NATIONAL PARKS AUSTRIA

Nationalpark Hohe Tauern

LZM – Endbericht 2023-2024

Modul 08: Zooplanktongemeinschaften und abiotische Parameter hochalpiner Seen

MIT UNTERSTÜTZUNG VON BUND UND EUROPÄISCHER UNION

BUNDESMINISTERIUM FÜR NACHHALTIGKEIT UND TOURISMUS

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
Für den Inhalt verantwortlich:
WICKHAM, S.A., PETERMANN, J.S., BERNINGER, U.-G. / UNIVERSITÄT SALZBURG
Nationalparkrat Hohe Tauern, Kirchplatz 2, 9971 Matrei i.O.
Projektleitung: WICKHAM, S.A., PETERMANN, J.S., BERNINGER, U.-G.
Fotos: © Stephen Wickham, Jana Petermann, Eva Piberger, Florian Hohenberger
Titelbild: Probenentnahme „caught in the thunder storm“, © Florian Hohenberger

Zitiervorschlag: konsistent mit den Endberichten der anderen Module. Autoren/innen-Reihenfolge wie im Impressum (s.o.)

Salzburg, 30.04.2024

Inhaltsverzeichnis

EINLEITUNG 1

a. Ausgangssituation, Fragestellung 1
b. Zielsetzung 2
c. Projektpartner 3

METHODIK 3

a. Untersuchungssysteme 3
b. Geländearbeit 6
c. Abiotische Faktoren 7
d. Probenentnahme 8
e. Laboranalysen Lebensgemeinschaften 9
f. Datenanalyse 9

ERGEBNISSE UND DISKUSSION 9

a. Untersuchungssysteme, Anmerkungen zur Geländearbeit 9
b. Abiotische Faktoren 10
c. Zooplankton der Wassersäule 15

FAZIT UND AUSBLICK 19

DANKSAGUNG 19

LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS 20

Einleitung

a. Ausgangssituation, Fragestellung

Bezüglich der Ausgangssituation bzw. der wissenschaftlichen Fragestellung, die das Projekt bestimmt, hat sich seit Beginn des Förderzeitraums nichts geändert: Vor dem Hintergrund des Selbstverständnisses und der Aufgabenstellung österreichischer Nationalparks, kombiniert mit den aktuellen gesellschaftlichen Herausforderungen durch die Klimawandelfolgen, wurde im Jahr 2015 ein interdisziplinäres und integratives Monitoring- und Forschungsprogramm im Nationalpark Hohe Tauern initiiert. Der Fokus dieses Projektes liegt auf hochalpinen Ökosystemen, die sich besonders für entsprechend ausgerichteter Untersuchungen eignen, da sie lang- und kurzfristige Klimaveränderungen deutlich aufzeigen. Anhand von messbaren Größen (z.B. Abundanzen, Biodiversität, abiotische Parameter, Ausdehnung) werden in jährlich wiederkehrenden Langzeituntersuchungen alle relevanten „Teil-Ökosysteme“ inkl. ihrer Lebensgemeinschaften (Böden, fließende und stehende Gewässer, Großherbivore, terrestrische Vegetationsbestände, sowie 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.

Im NPHT-internen Synthesebericht der sog. „Pilotphase" (2016 – 2019; Körner, et al. 2020, Wickham, et al. 2019) sowie dem einem „peer-review" unterzogenen Artikel von Körner et al. (2022) wurden Fragestellung, Herangehensweise und erste Ergebnisse bereits ausführlich beschrieben. Die sich andeutenden Trends und die große Relevanz der erhobenen Daten führten dazu, dass das gesamte Projekt erst im Zeitraum 2020 – 2022 und dann für eine Sommerkampagne 2023 fortgesetzt wurde. Die hier zusammengefassten Ergebnisse präsentieren die Ergebnisse der im Frühjahr 2024 abgeschlossenen Auswertung der Kampagne 23 (Modul 08 – Seen - Zooplanktongemeinschaften und abiotischen Parameter hochalpiner Seen) fokussiert und führen die aktuellen Daten mit denen, die in den vorherigen Jahren erhoben wurden, zusammen.

b. Zielsetzung

Auch hier hat sich naturgemäß nichts verändert: Nach wie vor besteht das übergeordnete Ziel des Monitoring-Programms darin, Prognosen über die zeitlichen Veränderungen der hochalpinen Lebensräume zu erstellen und dadurch in der Lage zu sein, Maßnahmen zum wirksamen Schutz bzw. dem Erhalt dieser fragilen und wichtigen Ökosysteme zu entwickeln. Insbesondere sollen belastbare Aussagen darüber getroffen werden, ob die Veränderungen (z.B. Temperaturamplitude, Niederschlagsmenge, Einsetzen und Länge distinkter Jahreszeiten, Vorkommen an bestimmte abiotische Bedingungen angepasster Organismengruppen) in direktem Zusammenhang mit dem Klimawandel stehen oder (wie z.B. Eutrophierung, zunehmende landwirtschaftliche Nutzung, Einschleppung invasiver Arten, Zerstörung von Ökosystemen durch deren physische Nutzung) eher durch anthropogene Aktivitäten hervorgerufen werden. In direkter Fortsetzung der Pilotphase wurden auch im Folgezeitraum die Veränderungen im Detail beschrieben, quantitativ und qualitativ ausgewertet und versucht, Beziehungen mit Klimaveränderungen bzw. anthropogenen Einflüssen aufzuzeigen.

Ein besonderes Charakteristikum des NPHT-LZM ist, dass nicht nur terrestrische Ökosysteme und deren Lebensgemeinschaften und Fließgewässer untersucht werden, sondern auch 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, mit eingeschlossen wurden (Psenner and Schmidt 1992; Koinig et al. 1998; s. auch IPCC 2001; Nogués-Bravo et al. 2007). Die Bedeutung der Hinzunahme von Seen wurde bereits im Synthesebericht beschrieben. Grundsätzlich geht man davon aus, dass die Biodiversität planktischer Gemeinschaften 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). Insgesamt ist im Zuge der direkten und indirekten Klimawandelfolgen eine Veränderung der Gesamtökosysteme und ihrer Lebensgemeinschaften nicht unwahrscheinlich (Shurin et al. 2012; Thackeray 2012). Aus den oben aufgeführten Gründen wurden die hochalpinen Seen mit in das Gesamtprojekt aufgenommen. Im Zuge der Beprobungen der Jahre 2017 und 2018 wurden die genauen Untersuchungssysteme identifiziert (s. Methodik). Durch ihre Lage wird langfristig ein einzigartiger, hochrelevanter Vergleich der Langzeitveränderungen terrestrischer und aquatischer Systeme möglich sein. Entsprechend wurden im Modul 08 (Seen) die Abundanz, Diversität und Gemeinschaftszusammensetzung des Zooplanktons in insgesamt 18 Seen (sechs pro Tal) aufgenommen. Die Seen liegen größtenteils in der Nähe der terrestrischen Plots sowie der untersuchten Fließgewässer. Die Ziele der Seen-Untersuchungen umfassen (s. auch Synthesebericht):

1. Die Analyse der planktischen Metazoen-Gemeinschaften (Rotatoria, Cladocera, Copepoda) von sechs Seen pro Tal (Obersulzbachtal, Innergschlöss, 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.

c. Projektpartner

Das Modul 08 (Seen) wird im Fachbereich Umwelt und Biodiversität an der Paris-Lodron-Universität Salzburg durch die Projektleiter/innen und Mitarbeiter/innen durchgeführt.

Methodik

a. Untersuchungssysteme

Die 2017 für die Pilotphase ausgewählten 18 Seen wurden in den Folgezeiträumen 20-22 und 2023 standardmäßig übernommen (Tab. 1). Ausschlaggebend dafür war die Beibehaltung der bereits 2017 festgelegten Kriterien:

- Lage der Seen entlang eines Höhengradienten
- Erreichbarkeit der Seen (Fußwanderung inkl. Materialtransport möglich, Entfernung von Unterkunft max. 5 Stunden)
- Erwartete permanente Wasserführung des Sees über viele Jahre
- Möglichkeit der Messung abiotischer Faktoren, der Beprobung und der Installation von Dataloggern
- Möglichst größte Nähe zu den Untersuchungsgebieten der anderen projektbeteiligten Gruppen

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
Innergschlöß	Salzbodensee	2138	47‘ 6'55“85"N	12‘25'33“29"E
	„Innergschlöß See 2“ (Eisseele)	2550	47‘ 7'25“88"N	12‘23'52“89"E
	„Innergschlöß 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
	Löbbensee	2226	47‘ 6'23“34"N	12‘28'36“87"E
	„See nahe Löbbensee“	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. 2023) untersuchten Seen.

Im Folgenden befindet sich die Photodokumentation aller beprobten Seen, die sich hinsichtlich der o.g. Kriterien nicht verändert hatten und somit als unsere Standard-Untersuchungssysteme identifiziert bleiben. Zu Zwecken der Wiedererkennung werden hier dieselben Abbildungen gezeigt wie bereits im Synthesebericht bzw. Methodenhandbuch

(Wickham, et al. 2019a; Wickham, et al. 2019b) sowie in den individuellen technischen Zwischenberichten zu den einzelnen Kampagnenjahren.

