



MonAlp Bericht Modul 8 (Seen) 2025

Zooplanktongemeinschaften und abiotische Parameter

hochalpiner Seen

Mit Unterstützung von Bund und Europäischer Union

 Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie


LE 14-20
Entwicklung für den ländlichen Raum

Europäischer
Landwirtschaftsfonds für
die Entwicklung des
ländlichen Raums:
Hier investiert Europa in
die ländlichen Gebiete.



www.hohetauern.at

IMPRESSUM

forschungsraum

MonAlp Bericht Modul 8 (Seen), 2025
Endbericht

Projektleitung und Koordination:

Stephen A. Wickham, Universität Salzburg (bis 30.9.25)
Ulrike-G. Berninger, Universität Salzburg (ab 1.10.25)

Für den Inhalt verantwortlich:

Stephen Wickham, Jana Petermann, Ulrike-G. Berninger, Universität Salzburg

Titelbild: © Florian Hohenberger

Trotz gebotener Sorgfalt können Satz- und Druckfehler nicht ausgeschlossen werden.

Zitiervorschlag: MonAlp Endbericht 2025, Modul 8 (Zooplankton in hochalpinen Seen)

Weblink:



Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Untersuchungssysteme.....	1
1.2	Methoden.....	5
2	Ergebnisse.....	6
2.1	Temperatur.....	6
2.2	Multisondenmessungen (am Beispiel von Chlorophyll <i>a</i> -Konzentration)	8
2.3	Zooplankton.....	10
3	Diskussion und Ausblick	16
3.1	Relevanz der bisher ermittelten Daten.....	16
3.2	Fazit und Ausblick.....	16
4	Danksagung	16
5	Literatur- und Quellenverzeichnis	17

1 Einleitung

Der Nationalpark Hohe Tauern unterstützt seit 2016 ein multidisziplinäres Monitoringprogramm, das an die ökologischen, aber auch gesellschaftlichen Folgen des Klimawandels gerichtet ist. Der Fokus dieses Programmes liegt auf hochalpinen Ökosystemen, die sich besonders für entsprechend ausgerichteter Untersuchungen eignen, da sie lang- und kurzfristige Klimaveränderungen deutlich aufzeigen. Anhand von messbaren Größen wie Abundanzen, Biodiversität, abiotischen Parametern etc. werden in jährlich wiederkehrenden Langzeituntersuchungen alle relevanten „Teil-Ökosysteme“ inkl. ihrer Lebensgemeinschaften (Böden, fließende und stehende Gewässer, Großherbivore, terrestrische Vegetationsbestände, abiotische Faktoren der Kryosphäre) analysiert und daraufhin untersucht, ob und ggf. wie diese sich über kurze und lange Zeiträume verändern. Perspektivisch werden alle Einzelergebnisse und Teilprojekte zusammengeführt, um zu belastbaren Prognosen hinsichtlich der Klimawandelfolgen zu kommen. Als gemeinsames Untersuchungsgebiet wurden drei repräsentative Täler im NPHT (Sulzbachtäler im Land Salzburg, Innergschlöß in Tirol und Seebachtal in Kärnten) ausgewählt. Seit der sog. „Pilotphase“ 2017, in der die Untersuchungssysteme ausgewählt und die Methoden getestet wurden, werden die einzelnen Projektteile nach einem sehr ähnlichen, allerdings ständig optimierten, Muster durchgeführt.

Details zum Gesamtprojekt finden sich im Synthesebericht der „Pilotphase“ (2016 – 2019; Wickham et al. 2019a / 2019b; Körner et al. 2020) sowie im begleitenden „Methodenhandbuch“, das im Jahr 2025 von allen Projektteilnehmer/innen überarbeitet wurde (Wickham et al. 2019 / 2025). Über alle Teilprojekte liegen kontinuierlich verfasste Zwischen- und Endberichte (für jeweils 1- bis max. 3-jährige Förderzeiträume) vor. Jeder dieser Berichte gibt kurz das Gesamtkonzept des Projektes wieder und fokussiert sich dann auf die Veränderungen der gemessenen Parameter bzw. die kontinuierlich umfassender werdende Langzeitanalyse. Diese Veränderungen werden jeweils im Detail beschrieben, quantitativ und qualitativ ausgewertet und es wird versucht, Beziehungen mit Klimaveränderungen bzw. anthropogenen Einflüssen aufzuzeigen. Entsprechend soll auch in diesem Bericht der Hintergrund nur kurz (mit Verweis auf bereits vorliegende Berichte) erläutert werden und der Fokus auf den Veränderungen im Vergleich zu den vorangegangenen Jahren liegen.

Der hier vorliegende Bericht bezieht sich auf das „Modul 8“, das sich mit den abiotischen Faktoren und den Zooplanktongemeinschaften hochalpiner Seen befasst.

1.1 Untersuchungssysteme

Hochalpine Seen, die aufgrund langfristiger Klimaveränderungen sowie durch kurzfristige Prozesse (Eutrophierung, Landnutzungsänderungen und die Ansiedelung von Fischen) zu den am stärksten gefährdeten Ökosystemen der Erde gehören, stehen im Fokus des Moduls 8. Man geht davon aus, dass die Biodiversität planktischer Lebensgemeinschaften in Seen mit steigender Höhenlage (u.a. wg. niedrigerer Wassertemperaturen, kürzeren eisfreien Perioden etc.) abnimmt. Im Zuge des Klimawandels ist es aber möglich, dass genau das Gegenteil eintritt, nämlich die Biodiversität hochalpiner Seen in der Zukunft eher ansteigen wird (Winder et al. 2001; Manca and Armiraglio 2002; Rosset et al. 2010). Besonders interessant ist es in diesem Fall, das Erscheinen einzelner Arten (z.B. Daphnien) zu verfolgen (Winder et al. 2001; Kamenik et al. 2007). Es ist anzunehmen, dass sich mögliche Veränderungen der Verbreitungsraten einzelner Zooplanktongruppen auf die gesamte Gemeinschaftszusammensetzung in den Systemen auswirken (Altermatt et al. 2008). Neben direkten Effekten wie Temperaturerhöhung müssen auch indirekte Effekte, z.B. höhere Frequentierung der Regionen / Seen durch Wanderer, freilaufende Tiere etc. berücksichtigt werden (Waterkeyn et al. 2010). Zusätzlich können auch lokale Faktoren wie hydrologische Veränderungen durch den Gletscherschwund, höhere Schmelzraten, Eutrophierung der Seen, Fischbesatz und ähnliches eine Rolle spielen (Latta et al. 2007).

Modul 8 untersucht die Abundanz, Diversität und Gemeinschaftszusammensetzung des Zooplanktons in insgesamt 18 Seen (sechs pro Tal) aufgenommen. Am Fuße des Schlattenkees (Innergschlöß) bildet sich im Zuge des Rückgangs des Gletschers ein neuer See, den wir bei unseren Geländearbeiten mit beobachten. Die Ziele der Seen-Untersuchungen sind:

1. Die Analyse der planktischen Metazoen-Gemeinschaften (Rotatoria, Cladocera, Copepoda) von sechs Seen pro Tal (Obersulzbachtal, Innerschlöß, Seebachtal), insbes. der Zusammenhang zwischen abiotischen Faktoren und der Artenzusammensetzung. Die ausgewählten Seen liegen entlang eines Höhengradienten. Die taxonomische Einordnung der Organismen erfolgt mittels mikroskopischer und molekularbiologischer Methoden.
2. Die Veränderung der biotischen und abiotischen Parameter über die Zeit, Identifizierung der ursächlichen Faktoren für die Gemeinschaftsveränderung.
3. Beurteilung der Relevanz von Metagemeinschafts- und Metapopulationsdynamiken für die Zusammensetzung der gesamten planktischen Gemeinschaften.

Die untersuchten Seen erfüllen die bereits 2017 festgelegten Kriterien (Lage entlang eines Höhengradienten, gute Erreichbarkeit, erwartete permanente Wasserführung über viele Jahre, Möglichkeit der Messung abiotischer Faktoren, der Beprobung und der Installation von Dataloggern und möglichst größte Nähe zu den Untersuchungsgebieten der anderen projektbeteiligten Gruppen). Die einzelnen Seen unterscheiden sich in einigen hydrologischen, biotischen und abiotischen Parametern (unterschiedliche Höhenstufen, unterschiedliche Ufer- bzw. Untergrundstrukturen, unterschiedliche Flächen, unterschiedliche maximale Wassertiefe und unterschiedliche anthropogen oder landwirtschaftlich bedingte Einflüsse und Ausdehnung ihres Einzugsgebietes).

