

# Erfassung von Klimawandelfolgen an Quellen in Bayern

Leitfaden für eine langfristige  
Beobachtung von Quellen zur Erfassung  
von Klimawandelfolgen in Bayern

Forschungsbericht 57

## IMPRESSUM

Nationalpark Berchtesgaden  
Forschungsbericht 57/2022

**Herausgeber** Nationalparkverwaltung Berchtesgaden  
Doktorberg 6  
83471 Berchtesgaden  
DEUTSCHLAND  
  
T +49 8652 9686-0  
poststelle@npv-bgd.bayern.de  
www.nationalpark-berchtesgaden.bayern.de

im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für  
Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV)  
© Nationalparkverwaltung Berchtesgaden,  
alle Rechte vorbehalten

ISBN 978-3-922325-65-9  
GTIN 9783922325659  
ISSN 0172-0023

**Satz und Druck** Verlag Plenk Berchtesgaden GmbH & Co. KG, Berchtesgaden  
Gedruckt auf Papier aus 100% Altpapier

**Titelbild** Die Gletscherquellen in der Gemeinde Ramsau, Nationalpark  
Berchtesgaden (© Nationalpark Berchtesgaden)

**Zitiervorschlag** LICHTENWÖHRER, K.; LEONHARDT, G.; SEIFERT, L.; HOTZY, R.;  
SCHUBERT, E.; GERECKE, R.; CANTONATI, M.; BLATTNER, L.; LOTZ,  
A. & POSCHLOD, B. (2022): Erfassung von Klimawandelfolgen an  
Quellen in Bayern. Leitfaden für eine langfristige Beobachtung  
von Quellen zur Erfassung von Klimawandelfolgen in Bayern. –  
Nationalparkverwaltung Berchtesgaden (Hrsg.): Forschungs-  
bericht 57, Verlag Plenk, Berchtesgaden, 76 S.

# Erfassung von Klimawandelfolgen an Quellen in Bayern

Leitfaden für eine langfristige Beobachtung von Quellen  
zur Erfassung von Klimawandelfolgen in Bayern

von

Kurt LICHTENWÖHRER\*

Dr. Linda SEIFERT\*\*

Eva SCHUBERT\*\*\*

Dr. Marco CANTONATI\*\*\*\*

Annette LOTZ\*

Dr. Gabi LEONHARDT\*

Ralf HOTZY\*\*\*

Dr. Reinhard GERECKE\*\*\*\*

Dr. Lucas BLATTNER\*\*\*\*\*

Dr. Benjamin POSCHLOD\*

\* Nationalpark Berchtesgaden

\*\* Nationalpark Bayerischer Wald

\*\*\* Landesbund für Vogelschutz in Bayern e.V.

\*\*\*\* Universität Tübingen

\*\*\*\*\* Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

\*\*\*\*\* Universität Basel und Integrative Taxonomy Lab GmbH, Basel



finanziert durch  
Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Verbraucherschutz





## Vorwort Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

Liebe Leserin, lieber Leser,

der Klimawandel verändert die Dynamik der landschaftsprägenden Ökosysteme in Bayern. Die Alpen sind besonders betroffen: Die Jahresmitteltemperaturen steigen dort nahezu doppelt so stark wie im übrigen Bayern. Im Hochgebirge zeigt sich der Klimawandel räumlich und zeitlich zudem sehr variabel – es gibt Gewinner und Verlierer in der Tier- und Pflanzenwelt.

Eine erstmalige Zusammenarbeit der beiden bayerischen Nationalparke in der Klimaforschung hat es nun ermöglicht, das Klima und seine Auswirkungen über lange Zeiträume im natürlichen Umfeld vergleichend zu untersuchen – im Alpenraum und im Bayerischen Wald. Durch die Auswertung langjähriger Datenreihen, die im Rahmen des Klimamonitorings dort erhoben werden, können die Auswirkungen des Klimawandels erkannt und die Erkenntnisse für Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel nutzbar gemacht werden.

Als beispielhafte Quellstandorte sind die Kernzonen der bayerischen Nationalparke von unschätzbarem Wert für die Klimaforschung. Quellstandorte stellen eine einzigartige Verbindung des Grundwassers mit dem Oberflächenwasser dar. Zudem haben auch seltene Tier- und Pflanzenarten hier einen speziellen Lebensraum. Chemisch-physikalische und biologische Veränderungen des Quellwassers und des Umfelds einer Quelle können Hinweise auf klimabedingte Veränderungen des regionalen Wasserhaushalts geben. Der vorliegende, reich bebilderte Leitfaden gibt erstmals übertragbare Handlungsempfehlungen für die klimabezogene Untersuchung von Quellstandorten. Er wendet sich an interessierte Fachleute, Kommunen, Verbände und Fachbehörden.

Mein herzliches Dankeschön gilt dem Autorenteam der Nationalparkverwaltung Berchtesgaden und der Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald, dem Klima-Allianz Partner Landesbund für Vogelschutz in Bayern e.V. sowie dem Bayerischen Landesamt für Umwelt und allen international tätigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der beteiligten Universitäten Tübingen, Bologna und Basel für ihre wertvollen Forschungsarbeiten zum Klimawandel an Quellstandorten.



Thorsten Glauber, MdL

Bayerischer Staatsminister für Umwelt und Verbraucherschutz

## Vorwort Bayerische Nationalparke

Nationalparke bieten durch die besondere Kombination der ökologischen und organisatorischen Rahmenbedingungen einzigartige Möglichkeiten zur langjährigen wissenschaftlichen Erforschung und dem Monitoring der Klimawandelfolgen in unberührten Systemen. Gleichzeitig sind Nationalparke wichtige Lernorte, mit dem Ziel, Empfehlungen für Anwendungen über ihre Grenzen hinaus zu erarbeiten und wichtige Orte der Vernetzung. All diese Gesichtspunkte konnten im vorliegenden Projekt verwirklicht werden.

Quellen spielen aufgrund ihrer ökologischen Schlüsselfunktion im Hinblick auf die Klimawandelfolgen für Wasserhaushalt und Biodiversität eine wichtige Rolle. Bereits vor vielen Jahren hat der Nationalpark Berchtesgaden den Forschungsbedarf zur Dokumentation von Auswirkungen des Klimawandels an seinen Quellstandorten erkannt. Datenerhebungen zu Quellstandorten liegen für das Gebiet seit 25 Jahren vor und dieses langfristige Monitoring hat nun eine große Bedeutung für die Abschätzung von Klimawandelfolgen auf Ökosysteme.

Am Beispiel der natürlichen Quellen haben nun die beiden bayerischen Nationalparke in Berchtesgaden und im Bayerischen Wald erstmals in ihrer Geschichte ein gemeinsames Forschungsvorhaben zu den Folgen des Klimawandels umgesetzt. Als weiterer Partner konnte der Landesbund für Vogelschutz in Bayern e.V. (Partner der Bayerischen Klima-Allianz) gewonnen werden. Mit dessen Expertise und den Empfehlungen zur Methodenübertragung in ganz Bayern wird es möglich sein, die Ergebnisse dieses Leitfadens in räumlich übergreifendem Zusammenhang anzuwenden. Letztendlich könnte die vorliegende Arbeit durchaus in weitaus größeren ökologischen Einheiten, wie zum Beispiel dem Alpenraum als Wasserschloss Europas umgesetzt werden. Erste Interessensbekundungen hierzu liegen vor.

Mit diesem Leitfaden erbringt die Bayerische Umweltverwaltung eine gesellschaftliche Vorsorgeleistung für das Monitoring von Quellen. Wir danken allen an dem Projekt beteiligten Partnern und Mitarbeitern, die zu dem Erfolg beigetragen haben. Dieses Projekt ist sicher beispielgebend für die künftig noch engere Zusammenarbeit der beiden Nationalparke in Bayern, hier im Bereich Forschung und Monitoring.



*Roland Baier*

Dr. Roland Baier  
Leiter Nationalpark Berchtesgaden



*Franz Leibl*

Dr. Franz Leibl  
Leiter Nationalpark Bayerischer Wald

## Vorwort Landesbund für Vogelschutz in Bayern e.V.

Quellen sind Lebensräume mit einer einzigartigen Tier- und Pflanzenwelt. Durch die sehr stabilen Standortfaktoren, wie Temperatur oder Wasserchemismus, konnten sich seit der letzten Eiszeit Lebensgemeinschaften in natürlichen Quellen etablieren, die ausschließlich dort vorkommen. Aus diesen Gründen eignen sich natürliche Quellen ganz besonders zum Monitoring von Klimaveränderungen, da zudem von einer besonderen Sensibilität der Quellorganismen gegenüber klimatischen Veränderungen auszugehen ist.

Im vorliegenden Leitfaden werden die Rahmenbedingungen für ein bayernweit übertragbares Klimamonitoring an Quellen aufgezeigt. Aufbauend auf den langjährigen Untersuchungen im Nationalpark Berchtesgaden, die nun durch Erhebungen im Nationalpark Bayerischer Wald ergänzt wurden, lässt sich eine praktikable und allgemeingültige Methode für ein Klimamonitoring an Quellen ableiten.

Die beiden bayerischen Nationalparks sind hierbei ihrer Vorbildfunktion als Referenzgebiete und Forschungsstandorte eindrücklich nachgekommen. Einmal mehr wurde dabei der Wert unberührter Referenzgebiete unter Beweis gestellt.

Die hier erarbeiteten Grundlagen sollten nun zur bayernweiten Anwendung kommen. Dazu wurden Vorschläge im Rahmen des Projektes erarbeitet, die als Grundlage für ein bayernweites Quellmonitoring dienen können. Neben den Erkenntnissen im Hinblick auf die Klimaveränderungen können so wertvolle Grundlagendaten zur Biodiversität an Quellen gewonnen werden. Es entstehen dadurch wertvolle Synergieeffekte im Klima- und Biodiversitätsschutz.

Der Landesbund für Vogelschutz in Bayern e.V. (LBV), Partner der Bayerischen Klima-Allianz, beschäftigt sich seit über 25 Jahren mit dem Lebensraum Quelle und konnte insbesondere in den letzten Jahren im Rahmen des vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) beauftragten Projektes „Quellschutz in Bayern“ einen hohen Erfahrungsschatz zum Thema gewinnen. Wir sind gerne bereit auch weiterhin unsere Expertise für ein bayerisches Quellmonitoring einzubringen!



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Norbert Schäffer'.

Dr. Norbert Schäffer

Erster Vorsitzender Landesbund für Vogelschutz in Bayern e.V.

## Kurzfassung

Quellen bilden einen Lebensraum mit hoher und spezifischer Biodiversität und sind Übergangszonen zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser. Sie haben als sensible ökologische Sonderstandorte auch eine besondere Zeigerfunktion für die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt einer Region. Die ökologischen Wechselwirkungen zwischen Klima, Wasserhaushalt und Biodiversität können besonders an natürlichen d.h. nicht von direktem menschlichem Einfluss veränderten Quellen beobachtet und verstanden werden.

Mit dem Wandel des Klimas sind auch Veränderungen an den Quellstandorten zu erwarten z.B. durch veränderte Wassertemperatur und Wasserführung, die sich auf die Diversität der Organismen auswirken. Verlässliche Aussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels erfordern allerdings eine einheitliche Methode der Beobachtung von Quellen und vergleichbare Datenreihen über lange Zeiträume. Erst dann können Trendentwicklungen sicher erkannt und analysiert werden.

Der Nationalpark Berchtesgaden hat seit vielen Jahren in die Quellforschung investiert. Um daraus einen dauerhaften gesellschaftlichen Mehrwert zu schöpfen, wurden die Erkenntnisse nun konsolidiert und zur Entwicklung des vorliegenden Leitfadens genutzt. Dabei spielte die erfolgreiche Übertragung auf den Nationalpark Bayerischer Wald sowie die langjährige Erfahrung des Landesbundes für Vogelschutz in Bayern e.V. – Partner der Bayerischen Klima-Allianz – im Schutz von Quellen eine wichtige Rolle.

Der vorliegende Leitfaden für eine Beobachtung natürlicher Quellen im Hinblick auf Klimawandelfolgen in Bayern wurde in dem dreijährigen Projekt „Quellen in den bayerischen Nationalparks als Zeiger des Klimawandels – QuellNPB; TKP01KPB-70869 und TKP01KPB-71382“ erarbeitet. Das Projekt wurde finanziert und begleitet durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz. Der Leitfaden beschreibt eine ausgereifte, auf Übertragbarkeit getestete Methode für die langfristige Beobachtung von Quellen hinsichtlich Klimawandelfolgen und liefert eine Entscheidungsgrundlage zur Etablierung eines solchen Quell-Monitoring-Programms.

Neben einheitlichen Kriterien zur Standortwahl sind ausgewählte klimasensitive Parameter zu erfassen. Dazu gehören die Kartierung von Quellumfeld und -struktur, die Messung von abiotischen Parametern und die Bestimmung des faunistischen und floristischen Artenbestands. Die Datenaufnahmen sind in fixen Zeitintervallen zu wiederholen. Je nach Parameter umfassen die vorgeschlagenen Messintervalle Zeiträume von dreimal pro Jahr bis zu alle 5 Jahre. Von zentraler Bedeutung für den Erfolg einer langjährigen Quellbeobachtung ist die nachhaltige Speicherung der aufgenommenen Parameterdaten. Dafür wurde im Zuge des Projektes



eine Datenbank entwickelt, die alle Monitoring-Parameter integriert und eine standardisierte Datenhaltung gewährleistet.

Die Erkenntnisse über Veränderungen an unseren natürlichen Quellen sind nutzbar als Nachweise für die konkreten Auswirkungen des Klimawandels. Sie können einen Eindruck von der Resilienz unserer Ökosysteme vermitteln und lassen Rückschlüsse auf Wasserhaushalt und Wasserversorgung zu.

Mit diesem Leitfaden wurde ein praktisches Werkzeug geschaffen, die für natürliche Quellen als klimasensitiv eingeschätzten Parameter zu dokumentieren und damit Auswirkungen des Klimawandels zu erkennen.

Konkrete Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels liefert der Leitfaden nicht, wohl aber ein Werkzeug zur Dokumentation von klimabedingten Trendentwicklungen und zur Begründung des Erhalts natürlicher Quellstandorte als Dauerbeobachtungsstellen mit ökologischer Schlüsselfunktion für Wasserhaushalt und Biodiversität sowie zur Argumentationsunterstützung von Klimaschutzmaßnahmen an anderer Stelle wie z.B. der Trinkwassernutzung.

Bei einer überregional einheitlichen Anwendung der Methode sind vergleichende Untersuchungen in verschiedenen hydrogeologischen Teilräumen und gesamt-bayerische Trendanalysen möglich. Das räumlich übergreifende Gesamtverständnis ist essentiell, um der Diversität der Quelllebensräume und deren unterschiedlicher Reaktion auf die Einflüsse des Klimawandels Rechnung zu tragen. Die Nationalparke als Referenzgebiete mit ihrer Infrastruktur bieten dabei die Möglichkeit zur lokalen und regionalen Klimaforschung und können als wissenschaftliche Lernorte Erkenntnisgewinne für die Nutzung außerhalb der Schutzgebiete beitragen.

Wie jedes Monitoring stellt auch die Quellbeobachtung eine Investition in die Zukunft dar, deren Erfolg sich möglicherweise erst in künftigen Generationen auszahlen wird. Bisher konnten keine eindeutig auf den Klimawandel zurückzuführende Trendentwicklungen im Quelllebensraum des Nationalparks Berchtesgaden nachgewiesen werden, da die vorliegenden Zeitreihen noch nicht lang genug sind. Diese Notwendigkeit langjähriger vergleichbarer Untersuchungen und insbesondere auch der überregionale Einsatz der Methode in verschiedenen Flächenzuständigkeiten erfordert eine gesamt-bayerische Koordination.

Das mit einem bayernweiten Monitoring an natürlichen Quellen erzielbare Wissen kann jedoch – entsprechende Kontinuität in der Umsetzung vorausgesetzt – zum umfassenden Verständnis ökosystemarer Zusammenhänge dienen. Es kann damit als ergänzendes Informationsinstrument für die Maßnahmen der bayerischen Klimapolitik herangezogen werden und übergeordnete Entscheidungen der Umweltverwaltung stützen.



## Inhaltsverzeichnis

Vorwort Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz .....	5
Vorwort Bayerische Nationalparke .....	6
Vorwort Landesbund für Vogelschutz in Bayern e.V.....	7
Kurzfassung.....	8
Inhaltsverzeichnis .....	11
1 Fachliche Grundlagen – Quellen und deren Klimarelevanz.....	12
1.1 Der Lebensraum Quelle .....	12
1.2 Klimawandel und Klimarelevanz von Quellen .....	17
1.3 Zielsetzung .....	21
2 Methoden .....	22
2.1 Auswahl der Untersuchungsstellen.....	22
2.2 Monitoring-Parameter im Überblick .....	25
2.3 Umfeld- und Strukturkartierung .....	25
2.4 Abiotisches Monitoring .....	26
2.4.1 Schüttung .....	28
2.4.2 Temperatur .....	29
2.4.3 pH-Wert .....	32
2.4.4 Elektrische Leitfähigkeit.....	33
2.4.5 Sauerstoffgehalt .....	35
2.4.6 Elektrolyte und Nährstoffe .....	36
2.5 Biologisches Monitoring .....	38
2.5.1 Mikrobiologie .....	39
2.5.2 Botanik.....	40
2.5.3 Zoologie.....	42
2.5.4 Molekulare Methoden .....	52
3 Langfristige Datenhaltung und Auswertung .....	57
4 Rahmenbedingungen für ein Monitoring an Quellen .....	58
5 Empfehlungen für eine bayernweite Beobachtung ausgewählter Quellstandorte .....	59
5.1 Auswahl der Quellstandorte.....	59
5.2 Voraussetzungen für eine langfristige bayernweite Quellbeobachtung .....	60
6 Zusammenfassung und Schlussbemerkung.....	61
Danksagung .....	63
Abbildungsverzeichnis.....	65
Tabellenverzeichnis .....	65
Literatur .....	66
Glossar .....	71

# 1 Fachliche Grundlagen – Quellen und deren Klimarelevanz

## 1.1 Der Lebensraum Quelle

Als „örtlich begrenzter Grundwasseraustritt, der zumindest zeitweise zu einem Abfluss führt“ (DIN 4049-3) ist die Quelle der einzige Ort in der hydrographischen Landschaft, an dem Grundwasser kontinuierlich (in temporären Quellen mit saisonaler Unterbrechung) nachströmt, ohne sich nachhaltig mit Oberflächenwasser zu mischen. Lediglich bei Starkregenereignissen kann es im Quellbereich zu einem Zutritt von Niederschlagswasser kommen, vor allem in exponiertem Offenland auf staunassen Böden. Quellen unterscheiden sich damit nicht nur entscheidend von den durch Oberflächenwasser- und Niederschlagspeisung geprägten Bächen, Flüssen, Teichen und Seen, sondern auch grundsätzlich von durch Grundwasser beeinflussten Bereichen in diesen größeren Gewässern: Dort werden die Grundwassereigenschaften unmittelbar an der Kontaktzone durch Mischwassersituationen „verwässert“. In Quellen hingegen trifft das Grundwasser mit allen seinen Sondereigenschaften auf die vollkommen andersartigen Milieuverhältnisse der Erdoberfläche, um dann in Kontakt mit Atmosphäre und Substraten einen Veränderungsprozess zu durchlaufen, der umso rascher ist, je drastischer die Unterschiede zwischen Untergrund und Oberfläche sind (Gerecke 2016).

Eine Quelle ist demnach durch zwei voneinander getrennte Lebensbereiche geprägt – den Grundwasserspeicher und den Quellbereich. Der Grundwasserspeicher ist als Teil des Wasserkreislaufes einer Region

unmittelbar durch die klimatischen Gegebenheiten auf regionaler und größerer Skala beeinflusst. Seine Charakteristik bestimmt Menge und Qualität des fließenden Wassers an der Quelle. Der Quellbereich erstreckt sich vom Quellmund, dem Austrittspunkt des Grundwassers, bis zum Beginn des Quellbachs. Die Eigenschaften dieses Bereichs sind nicht nur durch interne Faktoren geprägt (z.B. Wasserqualität und Substratbeschaffenheit), sondern auch durch externe wie die Eigenschaften des angrenzenden Geländes, der umgebenden Vegetation und vor allem von den klimatischen Gegebenheiten am Austrittsort. Die Artenvielfalt an einer Quelle wird maßgeblich von der Menge des fließenden Wassers und der Substratvielfalt beeinflusst (Schröder et al. 2006, Gerecke & Franz 2006). Die Verfügbarkeit einer Vielzahl von Kleinstlebensräumen im Quellbereich ermöglicht die Etablierung einer differenzierten Algen-, Moos- und Gefäßpflanzenflora im Übergangsbereich Wasser-Land, die ihrerseits eine diverse Besiedlung durch wirbellose Tiere begünstigt. Parameter wie das Fließverhalten am Austritt und die vorherrschenden Substrattypen bilden die Basis für den, im Rahmen des Aktionsprogramms Quellen vom Bayerischen Landesamt für Umwelt erstellten Bayerischen Quelltypenkatalog.

Der genannte Quelltypenkatalog kann digital auf der Webseite der Bayerischen Umweltverwaltung bezogen werden (siehe LfU 2008a).

Für die Klimafolgenforschung an Quelllebensräumen ist neben einer Übersicht über wichtige physikalisch-chemische Parameter in der Quelle eine möglichst genaue Kenntnis des gesamten Quellsystems von zentraler Bedeutung (Abbildung 1). Neben Informationen über das Einzugsgebiet (Höhenlage, naturräumliche Gegebenheiten im Infiltrationsbereich) und der Beschaffenheit des Grundwasserleiters, der das Wasser vom Einzugsgebiet zum Ausfluss am Quellmund transportiert, sind genaue Kenntnisse der Gegebenheiten im direkten Umfeld der Quelle grundsätzlich wichtig.

Überdies spielen die unterschiedlichen Quelltypen bei der Analyse von ökologischen und klimatischen Veränderungen des Quelllebensraumes eine wesentliche Rolle. Nach Substratbeschaffenheit und Fließverhältnissen lassen sich Quellen in das folgende, in der Limnologie etablierte System einordnen (Steinmann 1915, Thienemann 1922) – auch die Zuordnung zu Übergangstypen ist möglich und häufig erforderlich.

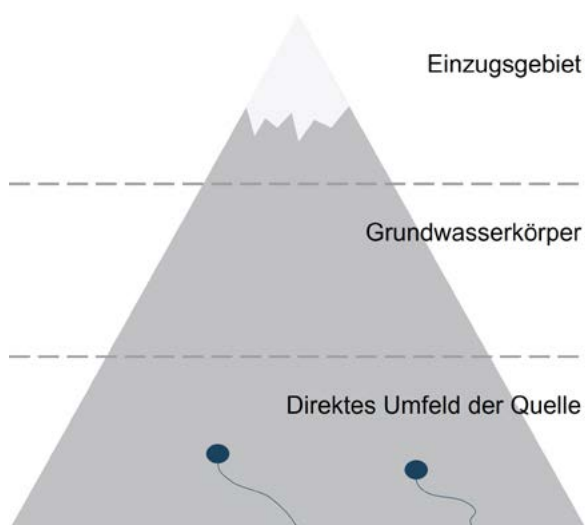


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Quellsysteme. | © Nationalparkverwaltung Berchtesgaden

#### Arten von Quellen:

(1) Die Strukturvielfalt ist im Typ der Sickerquelle (Helokrene, Abbildung 2) insbesondere ausgeprägt. Sickerquellen entstehen im flachen Gelände oder bei stärkerem Gefälle als Hangquellmoore und sind charakterisiert durch flächenhaften, oft diffusen Grundwasseraustritt und eine generell schwache Schüttung mit Ausbildung ausgedehnter Flachwasserbereiche. In Quellen dieses Typs wurden in den vergangenen Jahrzehnten zoogeographisch und biologisch besonders interessante Lebensgemeinschaften entdeckt. Neben strikt an Quellen gebundenen (krenobionten) Arten finden sich auch etliche mit einer Präferenz für Feuchtbereiche zwischen Wasser und Land. Sollte es in solchen Quellen zu klimabedingten Veränderungen der Lebensbedingungen kommen, dürften diese nur schwer zu dokumentieren sein: Auf Veränderungen von Schüttung, Temperaturverhältnissen oder Chemismus können Sickerquellen durch Verlagerungen innerhalb ihrer komplexen Struktur reagieren, die nur zu beobachten sind, wenn sie mit einem ganzen Netz von Probestellen oder zumindest einem Transekt überzogen werden.



Abbildung 2: Helokrene (Sickerquelle) im Nationalpark Bayerischer Wald. | © Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald



Abbildung 3: Stark schüttende Rheokrene (Fließquelle) im Nationalpark Berchtesgaden. © Nationalparkverwaltung Berchtesgaden



Abbildung 4: Limnokrene (Tümpelquelle) im Nationalpark Berchtesgaden. © Nationalparkverwaltung Berchtesgaden

(2) Meistens klarer strukturiert sind die Fließquellen (Rheokrenen, Abbildung 3), deren Wasser an einer wohldefinierten, i.A. punktförmigen Stelle zutage tritt und nach kurzer Strecke einen eindeutigen Quellbach bildet. Sie weisen im Vergleich zu Helokrenen entsprechend einer geringeren Differenzierung ihrer Substrate eine verringerte Artenvielfalt auf, zeigen aber oft einen ausgeprägten biozönotischen Längsgradienten: Im unmittelbaren Quellmundbereich können Populationen stygobionter Arten auftreten, im anschließenden, oft moosreichen eigentlichen Quellbereich Gemeinschaften krenobionter und krenophiler Arten und im anschließenden Übergangsbereich Quelle/Quellbach auch Vertreter bachtypischer Arten, z.B. filtrierende oder größere räuberische Arten. In Quellen dieses Typs ist zu erwarten, dass sich klimabedingte Veränderungen der Lebensbedingungen am ehesten in Veränderungen der Besiedlungsstruktur niederschlagen. Neben Verschiebungen der Grenzen in der Längszonierung und der Ein- bzw. Auswanderung einzelner stygobionter/rhithrobionter Arten wären hier auch großräumige zoogeographische Wanderungsbewegungen gut dokumentierbar.

Lineare Quellen, ein Sondertypus der Rheokrene, der dadurch gekennzeichnet ist, dass sich die Lage des Quellmunds je nach Füllungsstand des Grundwasserspeichers verlagert, sind unter hydrographischen Gesichtspunkten von Interesse, da sich hier Tendenzen der Grundwasserkapazitäten beobachten lassen. Die Instabilität des Austrittsbereichs schränkt jedoch die Möglichkeiten biologischer Beobachtung stark ein.

(3) Tümpelquellen (Limnokrenen, Abbildung 4) sind durch einen Wasseraufstau am Quellmund charakterisiert. Die hier auf den Grundwasseraustritt wirkenden Außenfaktoren können bei geringer Größe des Staubeereichs vernachlässigbar sein, mit wachsender Ausdehnung aber ausgesprochene Bedeutung erlangen (Sonneneinstrahlung, Temperaturschichtung, Ausbildung stagnierender Uferbereiche). Quellen mit relativ gering ausgedehntem Stau am Quellmund können als Sonderfall der Rheokrenen aufgefasst werden. Wie in Rheokrenen dürften klimabedingte Veränderungen das Aus- und Einwandern von Arten zur Folge haben.

Die Besonderheit von Quellen im Landschaftsgefüge liegt darin begründet, dass sie ihre Eigenschaften aus einem ortsfremden, von der Oberfläche abgeschnittenen Lebensraum beziehen. Der Grundwasserleiter, typischerweise von ephemeren, diurnalen und saisonalen Wetterereignissen weitgehend unberührt, spiegelt fortschreitende Umweltveränderungen, z.B. Klimawandel, wider (Hemmerle & Bayer, 2020). Diese Umweltveränderungen im Grundwasserleiter ziehen sich fort zum Quelllebensraum und bewirken in der Quelle klimabedingte Veränderungen. Folgende Auswertungen zeigen jedoch, dass Quelllebensräume einerseits stabile Ökotope sind und Umweltveränderungen teilweise erst nach längerer Zeit sichtbar werden und vor allem auch heterogen sind und somit Klimawandel-bedingte Veränderungen unterschiedlich auftreten werden. Aus einer zehnjährigen Untersuchung im Nationalpark Berchtesgaden (Gerecke &

Franz 2006), die erstmals im Nordalpenraum umfassende biologische Daten lieferte, ergaben sich drei besonders wichtige Erkenntnisse über die Lebensgemeinschaften von Quellen:

- Eine überraschende taxonomische Vielfalt, mit der Entdeckung zahlreicher seltener oder für die Wissenschaft neuer Tierarten. Individuelle Untersuchungsstellen können sich hinsichtlich Artenvielfalt und Faunenspektrum stark unterscheiden – erst nach Untersuchung einer hohen Zahl ökologisch unterschiedlicher Quellen lässt sich der Beitrag dieser Lebensräume zur Biodiversität eines Gebietes abschätzen.
- Eine hohe Stabilität in der organismischen Besiedlung. Bei jährlichen Wiederholungsuntersuchungen in drei ausgesuchten Quellkomplexen (1994 bis 2005) waren keine Veränderungen in den relativen Häufigkeitsmustern der Vertreter wichtiger Tiergruppen festzustellen (Schnecken und Muscheln, Krebstiere, Milben, Köcherfliegen).
- Ein Defizit hinsichtlich verfügbarer Daten zur Besiedlungsgeschichte. Während Verbreitungswechsel der Flora oder verschiedener traditionell intensiv beobachteter Tiergruppen (Vögel, Käfer, Schmetterlinge) in großräumigen Landschaftsstrukturen Rückschlüsse auf ökologische Entwicklungen in den vergangenen 200 Jahren erlauben, fehlen entsprechende Informationen für die Lebensgemeinschaften von Quellen vollkommen.

