



SeeWandel

SeeWandel Projektzusammenfassung Juni 2023

Leben im Bodensee –
gestern, heute und morgen



Bild: © Andreas Bannwart



Ökosystemforschung am Bodensee - der See ändert sich grundlegend

Während fünfeinhalb Jahren untersuchten Forschende von sieben Instituten aus drei Ländern den Einfluss und die Wechselwirkung verschiedener Stressfaktoren wie Nährstoffänderungen, invasive Arten und Klimawandel auf das Ökosystem Bodensee. Der Einfluss dieser Stressfaktoren und die Resilienz des Sees standen im Mittelpunkt des Forschungsprojekts „SeeWandel: Leben im Bodensee – gestern, heute und morgen“. Im Hinblick auf die Nährstoffänderungen im Bodensee zeigen einige Organismengruppen eine erstaunliche Reversibilität in Anbetracht der zeitgleich erfolgten Klimaänderungen und Einwanderung von Neozoen, andere jedoch nicht. Zu befürchten ist dennoch, dass diese Erholung nur von kurzer Dauer ist, da Klimawandel und invasive Arten wie Quaggamuschel und Stichling das Ökosystem Bodensee vermutlich weitreichend verändern werden. Erste Anzeichen dafür konnten in SeeWandel untersucht werden. In welche Richtung der Wandel vom Bodensee weitergehen könnte und was dies für seine Ökosystemdienstleistungen bedeutet, wird in dieser Projektzusammenfassung diskutiert.



Grenzüberschreitende Forschung zum Wandel des Bodensees

Wie der Projektname andeutet, widmet sich SeeWandel den Folgen der durch den Menschen verursachten Änderungen, die der Bodensee durchlief und die in neuerer Zeit im See zu beobachten sind. Zu nennen sind hier insbesondere die hohen Nährstoffeinträge während der Eutrophierung, klimatische Veränderungen und invasive Arten – alles Faktoren, die die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft im Bodensee verändern, mit möglichen Auswirkungen auf die Funktionsweise und die Leistungen des Ökosystems (Abb. 1).

