

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTMENT LIFE SCIENCES AND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

Regionale Typologie der Quellfluren im Parc Ela (Graubünden, Schweiz)



Bachelorarbeit

Hallie Frances Seiler
Studiengang Umweltingenieurwesen UI17
Vertiefung Naturmanagement
Abgabe 14. Januar 2021

Fachkorrektoren:

Prof. Dr. Jürgen Dengler, Dr. Regula Billeter

ZHAW Life Sciences and Facility Management, Schloss | 8820 Wädenswil Schweiz

Danksagung

Ein grosser Dank gebührt den zahlreichen Menschen, die mich bei dieser Arbeit unterstützten: Regula Ott, für Informationen zum Parc Ela und seinen Lebensräumen; Maya Weber, für die Organisation meiner Unterkunft in Savognin während der Feldarbeit; Dr. Daniel Küry, für die Begehung im Gelände und hilfreiche Diskussionen zur Ökologie der Quellen; Daniel Hepenstrick, für seine grosszügige und gutmütige Unterstützung bei der Bryophytenbestimmung am IUNR; Dr. Beata Cykowska-Marzencka, für die Hilfe bei der Lebermoos-Bestimmung; und dem Bryolich-Team für deren Beratung an Bestimmungsabenden in Zürich und Basel.

Auch meinem geehrten Lehrer, Prof. Dr. Jürgen Dengler, für den Einstieg in die Pflanzensoziologie und in die Bryologie und seine aufmerksame, unermüdliche Betreuung einen ganz herzlichen Dank.

Titelbild

Oligotrophe Fliessquelle auf einer alpinen Zwergstrauchheide bei Alp Sanaspans (Lantsch, GR).

Schlüsselwörter

Helokren; Quellen; montan; Moose; numerische Klassifikation; Parc Ela; Pflanzensoziologie; Quellflur; regionale Typologie; Rheokren; Schweiz; subalpin

Keywords

Bryophytes; springs; helocrene; montane; numerical classification; Parc Ela; phytosociology; spring flora; regional typology; rheocrene; subalpine; Switzerland

Zitiervorschlag

Seiler, H. F. (2021) *Regionale Typologie der Quellfluren im Parc Ela (Graubünden, Schweiz)*. Bachelorarbeit, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil.

Kurzfassung

Die Quell-Lebensräume Mitteleuropas sind kleine, beinahe zeitlose Inselbiotope mit hohem ökologischem Wert. Obwohl sie starkem Nutzungsdruck unterliegen, besitzen sie noch keinen umfassenden Schutzstatus in der Schweiz; zudem ist die syntaxonomische Klassifikation der Quellvegetation voller Kontroversen. Der Wunsch des Parc Ela (Kanton Graubünden, östliche Schweizer Alpen), ein Schutzkonzept für ihre Quellfluren zu entwickeln, sowie die Erstellung eines nationalen Verzeichnisses der Quell-Lebensräume im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, geben Anstoss für diese Arbeit. Im Parc Ela wurden 60 Vegetationsaufnahmen (inkl. Moose) von je 1 m² Fläche bei zwanzig Quellen gemacht, vom montanen Talboden bis knapp in die alpine Zone. Mittels einer «unsupervised» Klassifikation mit TWINSpan wurden ad hoc Vegetationstypen definiert, um die lokale Variabilität zu beschreiben und Vergleiche mit internationalen Klassifikationen zu ermöglichen. Eine DCA-Ordination und diverse lineare Modelle ermöglichten eine Beurteilung der Umweltgradienten. Der Artenreichtum der Aufnahmen ist verglichen mit ähnlichen Studien hoch (Gesamtartenzahl 264, Mittelwert 21.7 Arten pro m²). Die Artenzahl der Aufnahmen nimmt bei einer Zunahme des pH und Sauerstoffsättigung des Quellwassers signifikant ab, was vermutlich durch die limitierenden Effekte der Kalksinterbildung und starke Schüttung zu erklären ist. Die zwei wichtigsten Umweltgradienten für die Artenzusammensetzung waren Meereshöhe/Leitfähigkeit und Beschattung/Quellwasser-pH/Bodenreaktion. Aus der numerischen Klassifikation ergeben sich sieben gut bis schwach charakterisierte Vegetationstypen, welche teilweise starke Abweichungen von Syntaxa aus der Literatur aufweisen. Alle Offenland-Quellen, inkl. jener auf basenarmem Grundgestein, können zu einem breit gefassten *Cratoneurion commutati* Koch 1928 zugeteilt werden, wobei eine deutliche Auftrennung nach Meereshöhe und Leitfähigkeit des Quellwassers festzustellen war. Die Kalksinterquellen waren floristisch nicht stark von anderen basenreichen Quellen unterscheidbar. Die Waldquellen unterscheiden sich in der Bodenreaktion und im Sauerstoffgehalt des Quellwassers, und können in das basenärmere *Caricion remotae* Kästner 1941 und das basenreichere *Lycopodi europaei-Cratoneurion commutati* Hadač 1983 aufgeteilt werden. Da eine gewisse Bedrohung dieser wertvollen Lebensräume im Park durch anthropogenen Einfluss festzustellen ist, werden konkrete Schutzmassnahmen empfohlen, am wichtigsten die Anpassung der Alpwirtschaft und Sensibilisierung der Forstbetriebe.

Abstract

The spring habitats of Central Europe are small, timeless, and insular biotopes with high ecological value. Although subject to severe exploitation pressures, they do not yet have a comprehensive protection status as habitats in Switzerland; contributing to this challenge is the controversy involved with the syntaxonomic classification of spring vegetation. The impetus for this study of spring flora is Parc Ela's plan to develop a conservation concept for its springs (canton of Grisons, eastern Swiss Alps), as well as the development of a national inventory of spring habitats on behalf of the Federal Office for the Environment FOEN. In Parc Ela, 60 square-meter Relevés (including bryophytes) were recorded on twenty springs, from the montane valley floor to just into the alpine zone. Using an unsupervised

classification with TWINSpan, ad hoc vegetation types were defined to describe local variability and to allow comparisons with international classifications. Ordination with DCA and the analysis of various linear models allowed an assessment of environmental gradients. Recorded species richness is high compared to similar studies (total species 264, mean 21.7 species per m²). The biodiversity of the plots decreases significantly with increasing pH and oxygen saturation of the spring water, which is probably due to the limiting effects of tufa formation and strong flow intensity. The two most important environmental gradients for species composition were elevation/conductivity and insolation/spring water pH/soil chemistry. From the numerical classification, seven vegetation types of various degrees of distinction emerge. All unshaded springs, including those over base-poor bedrock, can be assigned to a broadly defined *Cratoneurion* Koch 1928. The vegetation types show a clear separation by elevation and water conductivity. The petrifying springs were not strongly distinguishable floristically from other base-rich springs. The forest springs are differentiated by soil chemistry and oxygen content of the spring water and can be divided into the base-poor and base-rich alliances *Caricion remotae* Käßtner 1941 and *Lycopodi europaei-Cratoneurion commutati* Hadač 1983. As there is a certain threat to these valuable habitats in the park due to anthropogenic influence, protection measures are recommended, most importantly adaptation of the management of alpine pastures and sensitization of forest enterprises.

Inhalt

Kurzfassung	3
Abstract	3
1. Einleitung.....	6
2. Methode.....	8
2.1. Untersuchungsgebiet	8
2.2. Vegetationsökologische Datenerhebung	11
2.3. Strukturhebung.....	12
2.4. Klassifikation.....	12
2.5. Statistische Auswertung	13
3. Ergebnisse.....	13
3.1. Artenreichtum	13
3.2. Klassifikation.....	15
3.3. Vergleich der Quelltypen.....	16
3.4. Umweltgradienten	23
4. Diskussion.....	24
4.1. Artenreichtum	24
4.2. Standortbedingungen	25
4.3. Klassifikation und Syntaxonomie.....	25
4.4. Umweltgradienten	31
4.5. Empfehlungen für den Quellschutz.....	33
4.6. Ausblick.....	35
Literatur.....	37
Anhang	42
1. Kopfdaten	42
2. Stetigkeitstabelle.....	42
3. Sortierte Aufnahmetabelle.....	42

1. Einleitung

Die Quell-Lebensräume Mitteleuropas sind kleine, komplexe und beinahe zeitlose Inselbiotope. Deren besondere Umweltbedingungen nehmen einen grossen Einfluss auf die Vegetation, und tragen dazu bei, dass die Lebensräume durch viele hochspezialisierte Arten besiedelt werden, unter anderem Relikte der Kaltzeiten (Wilmanns 1998). Um den Quellaustritt bleiben die Umweltbedingungen zeitlich konstant (Odum 1971): die Wassertemperatur bleibt ungefähr beim Jahresmittel der Lufttemperatur, und die Luftfeuchtigkeit in Bodennähe ist hoch, aber der Boden wird nur selten vollkommen gesättigt (Zechmeister & Mucina 1994). Ein grosser Artenreichtum entsteht durch starke ökologische Gradienten (Brunke et al. 2015) und räumlicher Heterogenität (Illies & Botosaneanu 1963, Weigand 1998).

Quellen sind wegen diesen Verhältnissen sowie ihrer Kleinflächigkeit und relativer Isolation empfindliche Lebensräume (Zollhöfer 1997, Weigand 1998). Im Schweizer Mittelland und Jura verschwanden bis Jahrtausendwende durch den Verbau und intensiver Nutzung ungefähr die Hälfte der Quellen (Zollhöfer 1999). Auch in den Mittelgebirgen Deutschlands bleiben nur noch wenige naturnahe Quellen erhalten (Bernnerth et al. 1999). Spezialisierte Arten werden durch Lebensraum-Degradierung besonders stark benachteiligt (Heino et al. 2005, Juutinen 2011). Auch in den spärlich besiedelten Alpen, wo die Quellen stark zur regionalen Biodiversität beitragen (Reiss et al. 2016), bestehen Gefährdungen: Bei Strukturhebungen von 114 Quellen im Parc Ela (Graubünden, CH) wurden 24% als mässig beeinträchtigt bis stark geschädigt eingestuft. Hauptgründe waren Verbau (15% der Quellen) und Viehtritt (46%) (Küry 2020).

Obwohl Quell-Lebensräume ökologisch wertvoll sind und starkem Nutzungsdruck unterliegen, besitzen sie in der Schweiz keinen umfassenden Schutzstatus. Quellflur-Verbände im Offenland sind zwar in der Natur- und Heimatschutzverordnung als «schützenswerte Lebensräume» aufgeführt (Anh. 1 NHV, vgl. auch Delarze et al. 2016); leider bietet dies nur begrenzt Schutz, u. a., dass allfällige Eingriffe «einem überwiegenden Bedürfnis» entsprechen müssen (Art. 14 NHV). Die Bestimmungen des Gewässerschutzgesetzes gelten implizit für Quell-Lebensräume (Art. 1-4 GSchG), aber dieser Schutz ist «so umfassend und allgemein gehalten, dass er wirkungslos ist» (Zollhöfer 1997). Quellen werden sonst nur da erwähnt, wo es um Trinkwasserressourcen geht; Konflikte zwischen Trinkwassernutzung und Lebensraumschutz werden in der Gesetzesgrundlage nicht behandelt.

Um eine differenzierte Schutzstrategie für die Quellen zu entwickeln wäre es nützlich, die Quell-Lebensräume in ein allgemeingültiges Schema zu bringen. Obwohl Phytozönosen sich als Referenzeinheiten für den Naturschutz besonders eignen (Dengler 2003), war die Pflanzensoziologie bis jetzt für den Quellschutz nur begrenzt hilfreich, da die Geschichte der Klasse *Montio-Cardaminetea* voller Kontroversen ist. Die einzige Ordnung der Klasse, die *Montio-Cardaminetalia* Pawlowski 1928, wurde ursprünglich in ein Weichwasser- und ein Kalkquellen-Verband aufgetrennt, das *Cardamino-Montion* Br.-Bl. 1925 und das *Cratoneurion commutati* Koch 1928. Maas hielt es für nötig, die zwei Verbände als Ordnungen aufzuwerten (*Montio-Cardaminetalia* Pawlowski 1928 em. Maas 1959 und *Cardamino-Cratoneuretalia* Maas 1959). Diese Trennung auf Ordnungsniveau konnte sich aber nicht durchsetzen, obwohl der Wasserchemismus eine von den wichtigsten Steuergrössen für die

Artenzusammensetzung sein sollte (z. B. Beierkuhnlein & Gollan 1999, Hájek et al. 2002, Hájková et al. 2008). Hinterlang (1992) trennte von der *Montio-Cardaminetalia* eine zusätzliche Ordnung der Waldquellfluren ab, die *Cardamino-Chrysosplenietalia*, während andere Pflanzensoziologen (Valachovič 2001, Chytrý 2011) die Waldquellen noch als Verbände der *Montio-Cardaminetalia* behandeln. Die Wichtigkeit der Beschattung für die Ausprägung der Vegetation bleibt also ungeklärt. Genauso kontrovers ist die Stellung der wärmeliebenden Kalk-Quellfluren (*Adiantion* Br.-Bl. ex Horvatic 1939); diese werden teils als eigene Klasse bzw. Ordnung (Braun-Blanquet 1948, Oberdorfer 2001), teils nur als Verband angegeben. Die Abgrenzung zwischen *Adiantion* und *Cratoneurion* ist umstritten. Einige Autoren behaupten, dass alle Hartwasserquellen der Montanstufe zum *Adiantion* gehören (Geissler 1976, Zechmeister & Mucina 1994). Für diese Untersuchung wird jedoch das *Adiantion* im Sinne von Delarze et al. (2015) als (sub)-mediterraner Verband verstanden.

Die Zuordnung der Quell-Lebensräume ist im Gebirge noch anspruchsvoller, da die Unterschiede zwischen Hart- und Weichwasserquellen hier weniger stark ausgeprägt sind (Braun-Blanquet 1949, Geissler 1976, Pott 1995, Pignatti & Pignatti 2014). In diesen Lebensräumen bekommen alpine Verhältnisse wie Frosteinwirkung grössere Bedeutung für die Ausbildung der Quellvegetation (Beierkuhnlein & Gollan 1999). Geissler (1976) definierte deshalb für die alpine Quellen die Ordnung *Cratoneuro-Philonotidetalia*, welche sowohl Quellen auf Kalk als auch auf Silikat umfasste.

Die Behandlung von Quell-Lebensräumen in der offiziellen Schweizer Lebensraumtypologie, dem TypoCH-System (Delarze et al. 2015), ist wenig differenziert. Das *Cratoneurion* und *Cardamino-Montion* werden beinahe wie Gegenpole präsentiert, was die Komplexität der Geologie der Schweiz kaum widerspiegelt. Waldquellen werden nicht gesondert behandelt, sondern gemäss der Auffassung von Ellenberg und Klötzli (1972) pauschal dem Wald-Verband *Fraxinion* zugeordnet. Dies macht in der Schweiz wenig Sinn, da solche Wälder kaum über der montanen Stufe vorkommen – so werden die zahlreichen Quellen der Bergwälder aus dem Klassifikationssystem ausgeschlossen (vgl. auch Schubert et al. 2001).

Überhaupt ist die Abgrenzung zwischen Quellen und ihren Kontaktassoziationen wegen ihrer starken kleinräumigen Variation und Verzahnung mit angrenzenden Lebensräumen oft nicht eindeutig (Warncke 1980, Beierkuhnlein & Gollan 1999). Die Vegetation der Ordnung tritt beispielsweise oft stark in Bachoberläufen über (Delarze et al. 2015). Die Grenzziehung erfolgt deswegen oft subjektiv (Pott 1995); da Schüttung und Evaporation saisonale Schwankungen unterliegen, wird bei Helokrenen das Feststellen einer klaren räumlichen Grenze gar für unmöglich gehalten (Warncke 1980). Es gibt nur wenige Kennarten der Assoziationen, die nicht auch häufig in anderen Lebensräumen (z. B. Flachmooren) vorkommen (Oberdorfer 1992, Beierkuhnlein & Gollan 1999), und Quellfluren mit ähnlichen Umweltbedingungen können sehr unterschiedliche Artenzusammensetzungen aufweisen; Cantonati et al. (2006) fanden beispielsweise in einer Metastudie, dass alpine Quellen im gleichen Areal oft nur wenige Arten teilen.

Bei der syntaxonomischen Bearbeitung der Klasse *Montio-Cardaminetea* treten zudem folgende methodischen Probleme auf:

- Ältere Typologien haben meist keine breit abgestützte Datenbasis (Dengler et al. 2005) – so wird eine akkurate Typisierung der bereits anspruchsvollen Quell-Lebensräumen weiter erschwert;
- Die Erfassung der Moose ist in einigen Werken nur rudimentär;
- Die meisten Werke zu den Quellen beziehen sich auf regionale Untersuchungen (Cantonati et al. 2006);
- Die starke Variation der Vegetationsaufnahme-Grösse hat Einfluss auf den Stetigkeitswert (Dengler et al. 2009).

Auf Grund dieser Schwierigkeiten besteht Bedarf für eine europaweite, systematische Überarbeitung der Klasse *Montio-Cardaminetea*, gestützt auf einer umfassenden Datenbasis. Solche ist von Hájek et al. seit 2020 in Bearbeitung. Die Daten dieser Untersuchung werden in Hájeks Projekt einfließen.

Der Wunsch des Parc Ela, ein Schutzkonzept für ihre Quellfluren zu entwickeln, sowie die Erstellung eines nationalen Verzeichnisses der Quell-Lebensräume im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU (Küry et al. 2019a) geben Anstoss für diese Arbeit. Audorff et al. (2011) nennen als wichtiges Ziel, Wissen zu den Quell-Lebensräumen zu erweitern durch die Entwicklung regionaler Typologien wie diese, welche sowie chemisch-physikalische Parameter als auch diversen Organismengruppen berücksichtigen. Da sich die Muster der Biodiversität der Quellen zwischen Bergregionen stark unterscheiden, können lokale Studien auch hilfreich sein, um die massgebenden Parameter zu identifizieren (Sekulová et al. 2012). In diesem Sinne sollte durch diese Arbeit die Vielfalt der Quell-Lebensräume im Parc Ela erfasst, lokal schützenswerte Arten identifiziert, und die grundlegenden Umweltfaktoren erkennbar gemacht werden, sodass effektive Schutzmassnahmen entwickelt werden können.

2. Methode

2.1. Untersuchungsgebiet

Als grösster Naturpark der Schweiz erstreckt sich der Parc Ela über 548 km² im Kanton Graubünden (Abbildung 1). Die Parkfläche umreisst das Surses- und Albulatal und die umliegenden Albula-, Plessur- und Oberhalbsteiner Alpen. Der tiefste Punkt im Park liegt in der Schinschlucht auf 745 m ü. M., der höchste auf dem Piz Kesch mit 3'418 m ü. M. (Parc Ela 2020a).

Als inneralpine Täler in Mittelbünden weisen das Surses- und Albulatal ein kontinental geprägtes Klima auf (Abbildung 2). Jährliche Niederschlagsmengen in den Tälern erreichen um 1'000 mm, und die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt etwa 3.5 °C (MeteoSchweiz 2020). Im Juli steigen die Temperaturen bis auf circa 18.1 °C. Sonst herrscht ein nass-kaltes Gebirgsklima, mit Jahresniederschlagssummen von circa 1'350 mm und Maximaltemperaturen bis circa 15.4° C. Das Jahr weist bis zu 190 Frosttage auf, was die Vegetationsperiode auf circa 6 Monate verkürzt.

Der Park liegt auf den penninischen und ostalpinen Decken, mit dem Tal Surses auf der Grenze zwischen den Haupteinheiten. Ein grosser Teil des Parks liegt auf basischem Grundgestein, vor allem biogene Sedimente und Evaporite (Abbildung 3); zu den häufigen Gesteinsarten gehören Dolomit, Brekzie und Mergel (swisstopo 2020). Im Süden des Gebietes, auf der Höhe der Albula-, Septimer- und Julierpässe, wechseln sich Sediment- und Kristallingestein (Granodiorit, Gneis) kleinräumig ab.

Metamorphes Gestein tritt punktuell beim Aroser Rothorn, Büelenhorn und anderen Gipfel auf. In den Tälern, insbesondere im Tal Surses, sind Bach- und Hangschutt sowie Bergsturzablagerungen (z. B. Rutschungen auf weichem Bündnerschiefer) von Bedeutung. Moräne steht grossflächig im Tal Surses und im unteren Albulatal an. Die Berglandschaft ist glazial geprägt, die Böden flachgründig und jung (ibid.).

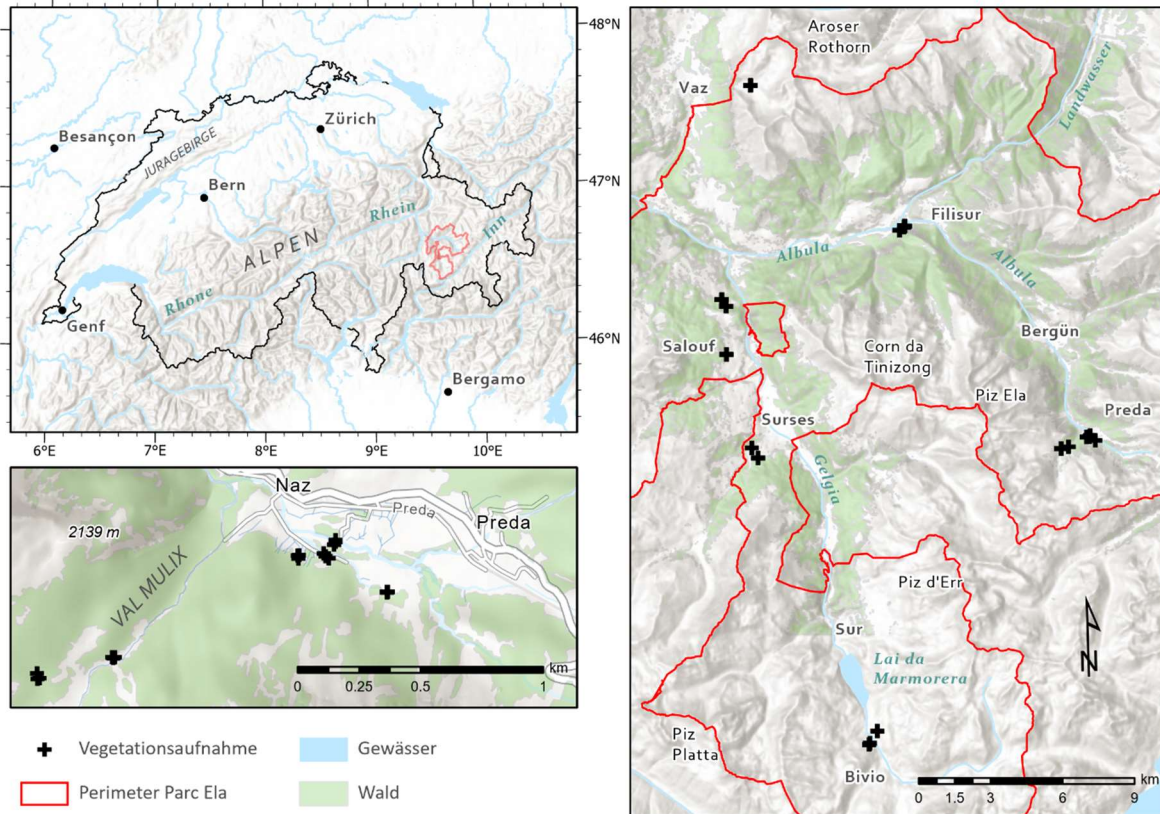


Abbildung 1: Karten des Untersuchungsgebiets. Links oben – Standort des Parc Elas in der Schweiz; rechts – Übersicht aller untersuchten Quellen; links unten – Detailansicht der Quellen Predas (Karte H. Seiler, Gestaltung im ArcGIS Pro mit Service layers von Esri, Airbus DS, USGS, NGA, NASA, CGIAR, N Robinson, NCEAS, NLS, OS, NMA, Geodastystyrelsen, Rijkswaterstaat, GSA, GEoland, FEMA, Intermap, HERE, Garmin, FAO, NOAA, OpenStreetMap Beitragende und die GIS-Benutzergemeinschaft).