Eine weitere umfassende Auswertung im Nationalpark Berchtesgaden in den Jahren 2017–2019 im Zuge des Projektes „QuellNPB“, in dessen Rahmen faunistische Daten von 1994–2018 und abiotische Aufnahmen von 2000–2019 berücksichtigt wurden, bestätigte die hohe Stabilität des Lebensraumes Quelle: In knapp 25 Jahren waren keine markanten faunistischen Veränderungen festzustellen. Weder wurde das Verschwinden oder erstmalige Auftreten besonderer Arten registriert, noch gar die Immigration von Neozoen. Es zeigt sich aber, dass unterschiedliche Quellsysteme, definiert durch beispielsweise Einzugsgebiet, Grundwasserspeicher, Substrat und Schüttungsregime unterschiedliche Einflusstendenzen des Klimawandels in beispielsweise Wassertemperatur über die Jahre aufweisen werden.

Im Zuge der Auswertung von Daten aus Datenlogger, die 2018 an Quellen unterschiedlicher Art in Berchtesgaden angebracht wurden, zeigt sich, dass je nach Quelle und Einzugsgebiet im Jahres-, aber auch im Tageslauf Temperaturschwankungen unterschiedlicher Amplitude auftreten können. Detaillierte Analysen der Ergebnisse befinden sich im Abschlussbericht des genannten Forschungsprojektes „QuellNPB“ (Lichtenwöhler et al. 2019).

Zur Dokumentation von Quellen als Lebensräume sind in den letzten beiden Jahrzehnten auch in anderen Gebieten des Alpenraums verschiedene faunistische und floristische Projekte in Gang gekommen. Im Fokus stand in den meisten Fällen die Dokumentation einer bis dato kaum bekannten Artenvielfalt

(Norditalien, Parco Naturale Adamello-Brenta: Cantonati et al. 2007a, Österreich, Oberösterreich, Nationalpark Kalkalpen: Weigand & Graf 2000; Steiermark, Nationalpark Gesäuse: Gerecke et al. 2012, Kreiner et al. 2018; Ausseerland: Remschak & Haseke 2019; Schweiz, NP Graubünden: Von Fumetti & Blattner 2016, gesamte Schweizer Alpen: Küry et al. 2016). Bei diesen Untersuchungen konnten ganz neue Einsichten in die Floristik, Faunistik und Biogeographie alpiner Quellen gewonnen werden, begleitet von der Entdeckung einer hohen Anzahl für die Wissenschaft neuer Arten. Für die Quellen der Schweiz wurde durch Lubini et al. (2014) ein Bewertungsverfahren entwickelt, das Aussagen über anthropogene Störungen erlaubt und Grundlagen für Renaturierungsmaßnahmen vermittelt. Am Beispiel ausgewählter Insektengruppen aus den Schweizer Hochalpen legten Küry et al. (2018) erstmals eine Analyse der Empfindlichkeit von Quellbewohnern gegenüber Klimaveränderungen vor. Die dort untersuchten Quellen liegen auf Meereshöhen zwischen 1.700 und über 2.500 m NHN, also auf einem Höhen transekt, dessen unterstes Ende sich gerade auf dem Niveau der höchstgelegenen Quellen Bayerns befindet. Auf Basis all dieser Forschungen publizierte das Schweizerische Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2021 eine Arbeitsgrundlage für Erfassung, Schutz und Renaturierung der Quellen des Landes.

Eine Übersicht über entsprechende Forschungen in Nordamerika, wo Quellen in den vergangenen Jahrzehnten ebenfalls zu einem wichtigen Objekt der Umweltforschung geworden sind, geben Stevens et al. (2020).



## 1.2 Klimawandel und Klimarelevanz von Quellen

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme sind mannigfaltig und haben sowohl globalen als auch regionalen Charakter: Während sich die Temperatur an der Erdoberfläche seit der Periode 1850–1900 bis heute global um ca. + 1,1 °C erhöhte (IPCC 2021), wurde in den Alpen eine etwa doppelt so starke Erwärmung mit rund +2 °C beobachtet (Kuhn & Olefs, 2020). Dieser räumliche Unterschied der Temperaturentwicklung lässt sich teilweise dadurch erklären, dass sich die Landoberfläche (+1,6 °C) stärker erwärmt als die Ozeane. Die verstärkte Temperaturzunahme im alpinen Raum gegenüber anderen Landflächen ist auf unterschiedliche Prozesse wie z.B. den verstärkten Schnee-Albedo-Rückkopplungseffekt zurückzuführen (Gobiet et al. 2013; Winter et al. 2017). Mit einer der Entwicklung der vergangenen Jahrzehnte vergleichbaren weiteren Zunahme der Lufttemperatur ist zu rechnen: Laut unterschiedlichen Szenarien des IPCC-AR6 (SSP1-1.9 bis SSP5-8.5) ist bis 2100 mit einem globalen Temperaturanstieg im Mittel von 1,4 °C bis 4,4 °C im Vergleich zu 1850–1900 zu rechnen (IPCC 2021). Im Zuge eines im Nationalpark Berchtesgaden durchgeführten Projekts (BIAS II) wurde für die nahe Zukunft (2020–2049 im Vergleich zu 1980–2009) für Zentraleuropa eine Zunahme der mittleren Lufttemperatur um +0,90 °C modelliert, für die Alpen um +0,96 °C (für die Zielregion des genannten Projektes den Nationalpark Berchtesgaden zwischen +0,93 °C und +1,05 °C – im Mittel +0,99 °C) (Warscher et al. 2019).

Auch die räumliche und zeitliche Verteilung sowie die Intensität des Niederschlags wird

durch den Klimawandel beeinträchtigt. Starkregenereignisse in Bayern und im Alpenraum werden intensiver und häufiger auftreten (Poschlod & Ludwig, 2021). Für Zentraleuropa (2020–2049 im Vergleich zu 1980–2009) modellieren Warscher et al. (2019) eine Zunahme des mittleren Niederschlages um 6 %, für die Alpen sogar um 10 %, mit einer prognostizierten Zunahme ausschließlich in den Herbst- und Wintermonaten bei nahezu unveränderten Niederschlägen während des übrigen Jahres. Dabei zeigt die räumliche Ausprägung der Niederschlagsverteilung in Gebirgsräumen eine besondere Heterogenität aufgrund der komplexen Topographie. Überdies ist mit einer Abnahme der mittleren Schneebedeckungsdauer zu rechnen, die sich laut Modellierungen im Nationalpark Berchtesgaden über das gesamte Gebiet um 13 Tage verkürzt (2020–2049 im Vergleich zu 1980–2009), vor allem in Gebieten auf mittleren Lagen (800–1300 m) (Kunstmann et al. 2019). Dementsprechend wird voraussichtlich die Schneeschmelze zu einem früheren Zeitpunkt eintreten und sich auf den Wasserhaushalt auswirken.

Es wird bisher davon ausgegangen, dass Quellen Lebensräume mit stabilen abiotischen Gegebenheiten und einer über die Zeit wenig veränderlichen biotischen Besiedelung sind (Martin et al. 2015). Diese Stabilität ist jedoch durch Einflüsse des Klimawandels gefährdet: Quellen sind Grundwasseraustritte und damit ein Teil des Wasserkreislaufes einer Region. Das Niederschlagswasser, das in einem bestimmten Einzugsgebiet abregnet oder

als Schnee fällt, versickert an der Oberfläche, durchströmt über unterirdische Fließwege den Grundwasserkörper und tritt an Quellaustritten wieder zu Tage. Quellen sind also direkt mit dem Klima einer Region verbunden und der beschriebene Klimawandel wird – je nach Quellsystem früher oder später – auch in diesen Lebensräumen sichtbar werden und zu Veränderungen führen.

Klimabedingte Veränderungen beispielsweise der Temperatur an der Erdoberfläche, der Niederschlagsintensität oder des Niederschlagsrhythmus können zu Veränderungen im Temperatur- und Schüttungsregime im Lebensraum Quelle führen, und damit potentiell sekundär auch die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften verändern: Im Zuge des Projektes „Quellen in den bayerischen Nationalparks als Zeiger des Klimawandels – QuellNPB; TKP01KPB-70869 und TKP01KPB-71382“ wurde im Zeitraum zwischen 2017 und 2019 bereits festgestellt, dass im Nationalpark Bayerischer Wald nach den Trockenjahren 2018 und 2019 Quellen in den Herbstmonaten trockenfielen, die zuvor noch nie trockengefallen sind – faunistische Analysen dieser Quellen vor den Trockenjahren zeigten in einigen Fällen die Anwesenheit von Lebensgemeinschaften, wie sie für permanent schüttende Quellen typisch sind (Lichtenwöhrer et al. 2019). Eine andere Studie aus Skandinavien belegt bereits einen Anstieg der mittleren Quelltemperaturen seit 2000 (Jyväsjärvi et al. 2015).

Zum einen gilt es zu beobachten, wie sich eine Zunahme der Lufttemperatur auf die

Wassertemperatur auswirkt und mit welcher zeitlichen Verzögerung. Zum anderen ist von großem Interesse, wie sich veränderte Niederschlagsverhältnisse auf die Wasserbeschaffenheit der Quellen auswirken. Die Verweildauer des Wassers im Untergrund, bevor es an der Quelle zu Tage tritt, prägt das sogenannte „Gedächtnis der Quelle“. Bei längerer Aufenthaltsdauer des Wassers im Grundwasserkörper ist mit einer verzögerten Auswirkung klimatischer Veränderungen auf den Quelllebensraum zu rechnen. Entsprechend weisen bei gleicher Durchströmungsgeschwindigkeit Grundwasserkörper mit größerem Volumen eine höhere Widerstandskraft gegen Klimawandelveränderungen auf als kleinere. Quellen, die kleine Grundwasserkörper entwässern, sind demnach voraussichtlich schneller vom Klimawandel betroffen. Die Meereshöhe des Einzugsgebietes hat ebenfalls eine große Bedeutung. Mit steigender Höhenlage nimmt die Mächtigkeit und Dauer der Schneebedeckung zu. Da die Schneedecke für das Grundwasser bis in die Sommermonate hinein als permanenter Wasserspender fungiert, trägt das kühle Schmelzwasser einerseits zu größeren Schüttungsmengen bei, andererseits aber auch zur jeweiligen kühleren Temperatur des Quellwassers. Basierend auf den beschriebenen regionalen Klimamodellierungen, die eine starke Abnahme der Schneedecke vorhersagen (Kunstmann et al. 2019), werden sich die Wassertemperatur und das Schüttungsregime der Quelle verändern: Quellen mit von Schneedynamik geprägten Einzugsgebieten werden ihre durch die Schneeschmelze erhöhte Schüttung früher im Jahresverlauf und in geringerem Ausmaß erfahren.

Die kühlende Wirkung des Schmelzwassers wird bei geringerer Schneemenge voraussichtlich abgeschwächt auftreten.

Bisher in der Literatur noch kaum beachtet sind Auswirkungen kleinskaliger Wetterextreme auf Quellstandorte: Bei Helokrenen und kleinen Rheokrenen wurden in den Nationalparks beispielsweise Temperaturschwankungen des Quellwassers auch im Tageslauf beobachtet (Lichtenwöhner et al. 2019). Es ist zu erwarten, dass zunehmende Häufigkeit und Intensität bei Wetterextremen diese Variabilität verstärken werden. Auch Auswirkungen eines veränderten Niederschlagsregimes können sich direkt im Umfeld des Quellaustritts bemerkbar machen: Vor allem um Quellen in flachem Gelände auf Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität kann sich bei Starkregenereignissen Niederschlagswasser temporär sammeln und zu einer Veränderung des Lebensraumes führen. Quellen mit entsprechender Typologie sind vor allem in offenem, unbewaldetem Gelände klimabedingten Umwelteinflüssen stärker ausgesetzt. Diese Einflüsse mikroklimatischer Gegebenheiten auf den Quelllebensraum gilt es langfristig zu verstehen und zu beobachten, um Auswirkungen des Klimawandels erkennen und je nach Quellstandort differenziert beurteilen zu können.

Seit Herbst 2013 sind an drei Quellstandorten im Nationalpark Berchtesgaden Datenlogger zur kontinuierlichen Aufnahme der Wassertemperatur angebracht. Die zeitlich hoch aufgelösten Daten (ein- bis dreistündiges Messintervall) weisen an den drei Standorten im Zeitraum 2014–2021 jeweils unterschiedliche

Temperaturentwicklungen auf (leicht steigende, gleichbleibende und leicht sinkende Temperaturentwicklung, Abbildung 5).

Jedoch sind die Zeitreihen zu kurz, um einen signifikanten Trend feststellen zu können. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit eines kontinuierlichen und langfristig angelegten Quellmonitorings. Neben der Detektion von Änderungen ermöglicht die Analyse der Monitoringdaten ein besseres Systemverständnis der untersuchten Quellen (Chang et al., 2021). Die naturräumlichen Gegebenheiten der Quelle (Lage und Eigenschaften des Einzugsgebietes, des Grundwasserleiters, Grad an Verkarstung, Eigenschaften der Böden) bedingen die Sensitivität und Reaktionsgeschwindigkeit des Quellsystems auf klimatische Einflüsse. Lange Verweilzeiten zwischen Infiltration im Einzugsgebiet und Austritt an der Quelle bewirken entsprechend verzögerte Auswirkungen von Klimaeinflüssen. Quellen auf stauendem Boden im Offenland (in exponierter Sonnenlage) sind Klimaextremen stärker ausgesetzt als solche, die in geschützten Lagen im Bereich eher durchlässiger Böden austreten.

Zusammenfassend ist davon auszugehen, dass klimawandelbedingte Einflüsse im Einzugsgebiet und im Umfeld der Quelle zu den folgenden Entwicklungen beitragen:

- Erhöhung der Wassertemperatur und Veränderung der Temperaturamplituden im Jahresverlauf
- Verändertes Abflussverhalten in Bezug auf Saisonalität und Abflussvolumen

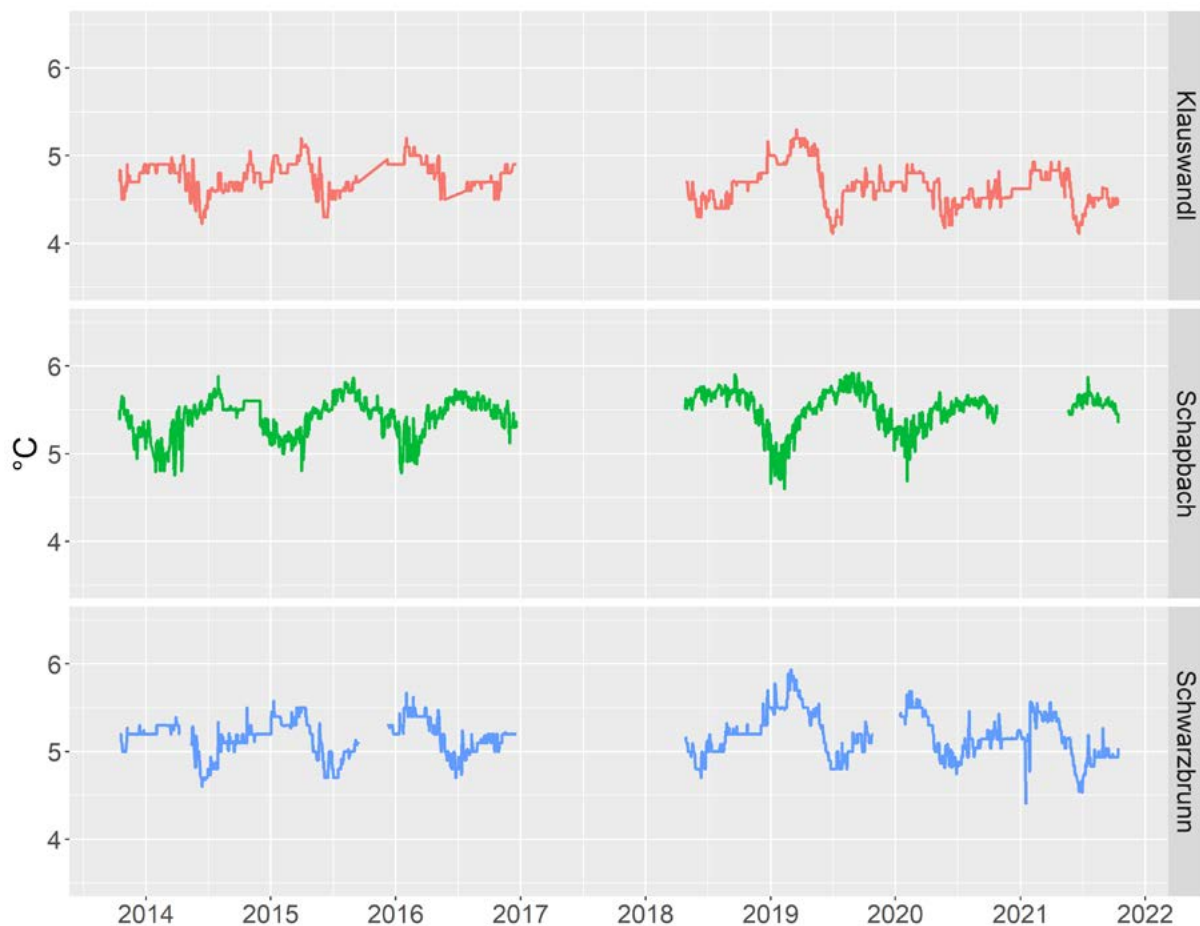


Abbildung 5: Entwicklung der mittleren Jahreswassertemperatur in drei Quellen im Nationalpark Berchtesgaden, 2014–2021. | © Nationalparkverwaltung Berchtesgaden

- Veränderte chemisch-physikalische Eigenschaften des Wassers
- Verschiebung der Verbreitungsgrenzen von Arten mit enger Temperaturtoleranz in größere Höhenlagen
- Ausbreitung thermophiler Arten
- Einwanderung von Arten, die bislang aufgrund anderer ökologischer Limitierungen (z.B. Dauer der Vegetationsperiode, Nahrungspräferenz) nicht Fuß fassen konnten
- Diffuse, zufallsgesteuerte Einwanderung von Arten unterschiedlichster ökologischer Valenz aufgrund der verlängerten Vegetationsperiode

Um Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf Quellen rechtzeitig verstehen zu können, ist eine umfassende Langzeitbeobachtung aller wichtigen chemisch-physikalischen Parameter (Mastrocicco et al. 2019) und der Entwicklung von Flora und Fauna eine unerlässliche Voraussetzung (Cantonati et al. 2006). Die seit vielen Jahren im Nationalpark Berchtesgaden aufgenommenen chemisch-physikalischen Daten der Quellbeobachtung (seit 2000) und die langjährigen biologischen Aufnahmen (seit 1994) bilden dafür ein starkes Fundament. Wie die Auswertungen dieser Zeitreihen im Forschungsvorhaben „Quellen in den bayerischen Nationalparks als Zeiger des Klimawandels“ zeigen, kann die Klimafolgenbeobachtung an Quellen nur erfolgreich sein,

wenn sie mit einer angemessenen Methode über mehrere Jahrzehnte erfolgt. Aufgrund vorliegender Daten und Modellierungen ist davon auszugehen, dass Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf Grund- und Quellwasser und deren Lebensgemeinschaften je nach Region und Höhenlage sehr unterschiedlich sind. Vor diesem Hintergrund ist zu betonen, dass ein Quellmonitoring überregional konzipiert sein muss – Basis dafür liefert die Quellforschung in den beiden bayerischen Nationalparks: Im Projekt „QuellINPB“ wurde die Übertragung der Methode vom Nationalpark Berchtesgaden (Hochgebirge) auf den Nationalpark Bayerischer Wald (Mittelgebirge) durchgeführt. Im Anschluss an das Projekt und auf Basis eines Leitfaden-Entwurfs wurde die Methodik durch das Biosphärenreservat Rhön und das Biodiversitätszentrum Rhön auf die bayerischen Mittelgebirge Rhön, Fichtelgebirge, Spessart und den Steigerwald transferiert. Dies zeigt das hohe Potential der Analyse von Klimawandeleinflüssen auf Ökosysteme unterschiedlicher Naturräume.

### 1.3 Zielsetzung

Die Beobachtung klimabedingter Veränderungen im Quelllebensraum setzt eine einheitliche und langfristige Beobachtung von Quellen mit einer einheitlichen Methode voraus. Nur unter solchen Bedingungen sind resultierende Datenreihen hinsichtlich der klimatischen Veränderungen auswertbar und vor allem auch vergleichbar.

Dieser Leitfaden ist Ergebnis des vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz initiierten Projekts „Quellen in

den bayerischen Nationalparks als Zeiger des Klimawandels“. In dessen Rahmen wurden Ergebnisse langjähriger ökologischer Forschung an Quellen im Nationalpark Berchtesgaden zusammengefasst. In den Nationalparks Berchtesgaden und Bayerischer Wald wurde im Projektrahmen eine Methode zur Quellbeobachtung hinsichtlich Klimawandelfolgen erarbeitet, mit dem Ziel, eine Entscheidungsgrundlage zur Planung und Etablierung eines klimabezogenen Quellmonitorings zu erstellen. Ferner wurde ein Vorschlag für eine langfristige bayernweite Quellbeobachtung erarbeitet, die möglichst alle typischen Landschaftseinheiten mit einbezieht.

Die in diesem Leitfaden vorgestellte Methode umfasst die folgenden Aspekte:

- Kriterien für die Auswahl geeigneter Standorte
- strukturelle Beschreibung der Untersuchungsstellen
- Auswahl abiotischer Parameter, ihre Erhebung und Auswertung in der Dauerbeobachtung
- Auswahl biotischer Parameter, ihre Erhebung und Auswertung in der Dauerbeobachtung
- zu beachtende Zeitintervalle bei Wiederholungsuntersuchungen
- nachhaltige Datenhaltung in einer für ein langfristiges Quellmonitoring erstellten Datenbank

## 2 Methoden

Für das klimabezogene Quellmonitoring sind drei Aspekte unerlässlich:

- Standortwahl
- Struktur- und Umfeldkartierung
- Erfassung von abiotischen und biotischen Parametern

Diese werden im folgenden Kapitel detailliert erläutert. Zu jedem einzelnen Parameter findet sich zusätzlich ein erläuternder Einführungstext.

Da die im folgenden beschriebenen Methoden zum großen Teil *in-situ*-Messungen voraussetzen, ist darauf zu achten, die vor Ort gültigen Hygieneprotokolle zu beachten. Beispielsweise bedroht der Salamanderpilz *Batrachochytrium salamandrivorans* in (bayerischen) Mittelgebirgen mehr und mehr die Vorkommen von *Salamandra salamandra*. Die bayerische Verwaltungsstelle des Biosphärenreservats Rhön hält sich bei jedem Besuch an den Quellen an ein Hygieneprotokoll, um die Ausbreitung des Pilzes möglichst einzudämmen (van Rooij et al. 2017).

### 2.1 Auswahl der Untersuchungsstellen

Folgende Kriterien sind für die Auswahl von Referenzstellen heran zu ziehen:

- Hydrogeologie: Berücksichtigung aller wichtigen hydrogeologischen Teilräume im Untersuchungsgebiet.
- Geographie: Weitestmögliche Abdeckung der wichtigsten charakteristischen Land-

schaftseinheiten. Neben der (hydro) geologischen Strukturierung prägen die Diversität der Oberflächenformen und die durch sie bedingten Substrat- und Vegetationsverhältnisse die Vielfalt der Quellstrukturtypen. Bestimmte Landschaftseinheiten müssen strukturbedingt unberücksichtigt bleiben, wenn ausschließlich Quelltypen vorliegen, die für ein standardisiertes Monitoring ungeeignet sind (große Limno- oder Helokrenen, longitudinale Rheokrenen).

- Höhengradient: Für eine Landschaftseinheit müssen die ausgewählten Stellen den gesamten vertikalen Gradienten, über den im Gebiet Quellen verteilt sind, repräsentieren - wenn möglich zumindest je eine Untersuchungsstelle auf tiefer, mittlerer und hoher Lage. Der mit dem Höhengradienten verbundene Temperaturgradient ist ein besonders wichtiger Faktor für die Klimabeobachtung.
- Strukturtypen: Fließquellen sind für ein standardisiertes Monitoring am besten geeignet – hier ermöglicht ein geringer Einfluss von Außenfaktoren stärkste Prägung durch den Grundwasserkörper. Überdies sollen die Referenzstellen eine möglichst hohe Diversität aufweisen (Grobsubstrat - starke Schüttung, Feinsubstrat - schwache Schüttung). In Gebieten ohne Rheokrenen werden unter Berücksichtigung der folgenden Kriterien auch Helokrenen und/oder Limnokrenen in das Monitoring einbezogen.

- Schüttung: Für das Monitoring eignen sich lediglich Quellstandorte, die eine ganzjährige Wasserführung aufweisen. Quellen mit sporadisch oder saisonal unterbrochener Schüttung sind für ein Langzeitmonitoring daher ungeeignet. Die Schüttung ist vor der Auswahl der Referenzstellen zu prüfen (Begehung nach langen Trockenphasen oder nach langdauernden Frostperioden bei Festlegung der Niederschläge als Eis oder Schnee). Vor allem in Karstgebieten muss die Begehung mehrfach erfolgen, mindestens einmal auch mehrere Monate nach der Trockenphase, da die Schüttung eine hohe Dynamik aufweisen kann (siehe Abbildung 6) und ebenfalls einer Latenz zu den meteorologischen Bedingungen unterliegen kann. In der Regel ist im Mittelgebirge der Frühherbst und im Hochgebirge der Winter die geeignetste Jahreszeit, um Schüttungsstabilität zu verifizieren. In fraglichen Fällen ist eine biologische Untersuchung einer Substratprobe hilfreich: Die Anwesenheit von Gammarus-Populationen oder auch eine artenreiche Besiedlung durch Milben oder Köcherfliegen indizieren langfristige Schüttungsstabilität, instabile Quellen zeichnen sich durch eine arme Fauna, gelegentlich mit Dominanz von Höhlenflohkrebsen und Turbellarienarten, die sich in Trockenzeiten ins Grundwasser zurückziehen, aus. Beobachtungen zeigen, dass es (im Gegensatz zu Fließgewässern) keine an temporär schüttenden Quellen speziell angepasste Tierarten gibt. Die Wiederbesiedlung erfolgt vor allem durch nicht-quelltypische Arten (je nach Typologie: Fließwasserbewohner, Arten temporärer Kleingewässer, Grundwasserarten).
- Temperatur: Referenzstellen mit stabilen Temperaturgängen im Jahresverlauf sind für ein Monitoring langjähriger Veränderungen im Grundwasserkörper besonders geeignet. Aber auch Standorte mit starker tages- und jahreszeitlicher Temperaturvariabilität liefern wichtige Daten, z.B. hinsichtlich der Veränderung von Amplituden oder der Verschiebung von Maxima und Minima.
- Naturnähe: Für ein Langzeitmonitoring, das biologische Aspekte einschließt, kommen nur natürliche und naturnahe Quellen in Frage.
- „Kalktuffquellen“ (Flora-Fauna-Habitat LRT 7220) weisen aufgrund ihres Chemismus eine eher arme Fauna auf (Cantonati et al. 2016), nur wenige Arten sind an den extremen Lebensraum mit Kalküberzügen („Sinter“) an allen Mikro- und Makrostrukturen angepasst. Sie verdienen dennoch Aufmerksamkeit, da die Sinterbildung selbst von Klimaveränderungen betroffen sein kann. Sofern also Kalksinterquellen in einem Landschaftsraum prägend vorkommen, sollte mindestens ein Lebensraum dieses Typs in die Beobachtung mit aufgenommen werden.



Abbildung 6: Schüttungsdynamik an der Quelle Schwarzbachloch im Nationalpark Berchtesgaden im a) Juli und im b) März, deren Einzugsgebiet einen hohen Grad an Verkarstung aufweist. © Nationalparkverwaltung Berchtesgaden

- **Logistik:** Für die Praktikabilität eines Monitorings gehört auch die Erreichbarkeit der Standorte zu den Auswahlkriterien. Um eine regelmäßige Datenaufnahme zu gewährleisten, sollten die Quellen zumindest in der schneefreien Zeit ohne großen Aufwand zu erreichen sein.
- **Datenlage:** Bei ansonsten gleicher Eignung sind Standorte zu bevorzugen, für die vergleichbare Ergebnisse aus früheren Untersuchungen vorliegen. Solche Daten aus der Zeit vor Beginn des Monitorings verlängern die Zeitreihen und erhöhen den Wert der Untersuchung. Stehen mehrere ähnliche Quellen zur Auswahl, sollte der Standort mit der höchsten Anzahl an Referenzarten bevorzugt werden oder die Verfügbarkeit von Daten aus dem Einzugsbereich (z. B. Grundwassermessstellen) den Ausschlag geben.
- **Vergleichbarkeit:** Extreme Lebensräume sind auch dann nicht als Referenzstellen auszuwählen, wenn sie in ihrer Charakteristik evtl. die Sonderstellung eines Gebietes repräsentieren (z.B. Felsquellen, stark versinterter Grundwasseraustritte, Quellen mit besonderem Chemismus, Thermalquellen) – Referenzstandorte müssen vergleichbar sein.