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, Innergschlöß

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

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

Abbildung 10: Löbbensee, Innergschlöß

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

Abbildung 12: „See nahe Löbbensee“, Innergschlöß

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

Alle beprobten Seen erfüllen die oben genannten Auswahlkriterien, wenngleich sie sich in einigen hydrologischen, biotischen und abiotischen Parametern unterscheiden (unterschiedliche Höhenstufen, unterschiedliche Ufer- bzw. Untergrundstrukturen, unterschiedliche Flächen, unterschiedliche maximale Wassertiefe und unterschiedliche anthropogen oder landwirtschaftlich bedingte Einflüsse und Ausdehnung ihres Einzugsgebietes).

b. Geländearbeit

Die Pilotphase diente dazu, die konkreten Untersuchungssysteme auszuwählen, sowie die anzuwendenden Methoden zu testen und hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für die Fragestellung zu evaluieren. Alle Ansätze wurden auch in den Folgezeiträumen beibehalten. Daher werden die textlichen Beschreibungen aus dem Synthesebericht (Wickham, et al. 2019a) hier zum Teil übernommen. Die Feldteams sind sehr gut eingearbeitet, jedes Jahr werden neue Personen (Studierende oder Angestellte der PLUS) neu rekrutiert (Abb. 19). Alle Untersuchungssysteme werden nach wie vor 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 (Abb. 20) oder z.B. mit dem Boot der Bergrettung am Sulzsee.

Abb. 19: Geländeteam der PLUS 2023 (von links: Florian Hohenberger, Eva Piberger, Dominik Ankel, David Zezula, Samuel Unterberger), Aug. 2023. © Florian Hohenberger.

Abb. 20: Beprobung auf dem Eisseele (Innergschlöß) vom Schlauchboot aus, August 2021, © Stephen Wickham

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.

c. Abiotische Faktoren

Die Messungen der Wassertemperatur wird mit zwei in jedem See installierten Dataloggern (tempmate.®-B2) durchgeführt (Abb. 21 & 22). Weil dieser Typ von Temperatur-Dataloggern nicht mehr lieferbar ist, wurden sie mit HOBO TidbiT® MX Temp 400 Bluetooth-Datenlogger schrittweise ausgetauscht. Nur wenn beide Datalogger verloren gegangen sind, wurden pro See nur einer der Typen eingesetzt, um die Daten über die Jahre möglichst vergleichbar zu machen. Durch eine Datenaufzeichnung in 6-stündigen Intervallen werden Langzeitentwicklung der Wassertemperatur sowie tageszeitliche und saisonale Temperaturunterschiede dokumentiert. In den meisten Jahren konnten fast alle der ausgebrachten Datalogger wieder aufgefunden werden, der gelegentliche Verlust von Temperaturloggern hat zu keinen kritischen Lücken in der Datenaufzeichnung geführt. Die Speichermedien werden während der Probennahme entnommen, elektronisch ausgelesen und wieder eingesetzt bzw. ausgetauscht.

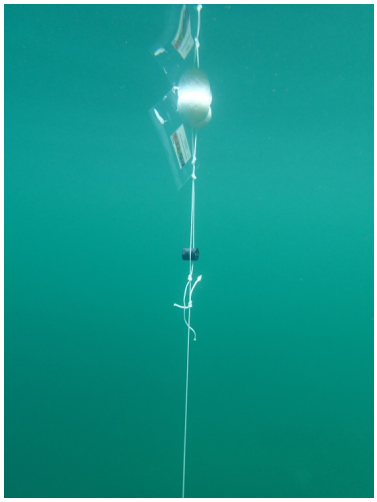

Abbildung 21: Temperaturdatenlogger in wasserdichtem Gehäuse (schwarze Kapsel) in der Wassersäule hängend. An der Wasseroberfläche sorgen 2 Styroporkugeln für Auftrieb und Sichtbarkeit.

Abbildung 22: Temperaturdatenlogger mit Styroporkugeln für Auftrieb und Sichtbarkeit und mit Steinen in Netzbehältnis als Anker.

Die Bestimmung der maximale Tiefe jeden Sees erfolgt mithilfe eines Echolots. 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 (µS/cm), pH, Nitratgehalt (mg/l), Trübheit (FNU), Pycocyanin der Blau-Grünen Algen (relative Fluoreszenzeinheiten und µg/l) und Chlorophyll a Konzentration (relative Fluoreszenzeinheiten und µg/l). Im Jahr 2023 wurde die 2022 erstmalig Durchgeführte Bestimmung der Konzentration an Gesamtphosphor im Wasser fortgesetzt. TP („*total phosphorus*") ist einer der wichtigsten Nährstoffe von Primärproduzenten (Algen, Pflanzen) und ein Anzeiger für Eutrophierungsereignisse in aquatischen Lebensräumen. Es wurde hier eine spektrophotometrische Standardmethode (nach EPA 365.3) angewandt, wegen der geringen zu erwartenden Konzentrationen wurde eine 10 cm Kuvette benutzt (EPA 1978).

d. Probenentnahme

<u>Zooplankton (Wasserproben)</u>

Das Metazooplanktons wird mithilfe eines Planktonnetzes (30 µm Maschenweite und 29 cm Durchmesser der Öffnung) beprobt (Abb. 24), je nach Tiefe des Sees und erwarteter Abundanz der Organismen aus unterschiedlichen Wasservolumen (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. Meist wurden Vertikalproben entnommen, war dies nicht möglich (in den sehr flachen Seen), wurde horizontal beprobt.

Abbildung 19: Schlauchboot mit Planktonnetz und Multisonde

Abbildung 24: Entnahme der Zooplanktonprobe mit dem Planktonnetz

e. Laboranalysen Lebensgemeinschaften

Zooplankton (Wasserproben)
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).

f. Datenanalyse

Auch in den auf die Pilotphase folgenden Projektperioden 2020 – 2022 und 2023 wurde an dem ultimativen Ziel der Untersuchungen festgehalten, nämlich mit den erhobenen Daten Zeitreihen zu erstellen und die unterschiedlichen Seen miteinander zu vergleichen. Die Daten sollen mögliche Veränderungen der Systeme aufzeigen bzw. es ermöglichen, perspektivisch Vorhersagen für die Entwicklung der abiotischen und biotischen Parameter der Seen zu erstellen.

Die mit der Multisonde erhobenen Daten werden zur Erstellung von Vertikalprofilen der abiotischen Faktoren in den einzelnen Seen verwendet und die Situationen der einzelnen Jahre miteinander verglichen. Die Langzeit-Temperaturmessungen werden in kontinuierlichen Charts abgebildet und erlauben Aussagen zu tageszeitlichen und saisonalen Schwankungen, zum Beginn und Ende der eisfreien Zeit sowie zu zeitlichen Veränderungen der Temperaturbedingungen bzw. -muster. Die Auswertung der Zooplanktonproben aus der Wassersäule dient dazu, Vorkommen und Abundanzen (Individuen pro Liter) unterschiedlicher Taxa in den beprobten Seen zu dokumentieren und räumliche (zwischen Seen) und zeitliche (unterschiedliche Jahre) Vergleiche ziehen zu können. 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.

Ergebnisse und Diskussion

a. Untersuchungssysteme, Anmerkungen zur Geländearbeit

Für aussagekräftige Ergebnisse des Langzeitmonitorings ist es unbedingt notwendig, Daten aus möglichst vielen Jahren heranzuziehen. In jedem abgeschlossenen Untersuchungsjahr werden daher die erhobenen Daten denen aus den vorangegangenen Jahren hinzugefügt. So können wir mittlerweile einen Datensatz präsentieren, der die Jahre 2017 bis einschl. 2023 umfasst. Auch wenn man mit Interpretationen natürlich nach wie vor sehr vorsichtig sein muss, können wir mittlerweile doch festhalten, dass sich nach einer Periode von 7 Jahren einige Trends zeigen. Beispielhaft werden hier entsprechend die Datensätze für einige ausgewählte Parameter aus allen bisher abgeschlossenen Untersuchungsjahren gezeigt. Die Gesamtanalyse aller Daten ist noch nicht abgeschlossen.

Bereits im zweiten Jahr der Untersuchungen konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass sich die ausgewählten Probenentnahmesysteme perfekt für die Durchführung der (damals noch „potenziellen“) Langzeitstudie eignen. Diese Einschätzung hat sich auch einschl. des Jahres 2023 bestätigt. Die ausgewählten Seen entsprechen alle unseren Anforderungskriterien (s. Einleitung), sie sind noch auffindbar, es haben sich keine großen Unterschiede in Größe und/oder Hydrologie ergeben und es sind keine Anzeichen vorhanden, dass die Seen in den Folgejahren womöglich verlanden oder austrocknen werden oder durch Geröllstürze u.ä. komplett verschüttet werden könnten. Die Bestätigung der Auswahl der Probensysteme dieses Teils des Monitoringprojektes ist auch deshalb so wichtig, weil die stehenden Gewässer nicht als losgelöste Einzelteile zu betrachten sind, sondern sich als Mosaiksteinchen in das Gesamtökosystem einfügen. Abgesehen von den Seen im Sulzbachtal (im Untersulzbachtal existieren keine erreichbaren Seen, daher wurden Seen im Obersulzbachtal beprobt) liegen die untersuchten Seen in unmittelbarer Nähe der terrestrischen Beobachtungs- bzw. Untersuchungsflächen sowie der Einzugsgebiete der ebenfalls berücksichtigten Fließgewässer. Im Hinblick auf die Gesamtsynthese des Projektes ist dies sehr wichtig.