Tal	See	Höhe (m)	Breitengrad	Längengrad
Obersulzbachtal	Seebachsee	2083	47°10'53"99"N	12°13'43"04"E
	Kleiner Seebachsee	2083	47°10'48"55"N	12°13'34"97"E
	Foißkarsee	2132	47°10'24"50"N	12°14'31"69"E
	Sulzbachsee	2193	47° 7'6"62"N	12°17'40"15"E
	„Untervorderjaidbachsee“	2274	47° 9'10"74"N	12°14'28"15"E
	„Obervorderjaidbachsee“	2412	47° 8'37"00"N	12°14'9"87"E
Innerschlöß	Salzbodensee	2138	47° 6'55"85"N	12°25'33"29"E
	„Innerschlöß See 2“ (Eisseele)	2550	47° 7'25"88"N	12°23'52"89"E
	„Innerschlöß See 3 (in Loche, Prager Hütte 2)“	2520	47° 7'17"69"N	12°23'51"78"E
	„Gletscherplateau (NPH 3)“	2235	47° 6'58"73"N	12°24'46"63"E
	Löbensee	2226	47° 6'23"34"N	12°28'36"87"E
	„See nahe Löbensee“	2233	47° 6'13"80"N	12°28'41"38"E
Seebachtal	Grüneckersee	2307	47° 2'8"11"N	13°10'32"19"E
	Kl. Tauernsee	2310	47° 2'24"38"N	13°10'55"48"E
	„See oberh. Mindener Hütte (Schneefeldsee)“	2474	47° 1'43"49"N	13° 9'13"01"E
	„See 2 oberhalb Mindener Hütte (Plattensee)“	2441	47° 1'35"03"N	13° 9'5"46"E
	„Kleines Elend“	2609	47° 2'30"86"N	13°15'22"46"E
	„Großes Elend“	2510	47° 2'22"33"N	13°15'9"10"E

Tab. 1: Liste der im Rahmen des Moduls „hochalpine Seen“ seit 2017 (bis einschl. 2025) untersuchten Seen.

Ogleich in allen bereits vorliegenden Berichten Fotos aller untersuchten Seen aufgeführt sind, präsentieren wir sie hier zum Zwecke der besseren Visualisierung auch wieder.



Abbildung 1: Seebachsee, Obersulzbachtal



Abbildung 2: Kleiner Seebachsee, Obersulzbachtal



Abbildung 3: Foißkarsee, Obersulzbachtal



Abbildung 4: „Obervorderjaidbachsee“, Obersulzbachtal



Abbildung 5: „Untervorderjaidbachsee“, Obersulzbachtal



Abbildung 6: Sulzbachsee, Obersulzbachtal



Abbildung 7: Salzbodensee, Innerschlöß



Abbildung 8: „Innerschlöß See 2“ (Eisseele), Innerschlöß



Abbildung 9: „Innerschlöß See 3 (in Loche, Prager Hütte 2)“



Abbildung 10: Löbbensee, Innerschlöß



Abbildung 11: „Gletscherplateau (NPH 3)“, Innerschlöß



Abbildung 12: „See nahe Löbbensee“, Innerschlöß



Abbildung 13: Grüneckersee, Seebachtal



Abbildung 14: Kl. Tauernsee, Seebachtal



Abbildung 15: „See oberhalb Mindener Hütte (Schneefeldsee)“, Seebachtal



Abbildung 16: „See 2 oberhalb Mindener Hütte (Plattensee)“, Seebachtal



Abbildung 17: „Kleines Elend“, Seebachtal



Abbildung 18: „Großes Elend“, Seebachtal

1.2 Methoden

Geländearbeit: Die Geländearbeit wird von Feldteams übernommen, die immer aus einer Mischung aus gut eingearbeiteten Personen und regelmäßig neu hinzukommenden Studierenden der Uni Salzburg bestehen. Die Untersuchungssysteme werden zu Fuß erreicht, die komplette Ausrüstung wird in Rucksäcken transportiert. Um Kontaminierungen der Seen untereinander zu vermeiden, bzw. dem natürlichen Prozess der Verbreitung der Organismen zu folgen, wird von „oben nach unten“ (also beginnend mit der jeweilig höheren Höhenstufe) die Beprobung durchgeführt. Außerdem wird nach jeder Probenentnahme das gesamte Equipment (inkl. der Wanderstiefel und Hände des Teams) mit filtriertem Wasser und einer niedrig konzentrierten Chlorlösung gereinigt. Die Größe der jeweiligen Seen wurde mit einer Kombination aus Kartenmaterial (z.B. aus GoogleMaps oder relevanten GIS-Programmen, s. auch Veits 2015) und der im Jahr 2017 durchgeführten Längen- und Breitenmessung ermittelt. Die Wasserproben werden an oder nahe der tiefsten Stelle des jeweiligen Sees entnommen (je nach Größe und Lage der Seen bzw. vorhandener Infrastruktur vom Ufer aus, per Schlauchboot oder z.B. mit dem Boot der Bergrettung am Sulzsee).

Bei jeder Beprobung wird in derselben Reihenfolge vorgegangen:

1. Ggf. Beladen des Bootes, 2. (Hinausrudern und) Ausbringen (bzw. Auffinden und Auslesen) der Datalogger (s.u.), 3. Bestimmen der tiefsten Stelle des Sees (mithilfe eines transportablen Echolots), 4. Durchführung der Messung der abiotischen Faktoren (Multisonde, s.u.), 5. Entnahme der Gesamtwasserprobe(n) (Wasserschöpfer, s.u.), 6. Entnahme der Zooplanktonproben (Planktonnetz, s.u., sofortige chemische Fixierung, s.u.).

Die Datenaufnahme inkl. allfälliger Beobachtungen werden in Standardprotokollen festgehalten und durch mehrfach redundante Datenspeicherung und diverse Kontrollmechanismen (Feldbuch, digitale Medien, abendliche Übertragung der Daten auf Computer, Datencheck auf Plausibilität während der Aufnahme, etc.) gesichert.

Im Sommer 2025 wurden die Geländekampagnen zu folgenden Terminen durchgeführt:

Obersulzbachtal 30.7-1.8.25

Innerschlöß 05.08-07.08.25

Seebachtal 18.8- 20.8.25

Messung der abiotischen Faktoren: der Wassertemperatur wird mit zwei in jedem See installierten Dataloggern (tempmate.®-B2) durchgeführt, die in 6-stündigen Intervallen die Daten aufzeichnen und so die Langzeitentwicklung sowie tageszeitliche und saisonale Temperaturunterschiede festhalten. Die Logger werden während der Probennahme entnommen, elektronisch ausgelesen und wieder eingesetzt bzw. ausgetauscht oder ersetzt (bei Verlust).



Mit einer Multisonde (EXO2 YSI, Abb. 23) werden die relevanten Wasserparameter über die vertikale Ausdehnung der Wassersäule (bis max. 15 m Tiefe) ermittelt: Wassertemperatur (°C), Luftdruck (mm Hg), gelöster Sauerstoff (% Sättigung), spezifische Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH, Nitratgehalt (mg/l), Trübheit (FNU), Phycocyanin der Blau-Grünen Algen (relative Fluoreszenzeinheiten und $\mu\text{g}/\text{l}$) und Chlorophyll a Konzentration (relative Fluoreszenzeinheiten und $\mu\text{g}/\text{l}$). Die 2022 begonnene Analys von Gesamtphosphor (TP) wurde fortgesetzt (spektrophotometrische Standardmethode nach EPA 365.3).

Probenentnahme: Mit einem Planktonnetz (30 μm Maschenweite und 29 cm Durchmesser der Öffnung) wird das Metazooplankton entnommen, je nach Tiefe des Sees und erwarteter Abundanz der Organismen aus unterschiedlichen Wasservolumina (200 bis 2000 Liter). Die Organismen werden konzentriert, zu einer einzigen Probe (pro See) kombiniert und noch im Gelände in Succrose-Formol (Endkonzentration ca. 5%) fixiert. Routinemäßig werden mit dem Netz Vertikalproben entnommen, nur in sehr flachen Seen, in denen dies nicht möglich ist, wurde horizontal beprobt.

Auswertung der Zooplankton-Proben: Für die taxonomische Bestimmung der Organismen wurden die Zooplanktonproben in eine Zooplankton-Zählkammer überführt und mit einem Olympus SZX9 Stereomikroskop bzw. einem Nikon Eclipse E800 Mikroskop und einer DS Ri1 Kamera ausgewertet (Koste 1978, Pontin 1978, Einsle 1993, Jersabek 1996, Gaviria 1998, Flößner 2000, Jersabek et al. 2001, Gaviria-Melo et al. 2005).

Datenanalyse: Ziel der Datenanalyse ist es, aus allen erhobenen Daten vergleichende Zeitreihen zu erstellen, die mittlerweile die Periode 2017 – 2025 umfassen. Es sollen einerseits die möglichen Veränderungen in jedem See aufgezeigt werden, gleichzeitig aber auch Unterschiede (oder Ähnlichkeiten) zwischen den Seen dokumentiert werden. Ultimativ sollen auf dieser Basis perspektivische Vorhersagen für die Entwicklung der Ökosysteme erstellt werden. In diese Datenanalyse fließen die Zooplankton-Daten ein, sowie die Temperaturdaten aus den Dataloggern und die bei den Probenentnahmen mit der Multisonde gemessenen abiotischen Parameter.

Alle erhobenen Daten werden mit statistischen Methoden (z.B. multivariate Analysen, lineare und generalisierte lineare Modelle, bei Mehrfachmessungen pro See auch gemischte Modelle) ausgewertet, um mögliche Korrelationen zwischen einzelnen Faktoren auf unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Skalen herauszustellen.

2 Ergebnisse

2.1 Temperatur

Mithilfe des Datenloggereinsatz soll die langfristige Temperaturentwicklung der untersuchten Seen dokumentiert werden. Die auch in den vergangenen 8 Jahren beobachteten beginnenden Trends in der Temperaturentwicklung setzen sich auch im 9. Jahr fort. Zwischen den Seen aber auch im zeitlichen Ablauf individueller Seen werden Unterschiede hinsichtlich Temperaturmaxima, Temperaturamplitude und Steilheit des Temperaturanstiegs im (Früh-) Sommer bzw. des Temperaturabfalls im Herbst / Winter, sowie Einsetzen der Eisbedeckung und der Anfang der eisfreien Zeit („ice-out“) sichtbar.

