

BODENSEE im STRESS

**Modellierung der Folgen von Klimawandel und
invasiven Arten für das Ökosystem Bodensee als
Grundlage für ein integrales Management**

BOiSMo (Arbeitstitel)

Organigramme

&

Teilprojektbeschreibungen

Addendum zum BOiSMo Interregantrag ABH025

Lead Partner, Eawag, Dübendorf: Piet Spaak

Weitere Projektpartner:

Institut für Seenforschung (ISF): Harald Hetzenauer

Fischereiforschungsstelle Baden-Württemberg (FFS): Alexander
Brinker

Universität Konstanz (UKON): Dietmar Straile

Universität Innsbruck (UIBK): Markus Möst

Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH (kup): Ulrich Lang

Universität Hohenheim (UHOH): Klaus Schmieder

Inhaltsverzeichnis

BOiSMo Partnerstruktur und Zusammenarbeit.....	3
BOiSMo Projektstruktur	4
TP 1: ISF, Vergangene Klimaänderungen im Bodensee – Lehren für die Zukunft.	6
Projektbeteiligte: Martin Wessels, Harald Hetzenauer, promovierte wissenschaftlich tätige Person.....	6
TP 2: FFS, Folgen von Klimawandel-verursachter phänologischer Entkopplung im Nahrungsnetz des Bodensees.	10
Projektbeteiligte: Alexander Brinker, Jan Baer, promovierte wissenschaftlich tätige Person ..	10
TP 3: UKON, Einfluss von wärmeren Wintern und Neozoen auf Planktonphänologie und Nahrungsnetzinteraktionen im Bodenseeplankton.	14
Projektbeteiligte: Dietmar Straile, promovierte wissenschaftlich tätige Person.....	14
TP 4: UIBK, Wasserflohgemeinschaft im Klimawandel – Öko-evolutionäre Effekte und Konsequenzen.	18
Projektbeteiligte: Markus Möst, promovierte wissenschaftlich tätige Person	18
TP 5: kup, Prognose der klimabedingten Änderungen von Hydrodynamik und Wasserqualität im Bodensee.....	22
Projektbeteiligte: Ulrich Lang, Stefan Mirbach, Irina Weber, Rebecca Zinser	22
TP 6: UHOH, Klimafolgenabschätzung für die Flachwasserbiozönosen des Bodensees.	26
Projektbeteiligte: Klaus Schmieder, promovierte wissenschaftlich tätige Person	26
TP 7A: Eawag, How will the invasive Quagga mussels develop in a changing lake?.....	30
Project participants: Alexandra Anh-Thu Weber, Piet Spaak, PostDoc	30
TP 7A: Eawag, Wie entwickeln sich die invasiven Quaggamuscheln in einem sich verändernden See?.....	34
Projektteilnehmer: Alexandra Anh-Thu Weber, Piet Spaak, promovierte wissenschaftlich tätige Person.....	34
TP 7B: Eawag, How do climate change and nutrient fluctuations interact to affect plankton ecological interactions and ecosystem stability in Lake Constance?	39
Project participants: Francesco Pomati, PostDoc	39
TP 7B: Eawag, Wie wirken sich Klimawandel und Nährstoffschwankungen auf die ökologischen Interaktionen des Planktons und die Stabilität des Ökosystems im Bodensee aus?.....	44
Projektteilnehmer: Francesco Pomati, promovierte wissenschaftlich tätige Person	44
TP 7C: Eawag, Eindimensionale Modellierung der Folgen von Klimawandel und Invasion der Quaggamuschel für das Ökosystem Bodensee.	49
Projektbeteiligte: Martin Schmid, Damien Bouffard, promovierte wissenschaftlich tätige Person	49

BOiSMo Partnerstruktur und Zusammenarbeit

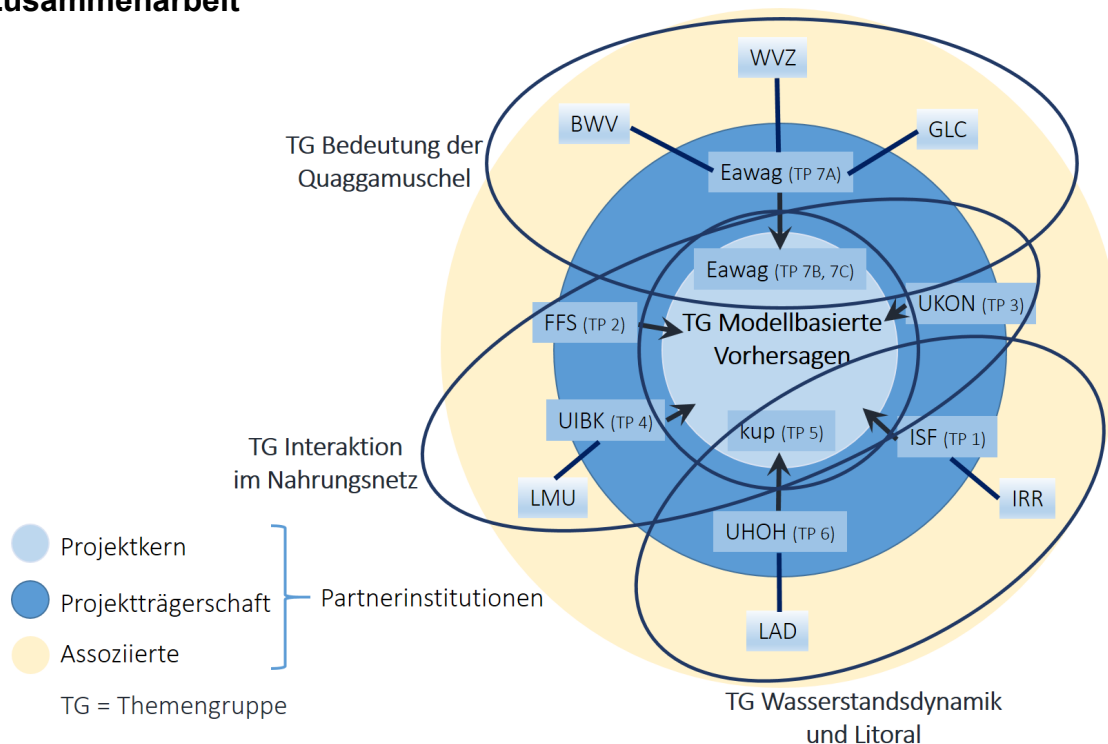


Abbildung 1. Die Vorhersage der komplexen Folgen von Faktoren wie Klimaänderungen und invasiven Arten sowie deren Zusammenspiel für das Ökosystem Bodensee und dessen Nutzung sind das Hauptziel des Projekts. Der zentrale Kern dafür sind die Modellierungsarbeiten und die enge Zusammenarbeit der internationalen Modellierungsexpertise (hellblauer Projektkern): Ingenieurbüro Prof. Kobus und Partner GmbH (kup, Teilprojekt 5, siehe detaillierte Beschreibung der geplanten Arbeiten S. 22-25); Eawag (Teilprojekte 7B [S. 39-48] und 7C [S. 49-52]). Die Bereitstellung robuster Parameter und Erkenntnisse zur Entwicklung der prognosefähigen Modellsysteme erfolgt seitens der Teams von Forschenden der entsprechenden Teilprojekte (TP): ISF (TP 1, S. 6-9), FFS (TP 2, S. 10-13), UKON (TP 3, S. 14-17), UIBK (TP 4, S. 18-21), UHOH (TP 6, S. 26-29) und Eawag (TP 7A, S. 30-38). Die Bereitstellung der Ergebnisse aus diesen TP ist grundlegend für die Entwicklung der Modelle und deswegen werden die TP als Projektkörperschaft gekennzeichnet (dunkelblau unterlegt). Die assoziierten, am Projekt beteiligten Institutionen (gelb unterlegt) sind: Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung (BWV), Stadt Zürich Wasserversorgung (WVZ), Great Lakes Center (GLC), Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU), Internationale Rheinregulierung, Rheinbauleitung (IRR) und Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart, Fachbereich Feuchtbodenarchäologie (LAD). Eine Linie verbindet sie jeweils mit einer am Projekt beteiligten Institution (Zusammenarbeit Eawag mit BWV, WVZ, GLC v. a. im Hinblick auf die Quaggamuschelproblematik; Verbindung UIBK mit LMU zum Erfahrungsaustausch und Wissenstransfer Seeökosysteme betreffend; Zusammenarbeit ISF mit IRR insbesondere im Hinblick auf mögliche Folgen z. B. von Sedimenteinträgen für den Bodensee; Zusammenarbeit UHOH mit LAD v. a. die Folgen der Änderungen in der Litoralzone für Unterwasserdenkmäler betreffend). Die Forschungsarbeiten sind in vier Themengruppen (TG) organisiert: Bedeutung der Quaggamuschel, Interaktion im Nahrungsnetz, Wasserstandsdynamik und Litoral, Modellbasierte Vorhersagen. In diesen arbeiten Forschende der direkt und assoziierten am Projekt beteiligten Institutionen und Vertretungen aus der Praxis zusammen.

BOiSMo Projektstruktur

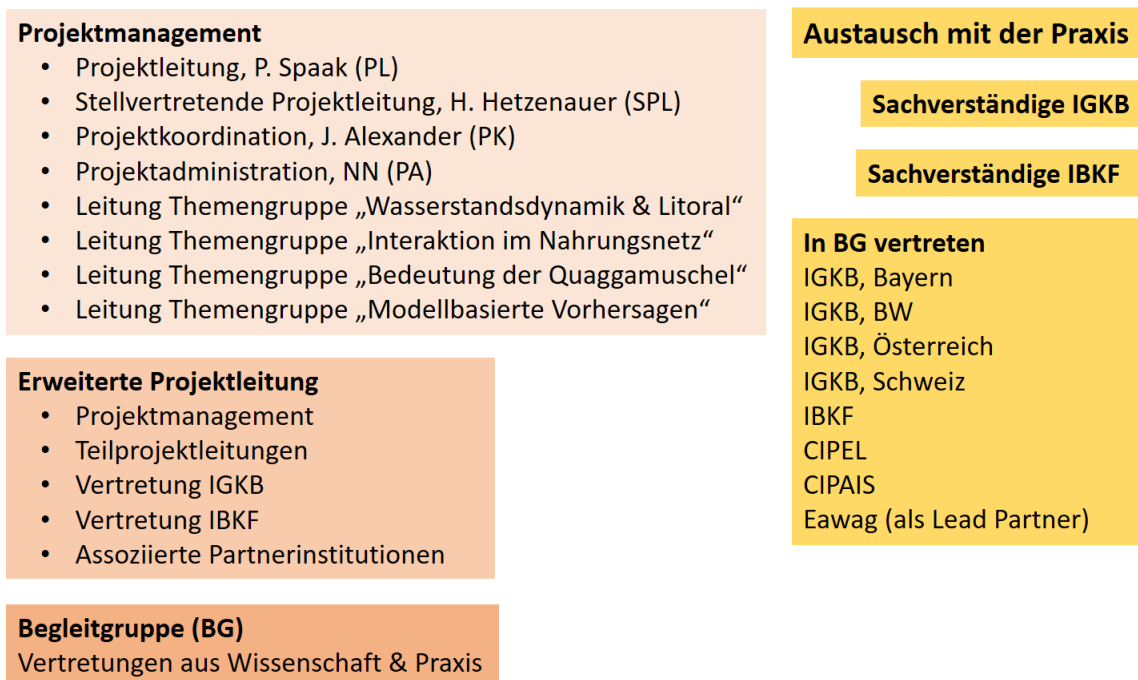


Abbildung 2. Die Projektleitung setzt sich aus dem Projektleiter Piet Spaak (Eawag) sowie seinem Stellvertreter Harald Hetzenauer (ISF) zusammen, die durch die Projektkoordination (60 % Stelle) und Projektadministration (25 % Stelle) unterstützt werden. Ebenfalls im Projektmanagementteam vertreten sind die Leitenden der vier Themengruppen. Man trifft sich regelmäßig in Videokonferenzen. Neben dem Tagesgeschäft und der Gewährleistung des Informationsflusses in die entsprechenden Gremien steuert das Projektmanagementteam die Umsetzung der Projektziele und -prinzipien sowie Presseanfragen und andere Aktivitäten im Bereich Öffentlichkeitsarbeit. Gemeinsam entwickelte Richtlinien für Datenaustausch und wissenschaftliche Zusammenarbeit dienen zudem dem Ziel der Sicherstellung einer regelkonformen Zusammenarbeit insbesondere im Hinblick auf Bereitstellung von Datensätzen für die zentralen und übergreifenden Forschungsarbeiten. Die erweiterte Projektleitung setzt sich aus dem Projektmanagementteam, den Teilprojektleitenden und Vertretungen der IGKB, IBKF sowie den assoziierten, am Projekt beteiligten Institutionen zusammen. In diesem Gremium erfolgen die strategischen Entscheide. Begleitet wird das Projekt durch Vertretungen aus Wissenschaft und Praxis, welche im Rahmen der Begleitgruppe eine beratende Funktion einnehmen und den Wissenstransfer fördern. Neben den entsandten Vertretungen aus den internationalen Bodenseekommissionen IGKB und IBKF, sind auch Vertretungen weiterer internationaler See-Kommissionen vertreten (Internationale Kommission zum Schutz der Gewässer des Genfersees - CIPEL, und Internationale Kommission zum Schutz der italienisch-schweizerischen Gewässer - CIP AIS). Geplant ist eine ein- bis zweitägige jährliche Klausur, an welcher sich alle Projektbeteiligte und beratende Organe treffen, das Projekt fortlaufend evaluiert wird und mögliche Anpassungen in der gemeinsamen fortlaufenden Projektentwicklung erfolgen.

Detailbeschreibung der 9 Teilprojekte

Addendum zum BOiSMo Interregantrag ABH025

TP 1: ISF, Vergangene Klimaänderungen im Bodensee – Lehren für die Zukunft.

Projektbeteiligte: Martin Wessels, Harald Hetzenauer, promovierte wissenschaftlich tätige Person

Einleitung:

Seesedimente sind ein hochauflösendes Archiv für Umweltänderungen, die nicht mit historischen Quellen und mit Messdaten belegt sind. Sie können darum helfen, das Ausmaß heute beobachteter Veränderungen besser zu verstehen, um sich auf zukünftige Veränderungen sinnvoll vorzubereiten. Das Teilprojekt wird erstmalig eine detaillierte Hochwasserchronologie des Bodensees und damit der Niederschlagshistorie seines alpinen Einzugsgebietes erarbeiten. Heute verwendbare neue Untersuchungsmethoden sollen gezielt genutzt werden, um die Hochwassergeschichte des Bodensees und Alpenrheins mit hohem Detaillierungsgrad in prähistorische Zeiträume zu verlängern. Damit lassen sich extreme Hochwasserereignisse und Jahre mit sehr geringen Zuflüssen durch den Alpenrhein identifizieren.

Untersuchungen von Sedimentkernen sind zudem der einzig mögliche Ansatz, um Informationen zum Ökosystem Bodensee aus messtechnisch nicht erfassten Zeiträumen zu gewinnen, und von historischen menschlichen Aktivitäten (Landnutzung, Wasserkraft, Wasserbau, Eutrophierung) unbeeinflusste Zeiträume zu analysieren. So lässt sich aus der Vergangenheit für die zukünftige Entwicklung lernen, um eine nachhaltige Entwicklung zu ermöglichen. Die Brücke in die Ökosysteme der Vergangenheit bilden Schalen von Kieselalgen, Muschelkrebse und Reste von Cladoceren, die über tausende Jahre im Sediment erhalten sein können und seit etwa 50 Jahren regelmäßig im Wasser untersucht werden. Diese Organismenreste werden in einzelnen Zeitabschnitten im Sediment bestimmt und nach Möglichkeit mit eDNA-Untersuchungen ergänzt.

Ziel 1: Eine aus Sedimenten abgeleitete Hochwasserchronologie für die letzten 5000 Jahren soll als Grundlage für Hochwasserstatistiken und -gefährdungen am Bodensee etabliert werden.

Der aktuelle Wissensstand zur Hochwasserchronologie wird von der langjährigen Pegelmesskurve am Bodensee (1817-heute), den Abflussmessungen der wesentlichen Zuflüsse (Alpenrhein, Bregenzer Ache, Argen) durch die hydrographischen Dienste der Bodenseeanrainer abgebildet (Bremicker et al. 2004). Grundlegende Beziehungen zwischen Schwebstoff- und Abfluss wurden in den 1960er Jahren erarbeitet und später von Kobus und Partner im Auftrag der Internationalen Rheinregulierung weiter ausgearbeitet (Lang & Mirbach 2021). Zudem wurden mit Sedimentuntersuchungen deutliche Veränderungen im Sedimenteintrag (Menge und Material) und ihr Zusammenhang mit kurzfristigen Klimaschwankungen (Wessels 1995, 1998) gezeigt. Die wissenschaftliche Grundlage, um aus den im See abgelagerten Sedimentmächtigkeiten und den zugehörigen Korngrößenverteilungen eine konsistente Hochwasserchronologie des Alpenrheins bzw. des alpinen Bodensee-Einzugsgebietes abzuleiten, ist darum ausgesprochen gut.

Ziel 2: Die Reaktion der aquatischen Lebensgemeinschaften auf von menschlichen Aktivitäten unbeeinflusste Klimaveränderungen der Vergangenheit soll für die Bewertung der heute beobachteten Veränderungen erfasst werden.

Klassische Verfahren (Identifizieren und Zählen von körperlich erhaltenen Organismenresten wie Diatomeen und Ostrakoden) und neue Methoden (Analyse von Organismengruppen mit sedimentären DNA-Fragmenten) wurden sehr erfolgreich verwendet, um die Veränderungen im Ökosystem Bodensee im Zuge der Trophieänderungen zu rekonstruieren (Wessels et al. 1999, Milan et al. 2022, Ibrahim et al. 2019, Wang et al. In press). Diese Verfahren sollen nun in älteren Sedimenten angewendet werden, um Reaktionen der aquatischen Lebensgemeinschaften auf natürliche Klimaveränderungen zu beschreiben.

Problemstellung/Ziele:

Ziel 1: Eine aus Sedimenten abgeleitete Hochwasserchronologie für die letzten 5000 Jahren soll als Grundlage für Hochwasserstatistiken und -gefährdungen am Bodensee etabliert werden.

Ziel 2: Die Reaktion der aquatischen Lebensgemeinschaften auf von menschlichen Aktivitäten unbeeinflusste Klimaveränderungen der Vergangenheit soll für die Bewertung der heute beobachteten Veränderungen erfasst werden.

In mehreren Teilprojekten spielen das Phyto- und Zooplankton im See als zentrale Bestandteile des Nahrungsnetzes eine wichtige Rolle. Die dort gemachten Untersuchungen müssen vor dem Hintergrund eines mehrfach stark beeinflussten Systems (Neozoen, Klimaänderungen,

Nährstoffverfügbarkeit) betrachtet und interpretiert werden. Nur mit den in diesem Teilprojekt beschriebenen Ansätzen kann analysiert werden, ob und in welchem Maß zumindest einige der wichtigen Zooplankton- und Phytoplankton-Taxa im See auf natürliche Klimaänderungen reagiert haben. Es ist deshalb eine wichtige Basis für die Aussagekraft der anderen Teilprojekte.

Arbeiten im Teilprojekt:

In einem ersten Schritt sollen in der Friedrichshafener Bucht vier möglichst lange Sedimentkerne (6-10 m) entnommen werden, die einen Zeitraum von etwa 5000 Jahren repräsentieren (Wessels 1995). Je zwei Kerne werden mit einigem Abstand voneinander entnommen um genügend Material für die Analytik zu gewinnen und um lokale Inhomogenitäten der Sedimente zu erkennen. Die Kerne werden geöffnet, dokumentiert und mit zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden weiter charakterisiert (hochauflösender line-scan, XRF zur Elementverteilung, magnetische Volumenssuszeptibilität). Möglichst aus 25-50 in einem Referenzkern verteilten Horizonten sollen Holzpartikel oder andere organische Fragmente gesammelt werden, um sie mit AMS-14C zu datieren. In das Altersmodell wird eine Zählung der individuellen Hochwasserlagen eingehängt. Zeiten mit hoher Dynamik und einer ausgeprägten Konstanz der Sedimentationsbedingungen werden repräsentativ beprobt und charakterisiert (Korngrößen, TC, TOC, C/N, Röntgendiffraktometrie) und mit den XRF-Daten interpretiert, um natürliche Klimaänderungen zu identifizieren.

An Proben aus einem bis ins Spätglazial zurückreichenden Referenzkern vom Thurgauer Seeufer der im Rahmen der Untersuchung archäologischer Strukturen („Hügeli“) untersucht wurde, werden mit hoher zeitlicher Auflösung Korngrößenverteilungen analysiert, um einen Zusammenhang mit möglichen Wasserstandsschwankungen infolge der geänderten hydrologischen Verhältnisse zu untersuchen (Leuzinger et al. 2021, Perler et al. In Vorbereitung). Sämtliche Ergebnisse der Sedimentkernanalytik werden mit den vorhandenen Ergebnissen früher entnommener Kerne (Wessels 1995, 1998) verglichen, so dass die Repräsentativität der Analysen und Aussagen gewährleistet wird.

In einem zweiten Schritt werden in Zeiten mit hoher hydrologischer bzw. klimatischer Dynamik Organismenresten in einzelnen Proben analysiert. Mit klassischen Verfahren (Diatomeen, Zooplanktonreste) und der Extraktion und Analyse von sedimentärer DNA soll die Reaktion der aquatischen Lebensgemeinschaften untersucht werden. Diese Arbeiten werden am ISF und in Zusammenarbeit mit der Universität Konstanz durchgeführt.

Milestones im Teilprojekt sind:

- die erfolgreiche Entnahme von vier mindestens 6 m langer Sedimentkerne,
- die Kernöffnung und das erfolgreiche *core-logging*
- das Etablieren eines guten Altersmodells aus AMS14C-Daten und dem Zählen von Hochwasserlagen
- Etablierung einer jahrtausendelangen Hochwasserchronologie aus den Schwebstoff-Abflussbeziehungen
- Bewertung der Spannweite von Reaktionen einzelner Organismengruppen auf natürliche Klimaveränderungen

Zu erwartende Ergebnisse:

Eine jährlich aufgelöste Abflussgeschichte des Alpenrheins mit einer zeitlichen Genauigkeit im Bereich einer Dekade.

Relevanz:

Die Hochwasserchronologie wird erstmals gut datierte Extremhochwässer und eine von anthropogenen Einflüssen unbeeinflusste Hochwasserhistorie für den Bodenseeraum für einen Zeitraum von mehreren Jahrtausenden zusammentragen. Diese kann verwendet werden, um aktuelle Planungen im Rheintal (Projekt Rhesi) oder auch die Relevanz der Bodenseewasserstände für die Siedlungsgeschichte im Bodenseeraum (Siedlungsunterbrüche der Pfahlbauer) zu bewerten. Die in der Zeitreihe dokumentierten Organismenreste bieten die einzige Möglichkeit Reaktionen der Organismengruppen auf Klimaänderungen zu untersuchen und damit die heute beobachteten Änderungen besser zu interpretieren.

Vernetzung mit anderen Projekten in BOiSMo:

In enger Zusammenarbeit mit der Firma Kobus und Partner (TP 5) werden die beobachteten Veränderungen der Sedimentationsbedingungen in „Paläo-Abflüsse“ „übersetzt“, um eine möglichst präzise und zeitlich hochauflösende Hochwasserchronologie zu rekonstruieren. Hierfür werden vorhandene Untersuchungen zum Schwebstoffeintrag durch das ISF, vorhandene Schwebstoff-

Abfluss-Beziehungen (Beauftragung von Kup durch den assoziierten Projektpartner Internationale Rheinregulierung, „IRR“) verwendet und auf die sehr langen Zeiträume in diesem Teilprojekt angepasst.

Die Untersuchungen zu möglichen Wasserstandsschwankungen bzw. den Auswirkungen hydrologischer Regimes auf die Dynamik in der Flachwasserzone werden in enger Abstimmung mit dem TP 6 (UHOH) durchgeführt. Ebenso werden Untersuchungen mit der Unterwasserkamera des ISF durchgeführt, um das Quaggauschel-Monitoring im Pelagial und Litoral (TP 6, TP 7A) zu unterstützen.

Diskutiert werden die Ergebnisse insbesondere mit dem assoziierten Projektpartner Landesamt für Denkmalpflege („LAD“), um mögliche Zusammenhänge mit prähistorischen Siedlungsphasen während des Paläolithikums zu diskutieren. Daneben wird die Hochwasserchronologie des Alpenrheins mit der IRR diskutiert, um die Bedeutung möglicher prähistorischer Extremhochwasser des Alpenrheins für den derzeit geplanten Ausbau des Alpenrheins darzustellen. Die paläolimnologischen Untersuchungen mit Hinweisen auf Veränderungen der Planktongemeinschaften werden vor allem mit den Teilprojekten 3 und 4 diskutiert.

Für die übrigen Teilprojekte im hier beschriebenen Projekt wird, je nach Bedarf, der Zugang zu sämtlichen Daten des jahrzehntelangen Monitorings des Instituts für Seenforschung im Bodensees sichergestellt. Es handelt sich um Daten zu Zooplankton und Phytoplankton (Biomassen und Abundanzen der jeweiligen Organismengruppen), Daten aus dem chemischen und physikalischen Monitoring der Wassersäule und der Zuflüsse sowie des Seebodens und der Fernerkundung.

Projektzeitplan:

Teilprojekt 1, ISF	2023		2024				2025				2026			
Vorbereitungen, Probenahme Sedimentkerne														
Hochwasserchronologie														
Paläolimnologie (Diat., Cladoc., Ostrak., eDNA)														
Berichte, Datenaustausch, Synthese Teilprojekt														

Literatur:

- Bremicker, M.; Bürgi, T.; Mathis, C. (2004): Gemeinsame Wasserstandsvorhersage der Bodensee-Anlieger; Schriftenreihe der Bundesanstalt für Gewässerkunde 6/2004, 28-33.
- Ibrahim, A.; Capo, E.; Straile, D.; Wessels, M.; Martin, I.; Meyer, A.; Schleheck, D.; Epp, L. (2021): Anthropogenic impact on the historical phytoplankton community of Lake Constance reconstructed by multimarker analysis of sediment-core environmental DNA. *Molecular Ecology* 2021: 30, 3040-3056.
- Lang, U. & Mirbach, S. (2021): Auswertung der Schwebstoff- und Sedimentdaten für den Alpenrhein, die Bregenzerach und den Bodensee in den Jahren 2019 und 2020. Unveröff. Bericht Kobus und Partner f. Internationale Rheinregulierung. 74 S.
- Leuzinger, U.; Anselmetti, F.; Benguerel, S.; Degel, C.; Ehmann, H.; Gilliard, F.; Hipp, R.; Hornung, J.; Keiser, T.; Müller, E.; Muigg, B.; Nigg, V.; Perler, D.; Schnyder, M.; Sturm, M.; Szidat, S.; Tegel, W.; Wessels, M.; Brem, H. (2021): "Hügel" im Bodensee – rätselhafte Steinschüttungen in der Flachwasserzone zwischen Romanshorn und Altnau, Kanton Thurgau (Schweiz). *Jahrbuch Archäologie Schweiz* 104, 7-22.
- Milan, M.; Albrecht, N.; Peeters, F.; Wengrat, S.; Wessels, M.; Straile, D. (2022): Clockwise hysteresis of diatoms in response to nutrient dynamics during eutrophication and recovery. *Limnol. Oceanogr.* 67 (9), 2022, 1–13; Doi: 10.1002/lno.12190.
- Perler, D.; Benguerel, S.; Brem, H.J.; Gilliard, F.; Hornung, J.; Keiser, T.; Leuzinger, U.; Schaller, S.; Vogel, H.; Wessels, M.; Anselmetti, F.S. (in Vorbereitung): Postglacial evolution of the Lake Constance shelf and its relation to a 10 km long chain of submerged neolithic mounds.
- Wang, Y.; Wessels, M.; Pedersen, M.W.; Epp, L.S. (in press): Spatial distribution of sedimentary DNA is taxon-specific and linked to local occurrence at intra-lake scale. *Communications Earth & Environment*.
- Wessels, M. (1995): Bodensee-Sedimente als Abbild von Umweltänderungen im Spät- und Postglazial. *Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie* 66, 1-105.