Angestrebt war es, die Geländearbeiten auch im Jahr 2023 während der eisfreien Zeit durchzuführen. Allerdings gab es im Juli und August sehr viele Schlechtwetterperioden, daher mussten einige Termine abgebrochen, verschoben bzw. wiederholt werden.

Seebachtal

Die (erste) Geländekampagne wurde am 17. und 18.8.23. durchgeführt. Die Seen Grüneckersee, Schneefeldsee, Plattensee, Kleines Elend und Großes Elend konnten beprobt werden. Die Beprobung des Kleinen Tauernsees konnte nicht stattfinden, da er noch eisbedeckt war. Auf dem Rückweg kam das Team in ein schweres Gewitter (s. auch Abb. 19). Die Beprobung des Kleinen Tauernsees wurde am 11.8. nachgeholt. In zwei Seen konnte jeweils nur ein Temperaturlogger ausgelesen werden.

Obersulzbachtal

Die Probenentnahmen waren für den 27. bis 28.7. geplant, mussten aber aufgrund schlechten Wetters am Morgen des 28.7. abgebrochen werden. Die Beprobung von drei der Seen in diesem Tal (See neben Seebachsee, Seebachsee, Foißkarsee) wurden am 7.9.23 (einem ungewöhnlich späten Termin für die Kampagne) nachgeholt. Bis auf einen Datalogger konnten alle Temperaturdaten ausgelesen werden.

Innergschlöß

Im Innergschlöß konnte die Probenentnahmekampagne planmäßig durchgeführt und abgeschlossen werden (8. und 9.8.), auch hier konnten nur von einem Temperaturlogger die Daten nicht eingelesen werden. Im Salzodensee wurde ein zusätzlicher Datalogger auf der Wassertiefe, in der sich das Tiefenchlorophyllmaximum befindet, installiert. Diese Daten werden dann nach der Sommerkampagne 2024 zur Verfügung stehen.

b. Abiotische Faktoren

Langzeit-Temperaturmessungen

Das Hauptziel des Datenloggereinsatzes war und ist es, die langfristige Temperaturentwicklung der untersuchten Seen zu messen. Nach nun insgesamt 7 Untersuchungsjahren beginnen Trends in der Temperaturentwicklung sichtbar zu werden. Zwar müssen zur Bestätigung dieser Einschätzung noch entsprechende statistische Verfahren angewandt werden, die Unterschiede lassen sich aber bereits herausstellen. So unterscheiden sich die Seen sowohl innerhalb eines Tals als auch zwischen den Tälern im Hinblick auf

- die absolute Höchsttemperatur,
- die Temperaturamplitude und die Steilheit des Temperaturanstiegs im (Früh-) Sommer bzw. des Temperaturabfalls im Herbst / Winter,
- das Auftreten bzw. Fehlen von Eisbedeckung im Winter,
- den zeitlichen Beginn der Eisbedeckung, deren Dauer und das Ende der Eisbedeckung sowie
- die aus den Temperaturdaten zu schließenden Schichtungsverhältnisse in den Seen.

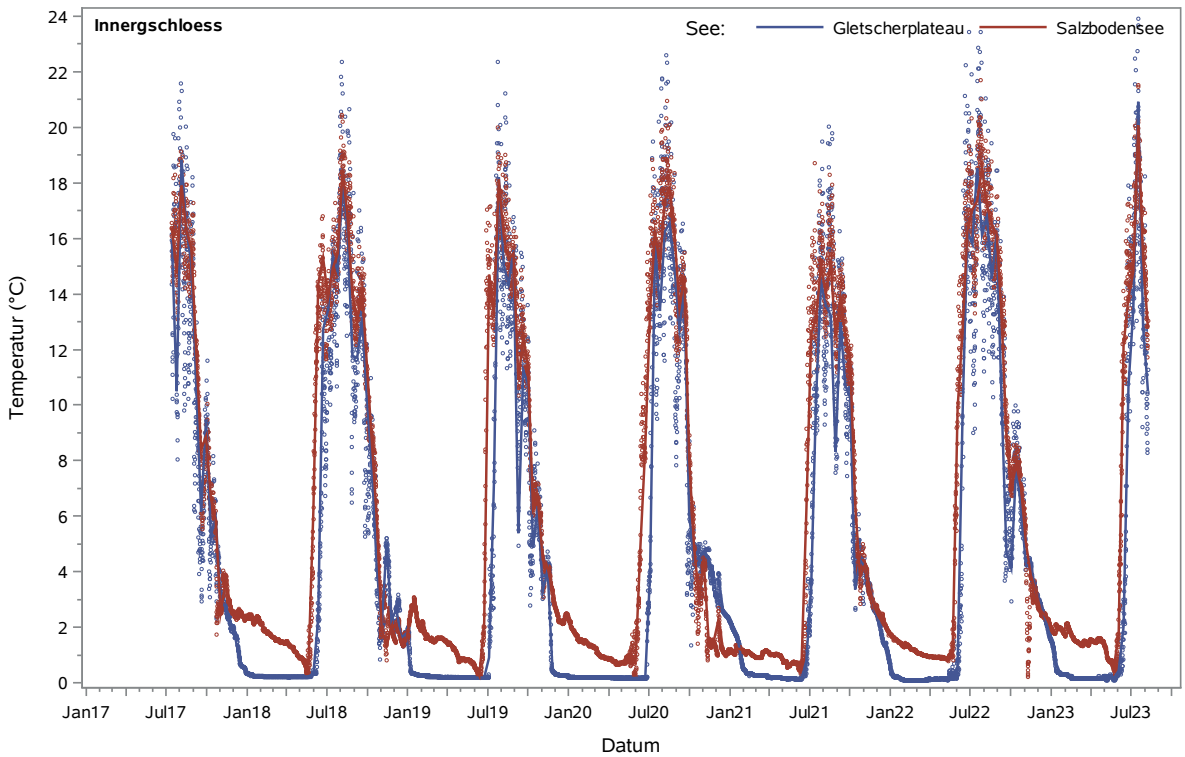

Abbildung 20: Wassertemperatur (°C, in ca. 0,4 m Wassertiefe, kontinuierlich gemessen mit Temperatur-Dataloggern in 6-Stunden Intervallen) Gletscherplateau (blau) und Salzbodensee (rot) des Innergschlöß. Die Datenpunkte sind Mittelwerte der Aufzeichnungen von zwei Loggern pro See. Linien sind Loess-Fits 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.

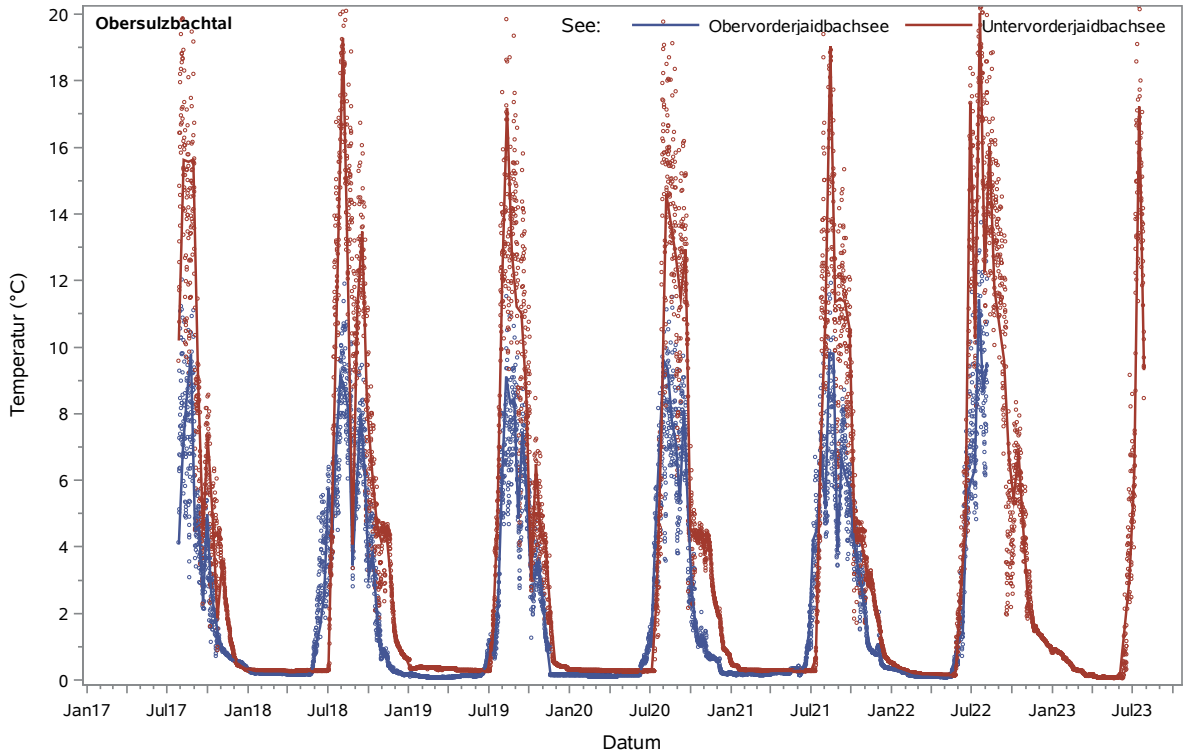

Abbildung 21: Wassertemperatur (°C, in ca. 0,4 m Wassertiefe, kontinuierlich gemessen mit Temperatur-Dataloggern in 6-Stunden Intervallen) Obervorderjaidbachsee (rot) und Untervorderjaidbachsee (blau) des Obersulzbachtal. Die Datenpunkte sind Mittelwerte der Aufzeichnungen von zwei Loggern pro See. Linien 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.