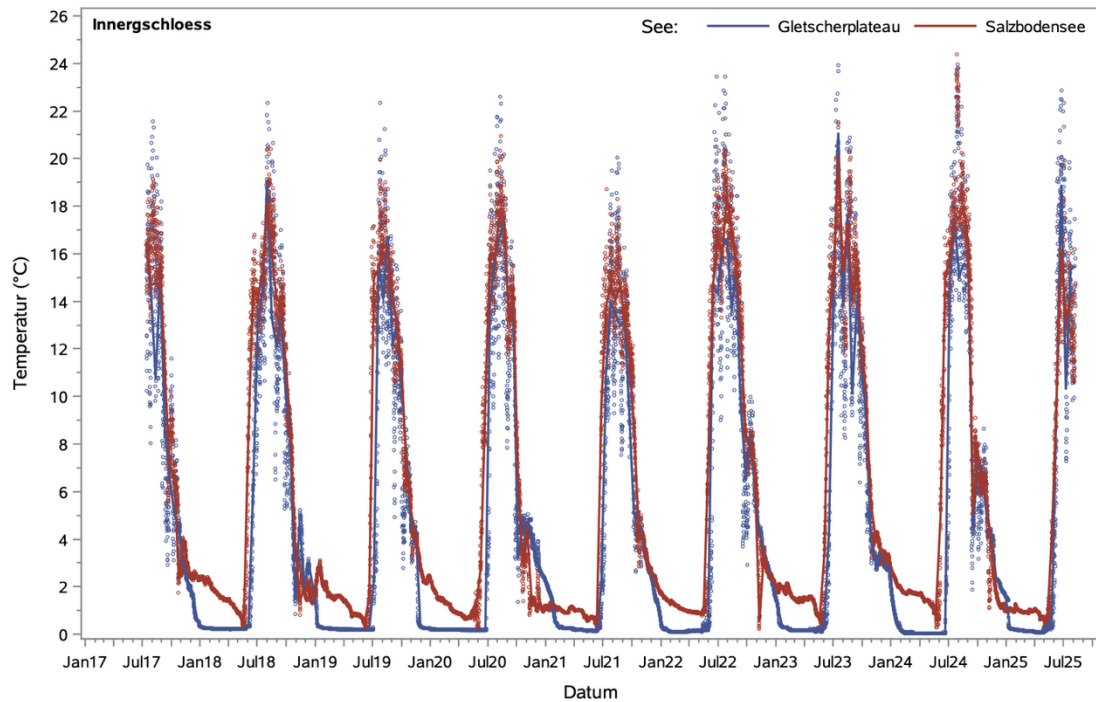


Abbildung 19: Wassertemperatur (°C, in ca. 0,4 m Wassertiefe, kontinuierlich gemessen mit Temperatur-Dataloggern in 6-Stunden Intervallen) Gletscherplateau (blau) und Salzbodensee (rot) des Innergshloß. Die Datenpunkte sind Mittelwerte der Aufzeichnungen von zwei Loggern pro See. Linien sind Loess-Fits der Daten. Temperaturen <2°C sind Zeiger einer umgekehrten Schichtung und somit einer Eisschicht auf dem See. Temperaturen von 0°C zeigen, dass die Logger im See eingefroren waren.

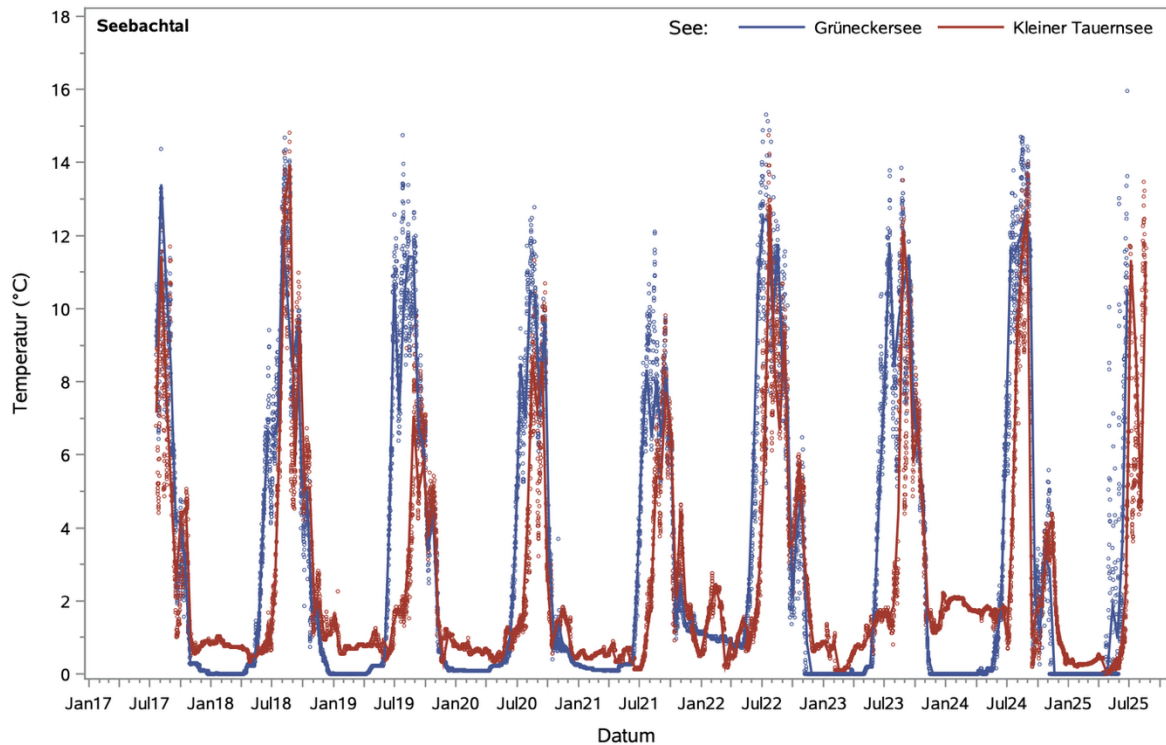


Abbildung 20: Wassertemperatur (°C, in ca. 0,4 m Wassertiefe, kontinuierlich gemessen mit Temperatur-Dataloggern in 6-Stunden Intervallen) im Grüneckersee (blau) und Kleiner Tauernsee (rot) des Seebachtal. Die Datenpunkte sind Mittelwerte der Aufzeichnungen von zwei Loggern pro See. Linien sind Loess-Fits der Daten. Temperaturen <2°C sind Zeiger einer umgekehrten Schichtung und somit einer Eisschicht auf dem See. Temperaturen von 0°C zeigen, dass die Logger im See eingefroren waren.

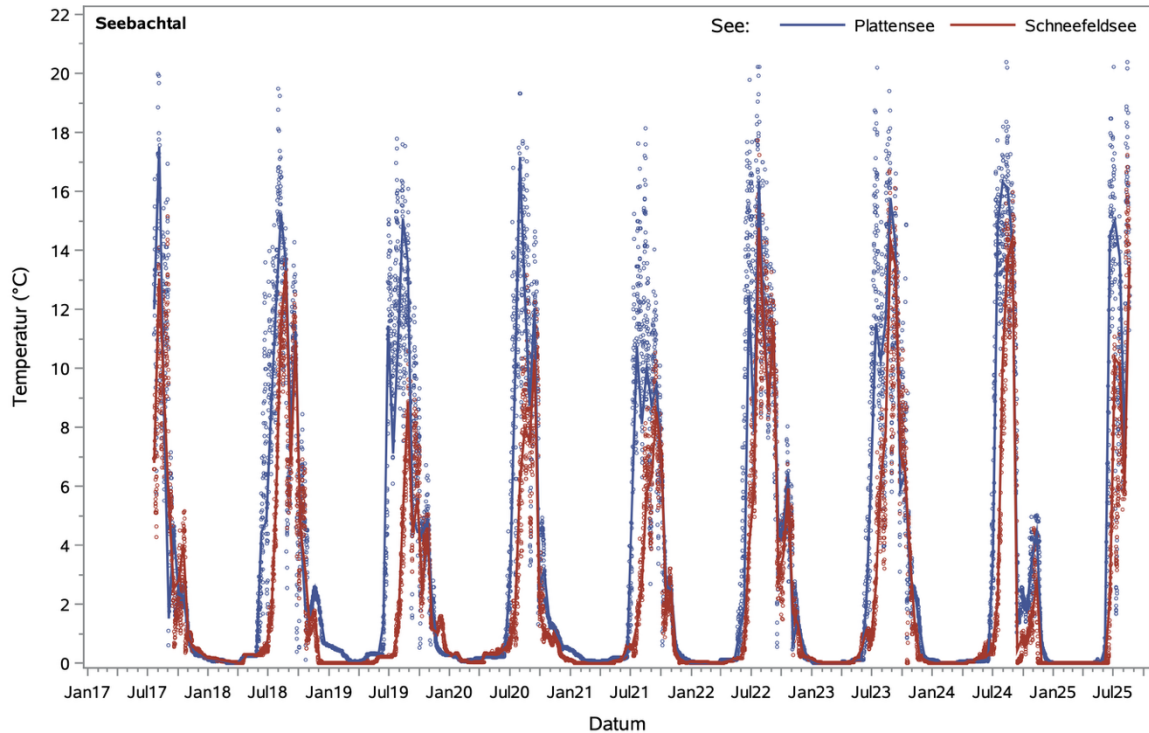


Abbildung 21: Wassertemperatur (°C, in ca. 0,4 m Wassertiefe, kontinuierlich gemessen mit Temperatur-Dataloggern in 6-Stunden Intervallen) im Plattensee (blau) und Schneefeldsee (rot) des Seebachtal. Die Datenpunkte sind Mittelwerte der Aufzeichnungen von zwei Loggern pro See. Linien sind Loess-Fits der Daten. Temperaturen <2°C sind Zeiger einer umgekehrten Schichtung und somit einer Eisschicht auf dem See. Temperaturen von 0°C zeigen, dass die Logger im See eingefroren waren

Die wichtigsten Informationen, die aus der Temperaturaufzeichnung gezogen werden können, betreffen die Höchsttemperatur der Seen und die genaue Periode und Dauer der Eisbedeckung. Dies sind z.B. Parameter, die für die Klimafolgenforschung relevant sind, und die das Potenzial haben, nicht nur die Ökosysteme als solche, sondern insbesondere die in ihnen vorkommenden (bzw. lebens- und fortpflanzungsfähigen) Organismen betreffen. Bemerkenswert ist seit Beginn unserer Aufzeichnungen, dass die Maximaltemperaturen sehr hoch sind (teilweise bis zu über 20°C), und dass sowohl der Temperaturanstieg im Frühsommer sowie der Abfall im Herbst sehr steil verlaufen.