## 2.2 Monitoring-Parameter im Überblick

Die folgenden Parameter und die dazugehörigen Monitoringintervalle (Tabelle 1) sind das Kernstück der in diesem Leitfaden empfohlenen Methode für ein klimabezogenes Quellmonitoring.

Tabelle 1: Überblick der Monitoring-Parameter

<b>Parameter</b>	<b>Messmethode</b>	<b>Monitoringintervall</b>
Umfeld- und Strukturkartierung	Kartierbogen	Alle 5 Jahre
<b><i>Chemisch-physikalische Eigenschaften des Wassers</i></b>		
Schüttung / Wassermenge	Bestimmung mittels Behälter/ Schätzung	4 (3) x pro Jahr
Temperatur (Wasser und Luft)	Datenlogger	Stündlich-dreistündlich
pH-Wert	Multisondengerät	4 (3) x pro Jahr
Elektrische Leitfähigkeit	Multisondengerät	4 (3) x pro Jahr
Sauerstoffgehalt	Multisondengerät	4 (3) x pro Jahr
Elektrolyte / Nährstoffe	Ionen Chromatographie	1 x pro Jahr
<b><i>Biologisches Monitoring wasserlebender Organismen</i></b>		
Mikrobiologie	Agarnährmedium	1 x pro Jahr
Botanik – Kieselalgen	Handaufsammlung	Alle 5 Jahre
Zoologie – Zoobenthos	Klassisch-Taxonomisch	Alle 5 Jahre

## 2.3 Umfeld- und Strukturkartierung

Zu Beginn des Monitorings sind die Situation des Umfelds und die strukturellen Eigenschaften des Gewässers zu dokumentieren, damit Entwicklungen im Verlauf der Langzeitbeobachtungen gut nachzuvollziehen sind. Im Interesse einer landesweit einheitlichen Erfassung ist hierfür den Standards des Bayerischen Quellerfassungsbogens (BayQEB, LfU 2008b) inklusive Skizze und photographischer Dokumentation zu folgen.

Bei jeder biologischen Probenahme sind auch Wiederholungskartierungen in fünfjährigem Abstand durchzuführen, bei denen alle

Details mit der Ersterfassung verglichen und beobachtete Veränderungen (z. B. klimabedingte Veränderungen, anthropogene Störungen, Veränderungen der Sedimentstruktur oder Beschattung) notiert werden.

### Kartierungsmethode:

Gemäß BayQEB wird nach Eintrag der Kopfdaten für die topographische, lokalpolitische und naturschutzfachliche Charakterisierung des Standorts (Koordinaten, Einzugsgebiet, Besitzverhältnisse, Schutzbestimmungen) die Größe und Struktur der Quelle charakterisiert (Situation, Austrittsart, Substratausprägung).

Im Weiteren wird der Quellzustand anhand einer Auswahl morphologischer Eigenschaften und unter Berücksichtigung möglicher Beeinträchtigungen dokumentiert. Auch das Umfeld (5/50 m Radius) wird hinsichtlich seiner Struktur, Vegetation (Beschattung!) und evtl. Störungen erfasst. Quellstruktur, Ablauf und Umfeld werden in einer mit einheitlichen Symbolen versehenen Skizze dargestellt

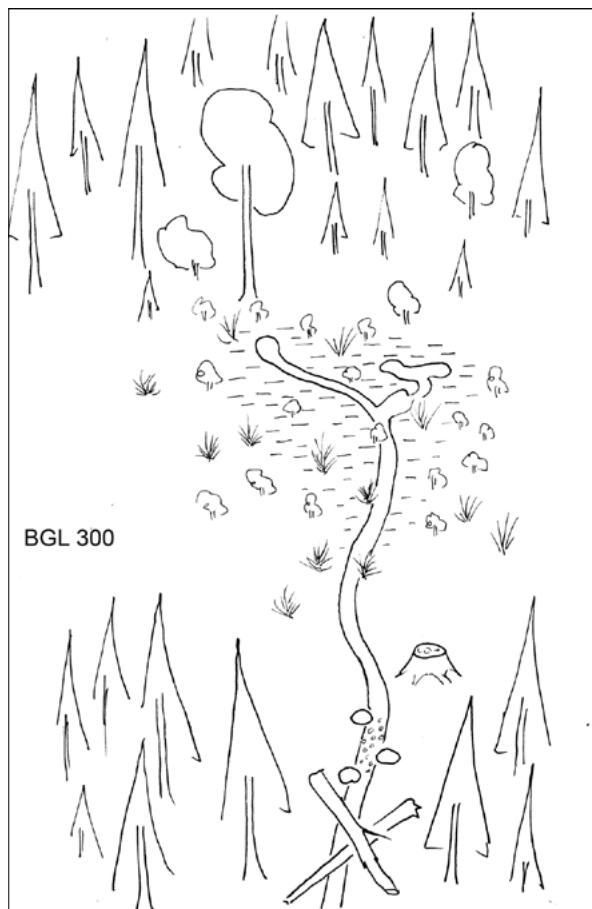


Abbildung 7: Beispiel einer Skizze einer Quelle im Nationalpark Berchtesgaden. © Nationalparkverwaltung Berchtesgaden

(Abbildung 7). Letztere enthält alle wichtigen Strukturen, die (a) der Wiedererkennung des Standortes dienen und (b) bei langfristiger Beobachtung Veränderungen unterworfen sein könnten. Um potentielle Strukturveränderungen bei jeder Kartierung lagegetreu feststellen zu können empfiehlt es sich, den Quellmund, wie in Abbildung 8 ersichtlich, zu markieren.



Abbildung 8: Markierung des Quellmundes einer Quelle im Nationalpark Berchtesgaden. © Nationalparkverwaltung Berchtesgaden

## 2.4 Abiotisches Monitoring

Die abiotischen Parameter des Quellwassers sind hauptsächlich von klimatischen Gegebenheiten und der Beschaffenheit des Grund-

wasserleiters geprägt. Je nach Porosität sind die Messwerte im Jahresverlauf mehr oder weniger stabil, aber auch Lage und Dimension

des speisenden Grundwasserleiters sind von großer Bedeutung: Quellen aus tiefen Grundwasserkörpern zeigen stabilere thermische Verhältnisse als solche aus oberflächennahen Grundwasserkörpern (Küry et al. 2016). Klimatische Veränderungen können potentiell sowohl bei Quellen aus tiefen- als auch oberflächennahen Grundwasserkörpern Einfluss nehmen, weshalb Quellen beider Grundwassersysteme für eine Klimabeobachtung von Relevanz sind.

Das empfohlene chemisch-physikalische Monitoring besteht aus mehreren Komponenten, die es erlauben, Auswirkungen von Klimaveränderungen auf abiotische Parameter im Quellwasser unter möglichst unterschiedlichen Gesichtspunkten zu beobachten. Neben Wassertemperatur und Schüttungsmenge, zwei



Abbildung 9: Einsatz einer Durchfluspumpe (durch roten Pfeil markiert) im Gelände im Nationalpark Berchtesgaden, um die Messsonden konstant mit Wasser bedeckt zu halten. © Nationalparkverwaltung Berchtesgaden

für diese Fragestellung besonders wichtigen Parametern, sind pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und möglichst auch der Sauerstoffgehalt (zur gelegentlich eingeschränkten Aussagekraft dieses Parameters s.u.) *in situ* zu erheben. Um detaillierteres Hintergrundwissen über die Dynamik hydrochemischer Prozesse zu erlangen und klimabedingte Veränderungen im Detail zu erfassen, sollten mit einem größeren Messintervall, möglichst jährlich, auch die wichtigsten Ionenkonzentrationen gemessen werden – in Fällen, die den Verdacht auf Schwermetalleintrag begründen, auch seltenere Spurenelemente (s. Kap. 2.4.6).

Die meisten zu erhebenden Parameter werden direkt am Quellaustritt gemessen, lediglich bei der Aufnahme der Schüttung erfolgt, falls es sich um einen Komplex mehrerer Quellmünder handelt, eine zusätzliche Bestimmung beim Zusammenfluss aller Quellarme. Während der Messung sind die Sonden der Messgeräte komplett mit Wasser bedeckt zu halten. Am besten ist die Verwendung einer Durchfluspumpe mit Zelle (Abbildung 9). Die Wartung der einzelnen Messgeräte ist mit den Monitoringintervallen zu takten.

Die Wassertemperatur wird kontinuierlich mit Datenloggern gemessen, die *in situ*-Parameter Leitfähigkeit, pH-Wert und Sauerstoffgehalt jeweils zu Monatsanfang im Januar, Mai, Juli und Oktober – also einmal pro Jahreszeit. Besteht im Hochgebirge während der Wintermonate keine Zugangsmöglichkeit zur Quelle, müssen die Messtermine auf Frühling, Sommer und Herbst beschränkt werden. Es wird empfohlen, nicht *in situ* erfassbare chemische Parameter einmal pro Jahr im Sommer zu messen.

### 2.4.1 Schüttung

Die Schüttung ist als das pro Zeiteinheit aus einer Quelle austretende Grundwasservolumen definiert, die Maßangabe erfolgt im Allgemeinen in Liter pro Sekunde (Hölting & Coldewey 2009). Die Stabilität der Schüttung über die Zeit ist ein besonderes Charakteristikum der Quellen – im Gegensatz zu Bächen und Flüssen, die vor allem dort, wo Böden eine geringe Wasseraufnahmefähigkeit und Speicherkapazität haben, extreme, niederschlagsabhängige Schwankungen aufweisen können. Zwar kann es in Gebieten mit Grundwasserspeichern geringen Fassungsvermögens in niederschlagsarmen Jahren zum Versiegen von Quellen kommen (in den Projektjahren 2017–2019 in Süddeutschland v.a. auf Buntsandstein, in Keupersandsteinen, aber auch im Grundgebirge). Die Schüttung von Quellen aus größeren Grundwasserspeichern ist aber oft nur in geringem Maß vom Gang der Niederschlagsereignisse betroffen, ihre Schwankungsamplitude kann sich von anderen Gewässern desselben Landschaftsraums um den Faktor 5 bis 50 unterscheiden (Berg 1951). In der Regel (mit vielen Ausnahmen!) ist in Mitteleuropa die stärkste Schüttung im Juni/Juli zu beobachten, oft bereits ab August gefolgt von einer herbstlichen Phase geringen Abflusses, die den ganzen Winter über andauern kann. Das Muster der Schüttung ist ein Charakteristikum einer Gewässerlandschaft, oft unterscheiden sich aber auch einzelne Quellen innerhalb einer solchen deutlich voneinander (Zollhöfer 1996). Trübung nach Starkregen kann auf eine ausgedehnte „Störzone“ im Quellmundbereich hinweisen (Wilhelm 1956). Das Niederschlagsregime im Einzugsbereich

des Grundwasserspeichers ist ein Außenfaktor, der Einfluss auf die Quellschüttung nehmen kann. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Ausdehnung und Beschaffenheit (Porosität) des Grundwasserkörpers. Er bestimmt die Intensität und Geschwindigkeit, mit der Veränderungen im Einzugsgebiet (an seinem „oberen Ende“) am Quellmund (an seinem „unteren Ende“) spürbar werden. Je nach Charakteristik des Grundwasserleiters kann die Aufenthaltszeit zwischen wenigen Wochen (im Extremfall von Karstquellen sogar Tagen), vielen Monaten oder sogar Jahren liegen. Als Extrempunkt in der Dynamik der Schüttung kann es zum Austrocknen von Quellen kommen. Das Phänomen temporärer Schüttung ist aus Karstgebieten wohlbekannt („Hungerbrunnen“), für kleinere Quellen im Gebirge aber oft kaum dokumentiert. Die Grundwasserspeicher im Karst werden durch Schneeschmelzwasser gefüllt, was offensichtlich an Quellen, deren Abfluss im Winter unter Schneebedeckung versiegt, zu einer kräftigen Schüttung im Sommer führen kann.

Sofern keine Felddaten vorliegen, erlaubt die Analyse der organismischen Besiedlung eine Abschätzung über das potentielle Trockenfallen: Beispielsweise ist eine Reihe von Kieselalgenarten an Bedingungen temporärer Überflutung angepasst, während viele wirbellose Tiere, z.B. die meisten Süßwassermilben, Trockenphasen nicht zu überdauern vermögen. Die Stärke der Schüttung prägt zusammen mit der Beschaffenheit des Untergrundes die Beschaffenheit des Sediments und ist wesentlich verantwortlich für die Struktur der Stromsohle und ihre Besiedlung. Die

von der Schüttung abhängige Turbulenz im Abfluss prägt die Korngröße des Untergrunds und damit die Quelltypologie und die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften.

Die Grundwasserneubildung, welche die Quellschüttung beeinflusst, ist von Klimaänderungen direkt (Niederschlagsmenge, Dauer der Schneebedeckung) oder indirekt (Vegetation und Bodenbedeckung) beeinflussbar (Taylor et al. 2013). Auch die Dynamik der Schüttung kann sich klimabedingt verändern – längere Trockenperioden können die Quelltypologie verändern oder zum völligen Versiegen des Abflusses führen.

#### Messmethode

Eine Messung der Schüttung mit relativ geringem Messfehler ist mit großem Aufwand und oftmals baulichen Eingriffen verbunden (LfU 2008c). Die im Folgenden beschriebenen Bestimmungsmethoden dienen eher einer qualitativen Beurteilung zur besseren Einschätzung der Schüttungssaisonalität.

An Quellen mit mittlerer Wasserspende, wie sie als Referenzstellen besonders geeignet sind, wird die Schüttung in aller Regel mit einem Behälter (Messbecher, Eimer, Plastikbeutel) über eine Volumen/Zeit - Messung bestimmt. Die Stelle für die Schüttungsbestimmung sollte einerseits beim Quellmund und andererseits in einem gewissen Abstand zum Quellmundbereich gewählt werden, wo ein klar definiertes Gerinne ausgebildet ist; am besten an einer Engstelle. Eine Markierung der zur Messung ausgewählten Stelle beispielsweise durch einen Edelstahlpflock ist zu empfehlen. Weist die Referenzquelle mehr

als einen Grundwasseraustritt auf oder ist der Austritt im Quellbereich teilweise sickern, so erfolgt die Bestimmung unterhalb des Zusammenflusses aller einzelnen Gerinne. Die Gewässersohle sollte an der Messstelle möglichst wenige Unebenheiten aufweisen (größere Steine sind ggf. zu entfernen), um den Messbehälter so anzusetzen, dass er das gesamte Abflusswasser sammelt. Diese Messung sollte mehrfach wiederholt werden, und der Mittelwert als finaler Messwert eingetragen werden. Die Schüttung starker Quellen, an denen keine Behälter zum Einsatz kommen können, muss geschätzt werden, mit einer Einstufung in folgende Größenklassen: < 0,5; 0,5 bis 1,0; 1,0 bis 5,0; 5,0 bis 20,0; > 20 l/s.

Da die Schüttung je nach Quelltyp einen mehr oder weniger ausgeprägten Jahresgang aufweist, sollten zumindest drei Messungen pro Jahr erfolgen, im Interesse einer überregionalen Vergleichbarkeit zu festgelegten Jahreszeiten – Anfang Mai, Anfang Juli und Anfang Oktober. Zusätzliche Bestimmungen, z.B. mehrmals pro Jahreszeit, auch im Winter oder nach besonderen Witterungsereignissen, sind zur besseren Charakterisierung der Standorte wünschenswert.

#### **2.4.2 Temperatur**

Eine wichtige Eigenschaft von Quellen ist ihre, im Vergleich zu Bächen oder Flüssen, Teichen oder Seen, beträchtliche langfristige Temperaturstabilität. Im Rahmen der Grundwasserneubildung gelangt in nördlichen Breiten im Winter und zur Zeit der Schneeschmelze kaltes, bei sommerlichen Regenfällen aber warmes Wasser in den Oberboden.

Seine Temperatur nähert sich dann beim Einsickern allmählich der Jahresdurchschnittstemperatur des betreffenden Gebietes an, die auch im gesamten Grundwasserkörper herrscht. Abweichungen von dieser Regel können durch externe Störungen zustande kommen: Relativ erhöhte Temperaturen in tiefliegenden, durch Erdwärme beeinflussten Schichten oder durch aufsteigendes Thermalwasser, relativ abgesenkte Temperaturen durch winterlichen Oberflächenkontakt oder aus höheren Lagen rasch zuströmendes Schmelzwasser (Wilhelm 1956). Hinzu kommen als wichtige Faktoren vor allem bei schwächer schüttenden Quellen klimatische Einflüsse direkt am Quellmund – vor allem Starkregenereignisse oder sommerliche Trockenphasen mit Extremtemperaturen. Wie auch die Ergebnisse des Projektes „QuellNPB“ zeigen, können Temperaturschwankungen des Quellwassers im Jahreslauf beträchtlich sein, wobei sich aus ihrem Muster und ihrer Amplitude geradezu ein Fingerabdruck der individuell untersuchten Quelle bildet. Wie die Schüttung, so ist auch der Temperaturgang von Größe und Porosität des Grundwasserkörpers entscheidend beeinflusst. Je länger die Verweildauer des Wassers im Grundwasserkörper ist, umso stärker können Maxima und Minima der Temperaturamplitude gegen den Gang der Außentemperatur verschoben sein, bis hin zu einer genauen Gegenläufigkeit, mit Maximaltemperaturen im Winter (Lahermo et al. 1977).

Den Temperaturverhältnissen wird eine prägende Rolle als Kontrollfaktor für die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften in Quellen zugesagt. Da Temperaturen meist

während der Vegetationsperiode beobachtet werden, werden dem Quellwasser meist Attribute wie „kalt“ oder „kühl“ zugesprochen und nicht selten wird sogar krenobionten, an Quellen gebundenen Organismen automatisch der ökologische Terminus der Kaltstenothermie (Kältebindung) zugeordnet. Das vielleicht entscheidende Phänomen in diesem Zusammenhang dürfte aber eher in der relativen Wärme des Lebensraums während der kalten Jahreszeit zu suchen sein (Gerecke 2016). Für eine angemessene Analyse dieses Zusammenhanges fehlt es in den meisten Fällen an einer Beweisführung durch Laborexperimente. Für die quelltypische Köcherfliege *Crunoecia irrorata* konnten Ebner et al. (2019) keine spezifische Temperaturpräferenz beobachten.

Unabhängig von diesen ökologischen Interpretationen ist der Faktor Temperatur für die langfristige Klimabeobachtung an Quellen eine entscheidende Größe. Der Prozess einer globalen Erwärmung muss zwangsläufig zu einer gleichgerichteten Temperaturentwicklung in den Grundwasserspeichern der Erde führen und kann hier in idealer Weise beobachtet werden. Es ist einerseits damit zu rechnen, dass sich solche Entwicklungen 1:1 in der Jahresdurchschnittstemperatur von Quellen abbilden (allerdings mit einer Verzögerung, die je nach Einzugsgebiet und Untergrund sehr unterschiedlich sein kann). Andererseits ist aber auch mit Veränderungen in Frequenz und Amplitude von Temperaturschwankungen zu rechnen (z.B. durch direkte Einflüsse im Quellbereich). Im Zuge des Klimawandels werden verstärkt Temperatur- und Niederschlagsextreme prognostiziert.

Vor diesem Hintergrund verdienen selbstverständlich auch die unter direktem Einfluss klimatischer Gegebenheiten im Quellbereich selbst stehenden Veränderungen der täglichen und jährlichen Temperaturamplituden des Wassers besondere Beachtung.

#### Messmethode

Bei der Erstaufnahme der Quelle sollten zur Ermittlung des eigentlichen Grundwasseraustritts (mit der im Sommer tiefsten, im Winter höchsten Wassertemperatur) mit einem Handthermometer Messungen entlang Längs- und Quertransekten durch den ganzen Quellbereich durchgeführt werden. Solche zusätzlichen Handmessungen sollten bei späteren Geländeaufnahmen im Rahmen des Monitorings wiederholt werden, sobald Strukturveränderungen wahrnehmbar sind. Als zusätzliche Information über den Umgebungszustand sollte auch die Lufttemperatur im Quellbereich erfasst werden.

Mit Hilfe von Datenloggern wird die Wassertemperatur durch eine kontinuierliche Datenaufnahme gemessen – die Zeitintervalle für das Auslesen werden durch die Speicherkapazität des Gerätes bestimmt. Aufgrund schlechter Zugänglichkeit alpiner Quellen in den Wintermonaten ist für die Überbrückung dieser Zeit ein höheres Messintervall einzustellen. In Berchtesgaden beispielsweise werden die Datenlogger im Sommer alle drei Monate gewechselt und ausgelesen, im Winter gefolgt von sechs Monaten ohne Auslesen. Neuestens sind auch Datenlogger verfügbar, die via Bluetooth eine Datenübertragung auf das Smartphone direkt im

Gelände ermöglichen. Die Datenlogger sind möglichst direkt am Quellaustritt anzubringen. Die Fixierung kann je nach Schüttung mit einem Kunststoff- oder Metallstab erfolgen (Abbildung 10), die Geräte sollten gegen Turbulenzen bei stärkerer Schüttung durch ein Gehäuse geschützt sein und so tief angebracht werden, dass sie bei Niedrigwasser nicht trockenfallen (Abbildung 11). Dennoch haben Erfahrungen aus dem Biosphärenreservat Rhön gezeigt, dass es im operationellen Monitoring vorkommen kann, dass die Datenlogger nach Starkniederschlag oder Schneeschmelze aufschwimmen. Im Gegensatz dazu können die Temperaturlogger bei extrem niedriger Schüttung trotz sorgfältiger Standrotauswahl (siehe Sektion 2.1) trockenfallen. Die dadurch verursachten Messfehler müssen vor dem Einpflegen der Daten in die Datenbank durch Fehlwerte ersetzt werden.

Zusätzlich zum Datenlogger im Quellwasser sollten mit Hilfe eines weiteren Datenloggers in unmittelbarer Nähe des Quellbereiches auch Veränderungen der Lufttemperatur dokumentiert werden.

Die Datenlogger sollen in einem engen Messrhythmus (1 bis 4-Stunden Intervall) die Wassertemperatur aufnehmen. Das tatsächliche Messintervall ist wie zuvor beschrieben von der Speicherkapazität des Datenloggers und den Jahreszeiten abhängig. Mit diesem engen Messintervall kann man nicht nur den Jahresgang, sondern auch den für den Lebensraum wichtigen Tagesverlauf der Temperatur beobachten und analysieren.



Abbildung 10: Metallstab, Kette und Metallkörnchen zur Fixierung und zum Schutz des Datenloggers gegen Geschiebefracht. © Nationalparkverwaltung Berchtesgaden



Abbildung 11: Anbringung eines Datenloggers in einer Quelle. © Nationalparkverwaltung Berchtesgaden

Es wird empfohlen die Wassertemperatur zusätzlich zu den Datenlogger-Messungen auch im Zuge der saisonalen Erfassungen physikalisch-chemischer Parameter mithilfe eines Handthermometers zu messen. Dabei ist zu beachten, dass der Temperaturfühler vor der Ablesung so lange ins Wasser eingetaucht wird, bis sich die Temperatur stabilisiert hat.

Zusätzlich zu diesen Messungen im Quellbereich wurden im Biosphärenreservat Rhön

Datenlogger zur Temperaturmessung im an die Quelle anschließenden Bachlauf installiert. Die dadurch gemessenen Temperaturunterschiede zwischen Wasser im Quellbereich und Wasser im Bachlauf könnten Aufschluss über den Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Wassertemperatur im Bach geben. Aufgrund sehr kurzer Messzeitreihen kann an dieser Stelle noch keine Einschätzung zu den Ergebnissen dieser Analyse gegeben werden.

### 2.4.3 pH-Wert

In naturnahen Gewässern schwankt der pH-Wert gewöhnlich zwischen 5,5 (in silikatischem Gestein) für saure und 8,5 (in kalkreichem Gestein) für basische Gewässer. In Gebieten mit schwach gepufferten Böden (Situation oft verschärft in Fichtenreinbeständen) beobachtete Brehm (1985) eine mit steigender Humidität zunehmende Versauerung der Quellwässer, teilweise erklärbar durch ein Ansteigen von Humifizierungsprozessen zu Lasten von Mineralisierungsvorgängen, in der seinerzeitigen Untersuchung aber verstärkt durch Säureinträge aus Niederschlägen. Die Konzentration der Wasserstoffionen im Quellwasser beeinflusst chemische Prozesse entscheidend, z.B. das Adsorptions- und Lösungsverhalten von Elementen. Bei pH-Werten unter 4 steigt die Löslichkeit und Auswaschung von Schwermetallen drastisch an (Puhe & Ulrich 1985).

Der Säuregrad spielt eine wichtige Rolle als kontrollierender Faktor für die Zusammensetzung der Quellfauna: Bei niedrigen pH-Werten erschweren sich die Existenzbedingungen auf Kalk angewiesener Arten – Weichtiere können vollkommen abwesend



sein, Krebstiere nur durch speziell angepasste Arten vertreten. In Wasser mit einem hohen pH-Wert kommt es an Quellen aus stark kalkhaltigen Einzugsgebieten zur Sinterbildung – gelegentlich schon kurz unterhalb des Quellmunds, oft aber erst nach einer längeren Fließstrecke. Die Kalk-Verkrustungen auf allen Sedimentbestandteilen beschränken die Besiedlungsmöglichkeiten für viele Quellorganismen enorm und führen im Extremfall zu einer starken Artenverarmung.

Klimabedingte Veränderungen sowohl im Einzugsgebiet als auch im Quellumfeld (Vegetation, Niederschlagsregime) können Auswirkungen auf den pH-Wert haben. Handelt es sich um langfristige Trends, so ist zu erwarten, dass sich solche Entwicklungen in einer veränderten Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften spiegeln.

#### Messmethode

Zur Messung des pH-Wertes ist eine wasser-dichte pH-Sonde zu empfehlen. Besonders geeignet ist ein Multisondengerät (Abbildung 12), mit dem zugleich auch Leitfähigkeit und Sauerstoffgehalt gemessen werden können. Die pH- Elektrode kann mit dem Multison-dengerät per Kabel oder kabellos verbunden sein. Ihre Spitze muss, wenn sie nicht im Einsatz ist, stets in einem Kunststoffbehälter mit Schraubkappe und Gummidichtung ge-lagert sein, der eine 3 molare KCl-Lösung enthält. Im Gelände sollte für den Fall eines Verschüttens zusätzliches KCl verfügbar sein. Vor jedem Messtag ist die pH-Elektrode mit je einer Pufferlösung von pH 4 und pH 7 zu kalibrieren. Um eine hohe Messgenauig-

keit sicherzustellen, ist auch die Bedingungs-anleitung des Messgeräts zu konsultieren und die Haltbarkeitsdauer der Sonde zu beachten; regelkonforme und regelmäßige Wartung der Elektroden sind unabdingbar. Da die Wartung der Elektroden je nach Hersteller unterschiedlich ist, sind im Zweifelsfall de-taillierte Informationen direkt vom Hersteller einzuholen. Bei der Messung im Gelände sollte sich die Elektrode an die Wassertem-peratur angepasst haben, bevor man den Messwert abliest (dies kann einige Minuten dauern). Das empfohlene Monitoringintervall ist vier- bzw. dreimal jährlich.

#### **2.4.4 Elektrische Leitfähigkeit**

Als Kehrwert des elektrischen Widerstands ist die elektrische Leitfähigkeit (Messeinheit  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) direkt proportional der Ladung gelöster Ionen im Wasser. Sie gibt also einen Hinweis auf den Mineralisationsgrad des Wassers, der mit zunehmendem Säuregehalt ansteigt. Da durch Abbauprozesse der  $\text{HCO}_3^-$ -Gehalt („aggressive Kohlensäure“), und damit auch die Mineralisation des Grundwassers erhöht ist, ist sein Leitfähigkeitswert naturgemäß höher als in Oberflächengewässern des Um-felds. Durch ihre weit gespreizten Messwerte und ihre direkte Beeinflussung durch den Ionenhaushalt ist die Leitfähigkeit ein sensibler Indikator der hydrogeologischen Situation, ihrer saisonalen Veränderungen und poten-tieller langjähriger Trends. In Jahreszeiten, in denen die Außentemperatur nahe der Jahres-durchschnittstemperatur liegt, kann die Iden-tifikation des Grundwasseraustritts im Quell-bereich statt über eine Temperaturmessung auch durch die Ermittlung der Bereiche mit der höchsten Leitfähigkeit erfolgen.



Abbildung 12: Messung der in situ-Parameter im Gelände mit einem beispielhaften Multisondengerät.  
© Nationalparkverwaltung Berchtesgaden

Im Buntsandstein und Silikat kann sie Werte nahe 0 annehmen (z.B. Finnland, auf Granit: 10–30  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Lahermo et al. 1977), in Sedimentgesteinen liegt sie deutlich höher (Beispiele aus dem Schweizer Mittelland, Zollhöfer 1996, im Jura: 510–530  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , im Lias auch deutlich höher; Sandstein-Keuper: um 670  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Muschelkalk 600–1300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) und kann im Gipskeuper auf Werte ansteigen, wie sie im marinen Brackwasser gemessen werden (um 2200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). In Quellen kann die Amplitude der Leitfähigkeit den Einfluss zufließenden Oberflächenwassers anzeigen (Brehm 1978).

Als ein über die gesamten Elektrolytgehalt integrierender Wert ist die Leitfähigkeit von besonderer Bedeutung für eine generelle Einschätzung des Quellwassers. So kann

beispielsweise das saisonale Muster der Leitfähigkeitswerte wertvolle Hinweise für die Abschätzung der Grundwasserherkunft liefern (Bakalowicz 1994), auch für die Interpretation der mittleren Verweilzeiten des Wassers im Untergrund liefert die Leitfähigkeit wertvolle Information.