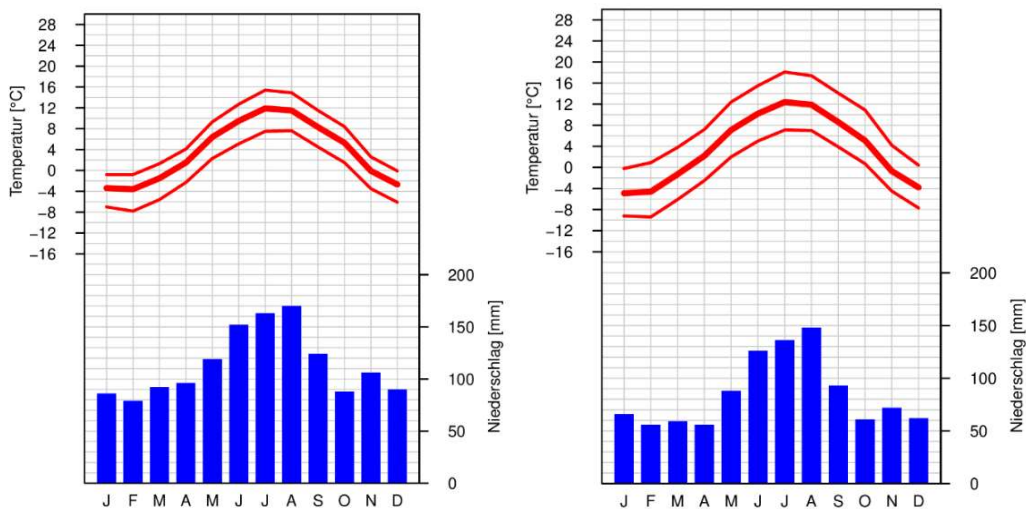


Abbildung 2: Das Klima bei Arosa (1'878 m ü.M., links) und Davos (1'594 m ü.M., rechts) wird als repräsentativ für Mittelbündnen genommen. Die Klimadiagramme zeigen Mittelwerte für die Normperiode 1981–2010. Jahresniederschlag Arosa – 1'365

mm; Jahresmitteltemperatur Arosa – 3.6 °C; Jahresniederschlag Davos – 1'022 mm; Jahresmitteltemperatur Davos 3.5 °C (MeteoSchweiz 2020).

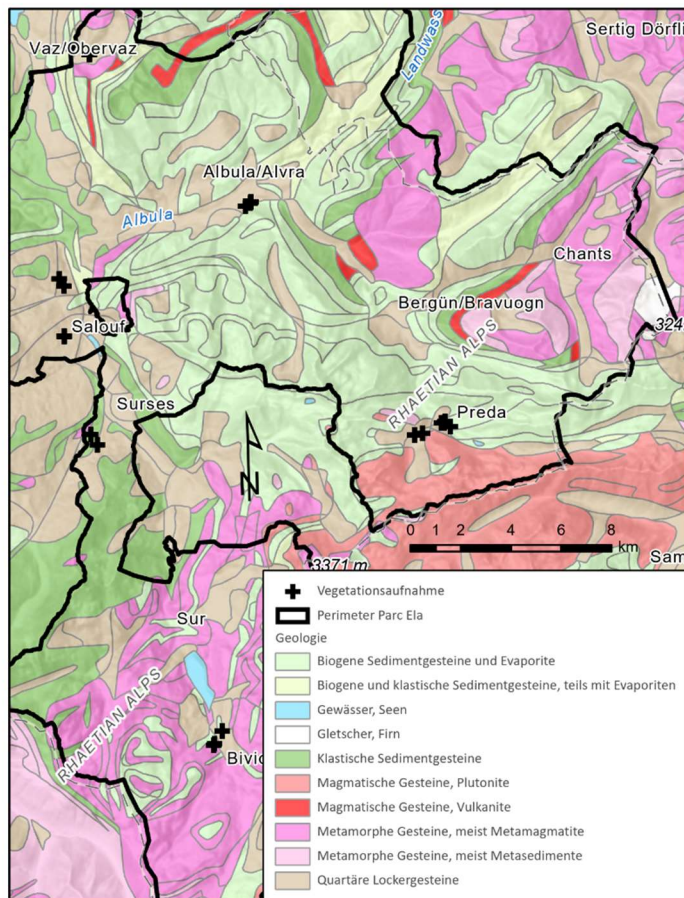


Abbildung 3: Geologie der jeweiligen Standorten (geologische Karte swisstopo 2005; Service layers wie Abbildung 2).

Der Park ist nur spärlich besiedelt. Die landwirtschaftliche Nutzung besteht vor allem aus Alpwirtschaft; der historische Bergackerbau wird nur noch kleinflächig an wenigen Orten betrieben. Wie vielerorts in der Schweizer Alpen ist die Nutzungsaufgabe bzw. Verbrachung eine regionale Herausforderung. Zu den vielfältigen Lebensräumen gehören Moorlandschaften, historische Kulturlandschaften, Heiden und Bergrasen. 43% der Waldfläche erfüllt eine Schutzfunktion (AWN GR 2015). Der Tourismus ist für die lokale Wirtschaft und regionale Entwicklung von grosser Bedeutung, und wird vom Naturpark gefördert (Abs. 3 Päv). Der Park setzt sich auch für die Erhaltung vom Naturwert und Landschaftsqualität ein, beispielsweise durch Aufwertungsprojekte, Umweltbildung und Pflegeinsätze (Parc Ela 2020b).

Die Quellen dieser Studie liegen zwischen 956 und 2'115 m ü. M. Die untersuchten Bereiche sind in der Abbildung 1 dargestellt und im folgenden Abschnitt kurz beschrieben:

- Alp Sanaspans, Lantsch (2'105–2'122 m ü. M.) – Talkessel einer Hochgebirgslandschaft, grossflächig als Alpweide benutzt. Moräne auf der Silvretta-Decke, gemischt Karbonat-Silikat; Rasen, Heide (inkl. *Juniperus communis* subsp. *alpina*), punktuell Schneetälchen-Vegetation. Zahlreiche Fließquellen am Südhang.
- Bivio (1'777–1'844 m ü. M.) – Am Fuss der Julier- und Septimerpässe; Moräne auf Basalt, Serpentin und biogenen Sedimenten; Kontaktgesellschaften inkl. Grünerlengbüsch und Braunseggenried. Bei Stalveder Fichtenwald auf Sackungsmasse (Silikatgestein, v.a. Basalt)
- Preda (1'750–2'111 m ü. M.) – oberes Albulatal; Moräne und Bachschutt v.a. aus Silikat mit etwas Kalk (Err-Decke) beigemischt. Aue, Flachmoore und lichte Berg-Föhrenwälder.
- Westliche Talseite Surses (Savognin, Salouf, Mon) (1'164–1'429 m ü. M.) – Rutschmasse auf Mergel, Dolomit etc. (Penninikum) mit westlicher Exposition. Unterschiedliche Standorte im Wald und Offenland, inkl. Kalkmoore, oft mit Kalksinterbildung.
- Filisur (964–1'013 m ü. M.) – Nordfuss der Plessur-Alpen; Hangschutt am bewaldeten Schattengang unter schroffen Kalkfelsen sowie angrenzendes Alluvion.

2.2. Vegetationsökologische Datenerhebung

Standorte wurden so ausgewählt, um die vermuteten Hauptgradienten von Beschattung, Höhenlage und Grundwasserchemismus möglichst gut abzubilden. Als Grundlage wurde das kantonale Quell-Inventar (geoGR 2020) herangezogen, sowie Daten aus den Strukturhebungen von den Quellen der Bündner Pärke 2016–2018 (Küry 2020). Standorte mit Qualität «naturnah» bis «bedingt naturnah» und einer Naturschutz-Priorität von «mittel» bis «hoch» wurden bevorzugt. Sieben untersuchte Standorte wurden zufällig angetroffen (d. h., sie waren nicht in der Datengrundlage vorhanden).

Quellen wurden einem hydrologischen Typus gemäss dem Steinmann-Thienemann Konzept zugeteilt (Rheo-, Helo- und Limnokren; Steinmann 1915, Thienemann 1922). Da Limnokrenen im Gebiet selten sind (Küry 2020, mündl. Kommunikation), wurden sie nicht aufgenommen. In einigen Fällen wurde als Mischform zwischen Rheo- und Helokren der Typus Wander- bzw. lineare Quelle vergeben (Zollhöfer 1997, Küry et al. 2019a).

Vegetationsaufnahmen wurden vom 30. Juli bis 14. August 2020 durchgeführt. Pro Standort wurden drei Vegetationsaufnahmen von 1 m² Fläche angefertigt. Die drei Aufnahmeflächen wurden so angeordnet, um die im Feld ersichtlichen Umweltgradienten oder Variabilität möglichst gut abzubilden. Obwohl die Flächen in sich möglichst homogen sein sollten, wurden weder vermeintlich «fragmentarische» noch «untypische» Standorte aus den Aufnahmen ausgeschlossen, um die reelle Situation möglichst komplett zu erfassen (Dengler et al. 2005). Pro Quadratmeter wurde das Artenvorkommen und die prozentuale Deckungsstärke von Gefässpflanzen und Moosen aufgenommen («shoot presence»). Für die Gefässpflanzen folgt die Nomenklatur der Checkliste 2017 der Flora der Schweiz (Juillerat et al. 2017), für die Moose der Checkliste 2013 der Schweizer Moose (Meier et al. 2013). Die Gefässpflanzen wurden mit Werken von Hess et al. (2015) und Eggenberg & Möhl (2013) bestimmt. Für die Bestimmung der Moose wurden folgende Werke herangezogen: Burck (1947); Paton (1999); Frahm & Frey (2004); Smith (2004); Frey et al. (2006); Atherton et al. (2010); und Lüth (2019). Die Arten *Bryum pseudotriquetrum* und *B. bimum* werden als *B. pseudotriquetrum* aggr. zusammengefasst, da kaum fertile Funde vorkamen. Die Bestimmungen der anspruchsvollen Gattung *Philonotis* werden noch überprüft: Laut Smith (2004) ist *Philonotis fontana* besonders variabel, mit Formen die mit *P. caespitosa*, *P. tomentella* und *P. calcarea* verwechselt werden können (Geissler 1976).

Eine Vielzahl an strukturellen und chemisch-physikalischen Parameter wurden als mögliche erklärende Variablen für die Artenzusammensetzung aufgenommen (Tabelle 1). Kronenschlussgrad wurde mit dem App %cover, eine Annäherung an der hemisphärischen Fotografie, geschätzt. Die chemisch-physikalischen Parameter pH, elektrische Leitfähigkeit (als Indikator für Mineralgehalt, analog Sekulová et al. 2012), Temperatur, Sauerstoffgehalt und Sauerstoffsättigung wurden an drei Stellen pro Aufnahme im offenen Wasser gemessen, alternativ in 10 cm-tief gegrabene Löcher, die sich fortwährend mit Quellwasser auffüllten. Der Karbonatgehalt des Substrates wurde mittels Salzsäure-Test geschätzt (Bodenmann et al. 1997). Zeichen von Nutzung durch Menschen oder Tiere wurden im Feld vermerkt und mit Bundes- und kantonale Geodaten verglichen (swisstopo 2020, geoGR 2020).

Tabelle 1 Erfasste Umweltparameter.

Parameter	Einheit	Erläuterung
Breitengrad	°	World Geodetic System WGS 1984
Längengrad	°	
Meereshöhe	m ü. M.	Schweizerischen Geländemodell TLM25
Quellfläche	m ²	Bereich des offenen Wassers unmittelbar um den Quellaustritt
Quellbereich	m ²	Durchfeuchtete Fläche um den Quellaustritt
Quellschüttung	l/s	Schätzung
Maximale Wassertiefe	cm	
Maximale Mikrorelief	cm	Senkrechte Abweichung der Oberfläche von der Ebene
Karbonatgehalt des Substrats	-	Ordinalskala 0 bis 4
Kronenschluss	%	App %cover
Wassertemperatur	°C	Multisonde HQ40d (Hach); Messung im Quellwasser
pH	-	Multisonde HQ40d (Hach); Messung im Quellwasser
Elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	Multisonde HQ40d (Hach); Messung im Quellwasser
Sauerstoffgehalt	mg/l	Multisonde HQ40d (Hach); Messung im Quellwasser
Sauerstoffsättigung	%	Multisonde HQ40d (Hach); Messung im Quellwasser
Deckung Vegetation	%	Gesamtdeckung Vegetation, Deckungen Baum-, Strauch-, Kraut- und Kryptogamenschicht
Maximale Wuchshöhen der Schichten	cm	
Bodenbedeckung	%	Offenes Wasser, Streu, Totholz, Steine / Fels, Kies / Grus, Feinerde

2.3. Strukturhebung

Die Strukturhebung beruhte auf der im Auftrag des BAFU entwickelten Methode für das nationale Verzeichnis der Quell-Lebensräume (Küry et al. 2019a). Als weiteres Hilfsmittel diente die Anleitung für die Strukturhebungen in den Bündner Pärken (Küry 2018).

Wenige Parameter aus den Standard-Protokollblättern wurden in der ökologischen Interpretation mit einbezogen: Quellfläche (benetzter Bereich), Fläche des Quellbereichs (feuchter Bereich um den Austritt) und Quellschüttung (Tabelle 1). Die Abgrenzung des Quellbereichs folgt dem Schema der BAFU-Strukturhebungen (Küry et al. 2019a). Eine grobe Schätzung der Quellschüttung wurde an einer gleichförmigen Stelle aus der Fliessgeschwindigkeit (Driftkörpermethode) berechnet, oder durch das Auffüllen eines Gefässes an einem Übersturz über eine definierte Zeitperiode (Küry et al. 2019a).

2.4. Klassifikation

Die Klassifikation erfolgte mit dem modifizierten TWINSpan-Algorithmus (Roleček et al. 2009) in der Software JUICE (Tichý 2002) klassifiziert (Version 7.1.25, 2020), mit einer minimalen Gruppengrösse von 3 und mit dem durchschnittlichen Sørensen-Koeffizienten als Ähnlichkeitsindex. Die «Pseudo-species Cut Levels» wurden bei 0, 5 und 40% Deckung gesetzt, um möglichst klare diagnostische Arten für die Gruppen zu erzielen und die räumliche Aufteilung der Cluster in der Ordination zu optimieren. Für die endgültigen Einheiten wurden diagnostische Arten aufgrund dem standardisierten phi-Koeffizienten (Chytrý et al. 2002, Tichý & Chytrý 2006) ermittelt, wobei phi-Werte von 0.25 oder grösser als diagnostisch, solche gleich 0.5 oder grösser als hochdiagnostisch galten. Nur nach Prüfung der Signifikanz mit Fisher's exact test (Fisher 1922) wurden Arten mit den entsprechenden phi-Werten als

diagnostisch akzeptiert. Arten mit einer Stetigkeit grösser als 50% im entsprechenden Cluster wurden als konstante Arten definiert. Die Ergebnisse der Klassifikation wurden mit Angaben aus der Literatur verglichen, um sie syntaxonomisch einzuordnen und ökologisch zu charakterisieren. An dieser Stelle soll vermerkt werden, dass dieser Datensatz weder für sämtliche Vegetationstypen der Region noch für alle Quelltypen schweizweit repräsentativ ist.

2.5. Statistische Auswertung

Die Daten wurden mit Microsoft Excel für Windows und Vegedaz (WSL 2019) verwaltet. Statistische Analysen wurden in R (Version 3.1.2, R Core Team 2017) unter Verwendung der RStudio-Erweiterung (Version 1.1.383, RStudio Team 2016) durchgeführt. Alle alternativen Hypothesen waren zweiseitig, sofern nicht ausdrücklich erwähnt. Das Signifikanzniveau wurde bei $\alpha = 0.05$ festgelegt.

In Vegedaz wurden die mit Wurzel gewichteten Mittel der Indikatorwerte für Feuchtigkeit, Bodenreaktion, Temperatur, Licht, Durchlüftung, Nährstoff- und Humusgehalt für jede Vegetationsaufnahme gebildet (Landolt et al. 2010). Gemäss Central Limit Theorem (Quinn & Keough 2002) wurde auf eine Beurteilung der Normalverteilung verzichtet. Bei erheblich abweichenden Varianzen (um den Faktor 4) wurden die Daten mit dekadischem Logarithmus oder Wurzel (Deckungswerte) transformiert; falls die Varianzen nicht in einen akzeptablen Bereich gebracht werden konnten, wurde die Signifikanz der Unterschiede mit Welch's ANOVA («one-way») getestet, mit Games-Howell Tests für die post-hoc Analyse. Sonst wurde die Signifikanz der Unterschiede der Mittelwerte via einfaktorieller Varianzanalyse (ANOVA) geprüft. Für die post-hoc Analyse wurden Tukey-Tests ausgeführt. In wenigen Fällen wurde Welch's t-Test verwendet, um die Signifikanz der Unterschiede zwischen zwei unabhängigen Gruppen zu ermitteln.

Auf den Vegetationsdaten wurde eine «Detrended Correspondence Analysis» (DCA) mit dem R-Paket «vegan» (Version 2.5) durchgeführt, wobei seltene Arten tiefergewichtet wurden (Oksanen et al. 2019). Zeigerwerte (Landolt et al. 2010) und erfasste Umweltfaktoren wurden passiv auf einer Visualisierung der Ordination projiziert.

Um massgebende Faktoren der Biodiversität zu untersuchen wurden für sämtliche chemisch-physikalischen und strukturellen Parameter (Tabelle 1) einfache lineare Modelle aufgebaut, mit der Artenzahl als abhängiger Variabel. Nach visueller Überprüfung der Residuen wurden lineare Regressionen berechnet, ggf. nach logarithmischer Transformation der Variabel, wo angemessen.

3. Ergebnisse

3.1. Artenreichtum

Insgesamt wurden 100 Moos- und 164 Gefässpflanzen-Arten erfasst. Der mittlere Artenreichtum betrug 21.7 Arten pro 1 m². Die artenreichste Aufnahme, P6-2 (Blais da Chagiosch, Naz), befand sich auf einem grossflächigen Helokren-System, welche als Sömmerungsfläche benutzt wird. Sie zeichnete sich durch 31 Gefässpflanzen- und 10 Moosarten auf 1 m² aus. Die Aufnahme mit den wenigsten Arten (11 Arten pro 1 m², inkl. 2 Moosarten) befand sich auf einem stark schüttenden Rheokren, die Anzeichen von Eutrophierung aufwies (Nr. 1220, Mon). Die häufigsten Arten der Aufnahmen waren *Bryum*

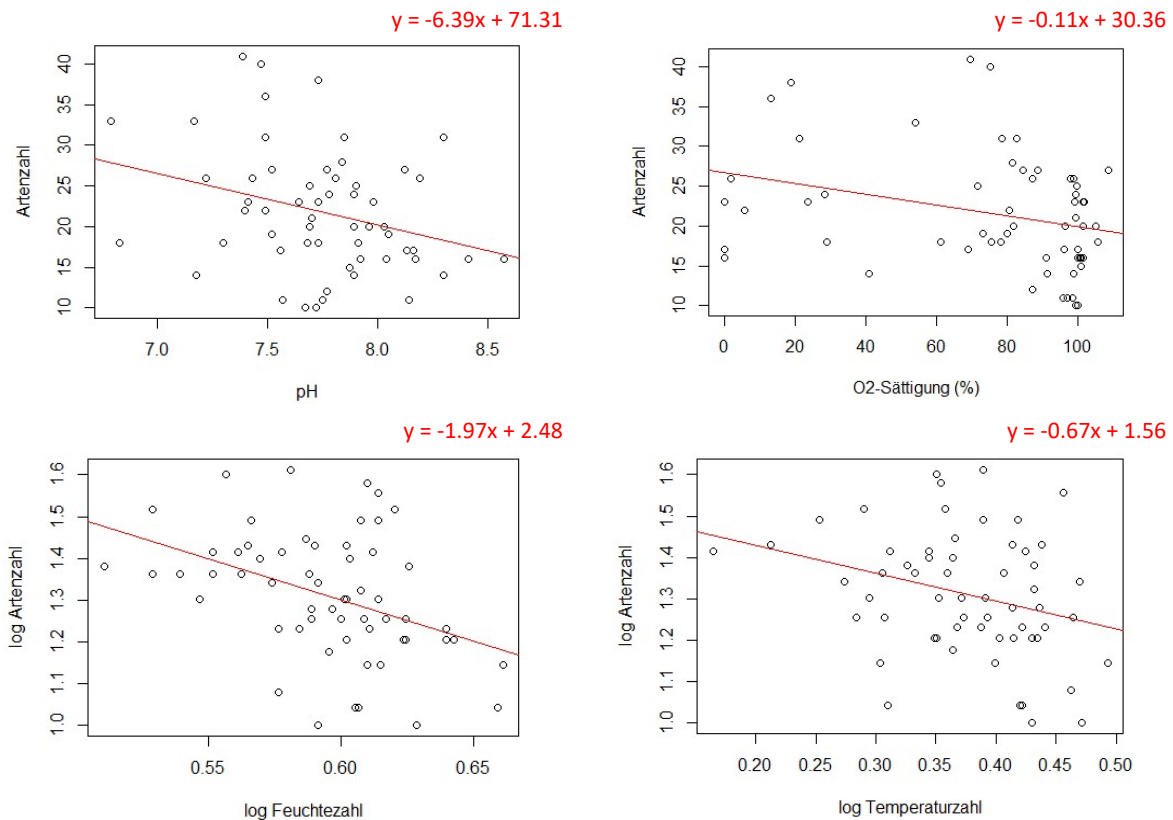
pseudotriquetrum (Vorkommen in 70% der Vegetationsaufnahmen) und *Aster bellidiastrum* (62%). In etwa der Hälfte der Aufnahmen wurde *Palustriella commutata* erfasst, sowohl auf Kalk als auch Silikat. Andere häufige Arten waren *Deschampsia cespitosa*, *Agrostis gigantea*, *Aneura pinguis* und *Potentilla erecta*. Sieben Arten der Aufnahmen sind gefährdet oder potentiell gefährdet (Tabelle 2).

Tabelle 2: Erfasste Arten der Roten Liste sowie potentiell gefährdete Arten (Schnyder et al. 2004, Bornand et al. 2016). Gefährdung: NT – potentiell gefährdet; VU – verletzlich; EN – stark gefährdet. Nationale Priorität: 1 – sehr hoch; 2 – hoch; 3 – mittel; 4 – mässig. Internationale Verantwortung: 1 – gering; 2 – mittel; 3 – hoch; 4 – sehr hoch. Alle Arten kamen jeweils einmal in den Aufnahmen vor.