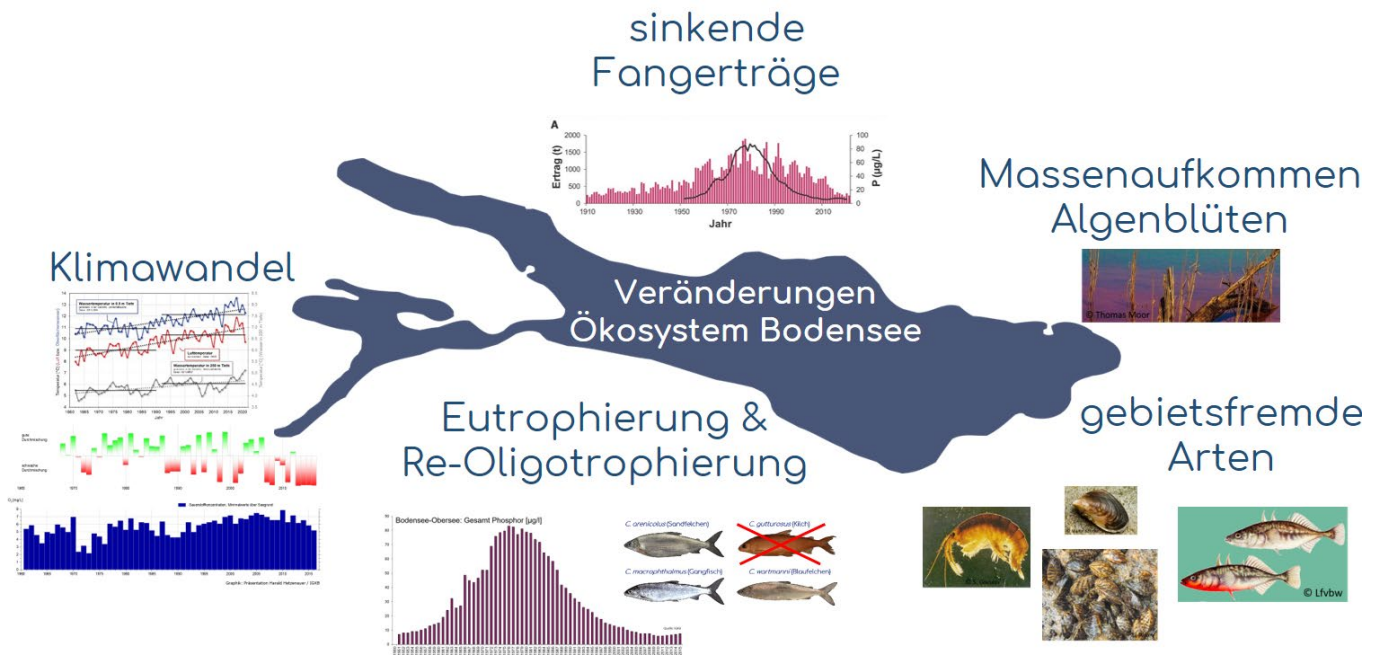


Abb. 1: Schematische Übersicht der Hauptthemen, die in SeeWandel untersucht wurden.

Den Anstoß zum Forschungsprojekt gab die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB). Im Vordergrund standen zunächst Untersuchungen zur Resilienz – wie der Bodensee auf sich ändernde Umweltbedingungen (v.a. Nährstoffänderungen) reagiert und ob sich das Ökosystem wieder zurück zum ursprünglichen Zustand bewegt oder sich bleibend geändert hat. Der Fokus weitete sich aus, weitere Forschende und Partnerinstitutionen wurden gewonnen und mithilfe von Interreg¹ konnte das breit angelegte Forschungsprogramm letztlich am Bodensee realisiert werden. Seit 2018 untersuchen Forschende von sieben Institutionen² aus drei Ländern (Deutschland, Schweiz, Österreich) die Auswirkungen und die Bedeutung sowie die

Wechselwirkungen insbesondere von Nährstoffrückgang (Re-Oligotrophierung), invasiven und gebietsfremden Arten und Klimawandel auf das Ökosystem Bodensee, seine Biodiversität und Funktionsweise sowie die menschliche Nutzung am See. Das Forschungsvorhaben umfasst 13 Teilprojekte, ein breites Methodenspektrum kommt zur Anwendung und teilweise werden Ergebnisse und Erkenntnisse aus anderen Seen (z.B. Zürichsee) herangezogen. Das Nahrungsnetz betreffend schließen die Betrachtungen Primärproduzenten (z.B. Phytoplankton, Wasserpflanzen) und -konsumenten (z.B. Zooplankton) sowie Sekundärkonsumenten (z.B. Fische) ein (Abb. 2). Viele der Untersuchungen haben Praxisrelevanz (u.a. im Hinblick auf Trinkwasserversorgung, Fischerei, Tourismus).

¹ Interreg, das Regionalprogramm der Europäischen Union zur Förderung der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit, an dem sich auch Nicht-EU-Staaten beteiligen können (www.interreg.org), finanzierte 53 % des SeeWandel-Projektbudgets

² Am Projekt beteiligt sind: Universität Hohenheim, Universität Innsbruck, Universität Konstanz, Universität Zürich, Fischereiforschungsstelle Baden-Württemberg (FFS-LAZBW), Institut für Seenforschung (LUBW-ISF), Eawag: Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs.

Grenzüberschreitender Austausch mit Stakeholdern, lokalen Behörden und Verwaltungen sowie Wissenstransfer wird eine große Bedeutung beigemessen. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst, entlang der wich-

tigsten Komponenten des Nahrungsnetzes (Abb. 2): Primärproduzenten (hier: Burgunderblutalge & Wasserpflanzen), Primärkonsumenten (hier: Zooplankton & Quaggamuschel) und Sekundärkonsumenten (hier: Stichling und Felchen).