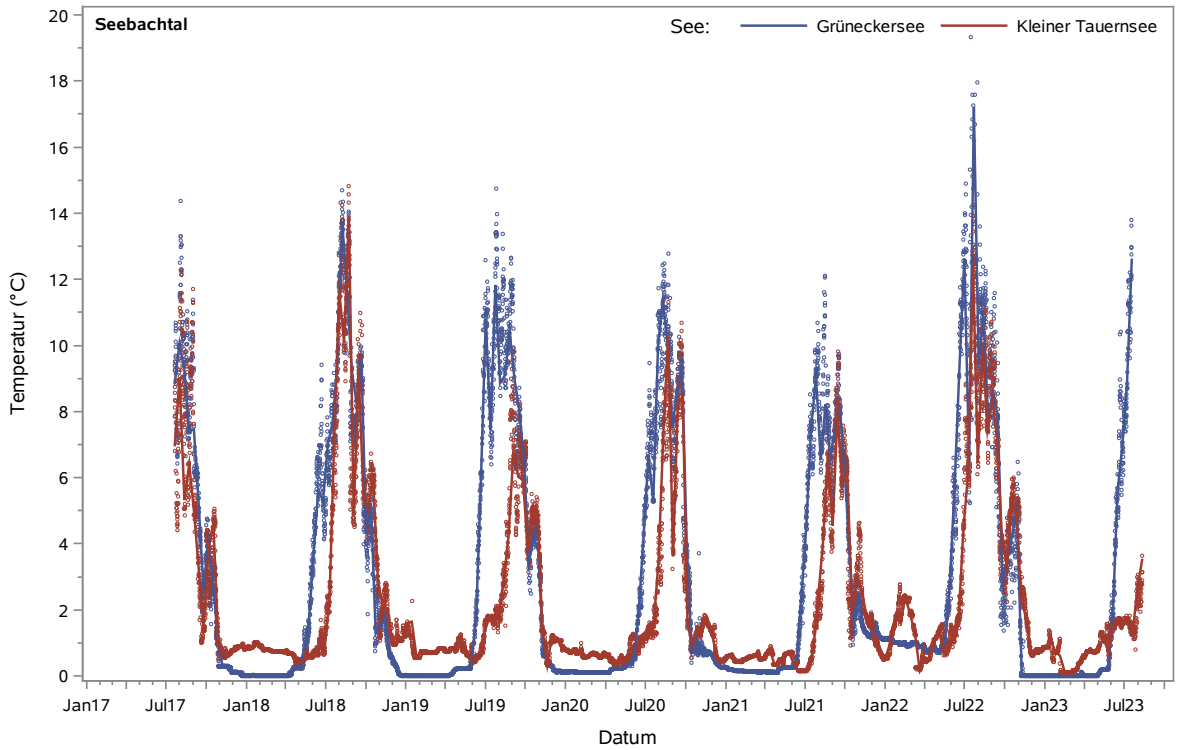

Abbildung 22: Wassertemperatur (°C, in ca. 0,4 m Wassertiefe, kontinuierlich gemessen mit Temperatur-Dataloggern in 6-Stunden Intervallen) im Grüneckersee (blau) und Kleiner Tauernsee (rot) des Seebachtal. Die Datenpunkte sind Mittelwerte der Aufzeichnungen von zwei Loggern pro See. Linien sind Loess-Fits 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.

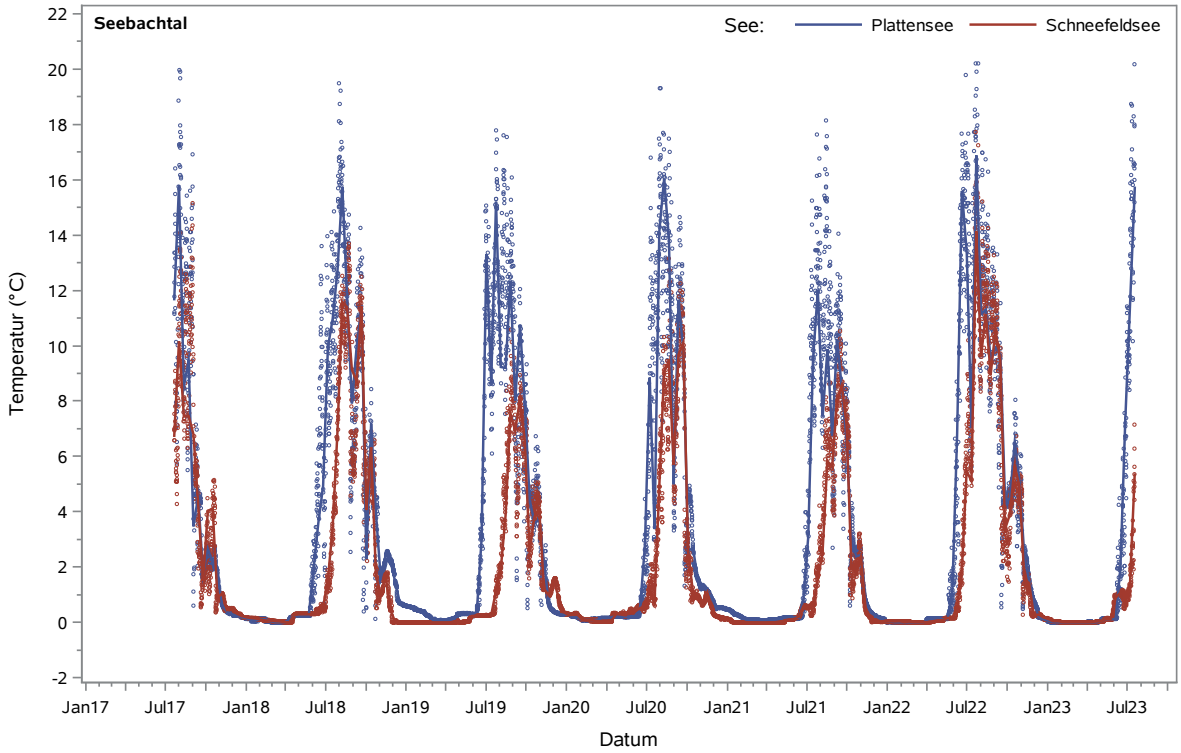

Abbildung 23: Wassertemperatur (°C, in ca. 0,4 m Wassertiefe, kontinuierlich gemessen mit Temperatur-Dataloggern in 6-Stunden Intervallen) im Plattensee (blau) und Schneefeldsee (rot) des Seebachtal. Die Datenpunkte sind Mittelwerte der Aufzeichnungen von zwei Loggern pro See. Linien sind Loess-Fits 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.

Bereits die Daten der ersten Jahre der kontinuierlichen Temperaturmessungen haben interessante Ergebnisse hervorgebracht. Aus den Temperaturdaten lässt sich schließen, dass alle beprobten Seen im Winter von einer Eisschicht bedeckt waren: Die Logger hängen auf einer Wassertiefe von ca. 0,4 m, wenn sie eine geringere Temperatur als 4°C zeigen, impliziert dies das Vorhandensein von Eis an der Gewässeroberfläche und die Ausbildung einer sog. „inversen Schichtung" (durch die Dichteanomalie des Wassers ist hier kälteres Wasser näher an der Oberfläche). Fast alle der Seen weisen eine Höchsttemperatur im Sommer von 15 - 20°C auf, eine Ausnahme bildet z.B. der Kleine Tauernsee.

Die hier beispielhaft gezeigten Daten (Abb. 25 bis 28) beinhalten erste Hinweise auf ansteigende Wassertemperaturen im Sommer und ein früher eintretendes Abschmelzen der Eisbedeckung: In einer Regressionsanalyse, mit Höhenlage und Jahr als fixiertem Parameter und einem zufälligen Abschnitt (s. Preston, et al. 2016) konnte gezeigt werden, dass die mittlere Sommertemperatur bis zum Jahr 2022 um 0,3 °C pro Jahr angestiegen ist (P=0.008; allerdings stark getrieben von den Ergebnissen des Jahres 2022). Allerdings wirkte sich die Rekordhöhe der Lufttemperatur im Sommer 2023 offensichtlich (noch) nicht stark auf die Wassertemperaturen aus, diese waren 2023 nicht statistisch signifikant höher als im Vorjahr. Allerdings ist der Datensatz für 2023 noch nicht komplett, da einige der Temperaturdatalogger ausgelesen wurden, bevor die (erwartete) höchste Temperatur erreicht wurde. Dies betrifft. z.B. den Kleinen Tauernsee, den Schneefeldsee und den Plattensee, der vollständige Datensatz wird 2024 verfügbar sein.