Art	Nationaler Gefährdungsgrad	Nationale Priorität	Internationale Verantwortung der Schweiz
<i>Carex dioica</i>	VU	4	1
<i>Dactylorhiza lapponica</i>	NT	4	2
<i>Salix ×hegetschweileri</i>	EN	1	3
<i>Tofieldia pusilla</i>	NT	3	3
<i>Bryoerythrophyllum alpigenum</i>	VU	4	1
<i>Catoscopium nigratum</i>	VU	4	1
<i>Philonotis caespitosa</i>	VU	4	1

Aus den berechneten linearen Regressionen ergibt sich, dass sechs Umweltparameter mit der Artenzahl der Aufnahmen signifikant zusammenhängen: Flächengrösse des Quellbereiches, Temperaturzahl, Feuchtezahl sowie pH, O₂-Gehalt und O₂-Sättigung des Quellwassers (

Abbildung 4; O₂-Gehalt nicht abgebildet). Da die Residuen der Quellbereichs-Grösse vs. Artenzahl auf eine stark nichtlineare Beziehung hinwiesen, wurde die lineare Regression verworfen. Die Regression mit der Feuchtezahl erklärt 17.1% der Verteilung der Daten; die anderen Parameter erklären jeweils weniger als 10% der Verteilung. Die stärkste Steigung weist die Regression mit pH auf, sodass eine pH-Zunahme um 1 innerhalb des abgedeckten Gradienten mit dem Verlust von circa 6.4 Arten verbunden ist. Bei der O₂-Sättigung sind bei einer Zunahme um 10% eine Abnahme des Artenreichtums um circa 1.1 Arten zu erwarten.



LM	r ²	p (Steigung)	F (df)
Artenzahl-pH	0.091	0.023	5.486 (1:55)
Artenzahl-O ₂ -Sättigung	0.172	0.001	11.45 (1:55)
Artenzahl-O ₂ -Gehalt	0.168	0.002	11.1 (1:55)
log Artenzahl-log Feuchtezahl	0.171	0.001	11.99 (1:58)
log Artenzahl-log Temperaturzahl	0.087	0.022	5.501 (1:58)

Abbildung 4: Lineare Regressionen für die signifikanten Beziehungen zwischen Artenzahl und Umweltparametern. Die Grafik für die Beziehung zwischen O₂-Gehalt und Artenzahl wird nicht gezeigt; ihre Gleichung ist $y = -1.04x + 29.5$.

3.2. Klassifikation

Vergleicht man die verschiedenen Clustereinteilungen, so waren 7 Cluster die höchste Anzahl, bei der jeder der terminalen Cluster eine gut floristisch definierte Einheit aus mehr als 5 Vegetationsaufnahmen ergab; dabei wurde Cluster 1 (lediglich eine Aufnahme) als Ausreisser nicht berücksichtigt (Abs. 3.3.1). Für die höheren Syntaxa wurden Gruppierungen von Cluster gewählt, die ökologisch gut interpretierbare Einheiten ergaben. Für die meisten Quellen gehörten alle drei Aufnahmen zu einem gemeinsamen Cluster; bei sechs Quellen wurden die Aufnahmen über zwei Cluster aufgeteilt.

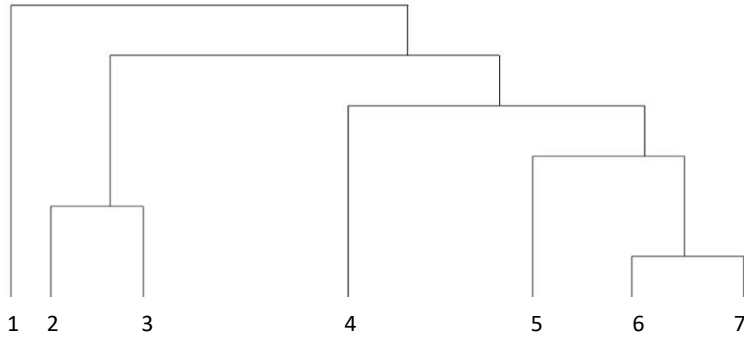


Abbildung 5: Dendrogramm der Klassifikation mit TWINSPLAN.

3.3. Vergleich der Quelltypen

Der pH des Quellwassers unterschied sich wenig zwischen den Vegetationstypen (Mittel zwischen 7.5 und 7.9, also schwach alkalisch), und der Sauerstoffgehalt war mit wenigen Ausnahmen hoch (Tabelle 4). Die Quellen waren meist kalt (3.7–7 °C) bis mässig erwärmt (7–11 °C), in wenigen Fällen jedoch stark erwärmt (> 11 °C). Moose dominierten in vielen Fällen; die Deckung der Moosschicht betrug im Durchschnitt 50%, diejenige der Krautschicht 46%. Die Quelltypen gedeihen auf sehr unterschiedlichen Substrat-Beschaffenheiten, von steinig-felsig bis schlammig. Die Aufnahmen waren voll besonnt bis stark beschattet. Die maximale Höhe der Krautschicht, oft an fertilen Halmen von *Deschampsia cespitosa* gemessen, war im Durchschnitt 54 cm.

In den folgenden Abschnitten werden die Cluster der numerischen Klassifikation (Abbildung 5) beschrieben (gekürzte synoptische Tabelle: Tabelle 5, Stetigkeitstabelle im Anhang 1, sortierte Aufnahmetabelle im Anhang 2).

Tabelle 3: Arithmetische Mittel-, Minimal- und Maximalwerte für erhobene Umweltvariablen über allen Aufnahmen. Signifikante Unterschiede sind mit Sternchen vermerkt: $p < 0.001$ (***) ; $p < 0.01$ (**). Die Ordinalskala des Karbonats im Boden ist wie folgt zu interpretieren: 0, kein Karbonat vorhanden; 1, nur Spuren von Karbonat; 2, < 2% Karbonat; 3, 2–10% Karbonat; 4, > 10% Karbonat (Bodenmann et al. 1997, verändert).

	Mittel	Min.	Max.	Test, Transformation	p-Wert	
Meereshöhe (m ü. M.) ***	1'575	964	2'122	one-way	< 0.001	$F_{(5:14.598)} = 30.753$
Fläche Quelle (m ²)	7	1	20	one-way	0.183	
Neigung (°)	19	4	46	ANOVA	0.911	
Max. Mikrorelief (cm) *	22	4	77	ANOVA, log10	0.010	$r^2 = 0.491$
Kronenschluss (%)	28	0	82	ANOVA	0.415	
Schüttung (l/s) **	5	0.03	25	one-way	0.005	$F_{(5:15.655)} = 10.41$
Max. Wassertiefe (cm) **	5	0	26	ANOVA, log10	0.005	$r^2 = 0.139$
Max. Höhe Krautschicht (cm)	54	16	150	ANOVA	0.559	
Deckung Krautschicht (%)	46	0.2	92	ANOVA	0.574	
Deckung Moosschicht (%)	50	5	96	one-way	0.503	
Artenzahl	21.7	10	41	ANOVA	0.845	
Gefässpflanzen-Arten ***	13.6	5	31	one-way	< 0.001	$F_{(5:17.97)} = 9.855$
Moosarten	7.3	1	17	ANOVA	0.130	
Substrat						
Offenes Wasser (%)	22	0	69	ANOVA	0.103	
Streu (%) *	17	0.1	95	one-way	0.047	$F_{(5:15.834)} = 2.922$

Totholz (%)	3	0	20	one-way	0.792	
Steine, Fels (%) ***	29	0	95	one-way	< 0.001	$F_{(5;16.881)} = 14.336$
Kies, Grus (%)	22	0	85	ANOVA	0.531	
Feinerde (%) **	49	0	100	ANOVA	0.006	$r^2 = 0.127$
Karbonat (Boden) ***	1.6	0	4	ANOVA	< 0.001	$r^2 = 0.491$
Quellwasser						
Temp. Austritt (°C) ***	8.5	3.7	13.0	one-way	< 0.001	$F_{(5;16.36)} = 16.828$
Leitfähigkeit (µS/cm) ***	487	131	1299	one-way	< 0.001	$F_{(5;16.224)} = 9.255$
pH *	7.7	6.8	8.6	one-way	0.046	$F_{(5;14.598)} = 16.112$
O ₂ -Gehalt (mg/l) ***	7.37	0.17	10.81	one-way	< 0.001	$F_{(5;14.598)} = 16.112$
O ₂ -Sättigung (%) ***	78.7	1.9	108.6	one-way	< 0.001	$F_{(5;13.915)} = 9.388$

Tabelle 4: Arithmetische Mittelwerte für erhobene Umweltvariablen in den sieben unterschiedenen Clustern. Die Angaben für den Typ 1 werden nicht in die statistische Analyse miteinbezogen, da es sich um eine einzige Vegetationsaufnahme handelt. Signifikante Unterschiede sind mit Sternchen vermerkt: $p < 0.001$ (***); $p < 0.01$ (**). Die Ordinalskala des Karbonats im Boden ist wie folgt zu interpretieren: 0, kein Karbonat vorhanden; 1, nur Spuren von Karbonat; 2, < 2% Karbonat; 3, 2–10% Karbonat; 4, > 10% Karbonat (Bodenmann et al. 1997, verändert).

Vegetationstyp	1	2	3	4	5	6	7
Anzahl Vegetationsaufnahmen	1	5	9	21	5	6	13
Meereshöhe (m ü. M.) ***	1'760	1'612	1'708	1'905	1'151	1'219	1'251
Fläche Quelle (m ²)	7	3.6	8.9	5.6	5.2	10.5	7.0
Neigung (°)	14.0	18.4	16.9	18.8	20.8	27.2	15.8
Max. Mikrorelief (cm) *	50.0	48.2	23.0	19.8	19	14.5	17.2
Kronenschluss (%)	63.0	48.8	15.7	13.7	40.6	43.7	28.3
Schüttung (l/s) **	25	6.2	8.5	1.8	0.2	12.5	1.5
Max. Wassertiefe (cm) **	7.0	11.0	10.8	3.2	4.0	1.7	4.0
Max. Höhe Krautschicht (cm)	31.0	88.2	61.7	40.9	79.0	43.2	55.5
Deckung Krautschicht (%)	20.0	58.0	40.0	46.0	63.2	31.2	45.9
Deckung Moosschicht (%)	60.0	59.6	60.1	44.0	52.8	54.0	45.0
Artenzahl	23.0	19.4	18.2	24.3	26.2	18.3	20.2
Gefässpflanzen-Arten ***	6.0	9.0	10.0	17.4	15.2	8.8	13.7
Moosarten	17.0	9.2	7.7	6.4	10.4	8.3	5.2
Substrat							
Offenes Wasser (%)	21.0	21.2	34.3	22.3	12.0	6.3	22.5
Streu (%) *	3.0	38.6	20.1	15.9	14.4	4.5	16.3
Totholz (%)	0.0	3.2	2.6	1.9	2.3	6.9	1.9
Steine, Fels (%) ***	61.0	34.4	70.3	21.4	7.0	20.7	20.2
Kies, Grus (%)	9.0	9.4	18.1	33.3	23.2	16.0	15.2
Feinerde (%) **	30.0	58.2	11.3	45.3	71.8	63.3	64.7
Karbonat (Boden) ***	1.0	0.4	0.8	0.6	2.4	3.0	3.2
Quellwasser							
Temp. Austritt (°C) ***	3.8	5.2	5.1	9.5	10.2	9.1	10.5
Leitfähigkeit (µS/cm) ***	338	285	319	288	695	821	735
pH *	7.7	7.9	7.9	7.5	7.7	7.9	7.9
O ₂ -Gehalt (mg/l) ***	10.59	8.5	10.2	6.7	3.1	8.1	7.0
O ₂ -Sättigung (%) ***	101.5	81.5	100.0	67.4	31.9	86.7	75.6

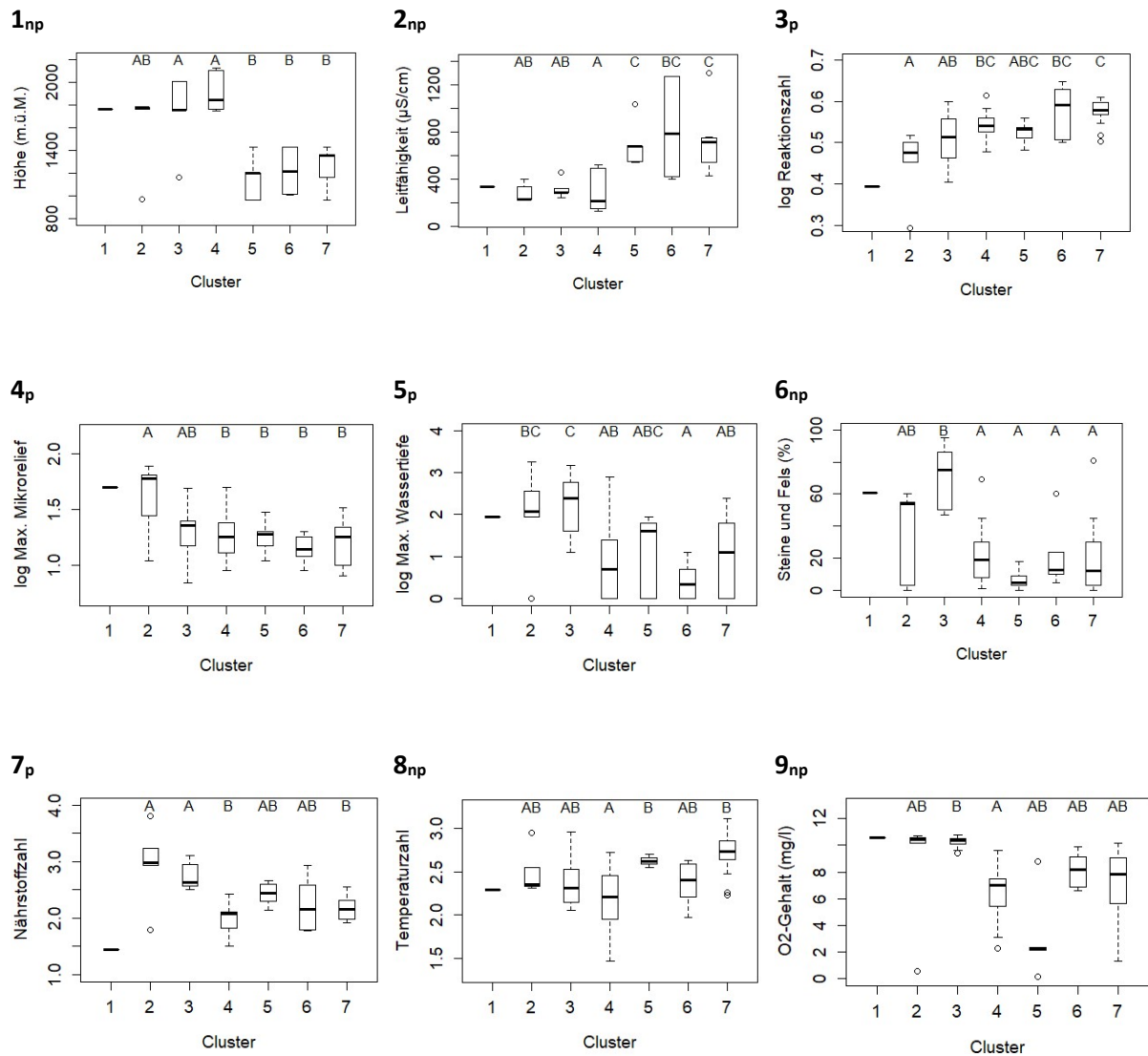


Abbildung 6: Boxplots einer Auswahl ökologischer Parameter. Balken ohne gemeinsame Buchstaben unterscheiden sich signifikant voneinander. Variablen mit Subskript «p» wurden mit parametrischen Verfahren (ANOVA, Tukey Test) beurteilt, für Variablen mit Subskript «np» wurden nichtparametrische Tests eingesetzt (Welch's ANOVA, Games-Howell Test).

3.3.1. Typ 1: Stark schüttende Rheokrene auf Blockschutt

Dieser Typ bestand aus einer einzigen Aufnahme (1203_1) im lichten Bergwald auf 1'760 m ü. M.: ein tiefer Austritt von sehr kaltem Wasser (3.9° C) unter einem massiven Felsüberhang, mit dem Grossteil der Vegetation auf Gestein wachsend. Viele vorhandene Arten waren in der Untersuchung einmalig (z. B. *Sphagnum capillifolium*, *Bryoerythrophyllum alpigenum*, *Anastrophyllum minutum*). In der Ordination lag diese Aufnahme mehr als 2 SD vom nächsten Punkt entfernt (DCA-Achse 1). Dieser Typ wurde aus diesen Gründen post-hoc aus der Klassifikation und Ordination ausgeschlossen. Die anderen Aufnahmen dieser extrem heterogenen Quelle 1203 gehören jeweils den Typen 2 und 3.

3.3.2. Typ 2: *Rhizomnium magnifolium*-*Chaerophyllum hirsutum*-Gesellschaft: Mineralarme Quellen in subalpinen Waldlichtungen (Abbildung 7)

Diagnostische Arten: *Rhizomnium magnifolium*, *Geranium sylvaticum*, *Calamagrostis villosa*

Konstante Arten: *Cratoneuron decipiens*, *Saxifraga rotundifolia*, *Plagiochila porelloides*, *Oxalis acetosella*, *Viola biflora*, *Bryum pseudotriquetrum*, *Brachythecium rivulare*, *Chaerophyllum hirsutum*

Diese Vegetationsaufnahmen setzte sich aus Arten zusammen, welche geschützte Standorte bevorzugen. *Brachythecium rivulare* kam mit hoher Stetigkeit vor, während *Palustriella commutata* fehlte. Streu erreichte einen hohen Deckungsgrad. Die Krautschicht war kräftig entwickelt (Deckung \bar{x} = 68%), mit einer maximalen Wuchshöhe von durchschnittlich 88 cm. Das Quellwasser hatte eine tiefe Leitfähigkeit, war meist sauerstoffreich und sehr kalt. Es handelte sich meist um Rheokrene mit mittlerer bis starker Schüttung (Tabelle 4). Das durchschnittliche maximale Mikrorelief war mit 48.2 cm signifikant grösser als in vielen anderen Typen (Abbildung 6, Nr. 4). Auch die Nährstoffzahl war signifikant grösser als bei vielen anderen Typen (Abbildung 6, Nr. 7).

3.3.3. Typ 3: *Epilobium alsinifolium*-*Brachythecium rivulare*-Gesellschaft: Mineralarme, kaltstenotherme Offenland-Quellen (Abbildung 8)

Diagnostische Arten: *Epilobium alsinifolium*, *Saxifraga stellaris*, *Brachythecium rivulare*, *Chaerophyllum hirsutum*
Konstante Arten: *Deschampsia cespitosa*, *Palustriella commutata*, *Polygonum viviparum*, *Agrostis stolonifera*, *Viola biflora*, *Bryum pseudotriquetrum*

Diese Vegetation entwickelte sich auf der subalpinen Stufe unter Einfluss von sauerstoffreichem, kaltem Quellwasser (\bar{x} = 5.5° C), beinahe ohne Beschattung. Im Vergleich zu anderen Offenland-Quellen der Untersuchung war das Wasser signifikant sauerstoffreicher (\bar{x} = 7.75 mg/l) (Abbildung 6, Grafik 9). Die mittlere Deckung der Moosschicht war mit 60% vergleichsweise hoch, und *Palustriella commutata* dominierte stark in vielen Aufnahmen, was die relativ tiefe Artenzahl erklären mag. Es handelte sich wiederum um stark schüttende Rheokrene. Die Deckung von Stein und Fels überstieg viele anderen Typen signifikant (Abbildung 6, Nr. 6).

3.3.4. Typ 4: *Pinguicula alpina*-*Palustriella falcati*-Gesellschaft: Mineralarme Quellen auf Alpweiden (Abbildung 9)

Diagnostische Arten: *Pinguicula alpina*, *Selaginella selaginoides*, *Salix foetida*, *Palustriella falcata*, *Arabis subcoriacea*, *Juncus alpinoarticulatus*

Konstante Arten: *Deschampsia cespitosa*, *Aster bellidiastrum*, *Aneura pinguis*, *Campylium stellatum* subsp. *pro-tensum*, *Polygonum viviparum*, *Saxifraga aizoides*, *Tofieldia calyculata*, *Agrostis gigantea*, *Bryum pseudotriquetrum*, *Potentilla erecta*, *Carex flacca*

Diese Aufnahmen umfassten oligotrophe Quellen auf Weiden in der subalpinen bis alpinen Stufe. Von den 21 Aufnahmeflächen lagen 15 auf Sömmerungsflächen für Vieh, 3 auf einer Pferdeweide, und 3 im Wald, ohne angebliche Beweidung; allerdings konnten bei den letztgenannten eine Nutzung als Waldweide nicht ausgeschlossen werden. Die artenreichsten Vegetationsaufnahmen der Untersuchung gehörten zu diesem Typ. Diese Quellen waren meist voller Besonnung ausgesetzt oder lediglich schwach beschattet (Tabelle 4). Teilweise wurden in seichten Bereichen sehr hohe Wassertemperaturen gemessen. Das Wasser war signifikant seichter als bei den Typen 2 und 3 (Abbildung 6, Grafik 5), und die Vegetation hatte eine signifikant tiefere Temperaturzahl als Typ 5 (Abbildung 6, Nr. 8). Die Nährstoffzahl war signifikant tiefer als bei den anderen hochgelegenen Quellen (Abbildung 6, Nr. 7).

3.3.5. Typ 5: *Fissidens dubius*-*Cratoneuron decipiens*-Gesellschaft: Mineralreiche, montane Waldsümpfe (Abbildung 10)

Diagnostische Arten: *Fissidens dubius*, *Plagiochila asplenioides*, *Knautia dipsacifolia*

Konstante Arten: *Deschampsia caespitosa*, *Aster bellidiastrum*, *Picea abies*-Schösslinge, *Platydictya jungermannioides*, *Hylocomium splendens*, *Palustriella commutata*, *Cratoneuron decipiens*, *Petasites albus*, *Rhytidadelphus triquetrus*, *Carex ferruginea*, *Equisetum palustre*, *Potentilla erecta*, *Carex flacca*

Diese Helokrene befanden sich in Wäldern der montanen Stufe. Das Substrat war basisch, nährstoffreich und reich an Feinerde, das Quellwasser relativ warm und mit tiefer Sauerstoffsättigung ($\bar{x} = 32\%$). Der Sauerstoffgehalt des Quellwassers war signifikant tiefer als bei vielen anderen Typen (Tabelle 4). Der Kronenschluss variierte stark. Zu den Aufnahmen gehörten Quellen mit starken Trittschäden durch Wild. Die Quellen waren eher kleinflächig und schwach schüttend (Tabelle 4). Die Deckung der Krautschicht war meist höher als diejenige der Moosschicht, was für diese Untersuchung ungewöhnlich ist.