- Wessels, M. (1998): Late-Glacial and Postglacial sediments in Lake Constance (Germany) and their palaeolimnological implications. - in: Bäuerle, E. & Gaedke, U.: Lake Constance. Characterization of an ecosystem in transition. Archiv für Hydrobiologie Supplement 53, 411-449.
- Wessels, M.; Mohaupt, K.; Kümmerlin, R.; Lenhard, A. (1999): Reconstructing Past Eutrophication Trends from Diatoms and Biogenic Silica in the Sediment and the Pelagic Zone of Lake Constance, Germany. Journal of Paleolimnology 21, 171-192.

TP 2: FFS, Folgen von Klimawandel-verursachter phänologischer Entkopplung im Nahrungsnetz des Bodensees.

Projektbeteiligte: Alexander Brinker, Jan Baer, promovierte wissenschaftlich tätige Person

Einleitung:

Der Bodenseefelchen ist eine Schlüsselart im Nahrungsnetz des Bodensee-Obersees und gleichzeitig der Brotfisch einer der bedeutendsten Binnenfischereien Europas (Baer et al., 2017; Eckmann and Rösch, 1998). In jüngerer Zeit wird hier ein starker Rückgang im Gesamtbestand der Felchen beobachtet (Baer and Brinker, 2022). Dafür wird aktuell unter anderem die Invasion des Stichlings im Freiwasser verantwortlich gemacht (Baer et al., 2021; Roch et al., 2018). Es ist jedoch ebenfalls davon auszugehen, dass der Bestandseinbruch des Felchen durch den fortschreitenden Klimawandel (Stich and Brinker, 2010) entscheidend verstärkt wird. Daten aus aktuellen Feldarbeiten, wie wissenschaftlicher Echolotung und Versuchsfischereien lassen vermuten, dass die Felchen im Gegensatz zu früheren Zeiten (Thomas et al., 2010) mittlerweile im Sommer bevorzugt die kälteren Tiefenschichten des Sees mit sehr geringer Nahrungsdichte aufsuchen und kaum noch Nahrung zu sich nehmen (DeWeber et al., 2022). Dies wird als *turning summer into winter-Paradoxon* bezeichnet, da heute Felchen im Sommer, ihrer ehemals besten Wachstumsphase, nicht wachsen und teilweise sogar Gewicht verlieren – ein bisher nur aus den Wintermonaten bekanntes Phänomen (DeWeber et al., 2022). Zusätzlich besteht die Vermutung, dass aufgrund des erwärmenden Sees die Felcheneier heute kürzere Entwicklungszeiten aufweisen und somit erheblich früher als üblich schlüpfen. Dies ist möglicherweise für den Gesamtbestand der Felchen im See von elementarer Bedeutung, da eine aktuelle wissenschaftliche Großstudie zeigt, dass derzeit mindestens 80 % der Felchen aus Naturverlaichung stammen und Besatzmaßnahmen für maximal 20 % des Gesamtaufkommens verantwortlich sind – der Felchenbestand also entscheidend von einer funktionierenden, natürlichen Reproduktion abhängt (Baer et al., 2023). Daher besteht die Möglichkeit, dass der Klimawandel zwei gravierende Folgen für die Felchen des Bodensee-Obersees bedingt: Zum einen könnte im Sommer die Zone mit dem meisten Futter durch die hohen Wassertemperaturen vom Lebensraum der Felchen räumlich entkoppelt sein (Ogorelec et al., 2022), da diese kälteliebenden Fische die oberen, sehr warmen Wasserschichten nicht mehr zur Nahrungssuche aufsuchen können. Zum anderen ist bekannt, dass sich auch die tiefen Wasserschichten weiter erwärmen. Da sich die Entwicklung der Felcheneier bei steigender Wassertemperatur zeitlich verkürzt (Eckmann, 1987) ist es funktionell naheliegend, dass es schon heute und noch verstärkt in Zukunft zu einem verfrühten Schlupf der Felchenlarven kommt. Ist dies der Fall, könnte ggf. eine zeitliche Entkopplung bei der entscheidenden ersten Nahrungssuche vorliegen, da zu diesem frühen Zeitpunkt möglicherweise die für die Felchenlarven spezielle erste Nahrung (Rotatorien, Copepodite) im See noch nicht ausreichend zur Verfügung steht, da diese an das Aufkommen von Phytoplankton gekoppelt ist die weniger Temperatur- sondern Lichtabhängig wachsen. Dieser mögliche Klimawandel-verursachte phänologischen mismatch könnte einen Großteil der fehlenden Rekrutierung der Felchen erklären und wäre damit ein wesentlicher Ausgangspunkt für die Entwicklung wirksamer Anpassungsstrategien.

Problemstellung/Ziele:

Folgende Forschungsfragen stehen im Projektvordergrund:

- Ist durch den sich erwärmenden See die Verfügbarkeit der Nahrungsquellen für die Felchen schon heute räumlich und/oder zeitlich entkoppelt?
- Kommt es durch die steigenden Wassertemperaturen zu einem verfrühten Schlupf und/oder zu einer sehr schnellen embryonalen Entwicklung und damit zu einer Entkopplung zum Aufkommen der ersten Nahrungsquellen (Zooplankton)?
- Wie wird sich der Klimawandel langfristig auf die Ontogenie und damit auch den Bestand auswirken?

Die Bedeutung dieses Teilprojekts und dessen hoher Innovationsgehalt ist an zentrale angewandte Forschungsfragen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Nahrungsnetze und damit die Ökosystemfunktionen der großen Seen der Alpenregion gebunden. Nur eine Beantwortung dieser Fragen kombiniert mit belastbaren Zukunftsprognosen ermöglichen eine Ableitung notwendiger und wirksamer Handlungsoptionen.

Arbeiten im Teilprojekt:

In diesem Teilprojekt sollen zwei Dinge im Feld erhoben werden: a) welche Wasserschichten adulte Felchen (ein- bis mehrjährige Tiere) von Frühsommer bis Herbst aufsuchen und was sie dort fressen

bzw. welche Nahrung dort zur Verfügung steht sowie b) den Zeitpunkt des Felchenschlupfes ab Eiablage und die Entwicklung der Felchenlarven in den ersten Wochen.

Im Projekt soll ein/e Postdoktorand/in angestellt werden, der/die beide Fragestellungen intensiv bearbeitet. Im Sommer soll diese Person mit vorhandenen, hochauflösenden wissenschaftlichen Echoloten das vertikale Schwarmverhalten der Felchen aufnehmen. Dazu ist es notwendig, während der Dämmerungsphasen (der Zeit des aktiven Fressens der Felchen), über mehrere Stunden hinweg konstant die Tiefenbewegung der Felchen aufzuzeichnen. Parallel wird die Temperatur der einzelnen Wasserschichten erfasst, um eventuelle Korrelationen zum Verhalten der Tiere ableiten zu können. Außerdem erfolgen Probefischereien in den unterschiedlichen Wassertiefen, um das Signal des Echolotes mit Fängen zu validieren und Tiere für Mageninhaltsanalysen zur Verfügung zu haben. Des Weiteren sollen größere Felchen mit speziellen Datenloggern besendert werden, die hochauflösend und individuell Tiefe und Wassertemperatur im Tagesverlauf aufzeichnen. Da unklar ist, ob Felchen, die mit den eingesetzten, traditionellen Fangmethoden (Kiemennetze) gefangen werden können, sich für eine Besenderung eignen, wird eine neue Fangmethode getestet. Dazu wird eine schwimmende Großreuse eingesetzt, die bisher zum Fang von Salmoniden (Lachsartigen) und Coregonen (Felchenartigen) in der Ostsee genutzt wird. Der große Vorteil dieser Methode ist, dass sich die Fische in dieser Falle nicht verhängen (wie im Kiemennetz) und sie somit vollständig unbeschadet und wenig gestresst für eine Besenderung besser geeignet sein könnten. Felchen, die für eine Besenderung in Frage kommen, werden so schonend wie möglich besendert, ausgesetzt und nach mehreren Wochen befischt. Erfolgt ein Wiederfang, kann der Logger ausgelesen und die Temperatur- sowie Tiefenpräferenz des jeweiligen Fisches in Abhängigkeit von Tageszeit und Schichtung des Sees aufgezeigt werden. Zeitgleich werden die Projektpartner (Uni Konstanz und Innsbruck, siehe „Vernetzung mit anderen Projekten in BOiSMo“ das räumliche und zeitliche Futterangebot (Zooplankton) sowie dessen Qualität erheben. Aufgrund dieser Daten und der aus den Probefischereien zu Verfügung stehenden Felchen ist es dann erstmals möglich, mittels Mageninhaltsanalysen Rückschlüsse auf die Nahrungswahl der Felchen bei gleichzeitiger Kenntnis der Nahrungsverfügbarkeit zu ziehen.

Im Winter soll der/die Postdoktorand/in den Zeitpunkt des natürlichen Schlüpfens der Felchenlarven mit speziellen, an der FFS gebauten und bereits getesteten Lichtfallen dokumentieren. Dazu werden die Fallen in verschiedenen Stellen über unterschiedlichen Wassertiefen des Sees oberflächennah ausgebracht. Nach dem Fang kann dann Alter und Wachstum der Larve bestimmt sowie über Mageninhaltsanalysen die Nahrungswahl im Vergleich zum natürlichen Nahrungsaufkommen in den ersten Lebensmonaten untersucht werden. Außerdem erhält man so erste Hinweise zur räumlichen Nahrungssuche der Felchenlarven. Vergleichsdaten aus ersten Versuchsreihen mit diesen Fällen aus den Jahren 2021-2023 liegen vor.

Ein weiterer wichtiger Baustein in dem Projekt ist es, die Daten der Felduntersuchungen und der der Projektpartnerinstitutionen (Zooplanktondaten) zusammenzuführen, um mittels mathematischer Modelle die Entwicklung der Felchen im See heute und in Zukunft bei sich weiter ändernden Umweltbedingungen aufzuzeigen. Diese Modelle haben als Grundlage bioenergetische Konzepte sowie funktionale Populationsmodelle. Da diese Expertise nicht an der FFS und im Projektteam vorliegt (Populationsmodellierung, Bayesianische Verfahren) wird diese Aufgabe an externe Experten vergeben.

Relevanz:

Das Projekt besitzt sowohl für den Fischartenschutz, das Nahrungsnetz als auch für das angewandte fischereiliche Management der großen vor-alpinen Seen prioritäre Bedeutung. Nicht nur im Bodensee ist schon seit mehreren Jahren der Felchenbestand stark rückläufig (Rösch et al., 2018), doch die Lage spitzt sich weiter zu und insbesondere seit 2020 fangen die Berufsfischer nur noch einen Bruchteil dessen, was noch vor wenigen Jahren bzw. Jahrzehnten an Felchen angelandet wurde (Baer and Brinker, 2022). Gelingt es daher im Projekt systematisch aufzuzeigen, welchen Einfluss der Klimawandel auf die Entwicklung der Felchen hat, können vielleicht entsprechende Schutzmaßnahmen aufgrund des neuen Verständnisses der Zusammenhänge entwickelt werden. Darstellbar wäre dann der Effekt von großflächigen, tiefgreifenden Maßnahmen zur Abschwächung der Wassertemperatur des Sees (geringere Wärmefrachten und thermische Belastung). Auch schnell umsetzbare Maßnahmen könnten abgeleitet werden, wie beispielsweise eine Anpassung der Befischungsstrategien, um z. B. den Fangaufwand an die Wassertemperatur zu koppeln und ggf. bei hohen Temperaturen zu senken, um die Fische während Perioden mit Hitzestress und geringer Fraßaktivität zu schonen. Auch wären Anpassungen im Besatzmanagement vorstellbar, z. B. gezieltes Aussetzen von künstlich aufgezogenen Felchenlarven zu Zeiten mit passender Nahrungsverfügbarkeit. Diese Maßnahmen könnten somit Wege aufzeigen, die Bodenseefelchen zu schützen und darüber hinaus ihre nachhaltige Nutzung zu sichern und zu entwickeln.

Vernetzung mit anderen Projekten in BOiSMo:

Die geplanten komplexen fischökologischen Fragestellungen sind dabei eng mit weiteren biologischen Betrachtungen insbesondere auf Zooplanktonebene, den Futterorganismen der Felchen, verknüpft. Um diese Ebene mit exzellenter Fachexpertise bedienen zu können, ist die Kooperation mit den Universitäten Konstanz und Innsbruck vorgesehen. Die Beteiligten der Universität Konstanz werden den Fokus auf die saisonale und räumliche Probennahme der Zooplankter sowie deren Art- und Häufigkeitsbestimmung legen. Die Beteiligten der Universität Innsbruck nutzen einen Teil dieser Proben, um ein genetisches Profil wichtiger Nahrungsorganismen und daraus folgend Selektionsprozesse darstellen zu können, da aktuell eine Selektion in Richtung kleinwüchsiger Daphnienarten vermutet wird (Ogorelec et al., 2021). Die FFS wird keine Zooplanktondaten erheben (Vermeidung von Doppelarbeit).

Durch diese hochkarätigen Kooperationspartner, mit denen die FFS schon in anderen nationalen und internationalen Projekten (SeeWandel) effektiv zusammengearbeitet hat, ist sichergestellt, dass sowohl die erhobenen Daten wechselseitig ausgetauscht werden, als dass auch die Interpretation der Daten unter Beteiligung der Expertise aller drei beteiligten Institute erfolgen wird. Die Daten, die nach einem Abstimmungs- und Validierungsprozess Relevanz für die angestrebte Modellierung der Felchenbestände besitzen, werden an die beteiligten externen Experten weitergegeben. Des Weiteren werden alle bedeutsamen Daten, die in diesem Teilprojekt erhoben werden, den weiteren Beteiligten im hier beschriebenen Projekt zu Verfügung gestellt. Die Projektbeteiligten können dann entscheiden, ob diese Daten auch für die Modellierungen in ihren Arbeiten genutzt werden. Dadurch wird sichergestellt, dass die Daten sowohl mehrfach gesichtet und einen Qualitätscheck durchlaufen, als auch eine möglichst breite Anwendung finden.

Projektzeitplan:

Teilprojekt 2, FFS	2023		2024				2025				2026			
Feldarbeiten (Larvenfang, Besenderung, Echolotung, etc.)														
Laborarbeiten (Mageninhaltsanalysen, Zooplanktonbestimmung, etc.)														
Populationsmodellierung														
Konzeption, Datenanalyse, Entwicklung Managementoptionen														

Literatur:

- Baer, J., Brinker, A., 2022. Wieviel weniger darf's denn sein? Düstere Zukunftsaussichten für eine der größten Binnenfischereien Europas. Zeitschrift für Fischerei 13. <https://doi.org/10.35006/fischzeit.2022.17>.
- Baer, J., Eckmann, R., Rösch, R., Arlinghaus, R., Brinker, A., 2017. Managing Upper Lake Constance fishery in a multi-sector policy landscape: beneficiary and victim of a century of anthropogenic trophic change, in: Song, A.M., Bower, S.D., Onyango, P., Cooke, S.J., Chuenpagdee, R. (Eds.), Inter-Sectoral Governance of Inland Fisheries. TBTI Publication Series, E-01/2017. Too Big To Ignore-WorldFish, St. John's, Canada, pp. 32–47.
- Baer, J., Gugele, S.M., Bretzel, J., DeWeber, J.T., Brinker, A., 2021. All day-long: Sticklebacks effectively forage on whitefish eggs during all light conditions. PLOS ONE 16, e0255497. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255497>.
- Baer, J., Kugler, M., Schubert, M., Schotzko, N., Rösch, R., Vonlanthen, P., DeWeber, J.T., 2023. A matter of time – efficacy of whitefish stocking in a large pre-alpine lake. Fisheries Management and Ecology in press.
- DeWeber, J.T., Baer, J., Rösch, R., Brinker, A., 2022. Turning summer into winter: nutrient dynamics, temperature, density dependence and invasive species drive bioenergetic processes and growth of a keystone coldwater fish. Oikos, e09316. <https://doi.org/10.1111/oik.09316>.
- Eckmann, R., 1987. A comparative study on the temperature dependence of embryogenesis in three coregonids (*Coregonus* spp.) from Lake Constance. Schweizer Zeitschrift für Hydrologie. 49, 353–362.
- Eckmann, R., Rösch, R., 1998. Lake Constance fisheries and fish ecology. Advances in Limnology 53, 285–301.

- Ogorelec, Ž., Brinker, A., Straile, D., 2022. Small but voracious: invasive generalist consumes more zooplankton in winter than native planktivore. *NeoBiota* 78.
- Ogorelec, Ž., Wunsch, C., Kunzmann, A.J., Octorina, P., Navarro, J.I., 2021. Large daphniids are keystone species that link fish predation and phytoplankton in trophic cascades. *Fundamental and Applied Limnology* 4, 297–309. <https://doi.org/10.1127/fal/2020/1344>.
- Roch, S., von Ammon, L., Geist, J., Brinker, A., 2018. Foraging habits of invasive three-spined sticklebacks (*Gasterosteus aculeatus*) – impacts on fisheries yield in Upper Lake Constance. *Fisheries Research* 204, 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2018.02.014>.
- Rösch, R., Baer, J., Brinker, A., 2018. Impact of the invasive three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus*) on relative abundance and growth of native pelagic whitefish (*Coregonus wartmanni*) in Upper Lake Constance. *Hydrobiologia* 824, 243–254. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3479-6>.
- Stich, H.B., Brinker, A., 2010. Oligotrophication outweighs effects of global warming in a large, deep, stratified lake ecosystem. *Global Change Biology* 16, 877–888. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02005.x>.
- Thomas, G., Rösch, R., Eckmann, R., 2010. Seasonal and long-term changes in fishing depth of Lake Constance whitefish. *Fisheries Management and Ecology* 17, 386–393.

TP 3: UKON, Einfluss von wärmeren Wintern und Neozoen auf Planktonphänologie und Nahrungsnetzinteraktionen im Bodenseeplankton.

Projektbeteiligte: Dietmar Straile, promovierte wissenschaftlich tätige Person

Einleitung:

Durch den Klimawandel und die Einwanderung und Ausbreitung neuer Arten (Stichling und Quaggamuschel) stehen dem Bodensee tiefgreifende Veränderungen bevor. Es ist zu erwarten, dass diese Veränderungen vor allem während zweier Jahreszeiten, dem Winter und dem Hochsommer entscheidend die Schlüsselarten des Sees und damit das Nahrungsnetz des Sees beeinflussen werden – mit weitreichenden Folgen für die restliche Jahreszeit. Zum einen ist zu erwarten, dass die Klimaerwärmung zu immer wärmeren und kürzeren Wintern (im Sinne der Durchmischungsdauer) führen wird (Peeters et al. 2007, Straile et al. 2010), zum anderen werden die sommerlichen Höchsttemperaturen aufgrund von Hitzewellen (Woolway et al. 2022) für verschiedene Organismen, wie speziell die kälteliebenden Felchen, die Wachstumsbedingungen verschlechtern. Eine besondere Sorge besteht darin, inwiefern die winterliche Erwärmung dazu führt, dass sich ein sogenannter zeitlicher mismatch zwischen Beuteorganismen und Konsumenten bildet, der dazu führt, dass die jeweiligen Konsumenten weniger Nahrung auffinden können (Winder and Schindler 2004, Thackeray 2012). Erste Modelluntersuchungen für den Bodensee lassen erwarten, dass eine solche Gefahr dann bestehen kann, wenn z. B. Wintertemperaturen stärker oder weniger stark zunehmen als die Temperaturen im Frühjahr (Straile et al. 2015). Auswirkungen von wärmeren Wintern auf einen mismatch innerhalb des planktischen Nahrungsnetzes, und insbesondere die weitere Populationsentwicklung der Konsumenten, sind dagegen für den Bodensee noch kaum untersucht. Für die Hitzewellen im Sommer besteht dagegen die Gefahr eines räumlichen mismatches, d. h., dass die Felchen aufgrund der hohen Wassertemperaturen die warmen Oberflächenschichten, in denen sich ihre Beuteorganismen aufhalten (Ogorelec et al. 2022), nicht mehr aufsuchen, und so zu wenig Nahrung finden.

Die invasiven Arten beeinflussen zudem stark die Vorgänge im planktischen Nahrungsnetz während dieser Jahreszeiten und damit die klimatisch bedingten Veränderungen. So nehmen die Stichlinge dadurch Einfluss, dass sich diese auch während des Winters aktiv von Zooplankton ernähren, wogegen die Felchen zum großen Teil ihre Nahrungsaufnahme einstellen (Ogorelec et al. 2022). Der durch die Stichlinge verursachte hohe Fraßdruck auf das Zooplankton hat vermutlich dazu geführt, dass sich eine neue Daphnienart (*Daphnia cucullata*) im Bodensee durchsetzen konnte, die sich im Sommer relativ oberflächennah, d. h. in sehr warmem Wasser aufhält. Der Einfluss der in tieferen Bereichen des Bodensees siedelnden Quaggamuscheln auf die Planktongemeinschaft wird vor allem während der winterlichen Durchmischungsphase hoch sein, und damit von der Dauer der Durchmischungsphase und den Temperaturen während dieser Jahreszeit abhängen (Rowe et al. 2015).

Die mit dem Klimawandel einhergehenden Veränderungen werden vermutlich durch die Ausbreitung der neuen Arten beeinflusst, wobei noch nicht geklärt ist, inwieweit die neuen Arten die Effekte der Klimaerwärmung verstärken oder verringern. So haben die Stichlinge im Gegensatz zu den Felchen, die während des Winters weitestgehend die Nahrungsaufnahme einstellen, auch während des Winters eine relativ hohe Nahrungsaufnahme (Ogorelec et al. 2022). Je nachdem, ob die Klimaerwärmung zu geringeren oder höheren Verlusten des Planktons während des Winters führt, wird der höhere Fraßdruck der Stichlinge den klimatischen Einfluss eher verstärken oder verringern. Ebenso wird vermutlich der Einfluss der Quaggamuschel von der Länge des Winters (der Mischungsperiode) und den Wassertemperaturen während des Winters abhängen, da nur während der Mischungsperiode die in größerer Wassertiefe siedelnden Muscheln mit viel Nahrung versorgt werden.

Problemstellung/Ziele:

Die pelagische Lebensgemeinschaft des Bodensees wurde/wird mindestens durch drei Wirkgrößen (Stressoren) beeinflusst: Nährstoffrückgang, Klimawandel und invasive Arten (Stichlinge und Quaggamuschel). Wie sich diese drei Stressoren auf das Überwintern, und die Phänologie verschiedener Schlüsselarten auswirken, und ob die Auswirkungen additiv oder synergistisch sind, ist noch unbekannt. Zur Beantwortung dieser Fragen verfolgt das Teilprojekt die folgenden Ziele:

- 1) Erstellen von statistischen Modellen zur Überwinterung von Schlüsselarten in Abhängigkeit der drei Wirkfaktoren Nährstoffrückgang, Klimaerwärmung, und invasive Arten.

- 2) Erstellen von statistischen Modellen zum Einfluss und zur Interaktion der drei Wirkfaktoren auf die Phänologie und das saisonale Vorkommen von Schlüsselarten des Bodenseeplanktons (die drei *Daphnia*-Arten, die beiden räuberischen Cladoceren *Bythotrephes longimanus* und *Leptodora kindtii*, sowie von jeweils fünf noch auszuwählenden Arten des Ciliaten-, Rotatorien- und Phytoplanktons).
- 3) Erstellen eines größenbasierten Phänologiemodells, welches die gesamte planktische Lebensgemeinschaft umfasst.
- 4) In Zusammenarbeit mit Teilprojekt TP 2 und TP 4 Ermittlung des zeitlichen Überlappungsgrades (mismatch) von Zooplankton und Felchenlarven während der Frühjahrsblüte.
- 5) Ermittlung des räumlichen Überlappungsgrades verschiedener Planktonarten (und in Zusammenarbeit mit Teilprojekt TP 2) des Zooplanktons mit den Felchen im Hochsommer.
- 6) In Zusammenarbeit mit den Modellierungsgruppen Übersetzung der empirischen Modelle in dynamische Modelle, und damit Vorhersage der Dynamiken der Schlüsselarten.

Arbeiten im Teilprojekt:

Die Arbeiten im Teilprojekt umfassen die folgenden Methoden und Arbeitspakete:

AP 1) Datenaufarbeitung der Langzeitdaten der Universität Konstanz zur Analyse der empirischen Modelle (AP 2 und AP 3) und zur Bereitstellung für andere Teilprojekte.

Die Phytoplankton- und Zooplanktondaten (Crustaceen, Ciliaten, und Rotatorienzooplankton) des Limnologischen Instituts werden aufgearbeitet und mit detaillierten Metadaten versehen, so dass diese komplexen Daten inklusive aller notwendigen Detailinformationen anderen Teilprojekten zur Verfügung stehen.

→ Milestone M1: Ende 2024 Datenaufarbeitung und Metadaten-Dokumentation ist abgeschlossen.

AP 2) Entwicklung von statistischen Modellen zur Überwinterung und zur saisonalen Phänologie von Schlüsselarten in Abhängigkeit von Klimaerwärmung und Neozoen (in Abhängigkeit des Trophiegrades).

Ob und wie stark verschiedene Zooplankton- und Phytoplanktonarten während der Wintermonate (Dezember - Februar) in ihrer Häufigkeit abnehmen, und inwieweit die Abnahmerate von der Stärke der Wintermischung, den winterlichen Temperaturen, und Neozoen abhängt ist weder am Bodensee, noch in anderen Voralpenseen, bislang untersucht.

Analysen zur Phänologie liegen für den Bodensee bislang vor allem für *Daphnia* (ohne aber zwischen den *Daphnia*-Arten zu unterscheiden) (Straile et al. 2012), nicht aber für das Ciliaten- und Rotatorienplankton, oder für die räuberischen Cladoceren vor. Da Ciliaten und Rotatorien zur ersten Nahrung von Fischlarven gehören, ist die Vorhersage der Phänologie dieser Arten von großer Bedeutung für ein besseres Verständnis des Wachstums von Fischlarven. Demgegenüber sind die räuberischen Cladoceren, insbesondere *Bythotrephes* die wichtigste Nahrung der Felchen im Bodensee (Ogorelec et al. 2022) und in vielen anderen Voralpenseen. Veränderungen der Phänologie dieser Art werden das Wachstum der Felchen somit unmittelbar beeinflussen.