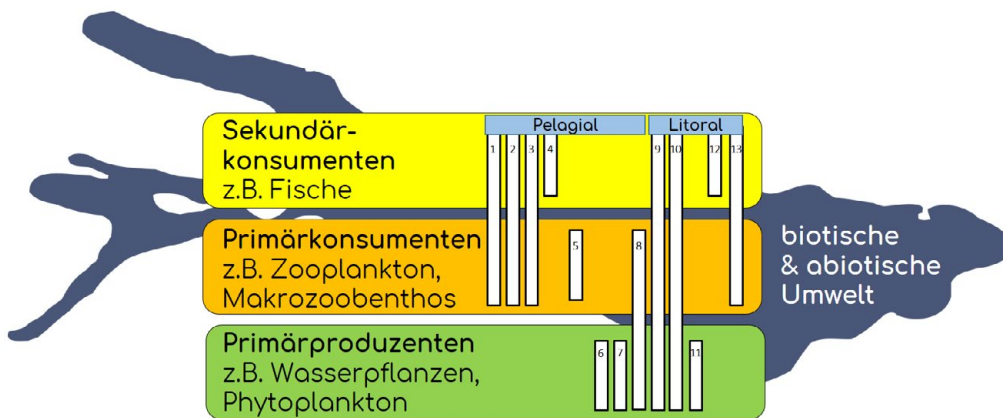


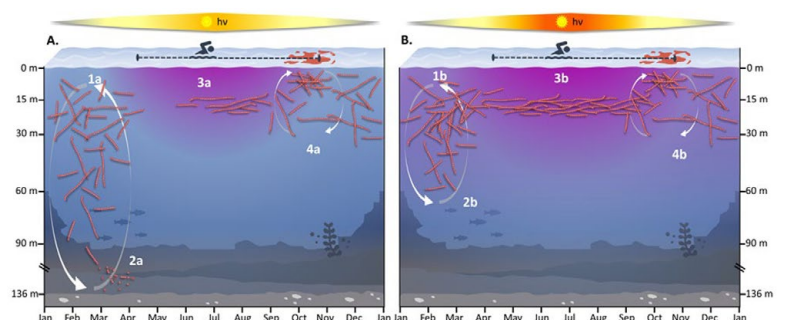
Abb. 2: SeeWandel umfasst 13 Teilprojekte, als vertikale Balken mit Teilprojektnummern dargestellt, deren Untersuchungen zu einem verbesserten Prozessverständnis des Pelagials (uferferner Freiwasserbereich) und Litorals (Uferregion), sowie Interaktionen zwischen diesen beitragen. Die Teilprojekte befassen sich mit einzelnen Komponenten des Nahrungsnetzes und deren Wechselwirkungen.

Derzeit ist es unwahrscheinlich, dass die Burgunderblutalge *Planktothrix rubescens* zu einer Problemart im Bodensee wird

Im Herbst 2016 bis Frühling 2017 wurde die Burgunderblutalge erstmals massenhaft als roter Oberflächenfilm im Bodensee-Obersee beobachtet. Bei Massenvorkommen ist Vorsicht geboten, da sie Stoffwechselprodukte bilden kann, die für Mensch und Tier giftig sind. Außerdem machen sie die Giftstoffe zu einer ungeeigneten Nahrungsquelle für Kleinkrebse. Bei regelmäßigen Massenvorkommen kann die Burgunderblutalge dadurch zu einer Senke für Nährstoffe werden und es kann zu einer Verarmung des Artenreichtums und zu gravierenden Umstrukturierungen des Nahrungsnetzes kommen.

Seit 2017 ist die Burgunderblutalge allerdings nur noch in geringen Mengen nachweisbar. Aufgrund ihrer Lebensweise und -ansprüche wird derzeit die Wahrscheinlichkeit einer dauerhaften Etablierung der Burgunderblutalge im Freiwasser des Bodensee-Obersees als niedrig eingestuft (Abb. 3). Es wird angenommen, dass die Burgunderblutalge im tiefen Bodensee die Winterdurchmischung größtenteils nicht überlebt. Kommt es jedoch während mehrerer Jahre zu einer sehr schwachen Durchmischung des Sees oder zu unerwarteten Nährstoffeinträgen, z.B. durch Hochwasserereignisse, könnte dies zu weiteren Massenentwicklungen führen.