Wie auch in den vergangenen Jahren bereits beobachtet, spielt das sog. "Mikroklima" der einzelnen Seen eine große Rolle. Dies kann man an den Unterschieden zwischen geografisch nah beieinander liegenden Seen gut illustrieren: der größere und tiefere Grüneckersee weist einen früheren Beginn der eisfreien Zeit auf als der – sehr nahe gelegene – Kleine Tauernsee, der große, tiefe Schneefeldsee zeichnet sich durch eine größere Temperaturvariabilität zwischen unterschiedlichen Jahren aus als der viel kleinere Plattensee. Eigentlich würde man in größeren und tieferen Seen ein späteres Abschmelzen der Eisdecke und weniger Schwankungsbreite als in den kleineren Seen erwarten. Herauszuheben ist ebenfalls, dass in einigen Seen die maximale Temperatur im Sommer nunmehr über 24°C liegt, Werte, die man nicht von hochalpinen Regionen erwarten würde.

Die in der Sommerkampagne 2025 hinzugekommenen Daten bestärken zwei Trends (höhere Maximaltemperaturen, und früherer Zeitpunkt des "ice-out"), die sich seit längerem herauskristallisieren: die maximale Wassertemperatur während der eisfreien Zeit ist seit Beginn unserer Aufzeichnungen um 0,15°C/J ($P < 0,001$) angestiegen, und der Beginn der eisfreien Zeit erfolgt im Schnitt mittlerweile 2,1 T/J früher (beide Trends sind für höhenbedingte Unterschiede korrigiert). Sie lassen die Schlussfolgerung zu, dass die Wachstumsperioden in den alpinen Seen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten länger und intensive werden.

2.2 Multisondenmessungen (am Beispiel von Chlorophyll α -Konzentration)

Mittels der Multisonde werden Tiefenprofile diverser Parameter (s.o.) aufgenommen. Von besonderem Interesse für uns ist hier die Konzentration von Chlorophyll α , da dieser Massenparameter potenziell Auskunft über

Nährstoffverfügbarkeit, Algenvorkommen und ggf. auch (indirekt) Nahrungsbeziehungen geben kann. Auffallend ist, dass die Chlorophyll-Konzentrationen nicht durchgehend niedrig sind (wie man es bei nährstoffarmen Seen weitab von menschlichen Siedlungen erwartet), und dass in einigen Seen (bzw. in einigen Jahren) sog. "Tiefenchlorophyll-Maxima" vorkommen. Die Messungen wurden in vertikalen 1 m Intervallen an der tiefsten Stelle des Sees durchgeführt, entsprechend gibt jeder Datenpunkt den über 1 m integrierten Mittelwert (+/- SD) wieder. Die y-Achse zeigt die maximale Tiefe des Sees an, wobei darauf geachtet wurde, dass der Sondenkopf das Seesediment nicht berührte. Die folgenden Grafiken enthalten Daten aller bisherigen Untersuchungsjahre (2017-2025).

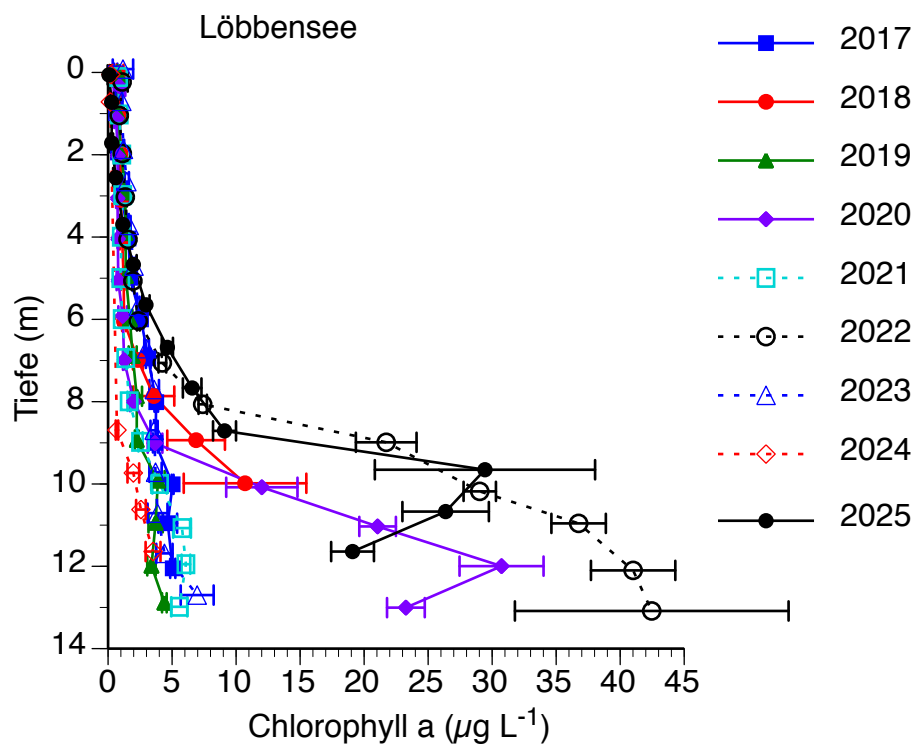


Abbildung 22: Vertikalprofile von Chlorophyll *a*-Konzentration ($\mu\text{g L}^{-1}$) in der Wassersäule des Löbensees, Innergschloß. Die y-Achse gibt die Gewässertiefe wieder. Die Ergebnisse der Messungen aus den sechs Jahren (2017 bis 2025, jeweils Juli/August) sind nebeneinander aufgeführt. Im Jahr 2018 musste die Messung des Profils wegen eines Schlechtwettereinbruchs abgekürzt werden.

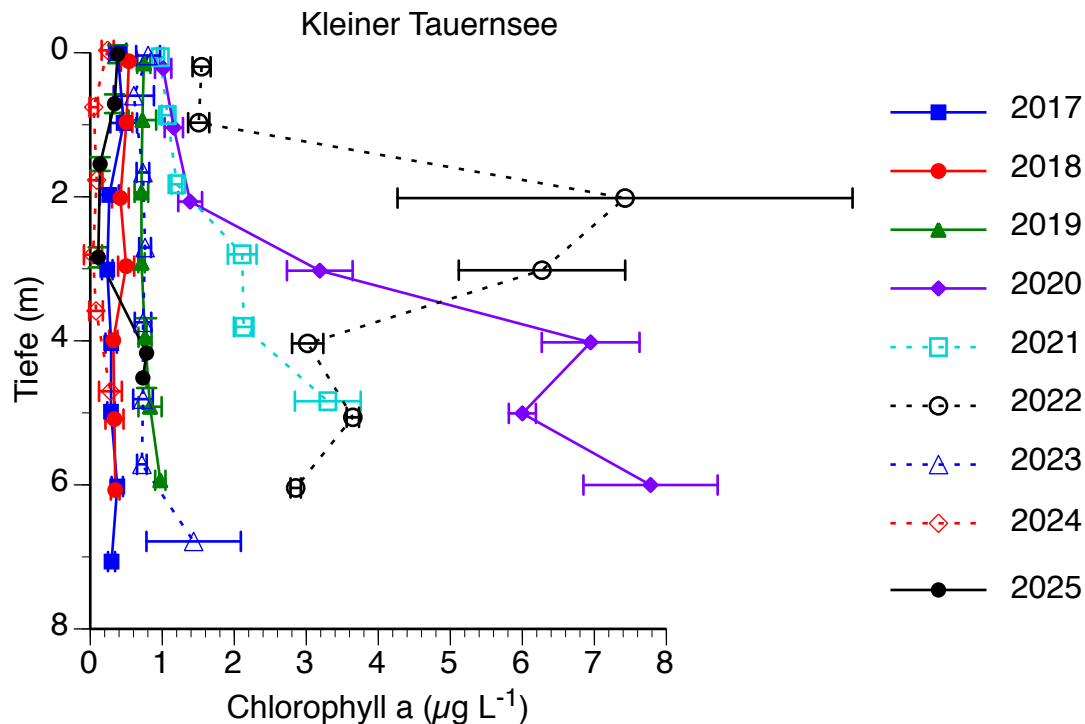


Abbildung 23: Vertikalprofile von Chlorophyll *a*-Konzentration ($\mu\text{g L}^{-1}$) in der Wassersäule des Löbensees, Innertschlöß. Die y-Achse gibt die Gewässertiefe wieder. Die Ergebnisse der Messungen aus den sechs Jahren (2017 bis 2025, jeweils Juli/August) sind nebeneinander aufgeführt. Im Jahr 2018 musste die Messung des Profils wegen eines Schlechtwettereinbruchs abgekürzt werden.