Da hinsichtlich der Grundwasserkörper Veränderungen in Fließwegen und Durchsatz von hoher Bedeutung für die Analyse von Klimaeinflüssen sind, kommt der Beobachtung der Leitfähigkeit eine besondere Bedeutung zu. Sie kann als eine Art Frühwarnsystem für klimabedingte Umweltveränderungen zum Einsatz kommen: Unregelmäßig veränderte Werte geben Hinweise auf Veränderungen der Ionenkonzentration, z.B. als Folge des Abschmelzens von Blockgletschern.

### Messmethode

Die Messung der Leitfähigkeit erfolgt mit einem Leitfähigkeitssensor. Bei der Nutzung eines Multisondengeräts (Abbildung 12) wird eine passende Leitfähigkeitssonde verbunden. Im Gegensatz zur pH-Elektrode muss die Leitfähigkeitselektrode nicht vor jedem Messtag kalibriert werden. Da die einzuhaltenden Kalibrierintervalle je nach Hersteller unterschiedlich sind, ist jeweils den Wartungsanweisungen zu folgen. Die Haltbarkeit einer Leitfähigkeitselektrode beträgt in der Regel mehrere Jahre, ein Mal pro Quartal sollte diese jedoch kalibriert werden. Die Elektrode sollte sich an die Wassertemperatur angepasst haben, bevor man den Messwert abliest (dies kann einige Minuten dauern). Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit soll vier bzw. drei Mal jährlich stattfinden.

### **2.4.5 Sauerstoffgehalt**

Im Wasser ist gelöster Sauerstoff (O<sub>2</sub>) essentiell für höheres organisches Leben. Je nach Beschaffenheit der Infiltrationszone wird er bei der Grundwasserneubildung durch organische Prozesse mehr oder weniger aufgebraucht, seine Konzentration entwickelt sich also weitestgehend gegenläufig zum CO<sub>2</sub> und Grundwasser ist tendenziell sauerstoffarm. Aber Restmengen sind in aller Regel vorhanden – der Stoffwechsel stygobionter Tiere ist an lang andauernde O<sub>2</sub>-Mangelsituationen angepasst, sehr wohl aber auf O<sub>2</sub>-Atmung angewiesen (Hervant et al. 1998). Die Nahrungsgrundlage heterotropher Organismen im Grundwasser besteht in lokal angereicherten Kleinstmengen organischen Materials, die autochthon entstehen können (Chemoautotrophie) oder eingetragen

werden. Quellwasser ist am Quellmund also typischerweise sauerstoffarm, sein O<sub>2</sub>-Gehalt gleicht sich aber nach wenigen Metern Fließstrecke den Mengenverhältnissen in der Luft an. Wie rasch dieser Prozess vor sich geht, hängt von der Turbulenz des Abflusses ab – Verwirbelung sorgt in Fließquellen oft schon unmittelbar am Austritt zu einem Druckausgleich mit der Atmosphäre. Wenn Messungen unmittelbar am Quellmund einen O<sub>2</sub>-Gehalt nahe der Sättigung ergeben, kann dies aber auch Hinweise auf Eigenschaften des Grundwasserkörpers geben: (1) einen relativ kleinen, rasch durchflossenen Grundwasserleiter, in dem keine nennenswerte Veratmung eingetragener organischer Substanz stattfindet; (2) Austausch mit atmosphärischer Luft in klüftigen Grundwasserleitern oder zumindest im quellnahen Bereich; (3) Einsickern sauerstoffreichen Oberflächenwassers im Quellbereich.

Typischerweise ist Quellwasser relativ arm an O<sub>2</sub> – ein Phänomen, das einen wichtigen ökologischen Unterschied zwischen Quelle und Quellbach bedingt. Obwohl hierzu noch keine belastbaren Laboruntersuchungen vorliegen, ist davon auszugehen, dass an Quellen gebundene Pflanzen- und Tierarten nicht polyoxybiont sind, sondern zumindest eine Toleranz gegenüber, vielleicht sogar eine Präferenz für, Wasser mit geringer Sauerstoffsättigung haben. Solche Phänomene konnten bei Grundwasserorganismen in Labortests nachgewiesen werden (z. B. Hervant et al. 1999). Andererseits könnte ihre Sauerstoffarmut Quellen für polyoxybionte Bachbewohner als Lebensräume unattraktiv machen.

O<sub>2</sub> steht im Grundwasser mit anderen chemischen Faktoren in einem charakteristischen Gleichgewicht, das sich beim Austritt in der Quelle verschiebt. Wie der CO<sub>2</sub>-Gehalt und der pH-Wert steht er sowohl im Einzugsbereich des Grundwasserkörpers, als auch im Quellmundbereich unter dem Einfluss von Außenfaktoren. Da seine Löslichkeit im Wasser u. a. von der Temperatur und der Schüttungsmenge abhängig ist, ist unter dem Einfluss klimatischer Veränderungen auch mit einem veränderten O<sub>2</sub>-Regime in Quellen zu rechnen.

#### Messmethode

Der Sauerstoffgehalt wird in der Regel sowohl als Konzentration (Einheit: mg/l), als auch als prozentuale Sättigung angegeben. Sauerstoffelektroden funktionieren nach dem Lumineszenzverfahren und werden mit einem Multisondengerät (Abbildung 12) per Kabel oder kabellos verbunden. Die Sonde muss nicht wie die pH-Sonde vor jedem Messtag kalibriert werden, je nach Hersteller sind aber gerätetypische Eichungs- und Auswechslungsintervalle einzuhalten. Auch bei dieser Messgröße ist vor der Ablesung darauf zu achten, dass sich die Temperatur der Elektrode an die Wassertemperatur angepasst hat. Das empfohlene Messintervall ist vier- bzw. dreimal jährlich.

#### **2.4.6 Elektrolyte und Nährstoffe**

Messungen weiterer chemischer Parameter (Elektrolyte und Nährstoffe) sind für das Verständnis des Systems Quelle essentiell. Ionenkonzentrationen informieren nicht nur über die Beschaffenheit des Grundwasserleiters, sondern auch über die Gegebenheiten

im Infiltrationsgebiet. Verschiedene chemische Parameter können darüber hinaus Indikatoren für anthropogene Verschmutzung im Einzugsgebiet sein. Vor allem Quellen in Karstgebieten sind aufgrund der oft fehlenden Bodenschicht im Einzugsgebiet und der klüftigen Beschaffenheit der Grundwasserleiter äußerst verschmutzungsanfällig, der Eintrag von Nährstoffen kann die Biozöosen umstrukturieren. Aufgrund der erhöhten Ionen-Lösungskapazität des Grundwassers und der entsprechend verschobenen Gleichgewichte liegen Elektrolyt-Konzentrationen in Quellen bereits ohne den Einfluss von Klimaveränderungen höher als in den Gewässern des Umfeldes. Diese Tatsache trifft auch für das aktuell oft diskutierte Nitrat zu, für dessen erhöhte Konzentration neben der oft geringen Filtrationskapazität des Bodens (Maire & Pomel 1994) auch die hier stattfindende Nitrifikation eine Ursache sein kann. Anzeiger für eine Erhöhung der Nitratwerte können Trophie-indizierende Algen am Quellmund sein (Stanford et al. 1994). In ähnlicher Weise können in Quellen auch Sulfat oder Schwefelwasserstoff in erhöhter Konzentration auftreten (Pax 1948), besonders aus Grundwasserleitern in der Kreide und im Keuper, aber auch im Tertiär. Solche Sonderhabitats, auch wenn ihr Chemismus natürlichen Ursprungs ist, sind als Referenzstandorte nicht geeignet. Von besonderem Interesse für das Verständnis der Wirkung von Außeneinflüssen auf Grundwasserspeicher kann der Chloridgehalt sein. Da Chlorid keinerlei biologische Reaktionen eingeht, und aus Grundwasserleitern in der Regel bereits vollständig herausgelöst ist, kann man annehmen, dass der Austrag

im Quellwasser 1:1 den Eintrag im Einzugsbereich widerspiegelt (Bakalowicz 1994). Entsprechend ist in Bayern ein Gradient der Zunahme von den alpinen Zonen (bei 4 mg/l oder darunter) ins Tertiär des Alpenvorlands (> 14 mg/l) zu beobachten (Wilhelm 1956) – stark erhöhte Winterwerte können durch die Ausbringung von Auftausalz auf Straßen bewirkt sein. Quellen mit im Vergleich zu umgebenden Gewässern erhöhtem Chloridgehalt kommen als Referenzstandorte nicht in Frage.

Im Vergleich zu Fließgewässern eines Landschaftsraums zeichnet sich das Quellwasser in aller Regel durch einen relativ erhöhten Anteil im Wasser gelöster Ionen aus, der sich auch in erhöhten Leitfähigkeitswerten spiegelt. Die relative Konzentration verschiedener Komponenten des Elektrolytspektrums ist einer der Faktoren, die zur hohen Individualität einzelner Quellen beitragen – auch nicht weit voneinander entfernte Quellen können sich in dieser Hinsicht deutlich voneinander unterscheiden. Kaum erforscht, angesichts der hohen biologischen Diversität aber wahrscheinlich beträchtlich, ist die Bedeutung dieses „elektrolytischen Fingerabdrucks“ einer individuellen Quelle für ihre organismische Besiedlung.

Um detaillierte Veränderungen im Chemismus des Quellwassers über längere Zeiträume festzustellen, muss die Beobachtung wichtiger Ionen Teil des Monitorings sein. In hochalpinen Gebieten wurden erhöhte Schwermetallkonzentrationen als Folgen des Klimawandels beobachtet: Steigende Temperaturen können das

Abschmelzen von Blockgletschern verstärken und dadurch zum Eintrag von stark ionisiertem Wasser in die Gewässer führen (Thies et al. 2013). Wie schon für den Sauerstoffgehalt und den pH-Wert ausgeführt, ist bei klimatischen Veränderungen auch mit Veränderungen im Eintrag und Haushalt von Elektrolyten zu rechnen, die teilweise wichtigen Einfluss auf die Trophie des Quellwassers nehmen können.

#### Messmethode

Elektrolytmessungen sollen die wichtigsten Kationen ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ) und Anionen ( $\text{Cl}^{-}$ ,  $\text{NO}_3^{-}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}$ ,  $\text{F}^{-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) erfassen. An Standorten mit niedrigen pH-Werten ist zusätzlich die Messung von Spurenelementen (Schwermetallen) angebracht. Für die Analyse der Hauptionen bietet sich als Verfahren die Ionenchromatographie an, für die Bestimmung von Spurenelementen die Atomemissionspektrometrie. Überdies ist zu empfehlen, photometrisch die Absorptionskoeffizienten bei 254 und 436 nm und turbidimetrisch die Trübung zu messen. Bei der Probenahme ist zu beachten, dass die Entnahme des Wassers möglichst nahe am Quellmund und ohne Verwirbelung des Substrats stattfindet. Eine ausreichende Quellschüttung muss zum Messzeitpunkt gegeben sein. Die Messung sollte einmal jährlich stattfinden. Bei Nichtvorhandensein eines betriebsinternen Labors ist ein gut instruiertes externes Labor zu beauftragen. Die Probenahme ist entweder selbst vom externen Auftragnehmer durchzuführen oder nach genauer Anweisung vom eigenen Bearbeiter zu vollziehen.

## 2.5 Biologisches Monitoring

Die Erforschung der pflanzlichen und tierischen Besiedlung von Quellen ist erst in jüngerer Zeit in systematische Bahnen gekommen. Aus dem 19. und frühen 20. Jahrhundert liegen zwar viele verstreut publizierte Einzelnachweise vor, nach der frühen Monographie dreier Quellen in Graubünden von Nadig (1943) kamen größerflächige Erfassungen aber erst um die letzte Jahrhundertwende in Gang. Mittlerweile vorliegende Monographien belegen eine stark ausgeprägte Individualität dieser Lebensräume. Oft weist die Besiedlung der Quelle im Vergleich mit allen folgenden Fließwasserabschnitten einen hohen Anteil spezifischer, nur hier vorkommender Arten auf, in alpinem Gelände bei starkem Gefälle auch eine erheblich höhere Diversität (Cantonati et al. 2006). In Quellen des Mittelgebirges, auf kristallinem Untergrund oder vor allem auf Buntsandstein, kann die Diversität im Vergleich mit dem Quellbach aber auch geringer sein.

Neben der Anwesenheit speziell angepasster (krenobionter) Arten kennzeichnet die Quellen typischerweise die Abwesenheit von Tiergruppen, die in der Fauna der Bäche prägend sind: Fische sind allenfalls ausnahmsweise in großen Quellen mit ausgedehnten Staubeichen anzutreffen, filtrierende Organismen fehlen oft völlig, treten am ehesten in Sickerquellen mit höherem organischem Eintrag auf, Eintagsfliegen fehlen oft oder sind nur durch kleine Populationen einzelner Arten vertreten.

### Entnahme des biologischen Materials

Die Herausforderung der Quellbiologie liegt in der geringen räumlichen Ausdehnung

des Untersuchungsobjekts. Die Anwendung limnologischer Standardtechniken wie sie sich für die Entnahme von Phyto- und Zoobenthos aus Seen oder Fließgewässern bewährt haben (mikrobiologische Probenahmen sind ein Sonderfall, s. Kap. 2.5.1), würde den Lebensraum zerstört hinterlassen; die Substratentnahme muss entsprechend auf relativ kleine Volumina beschränkt werden. Die Einschränkung der Probengröße wiederum birgt das Risiko, dass Arten mit geringer Individuendichte, wie sie in Quellen oft anzutreffen sind, unentdeckt bleiben. Ein groß angelegtes biologisches Monitoring sollte zweigleisig fahren: (1) quantitative Beobachtung von Arten, die in größeren Populationen die Lebensgemeinschaft dominieren; (2) qualitative Beobachtung seltenerer Arten unter Anwendung wenig invasiver Methoden (Handaufsammlung, genetische Methoden). Da die rasante Entwicklung molekulargenetischer Arbeitsmethoden die Erstellung dieses Leitfadens begleitet, diese neuen Methoden aber noch nicht ausgereift sind, haben wir uns entschlossen, klassisch morphologischer und molekularbiologischer Methodik jeweils getrennte Kapitel zu widmen. Die zunächst besprochene herkömmliche Methodik ist zugleich diejenige, mit der die Grundlagen für diesen Leitfaden erarbeitet wurden. Für ein neu zu beginnendes Monitoring empfehlen wir ein kombiniertes Vorgehen, in dem beide Methodenfelder parallel zur Anwendung kommen. Je nach Qualität und Standardisierbarkeit der Ergebnisse ist in fernerer Zukunft zu entscheiden, ob es sinnvoll ist, Schwerpunkte hin zur molekularen Methodik zu verlagern.

### Untersuchungsintervall

Mikrobiologische Untersuchungen sollten jährlich simultan mit der Erfassung der chemischen Parameter durchgeführt werden. Probenahmen für botanische und zoologische Untersuchungen (Phytobenthos, Meiobenthos, Makrobenthos) sollten in fünfjährigem Zeitabstand durchgeführt werden. An Stellen, für die sich bei der Auswertung interessante Entwicklungen abzeichnen, ist das Zeitintervall entsprechend zu reduzieren. Bei organisatorischen oder finanziellen Engpässen sollte das Intervall der Beprobung nicht verändert werden. Proben eines Jahrganges können tiefgekühlt aufbewahrt und zu einem späteren Zeitpunkt analysiert werden. Insbesondere angesichts der rasch fortschreitenden Möglichkeiten im molekularbiologischen Bereich ist in einem solchen Fall die jeweils bestmögliche Fixierung und Hälterung mit Spezialisten abzusprechen. Für solche Proben ist ein Aufbewahrungssystem mit Sicherung gegen Stromausfälle unerlässlich.

#### **2.5.1 Mikrobiologie**

Mikrobiologische Untersuchungen in Grundwasser und Quellen konzentrierten sich bislang weitgehend auf die Nutzbarkeit der Ressource Trinkwasser (Bestimmung der Gesamtkeimzahl, Keimzahlen von Coliformen und Enterokokken – erhöhte Werte deuten auf anthropogene Störungen im Einzugsgebiet und sind bei der Auswahl von Referenzquellen als Ausschlusskriterien bedeutsam). Die tatsächliche mikrobiologische Diversität in Grundwasser und Quellen ist hingegen noch nicht angemessen dokumentiert. Bei eDNA-Untersuchungen an Quellen (s. Kap. 2.5.4) findet sich eine hohe Anzahl protistischer

und mykologischer taxonomischer Einheiten („OTUs“), von denen jede einzelne eine noch undefinierte Art repräsentiert.

Die mikrobiologische Diversität in Quellen und Grundwasser ist ein Forschungsfeld mit großem Potential, lässt sich aber nach gegenwärtigem Kenntnisstand im Rahmen eines standardisierten Monitorings nicht repräsentativ analysieren. Die Beobachtung ausgesuchter, in der Trinkwasseranalyse etablierter Parameter vermittelt aber wichtige Signale über die Entwicklung auch dieser Lebensgemeinschaften.

Es ist davon auszugehen, dass eine Temperaturerhöhung im Grund- und Quellwasser zu einer Vermehrung der mikrobiellen Zelldichte führt, da sie die Wachstumsbedingungen für bestimmte koloniebildende Stämme verbessert (Karthe 2015).

### Messmethode

Die Vielfalt unterschiedlicher Untersuchungsmethoden für die mikrobiologische Wasseruntersuchung ist groß. In der rezenten Quellforschung hat sich die Membranfiltration in Verbindung mit einem Agarnährmedium bewährt. Als Minimalprogramm sollte die Erfassung trinkwasserrelevanter Parameter (s.o.) durchgeführt werden, sowohl bei der Erstuntersuchung, als auch als Teil des langfristigen Monitorings. Steht kein eigenes Labor mit Bearbeiter zur Verfügung, so ist ein externer Auftragnehmer zu beauftragen, der auch für das Vorgehen bei der Probennahme die Qualitätssicherung übernimmt oder diese selbst durchführt.

Das entscheidende bei der Probennahme ist, dass man keine Verwirbelung des Substrats verursacht und somit rein die mikrobiologischen Gegebenheiten in der Wassersäule bestimmt. Die mikrobiologische Untersuchung sollte jährlich simultan mit der Erfassung der chemischen Parameter durchgeführt werden.

### 2.5.2 Botanik

Die Diversität der Makrophytenbesiedlung von Quellen ist sehr unterschiedlich - durch einen höheren Artenreichtum zeichnen sich vor allem solche Standorte aus, die aus anderen Gründen für das Monitoring eher weniger geeignet sind (Helokrenen, Offenlandquellen, s. Kap. 1.1). Zu Beginn des Monitorings sollte eine Vegetationsaufnahme nach den Vorgaben des Bayerischen Quellerfassungsbogens erfolgen, Veränderungen sind bei Wiederholungsuntersuchungen zu protokollieren. Für das Verständnis von Struktur und Veränderlichkeit des phototrophen Sektors der Lebensgemeinschaft ist die Untersuchung der Algenflora von besonderem Interesse, die in Quellen sehr vielfältig und artenreich entwickelt sein kann (Cantonati et al. 2007b). Unter den Besiedlern lassen sich Indikatorarten für wichtige Faktoren wie Stabilität der Wasserführung, Versauerung, Nährstoffhaushalt oder Lichtklima identifizieren.

Ist eine Erfassung der gesamten Algenflora nicht möglich, so sind aufgrund ihres Artenreichtums und der bereits gründlichen Dokumentation ihrer Lebensraumsprüche die Kieselalgen (Diatomeae oder Bacillariophyta) die prädestinierte Zeigergruppe (Abbildung 13). Sie besiedeln neben dem dauerfeuchten unmittelbaren Umfeld von Quellen auch von Schüttungsschwankungen betroffene

Bereiche, die nur periodisch befeuchtet werden, z.B. Spritzwasserzonen. Die Lebensgemeinschaft der Diatomeen kann Hinweise auf verschiedene Trends geben, die vor dem Hintergrund des Klimawandels von besonderer Bedeutung sind: Sie reagieren sensibel auf Kontinuität und Variabilität der Abflussverhältnisse, aber auch auf Veränderungen der chemischen Zusammensetzung des Wassers, z. B. Konzentrationen von Nitrat und organischen Stoffen oder Veränderungen des Säuregehalts (Alles et al. 1991, Lange-Bertalot & Metzeltin 1996, Cantonati 1998, Andrén & Jarlman 2008, Cantonati & Lange-Bertalot 2011).

Quellspezialisten konnten bislang nicht entdeckt werden, wohl aber Arten, die zur Unterscheidung zwischen grundwasserbeeinflussten und bachtypischen Fließwasserabschnitten herangezogen werden können (Cantonati et al. 2010). Die meisten Arten reagieren sehr sensibel auf genau diejenigen Faktoren, die als die wichtigsten für

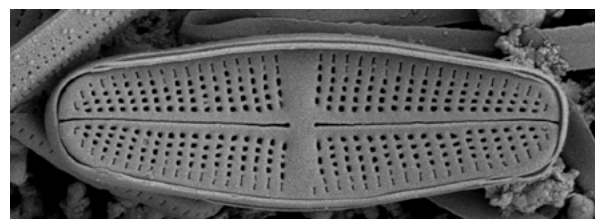


Abbildung 13: Unter einem Rasterelektronenmikroskop gesehene Kieselalge *Achnanthydium dolomiticum* (Breite etwa 3  $\mu\text{m}$ ). Diese überwiegend epiphytisch lebende Art (in Quellen findet man sie typischerweise auf Moosen) ist einerseits charakteristisch für Gewässer mit überdurchschnittlichen Magnesiumkonzentrationen (im Nationalpark Berchtesgaden beispielsweise findet man sie in einigen Quellen, die im hydrogeologischen Einzugsgebiet Ramsaudolomit aufweisen) andererseits ist sie ein hervorragender Indikator für Schwankungen im Abfluss, also ein guter Zeiger von einem ökologischen Faktor der besonders wichtig für die Überwachung des Klimawandels ist. Foto: © Cantonati.



die Einteilung von Quelltypen gelten (Strömungsgeschwindigkeit, Mineralstoffgehalt, Substratbeschaffenheit, Lichtverhältnisse). Entsprechend eignet sich die Diatomeenbesiedlung zur Beschreibung von Quelltypen und zur Beobachtung möglicher klimabedingter Veränderungen (Cantonati et al. 2012).

#### Probenahme Phytobenthos

Die folgende Beschreibung beruht in vielen Details auf Angaben von Cantonati et al. (2007b). Das gesamte Eukrenal sollte in die Beprobung einbezogen werden, als Zeitraum besonders geeignet ist eine Periode mit mittleren, stabilen Abflussbedingungen, auf keinen Fall kurz nach starken Niederschlägen (in den Alpen und Mittelgebirgen oft der Spätsommer). Die Verwendung eines Unterwassersichtgeräts („Aquascope“) ist in größeren Rheokrenen nützlich.

#### Geländearbeit

Da etliche Aufwuchsalgen makroskopisch sichtbare Lager ausbilden, die sich hinsichtlich Größe, Wuchsform, Färbung und Konsistenz unterscheiden, ist eine vorläufige Zuordnung oder sogar Bestimmung bereits im Gelände möglich. Der Probenahme geht daher eine Aufnahme voran, in der alle makroskopisch differenzierbaren Algenlager registriert sowie fotografisch und anhand von Handskizzen dokumentiert werden, begleitet von einer Abschätzung von Deckungsgrad und Schichtdicke. Einen Schlüssel und ökologische Referenzdaten für Makroalgen in Quellen geben Cantonati et al. (2007b). Auf jeden Fall ist es erforderlich, Belege der auf diese Weise klassifizierten Arten zu entnehmen und im Labor zu überprüfen.

Alle protokollierten Makroalgenarten und Mikroalgenmischbestände werden entnommen und nach Substrattyp getrennt aufbewahrt. Da sich die Auswahl der beprobten Substrate nach ihrem Deckungsgrad richtet, kommt es automatisch zu einer deutlichen, vom Quelltyp bestimmten Differenzierung: Während in Rheokrenen gröbere mineralische Substrate dominieren, zeigen Quellen anderen Typs höhere Anteile mineralischer und organischer Feinsedimente – letztere oft besonders artenreich besiedelt.

Kleinere Steine und andere Hartsubstrate werden als Ganzes entnommen, Aufwuchsformen, die nur auf großen Blöcken oder anstehendem Gestein zu finden sind, werden abgelöst, wenn nötig mit Hilfe eines Schabers oder einer Bürste, und separat aufbewahrt. Zumindest an drei Stellen mit Feinsediment werden die obersten 2 mm abgesogen. In Quellen tragen neben mineralischen Oberflächen oft Moose als Wuchssubstrat zu einer höheren Kieselalgendiversität bei und verdienen besondere Berücksichtigung. Man entnimmt von ihnen, aber auch von submersen Organen von Makrophyten (welkende Blätter, Wurzeln) vor allem apikale Teile und zerkleinert das Material, damit auch fest angeheftete Algen der Beobachtung nicht entgehen. Wenn es erforderlich ist, Bearbeitungszeit und -kosten zu sparen, kann die Probenahme auf die Substrattypen mit dem jeweils höchsten Deckungsgrad beschränkt werden.

#### Laborarbeit

Alles gesammelte Material wird möglichst kühl und dunkel zur weiteren Verarbeitung ins Labor transportiert. Falls eine zeitnahe

Bearbeitung nicht gewährleistet werden kann, lassen sich die Proben bei Kühl-schranktemperaturen für wenige Tage, oder tief gefroren für einige Wochen aufbewahren. Eine Aufbewahrung über noch längere Zeiträume ist nach Zugabe von Formalin zu einer Endkonzentration von 2–3 %, oder von Ethanol zu > 40% möglich. Ersteres führt aber bei einigen Arten zu morphologischen Veränderungen, letzterer mittel- bis langfristig zur Entfärbung. Solange Probenmaterial überhaupt noch nicht mit Laborchemikalien in Kontakt gekommen ist, lassen sich Teile davon auch trocknen und herbarisieren, mit dem Vorteil, dass solches Material auch nach Jahrzehnten noch molekularbiologisch analysiert werden kann (Cantonati et al. 2007b).

Die Ermittlung der relativen Häufigkeiten erfolgt auf unterschiedliche Weise, je nachdem ob alle Algentaxa oder nur die Kieselalgen bearbeitet werden (nach Pfister & Pipp 2013, s.d. für weitere Details). Relative Deckungsgrade der Makroalgen werden nach den Beobachtungen im Gelände und nötigenfalls Korrekturen nach Stichprobenbefunden im Labor abgeschätzt. Für die Häufigkeitsbestimmung der Mikroalgen(mischbestände) (außer Kieselalgen) sind zwei Arbeitsschritte erforderlich: Die relativen Anteile der während der Freilandarbeit makroskopisch erkennbaren Mikroalgenmischbestände am Gesamtdeckungsgrad werden nach ihrer absoluten Deckung bestimmt und dann bezogen auf die bewachsene Fläche umgerechnet. Im Labor wird die relative Häufigkeit der bestandsbildenden Arten bestimmt (relative Flächenanteile der einzelnen Mikroalgentaxa in jeweils

5-10 Präparaten pro Typ), die endgültigen relativen Häufigkeiten der einzelnen Arten werden dann nach dem Verhältnis des jeweiligen Bewuchstyps zum Gesamtdeckungsgrad berechnet. Für die Häufigkeitsbestimmung der Kieselalgen wird das zu untersuchende Material zunächst mit Wasserstoffperoxyd oder verschiedenen Säuren (für Details s. Cantonati et al. 2007b) mazeriert, um organische Bestandteile zu entfernen. Dann werden aus jeder Choriotop-Teilprobe mindestens 500 Schalen bei 1000-facher Vergrößerung ausgezählt, weitere nur qualitativ erfasste seltenere Taxa werden bei einer weiteren Sichtung des übrigen Materials ermittelt.

Die Algenflora sollte zeitgleich mit dem anschließend beschriebenen Zoobenthos alle fünf Jahre untersucht werden.

### 2.5.3 Zoologie

Hinsichtlich der tierischen Besiedlung ist die Situation im Vergleich zur Botanik genau umgekehrt: Während das Makrobenthos und zu Teilen auch das Meiobenthos für eine ökologische Analyse hinreichend gut dokumentiert ist, fehlen noch verlässliche Grundlagen für die Bewertung der Protozoenbesiedlung und mancher klein dimensionierter Meiozoobenthos-Gruppen (z.B. Rotatoria, Oligochaeta, Nematoda). Dies bedeutet nicht, dass die Besiedlung von Quellen durch diese Tiergruppen nicht dokumentationswürdig ist (vor allem ihre Oligochaetenfauna ist offensichtlich quantitativ und qualitativ bemerkenswert: Sambugar et al. 2005). Für die Behebung diesbezüglicher Defizite in der Grundlagenforschung könnten molekulare Methoden in den kommenden Jahrzehnten einen nützlichen Beitrag leisten.

Um eine möglichst breite Dokumentation der Lebensbedingungen zu ermöglichen, sollten neben den wichtigen Insektenordnungen der Käfer (Coleoptera), Eintagsfliegen (Ephemeroptera), Steinfliegen (Plecoptera) und Köcherfliegen (Trichoptera) – falls anwesend

auch Wanzen (Heteroptera) und Libellen (Odonata) – die in Quellen besonders relevanten Wassermilben (Hydrachnidia) sowie Krebse (Crustacea) und Weichtiere (Mollusca) berücksichtigt werden (siehe dazu auch Abbildung 14).