→ Milestone M2: statistische Modelle liegen Juli 2025 vor und werden mit Modellierungsgruppen (TP 5 und TP 7C) geteilt.

AP 3) Entwicklung eines empirischen Modells zur Größenabhängigkeit der Planktonphänologie unter Einbezug von Klimaänderung, Trophiegrad, und des Einflusses der Neozoen.

→ Milestone M3: Bericht/Publikation Dezember 2026.

Sowohl Klimawandel, als auch Nährstoffrückgang wie der Fraß der Stichlinge sollten theoretisch die Größenstruktur der planktischen Lebensgemeinschaft hin zu einer kleineren Art verändern. Dies ist problematisch, da dadurch die ökologische Effizienz, mit der die Primärproduktion der Algen die Nahrungskette entlang zu den Fischen transportiert wird, sich verringert. Ob die Größe der planktischen Arten einen systematischen Einfluss auf ihre Phänologie hat ist sowohl für den Bodensee als auch für andere Seen noch nicht bekannt, und soll in AP 3 untersucht werden. Die Ergebnisse werden wichtige Erkenntnisse für den Energiefluss durch das planktische Nahrungsnetz liefern.

AP 4) Planktonerhebungen in Zusammenarbeit mit TP 2 und TP 4.

Neben den Auswertungen der bereits vorhandenen Daten werden wir - teilweise in Zusammenarbeit mit TP 2 und TP 4 - auch neue Zooplanktondaten erheben. Diese neuen Datenerhebungen vertiefen die laufenden Routinebeprobungen des Limnologischen Instituts für spezielle Fragestellungen des Projekts:

- 1) Wir wollen während des Winters mit höherem Aufwand Zooplanktonorganismen erfassen, um deren Überwinterung besser zu verstehen, und damit auch besser vorhersagen zu können, wie der Klimawandel die Überwinterung dieser Arten beeinflussen wird. Hierzu werden wir während des Winters mit größeren Netzen im monatlichen Abstand Beprobungen durchführen und die jeweiligen Arten identifizieren. Damit werden wir besser quantifizieren können, ob die Populationszunahme der jeweiligen Arten im darauffolgenden Frühjahr durch überwinternde Organismen erklärt werden kann, oder ob das Schlüpfen von Dauereiern essenziell für das Überwintern der Arten ist.
- 2) Zusammen mit TP 4 werden wir monatliche Beprobungen der drei *Daphnia*-Arten durchführen, damit diese dann genomisch klassifiziert werden können.
- 3) Zeitgleich mit den Felchenlarven-Beprobungen von TP 2 werden wir während des Frühjahrs zeitlich hoch aufgelöst Zooplankton beproben, um damit eine etwaige zeitliche Entkopplung von Felchenlarven mit ihrer Nahrung durch den Klimawandel zu untersuchen.
- 4) Zeitgleich mit den Untersuchungen der Tiefenverteilung der Felchen im Bodensee werden wir während der Sommermonate in monatlichen Abständen die Tiefenverteilung des Zooplanktons untersuchen, um damit die potentielle räumliche Entkopplung von Felchen und Zooplankton durch die Klimaerwärmung zu analysieren.

Die Untersuchungen zu den Punkten 1, 3 und 4 werden auch das Ciliaten- und Rotatorienplankton umfassen. Die Bestimmung dieser Proben wird an ein Auftragsbüro übergeben. Bessere Daten zu Überwinterung und zur Tiefenverteilung des Zooplanktons werden auch für die Simulationsmodelle von Bedeutung sein.

→ Milestone M4: Bericht/Publikation Dezember 2026.

Relevanz:

Dieses Teilprojekt untersucht die Auswirkungen des Klimawandels auf die Überwinterung und die phänologische Reaktion der Schlüsselarten und des gesamten planktischen Nahrungsnetzes im Bodensee in einem ökosystem-basierten Ansatz. Weiterhin wird analysiert, inwieweit die Schlüsselarten und die Größenstruktur resilient gegenüber wärmeren Wintern und Sommern sind. Zusammen genommen werden wir ein empirisches Modell entwickeln, mit welchem in Abhängigkeit von der Planktongruppe und Planktongröße phänologische Veränderungen im Bodensee und anderen Seen in vergleichbaren Klimaregionen vorhergesagt werden können. Eine besondere Stärke des Projekts ist, dass für einen Großteil der geplanten Untersuchungen die weltweit einzigartigen Datensätze des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz und des Instituts für Seenforschung verwendet werden können, die teilweise auf wöchentlichen Datenerhebungen basieren.

Vernetzung mit anderen Projekten in BOiSMo:

Das Projekt wird mit den folgenden Projekten intensiv vernetzt sein:

- 1) TP 2 und TP 4: gemeinsame Probenahmen zur Zooplanktonverteilung im Frühjahr und Hochsommer, und Analyse des mismatch zwischen Zooplankton und Felchen.
- 2) TP 5 und TP 7C: Parametrisierung der Simulationsmodelle.
- 3) TP 7B: Erstellung eines konzeptionellen Planktonnetzwerkes.

Projektzeitplan:

Teilprojekt 3, Uni Konstanz	2023		2024				2025				2026			
AP 1: Datenaufbereitung der Langzeitdaten														
AP 2: Empirische Modelle der Phänologie für Schlüsselarten														
AP 3: Empirische Modell der Größenabhängigkeit der Planktonphänologie														
AP 4: Mismatch Zooplankton – Fische Datenerhebung/ Auswertung														
Berichte, Publikationen														

Literatur:

- Ogorelec Ž, Brinker A, Straile D. 2022. Small but voracious: invasive generalist consumes more zooplankton in winter than native planktivore. *NeoBiota* 78: 71–97.
- Peeters F, Straile D, Lorke A, Livingstone DM. 2007. Earlier onset of the spring phytoplankton bloom in lakes of the temperate zone in a warmer climate. *Global Change Biology* 13: 1898–1909.
- Rowe MD, Anderson EJ, Wang J, Vanderploeg HA. 2015. Modeling the effect of invasive quagga mussels on the spring phytoplankton bloom in Lake Michigan. *Journal of Great Lakes Research* 41: 49–65.
- Straile, D, R Adrian R. Daniel E Schindler DE 2012. Uniform temperature dependency in the phenology of a keystone herbivore in lakes of the Northern Hemisphere“. *PloS one* 7: e45497.
- Straile D, Kerimoglu O, Peeters F. 2015. Trophic mismatch requires seasonal heterogeneity of warming. *Ecology* 96: 2794–2805.
- Straile D, Kerimoglu O, Peeters F, Jochimsen MC, Kümmerlin R, Rinke K, Rothhaupt KO. 2010. Effects of a half a millennium winter on a deep lake - a shape of things to come? *Global Change Biology* 16: 2844–2856.
- Thackeray SJ. 2012. Mismatch revisited: what is trophic mismatching from the perspective of the plankton? *Journal of Plankton Research* 34: 1001–1010.
- Winder M, Schindler DE. 2004. Climate change uncouples trophic interactions in an aquatic ecosystem. *Ecology* 85: 2100–2106.
- Woolway RI, Albergel C, Frölicher TL, Perroud M. 2022. Severe Lake Heatwaves Attributable to Human-Induced Global Warming. *Geophysical Research Letters* 49: e2021GL097031.

TP 4: UIBK, Wasserflohgemeinschaft im Klimawandel – Öko-evolutionäre Effekte und Konsequenzen.

Projektbeteiligte: Markus Möst, promovierte wissenschaftlich tätige Person

Einleitung:

Die Konsequenzen des Klimawandels, invasive Arten und wechselseitigen Interaktionen dieser zwei Phänomene stellen uns vor große Herausforderungen. Um diese Komplexität verstehen und modellieren zu können, und um dann entsprechende Maßnahmen setzen zu können, müssen wir zuerst die Auswirkungen des Klimawandels und invasiver Arten auf die unterschiedlichen Teilkomponenten eines Ökosystems und dessen ökologische und evolutionäre Prozesse erfassen. In diesem Teilprojekt fokussieren wir hierzu auf die Wasserflohgemeinschaft (auch Daphnien genannt) und untersuchen die evolutionären und ökologischen Auswirkungen des Klimawandels und invasiver Arten auf die Daphnien – von genetischen Veränderungen einzelner Individuen bis zu den ökologischen Auswirkungen auf die Fischgemeinschaft. Die Daphniengemeinschaft wurde gewählt, da Wasserflöhe als Schlüsselorganismen in Seeökosystemen eine zentrale Stellung im Nahrungsnetz zwischen Phytoplankton und den Fischen einnehmen (Lampert, 2011; Miner et al., 2012). Durch diese zentrale Stellung, kommen Ökosystemänderungen rasch bei der Daphniengemeinschaft an und die Wasserflöhe können uns als eine Art Indikator dienen. Des Weiteren können Veränderungen in der Daphniengemeinschaft tiefgreifende Auswirkungen im Ökosystem haben. So sind Daphnien wichtige und bevorzugte Nahrung für viele Fische (Ogorelec et al., 2022a; Ogorelec et al., 2021, 2022b) und Zusammenbrüche in der Daphniengesellschaft haben in der Vergangenheit etwa zu starken Einbrüchen der Fischpopulationen geführt (Müller et al., 2007; Rellstab et al., 2007).

Die Daphnien des Bodensees eignen sich für unser Forschungsvorhaben besonders gut, da uns durch Rekonstruktionen mit Hilfe von Dauerstadien aus den Sedimenten und Monitoringprogrammen die Veränderungen der Daphniengemeinschaft über Jahrzehnte und Invasionen neuer Daphnienarten im ökologischen Kontext bekannt sind (Brede et al., 2009; Jankowski & Straile, 2003; Weider et al., 1997). Der Bodensee wurde ursprünglich von *Daphnia longispina* dominiert und erlebte im Zuge der Eutrophierung eine Invasion durch die nährstoffliebende *D. galeata*, die in der Folge zu Kreuzungen zwischen den Arten, einer Dominanz von *D. galeata* und Hybriden und einem beinahe kompletten Verschwinden von *D. longispina* führte. Mit der Reoligotrophierung wurde *D. galeata* wieder zurückgedrängt und eine neue *D. longispina* Population konnte festgestellt werden (Brede et al., 2009; SeeWandel P5, in prep.). Völlig überraschend wurde nun vor Kurzem eine neue Invasion durch *D. cucullata* im Obersee und ihre zunehmende Dominanz seit 2015 festgestellt (IGKB 2018). *D. cucullata* ist wesentlich kleiner als die zwei anderen Daphnienarten, wird daher von Fischen weniger gern gefressen und hat unter starkem Fraßdruck durch Fische daher kompetitive Vorteile (Schwenk & Spaak, 1995; Spaak & Hoekstra, 1997). Darum wird auch ein Zusammenhang zwischen der möglicherweise klimawandelbedingten Invasion des Stichlings in die Freiwasserzone und der Dominanz von *D. cucullata* in der Daphniengemeinschaft vermutet. Aber auch von anderen Veränderungen, wie der starken Erwärmung der Oberflächenschichten im See im Sommer oder den durchwegs wärmeren Wintern oder einer Interaktion mit dem Auftreten der Quaggamuschel und der veränderten Struktur des litoralen Ökosystems könnte direkt oder indirekt *D. cucullata* profitieren. Die Auswirkungen dieser *D. cucullata* Invasion sind größtenteils unklar. *D. cucullata* könnte die anderen Arten weiter verdrängen oder, da sie sich auch mit den anderen Daphnienarten im See kreuzen kann, zu einer genetischen Vermischung und starken evolutionären Veränderung der ökologisch so wichtigen Daphniengemeinschaft führen. *D. cucullata* und ihre Hybride sind kleiner als andere Arten und haben eine andere räumlich-zeitliche Verteilung im See. Diese Verschiebungen in Auftreten, Verteilung und Qualität des Nahrungsangebots lässt starke Auswirkungen auf die planktivoren Fische und insbesondere die Felchen im Bodensee erwarten.

Problemstellung/Ziele:

Ziel des Teilprojekts ist es, die Konsequenzen des Klimawandels, invasiver Arten und deren Interaktionen für die Artenzusammensetzung und Evolution der ökologisch wichtigen Daphniengemeinschaft besser zu verstehen. Wir wollen verstehen unter welchen ökologischen Bedingungen welche Arten dominieren, welche Faktoren die Zusammensetzung der Daphniengemeinschaft am stärksten beeinflussen (Stichlinge, Temperatur, Nährstoffe, Quagga) und ob die kürzlich in den Obersee eingewanderte *D. cucullata* bereits mit den anderen Arten im See hybridisiert und zu evolutionären Veränderungen der Daphniengemeinschaft führt, wie etwa, zum Beispiel, zu einer Veränderung des Größen- und Populationswachstums.

Darauf aufbauend wollen wir dann die Auswirkungen der Invasion von *D. cucullata* und daraus resultierende öko-evolutionären Veränderungen der Daphniengemeinschaft auf das Nahrungsnetz und hier vor allem die Fischgemeinschaft, insbesondere die Felchen, erfassen und verstehen. Da die unterschiedlichen Daphnienarten und Hybride verschiedene ökologische und räumliche Präferenzen haben, und auf Grund ihrer unterschiedlichen Größen und räumlichen Verteilung daher damit auch unterschiedliche Bedeutung als Nahrung für Fisch und ihre Larven haben können, benötigen wir das grundlegende Wissen welche Arten wann, wo und unter welchen ökologischen Bedingungen vorkommen. Daraus kann dann geschlossen werden wann Daphnien den Fischen als Nahrung zur Verfügung stehen und ob Klimawandel und *D. cucullata* Invasion die räumlich-zeitliche Verteilung verändert hat und es damit zu einer Entkopplung mit der saisonalen Entwicklung des Fischbestands und einem sogenannten phänotypischen mismatch gekommen ist.

Mit diesem Wissen können dann die ökologischen Konsequenzen abgeleitet und modelliert, Risiken identifiziert und Managementpläne, zum Beispiel der Fischbesatz, entsprechend angepasst werden.

Arbeiten im Teilprojekt:

Fragestellung / Hypothese

- 1.) Wie wirken sich Klimawandel und invasive Arten auf die Zusammensetzung und Evolution der Daphniengemeinschaft aus?
- 2) Welche Konsequenzen haben diese Veränderungen für die zeitlich-räumliche Verteilung, Zusammensetzung und Biomasse der Daphniengemeinschaft und damit für ihre Rolle als wichtige Nahrungskomponente für Fische und ihre Larven?
- 3) Wie verändert der Klimawandel die Interaktion der Daphniengesellschaft mit anderen trophischen Ebenen und invasiven Arten (z. B. Quagga)?

ad 1.) Wir gehen davon aus, dass der Anteil der seit 2015 invasiven *D. cucullata* an der Daphniengemeinschaft im Obersee weiter zunehmen wird. Da *D. cucullata* sowohl mit der immer noch häufig vertretenen *D. longispina* als auch mit der nun selteneren *D. galeata* hybridisieren kann, erwarten wir nun bereits auch Hybride im See. Wir erwarten, dass sich solche Hybride phänotypisch von den Parentalarten unterscheiden und unter gewissen saisonalen ökologischen Bedingungen die Gemeinschaft sogar dominieren können.

ad 2.) Da *D. cucullata* im Gegensatz zu *D. longispina* keine Vertikalwanderung durchführt und sich auch die Temperaturschichtung im See verändert hat, erwarten wir, dass sich die räumliche Verteilung der Daphnien im See verändert hat und sich saisonal mit der sich ändernden Artzusammensetzung verschiebt. Auch für Größenverteilung und Abundanzen erwarten wir Verschiebungen mit der sich ändernden Artzusammensetzungen. Die wärmer werdenden Winter, unterschiedliche Temperaturoptima der Arten und der erhöhte Fraßdruck durch den Stichling lassen starke Verschiebungen in der saisonalen Dynamik der Daphniengesellschaft erwarten. Wir erwarten einen starken Einfluss des Stichlings auf die räumlich-zeitliche Verteilung der Daphnienarten und gleichzeitig eine Entkopplung des räumlich-zeitlichen Auftretens der Daphnien und dem Auftreten bestimmter Fischarten wie den Felchen festzustellen.

ad 3.) Neben der Interaktion der Daphniengesellschaft mit dem Stichling erwarten wir auch einen Effekt der Quaggamuschel, der sich in Zukunft verstärken könnte. Die Daphnien im See sind - wie die Quaggamuschel - Filtrierer und haben unterschiedliche Ansprüche an das Nahrungsangebot. Wir erwarten, dass die zunehmende Verringerung und Verlagerung des Nahrungsangebots im Freiwasser durch die Ausbreitung der Quaggamuschel die Konkurrenz zwischen den Daphnienarten beeinflussen wird. Weiterhin gehen wir auch von einer Rolle der Wassertemperatur und einem Interaktionseffekt von Quaggamuschel und Temperatur auf die Konkurrenzverhältnisse in der Daphniengesellschaft aus.

Methoden

Um die räumlich-zeitliche Verteilung und Zusammensetzung der Daphniengemeinschaft zu verstehen, werden wir über den Projektzeitraum eine regelmäßige, mindestens monatliche Beprobung der Daphniengemeinschaft im Obersee durchführen. Stichprobenartige Probennahmen im Untersee sind ebenfalls geplant. Die Beprobung werden monatlich über das ganze Jahr erfolgen und auch Tiefenstufenfänge und Transektbeprobungen, zur Erhebung der räumlichen Verteilungsmuster, umfassen. Die Probennahmen werden dabei mit Teilprojekten 2, 3 und 6 sowie laufenden Monitorings am Bodensee eng koordiniert, um möglichst vergleichbare Daten zu Fischen, Phyto- und Zooplankton sowie Makrophytenbedeckung in den litoralen Transektanteilen zu generieren und die Anzahl an notwendigen Bootfahrten zu minimieren.

Die gesammelten Daphnien werden vermessen und zur Bestimmung der Arten, Hybriden und evolutionärer Muster wird für ein repräsentatives Subsample (>30) pro Probe die DNA aus

individuellen Tieren extrahiert und die gesamten Genome mittels short-read Illumina Sequenzieretechnologie sequenziert, bioinformatisch verarbeitet und analysiert. Für die Analyse der genomischen Daten stehen uns bereits Referenzgenome, Referenzdatensätze für die verschiedenen Arten sowie genomische Langzeitdaten aus Dauereiern aus Sedimentkernen des Bodensees für einen Vergleich mit historischen Populationen zur Verfügung. Wir planen rund 1.000 Individuen verteilt über zwei Jahre, integrativen Fängen, Tiefenstufenfängen und Transektbeprobungen zu analysieren, um ein umfassendes Bild der Artenzusammensetzung und Verteilung in Raum und Zeit erhalten. Diese Daten werden dann mit fortlaufend erhobenen abiotischen und biotischen Daten des „Standard-Bodenseemonitorings“ und Fisch- und Planktondaten aus Teilprojekten 2 und 3 zusammengeführt, um die Rolle der sich ändernden Daphniengemeinschaft als Nahrung für die Fische zu klären.

Für ein besseres Verständnis der Auswirkungen von Quaggamuschel und Temperatur auf die Konkurrenzverhältnisse der Daphnien, sind Aquarienexperimente geplant, in denen definierte Daphniengemeinschaften in Aquarien mit und ohne Muscheln bei unterschiedlichen Futter- unter Temperaturbedingungen inkubiert werden und die Veränderung der Artzusammensetzung beobachtet wird. Diese Ergebnisse werden mit Ergebnissen im Teilprojekt 7A kombiniert, um mögliche Szenarien für den Bodensee entwickeln zu können.

Durch die vorgeschlagenen Methoden und Kombination unterschiedlicher Teilprojekte erwarten wir, ein klares Bild der Veränderungen der Zusammensetzung und Verteilung der Daphniengesellschaft im Zuge des Klimawandels und des Einflusses invasiver Arten zu erhalten, ihre veränderte Rolle für die Ernährung der planktivoren Fische festzustellen und zu prognostizieren und Einblicke in gegenwärtige und zukünftige Interaktionen zwischen Daphnien, Klimawandel und invasiven Arten zu erhalten.

Milestones

- Modell der räumlich-zeitlichen Verteilung der unterschiedlichen Daphnienarten und Hybride im Bodensee.
- Genomische und morphologische Rekonstruktion der evolutionären Konsequenzen der Invasion von *D. cucullata* für die Daphniengesellschaft.
- Experimenteller Nachweis von Temperatur-, Quaggamuschel- und Interaktionseffekten auf Konkurrenz zwischen den Daphnienarten.
- Integration von Daphnien-, Plankton- und Fischdaten zur Beurteilung der Effekte einer sich verändernden Daphniengesellschaft auf die Entwicklung der Felchen.
- Berichtverfassung und Publikation der Resultate in anerkannten wissenschaftlichen Zeitschriften.

Relevanz:

Das Teilprojekt hat sehr hohe Relevanz, da es die Auswirkungen des Klimawandels und invasiver Arten auf eine Organismengruppe untersucht, die eine zentrale Rolle im Nahrungsnetz des Sees einnimmt. Damit sind Daphnien sowohl ausgezeichnete Indikatoren für Veränderungen im Nahrungsnetz, andererseits haben Veränderungen der Daphniengemeinschaft teils drastische Auswirkungen auf wirtschaftlich wichtige Fische wie den Felchen. Das Projekt hat hohen Innovationsgehalt, da es sowohl ökologische (räumlich-zeitliche Verteilung) als auch evolutionäre (Hybridisierung) Änderungen mit Hilfe genomischer Datensätze untersucht und damit den Grundstein für ein zukunftsweisendes Monitoring legt, das öko-evolutionäre Interaktion miteinbezieht. Die erhobenen Daten werden auch hohe Relevanz für die Ursachenforschung zum Rückgang der Felchen haben und zur Entwicklung nachhaltiger Managementmaßnahmen beitragen.

Vernetzung mit anderen Projekten in BOiSMo:

Dieses Teilprojekt hat starke Vernetzung mit den Teilprojekten 2 und 3. Teilprojekt 3 untersucht die saisonale Zusammensetzung des Planktons und damit den ökologischen Kontext für die öko-evolutionären Untersuchungen der Daphniengemeinschaft. Durch Kombination unserer genomischen Daten zur Daphniengemeinschaft mit Daten zur Abundanz und Zusammensetzung des Gesamtzooplanktons aus Teilprojekt 3 werden wir detaillierte Daten zu ökologischen und evolutionären Änderungen im Zooplankton mit Relevanz für den Felchen zeigen können. Um Doppelarbeiten und unnötige Bootsfahrten zu vermeiden werden wir alle Beprobungen eng abstimmen. Teilprojekt 6 werden wir bei den Transektbeprobungen eng zusammenarbeiten, um einen Einfluss der Makrophytenbedeckung auf die Daphnien zu erheben. Die Experimente mit Quaggamuscheln werden von Interaktionen mit Teilprojekt 7A profitieren. Auch eine Zusammenarbeit mit dem assoziierten Partner Prof. Herwig Stibor, einem ausgewiesenen Zooplanktonexperten, ist vorgesehen. Die erhobenen Daten zu den evolutionären und ökologischen Veränderungen der Daphniengesellschaft werden selbstverständlich für die geplanten Modellierungen in den Teilprojekten 6, 7B, 7C zur Verfügung gestellt.

Projektzeitplan:

Teilprojekt 4, Uni Innsbruck	2023		2024				2025				2026			
<i>Daphnia</i> Monitoring und Probenahmen														
Probenvorbereitung und Sequenzierung														
Bioinformatische Vorarbeiten und Analysen														
Berichte/ Publikationen														

Literatur:

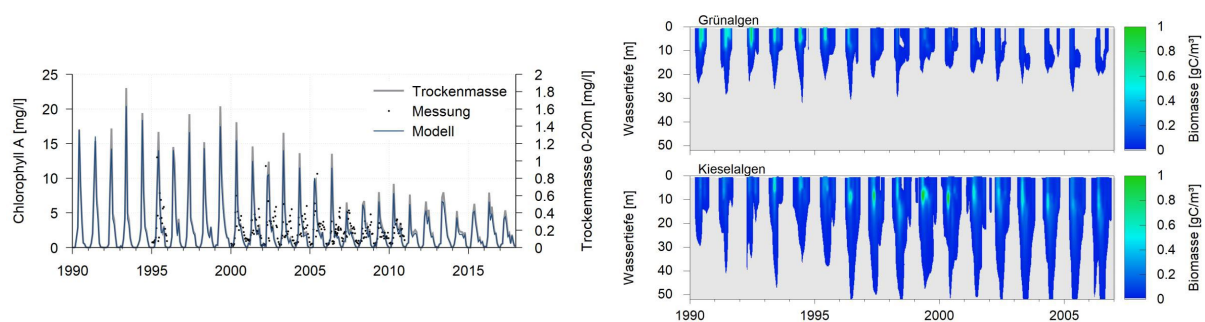
- Brede, N., Sandrock, C., Straile, D., Spaak, P., Jankowski, T., Streit, B., & Schwenk, K. (2009). The impact of human-made ecological changes on the genetic architecture of *Daphnia* species. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(12), 4758–4763. <https://doi.org/10.1073/pnas.0807187106>.
- IGKB (2018). Limnologischer Zustand des Bodensees, Grüner Bericht Nr. 42. https://www.igkb.org/fileadmin/user_upload/dokumente/publikationen/gruene_berichte/42_gb4_2gesamtbericht.pdf. Accessed 5 Oct. 2020.
- Jankowski, T., & Straile, D. (2003). A comparison of egg-bank and long-term plankton dynamics of two *Daphnia* species, *D. hyalina* and *D. galeata*: Potentials and limits of reconstruction. *Limnology and Oceanography*, 48(5), 1948–1955. <https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.5.1948>.
- Lampert, W. (2011). *Daphnia*: Development of a Model Organism in Ecology and Evolution. *Excellence in Ecology*, 21, 1–275.
- Miner, B. E., De Meester, L., Pfrender, M. E., Lampert, W., & Hairston, N. G. (2012). Linking genes to communities and ecosystems: *Daphnia* as an ecogenomic model. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1735), 1873–1882. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.2404>.
- Müller, R., Breitenstein, M., Bia, M. M., Rellstab, C., & Kirchhofer, A. (2007). Bottom-up control of whitefish populations in ultra-oligotrophic Lake Brienz. *Aquatic Sciences*, 69(2), 271–288. <https://doi.org/10.1007/s00027-007-0874-5>.
- Ogorelec, Ž., Brinker, A., & Straile, D. (2022a). Small but voracious: Invasive generalist consumes more zooplankton in winter than native planktivore. *NeoBiota*, 78, 71–97. <https://doi.org/10.3897/neobiota.78.86788>.
- Ogorelec, Ž., Rudstam, L. G., & Straile, D. (2022b). Can young-of-the-year invasive fish keep up with young-of-the-year native fish? A comparison of feeding rates between invasive sticklebacks and whitefish. *Ecology and Evolution*, 12(1), e8486. <https://doi.org/10.1002/ece3.8486>.
- Ogorelec, Ž. et al., Large daphniids are keystone species that link fish predation and phytoplankton in trophic cascades. *Fundamental and Applied Limnology*, 2021. 194: p. 297-309.
- Rellstab, C., Maurer, V., Zeh, M., Bürgi, H. R., & Spaak, P. (2007). Temporary collapse of the *Daphnia* population in turbid and ultra-oligotrophic Lake Brienz. *Aquatic Sciences*, 69, 257–270.
- Schwenk, K., & Spaak, P. (1995). Evolutionary and ecological consequences of interspecific hybridization. *Experientia*, 51(5), 465–481. <https://doi.org/10.1007/BF02143199>.
- Spaak, P., & Hoekstra, J. R. (1997). Fish predation on a *Daphnia* hybrid species complex: A factor explaining species coexistence? *Limnology and Oceanography*, 42(4), 753–762. <https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.4.0753>.
- Weider, L. J., Lampert, W., Wessels, M., Colbourne, J. K., & Limburg, P. (1997). Long-term genetic shifts in a microcrustacean egg bank associated with anthropogenic changes in the Lake Constance ecosystem. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 264(1388), 1613–1618. <https://doi.org/10.1098/rspb.1997.0225>.