3.3.6. Typ 6: *Plagiomnium medium*-*Palustriella commutata*-Gesellschaft: Mineralreiche Waldquellen (Abbildung 11)

Diagnostische Arten: *Brachythecium glareosum*, *Plagiomnium medium*

Konstante Arten: *Aster bellidiastrum*, *Picea abies*-Schösslinge, *Aneura pinguis*, *Campylium stellatum* subsp. *protensum*, *Dactylorhiza maculata* aggr., *Palustriella commutata*, *Plagiomnium undulatum*, *Cratoneuron decipiens*, *Agrostis gigantea*, *Sesleria caerulea*, *Equisetum arvense*, *Bryum pseudotriquetrum*, *Crepis paludosa*, *Carex flacca*

Diese Aufnahmen waren dem Typ 5 oberflächlich ähnlich: es handelte sich wiederum um basenreiche, beschattete Quellen der montanen Stufe. Die Hälfte der Vegetationsaufnahmen wiesen deutliche Kalksinterbildung auf; vielleicht aus diesem Grunde waren die Vegetationsaufnahmen im Durchschnitt für den Datensatz artenarm ($\bar{x} = 18.3$ Arten / m²). Das Wasser war im Gegensatz zur Gruppe 4 mässig sauerstoffreich, und die Standorte waren weniger nährstoffreich als diejenigen der Gruppe 4. Moose dominierten über Gefässpflanzen, mehr als in den anderen Gruppen (Tabelle 4). Diese grossflächigen Quellen besiedelten steile, bewaldete Hänge.

3.3.7. Typ 7: *Carex davalliana*-*Palustriella commutata*-Gesellschaft: Montane Kalkmoor-Quellen (Abbildung 12)

Diagnostische Art: *Carex davalliana*

Konstante Arten: *Aster bellidiastrum*, *Molinia caerulea*, *Palustriella commutata*, *Agrostis gigantea*, *Sesleria caerulea*, *Bryum pseudotriquetrum*, *Potentilla erecta*, *Carex lepidocarpa*, *Carex flacca*

Dieser Vegetationstyp wurde von warmem, basenreichem Quellwasser beeinflusst, teilweise mit Kalksinterbildung. Der Kronenschluss variierte zwischen 14 und 68%, aber die Arten hatten meist eine mässig hohe Lichtzahl ($\bar{x} = 3.34$; Abbildung 6, Nr. 9). Viele Arten der basenreichen Flachmoore kamen vor. Die Temperaturzahl der Vegetation war signifikant höher als bei Typ 4 (Abbildung 6, Nr. 8). Weder Moose noch Gefässpflanzen schienen dominierend zu sein. Das feinerdereiche Substrat wurde eher schwach durchsickert.



Abbildung 7: Typ 2 – Die Quelle 1203 (Preda, Isla) fließt in einem lichten Bergwald auf Blockschutt, von üppigem Bewuchs umgeben (Foto H. Seiler).



Abbildung 8: Typ 3 – Die Quelle P7 (Naz, Puntschiala da Tschoff) fließt direkt in die Albula. *Epilobium alsinifolium*, *Saxifraga stellaris* und *S. aizoides* wurzeln auf mächtigen Polstern von *Brachythecium rivulare* und *Palustriella commutata* (Foto H. Seiler).



Abbildung 9: Typ 4 – Die Quelle P3 (Alp Sanaspans), ein Rheokren auf Silikat. Gut ausgeprägte Mooschicht mit *Palustriella falcata* und *Philonotis tomentella*, (Foto H. Seiler).



Abbildung 10: Typ 5 – Die Quelle 1354, ein Helokren auf Kalk. In der üppigen Mooschicht wachsen *Scleropodium purum*, *Bryum pseudotriquetrum*, und *Palustriella commutata* (Foto H. Seiler).



Abbildung 11: Typ 6 – Die Quelle 0297 (Parseiras, Davos Falung). Das lückig bewachsene Substrat wird im benetzten Bereich mit Kalksinter flächig überzogen (Foto H. Seiler).



Abbildung 12: Typ 7 – Kalksinterterrasse im Quellkomplex 1454 (Salouf, Crap las Gneglas). *Saxifraga aizoides* prägt das Erscheinungsbild des Bestandes, begleitet von *Carex davalliana* und *Molinia caerulea* (Foto J. Dengler).

Tabelle 5: Stetigkeitstabelle für die numerische Klassifikation, gekürzt. Stetigkeiten sind prozentual angegeben; signifikante phi-Werte werden mit (*), hochsignifikante mit (**) markiert. Signifikante Werte sind hellgrün markiert, hochsignifikante dunkelgrün. Diagnostische Arten (oberer Teil der Tabelle) bestanden Fisher's exact Test, Begleitarten bestanden den Test nicht. Keine diagnostischen Arten werden für den Typ 1 hervorgehoben, da es sich um eine einzige Vegetationsaufnahme handelt.

Cluster		1	2	3	4	5	6	7
Anzahl Aufnahmen		1	5	9	21	5	6	13
Diagnostische Arten		Freq.						
<i>Rhizomnium magnifolium</i>	9	-	100 **	22	10	-	-	-
<i>Geranium sylvaticum</i>	3	-	60 **	-	-	-	-	-
<i>Calamagrostis villosa</i>	5	100	80 **	-	-	-	-	-
<i>Epilobium alsinifolium</i>	8	-	20	78 **	-	-	-	-
<i>Saxifraga stellaris</i>	9	-	-	67 **	14	-	-	-
<i>Brachythecium rivulare</i>	19	-	80	100 *	14	20	-	15
<i>Chaerophyllum hirsutum</i>	10	-	80	67 *	-	-	-	-
<i>Pinguicula alpina</i>	15	-	-	-	71 **	-	-	-
<i>Selaginella selaginoides</i>	16	-	-	-	67 **	-	-	15
<i>Salix foetida</i>	11	-	-	-	52 **	-	-	-
<i>Palustriella falcata</i>	12	-	20	-	52 **	-	-	-
<i>Arabis subcoriacea</i>	13	-	-	22	52 **	-	-	-
<i>Juncus alpinoarticulatus</i>	14	-	-	-	52 *	20	-	15
<i>Fissidens dubius</i>	7	-	-	-	5	80 **	-	15
<i>Plagiochila asplenioides</i>	7	-	-	-	-	80 **	33	8
<i>Knautia dipsacifolia</i>	8	-	20	-	-	80 **	33	8
<i>Brachythecium glareosum</i>	6	-	-	-	5	-	83 **	-
<i>Plagiomnium medium</i>	3	-	-	-	-	-	50 **	-
<i>Carex davalliana</i>	15	-	-	-	24	20	-	69 **
Begleitarten		Freq.						
<i>Bryum pseudotriquetrum</i>	42	-	60	100	62	40	100	69
<i>Aster bellidiastrum</i>	37	-	40	33	76	100	67	54
<i>Palustriella commutata</i>	33	-	-	78	33	80	67	85
<i>Carex flacca</i>	31	-	-	-	67	80	83	62
<i>Deschampsia cespitosa</i>	27	-	20	56	52	100 *	-	38
<i>Agrostis gigantea</i>	27	-	-	33	52	20	83 *	54
<i>Aneura pinguis</i>	26	-	-	33	57	20	67	46
<i>Potentilla erecta</i>	24	-	-	-	52	60	17	69 *
<i>Cratoneuron decipiens</i>	22	-	60	44	10	80	50	46
<i>Polygonum viviparum</i>	21	-	-	56 *	62 *	20	-	15
<i>Saxifraga aizoides</i>	21	-	-	22	62 *	-	-	46
<i>Campyllum stellatum subsp. protensum</i>	20	-	20	22	52	20	67 *	8
<i>Picea abies</i>	18	-	20	11	24	60	67	31
<i>Carex lepidocarpa</i>	18	-	-	-	43	40	-	54 *
<i>Tofieldia calyculata</i>	17	-	-	-	52 *	20	-	38
<i>Molinia caerulea</i>	15	-	-	-	29	20	-	62 *
<i>Sesleria caerulea</i>	14	-	-	-	19	-	50 *	54 *
<i>Equisetum variegatum</i>	14	-	-	11	43 *	-	-	31
<i>Crepis paludosa</i>	14	-	20	-	29	20	50	23
<i>Viola biflora</i>	14	-	60 *	56	14	20	-	15
<i>Agrostis stolonifera</i>	13	-	-	56 *	5	40	-	38
<i>Carex ferruginea</i>	12	-	-	22	10	60 *	-	38
<i>Equisetum palustre</i>	12	-	-	11	24	80 **	-	15
<i>Plagiochila porelloides</i>	11	-	60 *	33	14	-	33	-
<i>Fissidens adianthoides</i>	10	-	20	-	29	-	33	8
<i>Dactylorhiza maculata aggr.</i>	10	-	-	-	19	40	50 *	8
<i>Pinguicula vulgaris</i>	10	-	-	-	10	-	33	46 *
<i>Campyllum stellatum subsp. stellatum</i>	10	-	-	-	38 *	-	-	15
<i>Equisetum arvense</i>	9	-	-	22	-	20	67 *	15
<i>Oxalis acetosella</i>	9	100	60 *	-	-	40	17	15
<i>Hylocomium splendens</i>	8	100	40	-	5	60 *	-	8
<i>Taraxacum sp.</i>	8	-	20	-	5	-	17	38 *
<i>Cratoneuron filicinum aggr.</i>	8	-	20	22	10	40 *	-	8
<i>Petasites albus</i>	7	-	-	-	-	60 **	-	31
<i>Parnassia palustris</i>	7	-	-	-	19	-	-	23 *
<i>Juncus articulatus</i>	7	-	-	-	5	40 *	-	31
<i>Carex panicea</i>	7	-	-	-	29 *	-	-	8
<i>Vaccinium myrtillus</i>	6	100	40 *	11	5	-	-	8
<i>Plagiomnium elatum</i>	6	-	40 *	-	-	40 *	-	15
<i>Cirsium oleraceum</i>	6	-	20	11	-	-	33	15
<i>Campanula scheuchzeri</i>	6	-	-	22 *	19	-	-	-
<i>Plagiomnium undulatum</i>	6	-	20	-	-	20	50 *	8
<i>Carex frigida</i>	6	-	-	33 *	14	-	-	-
<i>Philonotis seriata</i>	6	-	-	-	29 *	-	-	-
<i>Rhytidadelphus triquetrus</i>	6	-	40	-	5	60 *	-	-
<i>Rubus saxatilis</i>	6	-	-	-	-	40 *	33	15
<i>Blindia acuta</i>	6	-	-	-	29 *	-	-	-
<i>Amblystegium fluviatile</i>	6	-	40 *	44 *	-	-	-	-
<i>Alchemilla coriacea aggr.</i>	6	-	-	22 *	19	-	-	-
<i>Platydictya jungermannioides</i>	5	-	-	-	5	60 **	-	8
<i>Tortella tortuosa aggr.</i>	5	-	-	-	10	40 *	-	8

3.4. Umweltgradienten

DCA-Achsen 1 und 2 erklären einen grossen Teil der Variation der Artenzusammensetzung (Eigenvalues 0.66 und 0.54, Abbildung 13). Die Länge der Achse 1 beträgt 5.09 Standardabweichungen, was eine hohe β -Diversität signalisiert, sodass die beiden Enden des Gradienten kaum gemeinsame Arten teilen (Abbildung 14). Die Achse 2 hat Gradientenlänge 3.51. Somit ist die Anwendung der DCA gerechtfertigt. Der Vegetationstyp 1 ($n = 1$) wurde als Ausreisser aus der Ordination weggelassen.

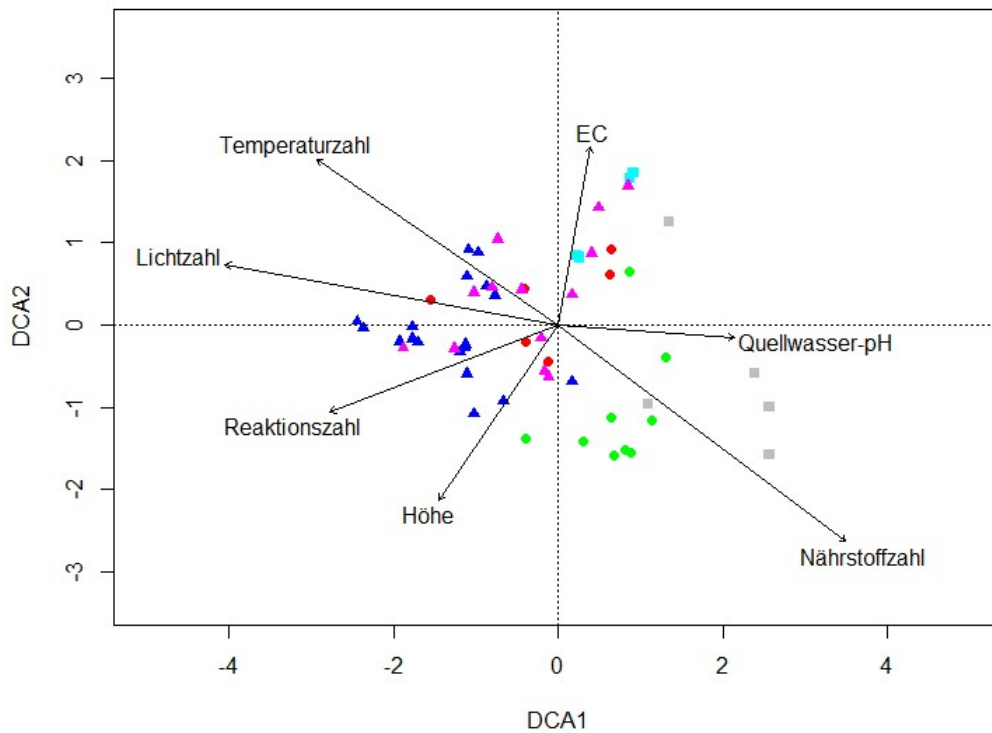


Abbildung 13: Gradient-Analyse (DCA) der vorhandenen Arten im Datensatz, mit projizierten abgeleiteten Umweltvariablen bzw. Indikatorwerten. EC – Leitfähigkeit des Quellwassers; ■ – Typ 2, mineralarme Quellen in subalpinen Waldlichtungen; ● – Typ 3, mineralarme, kaltstenotherme Offenlandquellen; ▲ – Typ 4, mineralarme Quellen auf alpinen Alpweiden; ■ – Typ 5, mineralreiche, montane Waldsümpfe; ● – Typ 6, mineralreiche Waldquellen; ▲ – Typ 7, montane Kalkmoorquellen. Die dargestellten Vektoren korrelieren mit mindestens $|r| = 0.80$ mit einer der beiden Achsen.

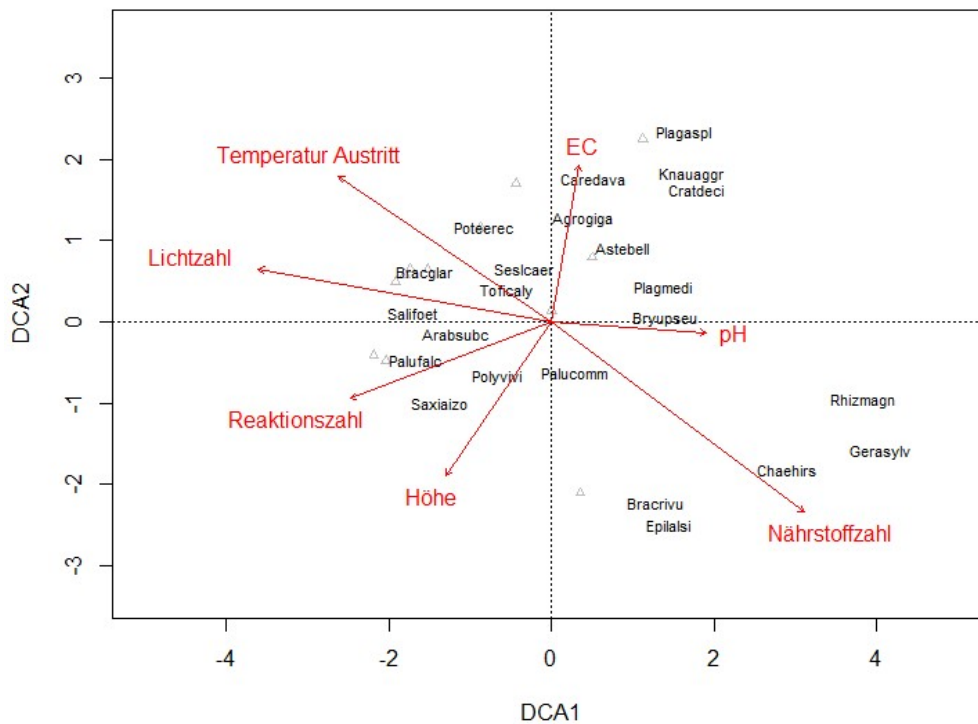


Abbildung 14: Gradient-Analyse (DCA) der vorhandenen Arten im Datensatz, mit projizierten abgeleiteten Umweltvariablen bzw. Indikatorwerten. Die 20 häufigsten Arten der Aufnahmen sowie die diagnostischen Arten der numerischen Klassifikation sind dargestellt; EC – Leitfähigkeit des Quellwassers. Arabsubc – *Arabis subcoriacea*; Agrogiga – *Agrostis gigantea*; Aneuping – *Aneura pinguis*; Astebell – *Aster bellidiastrum*; Bracglar – *Brachythecium glareosum*; Bracrivu – *Brachythecium rivulare*; Bryupseu – *Bryum pseudotriquetrum*; Caredava – *Carex davalliana*; Careflac – *Carex flacca*; Chaehirs – *Chaerophyllum hirsutum*; Cratdeci – *Cratoneuron decipiens*; Desccesp – *Deschampsia cespitosa*; Epilalsi – *Epilobium alsinifolium*; Equivari – *Equisetum variegatum*; Gerasylv – *Geranium sylvaticum*; Knauaggr – *Knautia dipsacifolia*; Palufalc – *Palustriella falcata*; Palucomm – *Palustriella commutata*; Plagaspl – *Plagiochila asplenioides*; Plagmedi – *Plagiomnium medium*; Polyvivi – *Polygonum viviparum*; Poteerec – *Potentilla erecta*; Rhizmagn – *Rhizomnium magnifolium*; Salifoe – *Salix foetida*; Saxiaizo – *–laris*; Seslcaer – *Sesleria caerulea*; Toficaly – *Tofieldia calyculata*.

4. Diskussion

4.1. Artenreichtum

Der Artenreichtum der Aufnahmen (100 Moosarten, 164 Gefässpflanzen-Arten) ist verglichen mit ähnlichen Studien hoch. Im Nationalpark Gesäuse (AT) wurden auf 46 unter-1 m²-grossen Vegetationsaufnahmen 97 Gefässpflanzen und 60 Moosarten erfasst (Suanjak 2007). Mogna et al. (2015) fanden in 48 Quellen in den ligurischen Alpen 135 Arten von Moos- und Gefässpflanzen. In den Kalkalpen (AT) konnte Weigand (1998) in 22 Quellen 77 Moosarten erfassen. In einer Studie von 19 Quellen im Adammello-Brenta Regionalpark (IT) fanden Cantonati und Ortler (1998) lediglich 58 Moosarten, jedoch erstaunliche 245 Gefässpflanzen-Arten. Die GrassPlot Datenbank (Dengler et al. 2018, Biurrun et al. 2019) gibt als mittlere Gesamtartenzahl der Feuchtgebiete in alpinen, borealen und gemässigten Klimazonen 15.4 Arten auf 1 m² an (n = 493) (GrassPlot Diversity Explorer 2020); in dieser Untersuchung wurde eine mittlere Artenzahl von 21.7 Arten pro m² verzeichnet. Allerdings sind in der Datenbank noch wenige Aufnahmen der *Montio-Cardaminetea* vertreten, und andere Feuchtgebiete (z. B. Röhrichte und Uferfluren) sind im Mittel allgemein artenärmer. Für Quellen der Schweizer Alpen, der westlichen Karpathen und des Gebirge Bulgariens fanden Sekulová et al. (2012) einen mittleren Artenreichtum von 25.0, 22.2 und 17.3 Arten pro 16 m². Es ist unklar, wieso die Aufnahmen im Parc Ela so

artenreich waren, insbesondere wenn die Artenzahl-Areal-Beziehung berücksichtigt wird. Mögliche Erklärungen sind die Aufnahme von Quellen mit sehr unterschiedlichen Umweltbedingungen (beispielsweise haben Sekulová et al. (2012) nur Quellen über der Baumgrenze aufgenommen) sowie die Gründlichkeit der kleinflächigen Aufnahmen.

Da die Vegetationsaufnahme nur einmal erfolgte, ist es möglich, dass einige Gefässpflanzen zur Zeit der Aufnahme nicht erfassbar oder bestimmbar waren. Zudem ist zu bemerken, dass viele Lebermoose nur auf Gattungsniveau bestimmt wurden. Flechten wurden nicht aufgenommen; allerdings wurden sie nur auf wenigen Flächen vorgefunden, oft nur auf Totholz-Stücken.

4.2. Standortsbedingungen

Die ökologischen Verhältnisse von Quellen sind im allgemeinen schwer zu erfassen, da sie klein und von starken Ökotonen geprägt sind (Brunke et al. 2015). Für diese Untersuchung wurde nur eine Einzelmessung der chemisch-physikalischen Parameter gemacht. Cantonati et al. empfehlen, diese Parameter über mindestens ein Jahr zu erfassen (2006). Obwohl Quellwässer in der Regel geringfügige chemisch-physikalische Veränderungen durchleben (Odum 1971), ist unbekannt, wie die Parameter im Gebiet über das Jahr variieren. Die angewendete BAFU-Strukturerhebungsmethode (Küry et al. 2019a) ist praktisch für die rasche Felderhebung der wichtigsten Merkmale, hat jedoch dementsprechend seine Limitierungen. Insbesondere bei der Schüttung handelt es sich um eine grobe Schätzung.

Die Vegetationstypen zeigen eine klare Auftrennung nach Meereshöhe und Leitfähigkeit des Quellwassers (Abbildung 6, Grafiken 1 und 2). Die erste Gruppe (Typen 1 bis 4) umfasst Quellen der subalpinen-alpinen Stufen mit einer mittleren Leitfähigkeit um $297 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($\sigma_x = 126 \mu\text{S}/\text{cm}$). Die mässig tiefe Leitfähigkeit könnte sowohl mit dem Chemismus des Grundwasserleiters als auch mit der kurzen Residenzzeit des Grundwassers im Aquifer (Catonati & Ortler 1998) zusammenhängen. Die mittlere Reaktionszahl entspricht einem pH zwischen schwach sauer und neutral ($\bar{x} = 3.31$, $\sigma_x = 0.43$). Die zweite Gruppe besteht aus montanen Quellen mit höheren Leitfähigkeiten ($\bar{x} = 748 \mu\text{S}/\text{cm}$), die allerdings stärker schwanken ($\sigma_x = 0.43 \mu\text{S}/\text{cm}$) und teilweise sehr hohe Werte erreichen – bis $1'299 \mu\text{S}/\text{cm}$ in einer Kalksinterquelle bei Parseiras. Hier ist laut Reaktionszahl das Substrat etwas basenreicher als bei der ersten Gruppe ($\bar{x} = 3.68$, $\sigma_x = 0.37$). Die Unterschiede an mittlerer Meereshöhe und Leitfähigkeit sind statistisch signifikant ($p < 0.001$ und $p = 0.002$, Welch's t-Test, einseitig). Die gemittelte Temperaturzahl der zweiten Gruppe ist signifikant höher ($p = 0.018$, Welch's t-Test, einseitig), aber die Differenz der Mittelwerte ist mit 0.33 nicht gross ($\bar{x}_1 = 2.27$, $\bar{x}_2 = 2.60$).