Die Tendenz, dass die Eisschmelze im Laufe der Jahre immer früher eintritt, setzte sich auch 2023 fort und ist statistisch signifikant (P=0.008). Korrigiert für die Höhenlage der einzelnen Seen verzeichnen wir mittlerweile ein „ice-out", das 2,6 Tage im Jahr früher gemessen wird als zu Beginn unserer Untersuchungen. Trotzdem benötigen wir nach wie vor weitere Untersuchungsjahre, bevor wir diese Trends als robuste Effekte deklarieren können. Mikroklimatische Einflüsse sind nach wie vor dominant, wobei zumindest im Hinblick auf die Wassertemperaturen im Sommer die Größe und Tiefe der Seen eine relativ geringe Rolle zu spielen scheinen. So zeigen z.B. der Salzbodensee und der Getscherplateausee (beide Innergschlöß, Abb. 25) auch 2023 erstaunlich ähnliche Temperaturmuster, obwohl der Salzbodensee fast 5-mal tiefer ist und eine fast 10-mal größere Fläche hat als der Getscherplateausee. Gleiches lässt sich ebenso wie in den früheren Jahren auch 2023 im Seebachtal zeigen (Abb. 27): der Grüneckersee ist doppelt so tief und 4-mal so groß wie der Kleine Tauernsee, weswegen man erwarten würde, dass der tiefere und größere See eine niedrigere Sommertemperatur aufweist als der flachere und kleinere See. Stattdessen ist der Grüneckersee in fast allen Untersuchungsjahren fast genauso warm oder sogar wärmer als der kleinere benachbarte See.

Multisonden-Messungen während der Probenentnahme

Auf der folgenden Abb. (29) sind die Tiefenprofile der mit der Multisonde aufgenommenen Daten für Chlorophyll *a* Konzentration (µg l^{-1}) beispielhaft für eines unserer Untersuchungssysteme (Löbbensee) aufgeführt. Zusätzlich liegen die Daten für Nitrat (mg l^{-1}), Temperatur (°C) und weitere Parameter (s.o.) vor, wir beschränken uns hier jedoch auf die Präsentation dieser biologisch relevantesten Messgröße. Die detaillierte Analyse aller Daten befindet sich in Vorbereitung und wird – gemeinsam mit den zukünftig erhobenen Daten – an anderer Stelle präsentiert. 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. Für sehr flache Seen liegen nur wenige Datenpunkte vor, in den tieferen Seen (z.B. Löbbensee, Grüneckersee, Seebachsee) konnten ausgiebige Vertikalprofile aufgenommen werden. In einigen Fällen führte Wind dazu, dass das Boot, von dem aus den Messungen durchgeführt wurden, während der Datenaufnahme etwas verdriftet wurde. Der Eisseele war während einiger Geländekampagnen noch größtenteils zugefroren, die Messungen konnten daher nur an einer relativ flachen Stelle durchgeführt werden. Der Sulzsee hat eine maximale Tiefe von ca. 42 m, da das Kabel an der verwendeten Multisonde aber nur 15 m lang ist, konnten keine tieferen Wasserschichten gemessen werden. Die Grafik (Abb. 29) beinhaltet die Daten aus allen Untersuchungsjahren (2017 – 2023).

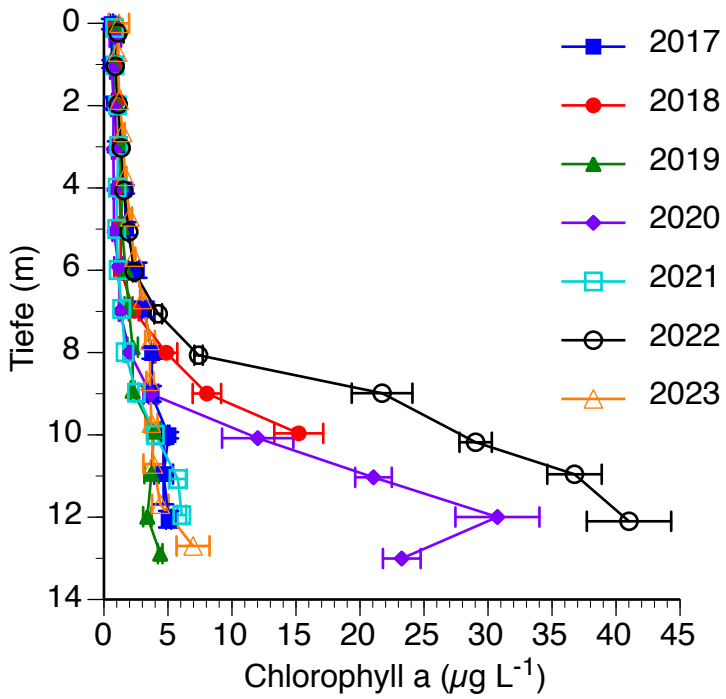

Abbildung 29: Vertikalprofile von Chlorophyll *a*-Konzentration (µg L^{-1}) in der Wassersäule des Löbbensees, Innergschlöß. Die y-Achse gibt die Gewässertiefe wieder. Die Ergebnisse der Messungen aus den sechs Jahren (2017 bis 2023, jeweils Juli/August) sind nebeneinander aufgeführt. Im Jahr 2018 musste die Messung des Profils wegen eines Schlechtwettereinbruchs abgekürzt werden.

Die Chlorophyll *a* -Konzentrationen aus dem Löbbensee (Innergschlöß) demonstrieren sehr gut, wie groß die interannuelle Varianz sein kann. Die Profile wurden um die 2023 ermittelten Daten ergänzt, wodurch die Abbildung die Werte der gesamten Dauer des Monitorings (2017 - 2023) zeigt. Chlorophyll als Massenparameter gibt Hinweise auf das quantitative Vorkommen von Algen in der Wassersäule, allerdings ohne Hinweise auf die taxonomische Vielfalt und/oder Größe oder Verteilung der Biomasse der Primärproduzenten.

Unsere Daten zeigen, dass insbesondere das Auftreten eines deutlichen Tiefenchlorophyllmaximums (DCM, *deep chlorophyll maximum*) sehr variabel sein kann. Im hier aufgeführten Löbbensee (Abb. 29) wurden im Jahr 2022 die höchsten Chlorophyllwerte über die bisherige Gesamtdauer des Projekts gemessen (≥40 µg Chl. *a* L^{-1}). Die Ursachen hierfür können wir noch nicht verlässlich benennen, dazu benötigen wir weitere Daten. Im krassen Gegensatz dazu trat im Jahr 2023 in diesem See überhaupt kein DCM auf. Wir können noch keine Aussage darüber treffen, welche Faktoren zum Auftreten eines DCMs führen, der Zeitpunkt unserer Beprobung bzw. Messung (früher oder später im Sommer) wirkt sich aber nicht aus. Die Fehlerbalken an den einzelnen Datenpunkten verdeutlichen, dass das DCM eine sehr geringe vertikale Ausdehnung hat. Der gezeigte Wert wird über eine Vertikaldistanz von 1 m gemittelt, das DCM erstreckt sich aber offenbar nur über einen Bruchteil davon. Die Werte, mit denen der Mittelwert berechnet wird, liegen im Zentrum des DCM (hohe Werte) aber auch darüber und darunter (geringe Werte). Da die Seen alle zur etwa gleichen Jahreszeit beprobt werden, liegen die gemessenen großen Unterschiede offenbar nicht in einer Saisonalität begründet, stattdessen scheinen See-spezifische Faktoren die dominierende Rolle zu spielen.

2022 wurden zum ersten Mal zusätzlich zu den anderen Analysen Gesamtphosphor (TP)-Messungen durchgeführt, um ein Maß für mögliche Eutrophierungsereignisse zu erhalten. Da man von den in nur einem Jahr ermittelten Ergebnissen keine weitereichenden Schlussfolgerungen ziehen kann, wurden die Messungen 2023 wiederholt. Wie im letzten Jahr lagen auch 2023 die meisten Werte im oligotrophen Bereich (4 - 10 µg P L^{-1}), erwartbar für hochalpine Seen. Die Daten des Sulzsees weichen davon ab, 2022 waren sie deutlich höher (134 µg P L^{-1}) als in den anderen Seen, und auch 2023 übertrafen die Konzentrationen die in den anderen Untersuchungssystemen deutlich, wenngleich die absoluten Werte „nur" noch bei ca. 70 µg P L^{-1} lagen. Wir gehen davon aus, dass diese (im Vergleich) höheren Werte daran liegen, dass viel PO_4 an Sedimentpartikel gebunden ist, die im Wasserkörper suspendiert sind (der Sulzsee ist sehr trüb). Unbeabsichtigte Messung von Sediment-gebundenem Phosphor in den Wasserproben kann auch als Artefakt in sehr flachen Seen auftreten, was eine größere interannuelle Variation in flachen, verglichen mit tieferen Seen erklären kann.