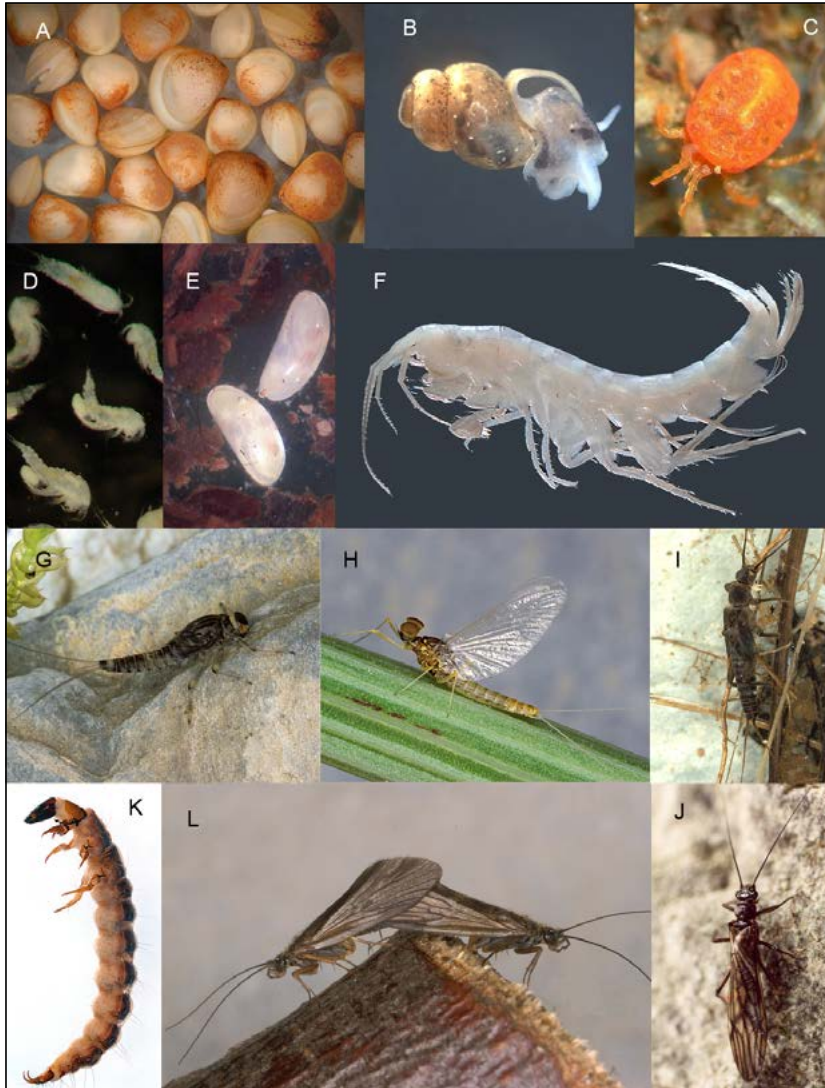
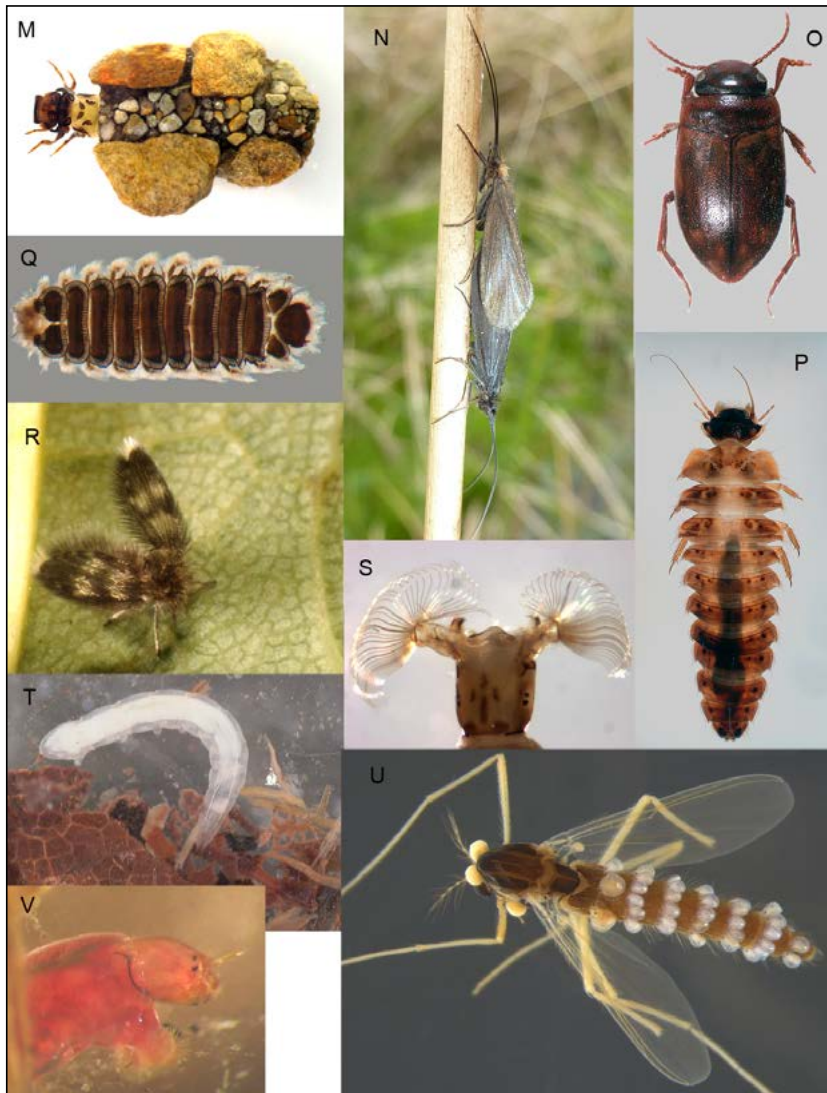


Abbildung 14: Tiergruppen mit besonderer Relevanz für das Quellmonitoring.

**A.** Muscheln der Gattung *Euglesa* (bis vor kurzem *Pisidium*) sind Feinpartikelfiltrierer. Entsprechend sind sie bestandsbildend vor allem in (Rheo)helokrenen mit hinreichender Produktion organischen Feinstmaterials. Foto: © Eiseler. **B.** Nur wenige sind an das Leben in Quellen angepasst. In Mitteleuropa sind vor allem die vergleichsweise lokalisiert auftretenden Arten der Gattung *Bythinella* interessant, die sich in Trockenphasen ins Grundwasser zurückziehen können und daher unter bestimmten Voraussetzungen auch temporäre Quellen besiedeln. Foto: © Eiseler. **C.** Die echten Süßwassermilben (Hydrachnidia, im Bild *Panisus michaeli*) sind in Quellen durch viele auf diese Habitate spezialisierte Arten vertreten, die auf einen kontinuierlichen Abfluss und stabile Bedingungen angewiesen sind. Foto: © Gerecke. **D.** Ruderfußkrebse (Copepoda, im Bild *Attheyella wierzejskii*) treten in Quellen oft in großer Individuendichte auf. Viele Arten sind auch im quellnahen oder tieferen Grundwasser lebensfähig und erlauben Aussagen über die Lebensbedingungen im speisenden Grundwasserleiter. Foto: © Stoch, aus Berchtesgaden FB 51. **E.** Muschelkrebse (Ostracoda, im Bild *Psychrodromus fontinalis*) haben ähnliche Lebensansprüche wie die Ruderfußkrebse und sind wie diese auch in Grenzen austrocknungsresistent und können auf dem Luftweg ausgebreitet werden. Foto: © Quellkurs Universität Tübingen, aus Berchtesgaden FB 51. **F.** Die meisten Höhlenflohkrebse (einzige Gattung: *Niphargus*, Amphipoda) leben in tieferen Grundwasserschichten, einige Arten können aber in Quellen Bestände bilden, vor allem wenn keine oberflächenbewohnenden Flohkrebse der Gattung *Gammarus* vorhanden sind. Bevorzugt treten sie in Quellen mit stärkeren Schüttungsschwankungen auf. Foto: © Eiseler. **G.** Larven der meisten Eintagsfliegenarten (Ephemeroptera) bevorzugen quellferne Abschnitte der Fließgewässer oder Stillgewässer. Lokalisiert können Populationen einzelner Arten (im Bild *Baetis alpinus*) aber auch in Quellbereiche vordringen, vor allem in stark schüttenden Rheokrenen. Foto: © Eiseler, aus Berchtesgaden FB 51. **H.** Erwachsene Eintagsfliegen (Ephemeroptera, im Bild *Baetis alpinus*) sind an ihren nach oben geklappten zarten Flügeln von anderen Vertretern an Gewässer gebundener Insekten leicht zu unterscheiden. Foto: © Eiseler. **I.** Larven von Steinfliegen (Plecoptera, im Bild *Protonemura* sp.) besiedeln Quellen oft in großer Individuendichte, ohne aber speziell an diesen Lebensraum angepasst zu sein, meist handelt es sich um dieselben Arten wie im anschließenden Quellbach und in Fließgewässern tieferer Lagen. Foto: © Eiseler. **J.** Erwachsene Steinfliegen (Plecoptera, im Bild *Protonemura* sp.) tragen ihre Flügel flach über den Hinterleib geklappt und bewegen sich bevorzugt kriechend und krabbelnd, entfernen sich also oft wenig von ihrem Geburtsort. © Foto: Graf & Schmidt-Kloiber, aus Berchtesgaden FB 51. **K.** Viele Arten von Köcherfliegen (Trichoptera) sind mehr oder weniger eng an den Lebensraum Quelle gebunden. Ihre Larven besitzen ein Spinnvermögen. Manche Arten nutzen dieses aber nicht zum (namensgebenden) Köcherbau, sondern sie spannen Stolperfäden (im Bild: *Rhyacophila* sp.) oder konstruieren verschiedenste Arten von Fangnetzen. Foto: © Eiseler. **L.** Die Köcherfliegen (Trichoptera, im Bild: ein Pärchen von *Rhyacophila tristis*) sind nahe mit den Schmetterlingen verwandt, unterscheiden sich aber von ihnen durch behaarte, nicht beschuppte, und daher meist weniger bunte Flügel. Foto: © Eiseler.

gen, aus Berchtesgaden FB 51. **F.** Die meisten Höhlenflohkrebse (einzige Gattung: *Niphargus*, Amphipoda) leben in tieferen Grundwasserschichten, einige Arten können aber in Quellen Bestände bilden, vor allem wenn keine oberflächenbewohnenden Flohkrebse der Gattung *Gammarus* vorhanden sind. Bevorzugt treten sie in Quellen mit stärkeren Schüttungsschwankungen auf. Foto: © Eiseler. **G.** Larven der meisten Eintagsfliegenarten (Ephemeroptera) bevorzugen quellferne Abschnitte der Fließgewässer oder Stillgewässer. Lokalisiert können Populationen einzelner Arten (im Bild *Baetis alpinus*) aber auch in Quellbereiche vordringen, vor allem in stark schüttenden Rheokrenen. Foto: © Eiseler, aus Berchtesgaden FB 51. **H.** Erwachsene Eintagsfliegen (Ephemeroptera, im Bild *Baetis alpinus*) sind an ihren nach oben geklappten zarten Flügeln von anderen Vertretern an Gewässer gebundener Insekten leicht zu unterscheiden. Foto: © Eiseler. **I.** Larven von Steinfliegen (Plecoptera, im Bild *Protonemura* sp.) besiedeln Quellen oft in großer Individuendichte, ohne aber speziell an diesen Lebensraum angepasst zu sein, meist handelt es sich um dieselben Arten wie im anschließenden Quellbach und in Fließgewässern tieferer Lagen. Foto: © Eiseler. **J.** Erwachsene Steinfliegen (Plecoptera, im Bild *Protonemura* sp.) tragen ihre Flügel flach über den Hinterleib geklappt und bewegen sich bevorzugt kriechend und krabbelnd, entfernen sich also oft wenig von ihrem Geburtsort. © Foto: Graf & Schmidt-Kloiber, aus Berchtesgaden FB 51. **K.** Viele Arten von Köcherfliegen (Trichoptera) sind mehr oder weniger eng an den Lebensraum Quelle gebunden. Ihre Larven besitzen ein Spinnvermögen. Manche Arten nutzen dieses aber nicht zum (namensgebenden) Köcherbau, sondern sie spannen Stolperfäden (im Bild: *Rhyacophila* sp.) oder konstruieren verschiedenste Arten von Fangnetzen. Foto: © Eiseler. **L.** Die Köcherfliegen (Trichoptera, im Bild: ein Pärchen von *Rhyacophila tristis*) sind nahe mit den Schmetterlingen verwandt, unterscheiden sich aber von ihnen durch behaarte, nicht beschuppte, und daher meist weniger bunte Flügel. Foto: © Eiseler.



**M.** Typische Larvengehäuse der Köcherfliegen (Trichoptera) bestehen aus einem röhrenförmigen Gespinnst, an das die Larve organisches oder mineralisches Material von außen anklebt (im Bild: *Lithax niger* mit typischen großen seitlichen Verankerungssteinchen). Foto: © Eiseler. **N.** Erwachsene Köcherfliegen (Trichoptera, im Bild ein Pärchen von *Lithax niger*) tragen ihre Flügel dachförmig über dem Körper. Manche Arten entfernen sich sehr weit von ihrem Geburtsgewässer. Foto: © Eiseler. **O.** Die Anzahl in allen Lebensphasen an Quellen gebundener Käferarten (Coleoptera) ist in der mitteleuropäischen Fauna gering. Ein typisches Beispiel ist der Schwimmkäfer *Hydroporus ferrugineus*. Foto: © Eiseler. **P.** Häufig in Quellen anzutreffen sind die etwas asselförmigen Larven der Sumpfkäfer (Coleoptera Scirtidae, im Bild *Elodes* sp.). Die erwachsenen Tiere leben an Land, aber meist gewässernah. Foto: © Eiseler. **Q.** Schmetterlingsmücken (Diptera Psychodidae) sind artenreich in und an Quellen vertreten. Ihre Larven (im Bild: *Sycorax* sp.) sind oft sehr charakteristisch schwarz-weiß gemustert. Foto: © Eiseler. **R.** Erwachsene Schmetterlingsmücken (Diptera Psychodidae) haben verbreiterte, behaarte Flügel. Sie entfernen sich oft nicht weit von ihren Geburtsorten. Foto: © Marten, aus Berchtesgaden FB 51. **S.** Kopf eine Kriebelmückenlarve (Diptera Simuliidae) mit charakteristischen Filterfächern. Aufgrund ihrer Ernährungsweise treten die meisten Arten eher quell-

fern auf, wo mehr filtrierbares Material von der fließenden Welle transportiert wird. Es gibt aber eine Reihe quelltypischer Arten - darunter einige alpine, die erst in den letzten Jahren als neu für die Wissenschaft entdeckt wurden. Foto: © Holopainen, aus Berchtesgaden FB 51. **T.** Larve einer Tanzfliege (Diptera Empididae). Die erwachsenen Tiere treten artenreich um Quellen auf, die madenartigen Larven leben hier räuberisch unter Wasser im Sediment, sind aber bislang nicht auf Artniveau zuzuordnen. Foto: © Quellkurs Universität Tübingen, aus Berchtesgaden FB 51. **U.** Erwachsene Zuckmücke (Diptera Chironomidae) mit parasitischen Wassermilbenlarven am Nacken, der Beinbasis und am Hinterleib. Keine andere Tiergruppe ist so artenreich aus Quellbereichen bekannt und sie stellt die wichtigsten Wirtsorganismen der Wassermilben. Erwachsene Tiere vieler Arten bilden große Schwärme und können mitsamt ihren Parasiten durch Winde weit verbreitet werden. Foto: © Aspas, aus Gerecke et al. 2022. **V.** Kopf und Vorderbrust einer Zuckmückenlarve (Diptera Chironomidae). Larven vieler Zuckmückenarten können bunt, oft rot gefärbt sein und besiedeln sowohl unterschiedlichste submerse Substrate als auch das and Wasser angrenzende Erdreich. Foto: © Gerecke

Die meisten Insekten (in allen freilebenden Stadien aquatisch lebende Familien der Käfer machen eine Ausnahme) repräsentieren ein Segment der Fauna, das in der Adultphase terrestrisch lebt und dann unter dem Einfluss der Bedingungen im näheren oder weiteren Umfeld steht. In Mitteleuropa sind, abgese-

hen von dem stygophilen Käfer *Hydroporus ferrugineus*, keine quellbewohnenden Insektenarten mit besonderem Bezug zum Grundwasser bekannt, Insekten stehen also für den eigentlichen Quellbereich und seine Verzahnung mit dem Umfeld. Dies gilt in ganz besonderem Maß für die Zweiflügler (Diptera),

von denen im Quellbereich viele Familien artenreich vertreten sein können – darunter etliche, für die noch nicht klar ist, ob ihre Larven und Puppen sich eher im feuchten terrestrischen Umfeld oder im eigentlich aquatischen Lebensraum entwickeln. Das Problem der Quellfauna dieser Tiergruppe liegt in ihrem Artenreichtum. Wären die Lebensansprüche relevanter Arten geklärt, könnte eine möglichst komplette Erfassung der Zweiflügler eine umfangreiche ökologische Charakteristik erlauben. Eine solche Analyse wäre aber nur von einem ganzen Stab erfahrener Spezialisten zu leisten und entsprechend aufwendig. Wie oben bereits für einige wenig bekannte Meiofauna-Gruppen ausgeführt, könnten in Zukunft auch für die Erfassung der Diptera verfeinerte molekulare Techniken ein wichtiges Hilfsmittel werden. Nach gegenwärtigem Stand ist eine angemessene Dokumentation nur mit Hilfe von Emergenzfallen möglich, die über die ganze Saison betrieben werden.

Auch die meisten Milben leben während eines Teils ihres Lebenszyklus außerhalb des Wassers, allerdings – umgekehrt als bei den Insekten – auf dem Larvalstadium. Adulte Wassermilben sind an das Wasser gebunden und nicht austrocknungsresistent. Die Gründe für die besondere Bindung vieler Milbenarten an Quellen (in der europäischen Fauna weist keine andere Tiergruppe einen so hohen Anteil krenobionter Arten auf - Gerecke et al. 2018) sind noch nicht abschließend geklärt – das Phänomen als solches prädestiniert sie aber mehr als alle anderen Tiergruppen für die ökologische Quellbeobachtung. Wie bei den Insekten, sind auch bei den

Milben keine Arten mit eigentlicher Bindung an das Grundwasser bekannt. Die echten Süßwassermilben (Hydrachnidia) sind durch ihre Bindung an Insekten, an denen sie larval parasitieren, indirekt von den Lebensumständen im Umfeld der Quellen beeinflusst. Ihre Puppenstadien entwickeln sich unter Wasser, wo sie auf mit Sauerstoff versorgte Mikrohabitate angewiesen und damit empfindlich gegen Kolmatierung sind.

Unter den über ihr ganzes Leben an das Wasser gebundenen Krebstieren (einige Kleinkrebse vermögen Austrocknung als Dauerstadien zu überstehen und sich so auch auszubreiten) finden sich im Gegensatz zu Insekten und Milben auch Arten mit mehr oder weniger deutlichem Bezug zum Grundwasser, beispielsweise die meisten Flohkrebse (Amphipoda) der Gattung *Niphargus*, aber auch die Brunnenkrebse (Bathynellacea), etliche Ruderfuß- oder Muschelkrebse (Copepoda und Ostracoda) oder die Höhlen-Wasserasseln (*Proasellus*). Während die Kleinkrebs-Gemeinschaften sehr gut die Substrat- und Produktionsverhältnisse im Quellmund- und Quellbereich repräsentieren (mit jeweils eigenen Artengemeinschaften in Fließ- und Sickerquellen), erlauben die austrocknungsempfindlichen Flohkrebse der Gattung *Gammarus* Aussagen über die Stabilität der Schüttung. Das Auftreten stygophiler und stygobionter Assel-, Flohkrebs- und Kleinkrebsarten erlaubt Aussagen über die Beschaffenheit des Grundwasserspeichers und seine Konnektivität mit dem Quellmund. Die meisten Arten der Krebse sind darüberhinaus empfindlich gegenüber dem Kalkhaushalt ihres Wohngewässers, da sie Calcium in ihr Außenskelett einbauen.

Ebenfalls auf ein Minimum an Kalk angewiesen sind alle Arten der Weichtiere, die in Quellen insgesamt artenarm vertreten sind, im sauren Milieu sogar völlig fehlen können. Die oft in größeren Populationen auftretenden Muscheln der Gattung *Pisidium* zeigen als aktive Feinpartikelfiltrierer eine mikroorganische Drift an. Unter den Schnecken (Gastropoda) der Gattung *Bythinella* finden sich ausschließlich krenobionte, oft nur lokal verbreitete und genetisch in ihrer Abgrenzung zum Teil noch nicht verstandene Arten, die speziell an das Abweiden von Algenbelägen an Grundwasseraustritten angepasst sind. Da sich lokalisiert auch andere Schneckengattungen finden, deren Arten einen ausgesprochenen Grundwasserbezug haben, dazuhin mit

dem Vorteil der subfossilen Nachweisbarkeit anhand von Gehäusen, sollte die Untersuchung der Weichtierfauna essentieller Bestandteil eines biotischen Quellmonitorings sein.

#### Referenzgruppen und -arten

In der ersten Phase einer langfristigen Faunenbeobachtung ist es sinnvoll, für das betreffende Gebiet Referenzgruppen und -arten zu definieren, für die eine besondere Sensibilität gegenüber Veränderungen klimatischer Verhältnisse zu erwarten ist. Das Zutreffen möglichst vieler der folgenden 12 Kriterien (Tabelle 2) bedeutet, dass eine Gruppe bzw. Art für die Klimafolgenforschung von besonderem Interesse ist:

Tabelle 2: Kriterien für die Auswahl von Referenzarten

<b>Ökologie</b>	<b>Zoogeographie</b>
Eingeschränkte Nahrungswahl	Eingeschränkte oder mosaikhafte Verbreitung
Parasitische/symbiotische Beziehung zu anderen Organismen	Grenzbereich des Verbreitungsareals
Empfindlichkeit gegenüber Nährstoffkonzentrationen	Änderungen in der Verbreitung während der letzten Jahrzehnte
Besondere Wasserchemie	Bindung an bestimmte Vegetationszonen
Temperaturempfindlichkeit	Bindung an bestimmte Höhenstufen
Bevorzugung einer besonderen Quelltypologie	Intraspezifische Variabilität

Basierend auf diesen Kriterien wurden im Projekt 10 Tiergruppen als Referenzgruppen ausgewählt (Tabelle 3). Je nach Untersuchungsgebiet und lokal vorkommendem Artenspektrum sind innerhalb dieser Tiergruppen spezifische Indikatorarten auszuwählen, die für eine langfristige Dauerbeobachtung der faunistischen Quelllebensräume ver-

wendet werden sollen. Im Abschlussbericht zum Projekt „QuellINPB“ (Lichtenwöhler et al. 2019) ist für die beiden bayerischen Nationalparke eine Liste von Referenzarten mit besonderem Indikatorpotential definiert. Sie kann als Anhaltspunkt für die Anwendung in anderen Gebieten herangezogen werden.

Tabelle 3: Auswahl der Tiergruppen

<b>Tiergruppen</b>	
Weichtiere	MOLLUSCA
Milben	ACARI
Ruderfußkrebse	COPEPODA
Muschelkrebse	OSTRACODA
Flohkrebse	AMPHIPODA
Eintagsfliegen	EPHEMEROPTERA
Steinfliegen	PLECOPTERA
Köcherfliege	TRICHOPTERA
Käfer	COLEOPTERA
Fliegen und Mücken	DIPTERA

Es ist allerdings hervorzuheben, dass für viele Vertreter der Quellfauna ökologische und zoogeographische Informationen allenfalls unvollständig vorliegen oder in tautologischer Weise postuliert werden. Um nur ein Beispiel anzuführen: Für Quellorganismen wird die Bevorzugung einer bestimmten Temperatur („Stenothermie“) oft aufgrund ihres Vorkommens in Quellen postuliert. Darüber hinaus wird ihnen auch noch eine Bevorzugung für kalte Temperaturen („Kaltstenothermie“) zugesprochen, da die meiste Freilandarbeit im Sommer stattfindet, wenn die Quelltemperatur nicht höher liegt als die Umgebungstemperatur (wie es im Winter der Fall ist). Neben dem Verschwinden solcher Referenzarten ist das Neuaufreten bislang gebietsfremder Arten und ihre ökologisch-zoogeographische Einstufung ein ähnlich wichtiger Beobachtungsgegenstand und unter den Aspekten des Klimawandels durchaus denkbar.

Eine möglichst hohe Repräsentanz solcher Referenzarten ist ein wichtiger Gesichtspunkt für die engere Auswahl langfristig untersuchter

Referenzstandorte. Populationsveränderungen solcher Arten sollten im Rahmen des Monitorings besondere Beachtung finden.

Für die Arten der Insektenordnungen Ephemeroptera, Plecoptera und Trichoptera wurde durch Hershkovitz et al. (2015) ein „Klima-Veränderungs-Empfindlichkeits-Index“ (climate change vulnerability score, CCVS) publiziert, der auch für eine Einstufung der Quellfauna geeignet ist. In Tiergruppen mit einer hohen Zahl lokalisierter Arten (z.B. Amphipoda der Gattung *Niphargus*) können solche europaweit bewerteten Indizes allerdings nicht 1:1 angewandt werden – die Referenzartenliste ist auf jeden Fall an die lokale Situation anzupassen.

Die Idee, im Langzeitmonitoring durch Reduktion der Analyse auf Referenzarten morphologisch basierte Arbeit zu beschleunigen und den Arbeitsaufwand von Spezialisten zu reduzieren, greift allerdings zu kurz. Auslesen und Erkennen solcher Arten kann nicht ohne breite Kenntnis der gesamten Artenvielfalt erfolgen, viele der vermutlich klimaempfindlichen Arten tragen heikle diagnostische Merkmale. Weiterhin ist die Forschung zu den Kriterien der Artenauswahl im Fluss, gerade die ökologischen und zoogeographischen Eigenschaften vieler Quellarten sind noch unterdokumentiert.

Solche Einschränkungen könnten sich zukünftig mit zunehmender Verfeinerung der Barcoding-Technologie (s. Kap. 2.5.4.) umgehen lassen.

Allerdings wird es auch nach deren Etablierung keinen Sinn haben, Sedimentproben oder aussortierte Organismen mit spezifischen Primern nur auf besonders ausgewählte Referenzarten zu durchsuchen. Ist die Technik erst ausgereift, werden sich ohne zusätzlichen Aufwand auch Gesamtartenlisten erstellen lassen, die alle wichtigen Tiergruppen berücksichtigen. Anhand solcher Listen könnte es möglich werden, eventuelle Faunenveränderungen in Zusammenarbeit mit Spezialisten zu beobachten und nötigenfalls mit klassischen Methoden zu überprüfen. Eine für den jeweiligen geographischen Raum angepasste Referenzartenliste kann hierbei einen Rahmen vorgeben, dürfte aber ein Hilfsmittel sein, das seinerseits im Lauf der Zeit kritisch überarbeitet werden muss.

#### Probenahme Zoobenthos

Eine von Zollhöfer (1997, s.a. Zollhöfer et al. 2000) für das Problem der repräsentativen Probenahme in Quellen vorgeschlagene Lösung ist der Einsatz flächenverkleinerter Surbersampler, mit denen über das Eukrenal statistisch verteilt Substratproben entnommen werden (s.a. Von Fumetti et al. 2007). Franz et al. (2006) befürworten eine integrierende Handnetzaufsammlung, mit der eine Sammelprobe aus allen charakteristischen Substraten entlang einer Transektlinie durch das Eukrenal gewonnen wird (Abbildung 15).

Der Surber-Aufsammlung lassen sich zwei Vorteile zuschreiben: (1) der Flächenbezug und (2) die Möglichkeit, die Verteilung der Organismen innerhalb der Quelle genauer zu dokumentieren. Während der Flächenbezug angesichts der Heterogenität der meisten

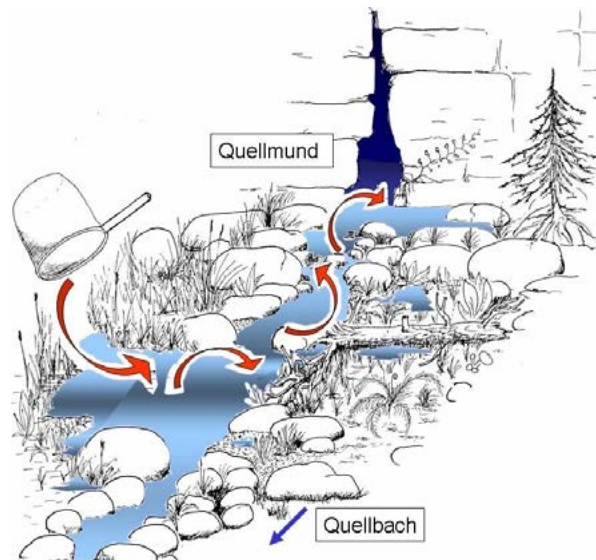


Abbildung 15: Probenahme Benthos. © Gerecke

Quellsubstrate allerdings de facto kaum zu realisieren ist, ist das Thema der Heterogenität der Mikrohabitate in der Tat interessant. Da die integrative Methode von Franz et al. (2006) den Vorteil des deutlich geringeren Arbeitsaufwands hat, vor allem bei der Laborauswertung der Probe, schlagen wir sie für das Monitoring als Standard vor. Die meisten im Folgenden beschriebenen Arbeitsschritte entsprechen einander bei beiden Methoden.