Innerhalb der Hauptgruppen besteht ein ersichtlicher Gradient der Beschattung (Abbildung 6, Grafik 9), der allerdings im Gesamtdatensatz nicht statistisch signifikant ausfällt, obwohl er einen grossen Teil der Variabilität in der Ordination erklärt ($|r| = 0.984$ mit DCA-Achse 1).

4.3. Klassifikation und Syntaxonomie

Auch diese Untersuchung wurde von der oft zitierten Kennartenarmut der Quellfluren geplagt. Von den 18 berechneten diagnostischen Arten gehören weniger als die Hälfte zu den Kennarten der Literatur. Vermutlich hängt dies vor allem mit den Limitierungen der Aufnahmen zusammen: da nur Daten zur Quellvegetation miteinbezogen wurden, sind viele von den diagnostischen Arten wohl keine wahre

Charakterarten für die Quellen, sondern Differentialarten, die in anderen Lebensräumen (z. B. Kontaktgesellschaften wie Moore und Sumpfwiesen) häufiger sind.

Die als Klassencharakterart der *Montio-Cardaminetea* angegebene *Epilobium alsinifolium* erscheint in diesen Aufnahmen nur in den Typen 2 und 3, vermutlich temperaturbedingt (Kaltzeitrelikt). Die Klassencharakterarten *Stellaria alsine* und *Bryum schleicheri* (Schubert et al. 2001) kommen in den Aufnahmen nicht vor; bei *Stellaria alsine* handelt es sich um eine eher kalkmeidende Waldpflanze, welche im Gebiet nicht vorkommt, während *Bryum schleicheri* als spezialisierte Pionierart an kiesigen, hochalpinen Quellen oder gestörten Sekundärstandorten (Philippi 1975, Geissler 1976) sich kaum als Klassencharakterart eignet. *Cardamine amara* bevorzugt laut Oberdorfer (2001) humose, nährstoffreiche Stellen, und kommt nur verstreut in Quellfluren vor; in dieser Untersuchung wurde sie nur in 3 Vegetationsaufnahmen angetroffen. Ausserdem vermerkt Pott (1995), dass die Art zu stark in Röhrichte und Erlenwälder übertritt, um eine starke Kennart der Klasse zu sein.

Obwohl die Leitfähigkeit des Wassers meist nicht sehr niedrig ist (Tabelle 4), kommen diverse Arten des *Cardamino-Montion* vor. Die Verbands-Charakterart *Diobelonella palustris* wurde sporadisch beobachtet, aber das Hauptverbreitungsareal der *Montia* spp. hört nördlich der Alpen auf (Hinterlang 2017) und die Art ist, wie auch die Verbands-Charakterart *Epilobium obscurum*, im Schweizer Gebirge selten (Info Flora 2020). Die angebliche Differentialarten des Verbandes, *Calliergonella cuspidata* und *Juncus articulatus* (Hinterlang 2017), kommen vor, sind jedoch nicht streng an saures Substrat gebunden (Atherton et al. 2004, Oberdorfer 2001). Die Artengarnitur der Offenland-Quellen stimmt meist mit den Literaturangaben zum klassischen *Cratoneurion commutati* überein; das Problem liegt vielmehr darin, dass diese Arten in den Alpen auch durchaus auf saurem Substrat vorzufinden sind (z. B. *Palustriella commutata*, *Saxifraga aizoides*).

Die Abgrenzung zwischen Quelle und Kontaktgesellschaft ist anspruchsvoll (vgl. Abs. 1), was die Flächenwahl für Vegetationsaufnahmen erschwert: in der Literatur werden sehr unterschiedliche Flächengrößen aufgenommen (Pott 1995), um Größenordnung 0.1 bis 10 m². Fragmentarische oder schwach ausgeprägte Bestände werden oft zugunsten von homogenen Kleinststandorten ignoriert (Cantonati et al. 2006), was in dieser Untersuchung nicht gemacht wurde; deswegen sind die Vergleiche mit bestehenden Syntaxa kritisch zu betrachten.

Aus der numerischen Klassifikation ergeben sich 7 Vegetationstypen, welche scheinbar eine Stellung zwischen Gesellschaft und Verband einnehmen. Die Waldquellen werden in dieser Klassifikation weder pauschal in einen eigenen Verband verschoben, noch werden sie undifferenziert mit den Offenlandquellen mit einem ähnlichen Chemismus zusammengeführt. Die Aufnahmen «semi-supervised» zu klassifizieren – in Waldquellen und Quellen im Offenland zu trennen, und separat numerisch klassifizieren zu lassen – ergaben gut charakterisierte Einheiten für die Waldquellen, aber keine sinnvollen Einheiten für die Quellen im Offenland. Zudem macht es wenig Sinn, solch eine manuelle Trennung vorzunehmen, wenn es um das Aufdecken tatsächlich wirkender Umweltgradienten geht.

Obwohl einige Forscher (z. B. Delarze et al. 2015) die Waldquell-Synusien als Bestandteile der Waldgesellschaften behandeln (vgl. Abs. 1), teile ich die Ansicht von Kästner (1941), der für die Herauslösung

der Wald-Quellfluren bzw. Waldsümpfen aus den Waldgesellschaften plädierte. Die Vegetation der Waldquellen, obwohl von der Beschattung abhängig, weist charakteristische Artenzusammensetzungen auf, welche von zahlreichen Autoren als abgesetzter Vegetationstyp belegt wird (z. B. Braun-Blanquet 1926, Tüxen 1937, Maas 1959, Hinterlang 1992). Grabherr & Mucina (1993) vermerken zu den Quellen im Nadelwald: «Die Vegetation dieser Flächen ist sehr eigenständig, wenn auch, bedingt durch die Kleinflächigkeit des Standortes, Arten aus der umgrenzenden Waldvegetation Fuss fassen können.» Für diese Typologie werden also die Waldquell- und Waldsümpfgesellschaften von den Wald-Syntaxa losgelöst.

Alle Typen der numerischen Klassifikation, die aus mehr als einer Aufnahme bestehen werden in den folgenden Absätzen diskutiert:

Die Gesellschaft der «**Mineralarmen Quellen in subalpinen Waldlichtungen**» (Typ 2, Abs. 3.3.2) ist wie alle Waldquell-Vegetation schwer pflanzensoziologisch einzuordnen. Die *Cardamino flexuosae-Chryso-splenietalia oppositifolii* Hinterlang 1992 kommt stets unterhalb der Fichtenstufe vor. Die gut entwickelte Krautschicht, die schattenliebenden Arten und starke Durchsickerung spricht für eine Einteilung zum *Caricion remotae* Kästner 1940, was im Sinne von Chytrý (2011) dem *Montio-Cardamine-talia* zuzuteilen wäre (Tabelle 6). Dieser Verband, obwohl meist in Verbindung mit der montanen Stufe gebracht, wird auch im Hochgebirge erfasst (z. B. Grabherr & Mucina 1993, Chytrý 2011). An schwach sauren Standorten bildet der Verband die torfmoosreiche Gesellschaft *Trichocoleeto-Sphagnetum* Maas 1959; die hier behandelte Gesellschaft weist allerdings keine von den Kennarten auf. Übrig bleibt das *Cardamino-Chryso-splenietum alternifolii* Maas 1959, welche nur ausnahmsweise auf basenarmem Substrat vorkommt. Die traditionellen Kennarten sind hier nicht vorhanden, aber das sollte die Gesellschaft nicht ausschliessen: *Carex remota* wächst nicht oberhalb der montanen Stufe, und *Chryso-splenium alternifolium* kommt im Gebiet nur selten vor (Info Flora 2020). Einige von Chytrý (2011) angegebene Kenn- und dominante Arten der Gesellschaft sind vorhanden (*Chaerophyllum hirsutum*, *Brachythecium rivulare*, *Conocephalum conicum*, *Caltha palustris*). Bei *Conocephalum conicum* handelt es sich eigentlich um eine kalkliebende Art, die u. a. in schattigen, luftfeuchten Bergwäldern vorkommt (Zemp et al. 2016).

Der Vegetationstyp «**Mineralarme, kaltstenotheime Offenland-Quellen**» (Typ 3, Abs. 3.3.3) teilt eine diagnostische Art (*Epilobium alsinifolium*) mit dem *Cratoneuro-Philonotidetum seriatae* Geissler 1976. *E. alsinifolium* stellt keine besonderen Ansprüche am Substratchemismus, und besiedelt vorwiegend sehr nassen, kalten Standorten (Geissler 1976, Oberdorfer 2001). Weitere Charakterarten *Brachythecium rivulare* und *Saxifraga stellaris* (auch ein Kaltwasser-Spezialist) sind in diesen Aufnahmen viel häufiger als im Typ 2. Es bestehen jedoch ebenfalls Ähnlichkeiten mit dem kalkreichen Pendant dazu, dem *Cratoneuro-Philonotidetum calcarae* Geissler 1976: die Kennarten *Cratoneuron filicinum* und *Ara-bis subcoriaceae* sind in diesem Typ sporadisch vorhanden, und das Wasser hat einen mässig hohen pH ($\bar{x} = 7.5$). Das Vorkommen von entweder *Philonotis seriata* oder *Philonotis calcarae* könnte potentiell Klarheit schaffen, aber sie kommen in den Vegetationsaufnahmen nicht vor. Der Typ passt aufgrund Artengarnitur und gemischtem Grundgestein besser zum *Cratoneuro-Philonotidetum seriatae*; vermutlich handelt es sich um eine Zwischenform der zwei Gesellschaften. Obwohl die mittlere

Leitfähigkeit des Quellwassers mit 319 $\mu\text{S}/\text{cm}$ relativ zu anderen Untersuchungen hoch ist, gibt Geissler als Höchstwert der Gesamthärte für die Gesellschaft 16° dH (ca. 480 $\mu\text{S}/\text{cm}$) an. Das *Cratoneuro-Philonotidetum seriatae* hat ihren Schwerpunkt auf der subalpinen Stufe, wo sie v. a. durch Rheokrene mit beachtlichen Fließgeschwindigkeiten vertreten wird. Dieser Vegetationstyp ist mit durchschnittlich 18 Arten relativ artenarm für die Untersuchung. Das *Cratoneuro-Philonotidetum seriatae* ist eine mannigfaltige Gesellschaft, und wird von Geissler in 7 verschiedenen Varianten unterteilt. Die *Brachythecium rivulare-Cardamine amara*-Variante umfasst Bestände an rasch fließenden Quellbächen mit starken Beständen von *Brachythecium rivulare* sowie die punktuelle Beteiligung von *Cardamine amara* und Hochstauden (hier z. B. *Petasites paradoxus*); somit werden diese Vegetationsaufnahmen treffend beschrieben.

Die Aufnahmen der «**Mineralarme Quellen auf Alpweiden**» (Typ 4, 3.3.4) sind dem *Philonota fontanae-Montietum rivularis* Bükér & Tx. 1941 ähnlich. Diese Gesellschaft ist an mässig erwärmten Alpenquellen auf Silikat zu finden, und ist an Beweidung verbunden. Die Kennarten *Philonotis tomentella* und *P. caespitosa* kommen stellenweise vor. Auch *Diobelonella palustris*, eine kalkmeidende Art und eher auf humosen Stellen vorzufinden (ibid.), kommt sporadisch vor. Im Vergleich zu *Pinguicula vulgaris* kommt die diagnostische Art *P. alpina* eher im Hochgebirge vor, und ist weniger stark an Kalk gebunden (Oberdorfer 2001). Es fragt sich allerdings, ob dieser Vegetationstyp einem kalkarmen Verband zugeordnet werden könnte: obwohl einige von den Charakterarten des *Cardamino-Montion* Br.-Bl. 1925 und andere kalkmeidende Arten vorhanden sind (z. B. *Alchemilla coriacea* aggr., *Philonotis fontana* aggr., *Salix foetida*), und das Substrat basenarm ist, sind die Argumente für das *Cratoneurion* überzeugender. Die Verbandscharakterarten *Pinguicula alpina* und *Palustriella falcata* sind auch hier diagnostisch, und *Cratoneuron filicinum* kommt trotz Höhenlage sporadisch vor. Eine Lösung wäre, im Sinne von Geissler (1976) den Verband *Cratoneurion* als eine Zusammenstellung von subalpinen-alpinen Quellflugesellschaften auf Kalk und Silikat zu verstehen (Tabelle 6). Diese Lösung ist Hinterlang (1992) Vorschlag einen Verband der alpinen Weichwasserquellen auszuscheiden, der *Philonotidion seriatae*, vorzuziehen; Hinterlang Verband ist allesamt zu schwach charakterisiert. Die Differenzierung anhand der Meereshöhe ist allerdings nicht eindeutig, da vegetationskundlich definierte Höhenstufen im Gebirge oft weniger wichtig sind als kleinräumige Verhältnisse wie Topographie (Suanjak 2007).

Das *Cratoneuro-Philonotidetum calcareae* Geissler 1976 stellt sich daher als passende Gesellschaft heraus. Obwohl diverse kalkmeidende Pflanzen vorhanden sind, ist die Differentialart *Arabis subcoriacea* diagnostisch und häufig. Diese Art besiedelt basenreiche Sumpfhumusböden sowie überrieselten Steingrusboden (Oberdorfer 2001). *Brachythecium rivulare* kommt auffällig selten vor, und *Saxifraga aizoides* ist häufiger als *S. stellaris*, wie für die Gesellschaft charakteristisch. Das Vorkommen von *Blinidia acuta* auf wenigen Stellen zeigt den Einfluss mechanischer Störungen bzw. Beweidung an (ibid.).

Das *Cratoneuretum falcati* Gams 1927, welches m.E. als Synonym der Gesellschaft zu verstehen ist, ist ebenfalls interessant als Referenz für diesen Vegetationstyp, da *Palustriella falcata* recht hohe Deckungen erreicht und mehrere Differentialarten (*Polygonum viviparum*, *Juncus triglumis*, *Poa alpina*) in den Vegetationsaufnahmen vorkommen (Grabherr & Mucina 1993). *Saxifraga stellaris*, von Philippi (1975) als lokale Kennart der Gesellschaft in den Allgäuer Alpen angegeben, ist vorhanden. Philippi

merkt jedoch bei seinem *Cratoneuretum falcati* an, dass *Saxifraga aizoides* vergleichsweise selten auftritt, was hier nicht der Fall wäre. Surina et al. (2005) dagegen bemerkten in den Julischen Alpen eine häufige Vergesellschaftung von *S. aizoides*, *S. stellaris* und *Pinguicula alpina*, die auch hier zu finden ist. In den Dolomiten fanden Pignatti & Pignatti (2014) eine Übergangsform der Gesellschaft zum *Bryetum schleicheri* Br.-Bl. 1926 bei weniger kalkreichem Wasser – vielleicht handelt es sich hier um eine ähnliche Übergangsform mit diversen Arten des *Cardamino-Montion* (inkl. *Blindia acuta*, *Philonotis seriata*). Braun-Blanquet fand in seiner Abhandlung der Pflanzengesellschaften Rätiens (1949) als Subassoziation zum Verband *Cratoneurion* auch eine Übergangsform des *Bryetum schleicheri*, durch die Kennarten des *Cardamino-Montion* plus das Vorhandensein von *Palustriella commutata* aggr. gekennzeichnet.

Etliche Arten des *Cratoneurion* kommen in den «**Mineralreichen, montanen Waldsümpfen**» (Typ 5, Abs. 3.3.5) vor, die Mooschicht ist meist stärker entwickelt als die Krautschicht und punktuell mit Baum-Sämlingen bewachsen. Der Verband *Lycopodo europaei-Cratoneurion commutati* Hadač 1983 kommt in Frage. Diese kalkreichen Waldquellen, obwohl meist mit den kollinen und montanen Stufen in Verbindung gebracht, kommen laut Chytrý (2011) bis fast zur Waldgrenze vor, und wurden in Österreich (Grabherr & Mucina 1993) sowie den italienischen Alpen (Giacomini 1939, durch Dierssen 1973 zugeordnet) erfasst. Die einzige Gesellschaft des Verbandes, das *Brachythecio rivularis-Cratoneuretum* Dierssen 1973, passt aufgrund der Ökologie und Artengarnitur (vorhanden sind z. B. *Palustriella commutata* (diagnostisch), *Eucladium verticillatum* (diagnostisch) und *Equisetum palustre* (dominant)). Laut Hájek (1998) kommt diese Gesellschaft sowohl in stark als auch schwach beschatteten Lebensräumen vor. Kalksinter wird in den Vegetationsaufnahmen allerdings nicht gebildet, vermutlich aus klimatischen Gründen, obwohl mikroskopische Kalkkristalle in vielen Moosproben zu beobachten waren. Chytrý (2011) gibt diese Gesellschaft als artenarm an, was in Widerspruch zum Reichtum diesen Aufnahmen steht ($\bar{x} = 26$ Arten/m²). Wenige Arten des *Caricion remotae* (*Conocephalum conicum*, *Petasites albus*) kommen vor, was eventuell auf die *Carex remota*-Variante schliessen lässt. Diese ist u. a. durch schwächere Kalksinterbildung gekennzeichnet. Bei drei Quellen wurden Aufnahmen über Typ 5 und 7 (Kalkmoor-Quellen) aufgeteilt, vermutlich aufgrund variierender Lichtverhältnisse im Quellbereich.

Die Aufnahmen der «**Mineralreichen, montanen Waldquellen**» (Typ 6, Abs. 3.3.6) stammen aus zwei Waldquellen mit unterschiedlichsten Umweltbedingungen: eine linear sickernde Quelle ohne Kalksinter und ein sehr grosses, komplexes Rheokren-System mit Kalksinterplatten. Es stellt sich die Frage, wieso sie bei der Klassifikation zusammengefasst wurden. Es gibt nur wenige Arten, die sich bei starker Kalksinterbildung durchsetzen können; diese können jedoch oft auch auf anderen basenreichen, nassen Standorten vorkommen, sind also meist nicht streng an Kalksinter gebunden (Zemp et al. 2016). Die Seltenheit von echten Charakterarten für die Kalksinterquellen hat zur Folge, dass sie hier über 2 Typen (6 und 7) verteilt werden. Lyons & Kelly (2017) vermerken, dass die Definition der *Cratoneurion*-Vegetation seit langem problematisch ist, und dass Übergänge zwischen Kalksinterquellen und anderen Lebensräumen schlecht charakterisiert sind, obwohl in der Literatur breit anerkannt.

Die lineare Waldquelle könnte vermutlich als *Brachythecio rivularis-Cratoneuretum* gelten, während die grosse Kalksinterquelle potentiell zum *Eucladietum verticillati* Allorge 1922 zählen könnte. Diese Gesellschaft besiedelt steile, tiefnasse Kalkfelswände, oft im Halbschatten (Grabherr & Mucina 1993), welche periodisch austrocknen können (Oberdorfer 1992). Grabherr & Mucina (1993) geben für Österreich ein Vorkommen bis 1'500 m ü. M. an, obwohl die Gesellschaft in Österreich nur selten erfasst wurde. Die Charakterart *Eucladium verticillatum* ist vorhanden, jedoch nicht dominierend, wie in der Literatur angegeben. Sonst sind viele von den zahlreichen Begleitarten der Gesellschaft vorhanden: *Tofieldia calyculata*, *Carex flacca*, *Palustriella commutata* und *Agrostis stolonifera*. Eine Vegetationsaufnahme beherbergt als einzige der Aufnahmen *Catoscopium nigrum*. Diese Art gilt als Erstbesiedler des Kalksinters, oberhalb des benetzten Bereiches (Schubert et al. 2001). Obwohl Kalksinterquellen auch zum Typ 7 gehören, bestehen jene Formationen eher aus Terrassen als Platten.

Der Vegetationstyp «**Montane Kalkmoor-Quellen**» (Typ 7, Abs. 3.3.7) teilt viele Arten mit den Davallseggenrieder, inkl. *Carex davalliana* (diagnostisch), *Carex lepidocarpa* (konstant) und *Tofieldia calyculata*. Jedoch kommen Verbandscharakterarten des *Cratoneurion*, *Palustriella commutata* und *Aneura pinguis*, mit hoher Stetigkeit vor, und *Hymenostylium recurvirostrum* (Charakterart) und *Pinguicula vulgaris* (Begleitart) sind ebenfalls präsent. Die breit gefasste Gesellschaft *Cratoneuretum commutati* Aichinger 1913 könnte in Frage kommen: diese Vegetation kommt in kalkreichen Quellen der Montanstufe vor, und hat als Charakterart die vorhandene *Cratoneuron filicinum* aggr., eine eher nitrophile Art, welche die Austrocknung besser toleriert als *Palustriella commutata* (Lyons & Kelly 2007). Eine Trennart für die Gesellschaft auf der Hochmontanstufe, *Carex ferruginea* (Grabherr & Mucina 1993), ist ebenfalls häufig. Philippi (1975) hebt das seltene Vorkommen von *Pinguicula vulgaris* in der Gesellschaft in dem Allgäu hervor, erwähnt aber eine artenreiche Variante der Gesellschaft aus der Literatur (Braun 1968), die durch das Vorhandensein der Pflanze gekennzeichnet wird. Die häufige Verzahnung mit dem *Caricion davallianae* wird ebenfalls in der Literatur erwähnt (Knapp 1962, Grabherr & Mucina 1993). Zu diesem Typ gehörten Aufnahmen auf Quellen, deren Teilflächen punktuell den Typen 2 und 3 (beide im Mittel mineralarme Typen der subalpinen Zone) zugewiesen wurden. Diese Aufteilung unterstreicht die Schwierigkeit, Quell-Vegetation anhand des Grundwasser-Chemismus zu differenzieren.

Auch das *Cardamino-Cratoneuretum* Kornas & Medwecka-Kornas 1967 könnte in Frage kommen. Hinterlang (2017) beschreibt diesen Syntaxon als Zentralgesellschaft des Verbandes; als solche ist sie durch Verbandscharakterarten geprägt, ohne spezifische Differentialarten. Allerdings wird das *Cratoneuro-Philonotidetum calcareae* als Synonym genannt, was aus meiner Sicht wenig Sinn macht, da Geisslers Gesellschaften sich vor allem auf subalpine-alpine Lebensräume beziehen.

Daraus ergibt sich die vorgeschlagene Syntaxonomie in der Tabelle 6. Da weder das *Adiantion* noch *Philonotidion seriatae* angenommen werden (Abs. 1), werden alle Offenland-Gesellschaften in zwei «Unterverbände» des *Cratoneurion* aufgeteilt: eine Gruppe der montanen Stufe, und eine Gruppe sensu Geissler, welche subalpine-alpine Quellen auf Kalk und Silikat umfasst. Die laufende europaweite Revision der Ordnung durch Hájek et al. und weitere regionale Studien werden die syntaxonomische Stellung dieser Typen hoffentlich klären. Die Nadelwald-Quellen der Untersuchung zeigen eine starke

Differenzierung durch Chemismus, sodass die mineralreichen und -armen Quellen in zwei separate Verbände aufgeteilt werden.

Tabelle 6: Vorgeschlagene Klassifikation für die erhobenen Quellen.