Abb. 3: Das Wachstumsmuster der Burgunderblutalge während einer vollständigen Durchmischung (A) und während einer abgeschwächten Durchmischung (B) der Wassersäule des Sees. (1a-3a) Eine vollständige Durchmischung bewirkt, dass die Gasvesikel, die der Burgunderblutalge Auftrieb verleihen, kollabieren und ein Großteil der Population abstirbt, da der Aufstieg ins Oberflächenwasser nicht mehr möglich ist. Sehr geringe Bestandsdichten im Frähsommer sind die Folge. (1b-3b) Ist die Durchmischung abgeschwächt, überlebt der Großteil der Population und Bestandsdichten sind bereits im Frähsommer sehr hoch. (4a, 4b) Sowohl bei vollständiger als auch abgeschwächter Durchmischung kommt es im Herbst zu oberflächlichen Durchmischungen und es kann sich ein rötlicher Oberflächenfilm ausbilden (Grafik: Knapp & Posch 2021).





Im Litoral haben sich im Zuge der Re-Oligotrophierung die Wasserpflanzen (Makrophyten), v.a. die Armelechteralgen, wieder stark ausgebreitet - die Artendiversität hat zugenommen

2019 wurden die Makrophytenbestände in zwei Untersuchungsgebieten, Untersee und Friedrichshafener Bucht (Obersee), auf Artniveau flächenscharf erfasst und mit früheren luftbildbasierten Kartierungen von 1967, 1978 und 1993 verglichen. Der Schwerpunkt lag dabei auf der quantitativen Untersuchung der Einflüsse der Eutrophierungs- und Oligotrophierungsprozesse auf die Artenzusammensetzung und Vegetationsstruktur submerser Makrophytenbestände in den vergangenen Jahrzehnten. Grundlage für die Beurteilung der Resiliendynamik sowie für die Entwicklung von automatisierten, flächendeckenden Bewertungsindices bildet die Erfassung der aktuellen Makrophytenbestände mittels Integration verschiedener Fernerkundungstechniken. Hiermit wird die Basis für eine flächendeckende, automatisierte Bewertung nach der EU-Wasserrahmenrichtlinie oder der Habitatqualität für im Litoral lebenden Organismen wie Makroinvertebraten und Fische gelegt. In Abb. 4 sind die Randliniendichten zwischen hochwachsenden und niedrigwachsenden Makrophytenbeständen bezogen auf Hexagongrundflächen dargestellt.

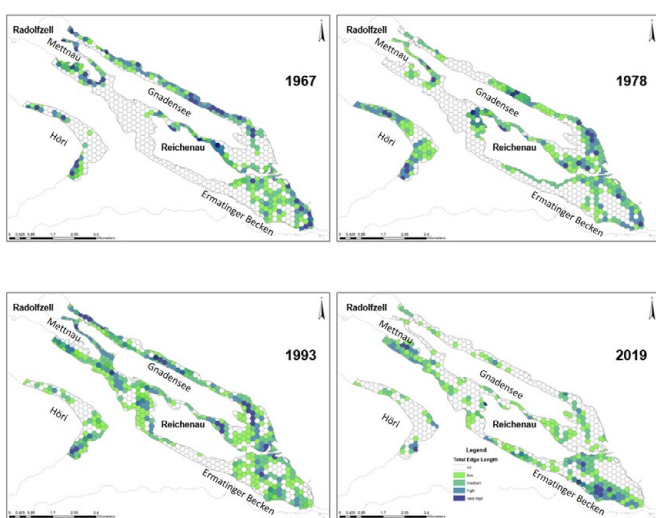


Abb. 4: Vergleichende Hexagondarstellung der Randliniendichten für die hochwüchsigen Laichkräuter im Bodensee-Untersee für die Jahre 1967, 1978, 1993 und 2019. Hexagonlegende: weiß = keine, hellgrün = gering, dunkelgrün = mittel, blau = hoch, dunkelblau = sehr hoch (unveröffentlichte Daten K. Schmieder et al.).

Ersichtlich ist, dass 2019 – im Vergleich zu den anderen Jahren – sowohl eine räumliche Verlagerung (1967: Schwerpunkt Gnadensee, 1978: Schwerpunkt Höri und Hegnebuch Gnadensee, 1993: Gnadensee und westliche Reichenau, 2019: Schwerpunkt Ermatinger Becken und Südufer Mettnau) als auch ein Rückgang der hochwüchsigen Makrophytenstrukturen stattfand. Dies kann Auswirkungen auf die Habitatqualität von Makroinvertebraten und Jungfischen haben.