Die Daten beider hier präsentierten Seen zeigen die jährliche Variabilität eindrucksvoll. In beiden Seen (und auch den anderen Untersuchungsstandorten) sind die Chlorophyll-Konzentration im oberflächennahen Epilimnion gering, also typisch für hochalpine Seen. Allerdings zeigen beide Systeme in einigen Jahren deutlich ausgeprägte "Tiefenchlorophyllmaxima" (TCM), allerdings nicht immer in den selben Jahren. So wies der Löbensee im Jahr 2025 ein intensives TCM auf, im Tauernsee wurde dies aber nur 2020 und 2022 beobachtet. Wir haben bisher noch keine Erklärung dafür, wie diese starke inter-annuelle Variabilität begründet ist. Auch ist noch unklar, woher die für die Ausprägung eines TCM erforderlichen hohen Nährstoffkonzentrationen stammen.

2.3 Zooplankton

Die Analyse des Zooplanktons hat mehrere Komponenten. Aufgrund der taxonomischen Zusammensetzung der jeweiligen Gemeinschaften sowie dem quantitativen Vorkommen (tw. umgerechnet in Biomasse) können wir innerhalb eines Sees über die Jahre verfolgen, ob einzelne Arten verschwinden oder einwandern. Im Vergleich aller Seen untereinander können wir sehen, ob die Gemeinschaften über die Zeit unterschiedlicher werden oder sich sukzessive angleichen. Diese Analysen erfolgen über die Erstellung sog. "heat-maps" sowie der Berechnung der Beta-Diversität im Vergleich aller Seen. Die hier gezeigten Daten schließen nur Organismen ein, die tatsächlich mit einem Planktonnetz der Maschenweite $30\ \mu\text{m}$ gefangen werden konnten. Zur Quantifizierung und taxonomischen Einordnung kleinerer planktischer Organismen (z.B. Ciliaten) müssten andere Methoden herangezogen werden.

Der erste Punkt (Einwanderung neuer Arten in die bestehende Gemeinschaft) wird im Gletscherplateausee deutlich. Um die - stark variierenden - Abundanzen optisch auf den Grafiken vergleichen zu können, wurde eine logarithmische Darstellungsweise gewählt.

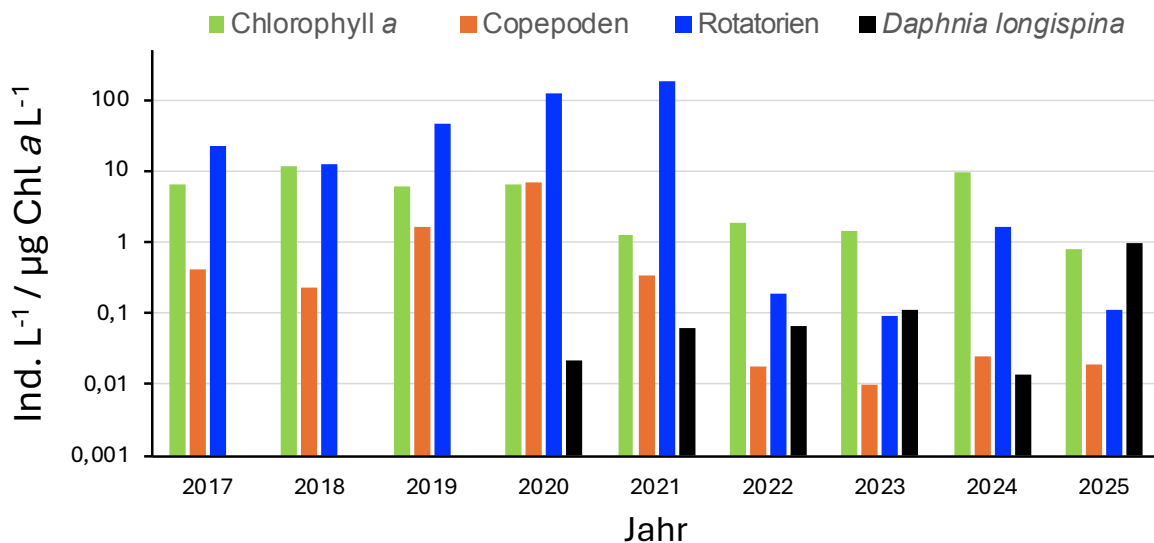


Abbildung 24: Abundanzen (log Individuen L⁻¹) der Zooplanktongemeinschaft sowie ein Maß für die verfügbare Nahrung (Chlorophyll *a* als Massenparameter) des Gletscherplateausees im Innerschlöß. Die Zahlen geben die Werte aus allen bisherigen Untersuchungsjahren (2017 bis 2025) wieder. Die Standardabweichungen wurden nicht mit aufgeführt. x-Achsenkategorie: Jahr. Symbolerklärung: grüne Balken: Chlorophyll *a*, rot: Copepoden, blau: Rotatorien, schwarz: *Daphnia longispina*.

Bereits in vorangegangenen Berichten wurde thematisiert, dass im Jahr 2020 erstmalig die Cladoceren-Art *Daphnia longispina* beobachtet wurde. Mit der Ausnahme des Jahres 2024 steigen die Populationsdichten deutlich an und andere Komponenten der Lebensgemeinschaften zeigen eine Reaktion darauf: Die Abundanzen der Rotatorien (Konkurrenten um ähnliche Nahrungsquellen) fallen über denselben Zeitraum ab (100 Ind/L im Jahr der *Daphnia*-Einwanderung, und nur noch ca. 0,1 Ind/L im Jahr 2025, also eine 1000x-fache Reduktion). Die Algenbiomasse verringert sich über denselben Zeitraum weniger deutlich (ca. 10 µg Chl/L vor der Einwanderung von *Daphnia*, und <1 µg/L im Jahr 2025). Eine neue Beobachtung im Jahr 2025 betraf die Artenzusammensetzung der Rotatoriengemeinschaft: wir verzeichnen ein komplettes Verschwinden der vorher dominanten Art *Polyarthra dolichoptera*. Dies ist ein Hinweis darauf, dass wärmere Temperaturen und längere eisfreie Perioden zu einer Veränderung der Zooplankton-Gemeinschaft führen können, indem Arten, die an moderatere Umweltbedingungen angepasst sind, in wärmer werdende Seen einwandern. Allerdings ist der Gletscherplateausee das einzige Gewässer, in dem dieser Effekt bisher gezeigt werden kann. Wir erwarten ähnliche Veränderung in den anderen Seen, allerdings müssen hierzu auch artspezifische Anpassungen und Interaktionen (wie Konkurrenz) berücksichtigt werden.

Die Gesamtunterschiede (bzw. Ähnlichkeit) der (Zooplankton-) Lebensgemeinschaften in den 18 Seen verfolgen wir seit dem ersten Jahr der Untersuchungen. Bisher haben wir die erhobenen Daten mittels sog. "Jaccard eat maps" dargestellt. Der Jaccard Index gibt die Proportion der Arten an, die in den unterschiedlichen Seen zu finden sind, und die Gemeinschaften können paarweise miteinander verglichen werden. Damit geht diese Art der Analyse über unspezifische Anzahlen von Arten oder allgemeine Diversitäts-Indizes hinaus. Damit kann man Informationen dazu bekommen, ob sich z.B. die Gemeinschaften nahe beieinander liegenden Seen mehr ähneln als die von weiter voneinander entfernten Lebensräumen. Wenn man die Artenzusammensetzungen der Seen über unterschiedliche Perioden hinweg vergleicht, lässt dies z.B. Rückschlüsse auf Wanderungen (oder andere Eintragsmechanismen) zu. Die damit verbundene Frage ist, gleichen sich die Gemeinschaften unterschiedlicher Seen sukzessive an, oder werden sie (durch Auswanderungen oder Absterben) unterschiedlicher.

