeigezogen. Zur Erfassung der Temperatur wurden Temperaturlogger (HOBO Water Temp Pro v2, von onset®) möglichst nahe beim Wasseraustritt platziert. Die Auflösung der HOBO-Logger beträgt 0,02 °C bei 25 °C, bei einer Genauigkeit von 0,2 °C zwischen 0 und 50 °C. Die Temperaturlogger massen die Temperatur alle 10 min über eine Dauer von ungefähr 12 Monaten von Juli 2014 bis Oktober 2015. Waren mehrere Wasseraustritte vorhanden, wurde derjenige mit der höchsten Schüttung ausgewählt. Vor der Auswertung wurden die Messreihen auf Ausreisser kontrolliert und korrigiert.

Für der Auswertung der Temperaturdaten wurden nur 41 berücksichtigt, weil 20 Quellen einen markanten Temperaturrückgang vor allem im Winter aufwiesen, der als starker Rückgang der Schüttung oder als ein Trockenfallen interpretiert wurde. Vermutlich wurden während dieser Zeit die Lufttemperatur oder teilweise die Schneetemperatur gemessen. Zur Interpretation der Wassertemperatur wurden die Lufttemperaturen 2 m über den Boden sowie die Niederschlagsmessungen und die Periode der Schneebedeckung aus der nächstgelegenen Messstation von MeteoSwiss für die Monate Juni 2014 bis Oktober 2015 hinzugezogen (http:// www.meteoswiss.admin.ch). Die Geologie und die Distanz zu möglichem Permafrost wurden mit Hilfe des Geokatalogs auf der Online-Kartensammlung der Schweiz ermittelt (https://map.geo.admin.ch > Geologie und Boden > Potenzielle Verteilung von Permafrost, Kategorie «Permafrost wahrscheinlich»). Die Exposition der Quellen wurde mit Hilfe der topografischen Online-Karten Massstab 1:25'000 ermittelt. Die Himmelrichtungen wurden für die Auswertung wie folgt zusammengefasst: Nord: NNW–NE, Ost: ENE–SE, Süd: SSE–SW, West: WSW–NW.

Untersuchung der Struktur

Die Struktur wurde mit Hilfe der Erhebungsmethode des BAFU (Lubini et al. 2014) erfasst. Diese besteht neben den Kopfdaten zur Identifizierung der Quelle aus der Protokollierung der Schadstrukturen sowie der Vegetation, der Korngrösse, der Variabilität der Fliesseigenschaften und der besonderen für die Biodiversität wichtigen Wertstrukturen.

Untersuchung des Makrozoobenthos

Zur Erhebung des Makrozoobenthos wurde gemäss der Methode von Lubini et al. (2014) vorgegangen. Da verschiedene Personen an den Felderhebungen beteiligt waren, wurde eine detaillierte Anleitung verfasst, in der alle Einzelheiten der Quellbegehung, der Aufsammlung und der Konservierung wiedergegeben sind (Küry et al. 2014). Neben der qualitativen Aufsammlung des Makrozoobenthos und der Imagines der Eintagsfliegen, Steinfliegen und Köcherfliegen (EPT) wurden in jeder Quelle auch vier quantitative Proben mit einem speziell angefertigten Sampler auf einer Fläche von jeweils 10 x 10 cm entnommen. Die Makrozoobenthosproben wurden direkt nach der Entnahme in 80% Ethanol konserviert und zur weiteren Untersuchung ins Labor verbracht, wo die quantitativen Proben mit Hilfe einer Stereolupe aussortiert und bestimmt wurden. Die nicht zu den EPT gehörenden Proben wurde nicht weiter ausgewertet und sind im Anhang zusammengestellt.

Nach einer Hauptprobenahme zwischen 1. Juli und 15. August 2014 fanden zusätzliche Untersuchungen zwischen 15. September und 25. Oktober 2014 sowie zwischen 15. Juli und 30. September 2015 statt. Diese dienten hauptsächlich dem Fang von Adulttieren bei Artengruppen, deren Larven nicht sicher bis zur Art bestimmbar sind.

Statistische Auswertung

Zur Auswertung der Temperaturdaten wurde folgende Software verwendet: StatPlusPro:Mac (AnalystSoft Inc. ©, lineare Regression), PSPP (GNU software Free Software Foundation, Mann-Whitney-Test und Kruskal-Wallis-Test), R (GNU software Free Software Foundation, multivariate Statistik).

4 Resultate

Struktur

Vegetation und Landnutzung

Die 61 untersuchten Quellen befanden sich mehrheitlich auf Alpenweiden oberhalb der Waldgrenze (61%). Viele waren umgeben von Moosgesellschaften (54%), Zwergstrauchbeständen (41%), Hochstaudenfluren (25%) und Gebüsch (16%). Quellen in Wälder, standortfremder Vegetation oder Siedlungsgebiet waren nicht in der Auswahl vertreten (Abb. 4).

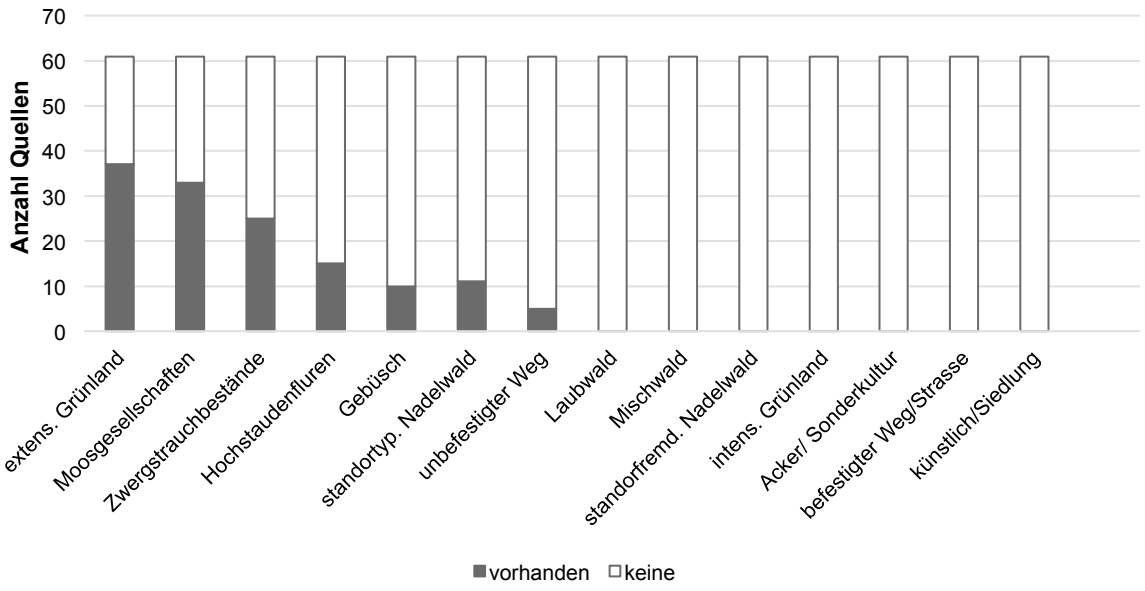


Abb. 4: Vegetation und Landnutzung der 61 untersuchten Quellen.

Substrate, Fliesseigenschaften und besondere Quell-Strukturen

Das Substrat der untersuchten Quellen war von groben Korngrössen dominiert (Blöcke, Steine, Kies/Schotter), was auf eine mehrheitlich schroffe bis starke Neigung des Geländes (>50%) deutet (Abb. 5). Die grobkörnigen Substrate waren in 97% der Fälle mit Moospolstern bewachsen. Weiter waren Sand, organischer Schlamm, mineralisches Feinmaterial, Pflanzen, Wurzeln und Totholz als Substrattypen zu finden. Falllaub wurde nur in Einzelfällen in Nachbarschaft von Gebüschen beobachtet (5%) und unterschied tiefer gelegene Objekte von alpinen Quellen. Kalksinterformationen wurden keine festgestellt.

Die Fliesseigenschaften und Quell-Strukturen werden ebenfalls stark von der Geländeneigung bestimmt. In zahlreichen Quellen wurde eine grosse Diversität unterschiedlicher Strömungscharakteristika sowie kleinräumiger, strukturreicher Habitate notiert (Abb. 6 und 7). Das ist typisch für naturnahe bis bedingt naturnahe Quellen wie sie im Alpenraum in grosser Zahl zu finden sind.

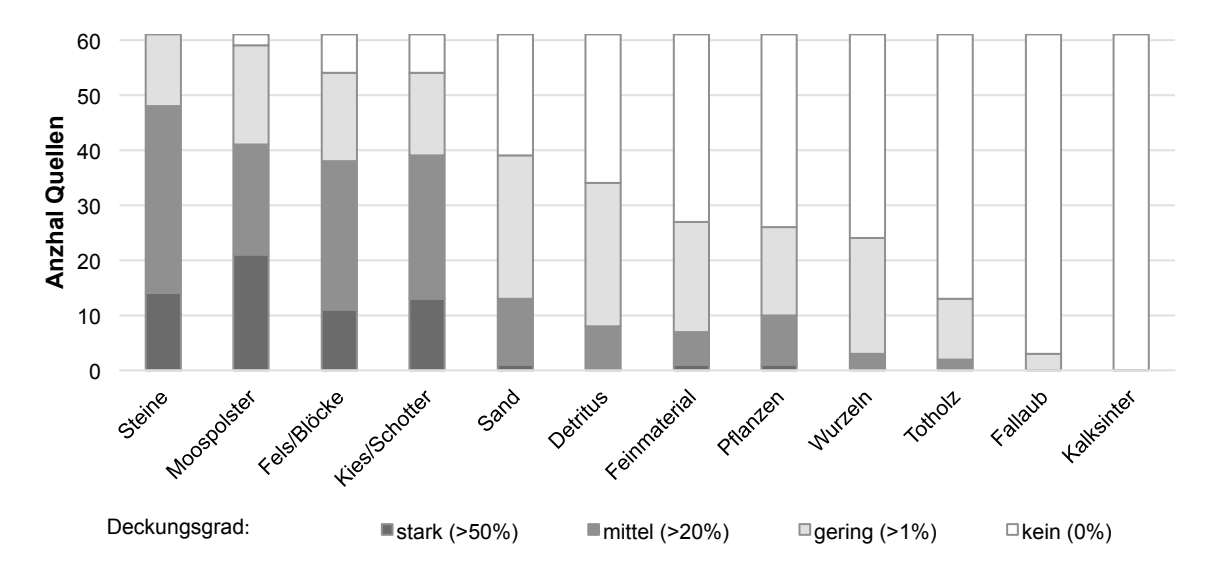


Abb. 5: Anorganische und organische Substrate und deren Deckungsgrad in den untersuchten Quell-Lebensräumen (n=61).

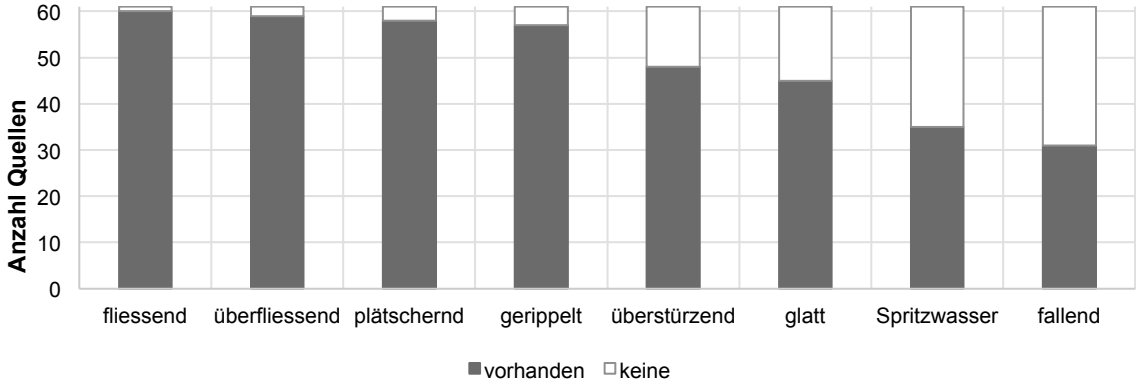


Abb. 6: Häufigkeit verschiedener Fliesseigenschaften in den untersuchten Quellen (n=61).

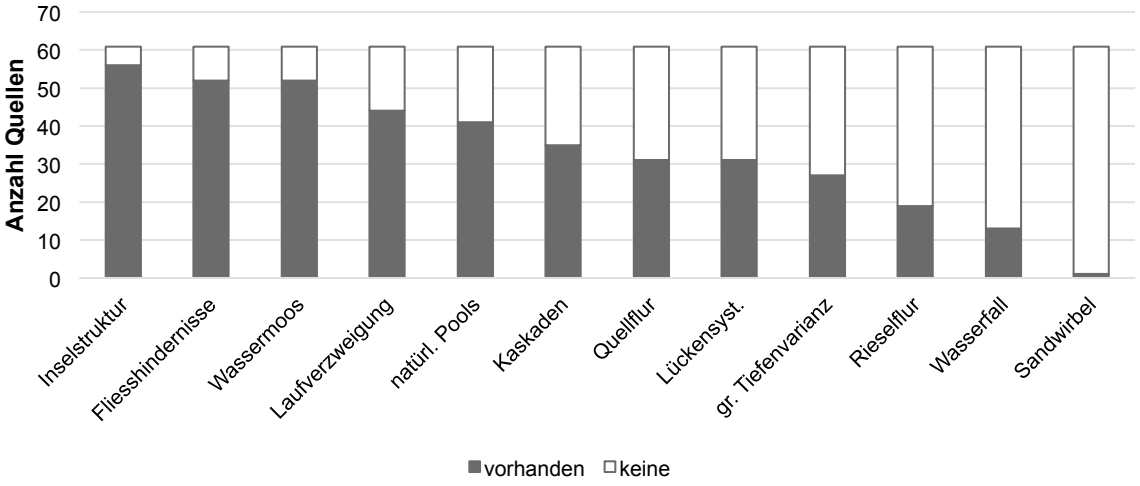


Abb. 7: Häufigkeit der Ausbildung wichtige kleinräumige Wertstrukturen, die für die Biodiversität von grosser Bedeutung sind (n=61).

Beeinträchtigungen und Gesamtbewertung der Quellen

Aufgrund der Strukturbewertung nach der Methode des BAFU (Lubini et al. 2014) waren alle Objekte den Klassen «naturnah» und «bedingt naturnah» zuzuordnen (Abb. 8). Bei den Beeinträchtigungen waren hauptsächlich Trittschäden zu beobachten (20%). Sowohl Vieh als auch menschliche Wanderaktivität sind als Ursache bei den erfassten Meldungen angegeben. Ferner wurden Fassungen, Wasserentnahmen, Fadenalgen in je 10% der Aufnahmen notiert. Weniger häufig waren Infrastrukturen (Zuwegung und Feuerstellen, zusammen 7%), Verbau der Ufer und/oder der Sohle (3%) und Aufstau (2%). Andere, bei Tieflandquellen häufige Beeinträchtigungen wie Viehtränke, Ablagerungen, Einleitungen oder Verlegungen fehlten (Abb. 9).

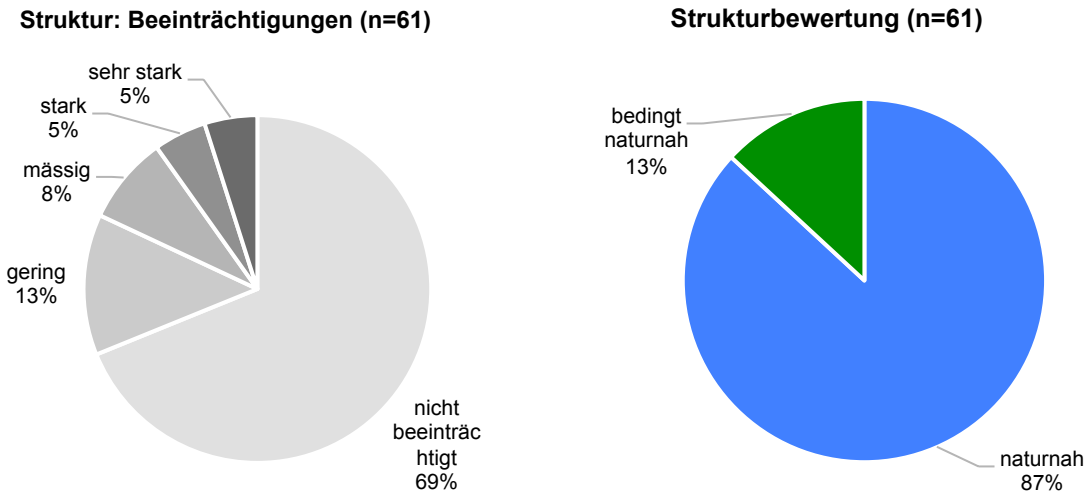


Abb. 8: Anteil der Quellen mit unterschiedlicher Beeinträchtigungsstärke (Teilwert A, links) und Gesamtbewertung der Struktur (rechts) der Quelle (n=61).

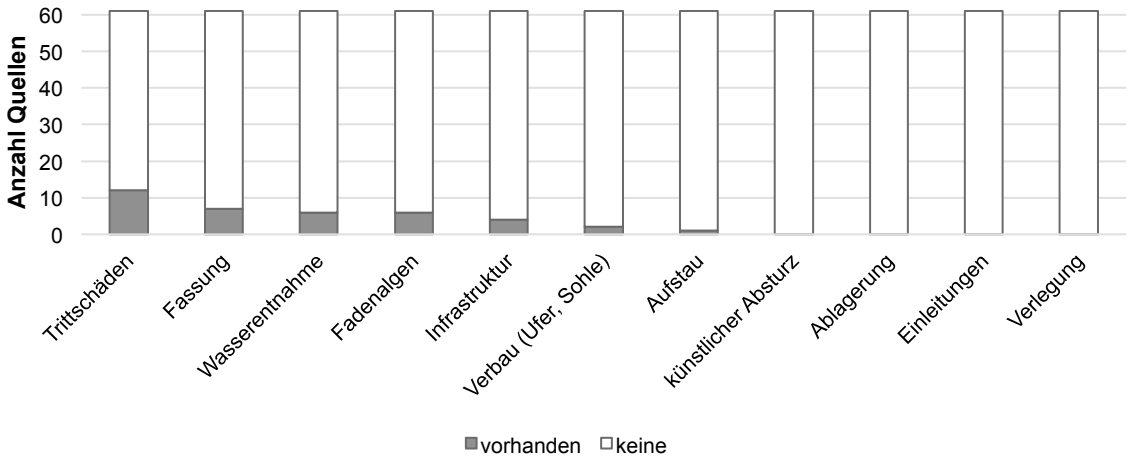


Abb. 9: Häufigkeit der Beeinträchtigungsursachen (Wert A) in den untersuchten Quellen (n=61).

Temperatur

Temperaturbereiche

Die jährlichen Mitteltemperaturen der 41 ausgewerteten Quellen schwankten von August 2014 bis Juli 2015 zwischen 1,21 und 6,15 °C mit einem Median von 3,93 °C. Die mittlere Temperatur der Monate Juli bis Dezember 2014 zeigte einen Median von 4,35 °C und war signifikant wärmer als jene zwischen Januar und Juni 2015, mit einem Median von 3,35 °C (Abb. 10, Mann-Whitney-Test. U: 521.00, Z:-2.82, p<0.001). Der Median der Monatsmitteltemperaturen in der Vegetationsperiode (Juli bis September) betrug in beiden Jahren 4,63 °C.

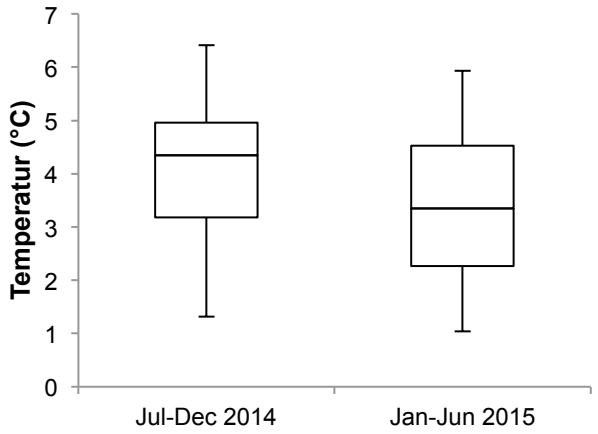


Abb. 10: Boxplot der Monatsmitteltemperaturen für die Perioden Juli bis Dezember 2014 und Januar bis Juni 2015.

Die mittleren Temperaturen der einzelnen Quellen waren nicht normal verteilt, sondern wiesen ein deutliches Maximum in der Klasse 4,5–5,0 °C auf. Die Monatsmittel der einzelnen Quellen variierten zwischen minimal 0,38 °C und maximal 8,74 °C, die Mediane der Monatsmittel aller 41 Quellen lagen zwischen 3,14 und 4,99 °C. Diese zeigten einen sinusförmigen Verlauf mit einem Minimum im März 2015 und einem Maximum im August 2015 (Abb. 11).

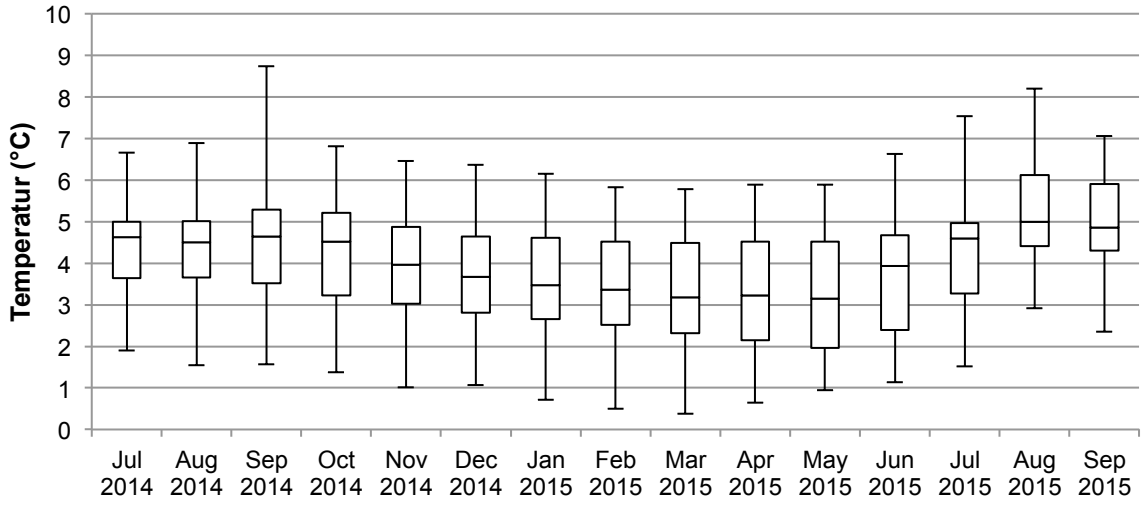


Abb. 11: Boxplot der Mitteltemperaturen für die Monate Juli 2014 bis September 2015 der 41 ausgewerteten Quellen.

Die Jahresmitteltemperatur nahm mit zunehmender Meereshöhe signifikant ab (y=-0,0037x + 11,089, R^2=0,55156; p < 0,001, Abb. 12). Mit einer Höhenzunahme von 100 m sank die Temperatur um 0,37 °C. Die Regressionen für die beiden Vegetationsperioden (Juli bis September) zeigten im Jahre 2015 eine leicht markantere Abnahme mit der Meereshöhe als (y=-0,0036x + 11,678; R^2 = 0,36279, p < 0,001; n = 28) als 2014 (y = -0,0032x + 10,914; R^2 = 0,3482, p < 0,001; N = 38).