Da in den hochwachsenden Wuchsformklassen hauptsächlich mesotrophente und eutrophente Arten zusammengefasst sind, bilden sie ebenso die Trophiebedingungen räumlich und zeitlich ab und spiegeln damit die Re-Oligotrophierung des Sees wider. Diese wird auch in Abb. 5 deutlich, wonach im Litoral sich nach der Eutrophierung die Makrophyten, v.a. die Armelechteralgen, stark ausgebreitet haben. Die Artendiversität hat im Laufe der Re-Oligotrophierung zugenommen und viele im Laufe der Eutrophierung verschollene Arten konnten sich wieder ansiedeln, womit die Reversibilität/Resilienz der Makrophyten eindrucksvoll verdeutlicht wird.

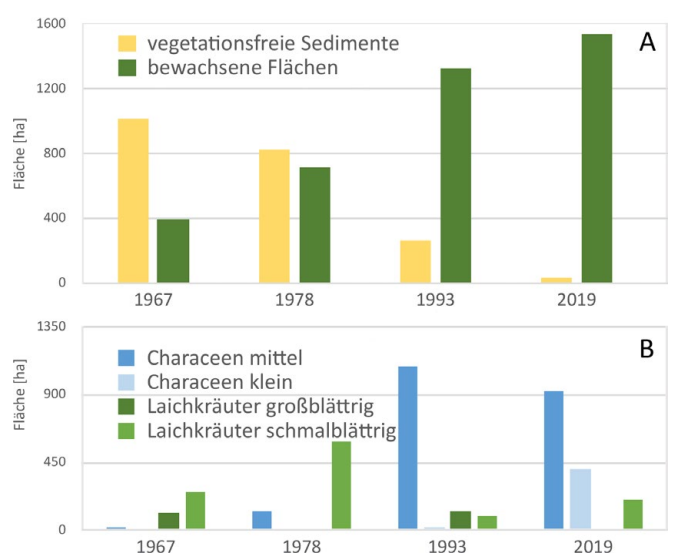


Abb. 5: A. Vergleich der Flächen an bewachsfreiem Sediment (gelb) mit von Makrophyten bewachsenen Sedimentflächen (grün) im Bodensee-Untersee für die Jahre 1967, 1978, 1993 und 2019. B. Vergleich der Veränderungen der Flächenanteile verschiedener Bewuchsformen in der Litoralfläche. Die hochwüchsigen Laichkräuter haben im Verhältnis zu den Characeen (Armelechteralgen) stark abgenommen (unveröffentlichte Daten K. Schmieder et al.).



Untersuchungen von Kieselalgen und Wasserflöhen in Sedimentkernen des Bodensee-Obersees zeigen eine erstaunliche Resilienz/Reversibilität der Kieselalgen

An nährstoffarme Bedingungen angepasste Arten von Kieselalgen (Diatomeen, wie z.B. *Cyclotella cyclopuncta*) wurden während der Eutrophierung von Arten ersetzt, die an nährstoffreiche Bedingungen angepasst sind (wie z.B. *Stephanodiscus minutulus* und *Asterionella formosa*). Durch die Sanierungsmaßnahmen wurde diese Entwicklung umgekehrt, mit der Konsequenz, dass im heutigen Bodensee wieder an nährstoffarme Bedingungen angepasste Arten dominieren (Abb. 6). Auch der Sedimentationsflux von Wasserflöhen (*Daphnia*) zeigt eine starke Zunahme mit der Eutrophierung und mit einsetzender Re-Oligotrophierung wieder eine starke Abnahme (Abb. 6).

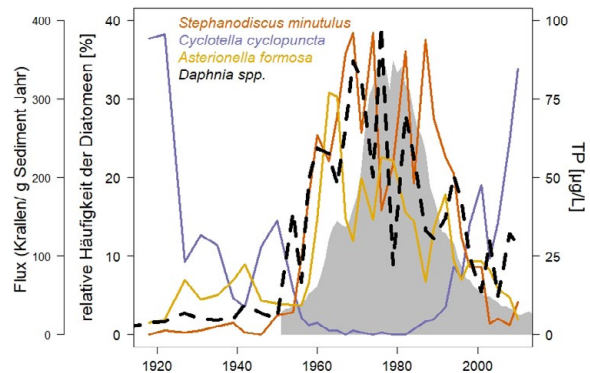


Abb. 6: Entwicklung der relativen Häufigkeit von drei Diatomeenarten (*Stephanodiscus minutulus*, *Asterionella formosa*, *Cyclotella cyclopuncta*), *Daphnia*-Furkakrallen-Mengen und der Gesamtphosphorkonzentration (TP, graue Fläche) während der Eutrophierung und Re-Oligotrophierung des Bodensees, basierend auf Zählungen aus Sedimentkernproben (Daten aus Milan et al. 2022).