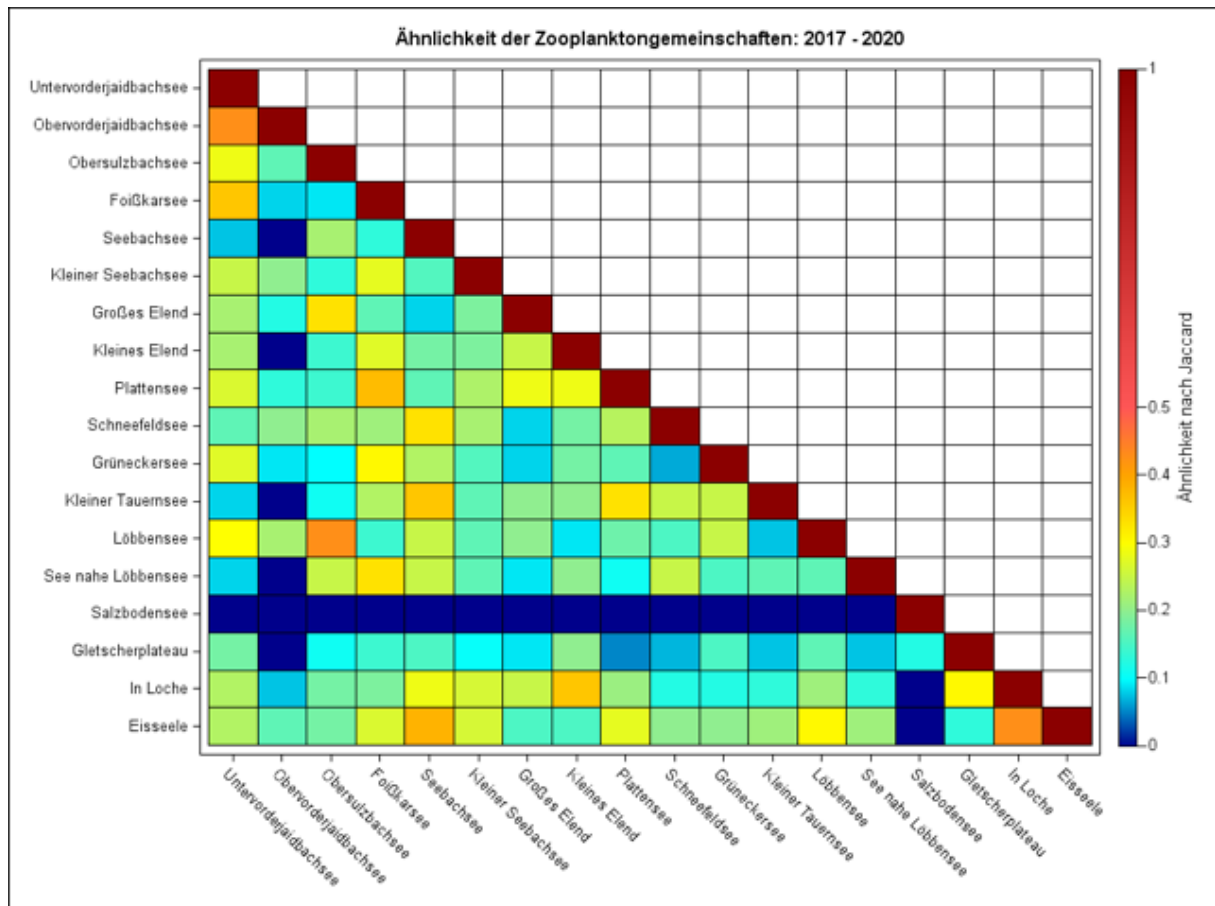


Abbildung 25: Jaccard Index zur Verdeutlichung der Ähnlichkeit bzw. der Unterschiede in der Artenzusammensetzung des Zooplanktons der beprobten Seen für die ersten vier Jahre der Messungen. Alle Seen sind sowohl auf der x- als auch auf der y-Achse aufgeführt und werden paarweise miteinander verglichen. Die Namen der Seen des Innerschloß sind kursiv geschrieben, die des Obersulzbachtals im Fettdruck, die des Seebachtals in normaler Formatierung. Die Diagonale der roten Quadrate impliziert 100% gemeinsame Arten, der Farbgradient von rot über orange, gelb, grün und türkis ist ein Maß für die geringer werdende Überlappung. Blaue Quadrate besagen, dass die beiden verglichenen Seen überhaupt keine gemeinsamen Arten aufweisen. Hier Daten vor 2021 (aus den Jahren 2017 – 2020)

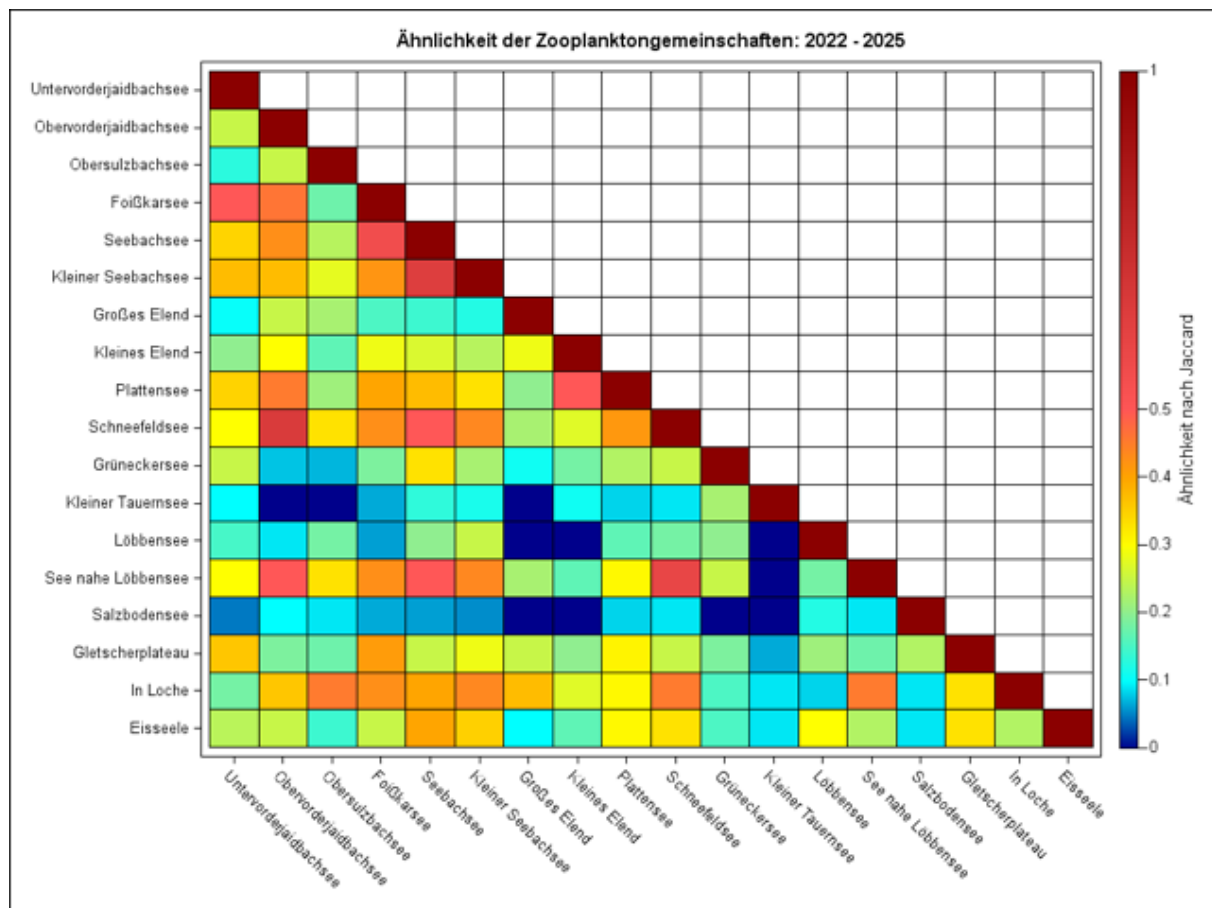


Abbildung 26: Jaccard Index zur Verdeutlichung der Ähnlichkeit bzw. der Unterschiede in der Artenzusammensetzung des Zooplanktons der beprobten Seen für die letzten vier Untersuchungsjahre (2021 – 2025). Die Darstellung der Daten entspricht der Abb. 25. Die wärmeren Farben im Vergleich mit den Daten aus der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraums machen klar, dass die Zooplankton-Gemeinschaften der Seen ähnlicher geworden sind.

Für die Abb. 25 und 26 wurden die Seen in zwei, jeweils 4 Jahre umfassende, aber unterschiedliche Intervalle Gruppen eingeteilt. Abb. 25 zeigt die Ähnlichkeiten / Unterschiede zwischen den 18 Seen in der ersten Phase des Monitorings (2017 bis 2020, Abbildung 26 dann in der späteren Phase (2022-2025). Beim Vergleich dieser beiden "heatmaps" wird deutlich, dass es zu Beginn unseres Erhebungszeitraums bemerkenswert wenig Überlappung der Gemeinschaften gegeben hat, diese Unterschiede sich aber mit der Zeit mehr und mehr verwischen und die Zooplanktongemeinschaften sukzessive ähnlicher werden. Am deutlichsten kann man dies am Beispiel des Salzbodensees aufzeigen. In den Anfängen des Monitorings wiesen sie keinerlei taxonomische Überlappung mit den anderen Seen auf, über die letzten 4 Jahre sind aber offensichtlich Rotatorien-Arten aus anderen Seen in den Salzbodensee eingewandert, wenn auch in geringen Abundanzen.

Eine andere Analyse- bzw. Darstellungsart der Unterschiede bzw. Ähnlichkeiten der Gemeinschaften in den untersuchten Seen über die Jahre ist die Berechnung der Beta-Diversität bzw. des Artenreichtums (species richness):