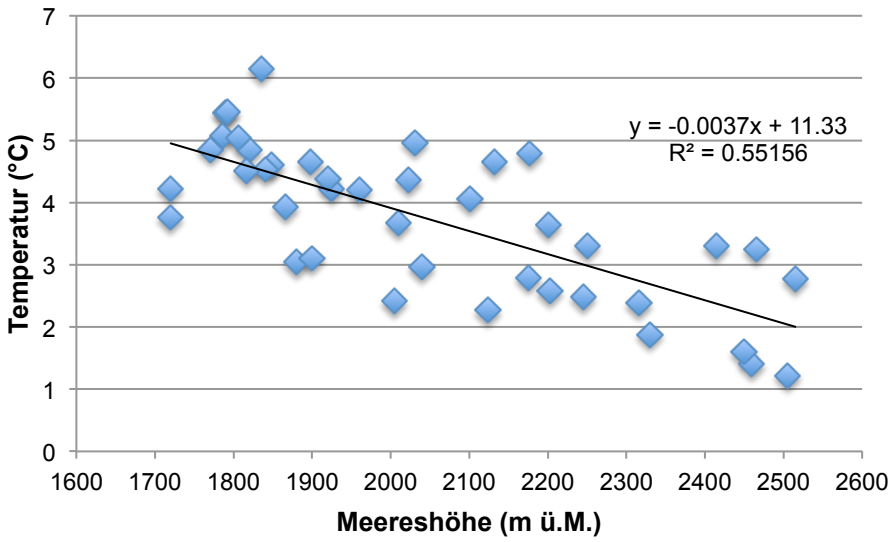


Abb. 12: Beziehung zwischen der Jahresmitteltemperatur und der Meereshöhe in den 41 untersuchten Quellen.

Temperatur geologisch unterschiedlicher Aquifere

In Karstquellen variierte die Jahresmitteltemperatur zwischen 2,26 und 5,46 °C mit einem Median von 4,07 °C, während in Kluftquellen die Minima 1,26 und 6,15 °C betrugen (Median: 3,93 °C). In Karst- und Kluftquellen waren die Mitteltemperaturen der Periode Juli bis Dezember 2014 mit Werten von 4,33 und 4,35 °C höher als in der Periode Januar bis Juni 2015 mit Medianen von 3,89 und 3,35 °C. Für die Kluftquellen war dieser Unterschied signifikant (Mann-Whitney Test, U: 306, Z: -2,91, p < 0,001, Tab. 1). Die Mitteltemperaturen in den beiden Vegetationsperioden (Juli bis September) waren 2014 mit Medianen von 4,93 °C (Karstquellen) und 4,35 °C (Kluftquellen) etwas höher als 2015 (Karstquellen: 4,22 °C, Kluftquellen: 4,63 °C).

Tab. 1: Statistische Signifikanz von U im Mann-Whitney-Test: p für den Vergleich der Mittleltemperatur in Karst- und Kluftquellen für die Periode Juli–Dezember 2014 gegen Januar–Juni 2015 sowie für die Vegetationsperioden (Juli-September) 2014 gegen 2015.

	Juli-Dezember 2014 gegen Januar-Juni 2015	Juli-September 2014 gegen Juli-September 2015
Karstquellen	0.17 (n=8)	0.82 (n=8)
Kluftquellen	< 0.001 (n=33)	0.95 (n=31)

Das Temperaturprofil von Karst- und Kluftquellen war in den Monaten Juli bis Oktober vergleichbar. Von November (3,85 °C) bis Mai (2,68 °C) sank die Temperatur in Kluftquellen aber auf deutlich tiefere Werte ab als in Karstquellen, in denen das Minimum im Mai bei bloss 4,23 °C lag (Abb. 13)

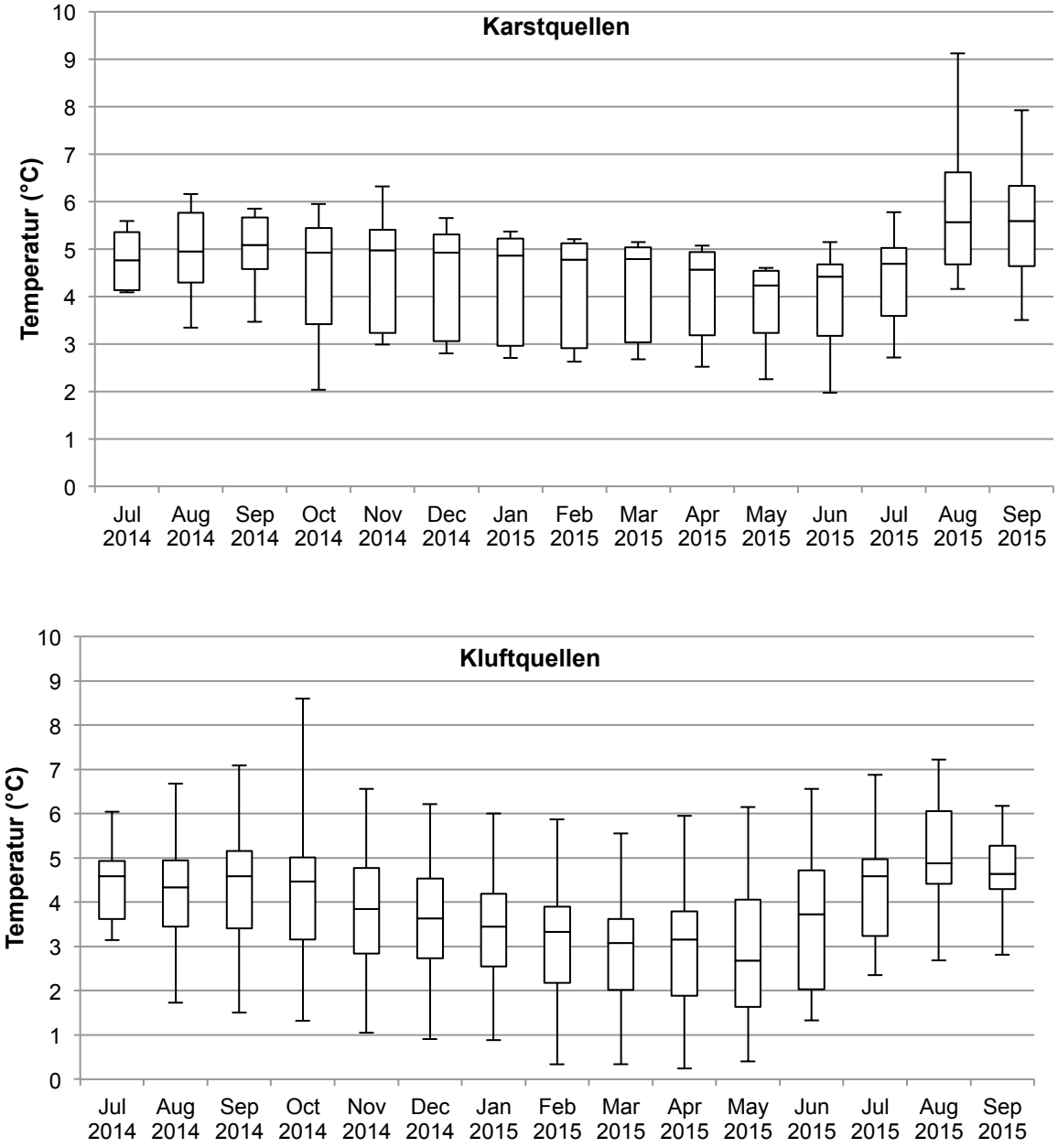


Abb. 13: Boxplots der Monatsmitteltemperaturen in Karstquellen (n=8, oben) und Kluftquellen (n=33, unten).

Einfluss von Exposition und Permafrost

Die Jahresmitteltemperaturen der Quellen mit verschiedener Exposition waren signifikant verschieden (Kruskal-Wallis-Test: Chi-Quadrat: 16,74, $p < 0{,}001$, Abb. 14). Die höchsten Werte wurden mit 4,65 °C in südexponierten Quellen gemessen, die tiefsten mit 2,73 °C in nordexponierten. Quellen in Ostexposition waren mit 4,30 °C wärmer als in Westexposition mit 3,20 °C. Die statistische Auswertung mit dem Mann-Whitney-Test ergab signifikante Unterschiede für die Paare Nord-Süd (U: 6,00, Z: -3,49, $p < 0{,}001$) und Süd-West (U: 20.00, Z: -3.05, $p < 0.001$). Die statistische Auswertung der beiden Perioden Juli–Dezember 2014 und Januar–Juni 2015 zeigte bei den gleichen Paaren signifikante Unterschiede.

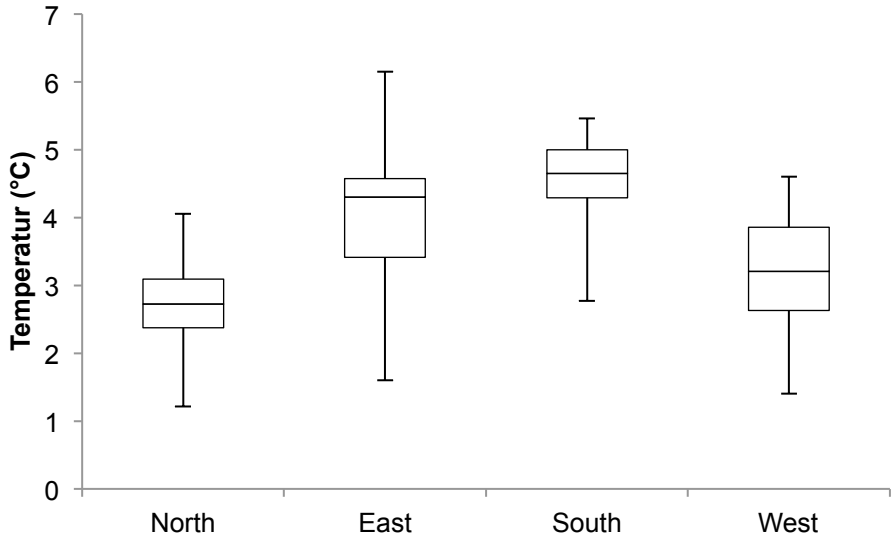


Abb. 14: Boxplots der Jahresmitteltemperatur in Quellen unterschiedlicher Exposition.

Der Jahresverlauf der Monatsmitteltemperaturen zeigte die höchsten Unterschiede für Quellen in Nordexposition (Mediane von 1,83 °C im Mai und 5,11 °C im August) während jene in Südexposition nur gering schwankten (Mediane von 4,51 °C im Februar und 5,07 °C im September Abb. 15). Die Mediane der Monatsmitteltemperaturen variierten in westexponierten Quellen zwischen 2,70 und 4,01 °C, in ostexponierten Quellen zwischen 3,13 und 4,92 °C.

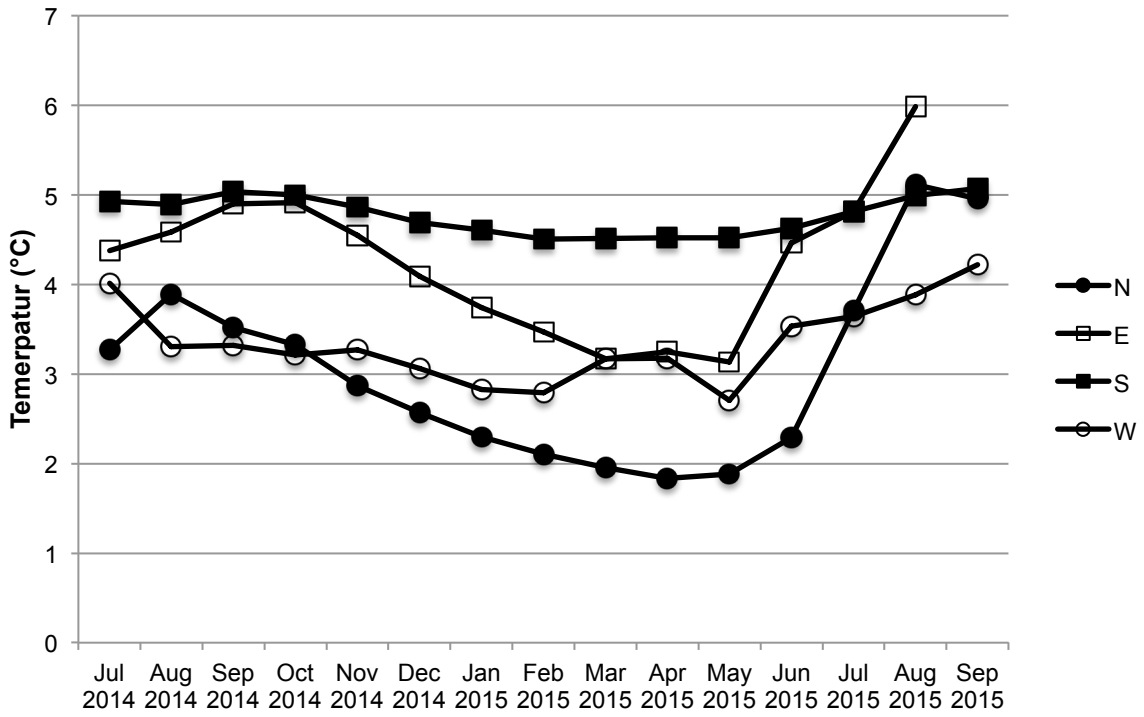


Abb. 15: Mediane der Monatsmitteltemperatur in den Quellen unterschiedliche Exposition.

Die Jahresmitteltemperatur der Quellen nahm mit zunehmender Distanz zu wahrscheinlichen Permafrostvorkommen signifikant zu ($y = -0{,}0016x + 1{,}9603$, $R^2 = 0{,}60068$; $p < 0{,}001$, Abb. 16). Für die Perioden Juli–Dezember 2014, Januar–Juni 2015 und die beiden Vegetationsperioden (Juli–September 2014 und 2015) war diese Beziehung ebenfalls signifikant positiv korreliert ($p < 0{,}001$).

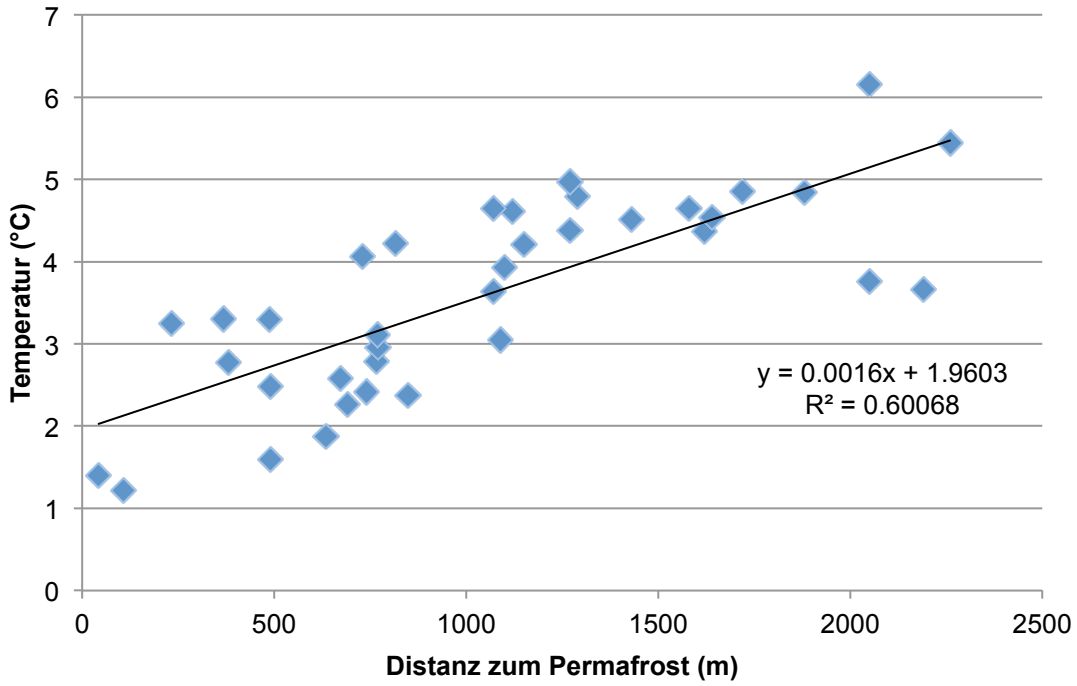


Abb. 16: Beziehung zwischen Temperatur und Distanz des Quellstritts zum nächstgelegenen Permafrostvorkommen im Einzugsgebiet..

Temperaturmuster der Quellen

Im Jahresverlauf zeigte die Temperatur in den 61 Quellen verschiedene Muster. Ein erster Typ umfasst Karstquellen mit einem Temperaturverlauf in Form einer Sinuskurve mit schwach ausgeprägter Amplitude zwischen Juni und Oktober sowie einem plötzlichen Temperaturrückgang und relativ stabilen Verhältnisse unter 1 °C von November bis April oder Mai (z. B. Q-KI_11_UR; Abb. 17). Dieser unvermittelte Temperaturabfall ist vermutlich auf einen starken Rückgang der Schüttung als Folge der Ausbildung einer Schneedecke und auf die Entstehung von Eis während den Wintermonaten zurückzuführen. Dies wird deutlich am Beispiel der Quelle Q-KI_04_BE, in der während der Phase tiefer Temperaturen immer wieder Pulse mit kurzen Phasen einer Temperaturerhöhung auftraten, was vermutlich auf eine Erwärmung der Luft und Regen zurückzuführen ist (Abb. 18). Gegen den Sommer hin steigt die Temperatur in solchen Quellen ebenso plötzlich wieder an.

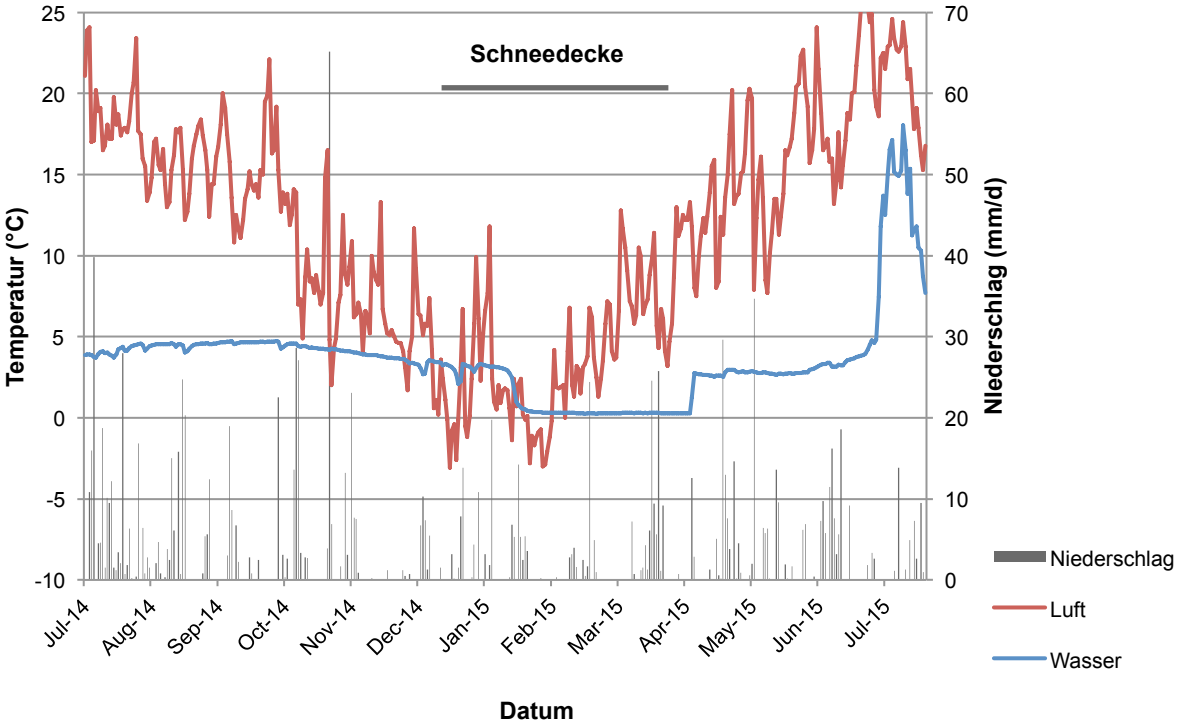


Abb. 17: Muster der Wassertemperatur in der Karstquelle Q-KI_11_UR ergänzt mit Daten der Lufttemperatur und der Niederschläge der MeteoSwiss Station Altdorf (UR). Der typische Rückgang der Temperatur im Winter geht vermutlich auf eine Austrocknung zurück.

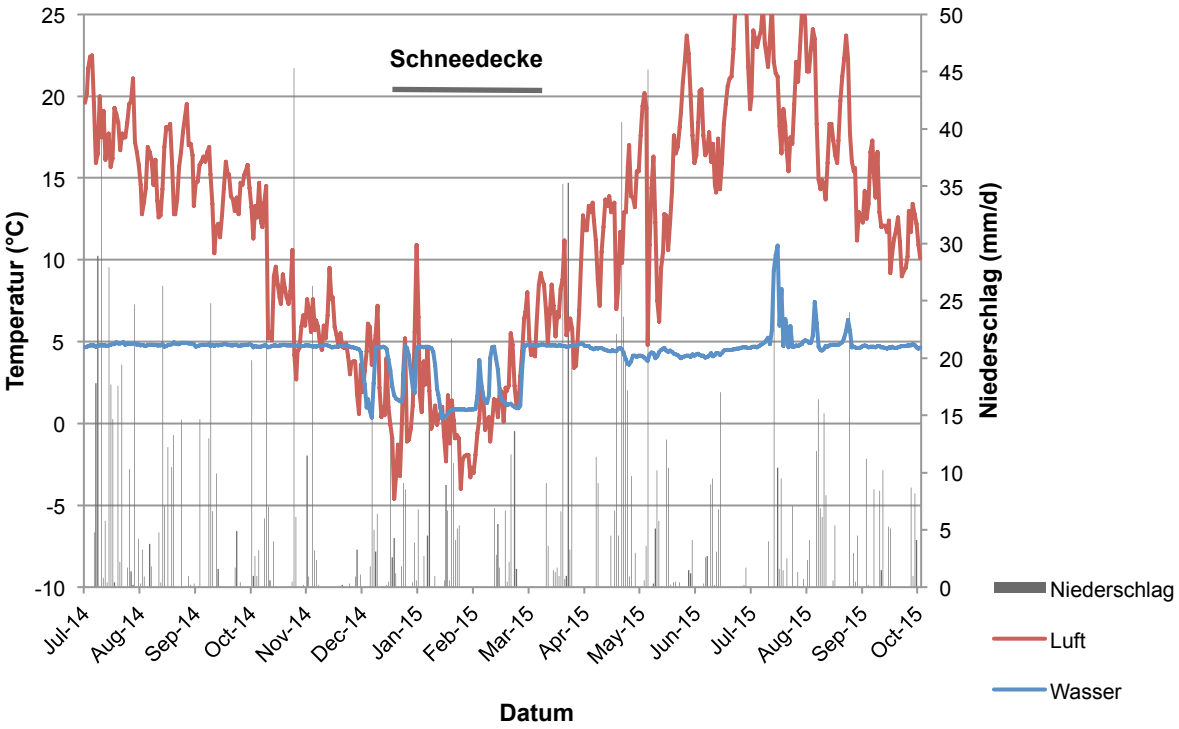


Abb. 18: Muster der Wassertemperatur in der Karstquelle Q-KI_04_BE ergänzt mit Daten der Lufttemperatur und der Niederschläge der MeteoSwiss Station Interlaken (UR). Der typische Rückgang der Temperatur im Winter geht vermutlich auf eine Austrocknung zurück und zeigt immer wieder kurze Phasen mit Abfluss.

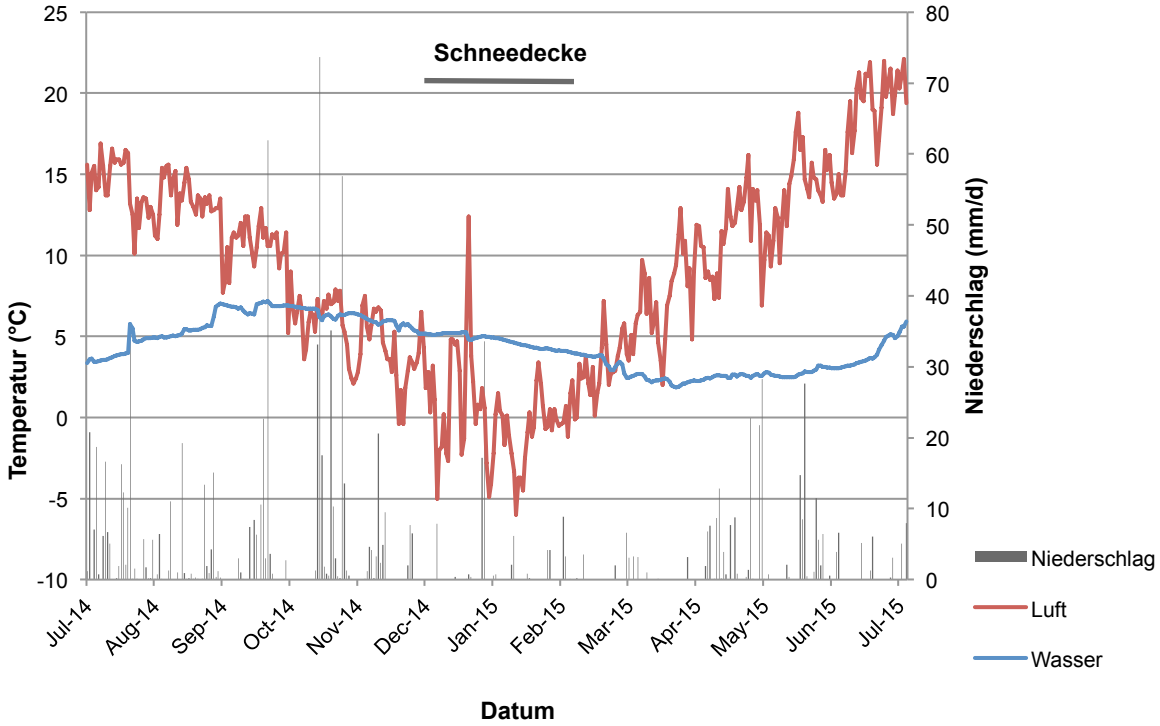


Abb. 19: Ausgeprägte Sinuskurve der Wassertemperatur in der Kluftquelle Q-Kl_13_GR, ergänzt mit Daten der Lufttemperatur und der Niederschläge der MeteoSwiss Station Poschiavo/Robbia (GR).