<p>Montio-Cardaminetea Br.-Bl. et Tüxen ex Klika et Hadač 1944</p> <p>Montio-Cardaminetalia Pawłowski et al. 1928</p> <p>Cratoneurion commutati Koch 1928</p> <p>Montane Gesellschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Eucladietum verticillati</i> Allorge 1922 ▪ <i>Cratoneuretum commutati</i> Aichinger 1913 <p>Subalpine-alpine Gesellschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Cratoneuro-Philonotidetum calcareae</i> Geissler 1976 ▪ <i>Cratoneuro-Philonotidetum seriatae</i> Geissler 1976 <p>Lycopodo europaei-Cratoneurion commutati Hadač 1983</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Brachythecio rivularis-Cratoneuretum</i> Dierssen 1973 <p>Caricion remotae Kästner 1941</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Cardamino-Chrysosplenietum alternifolii</i> Maas 1959
--

4.4. Umweltgradienten

Die zwei visualisierten Achsen der Gradientenanalyse zeigen eine hohe Heterogenität entlang ihrer Längen. Die DCA-Achse 1 kann als Gradient von stark insulierten, kalkreichen, oligotrophen Quellen bis zu etwas nährstoffreicheren, sauren Waldsümpfen hin interpretiert werden (Quellwasser-pH, $|r| = 0.998$; Lichtzahl, $|r| = 0.984$; Reaktionszahl, $|r| = 0.935$; Nährstoffzahl, $|r| = 0.799$). Die Nährstoffzahl nimmt mit zunehmender Beschattung zu, evtl. in Verbindung mit einem allochthonen Eintrag von organischem Material. Die Temperaturzahl nimmt auch in Verbindung mit diesem Gradienten leicht zu, da die bedeckten Quellen besser vor Kälte geschützt sind und meist unter der Waldgrenze vorkommen. Mit zunehmendem Achsenwert kommen typische Arten der Wälder und Hochstaudenfluren vor (z. B. *Geranium sylvaticum*, *Chaerophyllum hirsutum*). Am unteren Ende der Achse sind eher Arten des subalpinen-alpinen Offenlandes zu finden: *Palustriella falcata*, *Saxifraga aizoides* und *Arabis subcoriaceae*. Die DCA-Achse 2 ist am stärksten mit der Wasser-Leitfähigkeit und Meereshöhe korreliert ($|r| = 0.984$, $|r| = 0.825$). Im tiefsten Wertebereich befinden sich die Arten der kalten Quellen, wie *Saxifraga stellaris* und *Epilobium alsinifolium* (Abbildung 14). *Carex davalliana* als Kalkzeiger befindet sich im obersten Bereich der Achse.

In der Ordination ist klar zu sehen, dass die Meereshöhe ein Summenparameter ist, welcher diverse Faktoren und Prozesse der Einzugsgebiete integriert (Strohbach et al. 2009). Mit zunehmender Höhe nimmt der Mineralgehalt des Quellwassers ab, und die mittlere Jahrestemperatur sinkt. Die Lebensräume werden stärker insuliert und nährstoffärmer. In der Ordination ist allerdings kein starkes Muster

bezüglich Bodenreaktion ersichtlich, trotz hoher Korrelation mit der DCA-Achse 1. Die kalkmeidende *Salix foetida* befindet sich unweit von den Kalkzeigern *Arabis subcoriacea* und *Tofieldia calyculata*, und nahe beim Nullwert wäre die Art *Sesleria caerulea* nicht zu erwarten (Landolt et al. 2010). Die Durchmischung der kalkliebenden und -meidenden Pflanzen entspricht aber der beobachteten Realität im Feld. Anders als in anderen Studien (z. B. Beierkuhnlein & Grasle 1998, Hajkova et al. 2008), war das Quellwasser-pH nicht der wichtigste Parameter für die Artenzusammensetzung (vgl. Vektorenlänge); allerdings wurde bei dieser Untersuchung nur ein relativ kurzer Abschnitt des Gradienten abgedeckt. Um den Effekt des Gradienten zu verdeutlichen, wäre die Aufnahme von Quellen mit rein silikatischen Einzugsgebieten eventuell hilfreich, aber solche kommen im Gebiet nicht vor.

Aus den vielen gemessenen und geschätzten Umweltparameter weisen fünf mit der Biodiversität (Artenzahl) eine lineare Beziehung auf: pH, O₂-Gehalt und O₂-Sättigung des Quellwassers sowie die logarithmierte Temperaturzahl und Feuchtezahl (die letzten zwei mit logarithmierter Artenzahl). Alle Steigungen waren negativ. Die Beziehung zwischen Artenreichtum und Quellwasser-pH ist schwer interpretierbar; die allgemein akzeptierte Korrelation zwischen pH und Biodiversität in Mitteleuropa (höherer Artenreichtum auf Kalk, Pärtel 2002) bezieht sich auf den pH des Substrates. Eine Abnahme der Biodiversität bei starker Kalksinterbildung wäre eher mit der Leitfähigkeit verbunden; interessanterweise fanden Sekulová et al. (2012), dass die Leitfähigkeit des Quellwassers einen stärkeren Einfluss auf die α -Diversität der Vegetation ausübt als pH. Es kann jedoch sein, dass der treibende Faktor für die abnehmenden Artenzahlen doch die Kalksinterbildung ist. Da diese nur an milderer Lagen stattfindet, wird die Beziehung durch den Störeinfluss von Meereshöhe/Temperatur verzerrt (der Einfluss der Temperatur auf den Artenreichtum ist an der Beziehung mit der Temperaturzahl sowie der Sauerstoffsättigung ersichtlich).

Dass die Artenzahl bei Erhöhung der Sauerstoffsättigung des Quellwassers abnimmt, kann unterschiedlich interpretiert werden: dass das rasch fließende, gut oxygenierte Quellwasser durch Forttransport von organischem Material den Lebensraum in einem artenärmeren Sukzessionsstadium hält; dass schwach sickende Helokrene artenreicher sind; dass sich der direkte Einfluss des kalten Quellwassers negativ auf den Artenreichtum auswirkt. Letzteres ist nicht an temperaturbezogenen Parametern ersichtlich, da diese keinen Aufschluss zum Fließverhalten geben.

Dass die Voraussetzungen für die Residuen der Regressionen mit Feuchte- und Temperaturzahl erst bei Logarithmieren beider Variabel erreicht werden, deutet darauf hin, dass der Artenreichtum bei zunehmenden Indikatorwerten stärker abnimmt. Die Abnahme der Artenzahl bei zunehmenden Feuchtezahlen ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass nur spezialisierte Arten auf stark durchnässtem bzw. gesättigtem Substrat (maximale Feuchtezahl der Aufnahmen 4.58) überleben können. Die Beziehung zwischen Artenreichtum und Temperaturzahl ist schwer interpretierbar. Viele Arten der Quell-Lebensräumen sind kaltstenotherm, sodass weniger spezialisierten Arten bei wärmeren Verhältnissen zu erwarten sind, aber das muss nicht zwingend zu einem tieferen Artenreichtum führen. Dazu müssen Quell-Pflanzen oft starke Temperaturunterschiede zwischen Wurzeln und Triebspitzen aushalten (Hinterlang 2017); dieser Stressfaktor wird durch höhere Lufttemperaturen verstärkt, was nachteilig auf den Artenreichtum wirken könnte. Die Temperaturzahlen der Aufnahmen variierten zwischen

2.46 und 3.22, sodass der Artenreichtum gerade bei montanen Verhältnissen abnimmt; es kann sein, dass hier die Beziehungen zwischen Meereshöhe und andere Umweltparameter (z. B. Stärke des anthropogenen Einflusses, Grad der Beschattung) ins Spiel kommen.

Anders als bei Spitale et al. (2009) wurde kein signifikanter Zusammenhang zwischen Beschattung und Artenzahl festgestellt. Allerdings ist bei der Interpretation der Beziehungen Vorsicht geboten, da die Bestimmtheitsmassen nicht gross sind und da ökologische Beziehungen selten linear sind.

4.5. Empfehlungen für den Quellschutz

Aus der aufgestellten Typologie kann festgestellt werden, dass Schutzmassnahmen für die Offenland-Quellen auf den TypoCH-Verband *Cratoneurion* abzielen sollten. Diese Lebensräume sind besonders empfindlich auf mechanische Störungen und Eutrophierung (Delarze et al. 2015). Aus dieser Untersuchung sind keine klaren Aussagen zum Nährstoffhaushalt möglich, da er nicht direkt untersucht wurde. Die Ordination bestätigt allerdings, dass die Nährstoffzahl prägender Umweltfaktor ist für die Artenzusammensetzung ($|r| = 0.799$ mit DCA-Achse 1). Auch die Stabilität der Moosgesellschaften wird durch den Nährstoffgehalt beeinflusst (Warncke 1980). Da die Eutrophierung in oligotrophen Feuchtgebieten schnell zu einer Verarmung der spezialisierten Moosflora führt (Bergamini & Pauli 2001, Hedenäs et al. 2003), tragen Bewirtschafter von solchen Standorten eine besonders hohe Sorgfaltspflicht.

Interessanterweise befanden sich die artenreichsten Flächen der Untersuchung auf extensiv genutzten Weiden; es ist aber zu befürchten, dass hochspezialisierte Arten der Quellen unter dieser Störung benachteiligt werden können (Abs. 1). In einer Metastudie zu dem Einfluss von Vieh auf Fliessgewässer fanden O'Callaghan et al. (2019), dass das Schadenspotential am grössten ist bei kleinen Gewässern mit wenig Abfluss, hoher Wasserqualität und im Umfeld schlecht sickernder Böden. Rheokrene auf Schutt oder Kies scheinen weniger empfindlich zu sein. Für empfindliche Quellen werden Massnahmen empfohlen, um den weichen Quellmund vor Trittschäden zu schützen, z. B. durch Auszäunung (Zollhöfer 1997). Die Literatur zeigt, dass diese Massnahme die Ufervegetation kleiner Gewässer effektiv schützt (O'Callaghan et al. 2019). Die Zäunung sollte eine ausreichend breite Pufferzone berücksichtigen; als Grundlage für die Festlegung von Pufferbreiten könnte der Leitfaden zu Pufferzonen für Schweizer Moorbiotope dienen (Marti et al. 1997).

In 20% der Aufnahmen dieser Untersuchung wurde Tritt durch Wild oder Vieh festgestellt; die am stärksten beschädigten Quellen befanden sich in montanen Wäldern. Es wurde im Gebiet beobachtet, wie zwei Sumpfquellen durch die Waldwirtschaft beeinträchtigt wurden, durch Trittschäden und einen grossen Eintrag von Waldabfällen bei der Holzernte. Zollhöfer (1997) berichtet, dass Quellen auch Schleifspuren zum Opfer fallen. Aus diesem Grund betrachte ich eine enge Zusammenarbeit mit und Sensibilisierung der Forstbetriebe als notwendig, um die Waldquellen möglichst effektiv zu schützen.

Viele von den erfassten Quellen befinden sich innerhalb der Grenzen von Schutzobjekten (Flachmoore, Auen, Amphibienlaichgebiete). Die Quellen auf und bei Bundesinventarobjekten profitieren von einer gut ausgebauten Gesetzesgrundlage für den Naturschutz. Zudem könnten empfohlene Massnahmen für die Aufwertung der Flachmoore nationaler Bedeutung (Martin et al. 2012) für die Quellen förderlich wirken, u. A. das Auffüllen von Drainagegräben und die Anpassung von Bewirtschaftungsverträgen.

Anders sieht es aus bei den Quellen, die sich in kantonal geschützten Landschaften befinden; statt ungeschmälerter Erhaltung der Objekte müssen für bewilligte Beeinträchtigungen lediglich Ersatzmassnahmen oder -Abgaben geleistet werden (Art. 13 & 14. KNHG). Bei diesen und andere Quellen, die sich in schwach geschützten oder ungeschützten Bereichen befinden, sollte bei möglichen Bedrohungen auf den NHV-Lebensraumschutz (Anh. 2 NHV) berufen werden – wobei Waldquellen in der Liste der schützenswerten Lebensräume eigentlich nicht eingeschlossen sind. In diesen Fällen könnte es auch hilfreich sein, die Moose zu erfassen, um die Anwesenheit von Arten der Roten Liste festzustellen. In dieser Untersuchung konnte 3 gefährdete Moosarten festgestellt werden (Tabelle 2); für die Fundorte von 2 der 3 Arten (Nr. 0180, 1203) wurden schon von Küry et al. konkrete Massnahmen formuliert (2019b). Weitere zwei Rote-Liste-Arten sind vermutet, konnte aber nicht zweifelsfrei bestimmt werden (*Fissidens celticus*, *Drepanocladus sendtneri*). Andere gefährdete Arten von Feuchtgebieten können potentiell in der Region vorkommen, wie zum Beispiel *Calliergon cordifolium* und *Paludella squarrosa*.

Der Parc Ela hat eine gute ökologische Infrastruktur, welche durch zahlreiche Projekte laufend verstärkt wird. Quellen kommen im Gebiet oft gehäuft vor, was sie möglicherweise durch Vernetzung widerstandsfähiger macht gegen Störung. Obwohl gestörte Quellen ein hohes Risiko für die Besiedlung durch invasive Neophyten haben können (Nielson et al. 2019), wurde keine Neophyten in dieser Untersuchung beobachtet. Aus diesen Gründen haben Quell-Revitalisierungsprojekte im Park gute Erfolgsaussichten. Obwohl Quell-Revitalisierungen in der Schweiz noch relativ selten sind, bestehen diverse Hilfsmittel: der Quellen-Leitfaden von Rheinland-Pfalz (2008), der Bericht zum Quellschutz-Projekt der Biologischen Station Ravensberg (Vogt 1998) sowie diverse Praxisberichte zu Projekten in der Schweiz (z. B. Contesse & Küry 2005). Zollhöfer schätzt das Regenerationspotential von Quellen als hoch ein (1997); Cantonati et al. vermerken jedoch, dass zur Restoration der Flora von revitalisierten Quellen Forschungsbedarf besteht (2006).

In der Tabelle 7 werden konkrete Massnahmen zu jedem Vegetationstyp dieser Untersuchung formuliert. Auch der Bericht zu den Strukturerhebungen 2016–2018 bietet eine gute Grundlage, mit Einstufung der Objekte gemäss Priorität sowie konkreten Empfehlungen (Küry et al. 2019b).

Die Objekte dieser Untersuchung beschränkten sich auf relativ naturnahe Quellen der montanen und subalpinen Stufen; somit wird Basiswissen zu dem ökologischen Potential der lokalen Quellen geliefert. Für die weitere Entwicklung des Schutzkonzeptes werden vergleichbare Studien für beeinträchtigte Quellen bzw. solche in Siedlungsnähe empfohlen. Für eine Beurteilung der Situation bei den alpinen Quellen werden ebenfalls weitere Untersuchungen empfohlen.

Tabelle 7: Empfehlungen für die Vegetationstypen dieser Untersuchung.

Nr.	Name	Massnahmen	Erläuterung
2	<i>Rhizomnium magnifolium</i> - <i>Chaerophyllum hirsutum</i> -Gesellschaf- ten: Mineralarme Quellen in subalpi- nen Waldlichtungen	Rechtlichen Schutz bewirken	Besonders seltene Arten vorhanden
3	<i>Epilobium alsinifolium</i> - <i>Brachythecium</i> <i>rivulare</i> -Gesellschaften: Mineralarme, kaltstenotherme Offenland-Quellen	Pufferbereiche einrichten, Besucher- lenkung	Auffällig, exponiert
4	<i>Pinguicula alpina</i> - <i>Palustriella falcati</i> - Gesellschaften: Mineralarme Quellen auf Alpweiden	Extensive Nutzung, ggf. mit Auszäunung; Monitoring	Risiko Eutrophierung
5	<i>Fissidens dubius</i> - <i>Cratoneuron decipi-</i> <i>ens</i> -Gesellschaften: Mineralreiche, montane Waldsümpfe	Forstbetriebe sensibilisieren; keine Waldweide, kein Wild anlockendes Verhalten (Lecksteine, Füttern); Monitoring	Risiko mechani- scher Störung
6	<i>Plagiomnium medium</i> - <i>Palustriella</i> <i>commutata</i> -Gesellschaften: Mineral- reiche Waldquellen	Rechtlichen Schutz der Kalksinter- quellen bewirken	Besonders seltene Arten vorhanden
7	<i>Carex davalliana</i> - <i>Palustriella commu-</i> <i>tata</i> -Gesellschaften: Montane Kalk- moor-Quellen	Quellschutz durch Moorschutz und - Aufwertungsmassnahmen; bei Bewei- dung Auszäunung und Monitoring	Oft Schutzobjek- ten angrenzend

4.6. Ausblick

Diese Studie hat den oft zitierten Artenreichtum der Quell-Lebensräume bestätigt. Zum Schutze dieser Naturwerte sind in den nächsten Jahren viele neuen Entwicklungen zu erwarten: die geplante europäische Überarbeitung der Klasse *Montio-Cardaminetea* (vgl. Hájek et al. 2020); Fertigstellung des nationalen Verzeichnisses der Quell-Lebensräume in der Schweiz; längerfristig wird hierzulande auch auf die gesetzliche Verankerung des ökologischen Quellschutz abgezielt. Die Umsetzung von regionalen Projekten bleibt jedoch für den Schutz dieser bedrohten Lebensräume wichtig. Da die Bryophyten viele stark auf Quellen spezialisierte Arten aufweisen (Cantonati et al. 2006), sollten sie für Monitoring und Erfolgskontrollen eingesetzt werden. Die pendente neue Rote Liste der Schweizer Moose wird eine Neubeurteilung der Gefährdungssituation der Quell-Vegetation ermöglichen.

Wie beim Schweizer Trockenrasen-Schutz schon umgesetzt, muss auch für den künftig ausgebauten Quellschutz eine verfeinerte Typologie berücksichtigt werden. Bei dieser Untersuchung wurden drei grosse Herausforderungen für die Typisierung der Quellen in den östlichen Zentralalpen identifiziert: die komplexen geologischen und topographischen Verhältnisse machen eine einfache Aufteilung nach Grundwasserchemismus hinfällig; die Kalksinterquellen, obwohl klar ökomorphologisch differenzierbar, sind floristisch von anderen basenreichen Quellen kaum zu unterscheiden (auch eine Definition auf Basis Kalksinterbildung wäre unbefriedigend; Lyons & Kelly, 2007); und die subalpinen

Waldquellen, obwohl charakteristisch, sind im bestehenden Schweizer System nicht einzuordnen. Diese Punkte sollten im Rahmen des BAFU-Projektes berücksichtigt werden.

Obwohl das Netzwerk an Quellen im Hochgebirge intakter ist als dasjenige der Tieflagen, bestehen noch viele Herausforderungen durch anthropogenen Einfluss. In dieser Untersuchung bestehen Hinweise auf die Wichtigkeit des Nährstoffhaushalts für die Artenzusammensetzung der Feuchtgebiete, wie von anderen Autoren schon aufgezeigt; bei den zahlreichen oligotrophen Quellen auf Alpweiden ist jedoch noch unklar, wie stark deren Ökologie durch die Bewirtschaftung beeinflusst wird. Das Monitoring solcher Lebensräume könnte wichtige Informationen liefern. Auch klimatische Verhältnisse können in den nächsten Jahren problematisch werden: Da hochgelegene Quellen von Schneedecke und Gletschern des Einzugsgebietes abhängig sind (Brown et al. 2003, Hannah et al. 2007), werden diese disjunkten Lebensräume noch empfindlicher auf Klimawandel reagieren (Woodward et al. 2010).

Als «Wasserschloss Europas» trägt die Schweiz hohe Verantwortung für die Erhaltung naturnaher Quellen. Obwohl zahlreiche Herausforderungen für diese Lebensräume bestehen, sollte das rege wissenschaftliche Interesse zu den Quellen vieles zu ihrem Schutz beitragen.

Literatur

- Amt für Wald und Naturgefahren AWN Graubünden (2015) *Bergwald im Parc Ela*. Broschüre Parc Ela. URL: https://www.parc-ela.ch/sites/parc_ela/files/generic_files/2015_flyer_bergwald_web.pdf (Zugriff am 02.12.2020).
- Atherton, I., Bosanquet, S. D. S., & Lawley, M. (2010) *Mosses and liverworts of Britain and Ireland: A field guide*. British Bryological Society, London.
- Audorff, V., Kapfer, J., & Beierkuhnlein, C. (2011) The role of hydrological and spatial factors for the vegetation of Central European springs. *Journal of Limnology*, 70, 9–22.
- Beierkuhnlein, C. & Gräsele, W. (1998) The influence of light regime and water chemistry on the structure of forest spring vegetation. In: Botosaneanu L. (Hrsg.), *Studies in crenobiology: the biology of springs and springbrooks*. Backhuys, Leiden.
- Beierkuhnlein, C. & Gollan, T. (1999) Ökologie silikatischer Waldquellen in Mitteleuropa. *Bayreuther Forum Ökologie*, 71, 1–256.
- Bergamini, A. & Pauli, D. (2001) Effects of increased nutrient supply on bryophytes in montane calcareous fens. *Journal of Bryology*, 23, 331–339.
- Bernerth, H., Tobias, W. & Paschmajer, M. (1999) Status quo von Taunusquellen: das ernüchternde Fazit einer Biotopkartierung. *Kleine Senckenberg Reihe*, 32, 32–47.
- Biurrun, I., Burrascano, S., Dembicz, I., Guarino, R., Kapfer, J., Pielech, R., Garcia-Mijangos, I., Wagner, V., Palpurina, S., (...) & Dengler, J. (2019) GrassPlot v. 2.00 – first update on the database of multi-scale plant diversity in Palaeartic grasslands. *Palaeartic Grasslands*, 44, 26–47.
- Bodenmann, M., Siegenthaler, A. & Brunner, J. (1997) *Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden: Kartieranleitung*. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau FAL, Zürich.
- Bornand C., Gygax A., Juillerat P., Jutzi M., Möhl A., Rometsch S., Sager L., Santiago H. & Eggenberg S. (2016) *Rote Liste Gefässpflanzen. Gefährdete Arten der Schweiz*. Umwelt-Vollzug Nr. 1621. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern und Info Flora, Genf.
- Braun, W. (1968) Die Kalkflachmoore und ihre wichtigsten Kontaktgesellschaften im Bayerischen Alpenvorland. *Dissertationes Botanicae*, 1, 1–134.
- Braun-Blanquet, J. (1926) Etudes phytosociologiques en Auvergne. *Avernia*, 2, 29–48.
- Braun-Blanquet, J. (1949) Übersicht der Pflanzengesellschaften Rätians (III). *Vegetatio*, 1, 285–316.
- Brown, L. E., Hannah, D. M. & Milner, A. M. (2003) Alpine stream habitat classification: an alternative approach incorporating the role of dynamic water source contributions. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35, 313–322.
- Brunke, M., Hahn, H.J., Martin Peter, & Brendelberger, H. (2015) Grundwassergeprägte Lebensräume: eine Übersicht über Grundwasser, Quellen, das hyporheische Interstitial und weitere grundwassergeprägte Habitate. *Limnologie Aktuell*, 14, 1–266.
- Bundesamt für Landestopographie swisstopo (2020) Karten zur Geologie und Naturschutz. URL: <https://map.geo.admin.ch> (Zugriff am 02.12.2020).
- Bundesgesetz vom 24. Januar 1991 über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz GSchG) (SR 814.20), Stand am 1. Januar 2020.
- Bundesverordnung vom 16. Januar 1991 über den Natur- und Heimatschutz (NHV) (SR 451.1), Stand am 1. Juni 2017.
- Burck O. (1947) Die Laubmoose Mitteleuropas. *Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft*, 477, 1–198.
- Cantonati, M. & Ortler, K. (1998) Using spring biota of pristine mountain areas for long term monitoring: Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 248, 379–385.
- Cantonati, M., Gerecke, R., & Bertuzzi, E. (2006) Springs of the Alps – Sensitive Ecosystems to Environmental Change: From Biodiversity Assessments to Long-term Studies. *Hydrobiologia*, 562, 59–96.
- Chytrý, M., Tichý, L., Holt, J., & Botta-Dukát, Z. (2002) Determination of diagnostic species with statistical fidelity measures. *Journal of Vegetation Science*, 13, 79–90.