TP 5: kup, Prognose der klimabedingten Änderungen von Hydrodynamik und Wasserqualität im Bodensee.

Projektbeteiligte: Ulrich Lang, Stefan Mirbach, Irina Weber, Rebecca Zinser

Einleitung:

Das Ziel des Projekts ist es zunächst die bestehende Modellierung des Nährstoffkreislaufs im Bodensee zu verbessern. Dazu wird das bestehende Modellsystem BodenseeOnline (Lang et al., 2008) verwendet. BodenseeOnline ist ein Informationssystem, das ein dreidimensionales Seemodell basierend auf dem Programmsystem DELFT3D beinhaltet und seit 2005 ständig weiterentwickelt wird. Mit dem Modellsystem werden die hydrodynamischen Prozesse abgebildet. Dies beinhaltet die saisonale Schichtungsentwicklung, die windinduzierte dreidimensionale Strömung mit internen Wellen während der Schichtungsphase, die Flusswassereinströmungen und entsprechende lokale Austauschprozesse zwischen Litoral und Pelagial (Lang et al., 2010). Die Nachbildung der relevanten hydrodynamischen Prozesse wurde anhand von zahlreichen Messinformationen sowohl kurzfristig als auch langfristig überprüft (Eder et al., 2007). Auch die Abbildung von Dichteströmen aufgrund von sedimentbeladenem Flusswasser sind anhand von Hochwasserereignissen des Alpenrheins nachgewiesen (Eder et al., 2014 und Ehrbar et al., 2015). Das bisherige Wasserqualitätsmodul DELFT3D-Waq (Deltares, 2016) berücksichtigt die relevanten Nährstoffe mit Sauerstoff und simuliert zwei Algenspezies sowie das Zooplankton als Senke für Phytoplankton. Der Austausch mit dem Sediment ist implementiert und das Modell wurde anhand langjähriger Zeitreihen überprüft. Nicht nur die Entwicklung der Gesamtmasse an Algen lässt sich mit dem Modell abbilden, sondern auch die Sukzession der Algenspezies von zunächst dominanten Grünalgen zur Erhöhung der Kieselalgenkonzentration, entsprechend den Beobachtungen in IGKB (2014).



Gemessene und berechnete Chlorophyll a-Konzentrationen gemittelt über die oberen 20 m der Wassersäule am Profil Fischbach-Uttwil.

Berechnete Konzentrationen von Grünalgen und Kieselalgen am Profil Fischbach-Uttwil.

Der im Modell implementierte Nährstoffkreislauf wird sich mit der Zunahme von invasiven Arten verschieben. Eine entsprechende Prognose der langfristigen Entwicklung ist nur mit Berücksichtigung der neuen Arten wie der Quaggamuschel möglich. Ziel ist es, für die Zukunft ein prognosefähiges Modellsystem unter Berücksichtigung der Quaggamuschel und einer verbesserten Abbildung des Planktons sowie ggf. einer Implementierung der Fische (insbesondere Stichlinge) zu entwickeln. Daran schließt sich das zweite Ziel an, mit dem Modell unter klimatisch veränderten Verhältnissen die zukünftige Entwicklung auf einer Zeitskala bis 2050 abzuschätzen.

Problemstellung/Ziele:

Für die Erreichung der Ziele ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit mit den Projektpartnerinstitutionen notwendig, da die steuernden biologischen Prozesse mathematisch beschrieben werden müssen. Dies betrifft z. B. Wachstums- und Sterberaten oder Filtrationsraten der Quaggamuschel. Da das Gesamtziel des Projekts die Abschätzung der Folgen des Klimawandels und der Einwanderung invasiver Arten für das Ökosystem Bodensee ist, muss auch die Wirkung des Klimawandels auf die saisonalen Schichtungs- und Durchmischungsverhältnisse quantifiziert werden. Deshalb wird zunächst mit dem hydrodynamischen Modell die zukünftige Schichtung und Durchmischung simuliert. Dazu werden in Abstimmung mit Teilprojekt 7C die relevanten Klimaprojektionen und die damit verbundenen meteorologischen Eingangsgrößen für das Modell ausgewählt. Zusätzlich muss gemeinsam mit Teilprojekt 7C die zukünftige hydrologische Dynamik der Zuflüsse ermittelt werden und der weitere Nährstoffeintrag abgeschätzt werden. Unter diesen Randbedingungen werden dreidimensionale instationäre Simulationsrechnung mit dem

hydrodynamischen Modell durchgeführt. Diese bilden die Basis für die weiteren Wasserqualitätsmodellierungen unter Berücksichtigung der invasiven Arten.

Im Teilprojekt 1 werden anhand von Sedimentanalysen der letzten 5.000 Jahre Informationen zu den Umwelteinflüssen erarbeitet. Diese werden verwendet, um das Modell mit diesen prähistorischen Daten zu überprüfen und Vorstellungen der Auswirkungen vergangener Hochwasserereignisse zu entwickeln.

Ein weiteres Ziel und Arbeitsschwerpunkt ist die Analyse der Auswirkungen durch Mikroverunreinigungen am Beispiel von PFOS (Perfluorooctansulfonsäure). Diese Chemikalie wurde weltweit auf Grund ihrer praktischen Eigenschaften eingesetzt, etwa als Imprägnierungsmittel in Outdoorbekleidung, zur Beschichtung von Pfannen, in Papier- und Druckerzeugnissen sowie in Löschmitteln, um nur einige wichtige Beispiele zu nennen. Mit Hilfe des Modells wird versucht eine Bilanz von PFOS anhand der verfügbaren Zuflussdaten in den Bodensee zu erarbeiten und damit die zukünftige Entwicklung der PFOS-Konzentrationen abzuschätzen. Dabei müssen Annahmen zur Akkumulation im Sediment und in der Biomasse getroffen werden.

Arbeiten im Teilprojekt:

Im Teilprojekt 5 wird als wesentliches Werkzeug das dreidimensionale instationäre Modellsystem von BodenseeOnline eingesetzt. Dieses wird weiterentwickelt und über Klimaprognosen werden die Folgen des Klimawandels auf den Bodensee abgeschätzt. Folgende Arbeitspakete werden im Teilprojekt bearbeitet:

AP 1: Ermittlung der Antriebsgrößen bis 2050: Aus Klimasimulationen werden die relevanten meteorologischen Größen wie Lufttemperatur, rel. Luftfeuchte, Strahlung und Wind entnommen. Damit kann eine verbesserte Beschreibung der klimaveränderten Meteorologie erfolgen als dies im Projekt KlimBo (Wahl et al., 2015 und Schlabin et al., 2014) der Fall war. Hierzu stehen Klimaszenarien aus dem Projekt CH2018 NCCS (2018) oder EURO-CORDEX mit einer Vielzahl verschiedener Wettermodelle, mit denen regionale Klimaberechnungen für die einzelnen Emissionsszenarien durchgeführt wurden, zur Verfügung. Zusätzlich wird anhand der Ergebnisse aus dem Projekt Hydro-CH2018 die Zuflüsse aus der Schweiz abgeschätzt.

AP 2: Klimasimulationen mit bisheriger Parametrisierung: Auf der Basis der Eingangsgrößen aus den Klimamodellierungen werden hydrodynamische Simulationen gekoppelt mit der bisherigen Parametrisierung des Nährstoffkreislaufs durchgeführt. Diese liefern Informationen zu den Schichtungs- und Durchmischungsverhältnissen sowie der räumlichen und zeitlichen Verteilung von Nährstoffen, Primärproduktion und Sauerstoff.

AP 3: Paläosimulationen: Anhand der Hochwasserchronologie aus Teilprojekt 1 werden Langzeitsimulationen zur Ausbreitung von Schwebstoffen im Bodensee durchgeführt. Die prähistorische Niederschlagsstatistik und das daraus resultierende Abflussgeschehen mit Sedimenteintrag wird als Randbedingung im grob aufgelösten Langfristmodell angesetzt. Über eine Schwebstoff- Abflussbeziehung wird der historische Sedimenteintrag in den Bodensee berücksichtigt.

AP 4: Parametrisierung Quaggamuschel: Die Quaggamuschel wird einen signifikanten Einfluss auf den Nährstoffhaushalt des Bodensees haben. Dazu muss die Filtrationswirkung der Quaggamuschel implementiert werden. Auch ist es notwendig das Wachstumsverhalten der Muschel zu integrieren. Im dreidimensionalen Modell lässt sich die Tiefen- und Flächenansiedlung differenziert beschreiben. Auch der Transport und die Konzentration von Quaggamuschellarven lässt sich im Modell implementieren. Hierzu werden entsprechende konzeptionelle Ansätze und Bandbreiten zur Parametrisierung vom Teilprojekt 7A benötigt, die in die Modellierungen der Teilprojekte 5 und 7C integriert werden. Im Rahmen einer Kalibrierung werden die Parametervorstellungen aus Teilprojekt 7A konkretisiert und mit gemessenen Verteilungen und Entwicklungen der Quaggamuschelpopulation und deren Larven verglichen.

AP 5: Parametrisierung Nahrungsnetz: Die bisherige Parametrisierung des Nahrungsnetzes ist hinsichtlich des Planktons, dem Einfluss der Quaggamuschel und den Prozessen im Litoral durch Makrophyten zu überprüfen und gemeinsam mit Teilprojekt 3, 4 und 6 zu überarbeiten. Es werden konzeptionelle Ansätze mit einer erweiterten Speziesmodellierung geprüft und in das Modell eingearbeitet. Hierzu ist eine entsprechende Kalibrierung mit den entwickelten Parameterbandbreiten notwendig. Auch der Einfluss von Fischen unter Berücksichtigung der invasiven Stichlinge ist zu analysieren und erforderlichenfalls in das Modellkonzept zu integrieren.

AP 6: Klimasimulation mit aktualisierter Parametrisierung: Nach der Überarbeitung des Modellkonzeptes und Aktualisierung der Parametrisierung der biologischen und chemischen Prozesse im Seemodell werden die Klimasimulationen aus AP 2 mit dem Wasserqualitätsmodell durchgeführt und die zukünftige Entwicklung der Nahrungskomponenten und Nährstoffe abgeschätzt. Diese Ergebnisse lassen sich mit den Simulationen der Teilprojekte 7B und 7C vergleichen, so dass entsprechende Bandbreiten abzuleiten sind. Auch für die zukünftige Entwicklung der Quaggamuschel werden sich Abschätzungen ergeben, die mit den Erfahrungen der großen Nordamerikanischen Seen verglichen werden. In Analogiestudien erfolgt eine Übertragung der Ergebnisse auf weitere voralpine Seen wie den Zürichsee.

AP 7: Simulationen zu PFAS: Am Beispiel von PFOS wird eine Bilanz für den Bodensee erstellt. Dabei werden die landesweiten Daten zu PFOS in den Zuflüssen verwendet und deren Konzentration in langfristigen Modellbetrachtungen integriert. Das Modell liefert PFOS-Konzentrationen im See, die mit Messwerten verglichen werden. Es erfolgt eine Sensitivitätsstudie zur Ablagerung im Sediment durch Adsorption an Schwebstoffen und Akkumulation in der Biomasse. Mit dieser inversen Betrachtung wird versucht den vorhandenen Senkentern dieser beiden Prozesse abzuschätzen und mit den beobachteten PFOS-Akkumulationen in Fischen und Sediment zu vergleichen.

Folgende Meilensteine sind in den einzelnen AP vorgesehen:

- M1 (Anfang 2024): Meteorologische Zeitreihen bis 2050.
- M2 (Ende 2024): Ermittlung Austauschprozesse 2050 (Tiefenwassererneuerung, Nährstoff- und Sauerstoffverteilung).
- M3 (Anfang 2026): Historische Sedimententwicklung, S3 Datenbereitstellung durch TP 1.
- M4 (Mitte 2025): Modellintegration Quaggamuschel, S4 Bereitstellung Parametrisierung durch TP 6 und TP 7A.
- M5 (Mitte 2025): Modellupdate Nahrungsnetz Phytoplankton; S5 Bereitstellung Parametrisierung durch TP 3 und TP 7B.
- M6 (Ende 2025): Modellupdate Nahrungsnetz Zooplankton; S6 Bereitstellung Parametrisierung durch TP 4, Erweiterung für Stichlinge über TP 2.
- M7 (Ende 2026): Ermittlung biologische Verhältnisse 2050.
- M8 (Ende 2024): PFOS-Bilanz Bodensee.

S3-S6: Schnittstellen zu den anderen Teilprojekten, die angeben welche Daten und Informationen zur Erstellung der Modelle benötigt werden.

Relevanz:

Bereits während des Projekts werden die Modellergänzungen in das laufende Modellsystem BodenseeOnline implementiert. Das bedeutet, dass die Fachöffentlichkeit (IGKB und Fachbehörden) bereits während der Laufzeit von den Neuentwicklungen wie verbesserter Nährstoffhaushalt und Berücksichtigung der Quaggamuschel profitieren. Auch die Ergebnisse zur PFOS-Modellierung werden der Fachöffentlichkeit während der Projektlaufzeit zur Verfügung gestellt. Die Langfristprognosen stehen der Praxis nach Abschluss des Projekts zur Verfügung. Durch Einbindung der assoziierten Partner werden diese frühzeitig über die langfristigen Entwicklungen informiert und können damit die Folgen des Klimawandels unter Berücksichtigung der neuen invasiven Arten abschätzen.

Vernetzung mit anderen Projekten in BOiSMo:

Folgende Vernetzungen mit den anderen Teilprojekten sind geplant:

- Teilprojekt 1: Übernahme der historischen Hochwasserstatistik, Einarbeitung der Hochwasserereignisse zur Simulation der paläohydrologischen Ereignisse.
- Teilprojekt 2: Übernahme der Parameterinformationen zur Entwicklung der Fische im Bodensee (Nahrungsdargebot, Wachstum der Biomasse, Entnahme durch Fischerei, Konkurrenzparameter für unterschiedliche Fischarten, wie z. B. Stichlinge und Weißfische).
- Teilprojekt 3: Parametrisierung der Planktonphänologie und Nahrungsnetzinteraktionen im Bodenseeplankton.
- Teilprojekt 4: Parametrisierung der Daphniengemeinschaft und ihre Rolle als Nahrungsquelle der Fischgemeinschaft.
- Teilprojekt 6: Einfluss der Makrophyten auf das Nahrungsnetz.
- Teilprojekt 7A: Parametrisierung der Quaggamuschel.
- Teilprojekt 7B: Vergleichswerte für die Modellierung der zukünftigen Planktonpopulationen.

Teilprojekt 7C: Bereitstellung des Modellkonzepts des Wasserqualitätsmodells und Austausch der Parametrisierungen des Wasserqualitätsmodells, Synergien zwischen 1D- und 3D-Modellierung schaffen, da Parametervariationen im 1D-Modell um ein Vielfaches schneller berechnet werden können als im 3D-Modell.

Projektzeitplan:

Teilprojekt 5, kup	2023		2024			2025				2026			
AP 1			M1										
AP 2					M2								
AP 3						S3				M3			
AP 4							S4	M4					
AP 5						S5		M5	S6	M6			
AP 6												M7	
AP 7					M8								

Literatur:

- Deltares (2016): D-Water Quality Processes Library Description. Technical Reference Manual Version 5.01, Delft (<https://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals>).
- Eder, M., Wessels, M., Dare, J. (2014): Underflows in Lake Constance – Numerical Modeling, Instrumental Observations and Sediment Data. Geophysical Research Abstracts, Vol. 16, EGU2014-10709 .
- Eder, M., Lang, U., Rinke, K. (2007): Applying 1D and 3D coupled hydrodynamic-ecological models to Lake Constance and comparison with measured data. Proceedings of the Workshop: Perspectives of Lake Modelling towards Predicting Reaction to Trophic Change.
- Ehrbar, D., Eder, M., Vetsch, D., Lang, U. (2015): Transport and propagation of fine sediment at Alpine Rhine delta and Lake Constance during floods, IAHR World Congress 2015, Den Haag NL.
- IGKB (2014): Phytoplanktonentwicklung im Bodensee von 1965 – 2007: Einfluss von trophischen und klimatischen Veränderungen. Blauer Bericht Nr. 59. Download unter www.igkb.org.
- Lang, U., Schick, R., Schröder, G. (2010): The Decision Support System BodenseeOnline for Hydrodynamics and Water Quality in Lake Constance, Decision Support Systems Advances in, INTECH, ISBN 978-953-307-069-8.
- Lang, U., Kobus, H., Mehlhorn, H. (2008): BodenseeOnline als Entscheidungs-Unterstützungssystem. In: Wasserwirtschaft 98, Heft 10, S. 45-48.
- NCCS. (2018): CH2018-Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services. Råman Vinnå, L., Medhaug, I., Schmid, M., & Bouffard, D. (2021). The vulnerability of lakes to climate change along an altitudinal gradient Communications Earth & Environment, 2.
- Schlabing, D., Frassl, M. A., Eder, M., Rinke, K., Bárdossy, A. (2014): Use of a weather generator for simulating climate change effects on ecosystems: A case study on Lake Constance. Environmental Modelling & Software. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.06.028.
- Wahl, B., Zintz, K., Fink, G., Fleig, M., Lang, U., Mirbach, S., Schick, R., Wüest, A. (2015): KlimBo – Klimawandel am Bodensee. Interreg IV-Forschungsprojekt von 2011 – 2014. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), Blaue Reihe Bericht 60. ISSN 1011-1263.

TP 6: UHOH, Klimafolgenabschätzung für die Flachwasserbiozöosen des Bodensees.

Projektbeteiligte: Klaus Schmieder, promovierte wissenschaftlich tätige Person

Einleitung:

Angesichts des laufenden Klimawandels ist auch in der Bodenseeregion mit einer Häufung von extremen Witterungsereignissen zu rechnen. Vergangene Ereignisse wie das Extremhochwasser 1999 oder die Extremtrockenheit 2003, 2018, 2020 und 2022 haben bereits gezeigt, dass sich diese Entwicklung auf die Temperaturverhältnisse sowie vor allem auf die Hydrodynamik mit Wasserstandsfluktuationen und Wellendynamik auswirken werden (Adrian et al. 2009). Dabei ist vor allem die Litoralzone in vielfältiger Weise betroffen (Murphy et al. 2018). Extreme Wasserstandsschwankungen erhöhen die Erosionsgefahr, welcher neben den Biozöosen auch Kulturdenkmäler ausgesetzt sind; extrem hohe Wassertemperaturen können zudem die Lebensbedingungen für viele Bewohner des Litorals beeinträchtigen (Hanselmann et al. 2011). Dies verringert zum einen die Diversität, greift aber auch tief ins Ökosystem ein, indem Nahrungsnetze verändert werden, vor allem wenn es Organismen trifft, die wichtige Funktionen im Nahrungsnetz ausüben. Die durch derartige Störungen entstandenen Freiflächen stellen Einwanderungspforten für Neobiota dar, welche die Vegetationsstrukturen und damit den Lebensraum für spezialisierte Tierarten verändern (Hanselmann 2011).

Problemstellung/Ziele:

Der Einfluss des Klimawandels auf die litoralen Nahrungsnetze im Bodensee und seine Folgen auf die Nahrungsnetze im Freiwasser werden erstmals in einem ökosystem-basierten Ansatz untersucht. Eine Folgenabschätzung des Klimawandels auf die Litoralzone leistet einen Beitrag zur langfristigen Sicherung ihrer ökologischen Funktionen. Zudem spielen die Produktionsvorgänge im Litoral eine zentrale Rolle für die Nahrungsnetze der Freiwasserzone, finden aber in den bislang entwickelten Modellen noch keine Berücksichtigung. Hier leistet das Teilprojekt einen grundlegenden Beitrag. Um die Auswirkungen der Klimaveränderungen abzuschätzen und Anpassungsstrategien zu entwickeln bedarf es einer soliden Datengrundlage über den Status Quo der ökologischen Verhältnisse. Für die Modellierung des gesamten Ökosystems Bodensee ist eine repräsentative Erhebung in der Litoralzone notwendig. Ebenso müssen Veränderungen der Litoralbesiedlung im Jahreslauf erfasst werden, z. B. zur Winterverbreitung der Makrophyten, die erhebliche Auswirkungen auf die Stoffflüsse, Erosion und Materialtransport der Sedimente im Litoral haben. Fundierte Daten über die Nahrungsnetze in der Litoralzone fehlen bislang. Ohne die ist eine Beurteilung der Klimafolgen auf der Basis eines ökosystembasierten Ansatzes nicht möglich. Weitere entscheidende Einflussfaktoren im Litoral - wie die weiter fortschreitende Oligotrophierung sowie Veränderungen im Nahrungsnetz durch invasive Arten/ Neobiota (Quaggamuschel, Stichling) - werden im Teilprojekt ebenfalls berücksichtigt.

Ziele des Teilprojekts:

- 1: Fernerkundungsbasierte Quantifizierung der Makrophytenbiomasse in den ausgewählten Untersuchungsgebieten und darauf aufbauender Nahrungsnetze im Litoral des Bodensees sowie deren Veränderungen im Jahresverlauf mittels Drohnenbefliegungen.
- 2: Modellbasierte Abschätzung der Veränderungen im Nahrungsnetz des Litorals infolge von klimawandelbedingten Änderungen der Wasserstandsganglinien und Wassertemperaturen.
- 3: Modellbasierte Abschätzung der Veränderungen im Freiwassernahrungsnetz infolge von klimawandelbedingten Änderungen im Nahrungsnetz des Litorals insbesondere durch invasive Arten.

Zur Erreichung der Forschungsziele sind Kooperationen mit weiteren Teilprojekten sowie externen Auftragnehmern wie der TU Wien (LiDAR-Fernerkundung), der Firma EOMAP (Spektrale Fernerkundung) sowie der AGBU (Forschungstauchende) vorgesehen.

Arbeiten im Teilprojekt:

AP 1: Erfassung der Litoralbiozönose im Jahresverlauf

Um die saisonale Entwicklung zu erfassen wird mindestens ein kompletter Jahreszyklus (inkl. Wintermonate) betrachtet. Untersucht werden verschiedene Standorte im Litoral des Bodensees, welche auf der Grundlage der Typologie der Ufermorphologie (Guzman et al. 2020) ausgewählt werden. Dabei sind auch die bereits im Projekt „SeeWandel“ untersuchten Standorte (Schmieder et al. 2022, Franke et al. Nicht publiziert) mit einbezogen, um Synergien zu nutzen. Weitere Standorte am Schweizer Südufer des Bodensees sowie im schweiz/österreichischen Bereich der

Rheinvorstreckung sind vorgesehen. Die Lagekoordinaten der Probenahmen werden per RTK-GPS dokumentiert, um dieselben Standorte im Jahreslauf wiederholt beproben zu können.

Um die Schwankungen, denen das Litoral ausgesetzt ist, besser beschreiben zu können, werden parallel im gesamten Untersuchungszeitraum an den Probestellen kontinuierlich physikalische Daten erfasst. Dazu werden mit stationären Loggern Temperatur und Lichtstärke gemessen. Der Wasserstand wird mit den Daten des Pegels Konstanz (WSV) beschrieben. Das Tiefenmodell aus dem Interreg-Projekt „Tiefenschärfe“ dient als Basis für die räumliche Modellierung der Lebensräume im Litoral.

AP 1a: Makrophyten und Makroinvertebratenbeprobung

Pro Standort werden je nach Vegetationsverhältnissen unterschiedliche Vegetationstypen (CS: Characeen kleinwüchsig, CM: Characeen mittelhoch, ES: Elodeiden kleinwüchsig, ET: Elodeiden hochwüchsig) beprobt. An allen Standorten werden die Proben von Forschungstauchenden genommen und auf dem Begleitboot bis zur Aussortierung in Kühlboxen gelagert. In den Vegetationstypen CS und CM werden mit Hilfe von Edelstahlblechrahmen Makrophyten inkl. der sich darin befindlichen Makroinvertebraten ausgestochen und in perforierte Plastikbeutel überführt. Auch in den Vegetationstypen ES und ET werden alle Makrophyten inkl. Makroinvertebraten beerntet und in perforierte Plastikbeutel überführt. Die Proben werden im Boot in Plastikflaschen überführt und mit Alkohol fixiert.

Aussortiert wird noch am Probetag im Labor, je nach besserer Erreichbarkeit im Groblabor der Universität Konstanz oder am ISF Langenargen. Makrophyten und Makroinvertebraten werden zunächst sortiert und getrennt. Von den Makrophyten wird erst das Abtropfgewicht bestimmt und nach Trocknung im Trockenschrank bei 60° C das Trockengewicht, um die Biomasse der verschiedenen Vegetationstypen zu berechnen. Die Makroinvertebraten werden nach Aussammeln in Deckelgläser vorsortiert und bis zur Bestimmung der Arten und Auszählen der Abundanz mit Alkohol fixiert.

Ergänzend werden Daten des Quaggamuschel-Monitorings (lokalisiert eher seewärts, jenseits der Halde, TP 7A, Eawag), des WRRL-Monitorings sowie des Neozoen-Monitorings (lokalisiert mehr Richtung Land, beide per Handkescher vom Ufer aus, ISF Langenargen) genutzt.

AP 1b: Erfassung der Makrophyten-assoziierten (Jung-)Fischfauna im Litoral

Mittels Unterwasserkameras der Fischereiforschungsstelle Langenargen wird im Rahmen der Felderfassungen in unterschiedlichen Vegetationstypen die Fischfauna mittels kurzen Zeitsequenzen von wenigen Minuten pro Stunde über einen Zeitraum von 24 Stunden erfasst. Die Erfassung erlaubt Aussagen über die Bedeutung unterschiedlicher Vegetationstypen sowie auch der entsprechenden Makroinvertebratenbesiedlung für die Fischfauna des Litorals und auch des Pelagials.

AP 1c: Zooplanktonbeprobung Litoral (UHOH, Universität Innsbruck)

Für TP 4 (UIBK, M. Möst) werden per Kescher pro Probenahme und Standort jeweils vier Proben der Zooplanktonbesiedlung des Litorals gewonnen, um die Bedeutung des Litorals für die Zooplanktonpopulationen des Pelagials abschätzen zu können.