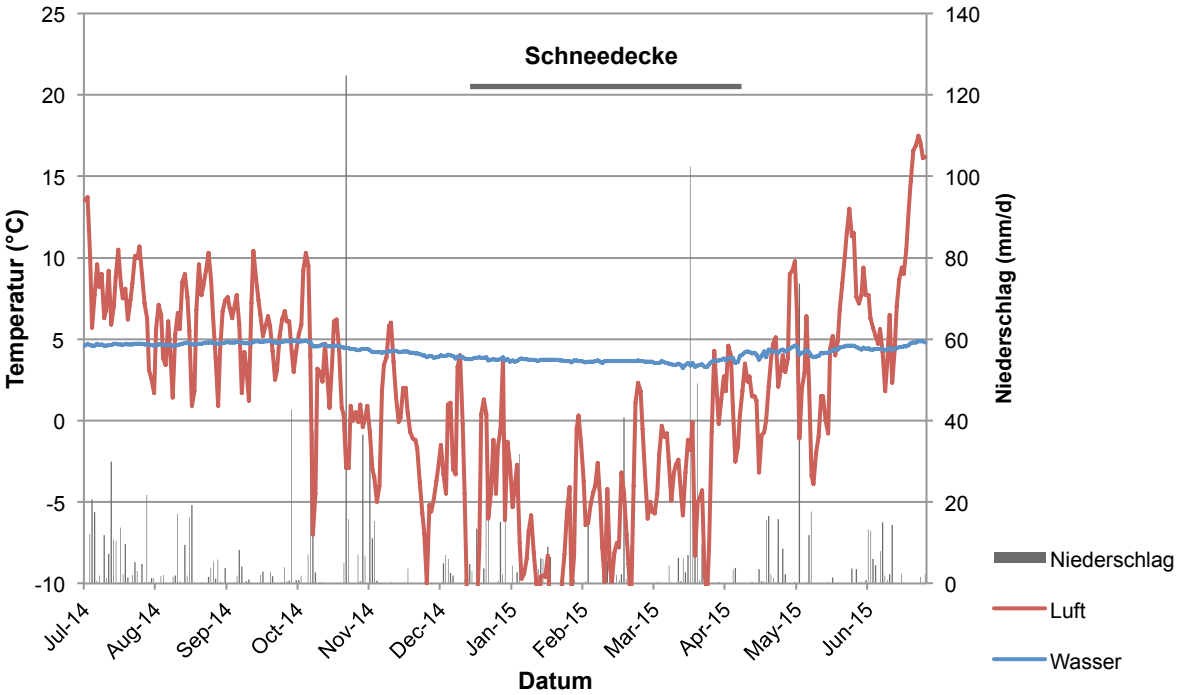


Abb. 20: Flache Sinuskurve der Wassertemperatur in der Kluftquelle Q-Kl_09_UR, ergänzt mit Daten der Lufttemperatur und der Niederschläge der MeteoSwiss Station Grütsch-Andermatt (UR).

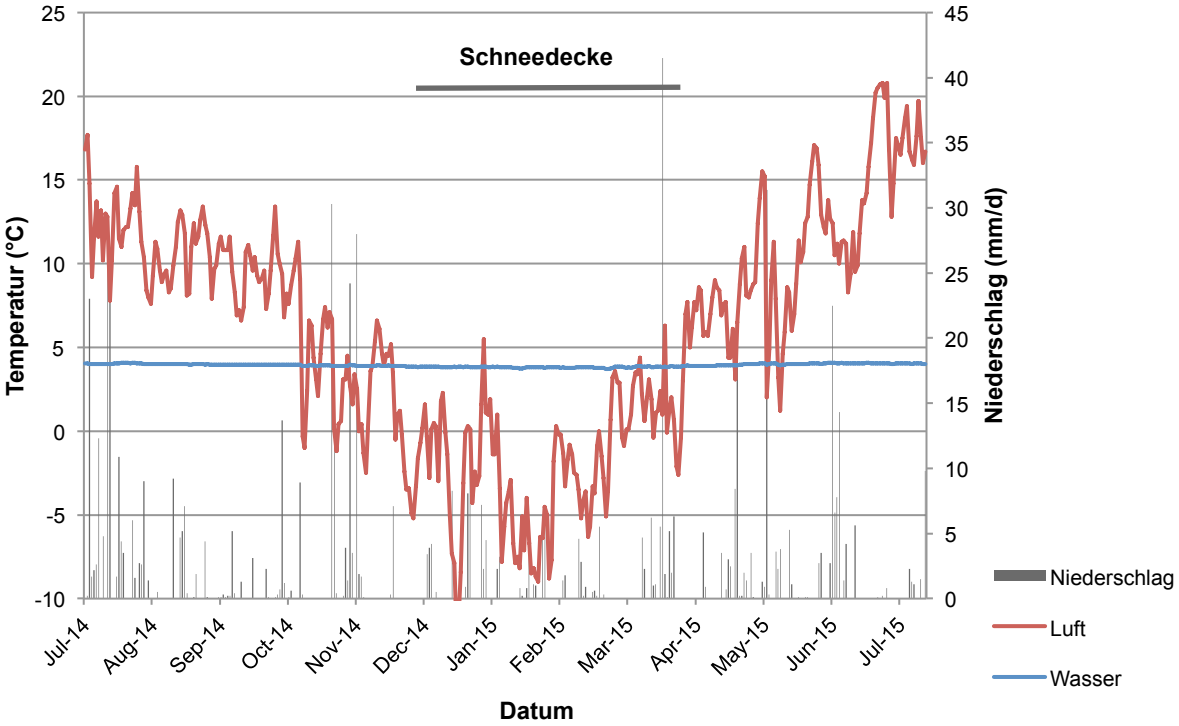


Abb. 21: Konstante Wassertemperatur in der Kluftquelle Q-Kl_06_VS, ergänzt mit Daten der Lufttemperatur und der Niederschläge der MeteoSwiss Station Zermatt (VS).

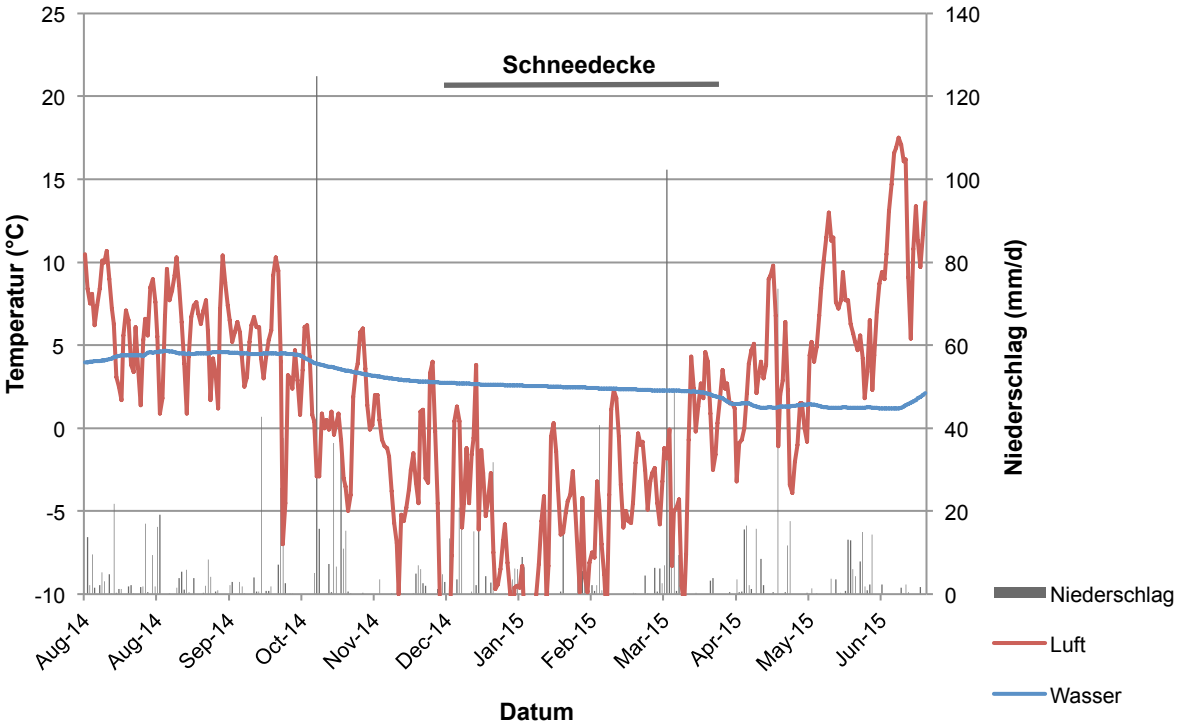


Abb. 22: Flache Sinuskurve der Wassertemperatur in der Kluftquelle Q-Kl_27_UR, ergänzt mit Daten der Lufttemperatur und der Niederschläge der MeteoSwiss Station Grütsch-Andermatt (UR). Temperaturrückgang im Mai/Juni während der Schneeschmelze.

Ein zweiter Typ charakterisiert die Temperaturmuster in Kluftquellen. Die Wassertemperatur schwankt saisonal und bildet deshalb eine Sinuskurve mit einem Maximum im Oktober und einem Minimum im Juni. Die Amplitude der Sinuskurve ist grösser (Abb. 19) oder nur schwach angedeutet (Abb. 20).

Muster mit konstanter Temperatur wurden sowohl in Karst- (z. B. Q-Kl_01_BE) als auch in Kluftquellen (z. B. Q-Kl_06_VS) beobachtet. Sinusförmige Temperaturkurven wurden mehrheitlich in Kluftquellen gefunden. In Karstgebieten besassen nur zwei Quellen Jahresamplituden von ± 1,5 °C, bei den übrigen sank die Temperatur plötzlich für mehrere Monate stark ab. Quellen ohne markante Änderungen zeigten eine leichte Temperaturabnahme während der Schneeschmelze zwischen März und Juni (Abb. 21).

In Quellen mit Ursprung in Gesteinsschutt oder Moränen betrugen die jährlichen Temperaturamplituden 5–6 °C. Offensichtlich wird das Wasser beim Durchfliessen der lockeren Gesteinsmassen stark von der Lufttemperatur beeinflusst und wird je nach Jahreszeit erwärmt resp. abgekühlt. Oft wurde zudem beobachtet, dass Veränderungen von Wasser- und Lufttemperatur phasenverschoben waren und sich das Wasser erst verzögert erwärmt oder abgekühlt hat (z. B. Q-Kl_27_UR, Abb. 22). Im Sommer hat vielerorts die Wassertemperatur auf die Erwärmung der Luft reagiert. Regenfälle haben dies in einzelnen Quellen beschleunigt und mit dem Wärmetransport kleine Peaks verursacht (Beispiel Kluftquelle: Juli/August 2015 in Q-Kl_04-BE, Beispiel Karstquelle: August 2014 in Q-Kl_13_GR, Abb. 18 und 19).

Makrozoobenthos: Eintagsfliegen, Steinfliegen, Köcherfliegen (EPT)

Zusammensetzung der Fauna

Bei den im Fokus stehenden Ephemeroptera (Eintagsfliegen), Plecoptera (Steinfliegen) und Trichoptera (Köcherfliegen) (EPT) sind 99 Arten als Larven und/oder Imagines nachgewiesen worden (Tab. 2).

Tab. 2: Übersicht der Zusammensetzung der Fauna der Ephemeroptera, Plecoptera und Trichoptera. Die Einstufung der Arten erfolgte anhand der europäischen Datenbank www.freshwaterecology.info sowie eigener auf die schweizerischen Verhältnisse angepassten Einstufungen.

Taxon	Anzahl Arten	kaltstenotherme Arten	krenobionte Arten	krenophile Arten	Endemische Arten
Ephemeroptera	11	4	0	0	2
Plecoptera	40	33	7	4	6
Trichoptera	48	31	17	9	9

In den 61 untersuchten Quellen wurden elf Ephemeroptera-Arten (Eintagsfliegen) nachgewiesen, pro Quelle im Mittel zwei Arten. Am häufigsten waren *Baetis alpinus* und *Rhithrogena loyolaea* (Abb. 23). Beide Arten sind in der Schweiz weit verbreitet, *B. alpinus* kommt bis ins Mittelland in Höhen von 400 m vor, während *R. loyolaea* Fliessgewässer im Alpenraum besiedelt. Alles andere waren Einzelfunde von Arten, deren Larven teilweise aus tiefer gelegenen Gegenden zugewandert sind oder den Schwerpunkt ihrer Entwicklung nicht in Quellen haben. Unter den schweizerischen Eintagsfliegen gibt es nur eine endemische Art (*Baetis nubecularis*) im Jura, die als charakteristischer Quellbewohner gilt.

Mit insgesamt 40 Arten wurde rund ein Drittel der in der Schweiz vorkommenden Plecoptera-Arten (Steinfliegen) nachgewiesen (Tab. 2). Pro Quelle waren es im Mittel sechs Arten (Median). Dies erstaunt nicht, da die grösste Diversität der Steinfliegen, die fast ausschliesslich Fliessgewässer bewohnen, in den Alpen liegt. Vier Arten, die bloss als Imagines nachgewiesen worden sind, wurden auch

aufgrund ihrer Ökologie für die weiteren Auswertungen weggelassen. Nur wenige Steinfliegenarten sind eng auf Quellen als Entwicklungsort ihrer Larven angewiesen, weshalb unter den verbleibenden 36 Arten – obwohl die Mehrheit als kaltstenotherm gilt – bloss sechs als krenobiont und vier als krenophil gelten. Die beiden Arten mit dem häufigsten Vorkommen waren keine Quellarten sondern euryöke Arten mit weiter Verbreitung im Alpenraum (Abb. 24). Erst an dritter und vierter Stelle stehen Quellarten, gefolgt von meist kaltstenothermen Arten. Eine Ausnahme ist *Nemurella pictetii*, eine eurytherme Art mit der grössten Höhenerstreckung der Fundorte in der Schweiz. Sie besiedelt kleine, oft bewachsene Fliessgewässer und kalte Seen, aber auch Moorgewässer, was ihr oft massenhaftes Auftreten in Quellen mit Flachmoorcharakter erklärt. Im Gegensatz zu den alpinen Eintagsfliegenarten spielt bei den Steinfliegen die geografische Verbreitung für die faunistische Zusammensetzung eine grössere Rolle, weil manche Arten wie *Leuctra muranyi* , *Leuctra ravizzai* oder *Isoperla lugens* ein kleines Areal in der Schweiz besiedeln. Dies erklärt u.a. die individuelle Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften von Quellen.

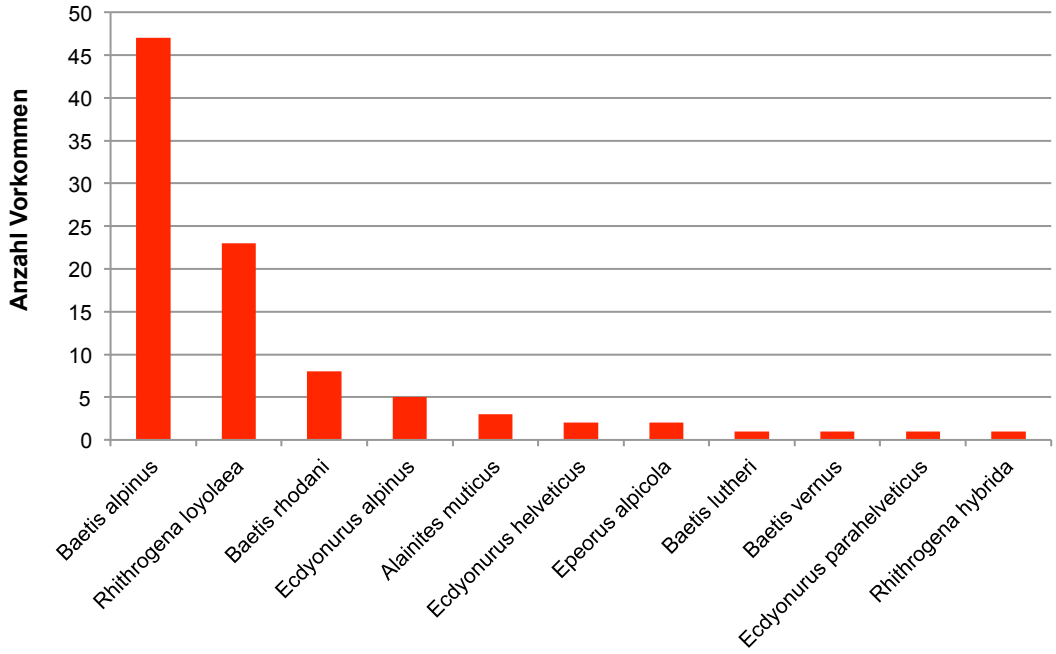


Abb. 23: Anzahl Vorkommen der 11 Eintagsfliegenarten in den 61 Quellen.

Bei den Trichoptera (Köcherfliegen) wurden insgesamt 48 Arten nachgewiesen (Tab. 25). Mit durchschnittlich sieben Arten (Median) je Quelle war dies die artenreichste Gruppe unter den EPT. Wie bei den Steinfliegen hatte es auch hier zugeflogene Imagines aus anderen Habitaten, so dass von 44 Arten mit sicherem Nachweis in den untersuchten Quellen ausgegangen werden kann. Unter den Arten mit Vorkommen in mehr als zehn Quellen befanden sich im Gegensatz zu den Steinfliegen meist Quellarten (Abb. 25). Dies bestätigt die enge Bindung zahlreicher Köcherfliegenarten an Quellen. Mit sechs von zwölf häufigsten Arten war die Unterfamilie der Drusinae in auffallend vielen Quellen vertreten. Manche unter ihnen sind bekannt als Alpenendemiten mit starker Bindung an kalte Gewässer, so auch an Quellen. Die Konzentration ihrer Vorkommen auf höhere Lagen macht sich hier im Gegensatz zu den Steinfliegen stärker bemerkbar. Der Einfluss der Biogeografie war hingegen weniger stark ausgeprägt, ausgenommen der nah verwandten *Allogamus mendax* mit Schwerpunkt in den Westalpen und *Allogamus uncatus* in den östlichen Zentralalpen. Ein sehr kleines Verbreitungsgebiet besitzt *Apatania fimbriata*, die in der Schweiz nur im Gebiet des Grossen Sankt Bernhards vorkommt. Einzig in den Zentralalpen kommt *Drusus alpinus* vor. Die Zusammensetzung je Quelle war bei den Köcherfliegen relativ stark vom Bewuchs und von der Umgebung beeinflusst. Moosbewuchs und angrenzende Flachmoore dürften hier ein wichtiger Faktor sein.

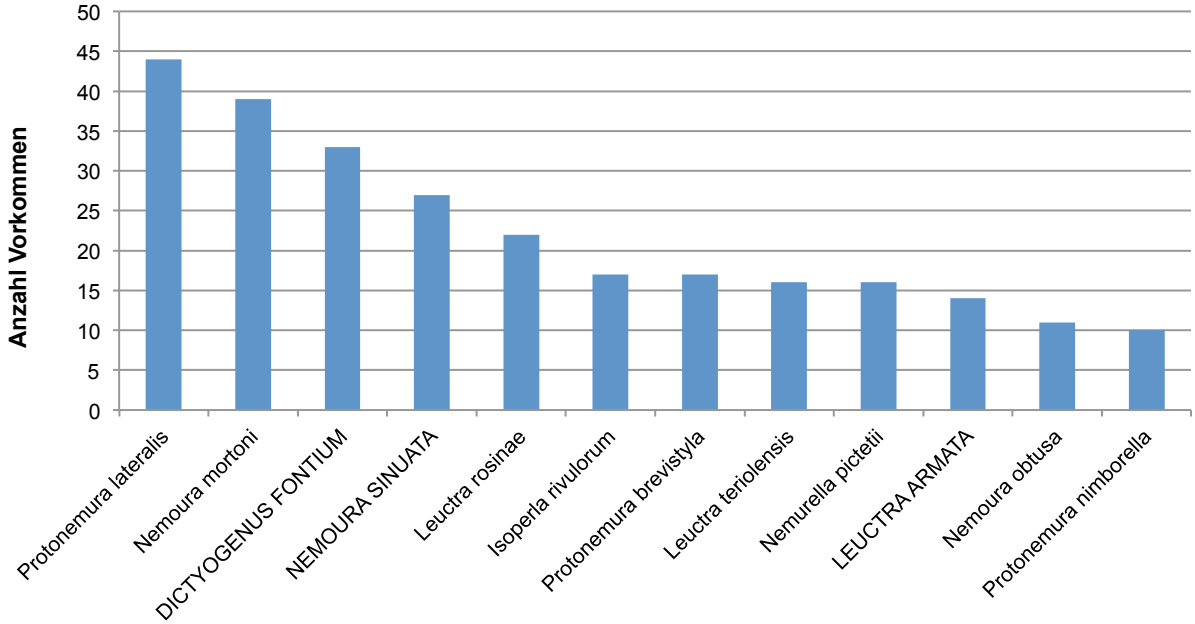


Abb. 24: Anzahl Vorkommen ausgewählter Steinfliegenarten in den 61 Quellen. Dargestellt sind nur Arten mit ≥ 10 Vorkommen. Grossbuchstaben bezeichnen Quellarten (krenophil, krenobiont).

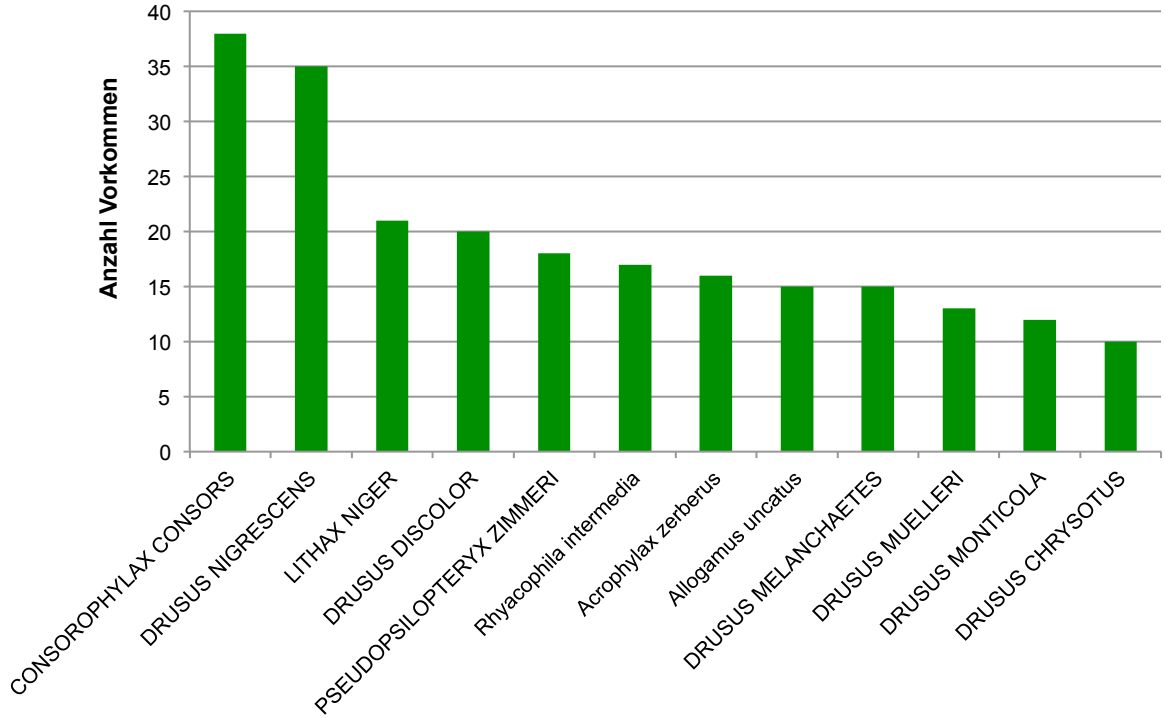


Abb. 25: Anzahl Vorkommen ausgewählter Köcherfliegenarten in 61 Quellen. Dargestellt sind nur Arten mit ≥ 10 Vorkommen. Grossbuchstaben bezeichnen Quellarten (krenophil, krenobiont).