#### Geländearbeit

Zu betonen ist, dass die erfolgreiche Anwendung jeder Methode von der Gründlichkeit der vorangegangenen Kartierung abhängt, bei der der Deckungsgrad aller wichtigen Choriotope (mineralische Substrate unterschiedlicher Korngröße, organische Substrate wie Holz, Wurzeln oder Detritus, Algen, Moose und höhere Pflanzen) abgeschätzt wird. Sowohl bei der Handaufsammlung, wie auch beim Setzen der Surbersampler sind die Choriotope entsprechend ihrer quantitativen Bedeutung zu berücksichtigen. Wichtig ist bei der Probenahme darüber hinaus auch die



angemessene Berücksichtigung besonderer/ beschatteter Bereiche (wobei es hier selbstverständlich nicht um die momentane Situation während der Geländearbeit geht, sondern um eine Abschätzung der Verhältnisse im Tages- und Jahreslauf). Werden alle diese Aspekte angemessen berücksichtigt, ist zu erwarten, dass mit beiden Methoden ähnliche Ergebnisse zu erzielen sind.

Für eine das Eukrenal repräsentierende Sammelprobe (Franz et al. 2006) wird Material aller charakteristischen Substrattypen in ein Handnetz der Maschenweite 250 µm ausgewaschen. Die Entnahme erfolgt mosaikhaft aus dem gesamten Eukrenal, und zwar so, dass insgesamt nur ein kleiner Anteil des Biotops betroffen ist. Hierdurch werden Schäden, die die Quelle (und damit auch die Probenahmen der folgenden Jahre) beeinträchtigen könnten, so gering wie möglich gehalten.

Der Netzinhalt wird im anschließenden Quellbach oder einem anderen, nicht zu untersuchenden Gewässer der Umgebung vorsichtig gespült und homogenisiert. Grobmaterial wie Holz oder Steine wird abgerieben oder abgebürstet und dann entfernt. Das Probenvolumen wird auf ca. 1 Liter reduziert und mit einem Sieb (Maschenweite 1000 µm) in eine grobe und eine feine Fraktion aufgetrennt.

Die grobe Fraktion sollte lebend aussortiert werden, wenn möglich sofort und vor Ort. Wenn es die Zeit erlaubt, kann die Fraktion durch zusätzliche Handaufsammlung weiterer großer Wirbelloser (adulte Flohkrebse und Käfer, schlupffreie Larven anderer Insekten)

angereichert werden. Da Probenahmen dieser Art semiquantitativen Charakter haben, verfälscht eine solche Vorgehensweise das Endergebnis nicht nennenswert, kann aber die Artenliste vervollständigen, da Repräsentanten größer dimensionierter Arten, z. B. Libellen oder Käfer, oft in individuenarmen Populationen anwesend sind. Letztere entgehen der Entnahme bei quantitativer Probenahme auch leicht aufgrund ihrer Schnelligkeit.

Von der Feinfraktion ist Sand durch mehrfaches Aufwirbeln und Abgießen des zu untersuchenden Überstands als Rückstand vom organischen Material abzutrennen. Im Interesse eines kontrollierbaren Arbeitszeitbudgets sollte vom organischen Teil nach gründlicher Durchmischung nur ein Volumen von höchstens 100 cm<sup>3</sup> zur Weiterverarbeitung fixiert werden, unter Verwendung von 80–90-prozentigem unvergälltem Ethanol, um spätere molekulare Untersuchungen zu ermöglichen.

#### Laborarbeit

Mit der beschriebenen Probenahmetechnik gesammeltes Material erlaubt eine Interpretation in zweierlei Hinsicht: (1) Identifizierung derjenigen Taxa, die dominant auftreten (gelegentlich nur auf Familien- oder Gattungsniveau, wenn Jugendstadien in großer Zahl auftreten oder wenn es sich um präadult nicht bestimmbare Taxa handelt); (2) Erarbeitung einer Faunenliste, die möglichst viele der selteneren, oft indikatorisch aber wichtigen Arten miteinschließt.

Aus dem Feinmaterial werden Käfer und Insekten nach Ordnungen, innerhalb letzterer die Diptera nach Familien getrennt aussortiert.

Da oft auch Taxa mit geringer Populationsgröße für die ökologische Einschätzung von Quellen wichtig sind, z.B. Arten stygobionter Krebse oder krenobionter Milben, ist auch bei hoher Individuendichte ein starkes Reduzieren des Probenvolumens ("subsampling") nicht ratsam. Es hat sich vielmehr bewährt, den quantitativen Aspekt an einem kleinen, konstant gewählten Sektor zu betrachten, den qualitativen Aspekt hingegen an der Gesamtprobe. Dies kann auf folgende Weise geschehen: Die Feinfraktion wird vorsichtig homogenisiert und in drei Teile mit geringem, mittlerem und hohem Anteil von Objekten mit relativ großer Masse aufgeteilt. Aus Teil 1 und Teil 3 werden jeweils 100 Individuen aller Invertebratengruppen ausgelesen, sortiert und abgezählt. Falls Teil 1 und 3 insgesamt weniger als 200 Individuen enthalten, werden auch aus Teil 2 Tiere ausgelesen, bis diese Anzahl erreicht ist, oder, bei insgesamt geringer Individuendichte, wird die Probe insgesamt ausgewertet. Der Rest der Probe wird durchgesehen, aber nur noch Vertreter zuvor nicht gefundener Taxa werden entnommen, die zu einer Bereicherung des taxonomischen Spektrums beitragen. Bei diesem Arbeitsschritt sollte großzügig vorgegangen werden, in dem Sinne, dass eher mehr als weniger Material entnommen wird. Es ist ohnehin wünschenswert, dass pro Morphospecies möglichst mehrere Exemplare vorliegen.

Wenn die Dominanzstruktur der 200-Individuenprobe ermittelt ist, können die daraus sortierten Tiere taxawise mit dem übrigen aussortierten Material (den Exemplaren aus der Grobfraktion, den zusätzlichen Individuen aus der "Morphospecies-Auslese" der

Feinfraktion) vereinigt und an Spezialisten zur Bearbeitung weitergeleitet werden.

Ähnliche Resultate lassen sich auch mit Hilfe einer in mehrere Sektoren unterteilten Platte erreichen, in der jeweils ein Sektor ausgelesen, die Restfläche aber nur qualitativ gesichtet wird. Beiden Vorgehensweisen ist gemeinsam, dass Arbeitszeit eingespart werden kann, aber doch ein repräsentativer Querschnitt durch die gesammelte Fauna ausgelesen wird. Da Vertreter unterschiedlicher Tiergruppen beim Homogenisieren und Abfüllen des Probenmaterials zwangsläufig ungleichmäßig verteilt werden, ist es unbedingt nötig, alle Gewichtsfractionen gleichermaßen zu berücksichtigen.

Die zoologischen Bestimmungen sollen zeitgleich mit den botanischen Bestimmungen alle fünf Jahre wiederholt werden.

#### Zusätzliche Methoden

Die folgenden Methoden werden nicht als Teil des Langzeitmonitorings empfohlen, werden aber als Möglichkeit für eine ergänzende Erweiterung der faunistischen Erfassung beschrieben.

Zur gründlichen Erfassung der Insektenfauna einer Quelle leistet der Betrieb mindestens einer Emergenzfalle über eine ganze Vegetationsperiode hin einen sehr wertvollen Beitrag. Der Chance, auf diese Weise sehr viele Arten zu dokumentieren steht allerdings eine Reihe von Einschränkungen gegenüber: (1) Auch einige Vertreter der fliegenden Insekten, z.B. die Trichoptera, werden aufgrund ihrer Verhaltensweise nicht

angemessen erfasst; (2) nur das eng umgrenzte, von der Falle bedeckte Areal wird dokumentiert und dieser Bereich wird seinerseits durch die Präsenz der Falle mittelfristig verändert – weder ein langfristiger Betrieb einer stets gleich lokalisierten Falle, noch ihr regelmäßiges Umplatzen liefert daher belastbare Ergebnisse im Sinne eines Monitorings; (3) der logistische Aufwand (Aufbau, regelmäßige Leerung, Sortierung der Ausbeute) ist enorm und kann nur durch ein entsprechend großes Budget gerechtfertigt werden).

Aus Berchtesgaden vorliegende Daten legen nahe, dass mit Emergenzfallen dokumentierbare Veränderungen der Biozöosen relativ langsam vor sich gehen. Für den Fall, dass Emergenzuntersuchungen Teil eines Monitoring-Programms werden, schlagen Franz et al. (2006) daher vor, diese wie die Benthosdokumentation in einem mehrjährigen Rhythmus zu wiederholen. Eine weitere erhebliche Einsparung ist möglich, wenn die Fallenaufstellung jeweils auf die Monate mit höchster Insektendiversität beschränkt wird.

Lichtfallen haben den Vorteil, dass sie fast ohne Eingriffe in die Habitatstruktur betrieben werden können. Vor allem im quellnahen Luftraum haben sie sich für den Nachweis fliegender Adulte auch seltener Arten als sehr nützlich erwiesen. Während sie, wenn sie submers installiert werden, nur einen sehr geringen Radius erreichen, können sie im terrestrischen Bereich phototaktische Arten allerdings in solchen Massen fangen, dass Sorgen über den Erhalt ihrer Population gerechtfertigt sind. Gegen eine Verwendung

solcher Fallen im langfristigen Monitoring spricht allerdings neben ihrer starken Selektivität im terrestrischen Bereich auch die Tatsache; dass sie sich nur bei günstigen Witterungsverhältnissen (milde Temperaturen, schwache Luftbewegung) effektiv betreiben lassen, dann aber auch zahlreiche Arten ohne besonderen Bezug zum Lebensraum Quelle anlocken.

Die Exposition von Driftnetzen am Quellmund ist eine bewährte Methode zur Erfassung der quellnahen Mikrofauna des Grundwassers, insbesondere der Microcrustacea. Das Netz sollte mindestens mehrere Stunden, eventuell auch über mehrere Tage exponiert werden. Eine Exposition in regelmäßigen Zeitabständen erlaubt Aussagen zu Aktivitäts- und Reproduktionsrhythmen der Stygofauna. Durchaus vorstellbar, aber bislang nicht zur Anwendung gebracht, ist die Nutzung solcher Netze für die langfristige Beobachtung klimabedingter Veränderungen der Grundwasserfauna. Versuche, mit Driftnetzen ausdriftende Dipteren-Exuvien am Übergang Eu-/Hypokrenal zu erfassen, haben hingegen keine überzeugenden Ergebnisse erbracht. Offensichtlich sorgt sowohl die enge Verzahnung von terrestrischen und aquatischen Habitaten, als auch die unregelmäßige Struktur der Substrate für eine weitgehende Rückhaltung der Exuvien im Quellbereich (Stur & Wiedenbrug, persönliche Kommunikation).

Gerade hinsichtlich der emergierenden Insektenfauna können Kescherfänge nur bei regelmäßiger Durchführung über längere Zeiträume einen guten Überblick über die Diversität verschaffen.

Während stichprobenhafte Benthosproben neben der Diversität der Meiofauna auch einen beträchtlichen Anteil der Makrofauna abbilden können, sind die Ergebnisse auf einzelne Termine beschränkter Kescherfänge von einer Vielzahl von Zufällen abhängig. Auch wenn für die Anwendung dieser Methode ein kompliziertes Protokoll befolgt würde, ließe sich der Einfluss witterungsbedingter Unregelmäßigkeiten nicht so weit kontrollieren, dass statistisch auswertbare Ergebnisse zustande kämen. Kescherfänge im Quellumfeld können von großer Bedeutung für die Klärung taxonomischer Fragen sein, können im Langzeitmonitoring aber nicht systematisch zur Anwendung kommen.

#### 2.5.4 Molekulare Methoden

Die Ergebnisse der beschriebenen klassischen Methodik zur Analyse von Sedimentproben wurden in einem Vorprojekt mit Resultaten verglichen, die mit molekulargenetischen Metabarcoding-Methoden erarbeitet wurden. Dabei kamen grundsätzlich übliche, aber nicht für Quellen und deren Organismen optimierte Laborarbeitsweisen zur Anwendung. Solche mit molekularer Methodik erzielten Resultate erwiesen sich als nur bedingt brauchbar - Nachweise vieler mit klassischer Methodik am Untersuchungs-ort nachgewiesener Arten gelangen nicht, dafür erfolgten offensichtlich falsch positive Nachweise gebietsfremder Arten (QuellNPB unveröffentlicht, Lichtenwöhler et al. 2019). Vor allem die folgenden lebensraumtypischen Störfaktoren der DNA-Extraktion, Amplifikation und Sequenzierung kommen in Betracht: (1) unterschiedlich konservierte Umwelt-DNA (eDNA); (2) mineralische Bestandteile (stark

erhöhter Kalkgehalt); (3) andere gelöste chemische Substanzen (z.B. Huminsäuren), die zu einem sehr niedrigen pH-Wert führen, was auch in vergleichbaren Studien zu Quellen diskutiert wird (Blattner et al. 2021); (4) unausgeglichene DNA-Konzentrationen bei sehr groß vs. sehr klein dimensionierten Organismen in derselben Probe. Inzwischen durchgeführte Experimente mit vorsortierten Proben (Beseitigung organischen und anorganischen Materials, Auftrennung nach Größenklassen, weitgehende Beseitigung sehr großer Tiere unter Verbleib nur einzelner Körperanhänge in der Probe, s.a. Beermann et al. 2018) führten in diesem Vorprojekt nicht zu grundsätzlich besseren Ergebnissen obwohl gegenteiliges bereits dokumentiert wurde (Elbrecht et al. 2017). Somit liegt nahe, dass die Defizite im Wesentlichen in der für Quellen und deren Artgemeinschaften noch unausgereiften molekularen Labormethodik begründet sind. Dies dürfte unter anderem bedingt sein durch das Fehlen von verlässlichen Referenzsequenzen oder geeigneten Primersequenzen für wichtige Tiergruppen.

Ein Metabarcoding von DNA-Proben aus der fließenden Welle (eDNA: Rees et al. 2014) produzierte bei Vorexperimenten im Projekt-rahmen (QuellNPB unveröffentlicht, Lichtenwöhler et al. 2019) zunächst uneinheitliche, mit „klassisch“ erarbeiteten Daten aus Benthosproben nicht vergleichbare Ergebnisse. Zum einen fand sich eine von Probe zu Probe sehr unterschiedliche Anzahl nachweisbarer „Arten“ („operational taxonomic units (OTU)“, bis zu über 1700 pro Probe), zum anderen betrafen über 50 % der Sequenzen Prokaryonten, Pilze und Pflanzen

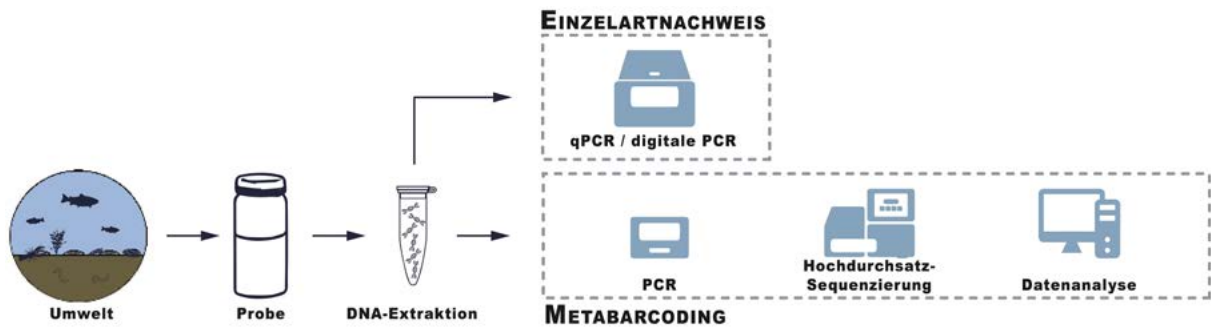


Abbildung 16: eDNA-Labormethodik, zielgerichtete Untersuchung von Einzelarten und Lebensgemeinschaften.  
© Pawlowski et al. 2020

(vorwiegend Algen), über 95 % der Sequenzen waren zu Taxa gehörig, deren Identität noch unbekannt ist. Diesem Problem könnte in Zukunft durch das Verwenden besser geeigneter Primer mit höherer Spezifität begegnet werden (z.B. Blackman et al. 2019 oder Leese et al. 2021).

Die im Rahmen des QuellINPB durchgeführten Vorexperimente zum eDNA-Metabarcoding weisen darauf hin, dass für die zielgerichtete Untersuchung aquatischer Lebensgemeinschaften (Abbildung 16) mit eDNA-Metabarcoding-Technik die Verfügbarkeit einer verlässlichen und vollständigen Sequenzdatenbank der zu detektierenden Arten (nach derzeitigem Stand der Wissenschaft bevorzugt CO1 Sequenzen: Pawlowski et al. 2020) Hauptvoraussetzung ist. Auf dieser Basis lässt sich mit Hilfe von Hochdurchsatz Sequenzierung eine ganze Artengemeinschaft identifizieren. Qualitative Veränderungen in ihrer Zusammensetzung können dann bei Wiederholungsuntersuchungen beobachtet werden – Artenschwund ohne weitere Voraussetzungen, das Auftreten zuvor nicht registrierter Arten allerdings nur, wenn deren Sequenzen in der Datenbank

vorliegen. Letzteres bedeutet, dass die Datenbank so zu pflegen ist, dass sie auch für Arten aus benachbarten zoogeographischen Räumen oder potentielle Neobiota vollständig ist. Nach einer vergleichsweise aufwendigen Etablierungsphase ließe sich mit dieser Methodik mit Bezug auf alle Arten der Datenbank die enthaltene Biodiversität mehrerer Proben parallel erfassen. Die Interpretation und Überarbeitung der resultierenden Artenlisten kann nur durch erfahrene Ökologen erfolgen, in Zukunft könnten lebensraumspezifische Referenzsequenz-Sammlungen die Analyse unterstützen.

Alternative Wege für die Bearbeitung von eDNA-Proben zeigen Blattner et al. (2021) auf. Diese weniger aufwendige Alternative beruht auf dem Einzelnachweis von Arten in eDNA durch qPCR, wofür lediglich die Kenntnis genetischer Marker-Sequenzen gezielt gesuchter Leitarten erforderlich ist. Nach der Etablierung muss bei dieser Methode nicht mehr sequenziert werden, da Arten auf Grund der hohen Spezifität und Sensitivität der Testansätze mittels Amplifikationssignal detektiert werden können.

Bei standardisierter Probenahme ist diese Methode zudem besser zur relativen Quantifizierung der DNA-Menge zwischen Standorten geeignet. Auf Grund der geringen Kosten durch das Wegfallen der Sequenzierung und einem minimierten bioinformatischen Aufwand ist diese Methode deutlich kostengünstiger. Zudem entfällt nach einmaliger kritischer Etablierung der ausgewählten Leitarten im weiteren Projektrahmen die Bearbeitung und Interpretation von Artlisten durch Fachpersonen.

Angesichts des Fortschritts im molekularbiologischen Bereich ist in Zukunft bei jeder biologischen Erhebung die flankierende Entnahme von Proben zur genetischen Analyse durch geschultes Personal ratsam. Falls keine Möglichkeit besteht, diese zeitnah in Zusammenarbeit zwischen Laborspezialisten und Taxonomen auszuwerten, können sie bei  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  für die Bearbeitung zu einem späteren Zeitpunkt aufbewahrt werden. Die Bearbeitung sollte allerdings möglichst zeitnah, in einem der fünf Folgejahre erfolgen. In diesen Grenzen besteht auch die Chance, Proben in einer Zukunft zu untersuchen, in der wahrscheinlich geeignetere Protokolle für eine einheitliche, effektive Analyse vorliegen. Molekularbiologische Analysen sollten mindestens im gleichen Zeitintervall wie die Bestimmungen zur Flora und Fauna (alle fünf Jahre) durchgeführt werden. Einmal etabliert, erlaubt diese dann kostengünstigere Methodik allerdings die Bearbeitung spezieller Fragestellungen in einem engeren Zeittakt.

#### Probenahme und Vorsortierung

Proben für das Sediment-Metabarcoding werden gemäß der für klassische Untersuchun-

gen von Franz et al. (2006) vorgeschlagenen Methodik entnommen. Im Gelände wird aus der Sammelprobe mit Hilfe eines Siebs (Maschenweite 1,5 mm) Grobmaterial entfernt (und eventuell auf interessante Individuen für klassische Bearbeitung durchgesehen). Das Feinmaterial wird durch Schütteln und Rühren homogenisiert und aus dem Homogenisat ein Volumen von ca. 50 ml direkt vor Ort mit möglichst wenig Wasser mit Hilfe von Trockeneis eingefroren. Sollte dies nicht möglich sein, ist eine Fixierung in reinem unvergälltem, 100% Ethanol möglich. Eine solche Probe sollte dann gekühlt transportiert werden (Kühltasche), nach Ende der Freilandarbeit sollte das Fixiermittel noch einmal ausgetauscht werden, bevor das Material möglichst rasch bei  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  im Labor tiefgefroren wird. DNA-Extraktion, Amplifikation und Sequenzierung erfolgen nach jeweils aktuellen Standards des bearbeitenden Labors.

Die Probenahme für das Metabarcoding mit vorsortierten Sedimentproben folgt ebenfalls dem Protokoll von Franz et al. (2006). Die Sortierung erfolgt aber nicht taxonomisch – ausgelesene Tiere werden vielmehr in zwei Größenklassen aufgeteilt, wobei beispielsweise Jungtiere einer Insektenart im Feinmaterial mit Milben und Kleinkrebsen, größere Larven derselben Art im Grobmaterial mit den Flohkrebsen vereinigt werden können. Von sehr groß dimensionierten Tieren werden einzelne Körperteile (Beine, Flügelscheiden, bei extremitätenlosen Tieren Stücke der Abdominalmuskulatur) abgetrennt und der Grobfraktion hinzugefügt, Gehäuse von Schnecken und Muscheln werden zertrümmert, Köcher von Köcherfliegen entfernt,

größere schleimige Tiere (Turbellaria, große Oligochaeta) aufgeschnitten. Reste großer, sezierter Tiere werden für eventuelle morphologische Nachuntersuchungen aufbewahrt. Jeweils vor dem Übergang zur Sortierarbeit an einer neuen Probe werden alle Laborgeräte gründlich gereinigt, Pinzetten und Skalpelle ausgeglüht.

Für die molekulare Methode mit dem größten Potential für Langzeitbeobachtungen der Biodiversität an Quellen, die artspezifische eDNA-Untersuchung, beschreiben wir im Folgenden die Methodik in größerem Detail:

Etablierung artspezifischer eDNA qPCR Tests: Falls für die zu erfassenden Arten noch keine qPCR Primer vorhanden sind, müssen die artspezifischen Messmethoden für jede Art neu etabliert werden. Hierzu sind die folgenden Schritte notwendig:

- Auswahl potentieller Indikatorarten in Absprache mit erfahrenen Kennern der lokalen und umgebenden Fauna.
- Sammeln von Individuen der Indikatorarten an möglichst unterschiedlichen Standorten. Als Richtlinie kann gelten: Entnahme von jeweils drei Individuen an mindestens drei geographisch weit auseinanderliegenden Probestellen. Dieses Vorgehen ermöglicht die Berücksichtigung innerartlicher genetischer Varianz, die ansonsten zu falsch-negativer Detektion führen würde. Es können auch bereits vorhandene, in Ethanol konservierte Individuen verwendet werden.

- Erfassung der Sequenzen nahe verwandter, parallel vorkommender Arten. Diese Maßnahme ist nötig, um falsch-positive Detektionen auszuschließen. Falls für diese Arten keine Sequenzen vorliegen, sind neue Aufsammlungen entsprechender Populationen im Untersuchungsgebiet und seinem geographischen Umfeld unerlässlich.

- Sequenzierung von Marker-Loci (Genom-Regionen), die für die Entwicklung von qPCR Primern potenziell geeignet sind (i.d.R. mitochondriale Marker-Regionen wie CO1, CytB, 16S oder 12S).

- Entwicklung artspezifischer qPCR Tests und deren bioinformatische und labortechnische Validierung.

- In situ-Validierung der neu entwickelten qPCR Tests durch Detektion der Arten in eDNA Proben von Standorten mit bekanntem Artspektrum.



Abbildung 17: links: Einwegspritze; rechts: Aufsetzen der Filterkapsel. © Pawlowski et al. 2020

### Durchführung einer eDNA qPCR Messung im Gewässer:

- Probenahme in der Quelle mit Hilfe von Filterkapseln und Einwegspritzen (Abbildung 17). Hierbei sollte ein Mindestvolumen von 1–2 l Wasser gefiltert werden (Detektionswahrscheinlichkeit wächst mit Probenvolumen!). Die Beprobung kann durch ITaxLab GmbH durchgeführt werden oder durch geschultes Personal mit Hilfe von bereitgestelltem normiertem Probematerial.
- Konservierung der vollständig verschlossenen Filter bei – 20 °C. Dies erfolgt im Gelände am einfachsten durch Lagerung in kleinen Isolationsboxen mit Trockeneis.
- Versand der Filterproben an ein Labor zur weiteren Bearbeitung oder tiefgekühlte Lagerung.



### 3 Langfristige Datenhaltung und Auswertung

Bei einem langfristig angelegten Monitoring nimmt die nachhaltige Datenhaltung einen hohen Stellenwert ein. Um möglichen Verlusten oder Doppelspeicherungen vorzubeugen ist sie zentralisiert anzulegen. Im Projektrahmen wurde eine Datenbank auf Basis von MS Access entwickelt, die speziell an die Erfordernisse eines langfristigen Quellmonitorings angepasst ist. Abbildungen 18, 19 und 20 zeigen die Haupt-Benutzeroberflächen, die im Folgenden in Kürze erläutert werden. Detailliertere Anwendungsinformationen sind der Datenbank selbst beigefügt.

Die Datenbank ist so strukturiert, dass neu erfasste Quellen unter „Neue Quelle anlegen“ mit allgemeinen Informationen zur Lage etc. aufgenommen werden können und die nachhaltige Sicherung von Monitoringdaten (Parametermessungen etc., eingepflegt unter „Quelldaten bearbeiten“) zentralisiert gewährleistet ist. Neben einer direkten Eingabe der Daten ist auch der Import externer Excel-files möglich. Ergebnisse der Kartierungen, sowie der meisten Messungen chemisch-physikalischer und mikrobiologischer Parameter werden direkt eingegeben, während Messergebnisse der Temperatur-Datenlogger und faunistische Daten aus standardisierten Excel-Listen importiert werden.

Überdies beinhaltet die Datenbank standardisierte Analysefunktionen, welche unter „Auswertungen I“ und „Auswertungen II“ geöffnet werden. Beispielsweise kann man sich alle gemessenen in situ-Parameter einer Quelle, die Artenlisten pro Quelle, den Zustand der Quellen in einem geographischen Raum, oder die Beeinträchtigungen einer Quelle standardisiert anzeigen und ausgeben lassen.



Abbildung 18: Eingabemaske Datenbank „Bayerische Quellen als Zeiger des Klimawandels“. © Nationalparkverwaltung Berchtesgaden



Abbildung 19: Auswertungsmöglichkeiten 1 der Datenbank. © Nationalparkverwaltung Berchtesgaden



Abbildung 20: Auswertungsmöglichkeiten 2 der Datenbank. © Nationalparkverwaltung Berchtesgaden

## 4 Rahmenbedingungen für ein Monitoring an Quellen

Obwohl für die biotischen Aspekte größere Zeitintervalle empfohlen werden, bedarf es allein wegen der abiotischen Messreihen vom ersten Beginn des Monitorings an einer kontinuierlichen Überwachung der Datenerhebung und -verwaltung. Eine Organisation in Form etappenweise abgearbeiteter Kurzprojekte kann die für dieses Forschungsthema erforderliche Kontinuität nicht garantieren. Da es sich um ein klimabezogenes Monitoring handelt, das über sehr lange Zeiträume nach festen Standards laufen soll, ist bereits vor der Etablierung des Monitorings diese Langfristigkeit bestmöglich zu gewährleisten. Die Umsetzung des Leitfadens kann nur von ausgebildetem Fachpersonal erfolgreich durchgeführt werden.

Für die Messung und Bestimmung der beschriebenen Parameter sind die folgenden Voraussetzungen erforderlich:

Anschaffungen:

- Datenlogger für die kontinuierliche Messung der Wassertemperatur
- Messgeräte nach den definierten Standards für die *in situ* Messung von chemisch-physikalischen Parametern
- Probenbehälter für chemisch-physikalische und biologische Untersuchungen
- Standard-Sammel-ausrüstung für biologische Probenahme

- Ausrüstung für die Entnahme und Konservierung von eDNA-Proben (Filterkapseln, Einwegspritzen, Isolationsboxen mit Trockeneis)

Laboreinrichtung: Voraussetzungen für alle chemischen und mikrobiologischen Analysen und die standardgemäße Wartung aller Messgeräte. Sofern keine adäquate Laboreinrichtung mit qualifiziertem Personal vorhanden ist, vertragliche Einbindung externer Labors.

Expertennetzwerk: Unabhängig davon, ob die biologischen Aspekte der Langzeitbeobachtung mit traditionellen Methoden oder genetischem Barcoding durchgeführt werden, ist die Verfügbarkeit erfahrener biologischer Experten unabdingbar. Sofern für bestimmte Tier- und Pflanzengruppen zuständige Spezialisten nicht in den eingebundenen Behörden zur Verfügung stehen, sollten externe Spezialisten für ihren Spezialbereich langfristig Verantwortung übernehmen.