AP 2: Fernerkundungsanwendungen mit Drohnen zur Erfassung der Makrophytenvegetation (Arten, Biomasse, räumliche Struktur) (UHOH, angedachte Zusammenarbeit mit EOMAP, TU Wien)

AP 2a: Laserbathymetrische Untersuchungen zur flächendeckenden Erfassung der Vertikalstruktur sowie der Primärproduktion der submersen Makrophyten im Litoral über Biovolumina und Biomasse (UHOH, angedachte Zusammenarbeit mit TU Wien)

An den o. g. Untersuchungsstandorten wird im Zuge der Feldkampagnen die Untersuchungsgebiete mit einem Lasersensor beflogen und im Verhältnis zum Tiefenmodell aus „Tiefenschärfe“ ein nDOM (normalisiertes Digitales Oberflächenmodell) der Makrophytenvegetation ermittelt. Mittels Parametrisierung aus den Feldbeprobungen der Makrophyten wird hiermit über das Makrophytenbiovolumen die Makrophytenbiomasse, und hierüber sowohl die Habitatstrukturen und die Nahrungsressourcen flächendeckend für die Untersuchungsstandorte quantifiziert. Die erfassten Parameter werden den Projektpartnern Kobus und Partner für die Modellierung bereitgestellt.

AP 2b: Klassifikation der Makrophytenarten und der räumlichen Strukturen mittels drohnenbasierter multispektraler Sensoren (UHOH, angedachte Zusammenarbeit mit EOMAP)

An den o. g. Untersuchungsstandorten wird im Zuge der Feldkampagnen die Untersuchungsgebiete per Drohne mit einem Multispektralsensor beflogen. Anhand von spektralen Signaturen, die im Projekt SeeWandel gemessen wurden, werden mittels Integration der laserbathymetrischen Daten aus AP 2a flächendeckend Vegetationstypen (ggf. Einzelarten oder Mischbestände verschiedener Arten)

klassifiziert. Hiermit werden die Makroinvertebratendaten aus AP 1 flächendeckend für die Untersuchungsstandorte hochskaliert.

AP 2c: Skalierung hochaufgelösten Drohnendaten mittels multispektraler Satellitensensoren in den Untersuchungsgebieten (UHOH, angedachte Zusammenarbeit mit EOMAP)

Die Veränderungen der Makrophytenbesiedlung der Litoralzone in den Untersuchungsgebieten im Jahreslauf werden mittels Klassifikation von multispektralen Satellitenzenen erfasst. Mittels Überlagerung der Klassifikationen mit den Ergebnissen des AP 2b wird untersucht, inwieweit mittels Drohne erfasste Strukturen auch im Satellitenbild klassifizierbar sind. Hiermit soll geprüft werden, inwieweit ein Monitoring der Makrophytenvegetation der Litoralzone auf Satellitenbasis automatisiert werden kann.

AP 3: Modellierung von Szenarien der klimabedingten Änderungen der Wasserstandsganglinien auf die Litoralbiozönose mittels GIS-Anwendungen

Auf der Basis des aktuellen Tiefenmodells der Litoralzone (Interreg Projekt „Tiefenschärfe“) werden Auswirkungen von unterschiedlichen Wasserstandsganglinien im Jahreslauf auf die für Makrophyten besiedelbare Litoralfläche und damit die potenzielle Primärproduktion geprüft. Die resultierenden Wassertiefen in den Litoralbereichen werden den Tiefenpräferenzen der verschiedenen Arten zugeordnet und Beeinträchtigungen räumlich explizit dargestellt. Dazu werden Temperatursimulationen für die entsprechenden Wassertiefen durchgeführt, um die Veränderungen der Litoralhabitate infolge extremer Witterungsperioden zu modellieren.

AP 4: Modellierung der Rolle der Primär- und Sekundärproduktion des Litorals für den Lebensraum des Pelagials (UHOH, Kobus und Partner, Eawag)

Die in den AP 1 bis 3 erhobenen Daten dienen als Grundlage für die Modellierung der Produktionsvorgänge im Litoral und deren Bedeutung für die Lebensgemeinschaften des Pelagials und werden den jeweiligen Projektpartnerinstitutionen für die Modellierung der Einflüsse des Klimawandels und von Neobiota zur Verfügung gestellt.

Milestones:

- MS 1: Arten- und Abundanzverhältnisse der Litoralbiozönose und deren Veränderungen im Jahreslauf.
- MS 2: Fernerkundliche, räumlich explizite Klassifikation der Habitatstrukturen und deren Veränderungen im Jahreslauf.
- MS 3: Räumliche und zeitliche Skalierung der Felddatenerhebungen mittels hochauflösenden Drohnen- sowie Satellitendaten.
- MS 4: Methoden für ein automatisiertes, flächenscharfes Monitoring der Litoralzone.
- MS 5: Szenarien klimabedingter Änderungen der Litoralbiozönose und deren Bedeutung für die Lebensgemeinschaften des Pelagials.
- MS 6: Handlungsempfehlungen für das Gewässermanagement der Litoralzone in Bezug auf Klimaanpassung.

Relevanz:

Die Untersuchungen leisten einen Beitrag, die klimabedingten Änderungen in den Litoralbiozönosen zu verstehen und deren Folgen für die Lebensgemeinschaften des Pelagials abzuschätzen. Die erhobenen Daten stellen einen wesentlichen Beitrag zur Parametrisierung und Validierung der Erweiterung der Modelle Hydrodynamik und Wasserqualität um die bislang nicht berücksichtigte Litoralzone. Die zentralen Ergebnisse des Teilprojekts werden in wissenschaftlichen Veröffentlichungen sowie Faktenblättern für die Wasserwirtschaft zusammengefasst. Die Fernerkundungsarbeiten stellen die Grundlage für ein automatisiertes, flächendeckendes Monitoring des ökologischen Zustandes der Litoralzone. Hieraus können Managementmaßnahmen abgeleitet werden, um die Auswirkungen des Klimawandels zu mindern.

Vernetzung mit anderen Projekten in BOiSMo:

Innerhalb des Projekts sind Kooperationen mit den Teilprojektteams der Eawag (Einfluss der Quaggamuschel), der Fischereiforschungsstelle Langenargen (Erfassung litoraler Fischpopulationen), der Universitäten Konstanz und Innsbruck (Erfassung litoraler Planktongemeinschaften), ISF (Sedimentuntersuchungen) sowie Kobus und Partner (Integration der litoralen Nahrungsnetze in die Modellierung) geplant. Die Felddatenerhebungen im vorliegenden Teilprojekt ergänzen das bisherige Quaggamuschel-Monitoring. Hierzu sind auch Transektvideoaufnahmen (Rover) der Litoralzone in Kooperation mit dem ISF Langenargen vorgesehen. Die Fischereiforschungsstelle stellt UW-Kameras

für die Erfassung der makrophytenassoziierten Fischpopulationen im Litoral zur Verfügung. Die im Teilprojekt erhobenen Daten stellen die Grundlage für die Kalibrierung und Validierung der Modelle Hydrodynamik und Wasserqualität (Kobus und Partner), welche im Rahmen des Projekts um ein Modul Litoral erweitert werden.

Die innerhalb des Teilprojekts erhobenen Daten werden selbstverständlich mit allen Teams der Projektpartnerinstitutionen geteilt. Mit verschiedenen assoziierten, am Projekt beteiligten Institutionen kooperiert das Teilprojekt eng: mit dem Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, um die Folgen der Veränderungen der litoralen Lebensgemeinschaften für die Kulturdenkmäler zu beurteilen; mit der Rheinbauleitung, um die Auswirkungen der Umgestaltung der Alpenrheinmündung auf die litoralen Lebensgemeinschaften zu untersuchen.

Projektzeitplan:

Teilprojekt 6, Universität Hohenheim	2023	2024				2025				2026			
AP 1: Erfassung Litoralbiozönose								M1					
AP 2: Fernerkundung									M2		M3	M4	
AP 3: Modellierung von Szenarien												M5	
AP 4: Modellierung Litoral-Pelagial-Kopplung													M6
Berichte, Publikationen													

Literatur:

- Adrian, R.; O'Reilly, C. M.; Zagarese, H.; Baines, S. B.; Hessen, D. O.; Keller, W. et al. (2009): Lakes as sentinels of climate change. *Limnology & Oceanography* 54 (6): 2283–2297.
- Guzman, J. & Schmieder, K. (2022): Development of a shore typology of Lake Constance (Germany) using spatial analyses. *Limnologica* 92: 11.
- Hanselmann, A. J. (2011): A review of spatio-temporal patterns of the colonisation of Lake Constance with alien Macrozoobenthos. *Lauterbornia* 72: 131–148.
- Murphy, F.; Schmieder, K.; Baastrup-Spohr, L.; Pedersen, O. & Sand-Jensen, K. (2018): Five decades of dramatic changes in submerged vegetation in Lake Constance. *Aquatic Botany* 144: 31-37.
- Schmieder, K.; Dienst, M. & Ostendorp, W. (2002): Auswirkungen des Extremhochwassers 1999 auf die Flächendynamik und Bestandsstruktur der Uferföhrichte des Bodensees. *Limnologica* 32: 131-146.

TP 7A: Eawag, How will the invasive Quagga mussels develop in a changing lake?

Project participants: Alexandra Anh-Thu Weber, Piet Spaak, PostDoc

(Diese englische Teilprojektbeschreibung ist verbindlich. Für Verständniszwecke ist eine deutsche Übersetzung nachfolgend angefügt.)

Introduction:

The freshwater Quagga mussel (*Dreissena rostriformis*) is a prime example of successful invasive species (Nalepa and Schloesser, 2013; Karatayev et al., 2015). These mussels have specific life-history traits which can explain their ecological success, such as high fecundity, early sexual maturity and capacity of settlement on various substrates (Nalepa and Schloesser, 2013; Karatayev and Burlakova, 2022). When they find suitable conditions, they can also reach extreme densities (Hetherington et al., 2019), completely transforming the structure and functioning of the benthic habitat (Botts et al., 1996).

Originating in the Ponto-Caspian region in Eastern Europe, Quagga mussels invaded North America in the 1980s with disastrous consequences for the environment and extreme management and control costs (Lovell et al., 2006; Nalepa and Schloesser, 2013). The invasion pattern is different in Western Europe, where Quagga mussels colonized western European lakes and rivers only in early 2004 (Heiler et al., 2013). It has also been shown that Quagga mussels colonized Western Europe via multiple introductions, not only from their native range in Eastern Europe but also back from North America (Marescaux et al., 2016). Hence, European populations of Quagga mussels display relatively high levels of genetic diversity (Marescaux et al., 2016), on which natural selection can act upon when Quagga mussels are facing new environmental conditions.

Quagga mussels colonized Switzerland only recently, with the first detection in the Rhine in Basel in 2014 using eDNA (De Ventura et al., 2017). They then rapidly colonized major lakes in Switzerland, with confirmed presence in Lake Geneva since 2015, Lake Constance in 2016 and Lake Neuchâtel in 2017 (Haltiner et al., 2022). In Lake Constance, Quagga mussels colonized all depths within a few years and are found in extreme densities at shallow waters (<30 m). Their presence has dramatic consequences for ecosystems and their management is very costly for a range of different stakeholders around the lake such as drinking water providers and fishermen. Lake Constance is changing under the influence of climate change, but it is unknown how Quagga mussels will develop in changing conditions such as increased water temperature, change in oxygen levels and change in phytoplankton community. Furthermore, the genetic mechanisms underlying rapid adaptation to climate change in Quagga mussels are unknown. Yet, this knowledge is essential to better predict how fast and to what extent will Quagga mussels develop in Lake Constance and in other Swiss lakes.

The general goal of this work package is to investigate Quagga mussels' resilience under different stress scenarios to predict how they will develop in a changing lake. Furthermore, this work package will provide model parameters that will allow to better predict Quagga mussel development under different climate change scenarios. This sub-project outcome is of interest for a number of different stakeholders who have to manage Quagga mussels regularly (e.g. drinking water and wastewater plant owners, fishermen, cantonal authorities).

Problem/objectives:

To understand the future development of Quagga mussels in Lake Constance, this subproject has three specific objectives:

Objective 1: Experimentally assess Quagga mussels' resilience to temperature stress and change in phytoplankton community to predict how they will develop in a changing lake.

Objective 2: Uncover the epigenetic mechanisms of rapid adaptation in Quagga mussels to uncover how fast they will adapt to changing environmental conditions.

Objective 3: Monitor yearly the distribution of Quagga mussels in Lake Constance to better predict their distribution in the future.

Work in the sub-project:

Hypotheses:

Quagga mussels are present across the whole depth of Lake Constance, and mussels from shallow (1 m) and deep (60 m) waters do not present genetic differentiation, despite presenting morphological differentiation (i.e. deep mussels display the 'profundal' type). Hence, Quagga mussels display high levels of phenotypic plasticity. Similarly, it is expected that mussels from shallow water are more

acclimatized to elevated temperatures because they naturally experience more temperature fluctuations than deep-water mussels that are below the thermocline. As a result, we hypothesize that: **(H1)** shallow-water mussels display more thermotolerance than deep-water mussels. Given the rapid acclimation potential of the Quagga mussels, we also hypothesize that: **(H2)** deep-water mussels, which survived the first thermotolerance experiment, will display similar levels of survival as shallow-water mussels in a subsequent experiment.

Furthermore, it is expected that phytoplankton communities (i.e. the mussel's food source) will change as Lake Constance warms up and as a result, the communities will become less diverse. If the Quagga mussel's food source becomes less diverse, it may have a negative impact on the mussel's growth and survival. Hence, we expect that: **(H3)** Quagga mussels from both depths grow and survive better when fed with several algae species containing different fatty acids compared to single algae community.

Finally, it has been shown that molecular chaperones (i.e. proteins involved in protein folding and protection) are involved in acclimation and rapid adaptation to elevated temperature. As a result, we expect that: **(H4)** Differential methylation analyses between shallow- and deep-water mussels will reveal that molecular chaperones are involved in thermotolerance.

Methods and expected results:

A postdoc will be hired to conduct the experimental work, laboratory work, data analyses and manuscript/report writing. We will test the impact of elevated temperature and change in phytoplankton communities on mussel growth and survival by conducting two experiments in the laboratory. We will also compare the epigenetic signatures of mussels before and after the experiments as well as in an epigenomic field study to uncover which genes are differentially methylated in response to stress. Finally, we will monitor Quagga mussel presence yearly in Lake Constance.

Experiment 1:

We will collect juvenile mussels (0.5-1 cm) from 1 m (shallow) and 60 m (deep) in Lake Constance for all experiments as they have the fastest growth rate. Mussels will be brought back alive, acclimated for two weeks at Eawag experimental facilities and shell length will be measured. Temperature will be raised by 1 °C/h until reaching the desired temperatures (18 °C). Three temperature regimes (18 °C constant - control; 26 °C constant - stress; 26 °C variable - stress) and two food conditions (single algae species; mix of algae species) will be applied to the shallow-water and deep-water mussels, for a total of 12 conditions. Three replicate tanks per condition with 100 mussels each will be set up for a total of 36 experimental tanks and 3600 mussels.

26 °C has been chosen as stress temperature as it has been shown that the prolonged upper thermal tolerance of Quagga mussels ranges between 25 °C and 27 °C (Spidle et al., 1995). 18 °C has been chosen as a control temperature that maximizes growth without stressing the mussels. For the 26 °C variable stress, mussels will experience 26 °C stress every other day with a recovery day at 18 °C in between. This variable stress is meant to better simulate natural conditions. Mussels will be fed daily either with a single algae species or a mix of algae species. The experiment will last for 6 weeks, and mussel survival will be monitored every three days. At the end of the experiment or as soon as mussels die, their growth (shell length) will be measured. Furthermore, 20 surviving individuals (10 males and 10 females) will be collected from each of the 12 conditions for DNA methylation analysis (DNA extraction, library preparation and EM-seq), for a total of 240 individuals from experiment 1.

We expect that mussels from 1 m will better survive the thermal stress than the mussels from 60 m (**H1**). We also expect an overall better survival for the 26 °C variable stress compared to the 26 °C constant stress, as mussels will have better chances to get acclimatized. Furthermore, we expect an overall fastest growth at 26 °C compared to 18 °C in both mussels from shallow and deep water. Finally, we expect an overall stronger growth with a mix of algae species compared to a single algae species in both mussels from shallow and deep water (**H3**).

Experiment 2:

Surviving mussels will be left to rest at 18 °C for 6 weeks between the first and the second experiment. The same experimental design and conditions will be applied for the second experiment with all surviving mussels. At the end of the experiment, 240 individuals will be used for DNA methylation sequencing. For this experiment, we expect that survival of deep-water and shallow-water mussels at elevated temperatures will be similar, highlighting fast acclimatization capacities of Quagga mussels (**H2**).

Epigenomic field study:

We will in parallel conduct a field study to investigate DNA methylation change over three time periods (2019, 2021, 2024), between two depths (1 m and 60 m) and between localities (2 sites in Lake Constance). We will rely on existing frozen samples from previous monitoring campaigns for the samples of the years 2019 and 2021. In 2024, we will collect 20 individuals (10 males and 10 females) per population, for a total of 240 individuals (all years, depths and localities). Individuals will be sexed by visual inspection of the gonads after dissection. For each individual, we will perform DNA extraction, DNA quality control and DNA methylation library preparation.

Sequencing and bioinformatics:

All 720 libraries will be pooled and sequenced on two 25B flowcells of Illumina Novaseq X Plus (15,000 G data output; 13x average coverage per individual). Data will be analysed on the HPC cluster Euler of the ETHZ. Differential methylation analyses will be conducted using MethylKit in R. We expect to uncover genes and functions involved in rapid adaptation to thermotolerance, including molecular chaperones (H4).

Quagga mussel monitoring:

Quagga mussels will be monitored yearly in Lake Constance at 54 stations using the methodology developed by Karatayev et al. (2021), a combination of grab sampling and image analyses.

Milestones: (see project schedule)

We aim to complete fieldwork and experimental work by the end of 2024. Lab work and sequencing will be completed by mid-2025, and bioinformatics and data analyses by mid-2026. We will publish the results of this research in two publications in international peer-reviewed journals (one before the end of 2025 and one in mid-2026). Finally, we will update of the Quagga mussel factsheet regularly (first update early 2024 to be published in German, Italian and French) and write a report for stakeholders (in German and in French) that will be published in 2026 (general update of the Quagga mussel problematic, monitoring results of Lake Constance and major project results).

Relevance:

This project is relevant and unique because it uses a combination of stresses (temperature and food) to understand future adaptation of Quagga mussels. Furthermore, it not only aims at investigating phenotypic resilience of mussels (survival and growth) under stress, but also understanding the underlying genetic mechanisms which will allow to better predict future Quagga mussel evolution. Results will be combined with yearly field surveys, so that the future impact of Quagga mussels under different climate scenarios can be modelled. Furthermore, the Quagga modelling results in Lake Constance may help understanding invasion dynamics in other lakes. Finally, the project outcomes (reports for stakeholders) will be of high interest for local authorities (e.g. Federal Office for the Environment, Cantons).

Networking with other projects within and outside BOiSMo:

We are planning to collaborate with Pomati (Eawag) to better understand future phytoplankton dynamics and with the team of Karatayev (USA) who is an expert on Quagga mussel invasion in the USA. We will as well provide important biological data of the Quagga mussel that will be used for the modelling by Kobus und Partner, and Schmid and Bouffard (Eawag) to model future consequences for Lake Constance. There will also be a constant exchange of information with the drinking water companies of Zurich and Bodensee (Sippligen). All data resulting from this project will be made available to the other project partners.

The group of Spaak has been working on Quagga mussels for several years (Haltiner et al. 2022, Haltiner et al. 2023, Zhang et al. 2023, Kraemer et al. submitted). The work on Lake Constance was carried out as part of the project "SeeWandel", while the work on other lakes (Lake Geneva, Lake Biel, Lake Maggiore, Lake Lugano) was carried out in collaboration with the Swiss Federal Office for the Environment (FOEN) and the Swiss Expert Committee for Biosafety. The work proposed here will be carried out in close collaboration with the ongoing project „Development of a Quagga Mussel Protection and Monitoring Concept for Switzerland for the coming 10 - 15 years". This project, supervised by the "Cercle Exotique Arbeitsgruppe aquatische Neobiota", will exchange and share knowledge and experience with the proposed project so that both sides benefit.

Project schedule:

Sub-project 7A, Eawag, Weber	2023		2024				2025				2026			
Quagga mussel monitoring														
Sampling experimental animals														
Thermotolerance and food experiments														
Lab work and sequencing for genomics														
Bioinformatics and data analyses														
Factsheet (F) / Report (R) for stakeholders, Publikationen (P)				F1					P1			P2		R1

Literature:

- Botts, P. S., Patterson, B. A., and Schloesser, D. W. (1996). Zebra mussel effects on benthic invertebrates: physical or biotic? *Journal of the North American Benthological Society* 15, 179–184. Doi: 10.2307/1467947.
- De Ventura, L., Kopp, K., Seppälä, K., and Jokela, J. (2017). Tracing the quagga mussel invasion along the Rhine river system using eDNA markers: early detection and surveillance of invasive zebra and quagga mussels. *Management of Biological Invasions* 8, 101.
- Haltiner, L., Rossbacher, S., Alexander, J., Dennis, S. R., and Spaak, P. (2023). Life in a changing environment: dreissenids' feeding response to different temperatures. *Hydrobiologia*, In Press.
- Haltiner, L., Zhang, H., Anneville, O., De Ventura, L., De Weber, J. T., Hesselschwerdt, J., et al. (2022). The distribution and spread of quagga mussels in perialpine lakes north of the Alps. *Aquatic Invasions* 17, In press.
- Heiler, K. C., Bij de Vaate, A., Ekschmitt, K., von Oheimb, P. V., Albrecht, C., and Wilke, T. (2013). Reconstruction of the early invasion history of the quagga mussel (*Dreissena rostriformis bugensis*) in Western Europe. *Aquatic Invasions* 8, 53–57.
- Hetherington, A. L., Rudstam, L. G., Schneider, R. L., Holeck, K. T., Hotaling, C. W., Cooper, J. E., et al. (2019). Invader invaded: population dynamics of zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) and quagga mussels (*Dreissena rostriformis bugensis*) in polymictic Oneida Lake, NY, USA (1992–2013). *Biological Invasions* 21, 1529–1544. Doi: 10.1007/s10530-019-01914-0.
- Karatayev, A. Y., and Burlakova, L. E. (2022). What we know and don't know about the invasive zebra (*Dreissena polymorpha*) and quagga (*Dreissena rostriformis bugensis*) mussels. *Hydrobiologia*, first on-line <https://doi.org/10.1007/s10750-022-04950-5>.
- Karatayev, A. Y., Burlakova, L. E., Mehler, K., Hinchey, E. K., Wick, M., Bakowska, M., et al. (2021). Rapid assessment of *Dreissena* population in Lake Erie using underwater videography. *Hydrobiologia* 848, 2421–2436. Doi: 10.1007/s10750-020-04481-x.
- Karatayev, A. Y., Burlakova, L. E., and Padilla, D. K. (2015). Zebra versus quagga mussels: a review of their spread, population dynamics, and ecosystem impacts. *Hydrobiologia* 746, 97–112.
- Kraemer, B. M., Boudet, S., Burlakova, L. E., Haltiner, L., Ibelings, B. W., Karatayev, A. Y., Karatayev, V. A., Rossbacher, S., Stöckli, R., Straile, D., and Spaak, P. submitted. An abundant future for quagga mussels in deep European lakes. *Environmental Research Letters* bioRxiv 2023.05.31.543086. Doi: <https://doi.org/10.1101/2023.05.31.543086>.
- Lovell, S. J., Stone, S. F., and Fernandez, L. (2006). The economic impacts of aquatic invasive species: a review of the literature. *Agricultural and Resource Economics Review* 35, 195–208. Doi: 10.1017/S1068280500010157.
- Marescaux, J., von Oheimb, K., Etoundi, E., von Oheimb, P. V., Albrecht, C., Wilke, T., et al. (2016). Unravelling the invasion pathways of the quagga mussel (*Dreissena rostriformis*) into Western Europe. *Biological Invasions* 18, 245–264.
- Nalepa, T. F., and Schloesser, D. W. (2013). Quagga and zebra mussels: biology, impacts, and control. CRC press.
- Spidle, A. P., May, B., and Mills, E. L. (1995). Limits to tolerance of temperature and salinity in the quagga mussel (*Dreissena bugensis*) and the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 52, 2108–2119. Doi: 10.1139/f95-804.
- Zhang, H., Haltiner, L., Kaeser, S., Dennis, S. R., Rothhaupt, K.-O., Kraemer, B. M., and Spaak, P. (2023). Veliger density and environmental conditions control quagga mussel colonization rates in two perialpine lakes. *Journal of Great Lakes Research*.

TP 7A: Eawag, Wie entwickeln sich die invasiven Quaggamuscheln in einem sich verändernden See?

(DeepL Übersetzung ohne weitere ausführliche Prüfung. Die englische Beschreibung [siehe oben] ist verbindlich.)

Projektteilnehmer: Alexandra Anh-Thu Weber, Piet Spaak, promovierte wissenschaftlich tätige Person

Einleitung:

Die Süßwasser-Quaggamuschel (*Dreissena rostriformis*) ist ein Paradebeispiel für eine erfolgreiche invasive Art (Nalepa und Schloesser, 2013; Karatayev et al., 2015). Diese Muscheln verfügen über spezifische lebensgeschichtliche Merkmale, die ihren ökologischen Erfolg erklären können, z. B. eine hohe Fertilität, eine frühe Geschlechtsreife und die Fähigkeit, sich auf verschiedenen Substraten niederzulassen (Nalepa und Schloesser, 2013; Karatayev und Burlakova, 2022). Wenn sie geeignete Bedingungen vorfinden, können sie auch extreme Dichten erreichen (Hetherington et al., 2019) und die Struktur und Funktion des benthischen Lebensraums vollständig verändern (Botts et al., 1996).

Ursprünglich aus der ponto-kaspischen Region in Osteuropa stammend, drangen die Quaggamuscheln in den 1980er Jahren nach Nordamerika ein, was katastrophale Folgen für die Umwelt und extreme Kosten für die Bewirtschaftung und Bekämpfung hatte (Lovell et al., 2006; Nalepa und Schloesser, 2013). In Westeuropa ist das Invasionsmuster anders: Quaggamuscheln besiedelten die westeuropäischen Seen und Flüsse erst Anfang 2004 (Heiler et al., 2013). Es hat sich auch gezeigt, dass die Quaggamuschel Westeuropa über mehrere Einschleppungen kolonisiert hat, nicht nur aus ihrem ursprünglichen Verbreitungsgebiet in Osteuropa, sondern auch aus Nordamerika (Marescaux et al., 2016). Daher weisen die europäischen Populationen der Quaggamuschel eine relativ hohe genetische Vielfalt auf (Marescaux et al., 2016), auf die die natürliche Selektion einwirken kann, wenn Quaggamuscheln mit neuen Umweltbedingungen konfrontiert werden.