Thermisch wichtige Umweltparameter und Wasserinsekten-Taxa

Von den thermisch wichtigen Parametern hatten die Höhe und die Temperatur den grössten Einfluss auf die Anzahl EPT-Taxa. Letztere und die Anzahl der Trichoptera nahm mit zunehmender Höhe der Quellen signifikant ab, mit steigender Jahresmitteltemperatur signifikant zu (Abb. 26 und 27).

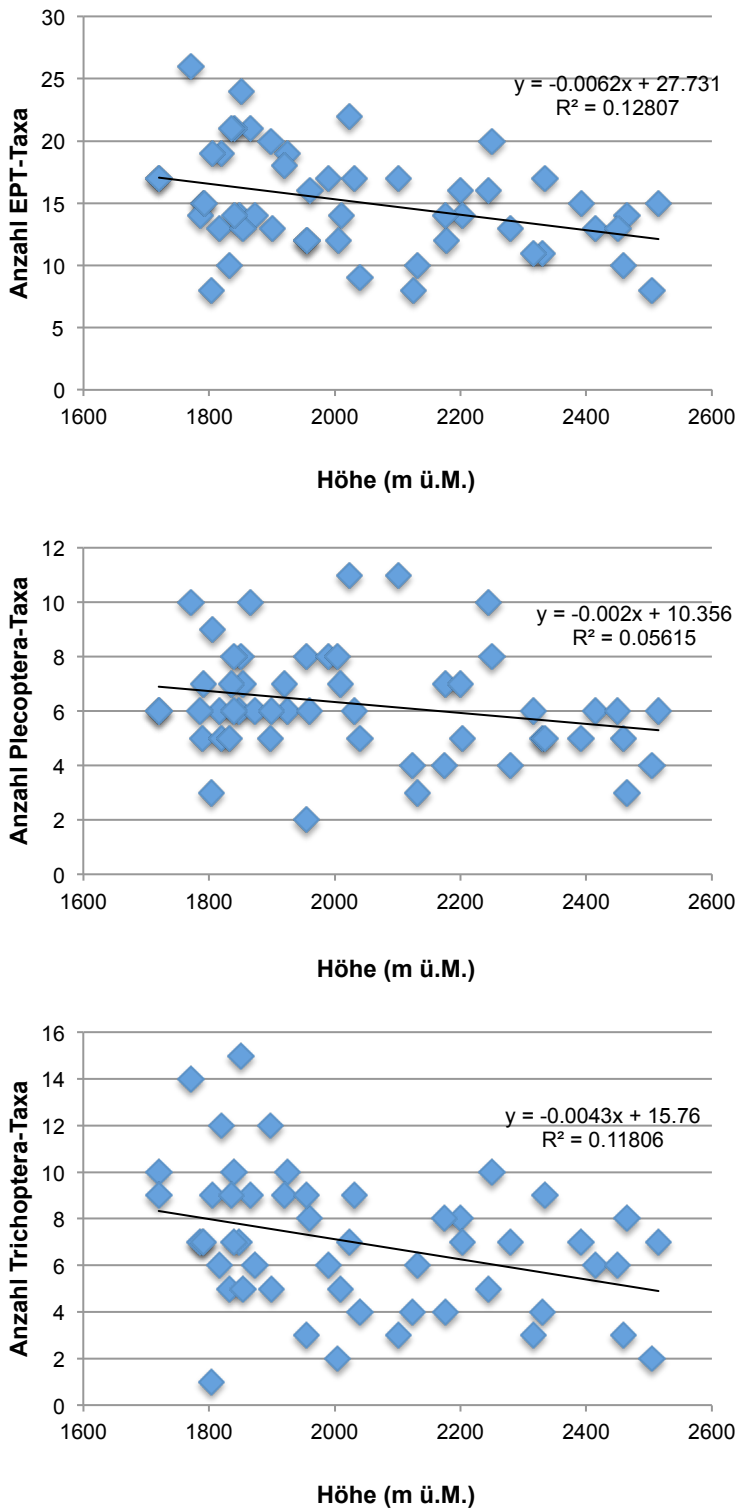


Abb. 26: Beziehung zwischen der Anzahl EPT-, Plecoptera- und Trichoptera-Taxa und der Meereshöhe des Quellaustritts (n=51).

Die Anzahl EPT-Arten nahm alle rund 160 m um eine Art ab, bei den Trichoptera alle 230 m. Die Anzahl der Plecoptera zeigte einen vergleichbaren Trend, doch war die Beziehung statistisch nicht signifikant (Tab. 3).

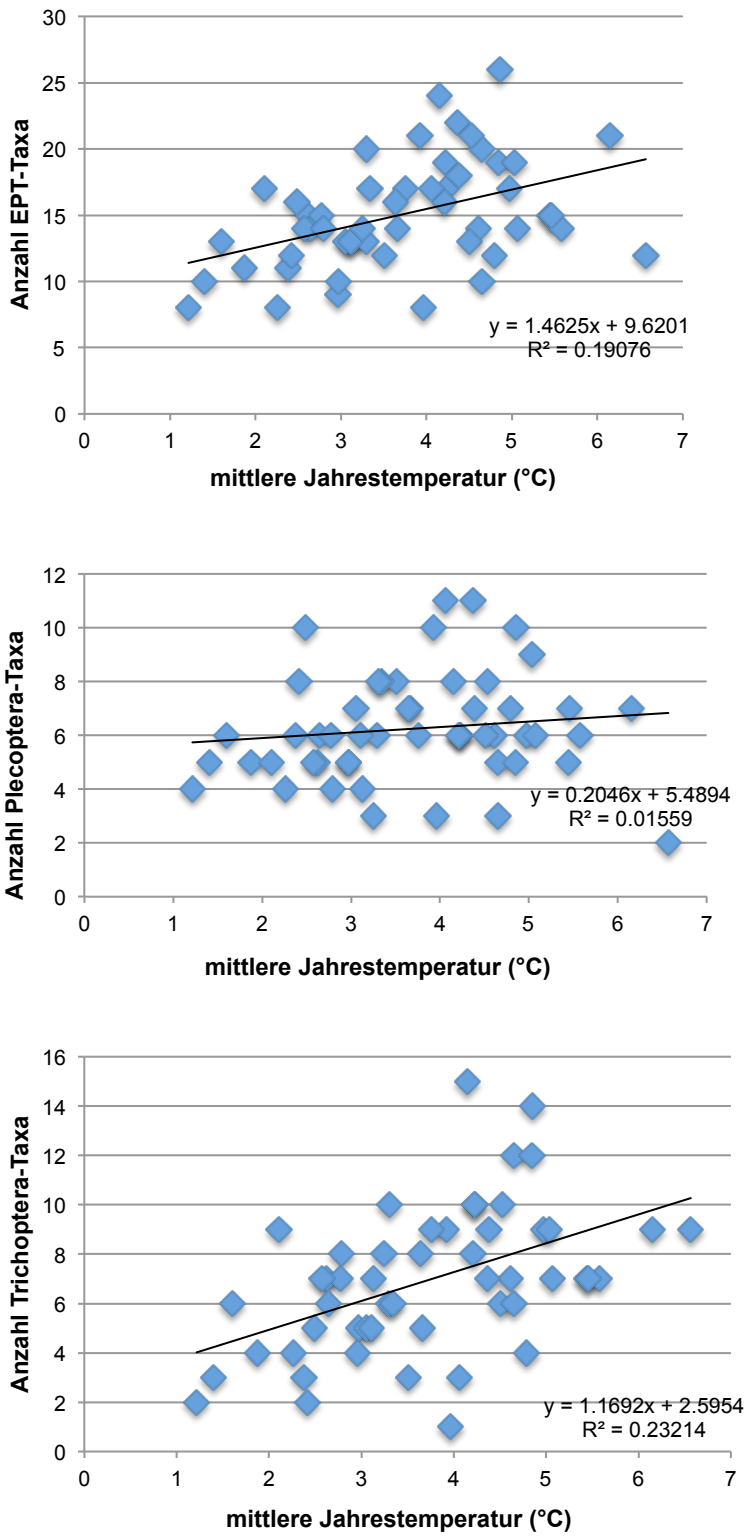


Abb. 27: Beziehung zwischen der Anzahl EPT-, Plecoptera- und Trichoptera-Taxa und der mittleren Jahrestemperatur (n=51).

Ebenfalls statistisch signifikant war die Beziehung zwischen der mittleren Temperatur der beiden Halbjahre Juli–Dezember und Januar–Juni sowie den EPT- respektive den Trichoptera-Taxa. Ebenfalls signifikant positiv korreliert mit der Anzahl EPT- und Trichoptera-Taxa war die Distanz der Quelle zu vermutetem Permafrost (Tab. 3). Beide Beziehungen waren bei den Plecoptera statistisch nicht

signifikant. Anders ausgedrückt: Die Unterschiede zeigen, dass der Artenreichtum der Plecoptera über das Spektrum der Jahresmitteltemperaturen deutlich ausgeglichener war als jener der Trichoptera.

Tab: 3: Tabelle der p-Werte aus der Regressionsanalyse der Beziehungen zwischen verschiedenen thermisch wichtigen Parameter und der Anzahl EPT-Taxa. EPT: Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera. Signifikanzniveau: **: p<0.01, *: p<0.05.

	Meereshöhe	Jahresmittel temperatur	Mitteltemperatur Jan-Jun	Mitteltemperatur Jul-Dez	Distanz zu Permafrost
EPT	0.00919**	0.00121**	0.00169*	0.00057**	0.00673**
Ephemeroptera	0.74173	0.50357	0.74665	0.13817	0.4963
Plecoptera	0.09077	0.37787	0.19258	0.25039	0.22167
Trichoptera	0.01263*	0.0003**	0.00073**	0.00068**	0.00758**

Zwischen den Temperaturparametern und der Anzahl Taxa mit einer ökologischen Bindung an Quellen waren mit Ausnahme der Anzahl krenophiler Taxa keine signifikanten Beziehungen zu erkennen.

Im Gegensatz zur Anzahl Taxa war die Beziehung zwischen der Dichte der Ephemeroptera, Plecoptera und Trichoptera und den thermisch wichtigen Parametern in keinem Fall signifikant. Die Dichte der EPT scheint in erster Linie von anderen Parametern wie den geologischen Verhältnissen, dem kleinräumigen Strukturangebot oder den Fliessverhältnissen bestimmt zu werden.

Geologie und Exposition

Nur für wenige faunistische Parameter war ein deutlicher Unterschied zwischen Karst- und Kluftgrundwasserleitern zu erkennen. Die Anzahl krenobionter (ÖWZ 16) Taxa und der Summe krenobionter und krenophiler Taxa (ÖWZ 16_8) war in den Karstquellen signifikant tiefer als in den Kluftquellen ($p<0.001$, Mann-Whitney-Test; Abb. 28). Die Unterschiede der Anzahl EPT-Taxa ($p=0.06628$) sowie der Ephemeroptera- ($p=0.05005$) und Trichoptera-Taxa ($p=0.06883$) lagen knapp über dem Signifikanzniveau.

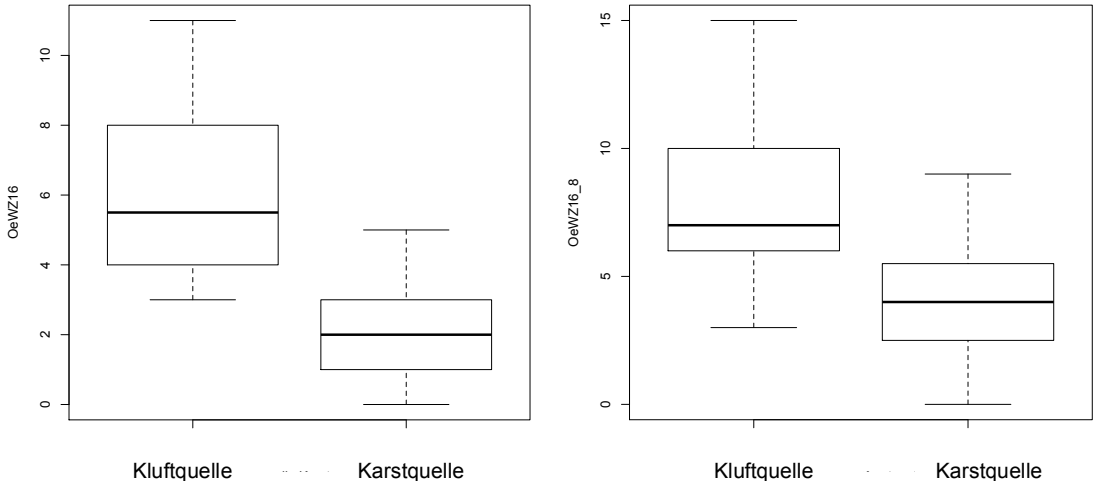


Abb. 28: Boxplots der Anzahl krenobionter Arten (ÖWZ16 links) und Anzahl krenobionter plus krenophiler Arten (ÖWZ16_8) in Kluft- (1) und Karstquellen (2). In beiden Fällen ist der Unterschied signifikant (Mann-Whitney Test, $p < 0.001$).

Ausserdem zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen der Exposition und der Anzahl krenophiler Arten (OeWZ8) sowie der Taxazahl der Trichoptera (Abb. 29). Bei den krenophilen Arten waren folgende Paare signifikant: N-E, N-S, N-W, E-W, S-W, bei den Trichoptera-Arten: N-E, W-S, N-W, S-W (Tab. 4)

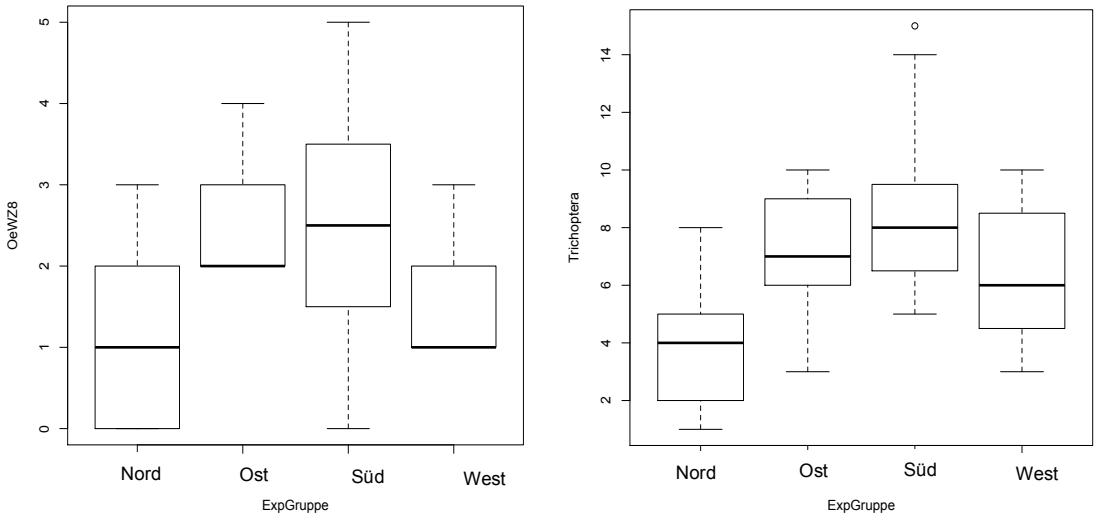


Abb. 29: Boxplots der Anzahl krenophiler Arten (OeWZ8, links) und der Trichoptera-Arten (rechts) in Quellen unterschiedlicher Exposition des Geländes.

Tab. 4: Mann-Whitney-Test (p-Werte): Unterschiede zwischen der Anzahl Trichoptera (hellgrau) und der Anzahl krenophiler Arten (dunkelgrau) in Quellen unterschiedlicher Exposition. Signifikanzniveau: **: p < 0,01, *: p < 0,05.

	Nord	Ost	Süd	West
Nord		0.018*	< 0.001**	0.049*
Ost	0.013*		0.348	0.562
Süd	0.024*	0.873		0.049*
West	0.452	0.011*	0.039*	

Die Dichte der EPT zeigte weder zwischen den Quellen der beiden geologischen Grundwasserleiter noch zwischen den Expositionsgruppen signifikante Unterschiede.

Arten mit besonderer Bindung an kalte Gewässer

Im Triplot der kanonischen Varianzanalyse (CCA) liessen sich die Quellen und die Arten nach ihren Beziehungen zu ausgewählten geografischen Grössen und Strukturparametern aufteilen. Die mittlere Jahrestemperatur des Wassers und die Meereshöhe der Quellen erwiesen sich als gegenläufig. Diese Achse trennte die Arten, die eher an mildere Verhältnisse angepasst sind und in tieferen Lagen vorkommen von jenen, die kälteadaptiert und auf hohe Lagen beschränkt sind (Abb. 30).

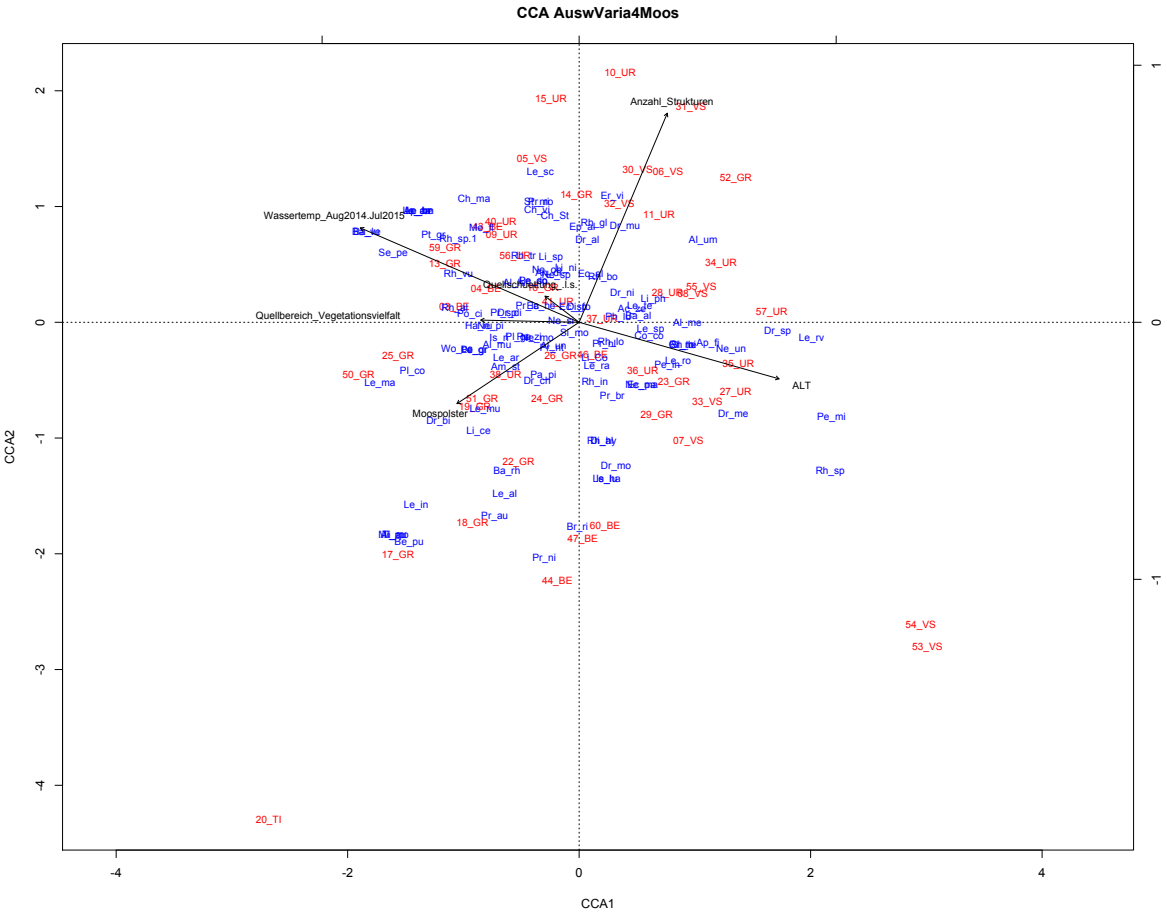


Abb. 30: Kanonische Korrespondenzanalyse (CCA): Triplot der Anzahl EPT-Taxa, der Quellen sowie der Parameter Wassertemperatur, Höhe (ALT), Quellschüttung, Vegetationsvielfalt, Anzahl Strukturen und Deckung der Moospolster (n=49).

In dieser Auswertung wurden in Form der weiteren Vektoren auch Strukturparameter berücksichtigt, welche die Vorkommen der Arten ebenfalls beeinflussen. Sie trennen die Arten, für welche in diesem Fall die Parameter Moospolster und Strukturvielfalt von Bedeutung sind. Die Länge der Vektoren ist proportional zur Bedeutung der zugehörigen Parameter. Die Quellschüttung und die Vegetationsvielfalt im Quellbereich haben demnach nur einen geringen Einfluss auf die Vorkommen der Arten

Ermittlung der Arten mit einer Bindung an extrem kalte Quellen

Aus dieser CCA wurde eine Liste jener Arten zusammengestellt, die sich von der übrigen Fauna durch eine Bevorzugung kalter Gewässer und grosser Höhen auszeichnen. Daraus ergaben sich 13 Plecoptera- und 14 Trichoptera-Arten, von denen 15 (55,6%) eine enge Bindung an Quellen besitzen (Tab. 5). Diese wiederum werden aufgeteilt in drei krenophile (11,5%) und zwölf krenobionte Arten (44,4%). Bei den Plecoptera waren dies eine krenophile und vier krenobionte Arten bei den Trichoptera zwei krenophile und acht krenobionte Arten.

Tab. 5: Plecoptera- und Trichopteraarten, die aufgrund der CCA eine starke Bindung an kalte Gewässer zeigen. *: krenophile Art, **: krenobionte Art. Graue Schrift: Arten mit ≤ 2 Nachweisen.

Plecoptera	Trichoptera
Dictyogenus fontium **	*Acrophylax zerberus*
Isoperla lugens **	*Allogamus mendax/uncatus*
Leuctra ameliae **	*Apatania fimbriata* **
Leuctra dolasilla	*Consorophylax consors* **
Leuctra ravizzai	*Cryptothrix nebulicola* *
Leuctra rosinae	*Drusus alpinus* **
Leuctra rauscheri *	*Drusus melanchaetes* **
Leuctra schmidi	*Drusus monticola* *
Leuctra teriolensis	*Drusus muelleri* **
Nemoura undulata	*Drusus nigrescens* **
Nemoura sinuata **	*Ernodes vicinus* **
Protonemura brevistyla	*Rhyacophila bonaparti* **
Protonemura nimborella	*Rhyacophila glareosa*
	Rhyacophila intermedia

Von sechs Plecoptera- und drei Trichoptera-Arten liegen in der Untersuchung nur ein oder zwei Nachweise vor. Aufgrund der sich daraus ergebenden Unsicherheiten wurden für die weiteren Betrachtungen nur die verbleibenden 18 Arten herangezogen.