Grundsätzlich kann man aber festhalten, dass die Errechnung der Mittelwerte der P-Konzentrationen jeden einzelnen Sees über die beiden Untersuchungsjahre die quantitativen Unterschiede zwischen den Seen verringert, was die Bedeutung der Messung über mehrere, aufeinanderfolgende Jahre hervorhebt. Das bereits im Jahr 2022 aufgetretene Phänomen, dass wir keine Korrelation zwischen Chlorophyll a-Gehalt, Nitrat und Gesamtphosphor beobachten konnten, wurde im Jahr 2023 bestätigt. Dies weist auf eine komplexe Beziehung zwischen diesen Faktoren hin, die wir derzeit noch nicht erklären können. Wiederum macht dies eine Fortsetzung der Messungen dringlich.

c. Zooplankton der Wassersäule

Der Fokus unserer Analysen liegt auf der quantitativen und qualitativen Analyse des heterotrophen Planktons in den Untersuchungssystemen. Die Organismen konnten den Großgruppen Crustaceen (Cladoceren und/oder Copepoden), Rotatorien und Ciliaten (z.B. *Bursaridium*) zugeordnet werden. Über alle Untersuchungssysteme hinweg zeigen sich große Unterschiede sich im Hinblick auf die absoluten Abundanzen der einzelnen Gruppen (Individuen L^{-1}) sowie auf die Menge der vorhandenen Arten („Artenanzahl").

Die Ergebnisse der Quantifizierungen und taxonomischen Einordnungen des Zooplanktons im beispielhaft ausgewählten Gletscherplateausee (Innergschlöß) illustriert die Abbildung 30. Um die - stark variierenden - Abundanzen optisch auf den Grafiken vergleichen zu können, wurde eine logarithmische Darstellungsweise gewählt. Die Standardabweichungen sind entsprechend groß und wurden nicht mitabgebildet. Die hier gezeigten Daten schließen nur Organismen ein, die tatsächlich mit einem Planktonnetz der Maschenweite 30 µm gefangen werden konnten. Gelegentlich gefundene Wassermilben oder Insektenlarven wurden nicht mitberücksichtigt, da sie nicht zum Plankton gezählt werden. Um kleineres Plankton (Ciliaten, Flagellaten) verlässlich zu quantifizieren und taxonomisch einzuordnen, müssten andere Methoden herangezogen werden (Gesamtwasserproben und z.B. mikroskopische Analysen nach Utermöhl).

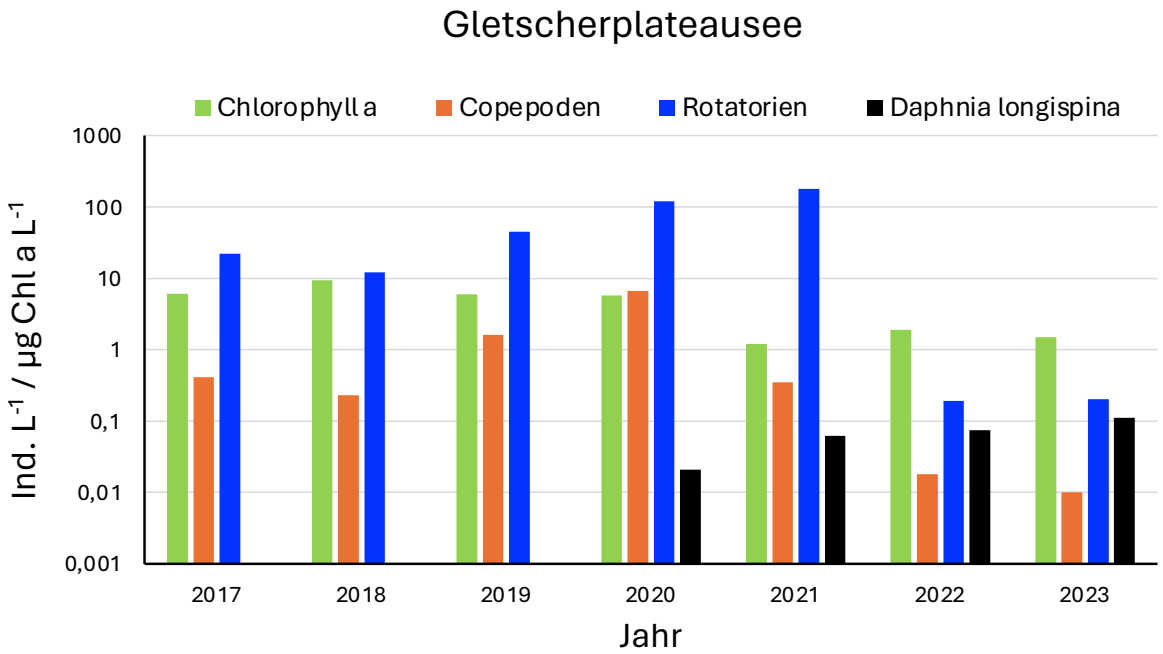

Abbildung 30: Abundanzen (log Individuen L^{-1}) der Zooplanktongemeinschaft sowie ein Maß für die verfügbare Nahrung (Chlorophyll *a* als Massenparameter) des Gletscherplateausees im Innergeschlöß. Die Zahlen geben die Werte aus allen bisherigen Untersuchungsjahren (2017 bis 2023) wieder. Die Standardabweichungen wurden nicht mit aufgeführt. x-Achsenkategorie: Jahr. Symbolerklärung: grüne Balken: Chlorophyll *a*, rot: Copepodem, blau: Rotatorien, schwarz: *Daphnia longispina*.

Der Gletscherplateausee ist ein gutes Beispiel zu zeigen, dass die Einwanderung bzw. das Auftauchen neuer Arten die gesamte Lebensgemeinschaft und die Ökosystem-Funktion verändern kann. Die Cladocerenart *Daphnia longispina* (Abb. 31) erschien erstmals im Jahr 2020 in diesem See und die Population scheint sich dort etabliert zu haben. *D. longispina* wurde bisher lediglich im Salzbodensee nachgewiesen, und taucht nun also dauerhaft in einem zweiten Gewässer auf. Seit der Erstbesiedlung im Gletscherplateausee stiegen die Abundanzen über die Folgejahre kontinuierlich an und *D.*

longispina konkurriert um die dominierende Position (im Hinblick auf Abundanz) mit den Rotatorien. Parallel zum Anstieg der Daphnien-Zahlen verringerte sich die Chlorophyll-Konzentration drastisch und die Abundanzen der Copepoden sowie der Rotatorien (dominierende Art *Polyarthra dolichoptera*) nahmen stark ab. Die Abundanzen der Rotatorien sowohl die Chlorophyll-Mengen scheinen sich allerdings zu stabilisieren, wohingegen die Copepoden-Zahlen auch im Jahr 2023 wieder etwas geringer wurden.

Dies ist unsere erste Dokumentation des wahrscheinlich aktiven Eintrags einer Zooplankton-Art in einen See, in dem sie vorher nicht beobachtet wurde, und der keine direkte Verbindung zu dem Gewässer hat, in dem diese Art bereits in den Vorjahren präsent war. Als Übertragungswege kommen hier z.B. Wanderer, Weidevieh oder auch Wasservögel infrage. Es muss allerdings festgehalten werden, dass unser Gelände-Team mit Sicherheit nicht für den Eintrag dieser Daphnien-Art in den Gletscherplateausee verantwortlich ist (s. auch Methodenteil zur Vermeidung solcher Artefakte). Die detaillierte Beantwortung der Fragen nach möglichen Eintragsmechanismen ist Inhalt eines im Februar 2023 begonnenen vom ÖAW geförderten Forschungsprojektes („High Alpine Lake Biodiversity and Climate Change - A Transdisciplinary Approach - AlpLake-Change“, Wickham. Berninger, Petermann, Hillberg, Otto, Shinozaki). Unsere Beobachtung stellt u.a. die Frage, ob die hohe *beta*-Diversität der Seen mit der Zeit sinken wird. Die Daten aus dem Gletscherplateausee zeigen darüber hinaus, dass manche – aber sicher nicht alle – Parameter eine große Jahr-zu-Jahr Varianz aufweisen.