- Chytrý, M. (Hrsg.) (2011) *Vegetation of the Czech Republic – 3. Aquatic and wetland vegetation* (S. 580–609). Academia, Prag.
- Contesse, E., & Küry, D. (2005) Aufwertung der Quellen im Moostal und im Aotal in Riehen (Schweiz): Machbarkeit der Ausdo- lung und Revitalisierung von Quellen und Quellbächen in Siedlungsnähe. *Mitteilungen Der Naturforschenden Gesell- schaften Beider Basel*, 8, 115–133.
- Delarze, R., Gonseth, Y., Eggenberg, S. & Vust, M. (2015). *Lebensräume der Schweiz: Ökologie - Gefährdung - Kennarten*. 3. Aufl. hep Verlag, Bern.
- Delarze, R., Eggenberg, S., Steiger, P., Bergamini, A., Fivaz, F. & Gonseth, Y. (2016) *Rote Liste der Lebensräume der Schweiz*. Aktualisierte Kurzfassung zum technischen Bericht 2013. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern
- Dengler, J. (2003) Entwicklung und Bewertung neuer Ansätze in der Pflanzensoziologie unter besonderer Berücksichtigung der Vegetationsklassifikation. *Archiv naturwissenschaftlicher Dissertationen*, 14, 1–297.
- Dengler, J., Berg, C. & Jansen, F. (2005) New ideas for phytosociological monographs. *Annali di Botanica, nuova serie*, Vol. 5., 193–210.
- Dengler, J., Löbel, S. & Dolnik, C. (2009) Species constancy depends on plot size – a problem for vegetation classification and how it can be solved. *Journal of Vegetation Science*, 20, 754–766.
- Dengler, J., Wagner, V., Dembicz, I., García-Mijangos, I., Naqinezhad, A., Boch, S., Chiarucci, A., Conradi, T., Filibeck, G., (...) & Biurrun, I. (2018) GrassPlot – a database of multi-scale plant diversity in Palearctic grasslands. *Phytocoenologia*, 48, 331–347.
- Dierssen, K. (1973) Die *Cratoneurum*-Gesellschaft einiger Quellbäche in den Bückebergen bei Bad Eilsen. *Mitteilungen der Floristisch-Soziologischen Arbeitsgemeinschaft*, 15–16, 22–27.
- Eggenberg, S., & Möhl, A. (2007) *Flora vegetativa: Ein Bestimmungsbuch für Pflanzen der Schweiz im blütenlosen Zustand*. 3. Aufl. Haupt, Bern.
- Ellenberg, H., & Klötzli, F. (1972) Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. *Mitteilungen der schweizerischen An- stalt für das forstliche Versuchswesen* 48, 4, 589–930.
- European Dry Grassland Group (Hrsg.) (2020) *GrassPlot Diversity Explorer (GrassPlot v. 2.10)*. URL: <https://edgg.org/databases/GrasslandDiversityExplorer> (Zugriff am 02.12.2020).
- Fisher, R. A. (1922) On the interpretation of χ^2 from contingency tables, and the calculation of P. *Journal of the Royal Statistical Society* 85, 1, 87–94.
- Frahm, J. P., & Frey, W. (2004) *Moosflora*. 4. Aufl. Ulmer, Stuttgart.
- Frey, W., Frahm, J.-P., Fischer, E. & Lobin, W. (2006) *Liverworts, mosses and ferns of Europe*. Harley Books, Colchester.
- Gams, H. (1927) Von den Follatères zur Dent de Mordes. *Beiträge zur geobotanischen Landesaufnahme der Schweiz*, 15, 1–760.
- Geissler, P. (1976) Zur Vegetation alpiner Fliessgewässer: Pflanzensoziologisch-ökologische Untersuchungen hygrophiler Moosgesellschaften in den östlichen Schweizer Alpen. *Beiträge zur Kryptogamenflora der Schweiz*, 14/2, 55 S.
- GeoGR (2020). Karten für die Biotope, Landschaften, Wild, landwirtschaftliche Nutzung, Gewässerschutzkarte. URL: <http://geogr.mapplus.ch/viewer/geogr/?lang=de> (Zugriff am 11.10.2020).
- Gesetz vom 19. Oktober 2010 über den Natur- und Heimatschutz im Kanton Graubünden (KNHG) (BR 496.000), Stand am 1. Januar 2013.
- Giacomini, V. (1939) Studi briogeografici. I. Associazioni di Briofite in Alta Valcamonica e in Valfurva (Alpi Retiche di Lombar- dia). *Atti Ist. Bot. Univ. Pavia*, Ser. 4, 12, 1–139.
- Grabherr, G. & Mucina, L. (Hrsg.). (1993). *Die Pflanzengesellschaften Österreichs – Teil 2: Natürliche waldfreie Vegetation*. 1. Aufl. Gustav Fischer, Jena.
- Hadač, E. (1983) A survey of plant communities of springs and mountain brooks in Czechoslovakia. *Folia geobotanica et phy- totaxonomica*, 18: 339–361.
- Hájek, M. (1998) Mokřadní vegetace Bílých Karpat. Sborn. Přír. *Klubu Uherské Hradiště*, 4, 1–158.
- Hájek, M., Hekera, P. & Hájková, P. (2002) Spring fen vegetation and water chemistry in the western carpathian flysch zone. *Folia Geobotanica*, 37, 364–364.

- Hájek, M., Hájková, P. & Peterka, T. (2020) *Variability of spring vegetation on a European scale*. European Vegetation Archive EVA Data Request Form 100 – 2020-03-01. URL: <http://euroveg.org/requests/EVA-data-request-form-2020-03-01-Hajek-Hajkova-Peterka.pdf> (Zugriff am 02.12.2020).
- Hájková, P., Hájek, M., Apostolova, I., Zelený, D. & Dítě, D. (2008) Shifts in ecological behaviour of plant species between two distant regions: evidence from the base richness gradient in mires. *Journal of Biogeography*, 35, 282–294.
- Hannah, D.M., Brown, L.E., Milner, A.M., Gurnell, A.M., McGregor, G.R., Petts, G.E., Smith, B.P. & Snook, D.L. (2007) Integrating climate–hydrology–ecology for alpine river systems. *Aquatic Conservation*, 17, 636–656.
- Hedenäs, L. & Bisang, I. (2002) *Drepanocladus sordidus* und *D. stagnatus*, zwei Sippen für die Schweiz angegeben. *Meylania*, 23, 15–20.
- Heino, J., Virtanen, R., Vuori, K.-M., Saastamoinen, J., Ohtonen, A., & Muotka, T. (2005) Spring bryophytes in forested landscapes: Land use effects on bryophyte species richness, community structure and persistence. *Biological Conservation*, 124, 539–545.
- Hess, H. E., Landolt, E., Müller-Hirzel, R., & Baltisberger, M. (2015) *Bestimmungsschlüssel zur Flora der Schweiz und angrenzender Gebiete*. Springer, Berlin.
- Hinterlang, D. (1992) Vegetationsökologie der Weichwasserquellgesellschaften zentraleuropäischer Mittelgebirge. *Crunoecia*, 1, 1–122.
- Hinterlang, D. (2017). Montio-Cardaminetea (C6): Quell- und Waldsumpfgesellschaften. *Synopsis der Pflanzengesellschaften Deutschlands, Heft 12*. Floristisch-soziologischen Arbeitsgemeinschaft e. V., Göttingen.
- Illies, J. & Botosaneanu, L. (1963) Problèmes et méthodes de la classification et de la zonation écologique des eaux courantes, considérées surtout du point de vue faunistique. *SIL Communications*, 12, 1–57.
- Institut für Wald, Schnee und Landschaft WSL (2019). *VegeDaz (Version Oktober 2019)*. URL: <https://www.wsl.ch/de/services-und-produkte/software-websites-und-apps/vegedaz-version-2017.html> (Zugriff am 06.06.2020).
- Info Flora, das nationale Daten- und Informationszentrum der Schweizer Flora (2020) Verbreitungskarten zu den Arten. URL: <https://www.infoflora.ch/de/flora/art-abfragen.html> (Zugriff am 12.12.2020).
- Juillerat, P., Bäumler, B., Bornand, C., Eggenberg, S., Gygax, A., Jutzi, M., Möhl, A., Nyffeler, R., Sager, L. & Santiago, H. (2017) *Flora Helvetica Checklist 2017 der Gefässpflanzenflora der Schweiz*. Info Flora, Bern.
- Juutinen, R. (2011) The decrease of rich fen bryophytes in springs as a consequence of large-scale environmental loss. A 50-year re-sampling study. *Lindbergia*, 34, 2–18.
- Kästner, M. (1941) Über einige Waldsumpfgesellschaften, ihre Herauslösung aus den Waldgesellschaften und ihre Neueinordnung. *Beihefte zum botanischen Centralblatt Abt. B*, 61, 137–207.
- Knapp, R. & Stoffers, A. L. (1962) Über die Vegetation von Gewässern und Ufern im mittleren Hessen. *Bericht der Oberhessischen Gesellschaft für Natur- und Heilkunde, Giessen, Naturwiss. Abt.*, 32, 90–141.
- Schindler, H. & Frey, W. (2008) *Quellen-Leitfaden*. Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz.
- Koch, W. (1928) Die höhere Vegetation der subalpinen Seen und Moorgebiete des Val Piora (St. Gotthard-Massiv). *Zeitschrift für Hydrologie*, 4, 131-175
- Küry, D. (2018) *Erhebungen Quell-Lebensräume Bündner Pärke 2018: Anleitung Feldarbeiten*, unveröffentlicht.
- Küry D., Lubini-Ferlin V. & Stucki P. (2019a) *Quell-Lebensräume – Anleitung zur systematischen Erhebung und Ermittlung ihrer Bedeutung im Naturschutz*. Expertenbericht. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- Küry, D., Conradin, C. & Abderhalden, A. (2019b) *Quell-Lebensräume in den Bündner Pärken und im UNESCO Biosphärenreservat Engiadina Val Müstair: Erhebung des Ökologischen Zustands und Aufwertungsobjekten 2018*. Bericht im Auftrag des Amtes für Natur und Umwelt ANU Kanton Graubünden, unveröffentlicht.
- Küry, D. (2020) Daten zu den Erhebungen Quell-Lebensräume Bündner Pärke 2016-2018, unveröffentlicht.
- Landolt, E., Bäumler, B., Erhardt, A., Hegg, O., Klötzli, F., Lämmli, W., Nobis, M., Rudmann-Maurer, K., Schweingruber, F. H., Theurillat, J.-P., Urmi, E., Vust, M. & Wohlgemuth, T. (2010) *Flora indicativa: ökologische Zeigerwerte und biologische Kennzeichen zur Flora der Schweiz und der Alpen*. 2. Aufl. Haupt, Bern.
- Lüth, M. (Hrsg.) (2019) *Mosses of Europe - A Photographic Flora*. Vol. 1–3. Michael Lüth, Freiburg.
- Lyons, M.D. & Kelly, D.L. (2017) Plant community ecology of petrifying springs (*Cratoneurion*) – a priority habitat. *Phytocoenologia*, 47, 13–32.

- Maas, F. M. (1959) Bronnen, bronbeken en bronbossen van Nederland, in het bijzonder die van de Veluwezoom. *Meded. Landbouwhogeschool*, 59/12, 1–166.
- Marti, K., Krüsi, B. O., Heeb, J & Theis, E. (1997). *Pufferzonenschlüssel: Leitfaden zur Ermittlung von ökologisch ausreichenden Pufferzonen für Moorbiotope*. BUWAL-Reihe Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern.
- Martin, M., Jöhl, R., Bonnard, L., Borgula, A., Grosvernier, P. & Volkart, G. (2012) *Konzept zur Aufwertung der Biotope von nationaler Bedeutung*. Expertenbericht zu Handen von Bund und Kantonen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- Meier, M. K., Urmi, E., Schnyder, N., Bergamini, A. & Hofmann, H. (2013) *Checkliste der Schweizer Moose*. Nationales Inventar der Schweizer Moosflora, Institut für Systematische Botanik der Universität Zürich.
- Mogna, M., Cantonati, M., Andreucci, F., Angeli, N., Berta, G. & Miserere, L. (2015) Diatom communities and vegetation of springs in the south-western Alps. *Acta Botanica Croatica*, 74, 265–285.
- Nielson, K.G., Gill, K.M., Springer, A.E., Ledbetter, J.D., Stevens, L.E. & Rood, S.B. (2019) Springs ecosystems: vulnerable ecological islands where environmental conditions, life history traits, and human disturbance facilitate non-native plant invasions. *Biological Invasions*, 21, 2963–2981.
- Oberdorfer, E. (1992) *Süddeutsche Pflanzengesellschaften, Teil I: Fels- und Mauergesellschaften, alpine Fluren, Wasser-, Verlandungs- und Moorgesellschaften*. 3. Aufl. Gustav Fischer, Jena.
- Oberdorfer, E. (2001). *Pflanzensoziologische Exkursionsflora für Deutschland und angrenzende Gebiete*. 8. Aufl. Ulmer, Stuttgart.
- O’Callaghan, P., Kelly-Quinn, M., Jennings, E., Antunes, P., O’Sullivan, M., Fenton, O., & hUallacháin, D.Ó. (2019) The Environmental Impact of Cattle Access to Watercourses: A Review. *Journal of Environmental Quality*, 48, 340–351.
- Odum, E.P. (1971) *Fundamentals of Ecology*. Saunders, Philadelphia.
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D, Minchin, P. R., O’Hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoecs, E. & Wagner, H. (2019) *vegan: Community Ecology Package*. R package. Version 2.5-4. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> (Zugriff am 02.12.2020).
- Paton, J. A. (1999) *The liverwort flora of the British Isles*. Brill, Leiden.
- Parc Ela (Hrsg.) (Zugriff 2020a) *Der Parc Ela in Zahlen*. URL: <https://www.parc-ela.ch/de/parc-ela/parc-ela-zahlen> (Zugriff am 02.12.2020).
- Parc Ela (Hrsg.) (Zugriff 2020b) *Natur & Landschaft aufwerten*. URL: <https://www.parc-ela.ch/de/verein-projekte/natur-landschaft-aufwerten> (Zugriff am 02.12.2020).
- Pärtel, M. (2002) Local Plant Diversity Patterns and Evolutionary History at the Regional Scale. *Ecology*, 83, 2361–2366.
- Puczko, K., Zieliński, P., Jusik, S., Kołakowska, A. & Jekatierynczuk-Rudczyk, E. (2018) Vascular plant and bryophyte species richness in response to water quality in lowland spring niches with different anthropogenic impacts. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 338.
- Philippi, G. (1975) Quellflugesellschaften der Allgäuer Alpen. *Beiträge zur naturkundlichen Forschung in Südwestdeutschland*, 34, 259–287.
- Pignatti, E. & Pignatti, S. (2014) *Plant Life of the Dolomites*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Pott, R. (1995). *Die Pflanzengesellschaften Deutschlands*. 2. Aufl. Ulmer, Stuttgart.
- Quinn, G. P. & Keough, M. J. (2002) *Experimental design and data analysis for biologists*. 2. Aufl. Cambridge University Press, Cambridge.
- R Core Team (2017) *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/> (Zugriff am 02.12.2020).
- RStudio Team (2016). *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, Inc., Boston, MA. URL: <http://www.rstudio.com/> (Zugriff am 02.12.2020).
- Reiss, M., Martin, P., Gerecke, R. & von Fumetti, S. (2016) Limno-ecological characteristics and distribution patterns of spring habitats and invertebrates from the Lowlands to the Alps. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1033.
- Roleček, J., Tichý, L., Zelený, D., and Chytrý, M. (2009) Modified TWINSpan classification in which the hierarchy respects cluster heterogeneity. *Journal of Vegetation Science*, 20, 596–602.

- Schnyder, N., Bergamini, A., Hofmann, H., Müller, N., Schubiger-Bossard, C. & Urmi, E. (2004) *Rote Liste der gefährdeten Moose der Schweiz*. BUWAL-Reihe Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern.
- Schubert, R., Hilbig, W. & Klotz, S. (2001) *Bestimmungsbuch der Pflanzengesellschaften Deutschlands*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin.
- Sekulová, L., Hájek, M., Hájková, P., Mikulášková, E., Buttler, A., Syrovátka, V. & Rozbrojová, Z. (2012) Patterns of bryophyte and vascular plant richness in European subalpine springs. *Plant Ecology*, 213, 237–249.
- Smith, A. J. E. (2004) *The moss flora of Britain and Ireland*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Spitale, D., Leira, M., Angeli, N. & Cantonati, M. (2012). Environmental classification of springs of the Italian Alps and its consistency across multiple taxonomic groups. *Journal of the North American Benthological Society*, 31, 563–574. 10.1899/10-038.1.
- Strohbach, M., Audorff, V. & Beierkuhnlein, C. (2009) Drivers of plant species composition in siliceous spring ecosystems: groundwater chemistry, catchment traits or spatial factors? *Journal of Limnology*, 68, 375.
- Surina, B. (2005). Contribution to the spring vegetation of the Julian Alps: The Association *Cratoneuretum falcati* Gams 1927. *Hacquetia* 4/1, 53–59.
- Swissbryophytes (Hrsg.) (2020). Verbreitungskarten Moosarten. URL: https://www.swissbryophytes.ch/index.php/de/verbreitung?taxon_id=nism-2321 (Zugriff am 22.12.2020).
- Suanjak, M. (2007). *Die Vegetation moosdominierter Quellfluren im Nationalpark Gesäuse*. Bericht im Auftrag der Nationalpark Gesäuse GmbH.
- Thienemann, A. (1922) Hydrobiologische Untersuchungen an Quellen (I-IV). *Archiv für Hydrobiologie*, 14, 151–190.
- Tichý, L. (2002) JUICE, software for vegetation classification. *Journal of Vegetation Science*, 13, 451–453.
- Tichý, L. & Chytrý, M. (2006) Statistical determination of diagnostic species for site groups of unequal size. *Journal of Vegetation Science*, 17, 809–818.
- Tüxen, R. (1937) Die Pflanzengesellschaften Nordwestdeutschlands. *Mitteilungen der Floristisch-Soziologischen Arbeitsgemeinschaft Niedersachsen*, 3, 1–170.
- Valachovič, M. (Hrsg.) (2001) *Plant communities of Slovakia – 3. Wetland Vegetation*. Veda, Bratislava.
- Vogt, A. (1998) Quellen im Kreis Herford – Erfassung und Schutzmassnahmen. Das Quellschutz-Projekt der Biologischen Station Ravensburg. *Berichte des Naturwissenschaftlichen Vereins Bielefeld und Umgegend*, 39, 241–268.
- Warncke, E. (1980) Spring Areas: Ecology, Vegetation, and Comments on Similarity Coefficients Applied to Plant Communities. *Holarctic Ecology*, 3, 233–308.
- Weigand, E. (1998) *Limnologisch-faunistische Charakterisierung von Karstquellen, Quellbächen und unterirdischen Gewässern nach Choriotopen und biozönotischen Gewässerregionen: Nationalpark o.ö. Kalkalpen, Österreich*. Bericht im Auftrag des Nationalparks o.ö. Kalkalpen GesmbH
- Wilmanns, O. (1998) *Ökologische Pflanzensoziologie: eine Einführung in die Vegetation Mitteleuropas*. 6. Aufl. Quelle & Meyer, Leipzig.
- Woodward, G., Perkins, D. M. & Brown, L. E. (2010) Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365, 2093–2106.
- Zechmeister, H. & Mucina, L. (1994). Vegetation of European Springs: High-Rank Syntaxa of the *Montio-Cardaminetea*. *Journal of Vegetation Science*, 5, 385–402.
- Zemp, F., Schnyder, N. & Danner, E. (2016) *Moosflora des Kantons Luzern*. Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Luzern, 40.
- Zollhöfer, J. M. (1997) *Quellen - die unbekanntesten Biotope im Schweizer Jura und Mittelland: erfassen - bewerten - schützen*. Bristol Stiftungsserie Band 6. Flück-Wirth Verlag, Teufen, Schweiz.
- Zollhöfer, J.M. (1999). Spring biotopes in Northern Switzerland: Habitat heterogeneity, zoobenthic communities and colonization dynamics. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zurich.