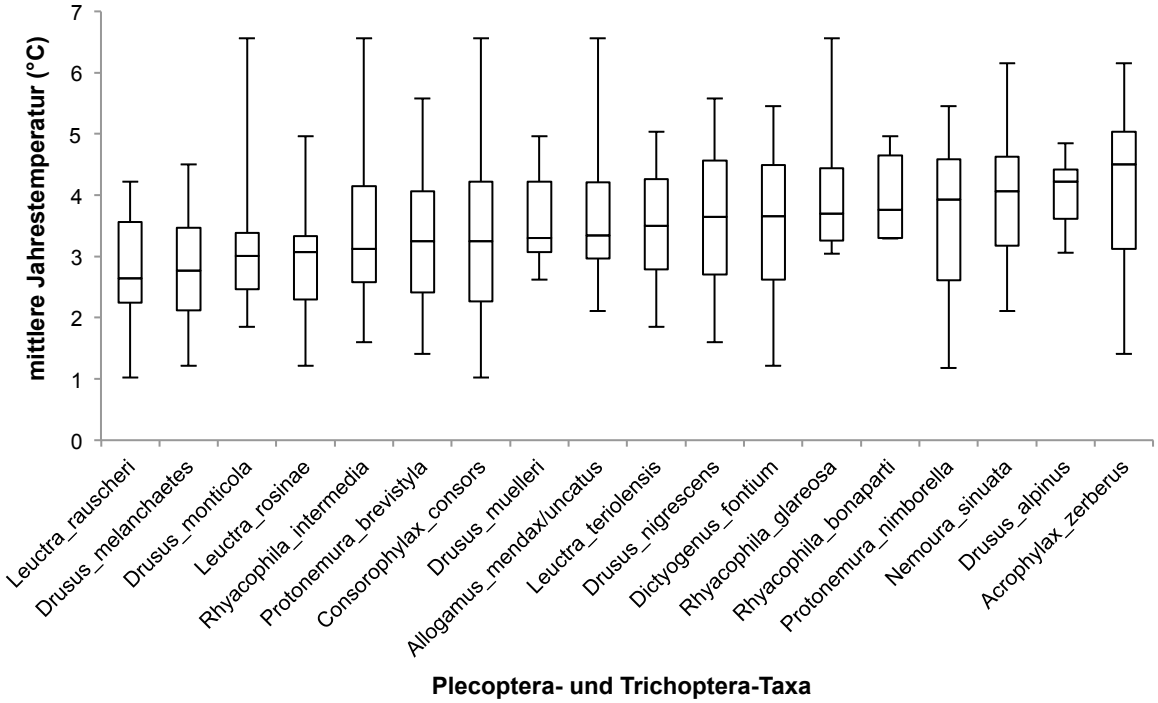


Abb. 31: Boxplots der mittleren Jahrestemperatur in den Quellen mit Vorkommen der an kalte Gewässer angepassten Plecoptera- und Trichoptera-Arten.

In den Quellen mit Vorkommen von Arten, die sich aufgrund der CCA als besonders kaltstenotherm erwiesen haben, wurde die mittlere Jahrestemperatur ermittelt. *Leuctra rauscheri*, *Drusus melanchaetes*. *Drusus monticola* und *Leuctra rosinae* haben die kältesten Quellen besiedelt (< 3.1°C). Bei insgesamt 14 Arten lag der Median der Temperatur unter 4°C bei teilweise beträchtlichen Schwankungen (Abb. 31).

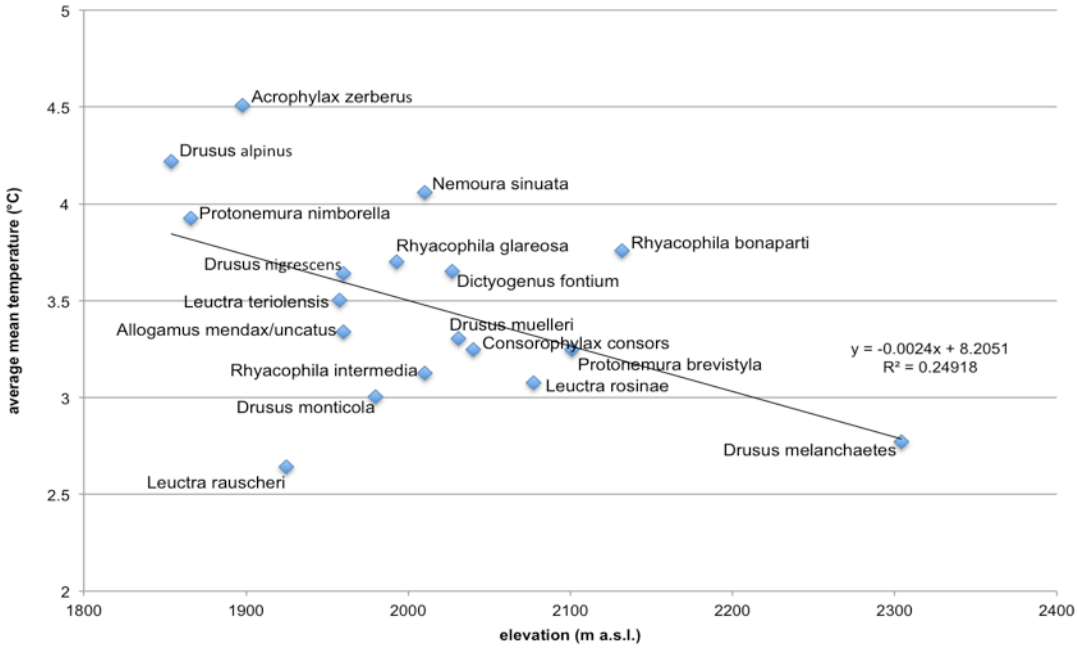


Abb. 32: Mittlere Jahrestemperatur und mittlere Höhe der Arten mit besonderer Bevorzugung von kalten Gewässern.

Da die thermischen Verhältnisse in Quellen stark höhenabhängig sind, wurde die Beziehung zwischen der Mitteltemperaturen und der mittleren Meereshöhe untersucht (Abb. 32). Die im Diagramm nahe der Regressionsgerade und unterhalb davon liegenden vier Plecoptera- und sieben Trichoptera-Arten besitzen eine besonders enge Bindung an kalte Gewässer (Tab. 6). Diese Arten sollen deshalb als hochsensibel in die Gruppe der klimasensiblen Arten aufgenommen.

Tab. 6: Plecoptera- und Trichoptera-Arten mit besonders enger Bindung an kalte Gewässer und Verbreitung in grossen Höhen. *: krenophile Art, **: krenobionte Art.

Plecoptera	**Trichoptera**
Leuctra rosinae	*Allogamus mendax/uncatus*
Leuctra rauscheri *	*Consorophylax consors* **
Leuctra teriolensis	*Drusus melanchaetes* **
Protonemura brevistyla	*Drusus monticola* *
	Drusus muelleri **
	Drusus nigrescens **
	Rhyacophila intermedia

5 Diskussion

Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften

Die Trichoptera mit 48 Arten und die Plecoptera mit 40 Arten besassen einen deutlich höheren Artenreichtum als die Eintagsfliegen (11 Arten). Unter den Letzteren existieren in den Alpen keine typischen Quellbewohner (Ermann, 2002, Maiolini et al., 2011) und die Vorkommen der meisten Arten konzentrieren sich in der Schweiz auf tiefere Lagen (Sartori & Landolt, 1999). In der Regel wurden die Lebensgemeinschaften von kaltstenothermen, resp. krenobionten und krenophilen Arten dominiert, wobei deren Anteil bei den Köcherfliegen am grössten war (Staudacher & Füreder, 2006; Reiss & Chifflard, 2015). Unter den Arten mit starker Quellbindung befanden sich überproportional viele gefährdete Arten mit nationaler Priorität und Alpenendemiten, besonders in Quellen, die höher als 2000 m lagen.

Thermisch wichtige Umweltparameter

Die gegensätzlichen signifikanten Korrelationen von Höhe sowie Temperatur und Distanz zum Permafrost mit dem Artenreichtum bei den Trichoptera und den EPT bestätigt die Bedeutung der Temperatur als Schlüsselfaktor für die Diversität und Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften in Quellen (Myers & Resh, 2002; Barquin & Death, 2011, Staudacher & Füreder, 2007, Ward & Standford, 1982, Wigger et al., 2015). Die über die gesamte Temperaturspanne einheitlichere Artenzahl bei den Plecoptera zeigt, dass diese Ordnung im Unterschied zu den Trichoptera mehr Arten umfasst, die an sehr tiefe Temperaturen angepasst sind, und bestätigt ihre Bevorzugung niedriger ausgeglichener Temperatur (Lubini et al., 2012, Robinson et al., 2010).

Dass die signifikanten Beziehungen auch für die Mitteltemperatur der beiden Halbjahre nachgewiesen wurden, zeigt dass es keine jahreszeitlichen Effekte gibt. Strukturen hatten nur eine untergeordnete Bedeutung für den Artenreichtum, können aber die Zusammensetzung auf Artniveau beeinflussen (Erman, 2002). Zudem zeigt das Fehlen eines signifikanten Zusammenhangs zwischen dem Reichtum krenophiler und krenobionter Arten sowie der Temperatur, dass Quellbewohner nicht in erster Linie kälteangepasste Arten sind, sondern auch andere Faktoren für die Anpassung an Quell-Lebensräume verantwortlich sind. Dieser Befund wird auch durch den unterschiedlichen Artenreichtum in Kluft- und Karstquellen gestützt.

Überraschend war hingegen, dass der signifikant höhere Reichtum krenobionter und krenophiler Arten in Kluftquellen in einer Beziehung steht zu den tieferen Minimaltemperaturen im Winter und mit den starken jahreszeitlichen Temperaturschwankungen im Vergleich mit den Karstquellen. Dies kann als Hinweis dafür gelten, dass die Minimaltemperatur eine wichtigere Rolle bei der Anpassung der Arten an Quell-Lebensräume spielt als die Jahresmitteltemperatur. Die Minimaltemperatur könnte neben der Trübung des Wassers durch Gletschermilch eine wichtige Rolle spielen bei dem von Khamis et al. (2014) beschriebenen Zusammenhang zwischen Mindestanteilen an Gletscherfläche und an Schmelzwasser sowie dem Auftreten kälteangepasster Arten.

Bei den Unterschieden der Anzahl Trichoptera und krenophiler Arten in Quellen verschiedener Exposition dürfte ebenfalls die Temperatur eine zentrale Bedeutung haben, denn die Jahresmitteltemperaturen zeigten ein ähnliches, vermutlich auf Einstrahlung und Dauer der Schneebedeckung zurückzuführendes Muster (Küry et al. 2016).

Auswirkungen des Klimawandels auf die EPT

In Form eines Überblicks ist mit den folgenden Auswirkungen auf die Bestände der EPT in den alpinen zu rechnen.

Durch Arealverschiebungen (Einwanderung wärmetoleranter, resp. Abwanderung oder Aussterben kaltstenothermer Arten) verändert sich die Zusammensetzung der ursprünglichen Lebensgemeinschaft (Dallas & Ross-Gillespie, 2015; Tierno de Figueroa et al., 2010). Es kommt zur Zu-, resp. Abnahme der Artenvielfalt (Brown et al., 2007, Khamis et al., 2014). Zu erwarten sind auch Verluste der genetischen Vielfalt (Balint et al., 2011).

Die neue Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften bringt neue Konkurrenzverhältnisse hervor, welche die Fitness der ansässigen Arten reduzieren können (Alexander et al., 2015). Durch neu zugewanderte Arten kann beispielsweise ein zunehmender Räuberdruck zum Aussterben von Arten führen (Khamis et al., 2014). In der Summe wirkt sich der Klimawandel nicht nur auf die trophische Ebene aus, sondern auf alle biologischen Interaktionen im aquatischen Ökosystem (Yang & Rudolf, 2010). Problematisch ist u.a. der Wegfall von Synchronizität der Abläufe im ökologischen Netzwerk (Walther, 2016). Zusätzliche Stressoren wie Landnutzung können die Klimaerwärmung verschärfen (Piggot et al., 2015), sind aber noch wenig erforscht (Woodward et al., 2010). Nicht zu vergessen sind Auswirkungen auf angrenzende terrestrische Lebensgemeinschaften, die sich von aquatischen Insekten ernähren (Jonsson et al., 2015).

Kleinräumig können Abwanderungen in höhere Lagen oder stärker beschattete Gewässer auftreten (Dohet et al., 2015). Dazu gehört auch die Verkleinerung von Verbreitungsarealen (Bhowmik & Schäfer, 2016; Giersch et al., 2014). In den Alpen wird bei den kaltstenothermen Arten eine Verschiebung nach Norden und Osten prognostiziert (Domisch et al., 2013). Besonders verletzlich sind Arten an der Grenze ihres Verbreitungsareals, die unter suboptimalen Bedingungen leben, sowie seltene Arten und Endemiten (Hering et al., 2009; Hershkovitz et al., 2015, Conti et al., 2014). Zu diesen gehören Plecoptera, deren grösste Diversität in den Alpen liegt. In der Schweiz sind dies *Leuctra sesvenna, Leuctra ameliae, Nemoura sinuata, Perlodes jurassicus* (Tierno de Figueroa et al., 2010). Erste Beobachtungen zur Verschiebung von Arten in höhere Lagen wurden im Schweizer Nationalpark dokumentiert (Knispel & Lubini, 2015). Bei den Trichoptera umfasst die Gruppe besonders verletzlicher Arten die Unterfamilien Drusinae mit ebenfalls einem hohen Anteil an Endemiten (Waringer et al. 2010).
Indirekte Auswirkungen erfolgen über Veränderungen der Niederschlagsverhältnisse (Beniston, 2005; Brown et al., 2007) und betreffen deren Intensität, Frequenz, jahreszeitliche Verteilung sowie die Dauer und das Ausmass der Schneebedeckung. Als Folge wird auch von einer Veränderung der Frequenz und Intensität der Abflüsse, einer Veränderungen in der Wasserqualität aufgrund des Verhältnisses zwischen Gletscherwasser zu Niederschlagswasser ausgegangen. Diese beeinflussen wiederum die Bettstrukturen und Strömungsverhältnisse in den Fliessgewässern. Eine mögliche Folge für Quellen ist das Trockenfallen von Quellen, was in der Regel zu einer Reduktion des Artenreichtums im Vergleich mit permanent schüttenden Quellen führt (Erman & Erman, 1995).

Kälteangepasste Arten in alpinen Quellen und Bewertung von deren Verletzlichkeit

Die mittels CCA aufgetrennten Arten hoch gelegener und kalter Quellen stimmen mit den speziell klimaverletzlichen Arten bei Conti et al. (2014) und Hershkovitz et al. (2015) überein. Unsere Felduntersuchungen bestätigen damit die von diesen Studien aufgrund der ökologischen Charakteristika (traits) ermittelten Arten. Die Quellen waren nicht nur von kaltstenothermen Arten besiedelt, sondern auch von kälteangepassten Arten mit Habitatschwerpunkt in den Bachoberläufen (Cantonati et al., 2006; Dallas & Ross-Gillespie, 2015).

Die stark kälteangepassten Arten wie *Drusus melanchaetes* sind bekannt als typische Bewohner kalter, quellbeeinflusster Fliessgewässer (Füreder et al., 2001; Füreder et al., 2005; Graf et al. 2005). In den untersuchten Quellen scheint die Temperatur die Gemeinschaft der Arten am stärksten zu prägen (Myers & Resh, 2002; Barquin & Death, 2011; Cantonati et al. 2006; Staudacher & Füreder, 2007; Wigger et al, 2015). Die Gruppe der kälteangepassten Arten besteht sowohl aus krenobionten/krenophilen als auch aus epirhithralen Arten. Dies in Umkehrung der Tatsache, dass Kaltstenothermie nicht der einzige Faktor ist, der die Quellbindung einer Art bestimmt (Fischer, 1996; Cantonati et al., 2006). Das zeigt, dass die Kälteanpassung nicht alleine die Eigenschaft von Quellspezialisten ist, sondern auch von Arten der Bachoberläufe entwickelt wurde. Offen bleibt dabei die Frage, ob die Arten höhere Temperaturen aus physiologischen Gründen nicht ertragen oder ob die Änderung der Zusammensetzung der Gemeinschaft sowie weitere Umweltfaktoren für das Fehlen in wärmeren Gewässerbereichen verantwortlich sind.

Die unterhalb der Regressionsgerade Jahresmitteltemperatur – Höhe liegenden Arten können als besonders gut an kalte Verhältnisse angepasst gelten. In dieser Gruppe befinden sich mit *Leuctra*

rosinae, L. rauscheri, L. teriolensis und *Protonemura brevistyla* vier Plecoptera- sowie mit *Allogamus mendax/uncatus, Consororphlyax consors, Drusus melanchaetes, D. monticola, D. muelleri*, *D. nigrescens,* und *Rhyacophila intermedia* sieben Trichoptera-Arten.

6 Climate Change-Index Bewertung der Verletzlichkeit von Quell-Lebensgemeinschaften

Ermittlung verletzlicher EPT

Von den aufgrund der Korrelation mit der Jahresmitteltemperatur abgetrennten 27 Taxa wurden 15 Arten (55,6%) von Conti et al. (2014), auf der Basis ökologischer Einstufungen (www.freshwaterecology.info) als verletzlich gegenüber dem Klimawandel bezeichnet. Aufgrund des «climate change vulnerability scores» (CCVS) von Hershkovitz et al. (2015) wurden 14 Arten (51,9%) als stark verletzlich (CCVS ≥4) und insgesamt 22 Arten (81,5%) als mässig bis stark verletzlich (CCVS ≥3) eingestuft. In der vorliegenden Studie wurden 10 stark kälteangepasste Arten (37%) ermittelt, die weder bei Conti et al. (2014) noch aufgrund des CCVS als verletzlich gegenüber Klimaveränderungen gelten. Das Fehlen dieser Arten ist auf die starke Gewichtung des Endemismus bei Conti et al. (2014) zurückzuführen. Insgesamt gelten 68% der in dieser Arbeit als verletzlich taxierten schweizerischen Arten als endemisch für den Alpenraum.

Endemismus gilt zusammen mit den folgenden Eigenschaften und Präferenzen der Arten als sehr wichtig für die Beeinträchtigung von Beständen als Folge des Klimawandels (Hering et al. 2009, Conti et al. 2014, Hershkovitz et al. 2015): Bevorzugung von Quellen und Bachoberläufen, Anpassung an hohe Lage, Anpassung an kaltstenotherme Verhältnisse, kurze Emergenzperiode/langer Lebenszyklus und schmale ökologische Nische.

Von den 63 Arten mit CCVS ≥3 waren 31 in der Schweiz vorkommende Arten (49,2%) nicht unter den Kälte bevorzugenden Taxa in den untersuchten Quellen.

Zur Ermittlung eines geeigneten Ansatzes zur Bezeichnung von Arten die sensitiv auf Klimaveränderungen reagieren, wurden die eigenen Untersuchungen mit den Ansätzen auf der Basis der ökologischen Eigenschaften (ecological traits; Conti et al, 2014, Hershkovitz et al. 2015) verglichen (Tab. 7). Bei allen Ansätzen sind ausschliesslich kaltstenotherme Arten (Präferenzen <10°C; Buffagni et al. 2009, Graf et al. 2008, Graf et al. 2009) berücksichtigt. Der Anteil endemischer Arten variierte hingegen stark mit 67,9% bei Conti et al. (2014) resp. 65% beim CCVS≥4 (Hershkovitz et al. 2015) und 44,4% in der vorliegenden Studie. Der Ansatz von Conti et al. (2014) berücksichtigte am wenigsten Arten mit langer Emergenzperiode und mit einer starken Quellbindung. Zusammenfassend besitzen die drei Ansätze bei jeweils drei oder vier ökologischen Eigenschaften einen Artenanteil von mehr als 50%.

Der Anteil der Arten mit langer Emergenzperiode war klein bei den Ansätzen mit ecological traits (3,6% und 15,0%), während er bei der 2014 / 2015 untersuchten Quellen mit 26,9% den höchsten Wert erreichte.

Tab. 7: Vergleich des Anteils klimaverletzlicher Arten mit relevanten Eigenschaften bei Conti et al. (2014) und Hershkovitz et al. (2015) mit den kälteangepassten Arten der vorliegenden Untersuchung (Q-KI 2014/2015).

Parameter	Q-KI 2014/2015 (vorliegende Studie)	Conti et al. 2014 verletzlich	Hershkovitz et al. 2015 CCVS ≥4	Hershkovitz et al. 2015 CCVS≥3
Anzahl Taxa	27	28	20	63
Endemismus	44,4%	67,9%	65,0%	39,7%
<10°C	100%	100%	100%	100%
Zonation krenobiont/-phil	44,4%/14,8%	39,3%/7,1%	55,0%/20,0%	38,1%/14,3%
Krenobiont & krenophil	59,2%	46,4%	75,0%	52,4%
Höhe	80,8%	76,9%	80,0%	56,1%
kurze Emergenz	74,1%	96,4%	85,0%	77,6%

Generell zeigt dieser Vergleich eine gute Übereinstimmung der Ansätze auf der Basis der ökologischen Eigenschaften mit der effektiv in kalten Quellen vorkommenden Gemeinschaft der Eintagsfliegen, Steinfliegen und Köcherfliegen.

Konzeption und Berechnung des Climate Change-Indexes

Um eine Bewertung der EPT-Lebensgemeinschaften in Quellen der alpinen und subalpinen Stufe vorzunehmen, wurde ein neuer, an schweizerische Verhältnisse angepasster Climate Change Verletzlichkeits-Index (CCVI) konzipiert und errechnet sich aus den spezifischen Climate Change-Verletzlichkeits-Werten (CCVW). Diese widerspiegeln die Verletzlichkeit der Arten gegenüber dem Klimawandel und beruht auf einer gewichteten Auswahl der ökologischen Eigenschaften aus der europäischen Datenbank (www.freshwaterecology.info). Der CCVI wird bei der Erhebung der Lebensgemeinschaft der EPT in Ergänzung zu Parametern wie Rote Listen (Lubini et al. 2012) und National Prioritäre Arten (BAFU, 2011) zur Beurteilung der Verletzlichkeit der Quell-Lebensräume gegenüber dem Klimawandel herangezogen.

• Gewichtete Teilparameter und Berechnung des artspezifischen CCV-Werts (CCVW)

T Thermischer Faktor (www.freshwaterecology.info) maximaler Wert: 4	
Kaltstenotherm	1
Warmstenotherm / eurytherm	0
H Höhenfaktor (www.freshwaterecology.info) maximaler Wert: 6	
Median der Höhenverbreitung > 1500 m (sal/alp)	2
Median der Höhenverbreitung 800 – < 1500 m (mon)	1
Median der Höhenverbreitung < 800 m (col)	0
E Endemismus (www.freshwaterecology.info) maximaler Wert: 2	
Endemismus Alpen / Jura	1
Nicht endemisch	0
Q Quellbindung (eigene Einstufung BAFU-Methode) maximaler Wert: 4	
Quellbindung ÖWZ 16	2
Quellbindung ÖWZ 8	1
Quellbindung ÖWZ ≤4	0
Em Emergenzperiode (www.freshwaterecology.info) maximaler Wert 1	
Kurze Emergenzperiode	1
Lange Emergenzperiode	0

Formel zur Berechnung des spezifischen CCS-Werts:

[(4 x T) + (3 x H) + (2 x E) +(2 x Q) + (1 x Em)] / 5

Der spezifische Climate Change-Verletzlichkeits-Wert (CCVW) jeder Art besteht aus fünf Teilparametern und berücksichtigt damit die aktuell wichtigsten, bekannten Einflüsse des Klimawandels auf die EPT: Der thermische Faktor ist eine zentrale Grösse und unterscheidet die beiden Klassen kaltste-

notherm und warmstenotherm/eurytherm. Da sich die Anpassung an grosse Höhen bei allen Ansätzen als wichtigster Parameter herausgestellt hat, wird er für die Einstufung der Arten ebenfalls stark gewichtet. Der Endemismus und die Bindung an Quell-Lebensräume erhalten jeweils eine mittlere Gewichtung, während der Dauer der Emergenzperiode die schwächste Bedeutung zugemessen wird.

• Klassifikation der Arten aufgrund ihrer Verletzlichkeit durch den Klimawandel

Die Berechnung ergibt einen spezifischen CCV-Wert, mit dem sich die Arten einer der fünf Klassen zuordnen lassen. Diese Klassen bezeichnen hochverletzliche, verletzliche, mässig verletzliche, schwach verletzliche und unverletzliche Arten (Tab. 8).