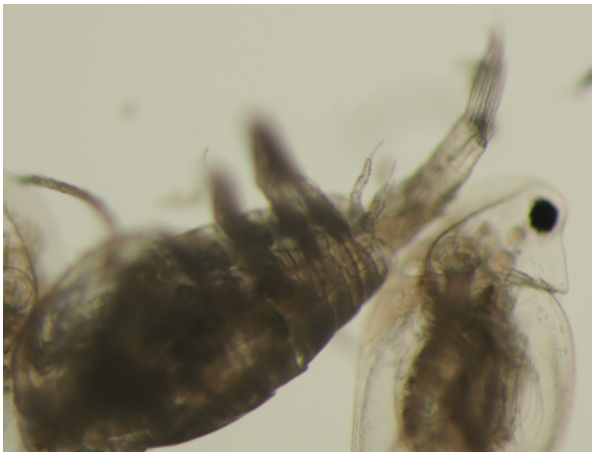

Abb. 31: Mikrograph von *Daphnia longispina* (rechts), eines seit 2020 im Gletscherplateau-See aufgetretenen Zooplankton-vertreters

Es gibt eine Reihe von Methoden, um die Biodiversität unterschiedlicher Ökosysteme miteinander zu vergleichen. Einen sehr klaren Eindruck solcher Unterschiede bzw. der Ähnlichkeit ausgewählter Lebensgemeinschaften wie hier der Zooplanktongemeinschaften kann man über eine sog. „Jaccard heat map“ vermitteln. 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. Interessante Beispiele liefern dann Seenpaare, die z.B. dicht aneinander liegen und trotzdem sehr unterschiedliche Biodiversitäten aufweisen, oder solche, die sehr weit voneinander entfernt sind, aber ähnliche Lebensgemeinschaften beherbergen. Auf den Abbildungen 32 bis 34 präsentieren wir entsprechenden Daten unserer Untersuchungssysteme.

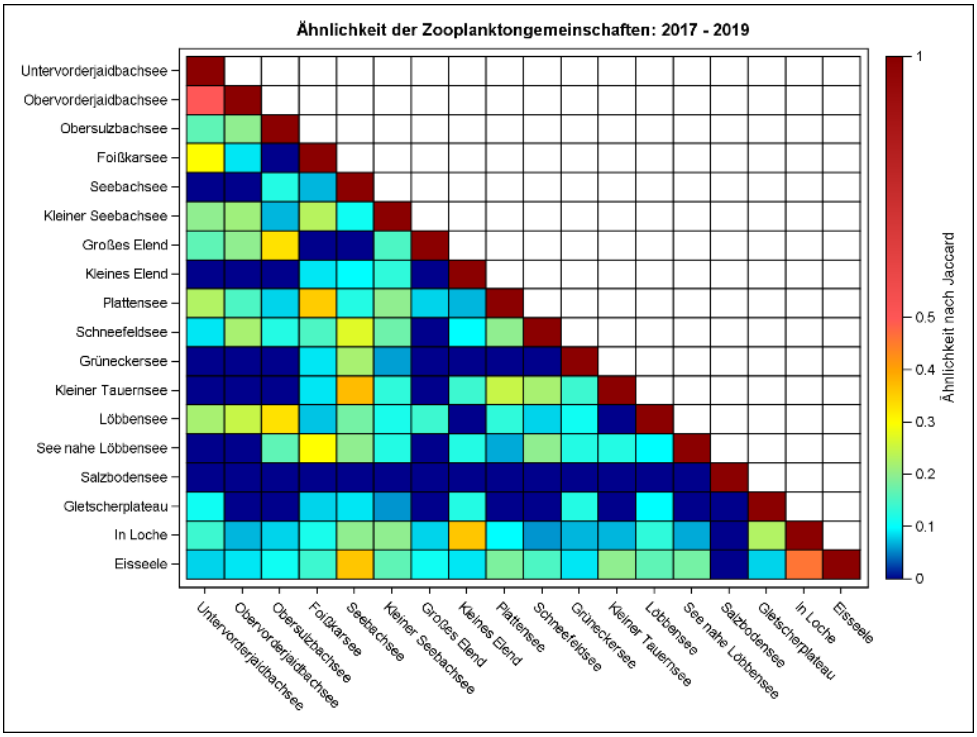

Abbildung 242: Jaccard Index zur Verdeutlichung der Ähnlichkeit bzw. der Unterschiede in der Artenzusammensetzung des Zooplanktons der beprobten Seen. Alle Seen sind sowohl auf der x- als auch auf der y-Achse aufgeführt und werden paarweise miteinander verglichen. Die Namen der Seen des Innergschlöß 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 2020 (aus den Jahren 2017 – 2019).

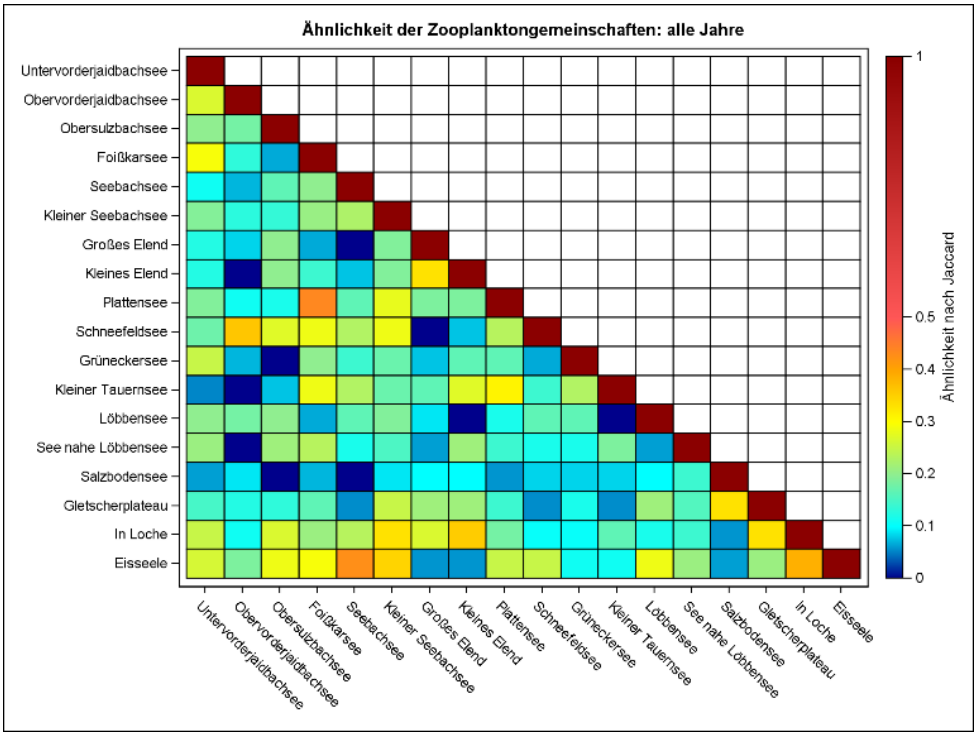

Abbildung 33: Jaccard Index zur Verdeutlichung der Ähnlichkeit bzw. der Unterschiede in der Artenzusammensetzung des Zooplanktons der beprobten Seen. Alle Seen sind sowohl auf der x- als auch auf der y-Achse aufgeführt und werden paarweise miteinander verglichen. Die Namen der Seen des Innergschlöß sind 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 aus dem gesamten Untersuchungszeitraum, also den Jahren 2017 – 2022.

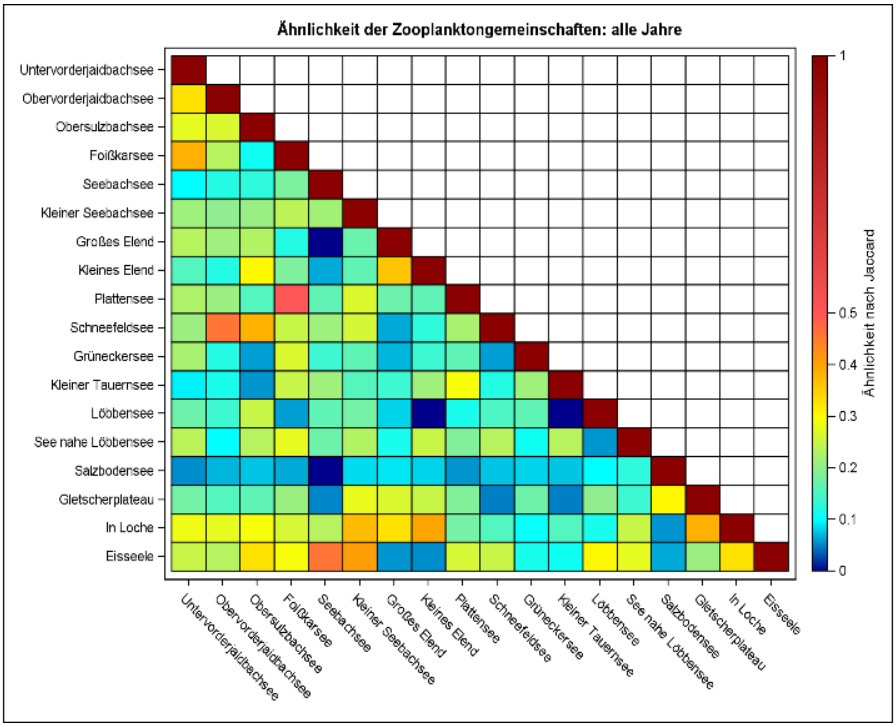

Abbildung 34: Jaccard Index zur Verdeutlichung der Ähnlichkeit bzw. der Unterschiede in der Artenzusammensetzung des Zooplanktons der beprobten Seen. Alle Seen sind sowohl auf der x- als auch auf der y-Achse aufgeführt und werden paarweise miteinander verglichen. Die Namen der Seen des Innergschlöß sind 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 aus dem gesamten Untersuchungszeitraum, also den Jahren 2017 bis einschließlich 2023.