Quaggamuscheln haben die Schweiz erst vor Kurzem besiedelt, wobei sie erstmals 2014 im Rhein in Basel mittels eDNA nachgewiesen wurden (De Ventura et al., 2017). Danach kolonisierten sie rasch die großen Seen in der Schweiz, wobei ihr Vorkommen im Genfersee seit 2015, im Bodensee seit 2016 und im Neuenburgersee seit 2017 bestätigt wurde (Haltiner et al., 2022). Im Bodensee haben sich Quaggamuscheln innerhalb weniger Jahre in allen Tiefen angesiedelt und sind in extremen Dichten in flachen Gewässern (<30 m) zu finden. Ihr Vorhandensein hat dramatische Folgen für die Ökosysteme, und ihre Folgen sind für eine Reihe verschiedener Interessengruppen rund um den See, wie Trinkwasserversorger und Fischer, sehr kostspielig. Der Bodensee verändert sich unter dem Einfluss des Klimawandels, aber es ist nicht bekannt, wie sich die Quaggamuscheln unter den veränderten Bedingungen wie erhöhter Wassertemperatur, verändertem Sauerstoffgehalt und veränderter Phytoplanktongemeinschaft entwickeln werden. Außerdem sind die genetischen Mechanismen, die der schnellen Anpassung der Quaggamuscheln an den Klimawandel zugrunde liegen, unbekannt. Dieses Wissen ist jedoch wichtig, um besser vorhersagen zu können, wie schnell und in welchem Umfang sich Quaggamuscheln im Bodensee und in anderen Schweizer Seen entwickeln werden.

Das allgemeine Ziel dieses Teilprojekts ist es, die Widerstandsfähigkeit von Quaggamuscheln unter verschiedenen Stressszenarien zu untersuchen, um vorherzusagen, wie sie sich in einem sich verändernden See entwickeln werden. Darüber hinaus wird dieses Teilprojekt Modellparameter bereitstellen, die eine bessere Vorhersage der Entwicklung der unter verschiedenen Szenarien des Klimawandels ermöglichen. Dieses Teilprojektergebnis erweist sich für diverse Interessensgruppen als relevant, die in regelmäßigem Kontakt mit Quaggamuscheln stehen. Hierzu zählen beispielsweise Betreiber von Trinkwasser- und Abwasseranlagen, Fischer sowie staatliche Behörden auf kantonaler Ebene.

Problem/Zielsetzung:

Um die zukünftige Entwicklung der Quaggamuschel im Bodensee zu verstehen, hat dieses Teilprojekt drei spezifische Ziele:

Ziel 1: Experimentelle Bewertung der Widerstandsfähigkeit von Quaggamuscheln gegenüber Temperaturstress und Veränderungen der Phytoplanktongemeinschaft, um vorherzusagen, wie sie sich in einem sich verändernden See entwickeln werden.

Ziel 2: Aufdeckung der epigenetischen Mechanismen der schnellen Anpassung bei Quaggamuscheln, um herauszufinden, wie schnell sie sich an veränderte Umweltbedingungen anpassen werden.

Ziel 3: Jährliche Überwachung der Verbreitung von Quaggamuscheln im Bodensee, um ihre künftige Verbreitung besser vorhersagen zu können.

Arbeit im Teilprojekt:

Hypothesen:

Quaggamuscheln kommen in der gesamten Tiefe des Bodensees vor und Muscheln aus flachen (1 m) und tiefen (60 m) Gewässern weisen keine genetische Differenzierung auf, obwohl sie sich morphologisch unterscheiden (d. h. tiefe Muscheln weisen den „profunda“-Typ auf). Quaggamuscheln weisen also ein hohes Maß an phänotypischer Plastizität auf. Ebenso wird erwartet, dass Muscheln aus flachen Gewässern besser an höhere Temperaturen akklimatisiert sind, da sie natürlicherweise mehr Temperaturschwankungen ausgesetzt sind als Tiefwassermuscheln, die sich unterhalb der Sprungschicht befinden. Daraus ergibt sich die Hypothese, dass: **(H1)** Flachwassermuscheln eine höhere Thermotoleranz aufweisen als Tiefwassermuscheln. In Anbetracht des schnellen Akklimatisierungspotenzials der Quaggamuscheln gehen wir außerdem davon aus, dass: **(H2)** Tiefwassermuscheln, die das erste Thermotoleranz-Experiment überlebt haben, in einem Folgeexperiment eine ähnliche Überlebensrate aufweisen wie Flachwassermuscheln.

Außerdem wird erwartet, dass sich die Phytoplankton-Gemeinschaften (d. h. die Nahrungsquelle der Muschel) mit der Erwärmung des Bodensees verändern werden, was zu einer geringeren Vielfalt der Gemeinschaften führen wird. Wenn die Nahrungsquelle der Quaggamuschel weniger vielfältig wird, kann dies negative Auswirkungen auf das Wachstum und Überleben der Muschel haben. Daher erwarten wir, dass: **(H3)** Quaggamuscheln aus beiden Tiefen wachsen und besser überleben, wenn sie mit mehreren Algenarten gefüttert werden, die unterschiedliche Fettsäuren enthalten, im Vergleich zu einer einzelnen Algengemeinschaft.

Schließlich hat sich gezeigt, dass molekulare Chaperone (d. h. Proteine, die an der Faltung und dem Schutz von Proteinen beteiligt sind) an der Akklimatisierung und schnellen Anpassung an erhöhte Temperaturen beteiligt sind. Infolgedessen erwarten wir, dass: **(H4)** Differenzielle Methylierungsanalysen zwischen Flach- und Tiefwassermuscheln werden zeigen, dass molekulare Chaperone an der Thermotoleranz beteiligt sind.

Methoden und erwartete Ergebnisse:

Für die Durchführung der Experimente, die Laborarbeit, die Datenanalyse und das Verfassen von Manuskripten/Berichten wird ein/e PostdoktorandIn eingestellt. Wir werden die Auswirkungen erhöhter Temperaturen und veränderter Phytoplanktongemeinschaften auf das Wachstum und Überleben von Muscheln in zwei Laborexperimenten untersuchen. Außerdem werden wir die epigenetischen Signaturen von Muscheln vor und nach den Experimenten sowie in einer epigenomischen Feldstudie vergleichen, um herauszufinden, welche Gene als Reaktion auf Stress unterschiedlich methyliert sind. Schließlich werden wir das Vorkommen der Quaggamuschel im Bodensee jährlich überwachen.

Versuch 1:

Für alle Experimente werden wir Jungmuscheln (0,5-1 cm) aus 1 m (flach) und 60 m (tief) im Bodensee sammeln, da sie die schnellste Wachstumsrate haben. Die Muscheln werden lebend zurückgebracht, zwei Wochen lang in der Eawag-Versuchsanlage akklimatisiert und die Schalenlänge wird gemessen. Die Temperatur wird um 1 °C/h erhöht, bis die gewünschten Temperaturen (18 °C) erreicht sind. Drei Temperaturregime (18 °C konstant - Kontrolle; 26 °C konstant - Stress; 26 °C variabel - Stress) und zwei Nahrungsbedingungen (eine Algenart; eine Mischung von Algenarten) werden auf die Flachwasser- und Tiefwassermuscheln angewandt, was insgesamt 12 Bedingungen ergibt. Für jede Bedingung werden drei Wiederholungstanks mit je 100 Muscheln eingerichtet, so dass insgesamt 36 Versuchstanks mit 3600 Muscheln zur Verfügung stehen.

Als Stresstemperatur wurde 26 °C gewählt, da die Quaggamuscheln nachweislich eine längere obere Temperaturtoleranz zwischen 25 °C und 27 °C haben (Spidle et al., 1995). 18 °C wurde als Kontrolltemperatur gewählt, die das Wachstum maximiert, ohne die Muscheln zu belasten. Bei der variablen Belastung von 26 °C werden die Muscheln jeden zweiten Tag einer Belastung von 26 °C ausgesetzt, mit einem Erholungstag bei 18 °C dazwischen. Diese variable Belastung soll die natürlichen Bedingungen besser simulieren. Die Muscheln werden täglich entweder mit einer einzigen Algenart oder mit einer Mischung von Algenarten gefüttert. Das Experiment wird 6 Wochen dauern, und das Überleben der Muscheln wird alle drei Tage überwacht. Am Ende des Versuchs oder sobald die Muscheln sterben, wird ihr Wachstum (Schalenlänge) gemessen. Darüber hinaus werden von jeder der 12 Bedingungen 20 überlebende Individuen (10 Männchen und 10 Weibchen) für die DNA-Methylierungsanalyse (DNA-Extraktion, Bibliotheksvorbereitung und EM-seq) entnommen, insgesamt also 240 Individuen aus Versuch 1.

Wir gehen davon aus, dass Muscheln aus 1 m Tiefe den thermischen Stress besser überleben als Muscheln aus 60 m Tiefe **(H1)**. Wir erwarten auch ein insgesamt besseres Überleben bei variablem 26 °C-Stress im Vergleich zu konstantem 26 °C-Stress, da die Muscheln bessere Chancen haben, sich zu akklimatisieren. Außerdem erwarten wir ein insgesamt schnelleres Wachstum bei 26 °C im

Vergleich zu 18 °C sowohl bei Muscheln aus flachem als auch aus tiefem Wasser. Schließlich erwarten wir ein insgesamt stärkeres Wachstum bei einer Mischung von Algenarten im Vergleich zu einer einzelnen Algenart sowohl bei Muscheln aus flachem als auch aus tiefem Wasser (**H3**).

Versuch 2:

Die überlebenden Muscheln werden zwischen dem ersten und dem zweiten Versuch sechs Wochen lang bei 18 °C ruhen gelassen. Für den zweiten Versuch werden mit allen überlebenden Muscheln derselbe Versuchsplan und dieselben Bedingungen angewandt. Am Ende des Experiments werden 240 Individuen für die DNA-Methylierungssequenzierung verwendet. Für dieses Experiment erwarten wir, dass die Überlebensrate von Tief- und Flachwassermuscheln bei erhöhten Temperaturen ähnlich ist, was die schnelle Akklimatisierungsfähigkeit von Quaggamuscheln unterstreicht (**H2**).

Epigenomische Feldstudie:

Parallel dazu werden wir eine Feldstudie durchführen, um die Veränderung der DNA-Methylierung über drei Zeiträume (2019, 2021, 2024), zwischen zwei Tiefen (1 m und 60 m) und zwischen verschiedenen Orten (2 Standorte im Bodensee) zu untersuchen. Für die Proben der Jahre 2019 und 2021 werden wir auf bereits eingefrorene Proben aus früheren Überwachungskampagnen zurückgreifen. Im Jahr 2024 werden wir 20 Individuen (10 Männchen und 10 Weibchen) pro Population sammeln, also insgesamt 240 Individuen (alle Jahre, Tiefen und Orte). Die Geschlechtsbestimmung der Individuen erfolgt durch visuelle Inspektion der Gonaden nach der Sektion. Für jedes Individuum werden wir eine DNA-Extraktion, eine DNA-Qualitätskontrolle und die Erstellung einer DNA-Methylierungsbibliothek durchführen.

Sequenzierung und Bioinformatik:

Alle 720 Bibliotheken werden gepoolt und auf zwei 25B Fließzellen von Illumina Novaseq X Plus sequenziert (15.000 G Datenausgabe; 13 x durchschnittliche Abdeckung pro Individuum). Die Daten werden auf dem HPC-Cluster Euler der ETHZ ausgewertet. Differenzielle Methylierungsanalysen werden mit MethylKit in R durchgeführt. Wir erwarten, dass wir Gene und Funktionen aufdecken, die an der schnellen Anpassung an die Thermotoleranz beteiligt sind, darunter molekulare Chaperone (**H4**).

Quagga-Überwachung:

Die Quaggamuscheln werden im Bodensee jährlich an 54 Stationen nach der von Karatayev et al. (2021) entwickelten Methodik, einer Kombination aus Greifproben und Bildanalysen, überwacht.

Meilensteine: (siehe Projektplan)

Wir wollen die Feldarbeit und die experimentellen Arbeiten bis Ende 2024 abschließen. Die Laborarbeiten und die Sequenzierung werden bis Mitte 2025 abgeschlossen sein, die Bioinformatik und die Datenanalyse bis Mitte 2026. Die Ergebnisse dieser Forschung werden wir in zwei Publikationen in internationalen, von Experten begutachteten Zeitschriften veröffentlichen (eine vor Ende 2025 und eine Mitte 2026). Schließlich werden wir das Faktenblatt zur Quaggamuschel regelmäßig aktualisieren (erstes Update Anfang 2024 auf Deutsch, Italienisch und Französisch) und einen Bericht für die interessierten Kreise verfassen (auf Deutsch und Französisch), der 2026 veröffentlicht wird (allgemeines Update der Quaggamuschelproblematik, Überwachungsergebnisse des Bodensees und wichtige Projektergebnisse).

Relevanz:

Dieses Teilprojekt ist relevant und einzigartig, weil es eine Kombination von Stressfaktoren (Temperatur und Nahrung) nutzt, um die künftige Anpassung von Quaggamuscheln zu verstehen. Darüber hinaus zielt es nicht nur auf die Untersuchung der phänotypischen Widerstandsfähigkeit der Muscheln (Überleben und Wachstum) unter Stress ab, sondern auch auf das Verständnis der zugrundeliegenden genetischen Mechanismen, die eine bessere Vorhersage der künftigen Entwicklung der Quaggamuschel ermöglichen werden. Die Ergebnisse werden mit jährlichen Felduntersuchungen kombiniert, so dass die künftigen Auswirkungen der Quaggamuscheln unter verschiedenen Klimaszenarien modelliert werden können. Darüber hinaus können die Ergebnisse der Quaggamuschel-Modellierung im Bodensee zum Verständnis der Invasionsdynamik in anderen Schweizer Seen beitragen. Schließlich sind die Projektergebnisse (Berichte für Interessengruppen) von großem Interesse für die Behörden (z. B. Bundesamt für Umwelt; Kantone).

Vernetzung mit anderen Projekten in und außerhalb von BOiSMo:

Wir planen eine Zusammenarbeit mit Pomati (Eawag), um die zukünftige Dynamik des Phytoplanktons besser zu verstehen und mit dem Team von Karatayev (USA), einem Experten für die Invasion der Quaggamuschel in den USA. Wir werden auch wichtige biologische Daten der Quaggamuschel liefern, die für die Modellierung von Kobus und Partner sowie Schmid und Bouffard (Eawag) verwendet werden, um die zukünftigen Folgen für den Bodensee zu modellieren. Ein ständiger Informationsaustausch findet auch mit den Trinkwasserwerken Zürich und Bodensee (Sipplingen) statt. Alle Daten, die aus diesem Projekt resultieren, werden den anderen Projektpartnerinstitutionen zur Verfügung gestellt.

Die Gruppe von Spaak arbeitet schon seit mehreren Jahren an Quagga-Muscheln (Haltiner et al. 2022, Haltiner et al. 2023, Zhang et al. 2023, Kraemer et al. eingereicht). Die Arbeiten am Bodensee wurden im Rahmen des Projekts "SeeWandel" durchgeführt, während die Arbeiten an den anderen Seen (Genfer See, Bieler See, Lago Maggiore, Luganer See) in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) und der Schweizerischen Fachkommission für biologische Sicherheit durchgeführt wurden. Die hier vorgeschlagenen Arbeiten werden in enger Zusammenarbeit mit dem laufenden Projekt "Entwicklung eines Schutz- und Überwachungskonzepts für die Quagga-Muschel in der Schweiz für die kommenden 10 - 15 Jahre" durchgeführt. Dieses Projekt, das von der "Cercle Exotique Arbeitsgruppe aquatische Neobiota" betreut wird, wird Wissen und Erfahrungen mit dem vorgeschlagenen Projekt austauschen und teilen, damit beide Seiten davon profitieren.

Zeitplan des Projekts:

Teilprojekt 7A, Eawag, Weber	2023	2024	2025	2026
Quaggamuschelmonitoring				
Probenahme bei Versuchstieren				
Thermotoleranz und Lebensmittelexperimente				
Laborarbeit und Sequenzierung für die Genomik				
Bioinformatik und Datenanalyse				
Faktenblatt (F) / Bericht (B) für Interessengruppen Publikationen (P)		F1	P1	P2 B1

Literatur:

- Botts, P. S., Patterson, B. A., and Schloesser, D. W. (1996). Zebra mussel effects on benthic invertebrates: physical or biotic? *Journal of the North American Benthological Society* 15, 179–184. Doi: 10.2307/1467947.
- De Ventura, L., Kopp, K., Seppälä, K., and Jokela, J. (2017). Tracing the quagga mussel invasion along the Rhine river system using eDNA markers: early detection and surveillance of invasive zebra and quagga mussels. *Management of Biological Invasions* 8, 101.
- Haltiner, L., Rossbacher, S., Alexander, J., Dennis, S. R., and Spaak, P. (2023). Life in a changing environment: dreissenids' feeding response to different temperatures. *Hydrobiologia*, In Press.
- Haltiner, L., Zhang, H., Anneville, O., De Ventura, L., De Weber, J. T., Hesselschwerdt, J., et al. (2022). The distribution and spread of quagga mussels in perialpine lakes north of the Alps. *Aquatic Invasions* 17, In press.
- Heiler, K. C., Bij de Vaate, A., Ekschmitt, K., von Oheimb, P. V., Albrecht, C., and Wilke, T. (2013). Reconstruction of the early invasion history of the quagga mussel (*Dreissena rostriformis bugensis*) in Western Europe. *Aquatic Invasions* 8, 53–57.
- Hetherington, A. L., Rudstam, L. G., Schneider, R. L., Holeck, K. T., Hotelling, C. W., Cooper, J. E., et al. (2019). Invader invaded: population dynamics of zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) and quagga mussels (*Dreissena rostriformis bugensis*) in polymictic Oneida Lake, NY, USA (1992–2013). *Biological Invasions* 21, 1529–1544. Doi: 10.1007/s10530-019-01914-0.
- Karatayev, A. Y., and Burlakova, L. E. (2022). What we know and don't know about the invasive zebra (*Dreissena polymorpha*) and quagga (*Dreissena rostriformis bugensis*) mussels. *Hydrobiologia*, first on-line <https://doi.org/10.1007/s10750-022-04950-5>.

- Karatayev, A. Y., Burlakova, L. E., Mehler, K., Hinchey, E. K., Wick, M., Bakowska, M., et al. (2021). Rapid assessment of *Dreissena* population in Lake Erie using underwater videography. *Hydrobiologia* 848, 2421–2436. Doi: 10.1007/s10750-020-04481-x.
- Karatayev, A. Y., Burlakova, L. E., and Padilla, D. K. (2015). Zebra versus quagga mussels: a review of their spread, population dynamics, and ecosystem impacts. *Hydrobiologia* 746, 97–112.
- Kraemer, B. M., Boudet, S., Burlakova, L. E., Haltiner, L., Ibelings, B. W., Karatayev, A. Y., Karatayev, V. A., Roszbacher, S., Stöckli, R., Straile, D., and Spaak, P. submitted. An abundant future for quagga mussels in deep European lakes. *Environmental Research Letters* bioRxiv 2023.05.31.543086. Doi: <https://doi.org/10.1101/2023.05.31.543086>.
- Lovell, S. J., Stone, S. F., and Fernandez, L. (2006). The economic impacts of aquatic invasive species: a review of the literature. *Agricultural and Resource Economics Review* 35, 195–208. Doi: 10.1017/S1068280500010157.
- Marescaux, J., von Oheimb, K., Etoundi, E., von Oheimb, P. V., Albrecht, C., Wilke, T., et al. (2016). Unravelling the invasion pathways of the quagga mussel (*Dreissena rostriformis*) into Western Europe. *Biological Invasions* 18, 245–264.
- Nalepa, T. F., and Schloesser, D. W. (2013). Quagga and zebra mussels: biology, impacts, and control. CRC press.
- Spidle, A. P., May, B., and Mills, E. L. (1995). Limits to tolerance of temperature and salinity in the quagga mussel (*Dreissena bugensis*) and the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 52, 2108–2119. Doi: 10.1139/f95-804.
- Zhang, H., Haltiner, L., Kaeser, S., Dennis, S. R., Rothhaupt, K.-O., Kraemer, B. M., and Spaak, P. (2023). Veliger density and environmental conditions control quagga mussel colonization rates in two perialpine lakes. *Journal of Great Lakes Research*.

TP 7B: Eawag, How do climate change and nutrient fluctuations interact to affect plankton ecological interactions and ecosystem stability in Lake Constance?

Project participants: Francesco Pomati, PostDoc

(Diese englische Teilprojektbeschreibung ist verbindlich. Für Verständnisszwecke ist eine deutsche Übersetzung nachfolgend angefügt.)

Introduction:

The goal of this project is to use time-series data from plankton communities in Lake Constance and across six other lakes to model the ecological responses of the Lake Constance ecosystem with high confidence, in terms of change in interactions among plankton taxa, and the responses of plankton to environmental conditions (**Fig. 1**). We will describe and predict change in taxa abundances, ecological interactions and ecosystem stability (e.g. variation of toxic cyanobacteria abundance and general plankton interactions linked to stability of food-web processes). By combining plankton-monitoring data, describing community dynamics within and between lakes, with novel approaches for modelling and forecasting ecosystem states, we aim at advancing basic and applied knowledge of the processes driving biodiversity change under climate warming and nutrient fluctuations in Lake Constance and other locally important lakes.

Ecological interactions among species, and between species and the abiotic environment, are the engine of ecosystem dynamics. They remain mostly unexplored however due the lack of data and high complexity of interactions in complex systems (Sugihara et al. 2012, Poisot et al. 2015, Ye and Sugihara 2016). Studying the structure and dynamics of interactions in a community (i.e. a network), has proven to be fundamental to understand how global change alters ecosystem structure and function (Montoya and Raffaelli 2010). The warming experienced by many lakes, particularly in the last decade, has put ecological networks in a situation where slight increases in nutrient levels can trigger dramatic ecosystem changes (O'Connor et al. 2009, Scheffer et al. 2009, Kraemer et al. 2021, Merz et al. 2023). Changes in network properties can anticipate rapid shifts in community structure, and promote invasions or species extinctions (Dunne et al. 2002, Gilbert 2009, Scheffer et al. 2009, Kraemer et al. 2021). Networks vary over space and time in the number of interactions between taxa (i.e. addition or loss of connections) or the strength of interactions (e.g. rerouting of biomass flows through existing connections) (May 1972, Bartley et al. 2019). Network connectance and the strength of species interactions are structural properties that can signal large-scale changes in the whole ecosystem, with potential implications for ecosystem stability, the maintenance of biodiversity and ecosystem processes (May 1972, Yodzis 1980, Bartley et al. 2019).

Biodiversity is critical for ecosystem processes and their stability, particularly in plankton communities, which cover an enormous phylogenetic and functional diversity and drive essential global and local scale processes (e.g. elemental cycles) and services (e.g. clean water, fisheries). To tease apart the intertwined effects of co-occurring anthropogenic impacts on plankton biodiversity, we have used long-term, highly curated time-series of plankton composition and abundance, complemented by monitoring data of water chemistry (e.g. nutrients) and physics (e.g. temperature), from 10 lakes in Switzerland. Similarly to Lake Constance, the history of these lakes in terms of biotic and abiotic changes, e.g. biodiversity change alongside warming and oligotrophication trends, has been well documented (Pomati et al. 2012, 2017, 2019). We studied how climate change and nutrient fluctuations interact to modify the plankton network of ecological interactions. Using empirical dynamic modelling (EDM) (Sugihara et al. 2012), a non-parametric method to detect and model causal links in ecological networks, we showed that: i) the number and strength of interactions respond nonlinearly to water temperature and phosphorus; ii) this reorganisation shifts trophic control of food webs, leading to consumers being controlled by resources; iii) competitive/facilitative interactions are the strongest, while trophic are the most prevalent; iv) small grazers and cyanobacteria are sensitive indicators of changes in plankton networks (Merz et al. 2023).

Problem/objectives:

The specific objectives of this study are: 1) assemble a database of plankton abundance time-series and environmental covariates for the target lakes (**Fig. 1**); 2) using all taxa in the plankton communities, map an empirical interaction-network for the study lakes, with a specific focus on Lake Constance; 3) study the responses of toxic cyanobacteria (with a specific focus on *Planktothrix rubescens*) to abiotic

and biotic factors; 4) investigate the relationships between changes in ecological network properties (connectance, modularity, interaction strengths, direction of interactions) with i) P-PO₄ and N-NO₃ water levels (eutrophication, oligotrophication), and their ratio (stoichiometry), ii) water temperature and stability (warming), and iii) biological invasions (quagga mussel and stickleback data); 5) use models to make predictions about responses of plankton ecological networks and focal taxa (cyanobacteria) to the interactive effects of nutrient levels and temperature, particularly under conditions that are expected for future nutrient and climate change scenarios.

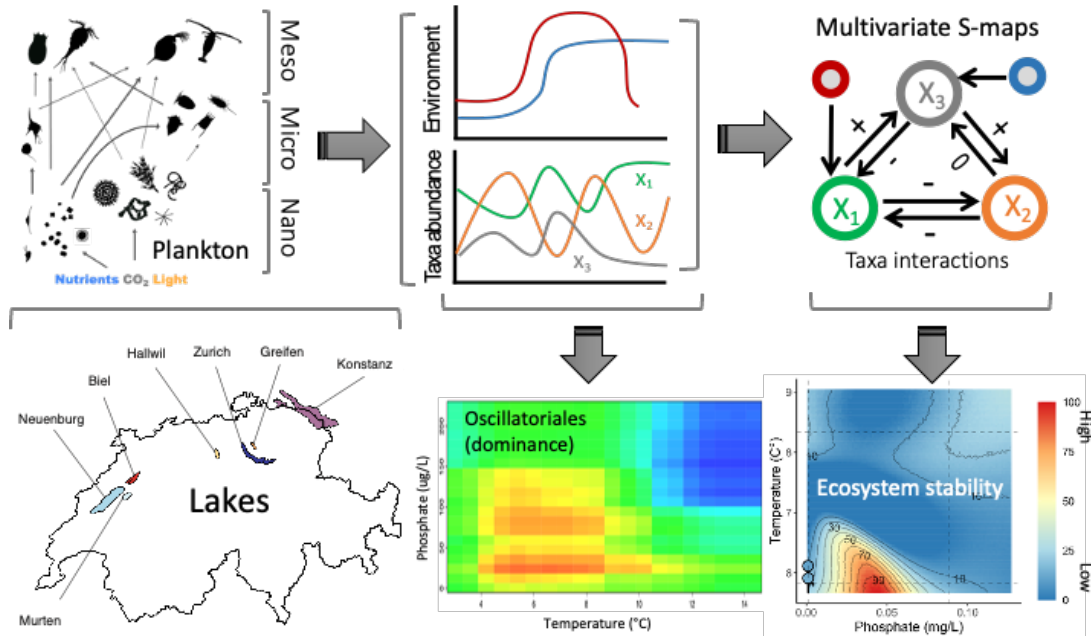


Fig. 1. In this project, monitoring data of the planktonic food-web (primary producers, herbivores, mixotrophs and carnivores) and environmental factors from 7 lakes (including Lake Constance) are used to model interactions among species, and between species and their abiotic environment (climate change, nutrient levels). From time-series data, we infer i) the time-varying network of taxa interactions and ii) their responses to environmental conditions, using EDM (Chang et al. 2021). Responses of key taxa like the toxic cyanobacterium *Planktothrix rubescens* to abiotic and biotic factors will be used to model their dominance as a function of environmental conditions, while properties of the plankton interaction networks will be used to estimate ecosystem stability. Collaboration with other project partners (Eawag, University of Konstanz, Kobus und Partner) will allow forecasting changes in the above endpoints under future scenarios of environmental change (nutrient levels, climate warming).