Die Arten, die im Rahmen dieser Studie in 61 Quellen der Schweizer Zentralalpen nachgewiesen wurden, sowie die bei Conti et al. (2014) sowie Hershkovitz et al. (2015) als verletzlich aufgeführten Arten mit Vorkommen in der Schweiz wurden zum grössten Teil in die Klassen verletzlich (CCVW-4; 29,4%) und mässig verletzlich (CCVW-3; 25,4%) eingestuft. Insgesamt 17 Arten (13,5%) waren hoch verletzlich (CCVW-5) und 13 Arten (10,3%) gering verletzlich (CCVW-2).

Tab. 8: Zuordnung der artspezifischen CCV-Werte zu den Klassen (CCVW-5 bis CCVW-1). In der Spalte «Anzahl Arten» ist die Einstufung der 126 Arten aufgeführt, die in der vorliegenden Studie nachgewiesen wurden und in den Arbeiten von Conti et al. (2014) und Hershkovitz et al. (2015) als verletzlich aufgeführt sind.

Klasse CCV-Wert	CCS-Wert	Bezeichnung	Anzahl Arten
CCVW-5	> 2,70	hochverletzlich	17
CCVW-4	2,11–2,70	verletzlich	37
CCVW-3	1,51–2,10	mässig verletzlich	32
CCVW-2	1,00–1,50	gering verletzlich	13
CCVW-1	< 1,00	unverletzlich	27

• Berechnung des CCV-Index für Quell-Lebensräume

Die Berechnung des CCV-Indexes (CCVI) für einen Quell-Lebensraum erfolgt analog der Bewertung von Gewässerqualitäts-Indices und ist die Summe des Produkts aus Häufigkeitsklasse und dem spezifischen CCS-Wert dividiert durch die Anzahl Arten.

$$\text{CCV-Index (CCVI)} = \frac{\sum \text{Häufigkeitsklasse} * \text{CCV-Wert (CCVW)}}{\text{Anzahl Arten}}$$

Die Häufigkeitsklassen sind die gleichen wie bei der BAFU Methode (Lubini et al. 2014)

Häufigkeitsklasse	Anzahl Tiere pro Probe	
1	1 – 2	Individuen
2	2 – 6	Individuen
3	7 – 15	Individuen
4	16 – 50	Individuen
5	> 50	Individuen

Der grösste Teil der intersuchten Quell-Lebensräume erwiesen sich als verletzlich (32,8%) und mässig verletzlich (37,7%) gegenüber dem Klimawandel. Fünf Quell-Lebensräume waren von ausserordentlich vielen Arten mit einer Präferenz für tiefe Temperaturen besiedelt und wurden deshalb als hoch verletzlich eingestuft (Tab. 9).

Tab. 9: Zuordnung der CCV-Indices zu den Klassen (CCVI-5 bis CCVI-1) der 61 Quellen aus der vorliegenden Studie zu den verschiedenen Klassen des CCV-Indexes.

Klasse CCV-Index	CCV-Index	Bezeichnung	Anzahl Quell-Lebensräume
CCVI-5	> 2,70	hochverletzlich	5
CCVI-4	2,11–2,70	verletzlich	20
CCVI-3	1,51–2,10	mässig verletzlich	23
CCVI-2	1,00–1,50	gering verletzlich	13
CCVI-1	< 1,00	unverletzlich	0

7 Schlussfolgerungen, Ausblick

Veränderung der Temperaturen in alpinen Quellen

In Quellen der subalpinen und alpinen Stufe sind als Folge des Klimawandels starke Veränderungen zur erwarten. Die Wassertemperatur wird als Folge der Erhöhung der Lufttemperatur und als Konsequenz des Schmelzens von Permafrost erhöht. Die Exposition und die Sonneneinstrahlung beeinflussen ebenfalls den thermischen Wasserhaushaushalt. Weniger Niederschlag im Sommer und mehr Niederschlag im Winter können unter Umständen ebenfalls die Wassertemperatur in Quellen beeinflussen. Fällt mehr Niederschlag als Schnee und bleibt dieser länger liegen, kühlt dies das Quellwasser aufgrund der verlängerten Schneeschmelze ab. Fällt hingegen auch im Winter mehr und öfter Regen kann dies die Schneeschmelze beschleunigen. Obwohl das Ausmass der Temperaturerhöhung im Quellwasser durch die Versickerung und die Fliesstrecke im Untergrund etwas gepuffert wird ist von deutlichen Temperaturerhöhungen auszugehen.

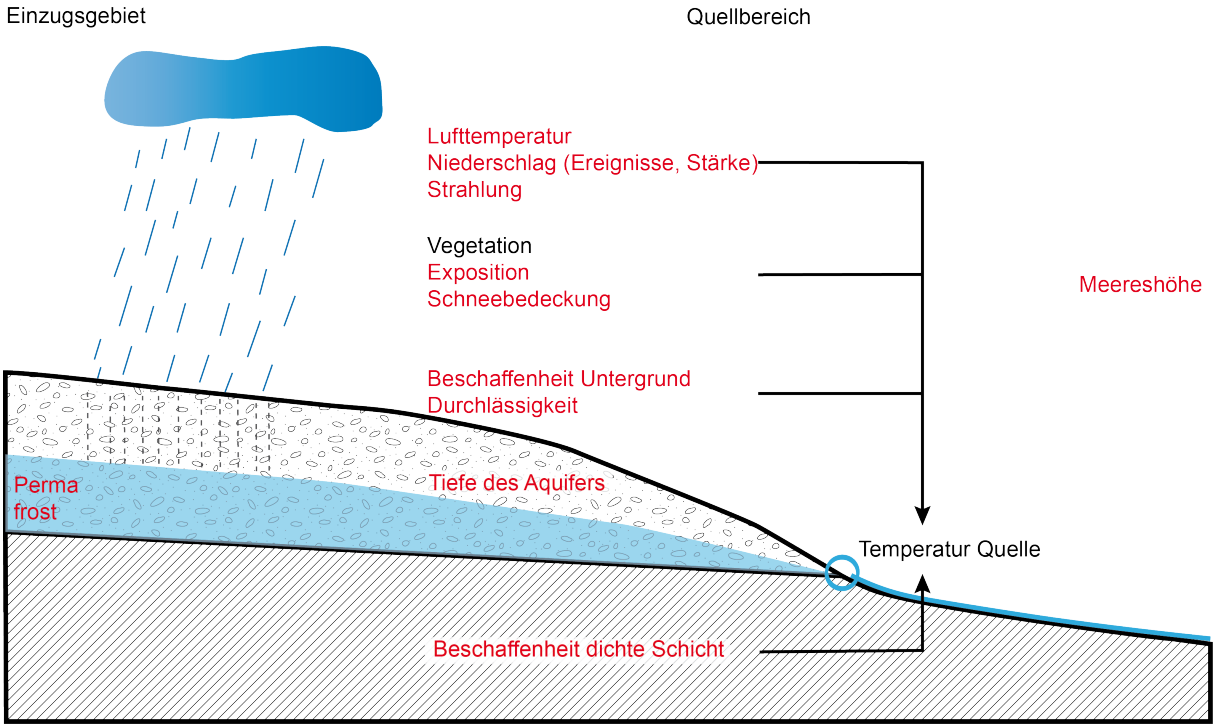


Abb. 33: Faktoren, welche die Temperatur in alpinen Quellen beeinflussen. Rot sind die Parameter dargestellt, denen eine grosse Bedeutung zukommt. Die Vegetation spielt für die Temperatur in alpinen Quellen nur eine untergeordnete Rolle.

Climate Change Verletzlichkeits-Index – Verletzlichkeit der Lebensgemeinschaften

Im Zusammenhang mit den Klimaveränderungen ist es wichtig nicht nur das Ausmass der Prozesse selbst einzuschätzen, sondern auch deren Auswirkungen auf die Lebensgemeinschaften. Die Verbreitung der Eintagsfliegen, Steinfliegen und Köcherfliegen (EPT) ist in der Schweiz recht gut untersucht. Die auch ökologisch gut erforschten EPT übernehmen bereits wichtige Indikatorfunktionen im Natur- und im Gewässerschutz. Deshalb bietet sich an, diese auch für einen Einsatz im Zusammenhang mit dem Klimawandel einzusetzen.

Die weitgehende Übereinstimmung der kälteangepassten Arten beim Vergleich der vorliegenden Untersuchungen mit den Artenlisten, die auf der Basis der ökologischen Eigenschaften (ecological traits) der Arten ermittelt worden sind, ermöglichte die Konzeption eines Climate Change Veretzlichkeits (CCV)-Indexes, der die Verletzlichkeit der Arten gegenüber dem Klimawandel abbildet.

Anwendung des CCV-Indexes in der Praxis

Der CCV-Index (CCVI) soll in den nächsten Jahren vor allem im Zusammenhang mit angewandten Fragestellungen in Quellen und allenfalls Bachoberläufen getestet werden. Mit seinem Einsatz steht ein Instrument zur Verfügung das in Ergänzung der Roten Listen und der Liste der National Prioritären Arten eingesetzt werden kann, wenn ökologische Auswirkungen von Bauprojekten bewertet oder Ziel- und Leitarten im Rahmen von Aufwertungs- und Förderungsmassnahmen definiert werden.

Es wird vorgeschlagen, zuerst eine Anwendungsphase von rund drei Jahren durchzuführen. Im Rahmen von Gutachten zu Projekten Im Zusammenhang mit Quellfassungen oder bei der Erfassung und Aufwertung der ökologischen Infrastruktur in den Naturpärken sollen die Anwendbarkeit, der Nutzen und die Präzision des Indexes geprüft werden.
In einer zweiten Phase soll der Index falls notwendig angepasst werden. Dabei ist zu prüfen, ob eine rechnerische Anpassung notwendig ist, die Gewichtung geändert werden muss oder allenfalls die Wertespannen zur Einstufung in die Verletzlichkeitsklassen verändert werden müssen.

CCV-Index auch für tiefer gelegene Gewässer

Auch in tiefer gelegenen Gewässern ist der Einfluss des Klimawandels auf die aquatische Lebensgemeinschaft bereits deutlich erkennbar. In einem Anschlussprojekt sollen deshalb die CCV-Werte für alle Arten der EPT errechnet werden. Dazu muss geprüft werden, ob und wie der CCV-Wert und folglich der CCV-Index hinsichtlich einer Anwendung in Gewässern tieferer Lagen angepasst werden muss. Das Ziel besteht einerseits darin wie bei den Roten Listen für alle EPT-Arten eine Einstufung der Klima-Verletzlichkeit zu erreichen und andererseits mit dem CCV-Index die Verletzlichkeit der Quell-Lebensräume zu bewerten.

8 Literatur

Alexander, J.M., J.M. Dies & J.M. Levine, 2015. Novel competitors shape species' responses to climate change. Nature. Research Letter. 1-5.

BAFU, 2011. Liste der National Prioriären Arten. Anrten mit nationaler Priorität für die Erhaltung und Förderung, Stand 2010. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1103. 132 S.

Balint, M., S. Domisch, C.H.M. Engelhardt, P. Haase, S. Lehrian, J. Sauer, K. Theissinger, S.U., Pauls & C. Nowak, 2011. Cryptic biodiversity loss linked to global climate change. nature climate change 1: 313-318.

Barquin, J. & R. G. Death, 2011. Downstream changes in spring-fed stream invertebrate communities: the effect of increased temperature range? J. Limnol 70 (Suppl 1): 134-146.

Benderitter, Y., B. Roy & A. Tabbagh, 1993. Flow characterization through heat transfer evidence in a carbonate fractured medium: First approach. Water resources research 29 (11): 3741–3947.

Beniston, M., 2005. Mountain Climates and Climatic Change: an Overview of Processes Focusing on the European Alps. Pure and Applied Geophysics 162 (8-9): 1587-1606.

Beniston, M., 2006. Mountain weather and climate: A general overview and a focus on climatic change in the Alps. Hydrobiologia 562: 3–16.

Bhowmik, A.K. & R.B. Schäfer, 2016. Large Scale Relationship between Aquatic Insect Traits and Climate. PLOs one 10 (6): e0130025

Blanc, P. & B. Schädler, 2013. Das Wasser in der Schweiz – ein Überblick. Schweizerische Hydrologische Kommission, Berne.

Brittain, J. 1991. Life history characteristics as a determinant of the response of mayflies and stoneflies to man-made environmental disturbance (Ephemeroptera, and Plecotera). 1991. In: Alba_Tercodor J. & Sanchez-Ortega A. 1991. Overview and strategies of Ephemeroptera and Plecoptera. S. 539-546. Sandhill Crane Press Gainsville, Florida U.S.A.

Brittain, J.E., 2008. Mayflies, Biodiversity and Climate Change. In: Hauer F.R., J.A, Stanford & R.L. Newell (eds.) International Advances in the Ecology, Zoogeography, and Systematics of Mayflies and Stoneflies. S. 1- 14. University of California Press Berkeley, Los Angeles, London.

Brittain, J.E. & S.J. Saltveit, 1989. A Review of the effect of river regulation on mayflies (Ephemeroptera). Regulated Rivers: Research & Management, Vol. 3: 191-204

Brown L.E., D.M. Hannah & A.M. Milner 2007. Vulnerability of alpine stream biodiversity to shrinking glaciers and snowpaks. Global Change Biology. 13: 958-966.

Brown L.E., R. Céréghino & A. Compin, 2009. Endemic freshwater invertebrates from southern France: DIversity, distribution and conservation implications. Biological Conservation 142:2613-2619.

Burgherr, P., J. V. Ward & C. T. Robinson, 2002. Seasonal variation in zoobenthos across habitat gradients in an alpine glacial floodplain (Val Roseg, Swiss Alps). Journal of the North American Benthological Society 21: 561–575

Byers, H., 1994. General Meteorology. McGraw-Hill, New York.

Caissie, D., 2006. The thermal regime of rivers: a review. Freshwater Ecology 51: 1389–1406.

Cantonati, M., R. Gerecke & E. Bertuzzi, 2006. Springs of the Alps - sensitive ecosystems to environmental change: from biodiversity assessments to long-term studies. Hydrobiologia 562: 59–96.

Cantonati, M., E. Bertuzzi & D. Spitale, 2007. The spring habitat: biota and sampling methods. Monografie del Museo Tridentino di Scienze Naturali, Vol. 4. Trento.

CH2014-Impacts, 2014. Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland, published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern.

Conti, L., A. Schmidt-Kloiber, G. Grenouillet & W. Graf, 2014. A trait-based approach to assess the vulnerability of European acquatic insects to climate change. Hydrobiologia 721: 297-315.

Dallas, HF. & V. Ross-Gillespie, 2015. Sublethal effects of temperature on freshwater organisms, with special reference to aquatic insects. Water SA 41 (5): 712-726

Delaloye, R., C. Lambiel, I. Gärtner-Roer, 2010. Overview of rock glacier kinematics research in the Swiss Alps – Seasonal rhythm, interannual variations and trends over several decades. Geographica Helvetica 65: 135–145.

Dohet, A., D. Hlubikova, C.E. Wetzel, L. L'Hoste, J.F. Iffly, L. Hofmann & L. Ector, 2015. Influence of thermal regime and land use on benthic invertebrate communities inhabiting headwater streams exposed to contrasted shading. Science of the Total Environment 505: 1112-1126

Domisch, S., M.B. Araujo, N. Bonada, S.U. Pauls, S.C., Jähnig & P. Haase, 2013. Modelling distribution in European stream macroinvertebrates under future climates. Global Change Biology 19: 752-762

EEA European Environment Agency, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. An indicator based report. EEA, Copenhagen.

EDI, 2014. Verordnung des EDI über Trink-, Quell- und Mineralwasser. Eidgenössische Gesetzessammlung, Nr. 817.022.102. Bern.

Elliott, J.M., 1987. Life cycle and growth of *Leuctra geniculate* (Stephens) (Plecoptera: Leuctridae) in the river Leven. Entomol. Gazette 38: 129-136.

Erman, N.A., 2002. Lessons from a Long-term Study of Springs and Spring Invertebrates (Sierra Nevad, California, U.S.A.) and Implications for Conservation and Management. Conference proceedings. Spring-fed Wetlands: Important Scientific and cultural Resources of the Intermountain Region.

Erman, N.A. & D.C Erman, 1995. Spring Permancence, Trichoptera Species Richness, and the Role of Drought. Journal of the Kansas entomological Society 68 (2) suppl. 50-64.

Everall, N. C., M. F. Johnson, R. L. Wilby & C. J. Bennett, 2015. Detecting phenology change in the mayfly *Ephemera danica*: Responses to spatial and temporal water temperature variations. Ecological Entomology 40: 95–105.

Figura, S., D.M. Livingstone, E. Hoehn & R. Kipfer, 2013. Klima und Wasser – Rückblicke und Vorhersagen von Temperatur und Sauerstoff mittels historischer Aufzeichnungen. Aqua & Gas 7/8: 28–33.

Fischer, J., 1996. Bewertungsverfahren zur Quellfauna. Crunoecia 5: 227-240

Frutiger, A. & A. Imhof, 1997. Life cycle of Dinocras cephalotes and *Perla grandis* (Plecoptera: Perlidae) in different temperature regimes. In: Landolt, P. & M. Sartori (eds.) Ephemeroptera & Plecoptera. Biology- Ecology-Systematics: 34-43. Mauron+Tinguely & Lachat SA, Fribourg.

Füreder L., C. Schütz, M. Wallinger & R. Burger, 2001. Physico-chemistry and aquatic insects of a glacier-fed and a sring-fed alpine stream. Freshwater Biology 46: 1673-1690.

Füreder L., M. Wallinger & R. Burger, 2005. Longitudinal and seasonal pattern of insect emergence in alpine streams Aquatic Ecology 39: 67-78.

Geiger, S. T., J. M. Daniels, S. N. Miller & J. W. Nicholas, 2014. Influence of rock glaciers on stream hydrology in the La Sal Mountains, Utah. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 46: 645–658.

Gerecke, R., M. Cantonati, D. Spatiale, E. Stur & S. Wiedenburg, 2011. The challenge of long-term ecological research in springs in the northern and southern Alps: indicator groups, habitat diversity, and medium-term change. Journal of Limnology 70 (Suppl. 1): 168–187.

Giersch, J.J., S. Jordan, G. Luikart, L.A., Jones, F.R., Hauer & C.C. Muhfeld, 2014. Climate-induced range contraction of a rare alpine aquatic invertebrate. Freshwater Science: 34(1): 53-65.

Graf, W., V. Lubini & U.S. Pauls, 2005. Larval description of *Drusus muelleri* McLachlan, 1868 (Trichoptera: Limnephilidae) with some notes on its ecology and systematic position within the genus Drusus. Ann. Limnol. Int. J. Limn. 41 (2): 93-98.

Gonseth, Y, T. Wohlgemuth, B. Sansonnens & A. Butler, 2001. Die biogeographischen Regionen der Schweiz. Erläuterungen und Einteilungsstandard. Umwelt Materialien Nr. 137 Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft Bern. 48 Seiten.

Haberkorn, A., M. Hoelzle, M. Phillips & R. Kenner, 2015. Snow as a driving factor of rock surface temperatures in steep rough rock walls. Cold Regions Science and Technology 118: 64–75.

Haemmig, C. & S. Strasky, 2003. Quartär- und Hydrogeologie in der Val Chaschauna (GR) – eine GIS und DGPS gestützte Datenaufnahme. Diploma Thesis, University Berne.

Hari, R. E., D. M. Livingstone, R. Siber, P. Burkhardt-Holm, & H. Guttinger, 2006. Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. Global Change Biology 12: 10–26.

Harper, M.P. & B.L. Pecharsky, 2006. Emergence cues of a mayfly in a high-altitude stream ecosystem: potential response to climate change. Ecological Applications 16 (2): 612-621

Haseke, H. & E. Pröll, 2006. Das Berchtesgadener Quellwasser und seine Herkunft. Geologische, physikalisch-chemische und mikrobiologische Parameter. In Gerecke, R.& H. Franz (eds), Quellen im Nationalpark Berchtesgaden. Lebensgemeinschaften als Indikatoren des Klimawandels. Nationalpark Berchtesgaden, Forschungsbericht 51: 39–70.

Hering, D., A. Schmidt-Kloiber, J. Murphy, S. Lücke, C. Zamora-Munoz, M.J. Lopez-Rodriguez, T. Huber & W. Graf, 2009. Potential impact of climate change on aquatic insects: A sensitivity analysis for European caddisflies (Trichoptera) based on distribution patterns and ecological preferences. Aquatic Sciences 71: 3-14.

Hershkovitz, Y., V. Dahm, A. W. Lorenz & D. Hering, 2015. A multi-trait approach for the identification and protection of Euopean freshwater species that are potentially vulnerabel to the impacts of climate change. Ecological Indicators: 50: 150-160.

Jonsson, M., R. Hedström, K. Stenroth, E. R. Hotchkiss, F.R. Vasconcelos, J.Karlsson & P. Byström, 2015. Climate change modifies the size structure of assemblages of emerging aquatic insects. Freshwater Biology 60: 78-88.

Khamis, K., D. M. Hannah, L.E. Brown, R. Tiberti & A. M. Milner, 2014. The use of invertebrates as indicators of enviromental change in alpine rivers and lakes. Science oft he Total Environment 493: 1242-1254.

Knispel, S. & V. Lubini, 2015. Assessing the stability of stonefly (Plecoptera) biodiversity in the Swiss National Park. Mitt Schweiz Ent. Ges. 88: 257-271.

Knispel, S., M. Sartori. & J. E. Brittain, 2006. Egg development in the mayflies of a Swiss glacial floodplain. Journal of the North American Benthological Society 25: 430–443.

Krainer, K., 2015a. Blockgletscher: Einführung. In Schallhart, N. & B. Erschbamer (eds), 2015, Forschung am Blockgletscher: Methoden und Ergebnisse, Innsbruck University Press, Alpine Forschungsstelle (Obergurgl): Series, 4: 9–32.

Krainer, K., 2015b. Der aktive Blockgletscher im Äusseren Hochebenkar. In Schallhart, N. & B. Erschbamer (eds), 2015, Forschung am Blockgletscher: Methoden und Ergebnisse, Innsbruck University Press, Alpine Forschungsstelle (Obergurgl): Series, 4: 55–75.

Küry, D., V. Lubini, & P. Stucki, 2016. Temperature patterns and factors governing thermal response in high elevation springs oft he Swiss Central Alps. Hydrobiologia DOI 10.1007/s10750-016-2918-0

Lillehammer, A., 1985. Temperature influence on egg incubation period and nymphal growth of the stoneflies *Leuctra digitata* and *L. fusca* (Plecoptera: Leuctridae). Entomol. Gen. 11: 059-067.

Lillehammer, A., J.E. Brittain, S.J. Saltveit, P.S. Nielsen, 1989. Egg development, nymphal growth and life cycle strategies in Plecoptera. Holarctic Ecology 12: 173-186.

Lubini, V., S. Knispel, M. Sartori, H. Vicentini & A. Wagner, 2012. Rote Listen Eintagsfliegen, Steinfliegen, Köcherfliegen. Gefährdete Arten der Schweiz, Stand 2010. Bundesamt für Umwelt, Bern, und Schweizer Zentrum für die Kartographie der Fauna, Neuenburg. Umwelt-Vollzug Nr. 1212: 111 S.

Lubini, V., P. Stucki, H. Vicentini & D. Küry, 2014. Bewertung von Quell-Lebensräumen in der Schweiz. Entwurf für ein strukturelles und faunistisches Verfahren. Report for Federal Office for Environnment FOE, Berne.

Luhmann, A. J., M. D. Covington, A. J. Peters, S. C. Alexander, C. T. Anger, J. A. Green, A. C. Runkel & E. C. Alexander Jr., 2011. Classification of thermal patterns at karst springs and cave streams. Groundwater 49: 324–335.

Maiolini, B., M. Carolli, & L.Silveri, 2011. Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera in springs in trentino (south-eastern alps). J. Limnol. 70 (Suppl 1): 122-133.

Manga, M. & J. W. Kirchner, 2004. Interpreting the temperature of water at cold springs and the importance of gravitational potential energy. Water resources research 40, W05110, doi:10.1029/2003WR002905.

Margreth, A., 2004. Quartärgeologische Untersuchungen im Unterengadin, GR. Geologische Kartierung Val Tavrü, Lockergesteinsprofile Val S-charl, Quellenhydrologie, Diamikte bei Champatsch (Scuol). Diploma Thesis, ETH Zürich.

Markarian, R.K., 1980. A study of the ralationship between aquatic insect growth and water temperature in a small stream. Hydrobiologia 75: 91-95

Martin, P., R. Gerecke & M. Cantonati, 2015. Quellen. In Brendelberger, H., Martin, P., Brunke, M. & Hahn H. J. (eds), Grundwassergeprägte Lebensräume - Eine Übersicht über Grundwasser, Quellen, das hyporheische Interstitial und weitere Habitate. Limnologie aktuell 14: 49–132.