Anwender der im Zuge des Projekts „QuellINPB“ erstellten Datenbank (s. Kap. 3) können eine lokale und autarke Datenerfassung durchführen, die Datenhaltung sollte aber an höchster Stelle in der Projekthierarchie angesiedelt sein und auf einen Langzeitbetrieb ausgerichtet werden. Hier erfolgt das Zeitreihenmanagement, wird über die Art der Speichermedien entschieden, für Vergleichbarkeit der Datenstrukturen gesorgt, und die Verfügbarkeit der Daten koordiniert.

## 5 Empfehlungen für eine bayernweite Beobachtung ausgewählter Quellstandorte

Ausgehend von den Erfahrungen in den beiden bayerischen Nationalparks und den daraus resultierenden Erkenntnissen sind Empfehlungen erarbeitet worden, wie bayernweit eine adäquate Auswahl von Quellstandorten getroffen werden könnte und welche weiteren Voraussetzungen für eine langfristige bayernweite Quellbeobachtung erforderlich sind.

### 5.1 Auswahl der Quellstandorte

Der quellenreiche Freistaat Bayern ist durch eine hohe Anzahl unterschiedlicher Landschaftsräume mit jeweils sehr eigener geologischer Prägung und klimatischer Charakteristik gekennzeichnet. Da Quellen in keinem anderen Bundesland über einen derart ausgedehnten Höhengradienten verteilt sind, ergeben sich hervorragende Voraussetzungen für die Etablierung eines Langzeitmonitorings.

Für die Auswahl einer Monitoring-Kulisse sollte die räumliche Gliederung „hydrogeologischer Raum“ gewählt werden. Hydrogeologische Räume weisen eine ähnliche geologische Struktur, eine ähnliche Morphologie und eine ähnliche Grundwasserbeschaffenheit auf, so dass deren hydrogeologische Eigenschaften innerhalb einer gewissen Bandbreite einheitlich sind. Es ist ebenso von einer weitgehenden Homogenität der biotischen und abiotischen Parameter auszugehen. Zudem bliebe die Zahl der bayernweit zu beprobenden Quellen bei 13 in Bayern vorkommenden hydrogeologischen Räumen noch

in einem überschaubaren Rahmen. Dieses Gliederungswerkzeug wurde analog zum Bayerischen Quelltypenatlas gewählt, um einen möglichst umfassenden Überblick über die Quellen abzubilden.

Bislang wurden für die beiden hydrogeologischen Teilräume Nördliche Kalkalpen und Oberpfälzer-Bayerischer Wald auf Einzugsgebietsniveau jeweils 15 Referenzstellen definiert. Diese Dichte an Messstellen ist für alle hydrogeologische Räume Bayerns nicht zu halten.

Die Festlegung auf eine Anzahl und genaue Lage der zukünftigen bayerischen Referenzstandorte gestaltet sich als Herausforderung. Zum einen fehlt eine bayernweite Quellerfassung, die eine flächenhafte Auskunft über Lage und Zustand aller Quellhabitats geben könnte. Zum anderen fehlen in weiten Teilen des Freistaates die fachlichen Grundlagen. So können beispielsweise nur annäherungsweise Aussagen zu typischen Indikatorarten gemacht werden. Das umfangreiche Wissen über die Quellen in Berchtesgaden fehlt für andere Räume.

Für die Auswahl der Standorte für ein bayernweites Monitoring werden nicht nur geologisch-hydrologische Gesichtspunkte herangezogen, sondern die Nutzungsfreiheit einer Quelle hat sich als entscheidender Parameter herausgestellt.

Um die landschaftliche Vielfalt dennoch abzudecken, sollten bei einem bayernweiten Quell-

monitoring mindestens 2–3 Quellstandorte in jedem der 10 relevanten hydrogeologischen Räume (drei wurden aufgrund des sehr geringen Flächenanteils von einer detaillierteren Betrachtung ausgenommen) ausgewählt werden. Als Grundlage bei der Auswahl ist der, im „Aktionsprogramm Quellen in Bayern“ des LBV erarbeitete „Bayerische Quelltypenkatalog“ (LfU 2008a) heranzuziehen. Voraussetzung für ein Quellmonitoring ist die langfristige Ungestörtheit der Standorte und ein guter ökologischer und struktureller Zustand, sowie eine weder zu geringe, noch zu starke Schüttung (0,2-1,0 l/sec). Das Umfeld und das Einzugsgebiet der Monitoring-Quellen sollte von standortgerechtem Waldbestand in Staatsbesitz dominiert werden. Sowohl aufgrund der natürlichen Situation (im besten Fall Klimaxvegetation), als auch der langfristigen Kontrollierbarkeit eventueller anthropogener Veränderung sind solche Quellen am besten vor störenden, nicht klimabedingten Entwicklungen geschützt.

Von Beginn des Monitorings an ist mit den Akteuren vor Ort dafür Sorge zu tragen, dass das Umfeld der Quelle nicht durch anthropogene Eingriffe verändert wird. Eine relative Ungestörtheit sowohl der Quelle als auch des Einzugsgebietes ist zum einen in den bayerischen Nationalparks gegeben, zum anderen können auch die Bayerischen Staatsforsten diese Ungestörtheit auf größerer Fläche sicherstellen.

In Räumen, in denen keine geeigneten Quellen im Staatswald vorhanden sind, kann die dauerhafte Sicherung der zu beprobenden Quellen durch langfristige privatrechtliche Vereinbarungen sichergestellt werden.

Ein detaillierter Vorschlag für ein bayernweites Quellmonitoring wurde im Rahmen des Projektes QuellNPB erarbeitet und liegt als Anhang im Endbericht vor (unveröffentlicht, Lichtenwöhler et al. 2019).

## **5.2 Voraussetzungen für eine langfristige bayernweite Quellbeobachtung**

Eine Beobachtung von Quellstandorten hinsichtlich des Klimawandels in allen hydrogeologischen Räumen Bayerns benötigt eine langfristige und verlässliche Koordination. Dies ermöglicht den Erhalt einer langen Datenreihe klimarelevanter Parameter, welche adäquate Auswertungen möglich macht. Eine zentrale Datenhaltung erleichtert Vergleiche zwischen den Regionen, überregionale Analysen und Verschneidungen mit anderen Monitoringdaten bayerischer Grundwasserleiter.

Ein bayernweites Monitoring an Quellen wird wertvolles Grundlagenwissen für die Beobachtung und das Verständnis zu erwartender Folgen des Klimawandels bereitstellen, kann aber nur erfolgreich sein, wenn es überregional als langfristiges Vorhaben koordiniert wird. Im Falle des Freistaats Bayern liegt die Verantwortung dafür im Geschäftsbereich Umwelt (StMUV). Der Leitfaden ist so verfasst, dass er in möglichst vielen verschiedenen Landschaftstypen zum Einsatz kommen kann und hat damit das Potential, die Basis für bundesweite oder internationale Standards zu bilden.

## 6 Zusammenfassung und Schlussbemerkung

Eine natürliche/naturnahe Quelle stellt einen kleinflächigen Übergangsbereich zwischen dem Grundwasserkörper und dem Gewässernetz auf der Erdoberfläche dar. Das austretende Grundwasser ist ein sensibles Ökoton im Wasserkreislauf einer Region und bildet am Austrittspunkt einen einzigartigen Lebensraum von hoher biologischer Individualität.

Der Klimawandel, sowohl auf globaler als auch auf regionaler Skala, wird sich auf den Wasserhaushalt und in Folge auf die Eigenschaften der Quellen auswirken. Ergebnisse langjähriger Untersuchungen im Nationalpark Berchtesgaden und neue Daten aus dem Nationalpark Bayerischer Wald zeigen, welche lebensraumbestimmenden Faktoren der Quelle von den Einflüssen des Klimawandels potentiell betroffen sind. Wird ein Quellstandort über einen langen Zeitraum immer wieder mit den in diesem Leitfaden empfohlenen Parametern und Monitoringintervallen untersucht, so ermöglicht die entstehende Datenreihe, signifikante Trends in Lebensbedingungen und Lebensgemeinschaften zu erkennen, die Aussagen über den Einfluss des Klimawandel auf den Quelllebensraum zulassen.

Finanziert durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz wurde in dem dreijährigen Forschungsprojekt „Quellen in den bayerischen Nationalparks als Zeiger des Klimawandels“ erstmalig eine Methode für die Beobachtung von Quellen vor dem Hintergrund des Klimawandels entwickelt. In dem interdisziplinären Vorhaben haben die Projektpartner Nationalpark Berch-

tesgaden, Nationalpark Bayerischer Wald und Landesbund für Vogelschutz in Bayern e.V. zusammen mit Experten aus Hydrologie, Zoologie, Botanik und Geographie eine Methode für die langfristige Beobachtung natürlicher/naturnaher Quellen entwickelt, die es ermöglicht, diese sensiblen Lebensräume als Zeiger des Klimawandels zu nutzen.

Der vorliegende Leitfaden beinhaltet diese in der Praxis getestete Methode, wie natürliche/naturnahe Quellen langfristig beobachtet werden können, um Klimawandelfolgen in Bayern sowohl auf den Wasserhaushalt, als auch auf die Biodiversität der Ökosysteme abschätzen zu können. Er gilt als Handlungsempfehlung und ist allgemein übertragbar.

Für eine bayernweite Umsetzung empfiehlt es sich, mindestens 2–3 Quellstandorte in jedem der 10 relevanten hydrogeologischen Räume auszuwählen. Voraussetzung für ein überregional einheitliches Monitoring ist eine übergeordnete Koordinationsstelle, welche die Etablierung und den Dauerbetrieb der Umweltbeobachtung an Quellen, sowie die Zusammenführung und Auswertung der Daten übernimmt. Neben der landesweiten Umsetzung ist auch eine alpenweite Übertragung möglich und wünschenswert. Dazu liefert der Leitfaden den methodischen Rahmen für die Erarbeitung vergleichbarer Datenreihen und sollte zukünftig zur Beobachtung von Quellen herangezogen werden. Darüber hinaus könnten öffentliche Datenplattformen wie z.B. AlpEnDac (StMUV 2017) zur überregionalen Vernetzung und Datennutzung in der Quellbeobachtung beitragen.



## Danksagung

Unser Dank gilt an erster Stelle dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz für die Finanzierung und Begleitung unseres Vorhabens zur angewandten Klimaforschung. Dadurch haben die beiden bayerischen Nationalparke die Möglichkeit erhalten, ihre Funktion als wissenschaftliche Lernorte zu erfüllen und zusammen mit dem Landesbund für Vogelschutz in Bayern e.V. (Partner der Bayerischen Klima-Allianz) den Weg zur praktischen Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse außerhalb der Schutzgebiete zu bereiten.

Die aktuellen Projektergebnisse beruhen zu einem wesentlichen Teil auf der Auswertung der langjährigen wissenschaftlichen Untersuchungen und praktischen Erfahrungen im Nationalpark Berchtesgaden. Unser besonderer Dank gebührt deshalb Helmut Franz, der als früherer Leiter der Nationalparkforschung – letztendlich seiner Zeit voraus – die Bedeutung der natürlichen Quellstandorte für die Erforschung von klimatischen Einflüssen erkannt und mit Pioniergeist bereits vor drei Jahrzehnten den Weg in die Klimaforschung beschritten hat. Damit können heute die Leistungen früherer Forschergenerationen – darunter Angehörige der Nationalparkverwaltung ebenso wie externe Partner – in Wert gesetzt werden.

Auch an der aktuellen Arbeit war eine Vielzahl von Personen beteiligt, sei es als Auftragnehmer mit konkret zu erbringenden Leistungen oder als freiwillige Zulieferer von wertvollen fachlichen Beiträgen. Ihnen allen sei gedankt für Ihr überdurchschnittliches Engagement weit über die Verpflichtungen hinaus.

Persönlich danken wir Elmar Pröll aus dem Nationalpark Kalkalpen für den wertvollen Erfahrungsaustausch hinsichtlich des abiotischen und mikrobiologischen Monitorings, Dr. Stefanie von Fumetti, Lucas Blattner und Daniel Hölbling für den fruchtbaren fachlichen Austausch zum Quellmonitoring in der Schweiz, Dr. Günter Kus für die Diskussionen zu Grundwasserverweilzeiten und hydrogeologischen Fragestellungen, Heike Howein für die Auskünfte zu früheren Strukturkartierungen sowie den Nationalpark-Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen beider bayerischen Nationalparke, die das Quellmonitoring im Gelände durchführen und somit die Datengrundlage für die Erarbeitung der Methode geliefert haben. Eine frühere Version dieser Arbeit wurde im Zusammenhang mit Freilandarbeiten in der Rhön evaluiert und ergänzt. Für vielfältige Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Probenahmen und für konstruktive Anregungen zur Verbesserung des Leitfadens danken wir herzlich Janina Goldbach, Alana Steinbauer und Dr. Tobias Gerlach (Biosphärenreservat Rhön), Sebastian Vogel (Biodiversitätszentrum Rhön) sowie Stefan Zaenker (Fulda).





## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Quellsysteme, eigene Darstellung	13
Abbildung 2: Helokrene (Sickerquelle) im Nationalpark Bayerischer Wald	13
Abbildung 3: Stark schüttende Rheokrene (Fließquelle) im Nationalpark Berchtesgaden	14
Abbildung 4: Limnokrene (Tümpelquelle) im Nationalpark Berchtesgaden	14
Abbildung 5: Entwicklung der mittleren Jahreswassertemperatur in drei Quellen im Nationalpark Berchtesgaden, 2014–2021	20
Abbildung 6: Schüttungsdynamik an der Quelle Schwarzbachloch im Nationalpark Berchtesgaden, deren Einzugsgebiet einen hohen Grad an Verkarstung aufweist	24
Abbildung 7: Beispiel einer Skizze einer Quelle im NP Berchtesgaden	26
Abbildung 8: Markierung des Quellmundes einer Quelle im NP Berchtesgaden	26
Abbildung 9: Einsatz einer Durchfluspumpe (durch roten Pfeil markiert) im Gelände im Nationalpark Berchtesgaden, um die Messsonden konstant mit Wasser bedeckt zu halten	27
Abbildung 10: Metallstab, Kette und Metallkörnchen zur Fixierung und zum Schutz des Datenloggers gegen Geschiebefracht	32
Abbildung 11: Anbringung eines Datenloggers in einer Quelle	32
Abbildung 12: Messung der in situ-Parameter im Gelände mit einem beispielhaften Multisondengerät	34
Abbildung 13: Unter einem Rasterelektronenmikroskop gesehene Kieselalge <i>Achnanthydium dolomiticum</i> (Breite etwa 3 µm).	40
Abbildung 14: Tiergruppen mit besonderer Relevanz für das Quellmonitoring.	43–44
Abbildung 15: Probennahme Benthos	48
Abbildung 16: eDNA-Labormethodik, zielgerichtete Untersuchung von Einzelarten und Lebensgemeinschaften (Pawlowski et al. 2020).	53
Abbildung 17: Links: Einwegspritze; rechts Aufsetzen der Filterkapsel (Pawlowski et al. 2020)	56
Abbildung 18: Eingabemaske Datenbank „Bayerische Quellen als Zeiger des Klimawandels“	57
Abbildung 19: Auswertungsmöglichkeiten 1 der Datenbank	57
Abbildung 20: Auswertungsmöglichkeiten 2 der Datenbank	57

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick der Monitoring-Parameter	25
Tabelle 2: Kriterien für die Auswahl von Referenzarten	46
Tabelle 3: Auswahl der Tiergruppen	47

## Literatur

- Alles E., Nörpel-Schempp M. & Lange-Bertalot H. (1991): Zur Systematik und Ökologie charakteristischer Eunotia-Arten (Bacillariophyceae) in elektrolytarmen Bachoberläufen. *Nova Hedwigia*, 53, 171–213.
- Andrén C. & Jarlman A. (2008): Benthic diatoms as indicators of acidity in streams. *Fundamental and Applied Limnology*, 173, 237–253. <https://doi.org/10.1127/1863-9135/2008/0173-0237>
- BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) (2021): Quell-Lebensräume erfassen – erhalten – aufwerten. Eine Arbeitsgrundlage für die Praxis. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2122, 39 S.
- Bakalowicz M. (1994): Water geochemistry: Water Quality and Dynamics. In: Gibert, J., Danielopol, D.L. & Stanford, J. (Hrsg.): *Groundwater ecology*, 97–129. Academic Press, London.
- Beermann A.J., Zizka V.M.A., Elbrecht V., Baranov V. & Leese F. (2018): DNA metabarcoding reveals the complex and hidden responses of chironomids to multiple stressors. *Environ Sci Eur*, 30, 26. <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0157-x>
- Berg K. (1951): Notes on some large Danish springs. *Hydrobiologia*, 3, 72–78.
- Blattner, L., Ebner, J. N., Zopfi, J. & von Fumetti, S. (2021). Targeted non-invasive bioindicator species detection in eDNA water samples to assess and monitor the integrity of vulnerable alpine freshwater environments. *Ecological Indicators*, 129, 107916. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107916>
- Blackman R.C., Mächler E., Altermatt F., Arnold A., Beja P., Boets P., Egeter B., Elbrecht V., Filipe A.F., Jones J.I., Macher J., Májaneva M., Martins F.M.S., Múrria C., Meissner K., Pawlowski J., Schmidt Yáñez P.L., Zizka V.M.A., Leese F., Price B. & Deiner K. (2019): Advancing the use of molecular methods for routine freshwater macroinvertebrate biomonitoring – the need for calibration experiments. *Metabarcoding and Metagenomics* 3, e34735. <https://doi.org/10.3897/mbmg.3.34735>
- Brehm J. (1978): Vierjährige hydrologische und chemische Untersuchungen an zwei benachbarten Buntsandstein-Waldquellen. *Arch. Hydrobiol.*, 82, 1, 49–65.
- Brehm J. (1985): Der pH-Wert von Buntsandsteinquellen und Bächen. II. Der Waldquell-pH-Wert nach der Höhenlage der Wasseraustritte und der Hangneigungsrichtung der Quelleneinzugsgebiete im Knüllgebirge. *Beitr. Naturk. Osthessen*, 21, 53–66.
- Cantonati M. (1998): Diatom communities of springs in the Southern Alps. *Diatom Research*, 13, 201–220. <https://doi.org/10.1080/0269249X.1998.9705449>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10750-005-1806-9>
- Cantonati M., Bertuzzi E. & Spitale D. (2007a): The spring habitat: biota and sampling methods. Museo Tridentino di Scienze Naturali, Trento: (Monografie del Museo Tridentino di Scienze Naturali 4).
- Cantonati M., Rott E., Pfister P. & Bertuzzi E. (2007b): Benthic algae in springs of the Alps: biodiversity and sampling methods. In: Cantonati, M., Bertuzzi, E. & Spitale, D. (Hrsg.): *The spring habitat: biota and sampling methods*, 77–112. Museo Tridentino di Scienze Naturali, Trento: (Monografie del Museo Tridentino di Scienze Naturali 4). [Bezug über: <https://www2.muse.it/pubblicazioni/libro.asp?libro=463>]
- Cantonati M., Lange-Bertalot H., Scalfi A. & Angeli N. (2010): *Cymbella tridentina* sp. nov. (Bacillariophyta), a crenophilous diatom from carbonate springs of the Alps. *Journal of the North American Benthological Society* 29, 775–788. <https://doi.org/10.1899/09-077.1>
- Cantonati M. & Lange-Bertalot H. (2011): Diatom monitors of close-to-pristine, very-low alkalinity habitats: three new Eunotia species from springs in Nature Parks of the south-eastern Alps. *Journal of Limnology*, 70, 209–221. <https://doi.org/10.4081/JLIMNOL.2011.209>
- Cantonati M., Angeli N., Bertuzzi E., Spitale D. & Lange-Bertalot H. (2012): Diatoms in springs of the Alps: spring types, environmental determinants, and substratum. *Freshwater Science*, 31, 499–524. <https://doi.org/10.1899/11-065.1>

- Cantonati M., Segadelli S., Ogata K., Tran H., Sanders D., Gerecke R., Rott E., Filipini M., Gargini A. & Celico F. (2016): A global review on ambient Limestone-Precipitating Springs (LPS): Hydrogeological setting, ecology, and conservation. *Sci Total Environ*, 568, 624-637. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.105>
- Chang Y., Hartmann A., Liu L., Jiang G. & Wu J. (2021): Identifying More Realistic Model Structures by Electrical Conductivity Observations of the Karst Spring. *Water Resources Research*, 57, e2020WR028587. <https://doi.org/10.1029/2020WR028587>
- DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) (Hrsg.) (1994): DIN 4049-3:1994-10. Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Beuth-Verlag, Berlin.
- Ebner J. N., Ritz D. & Von Fumetti S. (2019): Comparative proteomics of stenotopic caddisfly *Crunoecia irrorata* identifies acclimation strategies to warming. *Molecular Ecology*, 28, 4453–4469. <https://doi.org/10.1111/mec.15225>
- Elbrecht V., Vamos E.E., Meissner K., Aroviita J. & Leese F. (2017): Assessing strengths and weaknesses of DNA metabarcoding-based macroinvertebrate identification for routine stream monitoring. *Methods Ecol Evol*, 8, 1265-1275. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12789>
- Franz H., Gerecke R., Stur E. & Wiedenbrug S. (2006): Vorschläge für die langfristige Umweltbeobachtung, Ausblick. In: Gerecke R. & Franz H.: Quellen im Nationalpark Berchtesgaden. Lebensgemeinschaften als Indikatoren des Klimawandels. Nationalparkverwaltung Berchtesgaden (Hrsg.): Forschungsbericht 51, 255–263. Berchtesgadener Anzeiger, Berchtesgaden.
- Gerecke R. (2016): Quellen: Leben auf der Schwelle zum Licht. In: Tribskorn, R. & Wertheimer, J. (Hrsg.): Wasser als Quelle des Lebens, 169–187. Springer, Berlin/ Heidelberg.
- Gerecke R. & Franz H. (2006): Quellen im Nationalpark Berchtesgaden. Lebensgemeinschaften als Indikatoren des Klimawandels. Nationalparkverwaltung Berchtesgaden (Hrsg.): Forschungsbericht 51, 272 S. Berchtesgadener Anzeiger, Berchtesgaden.
- Gerecke, R.: Haseke, H.; Klauber, J. & Maringer, A. (2012): Quellen. Schriften des Nationalparks Gesäuse, 7, 1-391. Nationalpark Gesäuse GmbH (Hrsg.), Admont/ Weng.
- Gerecke, R., Martin, P., Waltzberg, C. & Walisch, T. (2022): Verbreitungsatlas der Wassermilben des Großherzogtums Luxemburg. *Ferrantia* 85, 1-175.
- Gobiet A., Kotlarski S., Beniston M., Heinrich G., Rajczak J. & Stoffel M. (2013): 12st century climate change in the European Alps – A Review. *Science of the Total Environment*, 493, 1138–1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>
- Hemmerle H. & Bayer P. (2020): Climate Change Yields Groundwater Warming in Bavaria, Germany. *Front. Earth Sci.*, 8, 575894. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.575894>
- Hershkovitz Y., Dahm V., Lorenz A.W. & Hering D. (2015): A multi-trait approach for the identification and protection of European freshwater species that are potentially vulnerable to the impacts of climate change. *Ecological Indicators*, 50, 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.10.023>
- Hervant F. Mathieu J. & Messana G. (1998): Oxygen consumption and ventilation in declining oxygen tension and posthypoxic recovery in epigeal and hypogean aquatic crustaceans. *J. Crust. Biol.*, 18: 4, 717–727. <https://doi.org/10.1163/193724098X00593>
- Hervant F., Mathieu J. & Culver D.C. (1999): Comparative responses to severe hypoxia and subsequent recovery in closely related amphipod populations (*Gammarus minus*) from cave and surface habitats. *Hydrobiologia*, 392, 197-204. <https://doi.org/10.1023/A:1003511416509>
- Höltling B. & Coldewey W.G. (2009): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. Spektrum, Heidelberg.

- IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, [doi:10.1017/9781009157896.001](https://doi.org/10.1017/9781009157896.001).
- Jyväsjarvi J., Marttila H., Rossi P. M., Ala-Aho P., Olofsson B., Nisell J., Backman B., Ilmonen J., Virtanen R., Paasivirta L., Britschgi R., Klove B. & Muotka T. (2015): Climate-induced warming imposes a threat to north European spring ecosystems. *Global Change Biology*, 21, 12, 4561–4569. <https://doi.org/10.1111/gcb.13067>
- Karthe D. (2015): Bedeutung des Klimawandels (insbesondere hydrometeorologischer Extremereignisse) für die Trinkwasserhygiene in Deutschland. In: Evers, M. & Diekkrüger, B. (Hrsg.): Aktuelle Herausforderungen im Flussgebiets- und Hochwassermanagement - Prozesse, Methoden, Konzepte. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 19./20. März 2015 an der Universität Bonn. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 35, 33–43. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), Hennef.
- Kreiner D., Maringer A., Remschak C., Haseke H. & Gerecke R. (2018): Quellen – Forschung 2012–2017. *Schriften des Nationalparks Gesäuse*, 15, 1-193. Nationalpark Gesäuse GmbH (Hrsg.), Admont/ Weng.
- Kuhn M. & Olefs M. (2020): Elevation-Dependent Climate Change in the European Alps. *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*, 17. Oxford University Press, Oxford. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.762>
- Kunstmann H., Strasser U., Warscher M., Laux P., Marke T. & Lorenz M. (2019): IPCC-AR5 Klimaszenarien (RCPs) zur hydrologischen Klimaimpaktanalyse: Synthese hochaufgelöster Regionalisierung, multivariater stochastischer Bias-Korrektur und optimierter hydrologischer Modell- und Prozessanalyse am Beispiel Nationalpark Berchtesgaden. BIAS II – Klimaforschungsprojekt im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz – Schlussbericht.
- Küry D., Lubini V. & Stucki P. (2016): Empfindlichkeit von Quell-Lebensgemeinschaften gegenüber Klimaveränderungen in den Alpen. Gewässer und Bodenschutzlabor Kanton Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU, Projekt-Schlussbericht: 1-64.
- Küry D., Lubini V. & Stucki P. (2018): Verletzlichkeit von Eintagsfliegen, Steinfliegen und Köcherfliegen alpiner Quellen gegenüber Klimaveränderungen. *Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt (München)*, 83, 199–218.
- Lahermo, P., Valovirta V.E. & Sarkioja A. (1977): The geobotanical development of spring-fed mires in Finnish Lapland. *Bull. geol. Surv. Finl.*, 300, 1–44.
- Lange-Bertalot H. & Metzeltin D. (1996): Indicators of oligotrophy. 800 taxa representative of three ecologically distinct lake types, carbonate buffered-oligodystrophic-weakly buffered soft waters. *Iconographia Diatomologica*, 2, 1–390. Koeltz Scientific Books, Königstein.
- Leese F., Sander M., Buchner D., Elbrecht V., Haase P., Zizka V.M.A. (2021): Improved freshwater macroinvertebrate detection from environmental DNA through minimized non-target amplification. *Environmental DNA*. 3, 261–276. <https://doi.org/10.1002/edn3.177>
- LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2008a): Aktionsprogramm Quellen in Bayern – Teil 1: Bayerischer Quelltypenkatalog. Hof: Beck Druck GmbH & Co. KG oder online unter [https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu\\_nat\\_00130.htm](https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_nat_00130.htm)
- LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2008b): Aktionsprogramm Quellen in Bayern – Teil 2: Quellerfassung und Bewertung. Hof: Beck Druck GmbH & Co. KG oder online unter [https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu\\_nat\\_00131.htm](https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_nat_00131.htm)
- LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2008c): Merkblatt Nr. 2.1/10. Messeinrichtungen an Quellen. Augsburg: LfU oder online unter [https://www.lfu.bayern.de/wasser/merkblattsammlung/teil2\\_gewaesserkundlicher\\_dienst/doc/nr\\_2110.pdf](https://www.lfu.bayern.de/wasser/merkblattsammlung/teil2_gewaesserkundlicher_dienst/doc/nr_2110.pdf)