Work in the sub-project:

We hypothesise that lake ecosystems, and specifically plankton interaction networks, will show highly non-linear responses to environmental conditions; yet we expect that historical time-series data and modern approaches for dynamic ecosystem modelling will allow us to produce reliable predictions about ecosystem change (Sugihara et al. 2012, Deyle et al. 2016, Ushio et al. 2018, Ethan Deyle, Damien Bouffard, Victor Frossard, Robert Schwefel, John Melack, George Sugihara 2022, Merz et al. 2023). Questions include: in what state is Lake Constance, relative to other lakes, in terms of plankton interaction networks and ecosystem stability? How did the ecosystem behave in the past, as a consequence of environmental change and species invasions? How do we expect the ecosystem to behave under future scenarios of nutrient levels and climate change?

Approach. We will use plankton-monitoring data from the target lakes to construct a conceptual plankton network of temperate lakes, which will be revised according to the local ecology of Lake Constance (Merz et al. 2023). We plan to use both the data collected by the University of Konstanz, and those collected by the “Institut für Seenforschung” in Langenargen. For training models of plankton interactions, we will also use data from well known Swiss lakes (Fig. 1). We will use multiview distance regularised (MDR) S-maps to perform state space reconstruction, detection of causal links and estimation of the Jacobian matrix of time-varying interactions between plankton taxa while accommodating for high dimensionality (large number of species), with minimal assumptions and problems related to noisy data (Chang et al. 2021). Changes in network properties such as connectance, modularity, reciprocity, and taxa interaction strengths and directions, are diagnostic metrics of resilience of ecosystems. To specifically study ecosystem stability, we will calculate the volume contraction rate of the interaction matrix at each time point, for each lake, as a measure of community structural resilience (Cenci and Saavedra 2019), and/or of species sensitivities (25), to

environmental perturbations. We will study correlations between patterns of network properties and interaction coefficients with quagga mussel and stickleback data to test whether invasions have left signatures of network instability. We will then model how network properties and interaction coefficients respond to PO₄, NO₃, their ratio, and temperature using lake environmental monitoring data. The S-maps models will be employed to predict responses of network properties and toxic cyanobacteria to the interactive effects of drivers under all combinations of values in the training datasets, including some combinations of conditions that are expected for future nutrient levels and climate warming scenarios (**Fig. 2**).

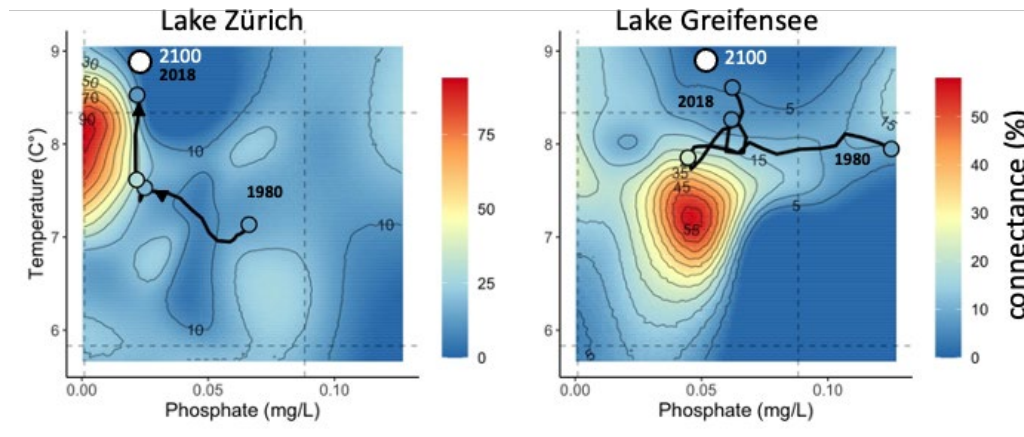


Fig. 2. Connectance (the % of realised links in the plankton network in two of the study lakes [from Merz et al. 2023]). Colour-coded plots depict the S-map models' inferred relationship between average water-column phosphate and temperature on connectance, and trajectories show the direction of lake conditions over time. White dots represent a possible forecast, based on future projections of water temperature and nutrients from project partners, of the expected stability of the plankton networks in 2100; note that this prediction is imaginary and not based on data - it will be the goal of internal project collaborations to produce real forecasts of future states of lake ecosystems, or of toxic cyanobacteria.

We expect to submit 2 manuscript to international peer-reviewed journals: one about the environmental controls of toxic cyanobacteria (focusing principally on *Planktothrix rubescens*) in temperate lakes and projections about future changes, one about the variation of plankton interaction networks over nutrients and climate change gradients, and projections about the ecosystem stability in future lake scenarios. Both papers will use multiple lakes, but focus on Lake Constance for scenario predictions. Note that the writing of manuscripts will start very early and occur during the research activities to be ready for submission of papers at the end of the project.

Relevance:

This project will focus on the main goals of the Interreg VI funding call, by: 1) Studying climate change effects (and their interactions with nutrient levels) on the complete pelagic lake ecosystem using plankton-monitoring data and novel ecological modelling; 2) Developing predictive models of an entire planktonic ecological network (not only species and their abundance, but also their interactions), that can be used to explore future scenarios of climate change by model forcing and simulations; 3) Producing knowledge about how the Lake Constance ecosystem can reorganise (resilience) when challenged by environmental change; 4) Synthesising ecological knowledge and modelling projections to inform decisions about how to manage the lake in a changing world. These plans make the project highly relevant for general public interests, with potential impacts particularly for local conservation and policy making in the context of climate change effects on the Lake Constance ecosystem services. This project is also highly innovative in its scientific disciplines (aquatic ecology, community and food-web ecology, and limnology), by combining data-driven approaches to infer ecosystem ecology and food-web dynamics, and by producing predictive models that can assist natural resource management – particularly for an ecosystem providing highly valuable services like Lake Constance. Last but not least, the project capitalises on already existing data with no expense or environmental impacts for data collection.

Networking with other projects within BOiSMo:

Cross-border cooperation and synergies with other projects are expected: i) With the University of Konstanz (D. Straile) and LMU München (H. Stibor) for a) conceptual plankton network; b) plankton and food-web ecology expertise; c) sharing of monitoring data. ii) With the process modelling groups (Kobus und Partner, and Damien Bouffard & Martin Schmid - Eawag) for a) climate projections of

lakes, in particular Lake Constance, about water temperature, stability, PO₄ and NO₃ levels; b) forcing of the S-maps models and produce forecasts of plankton ecosystem properties based on model predictions of future climate and nutrients scenarios. No duplication of work will occur, since we work with different input data, different modelling approaches, and different ecosystem endpoints. Exchange of data and knowledge is expected, with beneficial effects for all sub-projects.

Project schedule:

Sub-project 7B, Eawag, Pomati	2023		2024			2025			2026		
Database compilation											
Mapping of interaction networks											
Modelling responses of ecological networks											
Modelling responses of toxic cyanobacteria											
Forecasting ecosystem properties and stability											
Submission of manuscripts											

Literature:

- Bartley, T. J., K. S. McCann, C. Bieg, K. Cazelles, M. Granados, M. M. Guzzo, A. S. MacDougall, T. D. Tunney, and B. C. McMeans. 2019. Food web rewiring in a changing world. *Nature Ecology & Evolution* 3:345–354.
- Cenci, S., and S. Saavedra. 2019. Non-parametric estimation of the structural stability of non-equilibrium community dynamics. *Nature Ecology and Evolution* 3:912–918.
- Chang, C.-W., T. Miki, M. Ushio, P.-J. Ke, H.-P. Lu, F.-K. Shiah, and C.-H. Hsieh. 2021. Reconstructing large interaction networks from empirical time series data. *Ecology Letters* 24:2763–2774.
- Deyle, E. R., R. M. May, S. B. Munch, and G. Sugihara. 2016. Tracking and forecasting ecosystem interactions in real time. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 283, no. 1822 (2016): 20152258.
- Deyle, E. R., D. Bouffard, V. Frossard, R. Schwefel, J. Melack, and G. Sugihara. 2022. A hybrid empirical and parametric approach for managing ecosystem complexity: water quality in Lake Geneva under nonstationary futures. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*: 119, no. 26 (2022): e2102466119.
- Dunne, J. A., R. J. Williams, and N. D. Martinez. 2002. Network structure and biodiversity loss in food webs: robustness increases with connectance. *Ecology Letters* 5:558–567.
- Gilbert, A. J. 2009. Connectance indicates the robustness of food webs when subjected to species loss. *Ecological Indicators* 9:72–80.
- Kraemer, B. M., R. M. Pilla, R. Iestyn Woolway, O. Anneville, S. Ban, W. Colom-Montero, S. P. Devlin, M. T. Dokulil, E. E. Gaiser, K. David Hambright, D. O. Hessen, S. N. Higgins, K. D. Jöhnk, W. Keller, L. B. Knoll, P. R. Leavitt, F. Lepori, M. S. Luger, S. C. Maberly, D. C. Müller-Navarra, A. M. Paterson, D. C. Pierson, D. C. Richardson, M. Rogora, J. A. Rusak, S. Sadro, N. Salmaso, M. Schmid, E. A. Silow, R. Sommaruga, J. A. A. Stelzer, D. Straile, W. Thiery, M. A. Timofeyev, P. Verburg, G. A. Weyhenmeyer, and R. Adrian. 2021. Climate change drives widespread shifts in lake thermal habitat. *Nature Climate Change*, 11(6), pp.521-529
- May, R. M. 1972. Will a large complex system be stable? *Nature* 238:413–414.
- Merz, E., E. Saberski, L. J. Gilarranz, P. Isles, G. Sugihara, C. Berger, and F. Pomati. 2023. Disruption of ecological networks in lakes by climate change and nutrient fluctuations. *Nature Climate Change*. 13(4), pp.389-396.
- Montoya, J. M., and D. Raffaelli. 2010. Climate change, biotic interactions and ecosystem services. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 365:2013–2018.
- O'Connor, M. I., M. F. Piehler, D. M. Leech, A. Anton, and J. F. Bruno. 2009. Warming and resource availability shift food web structure and metabolism. *PLoS Biology* 7:e1000178.
- Poisot, T., D. B. Stouffer, and D. Gravel. 2015. Beyond species: why ecological interaction networks vary through space and time. *Oikos* 124:243–251.
- Pomati, F., B. Matthews, J. Jokela, A. Schildknecht, and B. W. Ibelings. 2012. Effects of re-oligotrophication and climate warming on plankton richness and community stability in a deep mesotrophic lake. *Oikos* 121:1317–1327.

- Pomati, F., B. Matthews, O. Seehausen, and B. W. Ibelings. 2017. Eutrophication and climate warming alter spatial (depth) co-occurrence patterns of lake phytoplankton assemblages. *Hydrobiologia* 787:375–385.
- Pomati, F., J. B. Shurin, K. H. Andersen, C. Tellenbach, and A. D. Barton. 2019. Interacting Temperature, Nutrients and Zooplankton Grazing Control Phytoplankton Size-Abundance Relationships in Eight Swiss Lakes. *Frontiers in Microbiology* 10:3155.
- Scheffer, M., J. Bascompte, W. A. Brock, V. Brovkin, S. R. Carpenter, V. Dakos, H. Held, E. H. van Nes, M. Rietkerk, and G. Sugihara. 2009. Early-warning signals for critical transitions. *Nature* 461:53–59.
- Sugihara, G., R. May, H. Ye, C.-H. Hsieh, E. Deyle, M. Fogarty, and S. Munch. 2012. Detecting causality in complex ecosystems. *Science* 338:496–500.
- Ushio, M., C.-H. Hsieh, R. Masuda, E. R. Deyle, H. Ye, C.-W. Chang, G. Sugihara, and M. Kondoh. 2018. Fluctuating interaction network and time-varying stability of a natural fish community. *Nature* 554:360–363.
- Ye, H., and G. Sugihara. 2016. Information leverage in interconnected ecosystems: Overcoming the curse of dimensionality. *Science* 353:922–925.
- Yodzis, P. 1980. The connectance of real ecosystems. *Nature*, 284(5756), pp.544-545.

TP 7B: Eawag, Wie wirken sich Klimawandel und Nährstoffschwankungen auf die ökologischen Interaktionen des Planktons und die Stabilität des Ökosystems im Bodensee aus?

(DeepL Übersetzung ohne weitere Prüfung. Die englische Beschreibung [siehe oben] ist verbindlich.)

Projektteilnehmer: Francesco Pomati, promovierte wissenschaftlich tätige Person

Einleitung:

Das Ziel dieses Projekts ist es, Zeitreihendaten von Planktongemeinschaften im Bodensee und in sechs anderen Seen zu verwenden, um die ökologischen Reaktionen des Bodensee-Ökosystems mit hoher Zuverlässigkeit zu modellieren, und zwar in Bezug auf Veränderungen der Interaktionen zwischen Planktontaxa und die Reaktionen des Planktons auf Umweltbedingungen (**Abb. 1**). Wir werden Veränderungen in den Taxa-Häufigkeiten, den ökologischen Interaktionen und der Stabilität des Ökosystems beschreiben und vorhersagen (z. B. Variationen der Häufigkeit toxischer Cyanobakterien und allgemeine Planktoninteraktionen in Verbindung mit der Stabilität von Nahrungsnetzprozessen). Durch die Kombination von Planktonüberwachungsdaten, die die Dynamik von Gemeinschaften innerhalb und zwischen Seen beschreiben, mit neuartigen Ansätzen zur Modellierung und Vorhersage von Ökosystemzuständen wollen wir das grundlegende und angewandte Wissen über die Prozesse, die den Wandel der biologischen Vielfalt unter dem Einfluss von Klimaerwärmung und Nährstoffschwankungen im Bodensee und anderen lokal wichtigen Seen vorantreiben, erweitern.

Ökologische Wechselwirkungen zwischen Arten sowie zwischen Arten und der abiotischen Umwelt sind der Motor der Ökosystemdynamik. Sie bleiben jedoch aufgrund des Mangels an Daten und der hohen Komplexität der Interaktionen in komplexen Systemen weitgehend unerforscht (Sugihara et al. 2012, Poisot et al. 2015, Ye und Sugihara 2016). Die Untersuchung der Struktur und Dynamik von Wechselwirkungen in einer Gemeinschaft (d. h. einem Netzwerk) hat sich als grundlegend erwiesen, um zu verstehen, wie der globale Wandel die Struktur und Funktion von Ökosystemen verändert (Montoya und Raffaelli 2010). Die Erwärmung vieler Seen, insbesondere in den letzten zehn Jahren, hat ökologische Netzwerke in eine Situation gebracht, in der ein geringer Anstieg des Nährstoffgehalts dramatische Veränderungen im Ökosystem auslösen kann (O'Connor et al. 2009, Scheffer et al. 2009, Kraemer et al. 2021, Merz et al. 2023). Veränderungen der Netzwerkeigenschaften können rasche Verschiebungen in der Gemeinschaftsstruktur vorwegnehmen und Invasionen oder das Aussterben von Arten fördern (Dunne et al. 2002, Gilbert 2009, Scheffer et al. 2009, Kraemer et al. 2021). Netzwerke variieren im Laufe von Raum und Zeit hinsichtlich der Anzahl der Interaktionen zwischen Taxa (d. h. Hinzufügung oder Verlust von Verbindungen) oder der Stärke der Interaktionen (z. B. Umleitung von Biomasseströmen durch bestehende Verbindungen) (May 1972, Bartley et al. 2019). Die Vernetzung und die Stärke der Arteninteraktionen sind strukturelle Eigenschaften, die großflächige Veränderungen im gesamten Ökosystem signalisieren können, mit potenziellen Auswirkungen auf die Stabilität des Ökosystems, die Aufrechterhaltung der biologischen Vielfalt und die Ökosystemprozesse (May 1972, Yodzis 1980, Bartley et al. 2019).

Die biologische Vielfalt ist entscheidend für Ökosystemprozesse und deren Stabilität, insbesondere in Planktongemeinschaften, die eine enorme phylogenetische und funktionelle Vielfalt aufweisen und wesentliche Prozesse auf globaler und lokaler Ebene (z. B. Elementkreisläufe) und Dienstleistungen (z. B. sauberes Wasser, Fischerei) vorantreiben. Um die miteinander verflochtenen Auswirkungen der gleichzeitigen anthropogenen Einflüsse auf die Plankton-Biodiversität zu entschlüsseln, haben wir langfristige, sorgfältig kuratierte Zeitreihen der Planktonzusammensetzung und -abundanz verwendet, die durch Überwachungsdaten der Wasserchemie (z. B. Nährstoffe) und -physik (z. B. Temperatur) aus zehn Seen in der Schweiz ergänzt wurden. Ähnlich wie beim Bodensee ist die Geschichte dieser Seen in Bezug auf biotische und abiotische Veränderungen, z. B. Biodiversitätsveränderungen neben Erwärmungs- und Oligotrophierungstrends, gut dokumentiert (Pomati et al. 2012, 2017, 2019). Wir haben untersucht, wie Klimawandel und Nährstoffschwankungen zusammenwirken, um das Plankton-Netzwerk ökologischer Interaktionen zu verändern. Mithilfe der empirischen dynamischen Modellierung (EDM) (Sugihara et al. 2012), einer nicht-parametrischen Methode zur Erkennung und Modellierung kausaler Zusammenhänge in ökologischen Netzwerken, zeigten wir, dass: i) die Anzahl und Stärke der Interaktionen nichtlinear auf Wassertemperatur und Phosphor reagieren; ii) diese Umstrukturierung die trophische Kontrolle von Nahrungsnetzen verschiebt, was dazu führt, dass Verbraucher durch Ressourcen kontrolliert werden; iii) kompetitive/fördernde Interaktionen am stärksten sind, während trophische Interaktionen am weitesten verbreitet sind; iv) kleine Weidegänger und Cyanobakterien empfindliche Indikatoren für Veränderungen in Planktonnetzwerken sind (Merz et al. 2023).

Problem/Zielsetzung:

Die spezifischen Ziele dieser Studie sind: 1) Zusammenstellung einer Datenbank mit Zeitreihen der Planktonabundanz und Umweltkovariaten für die Zielseen (**Abb. 1**). 2) unter Verwendung aller Taxa in den Planktongemeinschaften ein empirisches Interaktionsnetzwerk für die untersuchten Seen zu kartieren, mit einem speziellen Fokus auf den Bodensee; 3) die Reaktionen von toxischen Cyanobakterien (mit einem speziellen Fokus auf *Planktothrix rubescens*) auf abiotische und biotische Faktoren zu untersuchen; 4) Untersuchung der Beziehungen zwischen Veränderungen der ökologischen Netzwerkeigenschaften (Konnektivität, Modularität, Interaktionsstärke, Richtung der Interaktionen) mit i) P-PO₄- und N-NO₃-Wasserwerten (Eutrophierung, Oligotrophierung) und ihrem Verhältnis (Stöchiometrie), ii) Wassertemperatur und -stabilität (Erwärmung) und iii) biologischen Invasionen (Daten zu Quagga und Stichling). 5) Anwendung von Modellen, um Vorhersagen über die Reaktionen von ökologischen Planktonnetzwerken und Fokustaxa (Cyanobakterien) auf die interaktiven Auswirkungen von Nährstoffgehalt und Temperatur zu treffen, insbesondere unter Bedingungen, die für künftige Nährstoff- und Klimawandelszenarien erwartet werden.

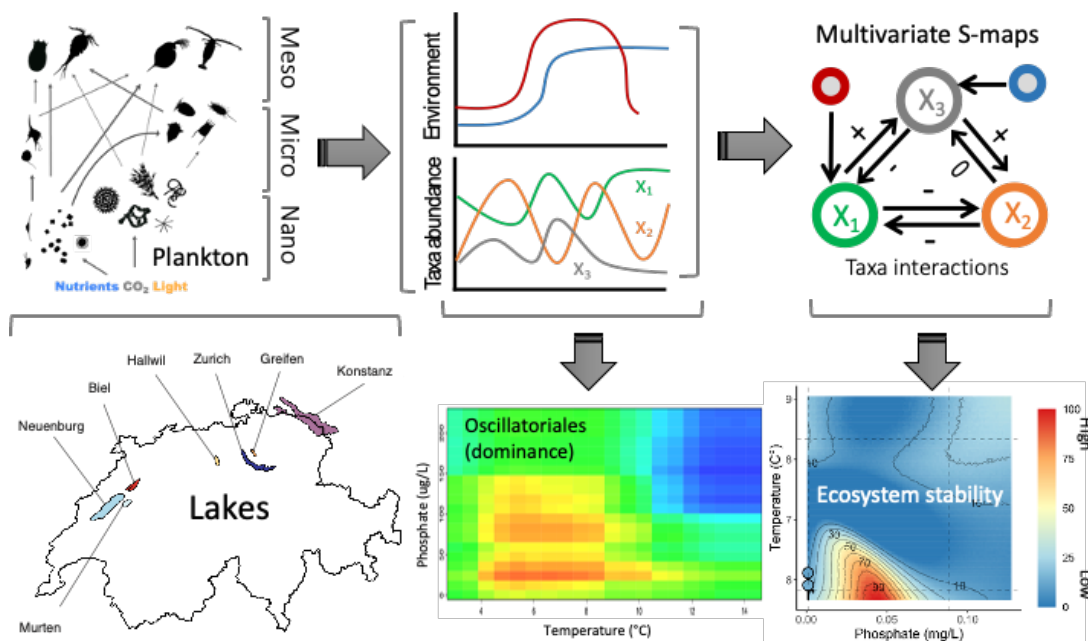


Abb. 1. In diesem Projekt werden Überwachungsdaten des planktonischen Nahrungsnetzes (Primärproduzenten, Herbivoren, Mixotrophe und Karnivoren) und Umweltfaktoren aus 7 Seen (einschließlich Bodensee) verwendet, um Interaktionen zwischen Arten sowie zwischen Arten und ihrer abiotischen Umwelt (Klimawandel, Nährstoffgehalt) zu modellieren. Aus den Zeitreihendaten leiten wir i) das zeitlich veränderliche Netzwerk von Taxa-Interaktionen und ii) ihre Reaktionen auf Umweltbedingungen ab, indem wir EDM (Chang et al. 2021) verwenden. Die Reaktionen von Schlüsseltaxa wie dem toxischen Cyanobakterium *Planktothrix rubescens* auf abiotische und biotische Faktoren werden verwendet, um ihre Dominanz als Funktion der Umweltbedingungen zu modellieren, während die Eigenschaften der Planktoninteraktionsnetzwerke zur Abschätzung der Ökosystemstabilität genutzt werden. Die Zusammenarbeit mit anderen Projektpartnern (Eawag, Uni Konstanz, Kobus und Partner) wird die Vorhersage von Veränderungen der oben genannten Endpunkte unter zukünftigen Szenarien von Umweltveränderungen (Nährstoffgehalt, Klimaerwärmung) ermöglichen.

Arbeit im Teilprojekt:

Wir gehen davon aus, dass Seenökosysteme und insbesondere Planktoninteraktionsnetzwerke hochgradig nichtlineare Reaktionen auf Umweltbedingungen zeigen; dennoch erwarten wir, dass historische Zeitreihendaten und moderne Ansätze zur dynamischen Ökosystemmodellierung es uns ermöglichen werden, zuverlässige Vorhersagen über Ökosystemveränderungen zu treffen (Sugihara et al. 2012, Deyle et al. 2016, Ushio et al. 2018, Ethan Deyle, Damien Bouffard, Victor Frossard, Robert Schwefel, John Melack, George Sugihara 2022, Merz et al. 2023). Zu den Fragen gehören: In welchem Zustand befindet sich der Bodensee im Vergleich zu anderen Seen in Bezug auf Plankton-Interaktionsnetzwerke und Ökosystemstabilität? Wie hat sich das Ökosystem in der Vergangenheit als Folge von Umweltveränderungen und Arteninvasionen verhalten? Wie wird sich das Ökosystem unter zukünftigen Szenarien der Nährstoffbelastung und des Klimawandels voraussichtlich verhalten?

Herangehensweise. Wir werden Planktonmessdaten aus den Zielseen verwenden, um ein konzeptionelles Planktonnetzwerk von Seen der gemäßigten Breiten zu erstellen, das entsprechend der lokalen Ökologie des Bodensees überarbeitet wird (Merz et al. 2023). Wir planen, sowohl die von der Universität Konstanz als auch die vom Institut für Seenforschung in Langenargen erhobenen

Daten zu verwenden. Für das Training von Planktoninteraktionsmodellen werden wir auch Daten von bekannten Schweizer Seen verwenden (**Abb. 1**). Wir werden Multiview Distance Regularised (MDR) S-Maps verwenden, um die Rekonstruktion des Zustandsraums, die Erkennung von kausalen Verbindungen und die Schätzung der Jacobimatrix von zeitlich veränderlichen Interaktionen zwischen Planktontaxa durchzuführen und dabei die hohe Dimensionalität (große Anzahl von Arten) mit minimalen Annahmen und Problemen im Zusammenhang mit verrauschten Daten zu berücksichtigen (Chang et al. 2021). Veränderungen in den Netzeigenschaften wie Konnektivität, Modularität, Reziprozität und Stärke und Richtung der Taxa-Interaktion sind diagnostische Metriken für die Widerstandsfähigkeit von Ökosystemen. Um speziell die Stabilität von Ökosystemen zu untersuchen, werden wir die Volumenkontraktionsrate der Interaktionsmatrix zu jedem Zeitpunkt und für jeden See als Maß für die strukturelle Widerstandsfähigkeit der Gemeinschaft (Cenci und Saavedra 2019) und/oder die Empfindlichkeit der Arten (25) gegenüber Umweltstörungen berechnen. Wir werden Korrelationen zwischen Mustern von Netzwerkeigenschaften und Interaktionskoeffizienten mit Quagga- und Sticlingsdaten untersuchen, um zu prüfen, ob Invasionen Signaturen von Netzwerkinstabilität hinterlassen haben. Anschließend werden wir modellieren, wie Netzwerkeigenschaften und Interaktionskoeffizienten auf PO₄, NO₃, ihr Verhältnis und die Temperatur reagieren, indem wir Daten aus der Umweltüberwachung von Seen verwenden. Die S-Maps-Modelle werden zur Vorhersage der Reaktionen von Netzwerkeigenschaften und toxischen Cyanobakterien auf die interaktiven Effekte der Einflussfaktoren unter allen Kombinationen von Werten in den Trainingsdatensätzen eingesetzt, einschließlich einiger Kombinationen von Bedingungen, die für zukünftige Nährstoffwerte und Klimaerwärmungsszenarien erwartet werden (**Abb. 2**).