Milner, A. M., J. E. Brittain, L. E. Brown & d. M. Hannah, 2010. Water sources and habitat of alpine streams. In Bundi U. (ed), Alpine waters. The handbook of environmental chemistry, Vol. 6. Springer-Verlag, Heidelberg: 175–192.

Muhfeld, C.C., J.J. Giersch, R.R. Hauer, G. T. Pederson, G. Luikart, D.P. Peterson, C.C. Downs & D.B. Fagre, 2011. Climate change links fate of glaciers and an endemic alpine invertebrate. Climate Change 106: 337-345.

Myers, M. & V.H. Resh, 2002. Trichoptera and other macroinvertebrates in springs ot the Great Basin: species composition, richness, and distribution. Western North American Naturalist 62 (1): 1-13

Nickus, U., K. Krainer, H. Thies & M. Tolotti, 2015. Blockgletscherabflüsse im Äußeren Hochebenkar – Hydrologie, Wasserchemie und Kieselalgen. In Schallhart, N. & B. Erschbamer (eds), Forschung am Blockgletscher: Methoden und Ergebnisse. Innsbruck Univ. Press, Innsbruck Alpine Forschungsstelle (Obergurgl): Series 4: 117–134.

Okland, B., 1991. Laboratory studies of egg development and diapause in Isoperla obscura (Plecoptera) from a mountain stream in Norway. Freshwater Biology 25 (3): 485-496

Piccolruaz, C., 2014. Zur Quartärgeologie des Kaunergrates im Bereich östlich des Gepatsch-Stausees in den westlichen Ötztaler Alpen (Tirol) unter besonderer Berücksichtigung der Blockgletscher. Diploma Thesis University Innsbruck.

Piggott, J.J. , C.R. Townsend & C.D. Matthaei, 2015. Climate warming and agricultural stressors interact to determine stream macoinvertebrate community dynamics Global Change Biology 21: 1887-1906.

Pointner, E., 2002. Quellhydrogeologie im Schweizerischen Nationalpark (GR). Diploma Thesis, University Berne.

Prier, H., 1985. Untersuchungen über das Temperaturverhalten von Quellen im Grundgebirge des südlichen Schwarzwaldes. Abhandlungen des geologischen Landesamts Baden-Württemberg 11: 77–92.

Reiss, M. & P. Chifflard, 2015. Hydromorphology and Biodiversity in Headwaters - An Eco-Faunistic Substrate Preference Assessment in Forest Springs of the German subdued Mountains. INTECH: 223-258.

Risi, M., 2014. Einfluss der Klimaänderung auf die Entwicklung der Grundwasserpegelstände und –temperaturen im Kanton Nidwalden. Master Thesis, ETH Zürich, Eawag Dübendorf.

Rivers-Moore, N.A., H.F. Dallas & V. Ross-Gillespie, 2012. Life History does matter in assessing potential ecological impacts of thermal changes on aquatic macroinvertebrates. River Research and Applications 29: 1100-1109.

Robinson, C.T., B. Kawecka, L. Füreder & A. Peter, 2010. Biodiversity of Flora and Fauna in Alpine Waters. Bundi U. (ed) Alpine Waters 6: 193-223.

Sartori, M. & P. Landolt, 1999. Atlas de distribution des éphémères de Suisse (Insecta, Ephemeroptera). Fauna Helvetica 3. 214 p.

Scarsbrook, M., J. Barquin & D. Gray, 2007. New Zealand coldwater springs and their biodiversity. Science for Conservation 278. Science and Technical Publishing: Wellington; 1–72.

Smith, H., P. J. Wood & J. Gunn, 2003. The influence of habitat structure and flow permanence on invertebrate communities in karst spring systems. Hydrobiologia 510: 53–66.

Staudacher K. & L. Füreder, 2006. Die Entomofauna ausgewählter Quellen der Schütt (Kärnten). Entomologica Austriaca 13: 47-56.

Staudacher K. & L. Füreder, 2007. Habitat Complexity and Invertebrates in Selected Alpine Springs (Schütt, Carinthia, Austria). Internat. Revue of Hydrobiology 92 (4-5): 465-479

Steiner, B., 2005. Hydrogeologie und –geochemie von ausgewählten Quellen im Schweizerischen Nationalpark. Diploma Thesis, University Berne.

Springer, A. E. & L. E. Stevens, 2009. Spheres of discharge of springs. Hydrogeology Journal 17: 83–93.

Sweeney, B. W., 1984. Factors influencing life-history patterns of aquatic insects. In Resh, V. H. & D. M. Rosenberg (eds), The ecology of aquatic insects. Praeger Publshers, New York.

Tierno de Figueroa, T.J.M., M.J. Lopez-Rodriguez, A. Lorenz, W. Graf, A. Schmidt-Kloiber & D. Hering, 2010. Vulnerable taxa of European Plecoptera (Insecta) in the context of climate change. Biodiversity Conservation 19: 1269-1277

Tremp, H., 2007. Quellen. In Konold, W., R. Böcker, U. Hampicke (eds), Handbuch Naturschutz und Landschaftspflege, Chapter XI-2.15.1, 21st delivery, Wiley-VCH, Weinheim: 1–16.

Urban, M.C., 2015. Accelerating extinction risk from climate change. Science 348: 571-573

Van der Kamp, G., 1995. The hydrogeology of springs in relation to the biodiversity of spring fauna: a review. Journal of the Kansas entomological society 68: 4-17.

Vannote, R.L. & B.W. Sweeney, 1980. Geographic analysis of thermal equilibria: conceptual model for evaluating the effect of natural and modified thermal regimes on aquatic insect communities. The American Naturalist 115 (5): 667-695

Vittoz, RP., D. Chérix, Y. Gonseth, V. Lubini, R. Maggini, N. Zbinden & S. Zumbach, 2013. Climate change impacts on biodiversity in Switzerland: A. review. Journal for Nature Conservation 21. 154-162.

Wagner, R., 1986. Egg development and life cycle of *Chaetopteryx villosa* (Trichoptera). Holarctic Ecology 9: 294-300.

Walther, G.-R., 2010. Community and ecosystem responses to recent climate change. Phil.Trans R. Soc. B 365: 2019-2024

Ward, J. V., 1992. Aquatic insect ecology, Vol. 1. Biology and habitat. Wiley, New York.

Ward, J. V. & J. Standford, 1982. Thermal responses in the evolutionary ecology of aquatic insects. Annual Review of Entomology 27: 97–117.

Waringer, J., Graf W., Pauls S.U., Previsic A. & Kucinic M., 2010. A larval key to the Drusinae species (Trichoptera: Limnephilidae) of Austria, Germany, Switzerland and the dinaric western Balkan. Denisia 29: 383-406

Wigger, F. W., L. Schmidlin, P. Nagel & S. von Fumetti, 2015. Macroinvertebrate assemblages of natural springs along an altitudinal gradient in the Bernese Alps, Switzerland. Annales de Limnologie - International Journal of Limnology 51: 237–247.

Williams, D. D. & B. W Feltmate, 1992. Aquatic Insects. CAB International, Oxon.

Yang, L.H. & V.H.W Rudolf, 2010. Phenology, ontogeny and the effects of climate change on the timing of species interactions. Ecology Letters 13: 1-10

Zollhöfer, J., 1997. Quellen – die unbekannten Biotope: erfassen, bewerten, schützen. Bristol Schriftenreihe Band 6, Krypto, Teufen.

Zollhöfer, J., 1999. Spring habitats in northern Switzerland: Habitat heterogeneity, zoobenthic communities and colonization dynamics. Zürich (Ph .D-Diss. ETH Nr. 13 209).

Zollhöfer, J., M. Brunke & T. Gonser, 2000. A typology of springs in Switzerland by integrating habitat variables and fauna, Archiv für Hydrobiologie Supplement 121: 349–376.

Zwick, P. & H. Zwick, 2010. Life history and development of *Dictyogenus fontium* (Plecoptera: Perlodidae) in two thermally contrasting streams at Lunz am See, Lower Austria. Denisia 29: 459-475

Anhang

CCV-Werte der nachgewiesenen Arten

Tab. A1: Spezifische CCV-Werte und Einstufung der 126 Schweizerischen EPT-Arten, die in der vorliegenden Studie nachgewiesen wurden, und bei Conti et al. (2014) und Hershkovitz et al. (2015) als verletzlich aufgeführt sind.
EPT: E: Ephemeroptera, P: Plecoptera, T: Trichoptera. RL: Einstufung Rote Liste (CR: Vom Aussterben bedroht, EN: stark gefährdet, VU: gefährdet, NT: potenziell gefährdet, LC nicht gefährdet, DD: ungenügende Datengrundlage, NE: nicht beurteilt) NPrio: Einstufung National prioritäre Arten (Nationale Prioritätskategorie: 1: sehr hoch, 2: hoch, 3: mittel, 4: mässig).

	EPT	Arten	T Temperatur	H Höhe	E Endemismus	Q Quellbindung	Em Emergenz	CCV-Wert	Klasse CCV-Wert	RL	NPrio
1	E	Alainites muticus	0	0	0	0	0	0	CCVW-1	LC	
2	E	Baetis alpinus	1	2	0	0	0	2	CCVW-3	LC	
3	E	Baetis lutheri	0	0	0	0	0	0	CCVW-1	LC	
4	E	Baetis rhodani	0	0	0	0	0	0	CCVW-1	LC	
5	E	Baetis vernus	0	0	0	0	0	0	CCVW-1	LC	
6	E	Ecdyonurus alpinus	1	2	1	0	1	2.6	CCVW-4	NT	3
7	E	Ecdyonurus helveticus	0	1	0	0	0	0.6	CCVW-1	LC	
8	E	Ecdyonurus parahelveticus	0	1	1	0	1	1.2	CCVW-2	VU	2
9	E	Epeorus alpicola	1	2	0	0	1	2.2	CCVW-4	LC	
10	E	Rhithrogena hybrida	0	1	0	0	1	0.8	CCVW-1	LC	
11	E	Rhithrogena loyolaea	1	1	0	0	1	1.6	CCVW-3	LC	
12	E	Rhithrogena nivata	1	2	1	0	1	2.6	CCVW-4	NT	3
13	P	Amphinemura standfussi	1	0	0	0	0	0.8	CCVW-1	NT	
14	P	Brachyptera risi	0	1	0	0	1	0.8	CCVW-1	LC	
15	P	Brachyptera trifasciata	1	1	0	0	1	1.6	CCVW-3	CR	2
16	P	Capnia vidua vidua	1	1	0	0	1	1.6	CCVW-3	NT	
17	P	Dictyogenus alpinus	1	2	0	0	1	2.2	CCVW-4	LC	
18	P	Dictyogenus fontium	1	2	0	2	1	3	CCVW-5	NT	
19	P	Isoperla carbonaria	0	1	0	0	0	0.6	CCVW-1	NT	4
20	P	Isoperla lugens	1	2	1	2	1	3.4	CCVW-5	CR	1
21	P	Isoperla orobica	1	1	1	0	0	1.8	CCVW-3	EN	1
22	P	Isoperla oxylepis oxylepis	1	1	0	0	1	1.6	CCVW-3	EN	3
23	P	Isoperla rivulorum	1	1	0	0	0	1.4	CCVW-2	LC	
24	P	Leuctra alpina	1	2	0	0	1	2.2	CCVW-4	LC	
25	P	Leuctra ameliae	1	2	1	2	0	3.2	CCVW-5	EN	2
26	P	Leuctra armata	1	1	0	1	1	2	CCVW-3	NT	4
27	P	Leuctra autumnalis	1	2	0	0	1	2.2	CCVW-4	VU	4
28	P	Leuctra braueri	1	1	0	1	0	1.8	CCVW-3	LC	
29	P	Leuctra dolasilla	1	2	1	0	1	2.6	CCVW-4	VU	3
30	P	Leuctra festai	1	2	1	0	1	2.6	CCVW-4	DD	4
31	P	Leuctra handlirschi	1	1	0	0	0	1.4	CCVW-2	LC	
32	P	Leuctra helvetica	1	1	1	0	1	2	CCVW-3	EN	2
33	P	Leuctra inermis	0	0	0	0	0	0	CCVW-1	LC	

	EPT	Arten	T Temperatur	H Höhe	E Endemismus	Q Quellbindung	Em Emergenz	CCV-Wert	Klasse CCV-Wert	RL	NPrio
34	P	Leuctra major	0	1	0	0	1	0.8	CCVW-1	LC	
35	P	Leuctra moselyi	1	1	0	0	1	1.6	CCVW-3	LC	
36	P	Leuctra muranyii	1	1	0	2	1	2.4	CCVW-4		
37	P	Leuctra niveola	1	1	0	0	1	1.6	CCVW-3	VU	4
38	P	Leuctra prima	1	1	0	0	1	1.6	CCVW-3	LC	
39	P	Leuctra pseudorosinae	1	1	0	0	1	1.6	CCVW-3	EN	2
40	P	Leuctra rauscheri *	1	1	0	1	0	1.8	CCVW-3	NT	
41	P	Leuctra ravizzai	1	2	1	0	1	2.6	CCVW-4	CR	1
42	P	Leuctra rosinae	1	1	0	0	0	1.4	CCVW-2	LC	
43	P	Leuctra schmidi	1	2	1	0	1	2.6	CCVW-4	EN	2
44	P	Leuctra sesvenna	1	2	1	0	1	2.6	CCVW-4	CR	1
45	P	Leuctra teriolensis	1	2	0	0	0	2	CCVW-3	LC	
46	P	Leuctra vinconi aubertorum	1	1	1	2	1	2.8	CCVW-5	CR	1
47	P	Leuctra zwicki	1	1	1	0	1	2	CCVW-3	CR	1
48	P	Nemoura marginata	1	1	0	1	1	2	CCVW-3	LC	
49	P	Nemoura minima	1	1	0	0	1	1.6	CCVW-3	NT	
50	P	Nemoura mortoni	1	1	0	0	0	1.4	CCVW-2	LC	
51	P	Nemoura obtusa	1	2	0	1	1	2.6	CCVW-4	NT	4
52	P	Nemoura pesarinii	1	1	1	0	1	2	CCVW-3	DD	4
53	P	Nemoura sciurus	1	0	0	0	1	1	CCVW-2	CR	2
54	P	Nemoura sinuata	1	2	0	2	1	3	CCVW-5	NT	4
55	P	Nemoura uncinata	1	1	0	0	1	1.6	CCVW-3	EN	4
56	P	Nemoura undulata	1	2	1	0	1	2.6	CCVW-4	CR	1
57	P	Nemurella pictetii	0	1	0	0	0	0.6	CCVW-1	LC	
58	P	Perla grandis	1	1	0	0	1	1.6	CCVW-3	LC	
59	P	Perlodes intricatus	1	2	0	0	1	2.2	CCVW-4	LC	
60	P	Perlodes microcephalus	0	1	0	0	1	0.8	CCVW-1	LC	
61	P	Protonemura auberti	1	1	0	1	0	1.8	CCVW-3	NT	
62	P	Protonemura brevistyla	1	2	0	0	0	2	CCVW-3	LC	
63	P	Protonemura lateralis	1	1	0	0	0	1.4	CCVW-2	LC	
64	P	Protonemura nimborella	1	2	0	0	1	2.2	CCVW-4	VU	3
65	P	Protonemura nimborum	1	2	0	0	1	2.2	CCVW-4	LC	
66	P	Protonemura nitida	0	1	0	0	1	0.8	CCVW-1	LC	
67	P	Protonemura p. praecox	1	1	0	0	1	1.6	CCVW-3	LC	
68	P	Protonemura risi	1	1	0	1	0	1.8	CCVW-3	LC	
69	P	Rhabdiopteryx alpina	1	2	0	0	1	2.2	CCVW-4	NT	4
70	P	Siphonoperla montana	1	2	0	0	1	2.2	CCVW-4	NT	
71	P	Siphonoperla torrentium	1	1	0	0	0	1.4	CCVW-2	LC	
72	T	Acrophylax zerberus	1	2	0	0	1	2.2	CCVW-4	VU	4
73	T	Adicella filicornis	1	0	0	2	1	1.8	CCVW-3	EN	3
74	T	Allogamus auricollis	0	0	0	0	1	0.2	CCVW-1	LC	
75	T	Allogamus hilaris	1	2	0	0	1	2.2	CCVW-4	LC	
76	T	Allogamus mendax/uncatus	1	2	0	0	1	2.2	CCVW-4	NT	3

	EPT	Arten	T Tem pera-tur	H Höhe	E En-demis-mus	Q Quell-bindung	Em Emer-genz	CCV-Wert	Klasse CCV-Wert	RL	NPrio
77	T	Anisogamus difformis	1	2	0	1	1	2.6	CCVW-4	VU	4
78	T	Apatania fimbriata **	1	1	0	2	0	2.2	CCVW-4	EN	3
79	T	Apatania helvetica	1	1	1	2	0	2.6	CCVW-4	EN	3
80	T	Apatania muliebris	1	1	0	2	0	2.2	CCVW-4	EN	2
81	T	Beraea maurus	1	1	0	2	1	2.4	CCVW-4	NT	
82	T	Beraea pullata	0	1	0	2	1	1.6	CCVW-3	NT	
83	T	Chaetopteryx major	0	0	0	1	1	0.6	CCVW-1	VU	4
84	T	Chaetopteryx villosa	0	1	0	0	0	0.6	CCVW-1	LC	
85	T	Consorophylax consors **	1	2	0	2	1	3	CCVW-5	NT	4
86	T	Cryptothrix nebulicola	1	2	1	1	1	3	CCVW-5	NT	4
87	T	Drusus alpinus	1	2	1	2	1	3.4	CCVW-5	EN	1
88	T	Drusus biguttatus	0	1	0	0	1	0.8	CCVW-1	LC	
89	T	Drusus chapmani	1	2	1	1	1	3	CCVW-5	NE	
90	T	Drusus chrysotus	1	2	0	2	1	3	CCVW-5	NT	
91	T	Drusus discolor	1	2	0	1	0	2.4	CCVW-4	LC	
92	T	Drusus melanchaetes	1	2	1	2	1	3.4	CCVW-5	VU	2
93	T	Drusus monticola *	1	2	0	1	1	2.6	CCVW-4	NT	
94	T	Drusus muelleri	1	2	1	2	1	3.4	CCVW-5	VU	2
95	T	Drusus nigrescens	1	2	1	2	1	3.4	CCVW-5	VU	2
96	T	Ernodes articularis	1	1	0	2	1	2.4	CCVW-4	VU	4
97	T	Ernodes vicinus **	1	1	0	2	1	2.4	CCVW-4	NT	
98	T	Halesus rubricollis	1	2	0	0	1	2.2	CCVW-4	LC	
99	T	Leptotaulius gracilis	1	1	1	2	1	2.8	CCVW-5	DD	
100	T	Limnephilus centralis	0	0	0	1	0	0.4	CCVW-1	LC	
101	T	Limnephilus coenosus	1	1	0	0	0	1.4	CCVW-2	NT	
102	T	Limnephilus sparsus	0	0	0	0	0	0	CCVW-1	LC	
103	T	Lithax niger	1	1	0	1	1	2	CCVW-3	LC	
104	T	Metanoea flavipennis	0	1	1	0	1	1.2	CCVW-2	NT	4
105	T	Micrasema morosum	1	1	0	0	0	1.4	CCVW-2	NT	4
106	T	Parachiona picicornis	0	1	0	2	1	1.6	CCVW-3	NT	
107	T	Philopotamus ludificatus	0	1	0	0	0	0.6	CCVW-1	LC	
108	T	Plectrocnemia conspersa	0	1	0	0	0	0.6	CCVW-1	LC	
109	T	Plectrocnemia geniculata	1	1	0	2	0	2.2	CCVW-4	NT	
110	T	Potamophylax cingulatus	0	0	0	0	0	0	CCVW-1	LC	
111	T	Pseudopsilopteryx zimmeri	1	1	0	1	1	2	CCVW-3	LC	
112	T	Ptilocolepus granulatus	1	1	0	2	0	2.2	CCVW-4	NT	
113	T	Rhadicoleptus alpestris	0	1	0	0	0	0.6	CCVW-1	NT	
114	T	Rhadicoleptus uncenorum	1	2	1	2	1	3.4	CCVW-5	CR	1
115	T	Rhyacophila bonaparti	1	1	1	2	1	2.8	CCVW-5	VU	2
116	T	Rhyacophila glareosa	1	1	0	0	1	1.6	CCVW-3	NT	4
117	T	Rhyacophila hirticornis	1	1	0	0	1	1.6	CCVW-3	NT	
118	T	Rhyacophila intermedia	1	1	0	0	0	1.4	CCVW-2	LC	
119	T	Rhyacophila meyeri	1	1	0	2	0	2.2	CCVW-4	VU	2

	EPT	Arten	T Tem pera-tur	H Höhe	E En-demis-mus	Q Quell-bindung	Em Emer-genz	CCV-Wert	Klasse CCV-Wert	RL	NPrio
120	T	Rhyacophila tristis	1	1	0	0	0	1.4	CCVW-2	LC	
121	T	Rhyacophila vulgaris	0		0	0	1	0.2	CCVW-1	LC	
122	T	Sericostoma persona-tum/flavicorne	0	0	0	0	0	0	CCVW-1	LC	
123	T	Stactobia moselyi	1	1	0	2	1	2.4	CCVW-4	EN	3
124	T	Tinodes rostocki	0	0	0	0	0	0	CCVW-1	NT	
125	T	Tinodes zelleri	1	1	1	2	1	2.8	CCVW-5	VU	2
126	T	Wormaldia o. occipitalis	1	1	0	2	0	2.2	CCVW-4	LC	

CCV-Index der untersuchten Quell-Lebensräume

Tab. A2: Strukturbewertung, ÖWS (Ökologische Wertesumme), Anzahl vorkommende Arten und CCVI (Climate Change Verletzlichkeits-Index) in den untersuchten Quell-Lebensräumen.
- Total Arten EPT: Anzahl der EPT-Arten aus Beprobungen der Quellbiotope und Fängen der Imagines in den Jahren 2014 und 2015.
- Anzahl indizierte Taxa: Alle Vertreter der Turbellaria, Mollusca, Crustacea, Ephemeroptera, Plecoptera, Odonata und Trichoptera, die bei der Berechnung der ÖWS berücksichtigt werden.
- Artenzahl EPT: Anzahl EPT-Arten, die bei der Haupt-Beprobung (in der Regel) im Jahr 2014 vorkamen und bei der Berechung der von CCVW/CCVI berücksichtigt wurden.
- Farbcode Struktur/ÖWS: blau: naturnah/quelltypisch, grün: bedingt naturnah/bedingt quelltypisch, gelb: mässig beeinträchtigt/quellverträglich, orange: geschädigt/quellfremd.
- Klasse CCVI, Bewertung der Verletzlichkeit der Lebensgemeinschaft: 5: hochverletzlich, 4: verletzlich, 3: mässig verletzlich, 2: gering verletzlich, 1: unverletzlich.