- Lichtenwöhler K., Leonhardt G., Lotz A., Hotzy R., Hoppe M., Schubert E., Seifert L. & Müller J. (2019): Quellen in den bayerischen Nationalparks als Zeiger des Klimawandels (QuellINPB) – Klimaforschungsprojekt im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz – Abschlussbericht, 170 S.
- Lubini V., Stucki P., Vicentini H. & Küry D. (2014): Bewertung von Quell-Lebensräumen in der Schweiz. Entwurf für ein strukturelles und faunistisches Verfahren. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern.
- Maire R. & Pomel S. (1994): Karst Geomorphology and Environment. In: Gibert, J., Danielopol, D.L. & Stanford, J.: Groundwater ecology, 130–157. Academic Press, London.
- Martin P., Gerecke R. & Cantonati M. (2015): Quellen. In: Brendelberger, H.; Martin, P.; Brunke, M. & Hahn, H.J. (Hrsg.): Grundwasser geprägte Lebensräume. Eine Übersicht über Grundwasser, Quellen, das hyporheische Interstitial und weitere grundwasser geprägte Habitate. *Limnologie aktuell* 14, 49–132. Schweizerbart, Stuttgart.
- Mastrocicco M., Busico C. & Colombani N. (2019): Deciphering Interannual Temperature Variations in Springs of the Campania Region (Italy). *Water*, 11, 288. <https://doi.org/10.3390/w11020288>
- Nadig A. (1943): Hydrobiologische Untersuchungen in Quellen des Schweizerischen Nationalparks im Engadin (unter besonderer Berücksichtigung der Insektenfauna). Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen des schweizerischen Nationalparks, 1, 265–432. Verlag H.R. Sauerländer & Co., Aarau.
- Pax F. (1948): Die Tierwelt der mitteleuropäischen Schwefelquellen. *Senckenbergiana*, 28,4, 139–152.
- Pawlowski J., Apothéloz-Perret-Gentil L., Mächler E. & Altermatt F. (2020): Anwendung von eDNA-Methoden in biologischen Untersuchungen und bei der biologischen Bewertung von aquatischen Ökosystemen. Richtlinien. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2010, 77 S.
- Pfister P. & Pipp E. (2013): Leitfaden zur Erhebung der Biologischen Qualitätselemente. Teil 3A – Phytobenthos. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.), Wien. 92 S.
- Poschlod B. & Ludwig R. (2021): Internal variability and temperature scaling of future sub-daily rainfall return levels over Europe. *Environmental Research Letters*, 16, 064097. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0849>
- Puhe J. & Ulrich B. (1985): Chemischer Zustand von Quellen im Kaufunger Wald. *Arch. Hydrobiol.*, 102, 331–342.
- Rees H.C., Maddison B.C., Middleditch D. J., Patmore J.R.M. & Gough K.C. (2014): The detection of aquatic animal species using environmental DNA – a review of eDNA as a survey tool in ecology. *Journal of Applied Ecology*, 51, 1450–1459.
- Renschak C. & Harald H. (2019): Benthosuntersuchungen in Bächen, Quellen und Teichen im Rahmen des LIFE+ Projektes Ausseerland (Steirisches Salzkammergut). Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark 149: 83-144.
- Sambugar B., Martinez-Ansemil E. & Giani N. (2005): Oligochaeta from springs in southern Europe. *Bollettino del Museo Civico di Storia Naturale di Verona*, 29.
- Schröder B., Howein H. & Gerecke R. (2006): Quelltypen und Quellfauna. In: Gerecke R. & Franz H.: Quellen im Nationalpark Berchtesgaden. Lebensgemeinschaften als Indikatoren des Klimawandels. Nationalparkverwaltung Berchtesgaden (Hrsg.): Forschungsbericht 51, 214–220. Berchtesgadener Anzeiger, Berchtesgaden.
- Stanford J.A., Ward, J.V. & Ellis, B.K. (1994): Ecology of the Alluvial Aquifers of the Flathead River, Montana. In: Gibert J., Danielopol D.L. & Stanford J.: Groundwater ecology, 367–390. Academic Press, London.
- Steinmann, P. (1915): Praktikum der Süßwasserbiologie. I. Teil: Die Organismen des fließenden Wassers. Gebrüder Borntraeger (Sammlung naturwissenschaftlicher Praktika), Berlin.
- Stevens L.E.; Jenness J. & Ledbetter L.D. (2020): Springs and Springs-Dependent Taxa of the Colorado River Basin, Southwestern North America: Geography, Ecology and Human Impacts. *Water*, 12, 1501. <https://doi.org/10.3390/w12051501>
- StMUV (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz) (2017): Virtual Alpine Observatory (VAO) – Alpine Environmental Data Analysis Center (AlpEn-Dac). <https://www.alpendac.eu/>

- Taylor R. G. et al. (2013): Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3, 322-329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>
- Thienemann, A. (1922): Hydrobiologische Untersuchungen an Quellen (I-IV). *Arch. Hydrobiol.* 14, 1, 151–190.
- Thies H., Nickus U., Tolotti M., Tessadri R. & Krainer K. (2013): Evidence of rock glacier melt impacts on water chemistry and diatoms in high mountain streams. *Cold Regions Science and Technology*, 96, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.06.006>
- Van Rooij P., Pasmans F., Coen Y. & Martel A. (2017): Efficacy of chemical disinfectants for the containment of the salamander chytrid fungus *Batrachochytrium salamandrivorans*. *PLoS ONE* 12: 10, e0186269. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186269>
- Von Fumetti S., Nagel P. & Baltés B. (2007): Where a springhead becomes a springbrook – a regional zonation of springs. *Fundamental and Applied Limnology*, 169, 37–48. <https://doi.org/10.1127/1863-9135/2007/0169-0037>
- Von Fumetti S. & Blattner L. (2016): Faunistic assemblages of natural springs in different areas of the Swiss National Park: a small-scale comparison. *Hydrobiologia*, 793, 175-184. <https://doi.org/10.1007/s10750-016-2788-5>
- Warscher M., Wagner S., Marke T., Laux P., Smiattek G., Strasser U. & Kunstmann H. (2019): A 5 km Resolution Regional Climate Simulation for Central Europe: Performance in High Mountain Areas and Seasonal, Regional and Elevation-Dependent Variations. *Atmosphere*, 10, 682. <https://doi.org/10.3390/atmos10110682>
- Weigand E. & Graf W. (2000): Hydrobiologische Beweissicherung im Rahmen des LIFE-Projekts Nationalpark Kalkalpen. In: *Forschung im Nationalpark 2000. Sonderband Umwelt*, 36–37. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.), Wien.
- Wilhelm F. (1956): Physikalisch-chemische Untersuchungen an Quellen in den Bayerischen Alpen und im Alpenvorland. *Münchener Geographische Hefte*, 10, 1–97.
- Winter K. J.-P. M., Kotlarski S., Scherrer S. C. & Schär C. (2017): The Alpine snow-albedo feedback in regional climate models. *Climate Dynamics*, 48, 1109–1124. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3130-7>
- Zollhöfer J.M (1996): Regionale Quelltypologie für Jura und Mittelland in der Schweiz. *Crunoecia* 5, 265–280.
- Zollhöfer J.M. (1997): Quellen - die unbekanntesten Biotop im Schweizer Jura und Mittelland: erfassen, bewerten, schützen. *Bristol-Schriftenreihe Band 6*, Bristol-Stiftung, Ruth und Herbert Uhl-Forschungsstelle für Natur- und Umweltschutz, 153 S.
- Zollhöfer J.M., Brunke M., Gonser T. (2000): A typology of springs in Switzerland by integrating habitat variables and fauna. *Arch. Hydrobiol./Suppl.* 121 (3-4)

## Glossar

- Abundanz** Häufigkeit einer Tier- oder Pflanzenart in einem bestimmten Raum, auf einer bestimmten Fläche
- Adultus, Adulttier** Erwachsenen Tier, bei Insekten das reproduktionsfähige Letztstadium (→ Imago) (Seite 51)
- allochthon** an anderer Stelle entstanden, nicht am Fundort heimisch
- alluvial** angeschwemmt (Bodenmaterial)
- anthropogen** vom Menschen ausgehend (Seite 16, 25, 36, 39, 60)
- aquatisch** im Wasser lebend (Seite 44, 45, 51, 53)
- autochthon** dem Standort zugehörig, von hier stammend (Organsimenarten: über Generationen hin) (Seite 35)
- Benthos** Gesamtheit der den Gewässergrund besiedelnden Organismen (**Zoobenthos**: Bodenfauna, **Phytobenthos**: Bodenvegetation eines Gewässers) (Seite 25, 38, 39, 41, 42, 48, 51, 52)
- Biozönose** Lebensgemeinschaft in einem definierten Lebensraum (Seite 14, 36, 51)
- bivoltin** s. Voltinismus
- Breccie** Sedimentgestein aus kantigen, durch Bindemittel verkitteten Gesteinstrümmern
- Datenlogger** Gerät zur automatischen Aufzeichnung von Messwerten in regelmäßigen Zeitabständen (Seite 16, 19, 25, 27, 31, 32, 57, 58)
- Detritus** partikuläres organisches Material in einem Gewässer, im freien Wasser und am Gewässergrund; (- **Detritusfresser**) (Seite 48)
- diurnal** im Tageslauf (Seite 15)
- Doline** geschlossene, oft trichterförmige Hohlform an der Erdoberfläche, die durch lokale Auslaugung löslicher Gesteine und/oder Einbrechen unterirdischer Karsthohlräume entsteht
- Drift** im fließenden Wasser suspendierte organische und anorganische Partikel (lebend und tot); **organismische Drift**: driftende lebende Organismen (Seite 46, 51)
- dystroph** sehr nährstoffarmes, i.A. kalkfreies Gewässer („Braunwasser“, Hochmoore)
- Einnischung** Anpassung an ein Spektrum spezifischer Lebensbedingungen
- Emergenz** Schlüpfen erwachsener Fluginsekten; der Terminus wird oft verwendet, um die Gesamtheit der aus einem Lebensraumabschnitt schlüpfenden Fluginsekten anzusprechen (Seite 45, 50, 51)
- ephemer** nur kurze Zeit bestehend (Seite 15, 43, 47)
- Epirhithral** oberer Bachabschnitt, im Anschluss an den Quellbereich
- Eukrenal** Nahbereich der Quellöffnung, geht diffus über in das → Hypokrenal (Seite 41, 48, 49, 51)
- euryök** ohne spezifische Lebensansprüche (z.B. **eurytherm** = einen weiten Temperaturbereich tolerierend)
- eutroph** mit hohem Nährstoffgehalt
- Evaporation** Verdunstung (**Evapotranspiration** = Summe aus Evaporation und (→) Transpiration)
- extraorale Verdauung** Verdauung außerhalb des Körpers (Verdauungssäfte werden in die Beute eingespritzt und das Opfer dann ausgesaugt)
- Exuvie** Körperhülle, die im Rahmen des Wachstumsprozesses abgestreift wird (z.B. Puppenexuvie: Chitinpanzer, der bei der letzten Häutung (→) holometaboler Insekten zurückgelassen wird) (Seite 51)
- Filterierer** Tiere, die ihre Nahrung mittels speziell angepasster Organe oder selbst angefertigter Hilfsmittel aus der strömenden Welle seihen (Seite 43, 46)
- fungivor** sich von Pilzen ernährend
- glazial** die Eiszeiten betreffend (**postglazial** = nach der Eiszeit; **Glazial** = Eiszeit)
- Helokrene** Quelle mit sumpfigem Bereich schwach fließenden oder stagnierenden Wassers am Quellmund („Sumpfquelle“) (Seite 13, 14, 19, 22, 40, 43)
- hemimetabol** mit unvollständiger Verwandlung, Larvenstadien nähern sich mit jeder Häutung schrittweise der Morphologie des Adultus an, kein zwischengeschaltetes Puppenstadium (Insekten)
- Holarktis** Bioregion der Nordhemisphäre; (→) Paläarktis + (→) Nearktis
- holometabol** mit vollständiger Verwandlung, zwischen letztes Larvenstadium und Adulttier ein ruhendes Puppenstadium (Insekten)

- hygropetratisch** benetzter Lebensraum auf mineralischem Substrat ohne eigentlichen Fließbereich, oft neben Traufquellen an Steilwänden
- hygrophil** feuchtigkeitsliebend
- Hypokrenal** unterer Quellbereich, Übergang zum Quellbach (→ Epirhithral) (Seite 51)
- Hyporhithral** unterer Bachabschnitt, vor dem Übergang zum „Potamal“ (Fluss)
- Imaginalstadium** s. Imago
- Imago (pl. Imagines)** geschlechtsreifes, geflügeltes Stadium der Fluginsekten (bei Eintagsfliegen existiert als Ausnahme unter den Insekten ein noch unreifes, aber bereits geflügeltes Vorstadium, = Subimago)
- intermittierend** nur zeitweise fließend (Bäche, Flüsse im Karst und Lockergestein)
- Interstitial** grundwassergefüllter Lückenraum im Kies- und Sandsediment von Bächen
- kaltstenotherm** s. stenök (Seite 30, 47)
- Karst** Erscheinungen und Oberflächenformen in Gebieten mit wasserlöslichen Gesteinen, vor allem in zerklüfteten Kalkgesteinen mit vorwiegend unterirdischem Abfluss (Seite 19, 23, 24, 28, 36)
- Kescher** Fangnetz (Seite 51, 52)
- Kolmation** Verfüllung des Sediments durch Feinmaterial bis zur Wasserundurchdringlichkeit (Seite 45)
- kollin** das Hügelland betreffend
- kolluvial** zusammengeschwemmt (Bodenmaterial)
- Konvektion** Zufuhr von Luftmassen in senkrechter Richtung
- Kopula** in Paarung begriffenes Pärchen (wirbellose Tiere)
- Kosmopolit** weltweit verbreitete Art (kann aber an sehr spezielle Lebensbedingungen angepasst sein (→) Ubiquist)
- Krenal** Quellbereich, bestehend aus (→) Eukrenal und (→) Hypokrenal (Seite 41, 48, 49, 51)
- krenobiont** an Quellen gebunden, schwerpunktmäßig in Quellen vorkommend („quellbewohnend“) (Seite 13, 14, 30, 38, 45, 46, 50)
- krenophil** regelmäßig oder häufig in Quellen vorkommend, aber schwerpunktmäßig in anderen Lebensräumen lebend („quellliebend“) (Seite 14)
- krenoxen** ausnahmsweise in Quellen auftretend („quellfremd“)
- lenitisch** stagnierend oder mit sehr geringer Strömung
- Limnokrene** Quelle mit teichartig aufgestautem Bereich stagnierenden Wassers am Quellmund („Teichquelle“) (Seite 14, 15, 22)
- Limnologie** Wissenschaft von den Binnengewässern und ihren Organismen (Seite 13)
- Litoral** Uferzone von Fließgewässern
- lotisch** bewegt, Wasser mit deutlicher bis starker Strömung
- madicole Fauna** Lebensgemeinschaft auf einem Substrat, das von einem feinen Film fließenden Wassers bedeckt ist (Dicke < 2 mm - **petrimadicol**: auf Steinen, hygropetratisch, **bryomadicol**: auf Moos, **limimadicol**: auf mineralischem Feinsubstrat); der Begriff wird oft auch für das entsprechende Habitat verwendet
- Makrofauna** s. Meiofauna (Seite 52)
- Mandibel** Beißklaue („Kiefer“)
- Meiofauna** Gesamtheit der Tierarten mittlerer Größenordnung (ca. 10-1000 µm), i.a. mehrzellige Wirbellose geringer Dimension, eingeordnet zwischen **Mikrofauna** (Protozoen) und **Makrofauna** (Tiere größerer Dimensionen, in gewissen Grenzen mit bloßem Auge ansprechbar). Die Grenzen zwischen diesen Kategorien sind unscharf und werden willkürlich gezogen (Seite 45, 52)
- mesotroph** mit mittlerem Nährstoffgehalt, zwischen (→) oligotroph und (→) eutroph
- Metarhithral** mittlerer Bachabschnitt
- Mikrofauna** s. Meiofauna (Seite 51)
- Monitoring** Beobachtung/Überwachung über einen definierten Zeitraum hin (Seite 5–9, 19, 21–27, 31, 33, 37–40, 43, 46–48, 50, 57–61)
- monophag** nur eine bestimmte Nahrung fressend (Seite 38)



**montan** das Bergland betreffend

**Morphologie** Gestalt und Aufbau der Lebewesen (Seite 26, 38, 42, 47, 55, 59)

**multivariat** mehrere Variable betreffend

**Nearktis** Bioregion Nordamerikas

**Nische** (ökolog.:) Summe der Anpassungen einer Tierart in Zeit und Raum; jede Tierart bildet eine eigene Nische, die sich von den Nischen aller anderen Arten unterscheidet

**nival** den Schnee betreffend

**oligotroph** mit geringem Nährstoffgehalt

**omnivor** allesfressend

**orographisch** das Relief einer Landschaft betreffend

**Ökoton** Übergangsbereich zwischen zwei verschiedenen Ökosystemen (Seite 15, 61)

**Paläarktis** Bioregion, die Europa, Nordafrika und den nördlichen Teil Asiens einschließt

**Parasit** Tier, das sich von einem anderen (tierischen oder pflanzlichen) Organismus ernährt, der in der Regel wesentlich größer ist als es selbst; im Gegensatz zum (→) Räuber vermag sich der Parasit über sein ganzes Leben oder zumindest eine ganze Phase seines Lebenszyklus von einem einzigen Beuteorganismus, seinem **Wirt**, zu ernähren (Seite 44–46)

**perennierend** ganzjährig

**periodisch** nur zeitweilig bestehend, aber in regelmäßigen Zeitabständen auftretend (Seite 17, 20, 23, 29, 30, 40, 41, 50)

**Periphyton** pflanzlicher Aufwuchs

**Phänologie** jahreszeitlich bedingtes Auftreten bestimmter Lebensstadien bzw. Erscheinungsformen der Organismen

**Phytal** Lebensraum, der durch Blätter und Stängel von Pflanzen gebildet wird

**Phytobenthos** s. Benthos (Seite 38, 39, 41)

**phytophag** pflanzenfressend

**planar** die Ebene betreffend

**Plankton** Gesamtheit der im freien Wasser lebenden und hier im Wesentlichen passiv durch Strömung transportierten Organismen

**pluvial** den Regen betreffend

**Podsol** „Bleicherde“ (durch Verlust an Mineralsalzen verarmter Oberboden, vorw. unter Nadel- und Mischwäldern feuchter Klimate)

**polyvoltin** s. Voltinismus

**Potamal** sommerwarmer Unterlauf eines Fließgewässers (Fluss)

**Prädator** s. Räuber

**Präimaginalstadium** Entwicklungsstufen vor der (→) Imago

**Quellgebiet** ähnl. (→) Quellkomplex, aber einen weiteren Raum betreffend; Quellen können zu verschiedenen Einzugsbereichen gehören

**Quellkomplex** System aus mehreren nahe beieinanderliegenden und zum selben Abfluss hin entwässernden Quellen (Seite 15)

**Radiation** stammesgeschichtliche Aufspaltung eines (→) Taxon, verbunden mit differenzierter Anpassung der neu entstehenden Taxa an neue Lebensbedingungen

**Räuber** Tier, das sich von anderen Tieren ernährt, die in der Regel kleiner als es selbst ist; im Gegensatz zum (→) Parasiten benötigt der Räuber im Laufe seines Lebens mehr als ein Beute-Individuum (= „**Prädator**“) (Seite 14, 44)

**rhobiont** an fließendes Wasser gebunden (hinsichtlich der kleinräumigen Lebensansprüche, nicht im Sinne der Längszonierung)

**Rheokrene** Quelle mit fließendem Gerinne am Quellmund („Fließquelle, Sturzquelle“) (Seite 14, 15, 19, 22, 41, 43)

**Rhithral** Ober- und Mittellauf eines Fließgewässers (**Epirhithral** = sommerkalter Oberlauf; **Metarhithral** = oberer Mittellauf, **Hyporhithral** = unterer Mittellauf)

**rhithrobiont** an Fließgewässer- ober- und mittelläufe gebunden (Lebensschwerpunkt im Sinne der Längszonierung weder im Quellbereich noch im Unterlauf) (Seite 14)

**saprophag** detritusfressend

**semi-aquatisch** teils im Wasser, teils am Land lebend

**Seston** Gesamtheit der anorganischen und organischen Schwebstoffe im Wasser

**stenök** mit spezifischen Lebensansprüchen (z.B. **stenotherm** = nur einen engen Temperaturbereich tolerierend, **kalt-/warmstenotherm** = an tiefe/hohe Temperaturen gebunden)

**Stigma (pl. Stigmen)** die an der Körperoberfläche liegenden Öffnungen des (→) Tracheensystems von Wirbellosen (Seite 14, 35, 45, 50)

**stygobiont** im Grundwasser lebend

**Taxon (pl.: Taxa)** Als Verwandtschaftseinheit innerhalb der biologischen Systematik abgegrenzte Gruppe von Organismen. Die phylogenetische (stammesgeschichtliche) Systematik ist bemüht, nur jeweils nah verwandte, auf einen gemeinsamen Vorfahren zurückgehende Organismen in Taxa (Gattungen, Familien, Ordnungen) zusammenzufassen (Seite 42, 49, 50, 53)

**Taxonomie** Einordnung von Lebewesen in ein ordnendes System (nach morphologischen und molekularbiologischen Gesichtspunkten) (Seite 15, 25, 39, 50, 52, 54)

**terrestrisch** an Land lebend (Seite 44, 45, 51)

**Tracheen** Atmungsorgane wirbelloser Organismen (Tausendfüßler, Insekten, Spinnen)

**Transpiration** gasförmige Ausscheidung von Wasser

**Ubiquist** unter sehr verschiedenen Lebensbedingungen („überall“) vorkommende Art; kann aber in ihrer geographischen Verbreitung sehr begrenzt sein (→ Kosmopolit)

**Umfeld** (bezügl. Quellen) der Bereich, in dem eine Beeinflussung durch das Vorhandensein eines Grundwasseraustritts wahrnehmbar ist (z.B. Vegetation, Geländeformung, Spuren zur Tränkekommender Tiere) (Seite 5, 8, 13, 19, 22, 25, 26, 33, 36, 40, 44, 45, 52, 55, 60)

**univariat** eine einzige Variable betreffend

**univoltin** s. Voltinismus

**Voltinismus** Anzahl Generationen pro Jahr (**univoltin** = mit einer Generation, **bivoltin** = mit zwei Generationen; **polyvoltin** = mit mehr als zwei Generationen pro Jahr)

**Weidegänger** Tiere, die sich durch Abweiden von vorwiegend pflanzlichem Aufwuchs ernähren

**Wirt** s. Parasit (Seite 44)

**Zerkleinerer** Tiere, die organische Sedimentpartikel durch Zerkauen aufschließen; sie ernähren sich sowohl von dabei freiwerdenden Substanzen als auch von sekundären bakteriellen Mikrofilmen

**Zoobenthos** s. Benthos (Seite 25, 38, 42, 48)

**zoophag** tierfressend (räuberisch oder parasitisch)

In der Reihe der Forschungsberichte sind außerdem erschienen:

- |      |   |      |  |
|------|---|------|--|
| # 1  | ENDERS, G.<br><b>Theoretische Topoklimatologie</b>  | # 30 | ZIERL, H. et al.<br><b>Die Wallfahrt über das Steinerne Meer</b>   |
| # 2  | BOCHTER, R.; NEUERBURG, W. & ZECH, W.<br><b>Humus und Humusschwund im Gebirge</b>   | # 31 | PECHACEK, P.<br><b>Spechte im Nationalpark Berchtesgaden</b>   |
| # 3  | NATIONALPARKVERWALTUNG (Hrsg.)<br><b>Zur Situation der Greifvögel in den Alpen</b>  | # 32 | DOMMERMUTH, C.<br><b>Beschleunigte Massenabtragung im Jennergebiet</b>   |
| # 4  | ENDERS, G.<br><b>Kartenteil: Theoretische Topoklimatologie</b>  | # 33 | BÖGEL, R.<br><b>Untersuchungen zur Flugbiologie und Habitatnutzung von Gänsegeier</b>  |
| # 5  | SIEBECK, O.<br><b>Der Königssee – Eine limnologische Projektstudie</b>  | # 34 | SCHUSTER, A.<br><b>Singvögel im Biosphärenreservat Berchtesgaden</b>   |
| # 6  | BOCHTER, R.<br><b>Böden naturnaher Bergwaldstandorte auf carbonatreichen Substraten</b>   | # 35 | HÖPER, M.<br><b>Moose – Arten, Bioindikation, Ökologie</b>   |
| # 7  | NATIONALPARKVERWALTUNG (Hrsg.)<br><b>Der Funtensee</b>  | # 36 | BARTHELMEß, T.<br><b>Die saisonale Plankton Sukzession im Königssee</b>  |
| # 8  | SCHMID-HECKEL, H.<br><b>Zur Kenntnis der Pilze in den Nördlichen Kalkalpen</b>  | # 37 | LIPPERT, W.; SPRINGER, S. & WUNDER, H.<br><b>Die Farn- und Blütenpflanzen des Nationalparks</b>  |
| # 9  | BOILER, R.<br><b>Diplopoden als Streuzersetzer in einem Lärchenwald</b>   | # 38 | GÖDDE, G.<br><b>Die Holzbringung aus dem Einzugsgebiet des Königssees</b>  |
| # 10 | LANGENSCHIEDT, E.<br><b>Höhlen und ihre Sedimente in den Berchtesgadener Alpen</b>  | # 39 | STAHR, A.<br><b>Bodenkundliche Aspekte der Blaikenbildung auf Almen</b>  |
| # 11 | NATIONALPARKVERWALTUNG (Hrsg.)<br><b>Das Bärenseminar</b>   | # 40 | BRAUN, R.<br><b>Die Geologie des Hohen Gölls</b>   |
| # 12 | KNOTT, H.<br><b>Geschichte der Salinenwälder von Berchtesgaden</b>  | # 41 | GLOBNER, F. & TÜRK, R.<br><b>Die Flechtengesellschaften im Nationalpark Berchtesgaden und dessen Vorfeld</b>                             |
| # 13 | MANGHABATI, A.<br><b>Einfluß des Tourismus auf die Hochgebirgslandschaft</b>  | # 42 | TÜRK, R. & WUNDER, H.<br><b>Die Flechten des Nationalparks Berchtesgaden und angrenzender Gebiete</b>                                    |
| # 14 | SPIEGEL-SCHMIDT, A.<br><b>Alte Forschungs- und Reiseberichte aus dem Berchtesgadener Land</b>   | # 43 | KONNERT, V. & SIEGRIST, J.<br><b>Waldentwicklung im Nationalpark Berchtesgaden von 1983 bis 1997</b>                                     |
| # 15 | SCHMID-HECKEL, H.<br><b>Pilze in den Berchtesgadener Alpen</b>  | # 44 | SCHMIDTLEIN, S.<br><b>Aufnahme von Vegetationsmustern auf Landschaftsebene</b>   |
| # 16 | SPANDAU, L.<br><b>Angewandte Ökosystemforschung im Nationalpark Berchtesgaden</b>   | # 45 | BRENDEL, U.; EBERHARDT, R.; WIEMANN-EBERHARDT, K. & D'OLEIRE-OLTMANN, W.<br><b>Der Leitfaden zum Schutz des Steinadlers in den Alpen</b> |
| # 17 | BERBERICH, W.<br><b>Das Raum-Zeit-System des Rotfuchses</b>   | # 46 | NATIONALPARKVERWALTUNG (Hrsg.)<br><b>Forschung im Nationalpark Berchtesgaden von 1978 bis 2001</b>                                       |
| # 18 | MÄCK, U.; BÖGEL, R.<br><b>Untersuchungen zur Ethologie und Raumnutzung von Gänse- und Bartgeier</b>   | # 47 | RETTELBACH, T.<br><b>Die Antagonisten des Buchdruckers im Nationalpark Berchtesgaden</b>   |
| # 19 | DITTRICH, B. & HERMSDORF, U.<br><b>Biomonitoring in Waldökosystemen</b>   | # 48 | PECHACEK, P.; D'OLEIRE-OLTMANN, W.<br><b>International Woodpecker Symposium</b>  |
| # 20 | KRAL, F.; RALL, H.<br><b>Wälder – Geschichte, Zustand, Planung</b>  | # 49 | KONNERT, V.<br><b>Standortkarte Nationalpark Berchtesgaden</b>   |
| # 21 | KLEIN, M.; NEGELE, R.-D.; LEUNER, E.; SOHL, E. & LEYERER, R.<br><b>Fischbiologie des Königssees: Fischereibiologie und Parasitologie</b>  | # 50 | FISCHER, K.<br><b>Geomorphologie der Berchtesgadener Alpen</b>   |
| # 22 | TRAUNSPURGER, W.<br><b>Fischbiologie des Königssees: Nahrungsangebot und Nahrungswahl, Bd. I</b>  | # 51 | GERECKE, R. & FRANZ, H.<br><b>Quellen im Nationalpark Berchtesgaden</b>  |
| # 23 | GERSTMEIER, R.<br><b>Fischbiologie des Königssees: Nahrungsangebot und Nahrungswahl, Bd. II</b>   | # 52 | KUDERNATSCH, T.<br><b>Auswirkungen des Klimawandels auf alpine Pflanzengesellschaften im Nationalpark Berchtesgaden</b>                  |
| # 24 | HECHT, W.; FÖRSTER, M.; PIRCHNER, F.; HOFFMANN, R.; SCHEINERT, P. & RETTENBECK, H.<br><b>Fischbiologie des Königssees: Ökologisch-genetische Untersuchungen am Seesaibling und Gesundheitsstatus der Fische</b> | # 53 | STRASSER, U.<br><b>Proceedings Alpine*Snow*Workshop</b>  |
| # 25 | HOFMANN, G.<br><b>Klimatologie des Alpenparks</b>   | # 54 | KÜFMANN, C.<br><b>Flugstaubeintrag und Bodenbildung im Karst der Nördlichen Kalkalpen</b>  |
| # 26 | RÖSCH, K.<br><b>Einfluß der Beweidung auf die Vegetation des Bergwaldes</b>   | # 55 | STRASSER, U.<br><b>Die Modellierung der Gebirgsschneedecke im Nationalpark Berchtesgaden</b>   |
| # 27 | REMMERT, H.; REY, P. G.; SIEGFRIED, W. R.; SCHERZINGER, W. & KLAUS, S.<br><b>Kleinstmögliche Populationen bei Tieren</b>  | # 56 | RUCKDESCHEL, W. & RUCKDESCHEL, W.<br><b>Die Nachtfalter des Nationalparks Berchtesgaden und seiner Umgebung</b>                          |
| # 28 | MÜLLER, B.; BERBERICH, W. & DAVID, A.<br><b>Zur Situation des Schalenwildes im Nationalpark Berchtesgaden</b>   |      |  |
| # 29 | KÖPPEL, J.<br><b>Beitrag der Vegetation zum Wasserhaushalt</b>  |      |  |

Zu beziehen über



Nationalparkverwaltung Berchtesgaden  
Doktorberg 6  
83471 Berchtesgaden