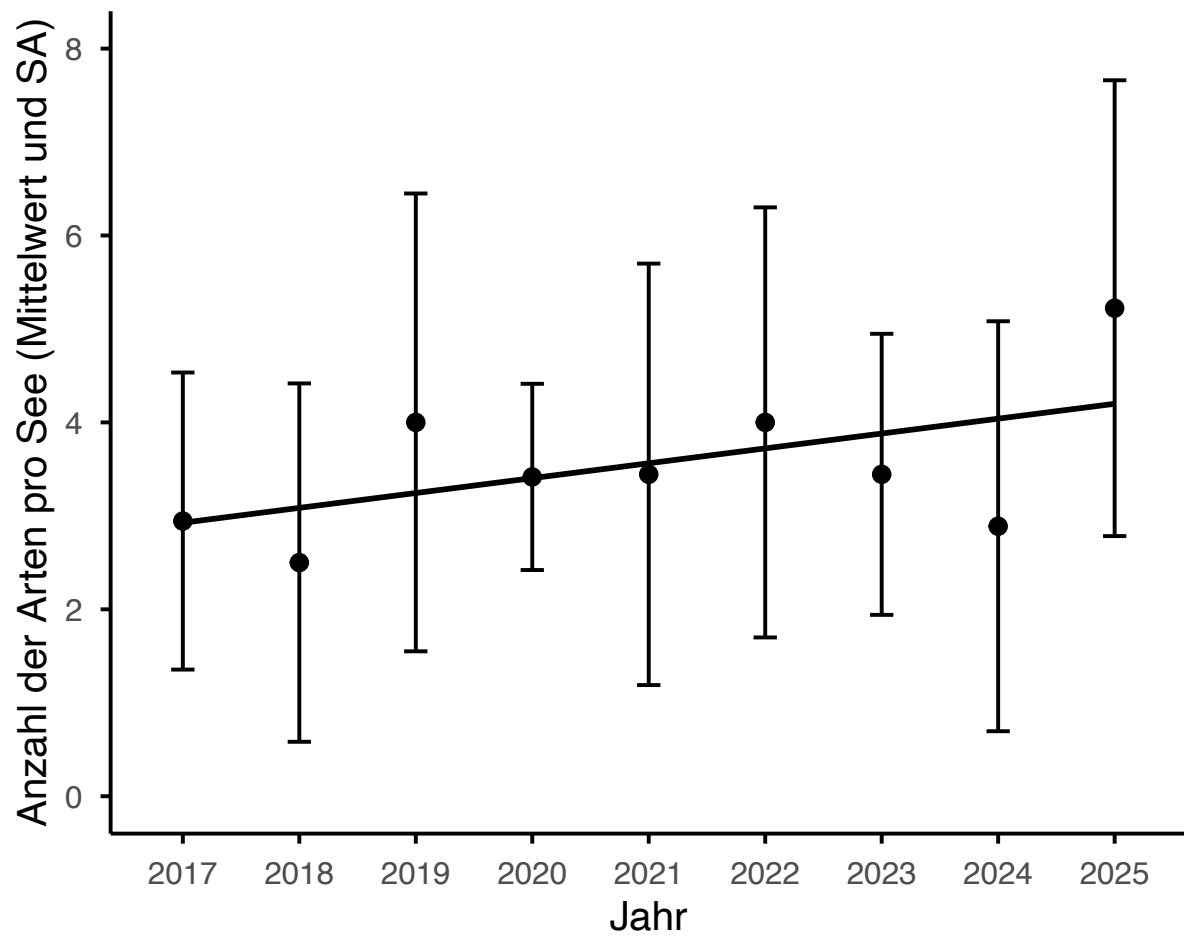


Abbildung 27: Anzahl der Zooplankton-Arten („species richness“ pro See über die gesamte Periode des Monitorings (2017-2025) hinweg. Die Analyse schließt alle 18 untersuchten Seen ein.

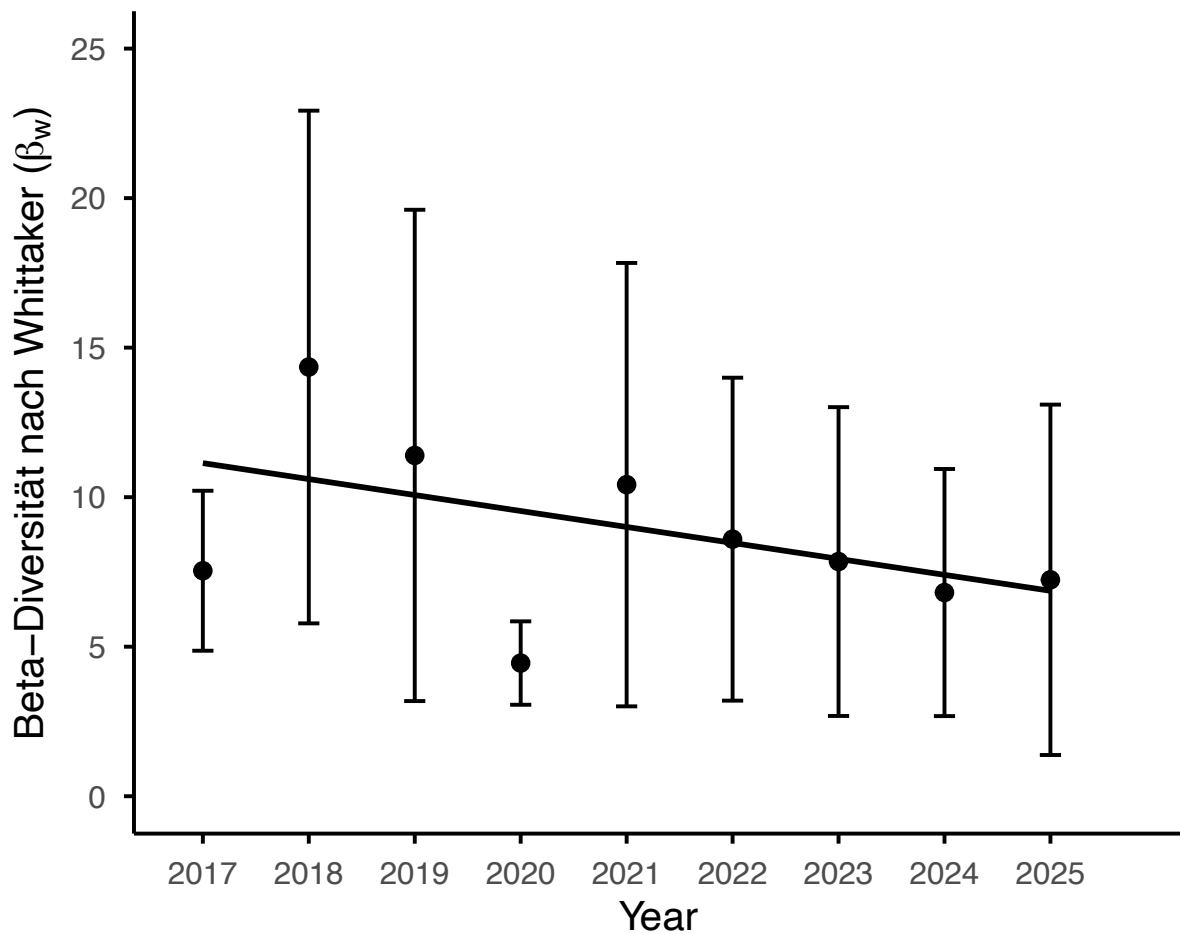


Abbildung 28: Beta-Diversity nach Whittaker („dissimilarity index“) des Zooplanktons in den 18 untersuchten Seen über die gesamte Dauer des Monitorings (2017 bis 2025) hinweg.

Die Beta-Diversität kann als Spiegelbild der Unterschiede im Artenreichtum der Seen bzw. der in den heatmaps dargestellten Daten betrachtet werden. Die Zooplankton-Gemeinschaften der Seen werden „weniger ähnlich“ (abfallende Beta-Diversität), mit einem statistisch signifikanten linearen Trend ($P = 0.0016$). Dies ist gekoppelt an einen Anstieg des Artenreichtums (ansteigende „species richness“, $0,16$ Arten/J, $P = 0,0022$). Anders ausgedrückt vergrößern die aus einem gemeinsamen Pool kommenden Arten ihre Verbreitung. Allerdings steigt die absolute Artenanzahl nur sehr gering, die Gamma-Diversität (Daten hier nicht gezeigt) verändert sich im selben Zeitraum nur unwesentlich. Dies zeigt sich auch an der bereits oben angesprochenen Beobachtung, indem das Vorkommen von *Daphnia longispina* im Gletscherplateausee bisher das einzige Beispiel für ein Einwandern einer Art aus einem anderen See (Salzbodensee) und damit einer qualitativen Veränderung der Zooplanktongemeinschaft ist.



3 Diskussion und Ausblick

3.1 Relevanz der bisher ermittelten Daten

Nach nunmehr 9 lückenlosen Jahren der Datenaufnahme kann konstatiert werden, dass die von uns gewählten Untersuchungssysteme und Methoden dazu geeignet sind, mögliche Klimawandelauswirkungen auf hochalpine Ökosysteme (am Beispiel von Seen) aufzuzeigen. Insbesondere die kontinuierlichen Temperaturaufzeichnungen in den Seen geben deutliche Hinweise darauf, dass die anthropogen verursachten Veränderungen sich auch auf die hochalpinen Ökosysteme auswirken. Die ansteigende maximale Wassertemperatur, das frühere Einsetzen der Eisbedeckung auf den Seen und die länger andauernde eisfreie Zeit sind mittlerweile statistisch nachzuweisen und damit mehr als nur ein „Trend“. Auch die Veränderungen der Zooplankton-Gemeinschaften in den 18 beprobten Seen (insbesondere die ähnlicher werdenden Gemeinschaften und das punktuell beobachtete Einwandern neuer Arten in einen bisher davon unbesiedelten See) weisen auf Veränderungen hin, die höchstwahrscheinlich durch die sukzessive Veränderung der abiotischen Bedingungen in den Seen verursacht werden.