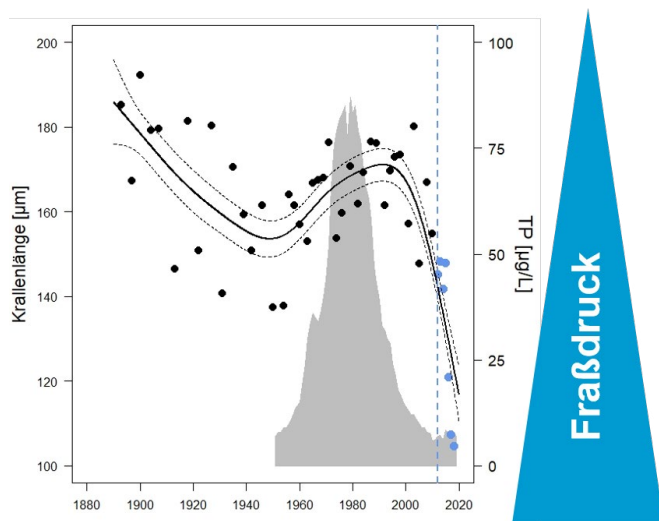


Abb. 7: Mittlere Größe von *Daphnia*-Furkakrallen, isoliert aus verschiedenen Schichten eines Sedimentkerns, als Maß für den Fraßdruck der Fische auf das Zooplankton. Die blauen Punkte markieren die Zeit nach der Besiedelung des offenen Wassers durch den Stichling (unveröffentlichte Daten D. Straile et al.).

Die Größenvermessungen an *Daphnia*-Überresten zeigen, dass die Größe der Planktonarten über die Zeit variiert. Weil Fische die großen *Daphnia* bevorzugen, geben diese Daten einen Hinweis auf den Prädationsdruck von den Fischen auf das Plankton. Abb. 7 lässt vermuten, dass die momentane mittlere *Daphnia*-größe im See die geringste während der letzten 100 Jahre ist. Vermutet wird, dass dies mit der Einwanderung der Stichlinge in das Freiwasser des Bodensees zusammenhängt. Diese Sedimentergebnisse werden von Plankton-Monitoringdaten bestätigt. Seit der Einwanderung der Stichlinge in das Freiwasser hat sich die mittlere Zooplanktongröße im Bodensee verringert. Dies liegt v.a. an der Einwanderung und zeitweisen Dominanz von *Daphnia cucullata* in den Bodensee-Obersee, aber auch an starken Populationsentwicklungen von kleineren Planktonarten wie *Bosmina* und *Diaphanosoma*. Dies alles könnte bedeuten, dass die Biomasse des von dem Felchen präferierten Zooplanktons im Bodensee abgenommen hat.



Die Daphniengesellschaft vom Bodensee hat sich genetisch irreversibel geändert, die kleine *Daphnia cucullata* übernimmt

Wasserflöhe der Gattung *Daphnia* haben eine zentrale Rolle im Nahrungsnetz. Sie sind eine wichtige Nahrungsquelle vieler Fischarten, wie der Felchen. Während der Eutrophierung kam zu der ursprünglich im Bodensee heimischen *Daphnia longispina*, die invasive *D. galeata* hinzu, und es kam dabei auch zur Bildung von Hybriden. Die Re-Oligotrophierung hat die Daphniengesellschaft wieder in die Richtung der ursprünglichen Zusammensetzung (*D. longispina*) verschoben. Allerdings wurde der Ausgangszustand nicht wieder erreicht. Hybride und *D. galeata*, letztere aber nur in sehr geringer Dichte, sind geblieben. Zudem ist die heutige *D. longispina* Population nicht mehr identisch mit der ursprünglichen Bodenseepopulation (Abb. 8). Die Veränderung in der Daphniengesellschaft durch die Eutrophierung scheint nachhaltig und irreversibel, insbesondere da sich seit einigen Jahren eine weitere Art, *D. cucullata*, stark ausbreitet. Diese Art findet man eigentlich meistens in nährstoffreicheren und flacheren Gewässern. Als Gründe für die *D. cucullata* Dominanz im Bodensee werden daher die Stichlingsinvasion und der Klimawandel vermutet.