Wir präsentieren hier drei unterschiedliche Heatmaps: eine, auf der die Ähnlichkeiten aus den ersten drei Jahren der Untersuchungen (2017 – 2019) abgebildet sind (Abb. 32), eine zweite Heatmap, die die bis einschließlich 2022 gewonnenen Daten zur Zooplanktongemeinschaft unserer Untersuchungssysteme wiedergibt (also den Untersuchungszeitraum von 2017 bis 2022, Abb. 33) sowie eine nochmals aktualisierte Version, die nun auch das Jahr 2023 mitberücksichtigt (2017 – 2023, Abb. 34). Die Skala auf den Abbildungen geht von 0 (keine Arten treten in beiden Seen eines Seenpaars auf; dies ist durch "kältere" Farben, Blautöne, verdeutlicht) bis 1 (die Proportion der gemeinsamen Arten liegt bei 100%; hier werden „wärmere" Farben, gelb – orange – rot, genutzt). Die Abbildungen zeigen eindrucksvoll, dass sich die Zooplanktongemeinschaften in den unterschiedlichen Seen offenbar annähern und ähnlicher werden, über den gesamten Untersuchungszeitraum überwiegen mittlerweile die wärmeren Farbtöne. Selbst die Hinzunahmen nur eines weiteren Jahres (Vergleich Abb. 33 mit Abb. 34) zeigt, dass dieser Trend anhält. Es ist unwahrscheinlich, dass dieses Resultat ein Artefakt (der sog. "sampling effect") ist, da auch in geringen Abundanzen auftretende distinkte Arten wie *D. longispina* in den Proben (hier: Gletscherplateausee) die Interpretationen bestätigen. Schlüssige Antworten erwarten wir uns von der molekularbiologischen Analyse unserer Proben (die Proben aus dem Jahr 2022 werden derzeit von unseren Kooperationspartnern Prof. Robert Ptacnik et al. am Wassercluster Lunz ausgewertet), die Ergebnisse liegen leider noch nicht vor. Dies wird zeigen, ob man die ansteigende Ähnlichkeit zwischen den Seen auch auf der Ebene der genetischen Diversität sehen kann.

Fazit und Ausblick

Das Langzeitmonitoring wurde mit einer Pilotphase gestartet, in der alle Methoden erprobt und/oder optimiert werden sollten. Gleichzeitig sollte aber auch kritisch evaluiert werden, ob unsere Ansätze überhaupt dazu geeignet sind, Ergebnisse zu bringen, die tatsächlich zeitliche (und räumliche) Veränderungen ausgewählter Lebensgemeinschaften bzw. Ökosysteme aufzeigen können, die mit den Klimawandelfolgen in Verbindung zu bringen sind. Bereits nach Abschluss der Pilotphase des Langzeitmonitoring wurde deutlich, dass wir die richtigen Ansätze gewählt haben, und dies konnte im Folgezeitraum 2020 bis 2022 und in einem weiteren Kampagnenjahr 2023 klar bestätigt werden. Die ausgewählten Probenstellen eignen sich perfekt als Dauerbeobachtungsflächen, denn durch ihre Lage entlang von Höhengradienten sind sie unterschiedlichen Temperaturregimen ausgesetzt, und sie repräsentieren damit Beispielsysteme entlang eines Temperaturgradienten. Darüber hinaus vermitteln die Seen einen realitätsnahen Eindruck der Bandbreite der stehenden Gewässer, die im NPHT zu finden sind. In Summe eignen sie sich als Modellsysteme, um Klimawandelfolgen zu untersuchen. Ebenso konnte bestätigt werden, dass die gewählten Methoden praktikabel, zielführend und langfristig anwendbar sind. Die Relevanz der Forschungsfragen, mit der diese Studie begonnen wurde, hat sich – man muss sagen „leider" – in den vergangenen Jahren noch erhöht, da die ökologischen, gesellschaftlichen und ökonomischen Folgen des Klimawandels immer deutlicher werden.

Inhaltlich können wir festhalten, dass sich hinsichtlich der von uns gewählten Parameter, die die Klimawandeleffekte aufzeigen sollen, mittlerweile begonnene sichtbare Trends herausbilden. Insbesondere die Veränderungen hinsichtlich der Temperatur (maximale Sommertemperatur im Wasser, Einsetzen der Schmelze), und die beobachteten Veränderungen der Zooplanktongemeinschaften deuten auf klimabedingte Veränderungen hin. Natürlich müssen diese noch sehr vorsichtig interpretiert werden, und es ist klar, dass wir nach sechs kontinuierlichen Untersuchungsjahren zwar einen Datensatz zur Verfügung haben, der ein breites Spektrum von Seen und gemessenen Parametern abgedeckt, der aber nur eine vergleichsweise kurze Zeitreihe umfasst. Es ist unerlässlich, die Untersuchungen langfristig fortzusetzen, um glaubwürdig beurteilen zu können, ob es sich hier um Zufallsbeobachtungen oder robuste Veränderungen handelt.

Zusammenfassend kann unser Eindruck nach der Pilotphase bestätigt werden, nämlich dass wir es bei den hochalpinen Seen mit sehr komplexen Ökosystemen zu tun haben. Ihre Lebensgemeinschaften, deren Gewichtung und Zusammensetzung kann man nicht an einem einzelnen Faktor festmachen. Zu den Veränderungen, die schon jetzt augenfällig sind, tragen nicht nur Klimaeffekte bei, sondern ebenso regionale Effekte, das Mikroklima jeden Standorts, und auch sog. „non-climate drivers" wie die direkten Einflüsse des Menschen (z.B. durch Tourismus), Beweidung und Fischbesatz. Die relative Bedeutung dieser Faktoren abzuwägen und Klimawandel-Effekte von anderen zu unterscheiden, bleibt Ziel der hier begonnenen Untersuchungen.

Danksagung

Die Umsetzung dieses Projekts wäre ohne die konstruktive Unterstützung vieler Institutionen und Personen nicht möglich gewesen. Ihnen möchten sehr herzlich danken. Besonders hervorheben möchten wir das Direktorium und die Verwaltung des NPHT, insbesondere Elisabeth Hainzer, Katharina Aichhorn, Barbara Hochwimmer und Martin Kurzthaler für die finanzielle, logistische und organisatorische Unterstützung, die Ranger des NPHT, die unser Team auf den Geländekampagnen sicher begleitet haben, den NPHT, die EU, und das Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus für finanzielle Unterstützung, die Paris-Lodron-Universität Salzburg (PLUS) für ihre konzeptionelle Unterstützung dieses Projektes, Dominik Ankel, Florian Hohenberger, Stefan Lienbacher, Eva Piberger, Samuel Unterberger, und David Zezula (PLUS) für ihre Beteiligung an den Geländekampagnen, sowie Eva Herzog, Jens Rüdiger, Claudia Mader und Alexandra Pitt (alle PLUS) für die Mithilfe bei der administrativen und praktischen Umsetzung der Arbeiten.

Literatur- und Quellenverzeichnis

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

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

IPCC (2001) Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press

Jersabek CD (1996) Verbretung, 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, Fernández Mendoza F, Füreder L, Grube M, Hainzer E, Kaiser R, Meyer E, Newesly C, Niedrist G, Niedrist GH, Petermann JS, Seeber J, Tappeiner U, Wickham SA (2022) Long-term monitoring of high-elevation terrestrial and aquatic ecosystems in the Alps – a five-year synthesis. eco.mont 14 (2): 44-65

Koinig KA, Schmidt R, Sommaruga-Wögrath S, Tessadri R, Psenner R (1998) Climate change as the primary cause for pH shifts in a high alpine lake. Water, Air, and Soil Pollution 104: 167-180

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

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

Nogués-Bravo D, Araújo MB, Errea MP, Martinez-Rica JP (2007) Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. Global Environmental Change 17: 420-428

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

Preston DL, Caine N, McKnight DM, Williams MW, Hell K, Miller MP, Hart SJ, Johnson PTJ (2016) Climate regulates alpine lake ice cover phenology and aquatic ecosystem structure. Geophys Res Lett 43: 5353-5360

Psenner R, Schmidt R (1992) Climate-driven pH control of remote alpine lakes and effects of acid deposition. Nature 356: 781-783

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

Shurin JB, Clasen JL, Greig HS, Kratina P, Thompson PL (2012) Warming shifts top-down and bottom-up control of pond food web structure and function. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 367: 3008-3017
Thackeray SJ (2012) Mismatch revisited: what is trophic mismatching from the perspective of the plankton? J Plankton Res: fbs066

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

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

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

Whittaker RH (1960) Vegetation of the Siskiyou mountains, Oregon and California. Ecological Monographs, 30, 279-338

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

Nationalpark Hohe Tauern

Medieninhaber und Herausgeber, Verleger:
Nationalparkrat Hohe Tauern
Kirchplatz 2, 9971 Matrei
Tel.: +43 (0) 4875 / 5112 | E-Mail: nationalparkrat@hohetauern.at

www.hohetauern.at