Anhang

1. Kopfdaten
2. Stetigkeitstabelle
3. Sortierte Aufnahme-tabelle

Digitaler Anhang

- Gesamt-Datensatz (.xls)
- Synoptische Tabellen (.xls)
- R-Skripte (.R) mit zugehörigen .csv-Daten
- Vegedaz Tabelle (.tab)
- JUICE-Klassifikation (.wct)

Anhang 1: Kopfdaten, alle Aufnahmen

Laufnr.	Plot-Nr	Cluster	Gew.		Shannon- Evenness	Artenzahl	Gefässpfl.- Arten		Moos-Arten
			Durchlüftungszahl	Index			Arten	Moos-Arten	
1	0180_1	2	2.05	1.95	0.61	23	6	17	
2	0180_2	2	1.59	2.10	0.74	17	12	11	
3	0180_3	2	1.60	2.17	0.80	15	7	9	
4	0181_1	4	1.01	1.27	0.45	17	7	6	
5	0181_2	4	1.02	1.34	0.48	16	7	11	
6	0181_3	4	2.07	1.56	0.50	23	12	9	
7	0295_1	5	1.97	2.34	0.71	26	9	11	
8	0295_2	7	1.51	2.17	0.59	38	6	3	
9	0295_3	7	1.89	1.84	0.64	17	5	4	
10	0297_1	6	1.60	1.91	0.64	20	10	6	
11	0297_2	6	2.15	1.02	0.42	11	16	10	
12	0297_3	6	1.95	1.65	0.58	17	12	4	
13	0449_1	7	1.05	1.81	0.65	16	5	9	
14	0449_2	7	1.33	2.05	0.74	16	14	10	
15	0449_3	7	1.15	1.99	0.65	21	13	12	
16	0719_1	4	1.85	2.10	0.68	22	11	6	
17	0719_2	4	1.56	2.16	0.66	27	12	3	
18	0719_3	4	1.60	1.67	0.58	18	17	5	
19	1203_1	1	1.49	2.18	0.70	23	18	4	
20	1203_2	2	2.15	2.35	0.78	20	18	6	
21	1203_3	3	2.19	2.45	0.78	23	13	6	
22	1218_1	5	2.20	2.15	0.67	24	19	11	
23	1218_2	5	1.54	2.40	0.74	23	10	4	
24	1218_3	7	1.31	2.14	0.74	18	13	5	
25	1220_1	7	2.35	1.16	0.48	11	24	8	
26	1220_2	3	1.00	1.64	0.71	10	19	6	
27	1220_3	3	1.59	1.84	0.80	10	9	2	
28	1354_1	5	1.62	2.53	0.73	31	19	7	
29	1354_2	5	1.79	2.06	0.63	27	17	3	
30	1354_3	7	1.34	2.32	0.70	27	12	2	
31	1355_1	7	1.17	2.21	0.62	36	23	10	
32	1355_2	7	1.44	1.43	0.54	14	31	10	
33	1355_3	2	1.12	1.75	0.57	22	24	7	
34	1447_1	6	2.01	2.10	0.65	25	16	4	
35	1447_2	6	2.90	1.18	0.40	18	17	11	
36	1447_3	6	1.15	1.97	0.67	19	24	14	
37	1454_1	7	1.43	1.76	0.61	18	16	9	
38	1454_2	7	1.39	1.44	0.58	12	15	9	
39	1454_3	7	1.65	1.63	0.54	19	15	7	
40	P1_1	4	1.23	2.62	0.76	31	16	14	
41	P1_2	4	1.03	2.03	0.75	14	14	13	
42	P1_3	4	1.11	2.22	0.75	18	8	11	
43	P3_1	4	1.90	2.73	0.78	33	7	4	
44	P3_2	4	1.56	2.51	0.77	26	8	7	
45	P3_3	4	1.00	1.47	0.61	11	15	10	
46	P4_1	3	1.09	1.91	0.69	16	5	11	
47	P4_2	3	1.72	2.47	0.75	26	10	7	
48	P4_3	3	1.14	2.17	0.78	16	25	13	
49	P5_1	4	1.16	2.30	0.71	26	15	1	
50	P5_2	4	1.25	2.34	0.78	20	10	6	
51	P5_3	4	1.50	1.79	0.64	16	9	5	
52	P6_1	4	1.46	2.51	0.72	33	18	3	
53	P6_2	4	1.59	2.76	0.74	41	12	5	
54	P6_3	4	1.40	2.49	0.73	31	5	2	
55	P7_1	3	1.00	2.03	0.77	14	17	10	
56	P7_2	3	1.40	2.24	0.71	24	23	13	
57	P7_3	3	1.24	2.21	0.69	25	10	1	
58	P8_1	4	1.55	1.89	0.63	20	14	2	
59	P8_2	4	1.25	2.58	0.77	28	9	2	
60	P8_3	4	1.48	2.67	0.72	40	11	5	

Anhang 2: Stetigkeitstabelle

Cluster	1	2	3	4	5	6	7
Bezeichnung	Rheokren Blockschutt	Mineralarm Wald	Mineralarm Kaltsten.	Mineralarm Alpweiden	Basisch Waldsumpf	Basisch Sinter	Montan Kalkmoor
Anzahl Relevés	1	5	9	21	5	6	13
Diagnostische Arten							
	Frequenz						
Rhizomium magnifolium	9	100 **	22	10	-	-	-
Geranium sylvaticum	3	60 **	-	-	-	-	-
Calamagrostis villosa	5	100 **	-	-	-	-	-
Epilobium alsinifolium	8	20	78 **	-	-	-	-
Saxifraga stellaris	9	-	67 **	14	-	-	-
Brachythecium rivulare	19	80 *	100 *	14	20	-	15
Chaerophyllum hirsutum	10	80 **	67 *	-	-	-	-
Pinguicula alpina	15	-	-	71 **	-	-	-
Selaginella selaginoides	16	-	-	67 **	-	-	15
Salix foetida	11	-	-	52 **	-	-	-
Palustriella falcata	12	20	-	52 **	-	-	-
Arabis subcoriacea	13	-	22	52 **	-	-	-
Juncus alpinoarticulatus	14	-	-	52 *	20	-	15
Fissidens dubius	7	-	-	5	80 **	-	15
Plagiochila asplenioides	7	-	-	-	80 **	33	8
Knautia dipsacifolia	8	20	-	-	80 **	33	8
Brachythecium glareosum	6	-	-	5	-	83 **	-
Plagiominium medium	3	-	-	-	-	50 **	-
Carex davalliana	15	-	-	24	20	-	69 **
Begleitarten							
	Frequenz						
Drepanocladus revolvens	2	-	-	10 *	-	-	-
Deschampsia cespitosa	27	20	56	52	100 *	-	38
Meesia uliginosa	1	-	-	5	-	-	-
Ranunculus montanus	1	-	-	5	-	-	-
Vaccinium myrtilloides	6	100	40 *	11	5	-	8
Aster bellidiastrum	37	-	40	33	76	100	67
Carex alba	1	-	-	-	20 *	-	54
Equisetum hyemale	1	-	-	-	5	-	-
Galium mollugo	1	-	-	-	20 *	-	-
Picea abies	18	-	20	11	24	60	67
Fissidens taxifolius	1	-	-	-	-	17 *	31
Carex paniculata	2	-	-	-	5	-	8
Cirsium acaule	1	-	-	-	5	-	-
Festuca arundinacea	1	-	-	-	-	-	8 *
Funaria sp.	1	-	-	-	5	-	-
Philonotis fontana	1	-	-	-	5	-	-
Salix myrsinifolia	4	-	-	-	10	-	15
Peucedanum ostruthium	2	-	20 *	11	-	-	-
Hieracium hoppeanum	1	-	-	-	5	-	-
Juncus subnodulosus	1	-	-	-	-	20 *	-
Riccardia multifida	1	-	-	-	-	20 *	-
Radula complanata subsp. lindenbergiana	1	-	20 *	-	-	-	-
Platydictya jungermannioides	5	-	-	-	5	60 **	8
Androsace chamaejasme	1	-	-	-	5	-	-
Epilobium collinum	1	-	20 *	-	-	-	-
Clematis vitalba	1	-	-	-	20 *	-	-
Alchemilla hybrida aggr.	1	-	-	11 *	-	-	-
Fissidens adianthoides	10	-	20	-	29	-	33
Sorbus aucuparia	1	-	-	-	-	-	8 *
Aneura pinguis	26	-	-	33	57	20	67
Plagiominium affine	2	-	-	-	5	-	17 *
Rhizomium pseudopunctatum	3	-	-	11	5	-	8
Angelica sylvestris	1	-	-	-	-	-	8 *
Cephalozia sp.	1	-	-	-	5	-	-
Amblystegium tenax	2	-	20 *	11	-	-	-
Mentha aquatica	1	-	-	-	-	-	8 *
Tortella tortuosa aggr.	5	-	-	-	10	40 *	8
Plagiominium elatum	6	-	40 *	-	-	40 *	15
Salix caprea	1	-	-	-	-	-	17 *
Vaccinium vitis-idaea	4	100	20 *	-	10	-	-
Polytrichum juniperinum aggr.	1	-	-	-	5	-	-
Grimmiaceae sp.	1	-	-	11 *	-	-	-
Campylium calcareum	2	-	20 *	-	-	-	8
Dicranum scoparium	3	-	40 *	-	-	20	-
Cirsium oleraceum	6	-	20	11	-	-	33
Hylacomium splendens	8	100	40	-	5	60 *	8
Scabiosa columbaria	2	-	-	-	5	-	8
Ctenidium molluscum	1	-	-	-	20 *	-	-
Taraxacum sp.	8	-	20	5	-	-	17
Ranunculus tuberosus	1	-	-	-	20 *	-	38 *
Plantago atrata	1	-	-	-	5	-	-
Vaccinium uliginosum aggr.	4	-	20 *	-	14	-	-
Poa trivialis subsp. trivialis	1	-	-	-	20 *	-	-
Poa annua	1	-	20 *	-	-	-	-
Blepharostoma trichophyllum	3	100	20 *	-	5	-	-
Briza media	1	-	-	-	-	-	8 *
Rhizomium punctatum	3	-	-	-	5	-	33 *
Adenostyles alliariae	2	-	20 *	11	-	-	-
Campylium stellatum subsp. protensum	20	-	20	22	52	20	67 *
Weissia sp.	1	-	-	-	-	-	8 *
Calliigonella cuspidata	5	-	20	-	-	20	23
Leucanthemum vulgare aggr.	3	-	-	11	10	-	-
Achillea millefolium aggr.	1	-	-	-	5	-	-
Campanula scheuchzeri	6	-	-	22 *	19	-	-
Melampyrum pratense	4	-	-	-	10	40 *	-
Juniperus communis subsp. alpina	1	-	-	-	5	-	-
Empetrum nigrum	1	-	-	-	5	-	-
Prunella vulgaris	1	-	-	-	5	-	-

Anhang 2: Stetigkeitstabelle

Cluster		1	2	3	4	5	6	7
Bezeichnung		Rheokren Blockschutt	Mineralarm Wald	Mineralarm Kaltsten.	Mineralarm Alpweiden	Basisch Waldsumpf	Basisch Sinter	Montan Kalkmoor
Anzahl Relevés		1	5	9	21	5	6	13
Ononis spinosa subsp. austriaca	1	-	-	-	-	-	-	8 *
Pinus sylvestris	2	-	20 *	-	-	-	-	8
Prunella grandiflora	2	-	-	-	-	20 *	-	8
Carex flava	6	-	-	-	5	20	17	23
Pteridium aquilinum	1	-	-	-	-	-	-	8 *
Galium uliginosum	1	-	-	-	-	-	-	8 *
Dianthus superbus	1	-	-	-	5	-	-	-
Cerastium arvense subsp. strictum	2	-	-	11	5	-	-	-
Sanionia uncinata	5	-	-	33 *	-	40 *	-	-
Carduus personata	1	-	-	11 *	-	-	-	-
Avenella flexuosa	1	-	-	-	5	-	-	-
Filipendula ulmaria	1	-	-	11 *	-	-	-	-
Erica carnea	1	-	-	-	5	-	-	-
Adenostyles alpina	3	-	-	-	5	-	33 *	-
Campanula rotundifolia	4	-	-	11	-	40 *	17	-
Tofieldia pusilla	1	-	-	-	-	-	17 *	-
Dactylorhiza lapponica	1	-	-	-	-	-	-	8 *
Carex dioica	1	-	-	-	5	-	-	-
Cratoneuron filicinum aggr.	8	-	20	22	10	40 *	-	8
Galium anisophyllum	1	-	-	11 *	-	-	-	-
Hepatica nobilis	1	-	-	-	-	-	17 *	-
Listera ovata	3	-	-	-	5	-	17	8
Carex digitata	1	-	-	-	-	20 *	-	-
Alchemilla glabra	2	-	-	11	5	-	-	-
Myosotis decumbens	1	-	-	11 *	-	-	-	-
Luzula nivea	1	-	-	-	-	20 *	-	-
Philonotis caespitosa	1	-	-	-	5	-	-	-
Humulus lupulus	1	-	-	11 *	-	-	-	-
Cardamine resedifolia	1	-	-	-	5	-	-	-
Distichium capillaceum aggr.	4	-	-	-	10	20	-	8
Rhododendron ferrugineum	1	-	-	-	5	-	-	-
Fragaria vesca	2	-	20	-	-	20	-	-
Catoscopium nigrum	1	-	-	-	-	-	17 *	-
Scapania sp.	2	-	-	-	5	-	-	8
Molinia caerulea	15	-	-	-	29	20	-	62 *
Dactylorhiza maculata aggr.	10	-	-	-	19	40	50 *	8
Plagiominium ellipticum	2	-	-	-	-	20 *	-	8
Cardamine amara	3	-	-	11	-	-	-	15
Pinguicula vulgaris	10	-	-	-	10	-	33	46 *
Palustriella commutata	33	-	-	78	33	80	67	85
Plagiominium undulatum	6	-	20	-	-	20	50 *	8
Brachypodium rupestre	2	-	-	-	-	20 *	-	8
Calamagrostis varia	2	-	-	-	-	-	33 **	-
Cratoneuron decipiens	22	-	60	44	10	80	50	46
Lophocolea bidentata	4	-	-	-	-	40 *	33 *	-
Saxifraga rotundifolia	4	-	60 **	11	-	-	-	-
Scleropodium purum	2	-	-	-	-	-	17 *	8
Rhytidadelphus squarrosus	2	-	-	-	-	20 *	-	8
Petasites albus	7	-	-	-	-	60 **	-	31
Parnassia palustris	7	-	-	-	19	-	-	23 *
Pinus cembra	3	-	-	-	14 *	-	-	-
Trichophorum cespitosum	2	-	-	-	-	-	-	15 *
Juncus articulatus	7	-	-	-	5	40 *	-	31
Juncus triglumis	2	-	-	-	10 *	-	-	-
Polygonum viviparum	21	-	-	56 *	62 *	20	-	15
Agrostis gigantea	27	-	-	33	52	20	83 *	54
Carex capillaris	3	-	-	-	14 *	-	-	-
Sesleria caerulea	14	-	-	-	19	-	50 *	54 *
Carex frigida	6	-	-	33 *	14	-	-	-
Geranium robertianum	1	-	20 *	-	-	-	-	-
Eucladium verticillatum	3	-	-	-	-	-	17	15
Philonotis seriata	6	-	-	-	29 *	-	-	-
Equisetum variegatum	14	-	-	11	43 *	-	-	31
Plagiochila porelloides	11	-	60 *	33	14	-	33	-
Sphagnum capillifolium	1	100	-	-	-	-	-	-
Bryoerythrophyllum alpigenum	1	100	-	-	-	-	-	-
Carex paupercula	2	-	-	22 *	-	-	-	-
Tetraphis pellucida	1	-	20 *	-	-	-	-	-
Lophozia sp.	2	100	-	-	-	-	-	8 *
Anastrophyllum minutum	1	100	-	-	-	-	-	-
Cystopteris fragilis	1	100	-	-	-	-	-	-
Polytrichum alpinum	1	100	-	-	-	-	-	-
Dryopteris expansa	1	100	-	-	-	-	-	-
Plagiothecium denticulatum aggr.	1	100	-	-	-	-	-	-
Urtica dioica	2	-	-	22 *	-	-	-	-
Agrostis stolonifera	13	-	-	56 *	5	40	-	38
Rhytidadelphus triquetrus	6	-	40	-	5	60 *	-	-
Hieracium murorum aggr.	5	-	40 *	11	5	20	-	-
Equisetum arvense	9	-	-	22	-	20	67 *	15
Rubus saxatilis	6	-	-	-	-	40 *	33	15
Bryum pseudotriquetrum	42	-	60	100	62	40	100	69
Pleurozium schreberi	1	100	-	-	-	-	-	-
Oxalis acetosella	9	100	60 *	-	-	40	17	15
Conocephalum conicum aggr.	5	100	40 *	11	-	-	-	8
Didymodon ferrugineus	1	-	20 *	-	-	-	-	-
Rumex obtusifolius	1	-	20 *	-	-	-	-	-
Dicranodontium denudatum	1	-	20 *	-	-	-	-	-
Diplophyllum albicans	1	100	-	-	-	-	-	-
Poa pratensis	2	-	-	22 *	-	-	-	-
Alchemilla conjuncta aggr.	1	-	-	11 *	-	-	-	-
Sphagnum quinquefarium	2	-	-	-	10 *	-	-	-
Hymenostylium recurvirostrum	3	100	-	11	-	-	17 *	-
Encalypta streptocarpa	1	-	-	-	5	-	-	-

Anhang 2: Stetigkeitstabelle

Cluster		1	2	3	4	5	6	7
Bezeichnung		Rheokren Blockschutt	Mineralarm Wald	Mineralarm Kaltsten.	Mineralarm Alpweiden	Basisch Waldsumpf	Basisch Sinter	Montan Kalkmoor
Anzahl Relevés		1	5	9	21	5	6	13
Amblystegium serpens	1	-	-	-	-	-	-	8 *
Carex ferruginea	12	-	-	22	10	60 *	-	38
Hymenoloma crispulum	2	-	-	11	5	-	-	-
Larix decidua	5	-	-	-	10	-	17	15
Salix xhegetschweileri	1	-	-	11 *	-	-	-	-
Aulacomnium palustre	1	-	-	11 *	-	-	-	-
Carex panicea	7	-	-	-	29 *	-	-	8
Eurhynchium schleicheri	1	-	-	-	-	-	-	8 *
Salix appendiculata	1	-	-	-	-	-	-	8 *
Cirsium palustre	1	-	-	-	-	-	-	8 *
Epilobium roseum	1	-	20 *	-	-	-	-	-
Soldanella alpina	3	-	-	-	14 *	-	-	-
Blindia acuta	6	-	-	-	29 *	-	-	-
Carex sempervirens	3	-	-	-	14 *	-	-	-
Schistidium apocarpum aggr.	1	-	-	-	5	-	-	-
Calluna vulgaris	3	-	-	-	14 *	-	-	-
Barbilophozia sp.	4	100	-	33 **	-	-	-	-
Equisetum palustre	12	-	-	11	24	80 **	-	15
Alchemilla alpina aggr.	3	-	-	-	14 *	-	-	-
Ulmus glabra	1	-	-	-	-	-	-	8 *
Salix serpyllifolia	1	-	-	-	5	-	-	-
Carex curvula	3	-	-	-	14 *	-	-	-
Campyllum polygamum	1	-	-	-	-	-	-	8 *
Melica nutans	3	-	-	-	-	40 **	-	8
Campyllum stellatum subsp. stellatum	10	-	-	-	38 *	-	-	15
Bartsia alpina	4	-	-	-	19 *	-	-	-
Crepis paludosa	14	-	20	-	29	20	50	23
Carex nigra	4	-	-	-	19 *	-	-	-
Homogyne alpina	5	-	-	-	24 *	-	-	-
Primula integrifolia	5	-	-	-	24 *	-	-	-
Mesoptychia bantriensis aggr.	9	-	-	22	24	-	17	8
Potentilla erecta	24	-	-	-	52	60	17	69 *
Saxifraga aizoides	21	-	-	22	62 *	-	-	46
Rhinanthus minor	2	-	-	-	10 *	-	-	-
Tussilago farfara	2	-	-	-	10 *	-	-	-
Eleocharis quinqueflora	5	-	-	-	14	-	-	15
Petasites paradoxus	5	-	-	22 *	14	-	-	-
Carex lepidocarpa	18	-	-	-	43	40	-	54 *
Primula farinosa	5	-	-	-	24 *	-	-	-
Amblystegium fluviatile	6	-	40 *	44 *	-	-	-	-
Thymus praecox subsp. polytrichus	2	-	-	-	10 *	-	-	-
Diobelonella palustris	2	-	-	-	10 *	-	-	-
Viola biflora	14	-	60 *	56	14	20	-	15
Carex flacca	31	-	-	-	67	80	83	62
Caltha palustris	4	-	20	-	5	-	-	15
Galium pumilum	2	-	-	-	10 *	-	-	-
Cephaloziella sp.	2	-	-	-	-	20 *	-	-
Philonotis tomentella	5	-	-	22 *	14	-	-	-
Sanguisorba officinalis	5	-	-	-	24 *	-	-	-
Poa alpina	2	-	-	-	10 *	-	-	-
Alnus viridis	2	-	-	-	10 *	-	-	-
Alchemilla coriacea aggr.	6	-	-	22 *	19	-	-	-
Tofieldia calyculata	17	-	-	-	52 *	20	-	38

Anhang 3: Sortierte Aufnahmetabelle

Laufnr.	19	1	2	3	20	33	21	26	27	46	47	48	55	56	57	4	5	6	16	17	18	40	41	42	43	44	45	49	50	51	52	53	54	58	59	60	7	22	23	28	29	10	11	12	34	35	36	8	9	13	14	15	24	25	30	31	32	37	38	39							
Plot-Nr.	1203_1	0180_1	0180_2	0180_3	1203_2	1355_3	1203_3	1220_2	1220_3	P4_1	P4_2	P4_3	P7_1	P7_2	P7_3	0181_1	0181_2	0181_3	0719_1	0719_2	0719_3	P1_1	P1_2	P1_3	P3_1	P3_2	P3_3	P5_1	P5_2	P5_3	P6_1	P6_2	P6_3	P8_1	P8_2	P8_3	0295_1	1218_1	1218_2	1354_1	1354_2	0297_1	0297_2	0297_3	1447_1	1447_2	1447_3	0295_2	0295_3	0449_1	0449_2	0449_3	1218_3	1220_1	1354_3	1355_1	1355_2	1454_1	1454_2	1454_3							
Cluster	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Taxon																																																																			
Galium uliginosum																																																																			
Dianthus superbus																																																																			
Cerastium arvense subsp. strictum																																																																			
Sanionia uncinata																																																																			
Carduus personata																																																																			
Avenella flexuosa																																																																			
Filipendula ulmaria																																																																			
Erica carnea																																																																			
Adenostyles alpina																																																																			
Campanula rotundifolia																																																																			
Tofieldia pusilla																																																																			
Dactylorhiza lapponica																																																																			
Carex dioica																																																																			
Cratoneuron filicinum aggr.																																																																			
Galium anisophyllum																																																																			
Hepatica nobilis																																																																			
Listera ovata																																																																			
Carex digitata																																																																			
Alchemilla glabra																																																																			
Myosotis decumbens																																																																			
Luzula nivea																																																																			
Philonotis caespitosa																																																																			
Humulus lupulus																																																																			
Cardamine resedifolia																																																																			
Distichium capillaceum aggr.																																																																			
Rhododendron ferrugineum																																																																			
Fragaria vesca																																																																			
Catoscopium nigrum																																																																			
Scapania sp.																																																																			
Molinia caerulea																																																																			
Dactylorhiza maculata aggr.																																																																			
Plagiominium ellipticum																																																																			
Cardamine amara																																																																			
Pinguicula vulgaris																																																																			
Palustriella commutata																																																																			
Plagiominium undulatum																																																																			
Brachypodium rupestre																																																																			
Calamagrostis varia																																																																			
Cratoneuron decipiens																																																																			
Lophocolea bidentata																																																																			
Saxifraga rotundifolia																																																																			
Scleropodium purum																																																																			
Rhytidiadelphus squarrosus																																																																			
Petasites albus																																																																			
Parnassia palustris																																																																			
Pinus cembra																																																																			
Trichophorum cespitosum																																																																			
Juncus articulatus																																																																			
Juncus triglumis																																																																			
Polygonum viviparum																																																																			
Agrostis gigantea																																																																			
Carex capillaris																																																																			
Sesleria caerulea																																																																			
Carex frigida																																																																			
Geranium robertianum																																																																			
Eucladium verticillatum																																																																			
Philonotis seriatata																																																																			
Equisetum variegatum																																																																			
Plagiochila porelloides																																																																			
Sphagnum capillifolium																																																																			
Bryoerythrophyllum alpigenum																																																																			
Carex paupercula																																																																			
Tetraphis pellucida																																																																			
Lophozia sp.																																																																			
Anastrophyllum minutum																																																																			
Cystopteris fragilis																																																																			
Polytrichum alpinum																																																																			
Dryopteris expansa																																																																			
Plagiothecium denticulatum aggr.																																																																			
Urtica dioica																																																																			
Agrostis stolonifera																																																																			
Rhytidiadelphus triquetrus																																																																			
Hieracium murorum aggr.																																																																			
Equisetum arvense																																																																			
Rubus saxatilis																																																																			
Bryum pseudotriquetrum																																																																			
Pleurozium schreberi																																																																			
Oxalis acetosella																																																																			
Conocephalum conicum aggr.																																																																			
Didymodon ferrugineus																																																																			
Rumex obtusifolius																																																																			
Dicranodontium denudatum																																																																			
Diplophyllum albicans																																																																			
Poa pratensis																																																																			
Alchemilla conjuncta aggr.																																																																			
Sphagnum quinquefarium																																																																			
Hymenostylium recurvirostrum																																																																			
Encalypta streptocarpa																																																																			
Amblystegium serpens																																																																			
Carex ferruginea																																																																			
Hymenoloma crispulum																																																																			
Larix decidua																																																																			