Quelle	Total EPT-Arten	Struktur	Anzahl indiz. Taxa	ÖWS	Artenzahl EPT	CCV-Index	Klasse CCV-Index
Q-KI_01_BE	6	1.21	9	24.0	6	2.33	4
Q-KI_02_BE	6	0.84	6	25.3	4	3.50	5
Q-KI_03_BE	17	2.30	12	13.5	7	3.14	5
Q-KI_04_BE	24	0.84	11	18.2	10	2.40	4
Q-KI_05_VS	14	0.76	16	27.9	5	1.40	2
Q-KI_06_VS	21	0.70	22	27.4	5	1.80	3
Q-KI_07_VS	13	0.99	12	22.2	2	1.00	2
Q-KI_08_VS	15	0.99	14	25.9	5	1.80	3
Q-KI_09_UR	17	0.86	17	27.6	13	2.31	4
Q-KI_10_UR	20	0.82	19	20.8	10	2.10	3
Q-KI_11_UR	12	2.01	13	21.0	6	1.00	2
Q-KI_12_UR	4	2.46	5	38.4	1	1.00	2
Q-KI_13_GR	22	1.46	18	21.1	14	2.36	4
Q-KI_14_GR	14	0.88	11	24.4	7	1.71	3
Q-KI_15_UR	20	1.91	16	21.8	10	2.10	3
Q-KI_16_GR	21	1.35	16	19.90	18	2.39	4
Q-KI_17_GR	18	0.66	15	15.50	12	1.92	3
Q-KI_18_GR	18	0.78	16	18.30	5	1.40	2
Q-KI_19_GR	16	0.69	13	25.20	15	2.53	4
Q-KI_20_TI	22	0.71	22	11.80	10	1.80	3
Q-KI_21_TI	14	0.82	11	21.10	2	2.00	3
Q-KI_22_GR	16	0.89	15	22.70	13	2.00	3
Q-KI_23_GR	11	1.48	11	20.50	10	2.20	4
Q-KI_24_GR	11	1.01	9	16.90	8	1.88	3
Q-KI_25_GR	12	1.84	11	14.90	9	2.33	4
Q-KI_26_GR	16	1.19	13	24.80	12	2.58	4
Q-KI_27_UR	15	0.91	11	33.6	9	2.33	4
Q-KI_28_UR	17	0.89	15	19.3	10	2.10	3
Q-KI_29_GR	14	0.87	12	26.5	8	1.50	2
Q-KI_30_VS	17	1.28	18	28.3	16	2.50	4

Quelle	Total EPT-Arten	Struktur	Anzahl indiz. Taxa	ÖWS	Artenzahl EPT	CCV-Index	Klasse CCV-Index
Q-KI_31_VS	14	1.42	15	28.5	5	2.20	3
Q-KI_32_VS	15	1.35	11	26.4	9	2.56	4
Q-KI_33_VS	17	1.36	15	13.2	8	2.63	4
Q-KI_34_UR	9	2.85	10	32.4	2	2.50	4
Q-KI_35_UR	8	0.97	7	32.0	4	1.25	2
Q-KI_36_UR	10	1.47	9	20.0	6	1.50	2
Q-KI_37_UR	14	1.30	12	21.7	5	1.40	2
Q-KI_38_UR	14	0.95	18	19.2	13	1.92	3
Q-KI_39_UR	2	3.00	4	22.0	2	1.00	2
Q-KI_40_UR	19	2.51	14	18.3	11	2.09	3
Q-KI_41_UR	13	2.80	7	20.6	11	1.55	3
Q-KI_42_BE	5	0.90	7	25.1	5	2.60	4
Q-KI_43_BE	14	1.26	16	16.1	11	1.64	3
Q-KI_44_BE	13	1.33	8	19.3	4	2.00	3
Q-KI_45_BE	2	1.25	6	20.7	2	2.00	3
Q-KI_46_BE	10	1.29	9	26.9	9	2.33	4
Q-KI_47_BE	8	0.85	9	9.6	4	1.25	2
Q-KI_48_BE	4	1.06	6	18.0	3	1.67	3
Q-KI_49_BE	12	0.80	10	19.0	3	3.33	5
Q-KI_50_GR	22	0.64	18	15.3	14	2.29	4
Q-KI_51_GR	17	0.78	15	23.9	14	1.71	3
Q-KI_52_GR	14	0.92	14	23.6	9	1.67	3
Q-KI_53_VS	8	1.25	9	37.8	8	2.88	5
Q-KI_54_VS	10	1.25	8	38.0	11	2.45	4
Q-KI_55_VS	20	1.38	16	30.6	18	2.33	4
Q-KI_56_UR	15	1.04	18	24.3	7	1.29	2
Q-KI_57_UR	13	2.63	11	30.7	3	1.67	3
Q-KI_58_BE	1	2.33	4	21.0	1	1.00	2
Q-KI_59_GR	27	0.72	20	24.3	14	1.93	3
Q-KI_60_BE	12	1.01	11	19.1	7	3.00	5
Q-KI_61_UR	2	1.69	4	15.0	2	2.00	3

Rohtabelle Fauna Quantitative Beprobungen

In dieser Tabelle sind neben den EPT auch die weiteren übergeordneten Taxa aufgeführt. Zusätzlich zu den im Zusammenhang mit den faunistischen Bewertungen der Quellen erfassten Turbellaria, Mollusca, Amphipoda, Ephemeroptera, Plecoptera, Odonata und Trichoptera wurde in den meisen Quell-Lebensräumen auch die folgenden Sippen erfasst:

Nematoda
Nemathelminthes
Oligochaeta
OStracoda
Hydrachnidia
Collembola
Coleoptera Hydrophilidae
Coeloptera Dytiscidae
Coleoptera Helodidae
Diptera-Familien

	Q-KI_01_BE	Q-KI_02_BE	Q-KI_03_BE	Q-KI_04_BE	Q-KI_05_VS	Q-KI_06_VS	Q-KI_07_VS	Q-KI_08_VS	Q-KI_09_UR	Q-KI_10_UR	Q-KI_11_UR	Q-KI_12_UR	Q-KI_13_GR	Q-KI_14_GR	Q-KI_15_UR	Q-KI_16_GR	Q-KI_17_GR	Q-KI_18_GR	Q-KI_19_GR	Q-KI_20_TI	Q-KI_21_TI	Q-KI_22_GR
beprobte Fläche (m^2)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
TURBELLARIA																						
Crenobia alpina	17	12	4		170	88	71	46	61	12	31	26	123	23	25	11	2	3	41	134		67
Dendrocoelum cavatic.	4																					
Phagocata vitta																						
CRUSTACEA																						
Gammarus fossarum				1																		
Niphargus spp.			1								3	1										
Proasellus cavaticus				1			11															
MOLLUSCA / GASTROPODA																						
Galba truncatula								7														
Pisidium personatum																				5		
Pisidium sp.																				1		
EPHEMEROPTERA																						
Alainites muticus			1																			
Baetis alpinus			25	22	22	142	22	114	9	1	1		3	4	2	2		2	1		2	
Baetis rhodani			3										1							13		
Ecdyonurus alpinus								46							6							
Ecdyonurus parahelveticus							49															
Ecdyonurus sp.																						
Rhithrogena loyolaea						28	80			1						1						
PLECOPTERA																						
Amphinemura standfussi																						
Dictyogenus alpinum																		2			1	
Dictyogenus fontium					67	45		3	16							1						
Dictyogenus sp.													8							1		1
Isoperla rivulorum			9														1		3			
Isoperla sp.													11									
Leuctra ameliae									1													
Leuctra armata					2	1			12				16									
Leuctra braueri / muranyii																	2	34				
Leuctra rosinae	10	18					17															
Leuctra teriolensis								26														
Leuctre rauscheri												1										
Leuctra cf. teriolensis													2									
Leuctra sp.			3		8	24	90	25			13		8			2					2	19
Nemoura mortoni	26		37	2			15	25	29						12	13		3	33	2	1	
Nemoura obtusa													1									
Nemoura sinuata						5		42					50				1	9				
Nemoura sp.							54		31	1	2	1		6						10		1
Nemurella pictetii			109										34		13					37		
Perlodes intricatus							14															
Perlodes sp.																						
Protonemura auberti																						
Protonemura brevistyla																						
Protonemura lateralis	8		50			26			32	7			91	14		18	2	6	5	47		1
Protonemura nitida																				1		
Protonemura sp.		34		57	467	57		3	4		14	1										
Siphonoperla montana																						
Siphonoperla torrentium																						
Taeniopterygidae																						
TRICHOPTERA																						
Acrophylax zerberus			11				9															
Allogamus uncatus/mendax			1	13				11		1	5				6		1					
Limnephilidae Gr. auricollis	3	19																				
Anisogamus diffformis										1				1								
Apatania fimbriata								9														
Apatania helvetica																						
Chaetopteryx villosa										2												
Consorophylax consors	1	1			4	13	27			3		1				1		1				
Drusus alpinus					31	13				8										1		
Drusus biguttatus																						
Drusus chrysotus																	1					
Drusus discolor														1								
Drusus melanchaetes																			129			
Drusus monticola	15	111					1	2														
Drusus muelleri	3			29	2	46		4		3												
Drusus nigrescens					23	6			4	2	13			8	62	52	2	2	5		100	118
Drusus sp.																						
Limnephilidae					5														2	7	1	
Chaetopt/Stenophylacini																				6		
Micrasema morosum																				2		
Pseudopsilopteryx zimmeri															10			7			1	
Parachiona picicornis															1							
Lithax niger						5		3	3	4			2		25	14		3	3			
Ptilocolepus granulatus					1																	
Philopotamus ludificatus						1		19		2												
Plectrocnemia conspersa																						
Rhyacophila bonaparti																						
Rhyacophila glareosa	2				6	18																
Rhyacophila intermedia						2	3															

	Q-KI_01_BE	Q-KI_02_BE	Q-KI_03_BE	Q-KI_04_BE	Q-KI_05_VS	Q-KI_06_VS	Q-KI_07_VS	Q-KI_08_VS	Q-KI_09_UR	Q-KI_10_UR	Q-KI_11_UR	Q-KI_12_UR	Q-KI_13_GR	Q-KI_14_GR	Q-KI_15_UR	Q-KI_16_GR	Q-KI_17_GR	Q-KI_18_GR	Q-KI_19_GR	Q-KI_20_TI	Q-KI_21_TI	Q-KI_22_GR
Rhyacophila tristis						6																
Rhyacophila sp.					7			1							1				3			
Sericostoma sp.																						
ZUSATZ-TAXA																						
Nemathelminthes	25	5			15	5	11	99														
Nematoda			1	2																		
Oligochaeta	31	7	3	6	69		24	183	53	28												
Lumbriculidae																						
Enchytraeidae												7		21								
Tubificidae														116								
Ostracoda									3													
Hydrachnidia			2		92	107	17	1	8	57					32							
Collembola sp.																						
Coleoptera										1												
Helophorus sp.								1			1											
Dytiscidae								1														
Agabus sp.																				1		
Helodes sp.																				3		
Chironomidae	265	175	174	108	212	126	225	114														
Tanypodinae									8													
Orthocladiinae									49	53		38		209	21							
Tanytarsini										24												
Dixidae	1				12	2		4	1													
Empididae	13	50		1	5	1	2							1								
Thaumaleidae	1						3	17	3	1												
Tipulidae	1	3		2			5							2								
Simuliidae		178	14	3				38														
Prosimuliinae									2													
Psychodidae			3	3	8					1					1							
Ceratopogonidae			1					7						1								
Muscidae			1																			
Lonchopteridae					1																	
Limoniidae	6		3	3	9	4	3	5														
Limoniidae/Pediciini																						
Pediciini									6	5				8	1							
Empididae										1												
Eriopterini												25										
Stratiomyidae														25								
Stratiomyidae sp./Oxycera sp.																						
Oxycera sp.																						
Hexatomini																						
Dolichopodidae																						
Lispe sp.																						

	Q-KI_23_GR	Q-KI_24_GR	Q-KI_25_GR	Q-KI_26_GR	Q-KI_27_UR	Q-KI_28_UR	Q-KI_29_GR	Q-KI_30_VS	Q-KI_31_VS	Q-KI_32_VS	Q-KI_33_VS	Q-KI_34_UR	Q-KI_35_UR	Q-KI_36_UR	Q-KI_37_UR	Q-KI_38_UR	Q-KI_39_UR	Q-KI_40_UR	Q-KI_41_UR	Q-KI_42_BE	Q-KI_43_BE	Q-KI_44_BE
beprobte Fläche (m^2)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
TURBELLARIA																						
Crenobia alpina	4	8	9	12	150	19	68	64	1	38	34	5	2	4	1	4		66	31		7	8
Dendrocoelum cavatic.																						
Phagocata vitta												3	1									
CRUSTACEA																						
Gammarus fossarum																						
Niphargus spp.												3	1	1								
Proasellus cavaticus																						
MOLLUSCA / GASTROPODA																						
Galba truncatula																2						
Pisidium personatum																						
Pisidium sp.																1						
EPHEMEROPTERA																						
Alainites muticus																						
Baetis alpinus			2	1		20		7	1		18							1	1		1	8
Baetis rhodani																						
Ecdyonurus alpinus																						
Ecdyonurus parahelveticus																						
Ecdyonurus sp.																					1	
Rhithrogena loyolaea						2		1														
PLECOPTERA																						
Amphinemura standfussi																						
Dictyogenus alpinum																						
Dictyogenus fontium		1		3	1		3	3								2		2				
Dictyogenus sp.																						
Isoperla rivulorum															3							
Isoperla sp.			8																			
Leuctra ameliae																						
Leuctra armata				9												1						
Leuctra braueri / muranyii																						
Leuctra rosinae	2						9					1										
Leuctra teriolensis																						
Leuctre rauscheri																						
Leuctra cf. teriolensis																						
Leuctra sp.					5			1			1	1				1						
Nemoura mortoni		12	7	2	5	1	19		3	15	4	1		1	8	91		2				
Nemoura obtusa											1							10				
Nemoura sinuata								6		1												
Nemoura sp.						3									7			3	3			
Nemurella pictetii			16													2		1				
Perlodes intricatus																						
Perlodes sp.											1											
Protonemura auberti																						
Protonemura brevistyla		1				5	3															8
Protonemura lateralis		5	31	1			6	14							1	23		27	1		1	17
Protonemura nitida																						
Protonemura sp.		2	3	5							2					3		1				
Siphonoperla montana		1																				
Siphonoperla torrentium																						
Taeniopterygidae																						
TRICHOPTERA																						
Acrophylax zerberus																7		3				
Allogamus uncatus/mendax											3				1							
Limnephilidae Gr. auricollis																						
Anisogamus diffformis																1						
Apatania fimbriata																						
Apatania helvetica																						
Chaetopteryx villosa						1																
Consorophylax consors	3				1		8	2	7		1	22	1		3		1			3	1	12
Drusus alpinus																						
Drusus biguttatus																1						
Drusus chrysotus																						
Drusus discolor																						
Drusus melanchaetes					12		44															
Drusus monticola							42															1
Drusus muelleri								2	2	1								1				
Drusus nigrescens		7		27	34	39		11	4	16		35	2	3		6				45		
Drusus sp.	1				3			1		4												
Limnephilidae			1	1	2			1	12		1	9			1	7		1				
Chaetopt/Stenophylacini																						
Micrasema morosum																						
Pseudopsilopteryx zimmeri	4			1												6		2			3	
Parachiona picicornis																						
Lithax niger						1		6		3					1							
Ptilocolepus granulatus																						
Philopotamus ludificatus																						
Plectrocnemia conspersa																						
Rhyacophila bonaparti																						
Rhyacophila glareosa								7														
Rhyacophila intermedia								1														2

	Q-KI_23_GR	Q-KI_24_GR	Q-KI_25_GR	Q-KI_26_GR	Q-KI_27_UR	Q-KI_28_UR	Q-KI_29_GR	Q-KI_30_VS	Q-KI_31_VS	Q-KI_32_VS	Q-KI_33_VS	Q-KI_34_UR	Q-KI_35_UR	Q-KI_36_UR	Q-KI_37_UR	Q-KI_38_UR	Q-KI_39_UR	Q-KI_40_UR	Q-KI_41_UR	Q-KI_42_BE	Q-KI_43_BE	Q-KI_44_BE
Rhyacophila tristis																						
Rhyacophila sp.						1		1														
Sericostoma sp.																						
ZUSATZ-TAXA																						
Nemathelminthes																						
Nematoda																						
Oligochaeta					50	32																
Lumbriculidae																						
Enchytraeidae																						
Tubificidae																						
Ostracoda																						
Hydrachnidia																						
Collembola sp.																						
Coleoptera																						
Helophorus sp.					7	1				1		1										
Dytiscidae																						
Agabus sp.																						
Helodes sp.																						
Chironomidae																						117
Tanypodinae																						
Orthocladiinae					216	93																
Tanytarsini																						
Dixidae																						
Empididae					2																	3
Thaumaleidae																						
Tipulidae																						
Simuliidae						1																
Prosimuliinae																						
Psychodidae																						
Ceratopogonidae																						
Muscidae																						
Lonchopteridae																						
Limoniidae																						
Limoniidae/Pediciini																						
Pediciini					16	5																
Empididae																						
Eriopterini																						
Stratiomyidae																						
Stratiomyidae sp./Oxyoera sp.																						
Oxyoera sp.																						
Hexatomini																						
Dolichopodidae																						
Lispe sp.																						

	Q-KI_45_BE	Q-KI_46_BE	Q-KI_47_BE	Q-KI_48_BE	Q-KI_49_BE	Q-KI_50_GR	Q-KI_51_GR	Q-KI_52_GR	Q-KI_53_VS	Q-KI_54_VS	Q-KI_55_VS	Q-KI_56_UR	Q-KI_57_UR	Q-KI_58_BE	Q-KI_59_GR	Q-KI_60_BE	Q-KI_61_UR
beprobte Fläche (m^2)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.25	0.25	0.25	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
TURBELLARIA																	
Crenobia alpina		72	1	5	30	5	14	6	36	141	163	12	78	21	21	18	1
Dendrocoelum cavatic.																	
Phagocata vitta																	
CRUSTACEA																	
Gammarus fossarum																	
Niphargus spp.																	
Proasellus cavaticus																	
MOLLUSCA / GASTROPODA																	
Galba truncatula					1									1			
Pisidium personatum																	
Pisidium sp.						1											
EPHEMEROPTERA																	
Alainites muticus																	
Baetis alpinus			1	1			1	23	48	58	9	24	34		1	13	
Baetis rhodani																	
Ecdyonurus alpinus																	
Ecdyonurus parahelveticus																	
Ecdyonurus sp.																	
Rhithrogena loyolaea							1	8	4	1	33						
PLECOPTERA																	
Amphinemura standfussi							2										
Dictyogenus alpinum																	
Dictyogenus fontium												34	5			2	
Dictyogenus sp.									14	20	18						
Isoperla rivulorum			1			4	2										
Isoperla sp.															11		
Leuctra ameliae																	
Leuctra armata															1		
Leuctra braueri / muranyii															2		
Leuctra rosinae																	
Leuctra teriolensis																	
Leuctre rauscheri																	
Leuctra cf. teriolensis																	
Leuctra sp.						3		13	9	68	36	13	26		3		
Nemoura mortoni						31	9					16			2		
Nemoura obtusa												3					
Nemoura sinuata		4					1								1		
Nemoura sp.									3		25	3			26		
Nemurella pictetii						2	6					1			16	5	
Perlodes intricatus																	
Perlodes sp.																	
Protonemura auberti																	
Protonemura brevistyla								1					2			7	
Protonemura lateralis		9				1						38				13	
Protonemura nitida																	
Protonemura sp.			1	1			1		1	14	23	36				2	
Siphonoperla montana																	
Siphonoperla torrentium																	
Taeniopterygidae										8							
TRICHOPTERA																	
Acrophylax zerberus												3	10				
Allogamus uncatus/mendax				2										1			
Limnephilidae Gr. auricollis																	
Anisogamus diffformis																	
Apatania fimbriata																	
Apatania helvetica															1		
Chaetopteryx villosa																	
Consorophylax consors								5	9	2	1						6
Drusus alpinus											6						
Drusus biguttatus																	
Drusus chrysotus																1	
Drusus discolor						1						2					
Drusus melanchaetes								17	346	211	11		5				
Drusus monticola		15		28	16											43	
Drusus muelleri		5						14			5						
Drusus nigrescens								26			28		9				
Drusus sp.					7												
Limnephilidae				3	1							8			4		
Chaetopt/Stenophylacini										13	7						6
Micrasema morosum																	
Pseudopsilopteryx zimmeri						2		3				9					
Parachiona picicornis																	
Lithax niger								3				2					
Ptilocolepus granulatus																	
Philopotamus ludificatus																	
Plectrocnemia conspersa						3											
Rhyacophila bonaparti											1						
Rhyacophila glareosa								1			6						
Rhyacophila intermedia											1						

	Q-KI_45_BE	Q-KI_46_BE	Q-KI_47_BE	Q-KI_48_BE	Q-KI_49_BE	Q-KI_50_GR	Q-KI_51_GR	Q-KI_52_GR	Q-KI_53_VS	Q-KI_54_VS	Q-KI_55_VS	Q-KI_56_UR	Q-KI_57_UR	Q-KI_58_BE	Q-KI_59_GR	Q-KI_60_BE	Q-KI_61_UR
Rhyacophila tristis																	
Rhyacophila sp.											1	10					
Sericostoma sp.						6											
ZUSATZ-TAXA																	
Nemathelminthes											2						
Nematoda							1			2							
Oligochaeta			14	3	46	2	1		1	12	8		38		75		
Lumbriculidae						12											
Enchytraeidae																	
Tubificidae						5											
Ostracoda						3											
Hydrachnidia		19			6	8			1		8		2			5	
Collembola sp.						2											
Coleoptera																	
Helophorus sp.									1		1		1			6	
Dytiscidae																	
Agabus sp.																	
Helodes sp.																	
Chironomidae		1429	26	71	133	43	72		164	346	1145					1352	
Tanypodinae																	
Orthocladiinae													64		195		
Tanytarsini																	
Dixidae						1											
Empididae		5					1		13	27	25		9			1	
Thaumaleidae																	
Tipulidae										3							
Simuliidae		2				1				318	1				11	3	
Prosimuliinae																	
Psychodidae		40														34	
Ceratopogonidae		11			1										3		
Muscidae																	
Lonchopteridae																	
Limoniidae		4			9				18	1							
Limoniidae/Pediciini											7						
Pediciini						2							1		8	4	
Empididae																	
Eriopterini													4				
Stratiomyidae		6	1														
Stratiomyidae sp./Oxyoera sp.							3										
Oxyoera sp.						7											
Hexatomini						1											
Dolichopodidae						1											
Lispe sp.											3						

Objektblätter

Legende

Die Objektblätter beinhalten die wichtigsten Informationen und ermöglichen einen raschen Überblick. Die Grundlage bilden die Erhebungsdaten aus der Saison 2014/15.

- Kopfdaten: aus dem Kartierbogen für die strukturelle Bewertung von Quell-Lebensräumen (Lubini-Ferlin et al. 2014).
- Naturschutz: Status der Quelle und des Umlands in Naturschutzgebieten von nationaler (nat) oder regionaler (reg) Bedeutung. Zusätzlich unter angegeben ob es sich um eine Aue (A) oder ein Flachmoor (F) handelt.
- Gewässerschutz: Lage in Grundwasserschutzgebiet mit Angaben Fassungsbereich (S1), engere Schutzzone (S2), weitere Schutzzone (S3) und Zuströmbereich (Zu). (Daten aus www.map.geo.admin.ch –> Geokatalog –> Natur und Umwelt –> Gewässer).

Struktur werden ebenfalls nach dem Kartierbogen für die strukturelle Bewertung von Quell-Lebensräume (Lubini-Ferlin et al. 2014) angegeben.

- Vegetation: Bezogen auf Quellbereich (allenfalls zusätzlich Umfeld). Kategorien: Wald und Offenland.
- Anzahl bes. Strukturen: Anzahl der besonderen Strukturen aus Strukturbewertung.
- Strömungsdiversität: Anzahl verschiedener Strömungsformen aus Strukturbewertung.
- Anzahl Substrat organisch: Anzahl der organischen Substrat-Strukturen (Moospolster, Wurzeln, Totholz, Pflanzen, Falllaub und Detritus/Org. Schlamm).
- Anzahl Substrat anorganisch: Anzahl anorganischer Substrat-Strukturen (Fels/Blöcke, Steine, Kies/Schotter, Sand, Feinmaterial, Kalksinter).
- Permafrost: Distanz zum nächstgelegenen Bereich mit Permafrost, Kategorie «Permafrost flächenhaft wahrscheinlich» und höher (Daten aus www.map.geo.admin.ch –> Geokatalog –> Natur und Umwelt –> Boden).
- Anzahl Tage mit Schneebedeckung: Daten aus Ski-Info im Gebiet.
- Temperaturmuster: Jahresverlauf der Luft- und Wassertemperatur sowie der Niederschlagsmengen und Dauer der Schneebedeckung. Für einige Quellen wurden keine Daten der Lufttemperatur und der Niederschläge beschafft.

Makrozoobenthos enthält die vorkommenden Ephemeroptera-, Plecoptera- und Trichoptera-Taxa.

- Spalte «RL»: der Rote Liste Status (Lubini et al. 2012)
- Spalte «NP»: Nationale Priorität der Art (BAFU 2011).
- klimasensitive Arten werden mit Fettdruck ausgezeichnet (CCSW-5 und CCSW-4).
- Dichte der Ephemeroptera-, Plecoptera- und Trichoptera (Individuen pro 0.1 m^2)
- Anzahl Rote-Liste-Arten angegeben (Lubini et al. 2012)