Nichtsdestotrotz stehen wir auch nach 9 Jahren noch am Anfang unserer Untersuchungen. Es können keine pauschalen Schlussfolgerungen gezogen werden, da z.B. das Mikroklima einzelner Seen teilweise größere Effekte hat als globale Veränderungen. Auch ein Einwandern neuer Arten in höher liegende Seen muss differenziert betrachtet werden, da dies nicht nur aufgrund von abiotischen Bedingungen erfolgt. Grundsätzlich erlauben zwar wärmer werdende Seen das Einwandern von Arten, die mit sehr niedrigen Temperaturen nicht zurechtkommen würden, die tatsächlichen Veränderungen innerhalb einer Gemeinschaft haben aber neben den physiologischen Voraussetzungen einzelner Arten auch sehr viel mit biotischen Interaktionen innerhalb der Gemeinschaften zu tun. So können Konkurrenz oder Räuber-Beute-Beziehungen potenzielle Gemeinschaftsveränderungen verschleiern oder gar verhindern. Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Effekt geht von Menschen oder auch Tieren (Rinder, Schafe) aus, die sich im Umfeld der untersuchten Seen bewegen. Auch durch sie können Organismen verschleppt werden, ebenso können sie zu Veränderungen im Nährstoffhaushalt der Seen führen (durch Eintrag organischer Substanzen)

3.2 Fazit und Ausblick

Das Langzeitmonitoring in den drei Tälern des Nationalparks Hohe Tauern ist ein extrem wichtiger Bestandteil der Erforschung von Klimawandeleffekten auf natürliche Ökosysteme. Je länger es fortgesetzt wird, umso aussagekräftiger werden die ermittelten Daten. Deswegen sollte es ein Anliegen der wissenschaftlichen Gemeinschaft und der Förderinstitutionen sein, die Untersuchungen fortzusetzen. Darüber hinaus ist es notwendig, die Fragestellung in ihrer gesamten Komplexität zu untersuchen, d.h. oben angesprochene Einflüsse des Mikroklimas, der artspezifischen Interaktionen innerhalb von Lebensgemeinschaften und nicht zuletzt den direkten Effekt des Menschen sowie den von Weidetieren im Einflussgebiet mit zu berücksichtigen und in begleitenden Studien zu erforschen. Unsere Studie zeichnet sich durch einen sehr umfassenden Ansatz aus. Vergleichbare Untersuchungen aus der Literatur helfen bei der Interpretation unserer Daten, berücksichtigen aber meist nur einzelne Aspekte, deutlich weniger untersuchte Seen und/oder kürzere Zeitspannen (z.B. Dory et al. 2025; Loria et al. 2020; Obertegger et al. 2025; Stuparyk & Vinebrooke 2024; Tiberti et al. 2025). Dies macht die hier vorliegenden Ergebnisse umso relevanter für die wissenschaftliche Gemeinschaft und die diversen Stakeholder (Körner et al., Wickham et al., 2026, in prep.).

4 Danksagung

Die vorliegenden Ergebnisse unserer Langzeitstudie der hochalpinen Seen profitiert vom großen Engagement vieler Personen und der finanziellen Förderung durch den Nationalpark Hohe Tauern, ergänzt durch die Bereitstellung von Infrastruktur und Personal durch die Universität Salzburg. Unser großer Dank geht an die



Forschungskoordinatorin des NPHT, Angelika Riegler, die durch ihre konstruktive und pragmatische Unterstützung sehr zur Machbarkeit der Studie beiträgt. Wir bedanken uns sehr bei unserem engagierten und sehr kompetenten Geländeteam (Dominik Ankel, Adrian Bauer, Laura Böll, Laura Höfle, Florian Hohenberger, Stefan Lienbacher, Eva Piberger, Samuel Unterberger und Michael Veits). Für logistische Unterstützung und die mikroskopische Auswertung der Zooplankton-Proben danken wir Claudia Mader, im administrativen Bereich haben uns Martina Althammer und Jens Rüdiger sehr hilfreich unterstützt.

5 Literatur- und Quellenverzeichnis

Die vorliegenden Ergebnisse unserer Langzeitstudie der hochalpinen Seen profitiert vom großen Engagement

Altermatt F, Pajunen VI, Ebert D (2008) Climate change affects colonization dynamics in a metacommunity of three *Daphnia* species. *Global Change Biol* 14: 1209-1220

Dory F, Arthaud F, Augé V, Baillot S, Bertrand C, Birck C et al. (2025) Vulnerable but not equal: Mountain lakes exhibit heterogeneous patterns of phytoplankton responses to climate change. *Limnol Oceanogr Letters* 10: 712-723

Einsle, U. (1993) Crustacea: Copepoda: Calanoida und Cyclopoida. Süßwasserfauna von Mitteleuropa. Vol. 8/4-1, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/Jena/New York

(EPA) EPA (1978) Method 365.3: Phosphorus, all forms (colorimetric, ascorbic acid, two reagent). US EPA Washington, DC

Flößner, D (2000) Die Haplopoda und Cladocera Mitteleuropas. Vol., Backhuys Publishers, Leiden.

Gaviria-Melo S, Forró L, Jersabek CD, Schabetsberger R (2005) Checklist and distribution of cladocerans and leptodorans (Crustacea: Branchiopoda) from Austria. *Annalen des Naturhistorischen Museums in Wien Serie B für Botanik und Zoologie*: 145-216

Jersabek CD (1996) Verbreitung, Ökologie und Taxonomie von Rädertieren (Rotifera) in alpinen Gewässern der Hohen Tauern und der nördlichen Kalkalpen. *Ber nat-med Ver Salzburg* 11: 76-145

Jersabek CD, Brancelj A, Stoch F, Schabetsberger R (2001) Distribution and ecology of copepods in mountainous regions of the Eastern Alps. *Hydrobiologia* 453: 309-324

Kamenik C, Szeroczyńska K, Schmidt R (2007) Relationships among recent Alpine Cladocera remains and their environment: implications for climate-change studies. *Hydrobiologia* 594: 33-46

Körner C, Tappeiner U, Newesely C, Wittmann H, Eberl T, Kaiser R, Meyer E, Grube M, Fernández Mendoza F, Füreder L, Niedrist GH, Daim A, Lieb G, Kellerer-Pirklbauer A, Wickham SA, Petermann JS, Berninger UG (2020) Langzeitmonitoring von Ökosystemprozessen im Nationalpark Hohe Tauern, Synthese der Startphase 2016-2018. Matrei i.O., Austria, ISBN-Online: 978-3-7001-8748-6, doi: 10.1553/GCP_LZM_NPHT_Synthese

Körner C, Berninger UG, Daim A, Eberl T, Fernandez Mendoza F, Füreder L, Grube M, Hainzer E, Kaiser R, Meyer E, Newesely C, Niedrist G, Niedrist GH, Petermann JS, Seeber J, Tappeiner U, Wickham S (2022) Long-term monitoring of high-elevation terrestrial and aquatic ecosystems in the Alps – a five-year synthesis. *Eco.Mont* 14. DOI: <https://dx.doi.org/10.1553/eco.mont-14-2s44>

Koste W (1978) Rotatoria. Die Rädertiere Mitteleuropas. Vol., Gebr. Borntraeger, Berlin, Stuttgart



Latta LC, Bakelar JW, Knapp RA, Pfrender ME (2007) Rapid evolution in response to introduced predators II: the contribution of adaptive plasticity. *BMC Evolutionary Biology* 7: 21

Loria KA, Christianson KR, Johnson PTJ (2020) Phenology of alpine zooplankton populations and the importance of lake ice-out. *J Plankton Res* 42: 727-741

Manca M, Armiraglio M (2002) Zooplankton of 15 lakes in the Southern Central Alps: comparison of recent and past (pre-ca 1850 AD) communities. *J Limnol* 61: 225-231

Obertegger U, Corradini S, Cerasino L (2025) Inter-Period and Inter-Season Variability of Zooplankton of a Mountain Lake With an Emphasis on Under-Ice Communities. *Freshwat Biol*, 70: e70085

Pontin R.M (1978) A Key to the Freshwater Planktonic and Semi-Planktonic Rotifera of the British Isles. *Freshwater Biological Association*

Rosset V, Lehmann A, Oertli B (2010) Warmer and richer? Predicting the impact of climate warming on species richness in small temperate waterbodies. *Global Change Biol* 16: 2376-2387

Stuparyk BR, Vinebrook RD (2024) Contrasting resistance and resilience trajectories of zooplankton communities in restored fishless alpine lakes. *Ecosphere* 15: e4836

Tiberti R, Dory F, Arthaud F, Auge V, Birk C, Cavalli L, Fontaneto D, Napoleoni R, Perga ME, Sabas I, Sagot C, Sommaruga R (2008) Long-term changes of zooplankton in alpine lakes result from a combination of local and global threats. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.111222>

Veits M (2015) *Salzburgs Seen. Natur - Geschichte - Kultur*. Vol. 15, Verein "Freunde der Salzburger Geschichte"

Wickham SA, Petermann JS, Berninger U-G (2019a) Langzeitmonitoring von Ökosystemprozessen im Nationalpark Hohe Tauern. Modul 08: Zooplanktongemeinschaften und abiotische Parameter hochalpiner Seen. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften

Wickham SA., Petermann JS, Berninger UG (2019b) Langzeitmonitoring von Ökosystemprozessen im Nationalpark Hohe Tauern. Modul 08: Zooplanktongemeinschaften und abiotische Parameter hochalpiner Seen. Methoden-Handbuch. Wien, ISBN-Online: 978-3-7001-8756-1, doi:10.1553/GCP_LZM_NPHT_Modul08

Waterkeyn A, Vanschoenwinkel B, Elsen S, Anton-Pardo M, Grillas P, Brendonck L (2010) Unintentional dispersal of aquatic invertebrates via footwear and motor vehicles in a Mediterranean wetland area. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 20: 580-587

Winder M, Monaghan MT, Spaak P (2001) Have human impacts changed alpine zooplankton diversity over the past 100 years? *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*: 467-475



**PARIS
LODRON
UNIVERSITÄT
SALZBURG**



Medieninhaber und Herausgeber, Verleger:

Nationalparkrat Hohe Tauern

Kirchplatz 2, 9971 Matri

Tel.: +43 (0) 4875 / 5112 | E-Mail: nationalparkrat@hohetauern.at

www.hohetauern.at