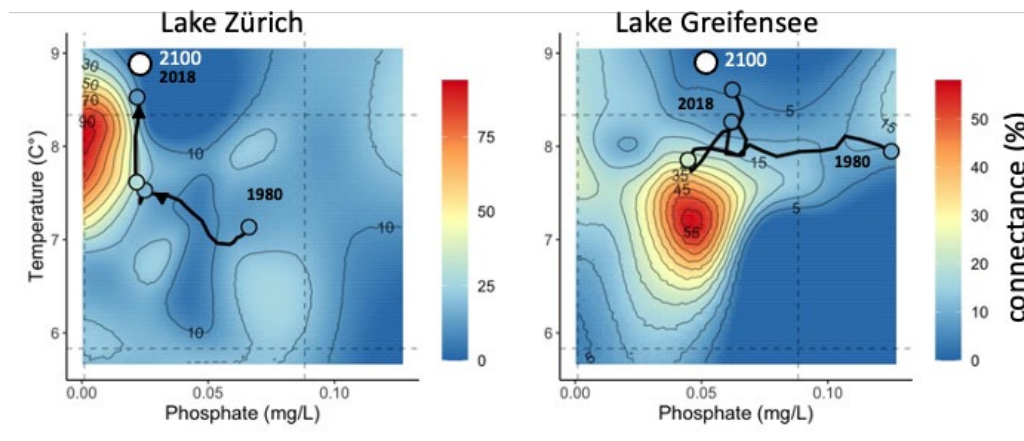


Abb. 2. Konnektivität (der Prozentsatz der realisierten Verbindungen im Planktonnetzwerk in zwei der untersuchten Seen (aus (Merz et al. 2023))). Farbkodierte Diagramme zeigen die von den S-Map-Modellen abgeleitete Beziehung zwischen dem durchschnittlichen Phosphatgehalt der Wassersäule und der Temperatur und der Konnektivität, und die Trajektorien zeigen die Richtung der Seebedingungen im Laufe der Zeit. Die weißen Punkte stellen eine mögliche Vorhersage der erwarteten Stabilität der Planktonnetzwerke im Jahr 2100 dar, die auf den zukünftigen Prognosen der Projektpartnerinstitutionen für Wassertemperatur und Nährstoffe basiert; beachten Sie, dass diese Vorhersage imaginär ist und nicht auf Daten basiert - es wird das Ziel der internen Projektzusammenarbeit sein, reale Vorhersagen über den zukünftigen Zustand der Seenökosysteme oder über toxische Cyanobakterien zu erstellen.

Wir werden voraussichtlich zwei Manuskripte bei internationalen Fachzeitschriften einreichen: eines über die Umweltkontrollen von toxischen Cyanobakterien (hauptsächlich *Planktothrix rubescens*) in Seen der gemäßigten Breiten und Prognosen über künftige Veränderungen, eines über die Variation von Plankton-Interaktionsnetzwerken über Nährstoff- und Klimawandel-Gradienten und Prognosen über die Stabilität von Ökosystemen in künftigen Seeszenarien. Für beide Arbeiten werden mehrere Seen herangezogen, der Schwerpunkt liegt jedoch auf dem Bodensee für Szenario-Vorhersagen. Bitte beachten Sie, dass das Schreiben der Manuskripte sehr früh beginnen und während der Forschungsaktivitäten stattfinden wird, damit die Papiere am Ende des Projekts eingereicht werden können.

Relevanz:

Dieses Projekt wird sich auf die Hauptziele des Interreg VI-Förderaufrufs konzentrieren, und zwar durch: 1) Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels (und ihrer Wechselwirkungen mit dem Nährstoffgehalt) auf das gesamte pelagische Ökosystem des Bodensees unter Verwendung von Planktonüberwachungsdaten und neuartiger ökologischer Modellierung; 2) Entwicklung von

Vorhersagemodellen für ein gesamtes planktonisches ökologisches Netzwerk (nicht nur Arten und ihre Häufigkeit, sondern auch ihre Wechselwirkungen), die verwendet werden können, um zukünftige Szenarien des Klimawandels durch Modellierung und Simulationen zu untersuchen; 3) Gewinnung von Erkenntnissen darüber, wie sich das Ökosystem des Bodensees bei Umweltveränderungen neu organisieren kann (Resilienz); 4) Synthese von ökologischem Wissen und Modellierungsprojektionen als Grundlage für Entscheidungen über die Bewirtschaftung des Sees in einer sich verändernden Welt. Diese Pläne machen das Projekt für die allgemeine Öffentlichkeit sehr relevant, mit potenziellen Auswirkungen insbesondere auf den lokalen Naturschutz und die Politikgestaltung im Zusammenhang mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökosystemleistungen des Bodensees. Das Projekt ist auch in seinen wissenschaftlichen Disziplinen (aquatische Ökologie, Ökologie von Lebensgemeinschaften und Nahrungsnetzen sowie Limnologie) höchst innovativ, da es datengestützte Ansätze zur Ableitung der Ökosystemökologie und der Dynamik von Nahrungsnetzen kombiniert und Vorhersagemodelle erstellt, die das Management natürlicher Ressourcen unterstützen können - insbesondere für ein Ökosystem, das wie der Bodensee äußerst wertvolle Dienstleistungen erbringt. Nicht zuletzt profitiert das Projekt von bereits vorhandenen Daten, ohne dass die Datenerhebung Kosten oder Umweltauswirkungen verursacht.

Vernetzung mit anderen Projekten in BOiSMo:

Grenzüberschreitende Zusammenarbeit und Synergien mit anderen Projekten werden erwartet: i) mit der Universität Konstanz (D. Straile) und der LMU München (H. Stibor) für a) ein konzeptionelles Planktonnetzwerk, b) Fachwissen über Plankton und Nahrungsnetzökologie; c) gemeinsame Nutzung von Monitoringdaten. ii) Mit den Prozessmodellierungsgruppen (Kobus und Partner sowie Damien Bouffard & Martin Schmid - Eawag) für a) Klimaprojektionen für Seen, insbesondere den Bodensee, in Bezug auf Wassertemperatur, Stabilität, PO₄- und NO₃-Gehalt; b) Forcing der S-Maps-Modelle und Erstellung von Prognosen der Plankton-Ökosystemeigenschaften auf der Grundlage von Modellvorhersagen für zukünftige Klima- und Nährstoffszenarien. Es wird keine Doppelarbeit geben, da wir mit unterschiedlichen Eingangsdaten, unterschiedlichen Modellierungsansätzen und unterschiedlichen Ökosystemendpunkten arbeiten. Es wird ein Austausch von Daten und Wissen erwartet, der sich positiv auf alle Teilprojekte auswirken wird.

Zeitplan des Projekts:

Projekt 7B, Eawag, Pomati	2023			2024			2025			2026		
Zusammenstellung der Datenbank												
Kartierung von Interaktionsnetzen												
Modellierung der Reaktionen ökologischer Netzwerke												
Modellierung der Reaktionen von toxischen Cyanobakterien												
Vorhersage von Ökosystemeigenschaften und Stabilität												
Einreichung von Manuskripten												

Literatur:

- Bartley, T. J., K. S. McCann, C. Bieg, K. Cazelles, M. Granados, M. M. Guzzo, A. S. MacDougall, T. D. Tunney, and B. C. McMeans. 2019. Food web rewiring in a changing world. *Nature Ecology & Evolution* 3:345–354.
- Cenci, S., and S. Saavedra. 2019. Non-parametric estimation of the structural stability of non-equilibrium community dynamics. *Nature Ecology and Evolution* 3:912–918.
- Chang, C.-W., T. Miki, M. Ushio, P.-J. Ke, H.-P. Lu, F.-K. Shiah, and C.-H. Hsieh. 2021. Reconstructing large interaction networks from empirical time series data. *Ecology Letters* 24:2763–2774.
- Deyle, E. R., R. M. May, S. B. Munch, and G. Sugihara. 2016. Tracking and forecasting ecosystem interactions in real time. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 283, no. 1822 (2016): 20152258.

- Deyle, E. R., D. Bouffard, V. Frossard, R. Schwefel, J. Melack, and G. Sugihara. 2022. A hybrid empirical and parametric approach for managing ecosystem complexity: water quality in Lake Geneva under nonstationary futures. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 119, no. 26 (2022): e2102466119..
- Dunne, J. A., R. J. Williams, and N. D. Martinez. 2002. Network structure and biodiversity loss in food webs: robustness increases with connectance. *Ecology Letters* 5:558–567.
- Gilbert, A. J. 2009. Connectance indicates the robustness of food webs when subjected to species loss. *Ecological Indicators* 9:72–80.
- Kraemer, B. M., R. M. Pilla, R. Iestyn Woolway, O. Anneville, S. Ban, W. Colom-Montero, S. P. Devlin, M. T. Dokulil, E. E. Gaiser, K. David Hambright, D. O. Hessen, S. N. Higgins, K. D. Jöhnk, W. Keller, L. B. Knoll, P. R. Leavitt, F. Lepori, M. S. Luger, S. C. Maberly, D. C. Müller-Navarra, A. M. Paterson, D. C. Pierson, D. C. Richardson, M. Rogora, J. A. Rusak, S. Sadro, N. Salmaso, M. Schmid, E. A. Silow, R. Sommaruga, J. A. A. Stelzer, D. Straile, W. Thiery, M. A. Timofeyev, P. Verburg, G. A. Weyhenmeyer, and R. Adrian. 2021. Climate change drives widespread shifts in lake thermal habitat. *Nature Climate Change*, 11(6), pp.521-529
- May, R. M. 1972. Will a large complex system be stable? *Nature* 238:413–414.
- Merz, E., E. Saberski, L. J. Gilarranz, P. Isles, G. Sugihara, C. Berger, and F. Pomati. 2023. Disruption of ecological networks in lakes by climate change and nutrient fluctuations. *Nature Climate Change*. 13(4), pp.389-396.
- Montoya, J. M., and D. Raffaelli. 2010. Climate change, biotic interactions and ecosystem services. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 365:2013–2018.
- O'Connor, M. I., M. F. Piehler, D. M. Leech, A. Anton, and J. F. Bruno. 2009. Warming and resource availability shift food web structure and metabolism. *PLoS Biology* 7:e1000178.
- Poisot, T., D. B. Stouffer, and D. Gravel. 2015. Beyond species: why ecological interaction networks vary through space and time. *Oikos* 124:243–251.
- Pomati, F., B. Matthews, J. Jokela, A. Schildknecht, and B. W. Ibelings. 2012. Effects of re-oligotrophication and climate warming on plankton richness and community stability in a deep mesotrophic lake. *Oikos* 121:1317–1327.
- Pomati, F., B. Matthews, O. Seehausen, and B. W. Ibelings. 2017. Eutrophication and climate warming alter spatial (depth) co-occurrence patterns of lake phytoplankton assemblages. *Hydrobiologia* 787:375–385.
- Pomati, F., J. B. Shurin, K. H. Andersen, C. Tellenbach, and A. D. Barton. 2019. Interacting Temperature, Nutrients and Zooplankton Grazing Control Phytoplankton Size-Abundance Relationships in Eight Swiss Lakes. *Frontiers in Microbiology* 10:3155.
- Scheffer, M., J. Bascompte, W. A. Brock, V. Brovkin, S. R. Carpenter, V. Dakos, H. Held, E. H. van Nes, M. Rietkerk, and G. Sugihara. 2009. Early-warning signals for critical transitions. *Nature* 461:53–59.
- Sugihara, G., R. May, H. Ye, C.-H. Hsieh, E. Deyle, M. Fogarty, and S. Munch. 2012. Detecting causality in complex ecosystems. *Science* 338:496–500.
- Ushio, M., C.-H. Hsieh, R. Masuda, E. R. Deyle, H. Ye, C.-W. Chang, G. Sugihara, and M. Kondoh. 2018. Fluctuating interaction network and time-varying stability of a natural fish community. *Nature* 554:360–363.
- Ye, H., and G. Sugihara. 2016. Information leverage in interconnected ecosystems: Overcoming the curse of dimensionality. *Science* 353:922–925.
- Yodzis, P. 1980. The connectance of real ecosystems. *Nature*, 284(5756), pp.544-545.

TP 7C: Eawag, Eindimensionale Modellierung der Folgen von Klimawandel und Invasion der Quaggamuschel für das Ökosystem Bodensee.

Projektbeteiligte: Martin Schmid, Damien Bouffard, promovierte wissenschaftlich tätige Person

Einleitung:

Wie in der Einleitung zum Gesamtprojekt beschrieben, werden der Klimawandel und die Ausbreitung der Quaggamuschel voraussichtlich in den nächsten Jahrzehnten die größten Veränderungen im Bodensee bewirken und entsprechend auch die größten Herausforderungen an die Nutzenden der Ökodiebstleistungen des Sees stellen. Für diese ist es von großer Bedeutung, die Bandbreite der möglichen Entwicklungen des Seeökosystems zu kennen. Ein eindimensionales Seemodell ist aufgrund seiner geringen Rechenintensität bestens geeignet, um eine große Anzahl an Szenarien zu berechnen, ausführliche Sensitivitätsanalysen für das Modellsystem durchzuführen, und so die gesamte Bandbreite der möglichen Entwicklungen und die Sensitivität des Ökosystems auf die erwarteten Veränderungen auszuloten. Zu diesem Zweck verwenden wir das eindimensionale physikalische Seemodell Simstrat (Goudsmit et al., 2002), welches von uns bereits operationell zur Simulation der Temperatur und der saisonalen Mischungsprozesse für alle größeren Schweizer Seen betrieben wird (Gaudard et al., 2019). Täglich aktualisierte Simulationen der Temperaturstruktur des Sees sind auf der Webseite simstrat.eawag.ch für den Zeitraum von 1981 bis heute verfügbar. Modellrechnungen für die zukünftige Entwicklung der Temperaturverhältnisse im Bodensee wurden mit dem Simstrat-Modell im Rahmen des Projekts Hydro-CH2018 durchgeführt (BAFU, 2021; Råman Vinnå et al., 2021). Um auch gekoppelte physikalisch-biogeochemische Modellrechnungen durchführen zu können, wurde das Simstrat-Modell kürzlich mit dem biogeochemischen Modell AED2 der University of Western Australia verbunden (Bärenbold et al., 2022).

Problemstellung/Ziele:

Dieses Teilprojekt erzeugt gemeinsam mit dem Teilprojekt 5 die numerischen Modelle, also die Werkzeuge, welche benötigt werden, um eines der Hauptziele des Projekts, die Vorhersage der Folgen des Klimawandels und invasiver Arten, sowie deren Zusammenspiel für das Ökosystem Bodensee und dessen Nutzung, erfüllen zu können. Das eindimensionale Modell Simstrat wird dabei in erster Linie eingesetzt, um die Sensitivität der Modellvorhersagen auf die Modellannahmen zu überprüfen und robuste Aussagen für die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen machen zu können. Das Teilprojekt 7C ist in folgende Arbeitspakete unterteilt:

1. Simulation der Temperaturstruktur sowie von Sauerstoff- und Nährstoffkonzentrationen im Bodensee mit dem eindimensionalen Seemodell Simstrat.
2. Abschätzung der Folgen a) des Klimawandels und b) der erwarteten Ausbreitung der Quaggamuschel auf die physikalischen Prozesse sowie die Nährstoff- und Sauerstoffkonzentrationen im Bodensee.
3. Exploration verschiedener möglicher Szenarien für die zukünftige Entwicklung des Bodensee-Ökosystems durch Verbindung der Ergebnisse aus 1) und 2) mit den in anderen Arbeitspaketen entwickelten datenbasierten Ökosystemmodellen.
4. Entwicklung eines benutzerfreundlichen Online Tools für Stakeholder.

Arbeiten im Teilprojekt:

Die Arbeiten im Teilprojekt 7C beinhalten folgende Arbeitspakete (AP):

AP 1: Aufsetzen des gekoppelten biogeochemischen 1D-Modells für den Bodensee

Das gekoppelte physikalisch-biochemische Modell Simstrat-AED2 wird für den Bodensee aufgesetzt. Dabei soll auch eine Version des Modells implementiert werden, welche soweit wie möglich die im 3D-Modell aus Teilprojekt 05 implementierten Modellgleichungen für die biogeochemischen Prozesse verwendet. Dadurch wird ein direkter Vergleich ermöglicht zwischen den Ergebnissen der beiden Modelle. Dies erlaubt einerseits Rückschlüsse, wie sensitiv die Modellergebnisse auf die unterschiedliche räumliche Auflösung der beiden Modelle sind. Andererseits ermöglicht es eine Identifikation der räumlichen Prozesse, welche auf die zukünftige Entwicklung des Bodensees einen wesentlichen Einfluss haben könnten.

Milestone 1: Das gekoppelte biogeochemische Modell ist aufgesetzt und mit den vorhandenen Messdaten kalibriert.

AP 2: Auswertung der Modellergebnisse für den historischen Zeitraum von 1981 bis heute

Die Modellergebnisse werden für den Zeitraum von 1981 bis heute ausgewertet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Auswertung der simulierten Temperaturverhältnisse sowie Nährstoff- und Sauerstoffkonzentrationen. Insbesondere wird ausgewertet, wie gut historische Veränderungen in den Temperaturverhältnissen, den Nährstoffkonzentrationen und den Sauerstoffkonzentrationen (Fink et al., 2014; IGKB, 2022; Rhodes et al., 2017) mit dem Modell reproduziert und durch die im Modell berücksichtigten Prozesse erklärt werden können.

Milestone 2: Bericht zur historischen Entwicklung der Temperatur-, Sauerstoff- und Nährstoffverhältnisse im Bodensee.

AP 3: Bereitstellung zukünftiger Szenarien für das Klima und die Zuflüsse

Gemeinsam mit dem Teilprojekt 05 werden Szenarien bereitgestellt, um das 1D-Modell aus diesem Teilprojekt sowie das 3D-Modell aus dem Teilprojekt 05 mit denselben Szenarien antreiben zu können. Für das Klima werden zu diesem Zweck die Klimaszenarien CH2018 (NCCS, 2018) verwendet, welche den Vorhersagen im Rahmen des Projekts Hydro-CH2018 (BAFU, 2021) zugrunde liegen. Falls diese rechtzeitig vorhanden sein werden, können alternativ auch die Klimaszenarien CH2025 verwendet werden, deren Entwicklung kürzlich eingeleitet wurde (Schweizerische Eidgenossenschaft, 2020). Die CH2018 und CH2025 Szenarien beinhalten Simulationen mit einer Reihe von gekoppelten globalen und regionalen Klimamodellen für verschiedene Szenarien der Treibhausgasemissionen. Insbesondere für rechenaufwendige Simulationen kann basierend auf Kriterien für die Repräsentativität eine Auswahl der zu verwendenden Szenarien getroffen werden (Merrifield et al., 2023). Die Zuflüsse können aus den Abflussvorhersagen des Hydro-CH2018 Projekts hergeleitet werden (Muelchi et al., 2021; Zappa et al., 2021). Für die Nährstofffrachten der Zuflüsse können verschiedene Szenarien gerechnet werden, beispielsweise konstant bleibende Frachten, abflussproportional sich verändernde Frachten, oder eine Zunahme oder Abnahme der Frachten je nach zu erwartenden Veränderungen im Einzugsgebiet (Landwirtschaft, Wald, Erosion).

Milestone 3: Szenarien für die zukünftige Entwicklung des Klimas, der Zuflüsse und der Nährstoffeinträge in den Bodensee stehen zur Verfügung.

AP 4: Simulation und Auswertung von Klimawandelszenarien

Das Simstrat-AED2 Modell wird mit den in AP 3 bereitgestellten Szenarien angetrieben, und die unter verschiedenen Szenarien zu erwartenden Veränderungen in den Temperaturverhältnissen, den Sauerstoff- und Nährstoffverhältnissen werden evaluiert. Die Ergebnisse werden mit den Vorhersagen des dreidimensionalen Modells verglichen. Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen wird zudem die Sensitivität der Vorhersagen des Simstrat-AED2 Modells auf diverse Modellannahmen überprüft.

Milestone 4: Bericht/Publication zur erwarteten Entwicklung der Temperatur-, Sauerstoff- und Nährstoffverhältnisse im Bodensee unter verschiedenen Szenarien.

AP 5: Implementierung eines einfachen Modells für die Auswirkungen der Quaggamuscheln

In diesem Schritt werden die möglichen Auswirkungen verschiedener Szenarien für die Ausbreitung der Quaggamuschel auf die physikalischen und biogeochemischen Prozesse im Bodensee untersucht. Der Fokus liegt dabei auf einer robusten Eingrenzung der möglichen Folgen. Als Grundlage für die Berechnungen werden in Zusammenarbeit mit Teilprojekt 7A Szenarien für die Ausbreitung der Quaggamuschel und Ansätze für deren direkte Auswirkung auf die im Simstrat-AED-Modell simulierten Prozesse entwickelt.

Milestone 5: Ein gekoppeltes Modell ist implementiert, welches die möglichen Auswirkungen der Invasion der Quaggamuscheln auf die Temperatur-, Nährstoff- und Sauerstoffbedingungen im Bodensee simuliert.

AP 6: Entwicklung von hybriden Modellen, um die Sensitivität des Ökosystems auf den Klimawandel und die Invasion der Quaggamuschel zu überprüfen

Empirische Modelle für Teile des Bodenseeökosystems, welche aus den Teilprojekten 2,3,4,6 und 7B hervorgehen, können mit dem Simstrat-AED2 Modell gekoppelt werden. Dies erlaubt eine Abschätzung, wie sich die veränderte Temperaturstruktur, und die veränderten Nährstoff- und Sauerstoffverhältnisse auf verschiedene Bestandteile des Ökosystems auswirken können.

Milestone 6: Szenarien für die Entwicklung verschiedener Bestandteile des Bodenseeökosystems als Funktion der Temperaturstruktur und des Nährstoff- und Sauerstoffverhältnisse stehen zur Verfügung.

AP 7: Entwicklung eines benutzerfreundlichen Web-Interface für das 1D-Modell

Ein benutzerfreundliches Web-Interface wird entwickelt, in welchem Nutzende Anpassungen in den Modellannahmen machen und deren Auswirkungen auf simulierte Parameter wie die Temperatur oder

die Sauerstoffkonzentrationen im Bodensee visualisieren können. Diese Arbeit wird unter Einbezug eines Softwareentwicklers parallel zum Forschungsprojekt durchgeführt.
Milestone 7: Ein benutzerfreundliches Web-Interface für das gekoppelte 1D-Modell Simstrat-AED2 steht zur Verfügung.

Relevanz:

Die Modellierung der Szenarien für die Auswirkungen des Klimawandels und der Invasion der Quaggamuscheln sind ein Kernstück des Projekts. Der Klimawandel und die Invasion der Quaggamuschel sind voraussichtlich die wichtigsten Ursachen für Veränderungen im Bodenseeökosystem in den nächsten Jahrzehnten. Robuste Szenarien für deren mögliche Auswirkungen sind deshalb eine unerlässliche Grundlage für die Diskussion möglicher Maßnahmen zum Schutz des Ökosystems. Bei der Entwicklung der Modelle wird Wert gelegt, dass die Methoden möglichst auch auf andere Seesysteme übertragbar sind. Mit dem Web-Interface wird zudem für Stakeholder die Möglichkeit geschaffen, eigene Modellannahmen zu testen und die Modellergebnisse zu visualisieren.

Vernetzung mit anderen Projekten in BOiSMo:

Der Code des numerischen Modells Simstrat-AED2 und alle wesentlichen Modellergebnisse und verwendeten Szenarien aus dem Teilprojekt 7C stehen den anderen Teilprojekten frei zur Verfügung und werden spätestens bei Abschluss des Projekts öffentlich verfügbar gemacht.

Das Teilprojekt 7C arbeitet eng mit dem Teilprojekt 5 zusammen. Klima- und Zuflussszenarien werden gemeinsam entwickelt und verwendet. Vergleiche der Modellergebnisse und Modellgleichungen führen zu einem besseren Verständnis der Prozesse, welche in den beiden Modellen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, und können so helfen, die Modelle selbst zu verbessern.

Die Entwicklung der Szenarien für die Invasion der Quaggamuschel (AP 5) erfolgt gemeinsam mit Teilprojekt 7A. In Zusammenarbeit mit den Teilprojekten 2,3,4,6, und 7B können hybride Modelle für die Abschätzung der Klimafolgen auf das Ökosystem im Bodensee erstellt werden.

Projektzeitplan:

Projekt 7C, Eawag Schmid, Bouffard	2023	2024			2025			2026		
Entwicklung Modell für Nährstoffe und O ₂										
Auswertung Ergebnisse für den hist. Zeitraum										
Bereitstellung Szenarien Klima / Nährstoffe										
Simulation und Auswertung Klimaszenarien										
Modellierung Folgen Invasion Quagga										
Kopplung Simstrat-Oekosystemmodelle										
Entwicklung Online-Tool										
Berichte/Publicationen										

Literatur:

- BAFU (Hrsg.) 2021: Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2101: 134 S
- Bärenbold, F., Kipfer, R., & Schmid, M. (2022). Dynamic modelling provides new insights into development and maintenance of Lake Kivu's density stratification. *Environmental Modelling & Software*, 147, 105251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105251>.
- Fink, G., Schmid, M., Wahl, B., Wolf, T., & Wüest, A. (2014). Heat flux modifications related to climate-induced warming of large European lakes. *Water Resources Research*, 50, 2072-2085. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2013WR014448>.
- Gaudard, A., Råman Vinnå, L., Bärenbold, F., Schmid, M., & Bouffard, D. (2019). Toward an open access to high-frequency lake modeling and statistics data for scientists and practitioners – the case of Swiss lakes using Simstrat v2.1. *Geoscientific Model Development*, 12, 3955-3974. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/gmd-12-3955-2019>.
- Goudsmit, G.-H., Burchard, H., Peeters, F., & Wüest, A. (2002). Application of k-e turbulence models to enclosed basins: the role of internal seiches. *Journal of Geophysical Research*, 107, 3230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2001JC000954>.

- IGKB (2022). Jahresbericht der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee: Limnologischer Zustand des Bodensees Nr. 44 (2020-2021).
- Merrifield, A. L., Brunner L., Lorenz R., Humphrey V., & Knutti R. (2023). Climate model Selection by Independence, Performance, and Spread (ClimSIPS v1.0.1) for regional applications. *Geoscientific Model Development*, 16, 4715–4747. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-4715-2023>.
- Muelchi, R., Roessler, O., Schwanbeck, J., & Martius Romppainen, O. (2021). An ensemble of daily simulated runoff data (1981-2099) under climate change conditions for 93 catchments in Switzerland (Hydor-CH2018-Runoff ensemble). *Geoscience Data Journal*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/gdj3.117>.
- NCCS (2018). CH2018 - Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services.
- Råman Vinnå, L., Medhaug, I., Schmid, M., & Bouffard, D. (2021). The vulnerability of lakes to climate change along an altitudinal gradient. *Communications Earth & Environment*, 2, 35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s43247-021-00106-w>.
- Rhodes, J., Hetzenauer, H., Frassl, M. A., Rothhaupt, K. O., & Rinke, K. (2017). Long-term development of hypolimnetic oxygen depletion rates in the large Lake Constance. *Ambio*, 46(5), 554-565. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0896-8>.
- Schweizerische Eidgenossenschaft. (2020). Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2020-2025.
- Zappa, M., Lustenberger, F., Weingartner, R., Bühlmann, A., & Mülchi, R. (2021). Mean discharge of large catchments. In *Hydro-CH2018: Scenarios to 2011. Hydrological Atlas of Switzerland*.