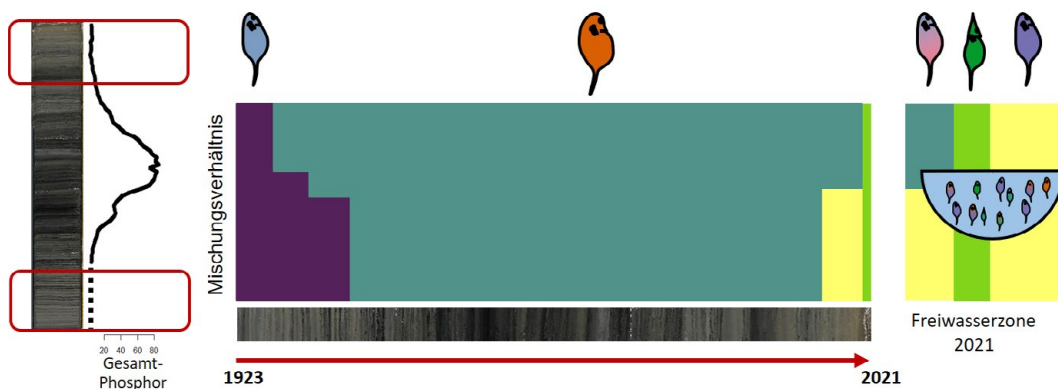


Abb. 8: Die Abbildung zeigt die genetische Zusammensetzung der drei *Daphnia* Arten, der Daphniengemeinschaft in der Dauereibank von 1923 bis 2021, sowie die Zusammensetzung der Population in der Freiwasserzone in 2021 (rechts). Die Farben zeigen genetische Komponenten, die den unterschiedlichen Arten entsprechen: *D. cucullata* (hellgrün), *D. galeata* (dunkelgrün), *D. longispina* (2 unterschiedliche Populationen, violett und gelb). Man kann die ursprüngliche *D. longispina* Population (violett), die Invasion von *D. galeata* mit anschließender Hybridisierung (violett – dunkelgrüne Balken), die Wiederetablierung einer neuen, anderen *D. longispina* Population (gelb – dunkelgrüne Balken) und die Invasion von *D. cucullata* sehen. Die roten Vierecke über Sedimentkern und Phosphorkurve (links) kennzeichnen die Perioden und trophischen Verhältnisse unter denen die zwei verschiedenen *D. longispina* Populationen vorgekommen sind (unveröffentlichte Daten T. Holtzem et al.).



Felchen und Stichlinge überlappen sehr stark in ihrer Nahrungspräferenz (Zooplanktonarten)

Mageninhaltsanalysen von Felchen und Stichlingen im Bodensee zeigen eine ähnliche Beutepreferenz beider Fischarten, v.a. im Sommer und insbesondere größere Zooplanktonarten betreffend, wie *Bythotrephes longimanus*, *Leptodora kindtii* und planktivore Cladoceren wie *Daphnia longispina* (Abb. 9). Kleinere Zooplanktonarten wie *Bosmina* werden dann gefressen, wenn diese Arten jahreszeitlich bedingt häufig auftreten und große Arten als Alternativen fehlen (Abb. 9). Von Bedeutung für das Zooplankton dürfte weiterhin sein, dass die Stichlinge auch während des Winters eine relativ hohe Nahrungsaufnahme haben, während die größeren Felchen weitgehend die Nahrungsaufnahme einstellen. Zudem zeigen Aquarierversuche, dass junge Stichlinge die acht häufigsten Zooplanktonarten des Bodensees mit gleichem oder größerem Erfolg fressen wie gleich große Felchen. Wie Felchen fressen Bodenseestichlinge v.a. großes Zooplankton im Freiwasser, wodurch es möglicherweise zur Nahrungskonkurrenz zwischen den Fischarten kommt, wenn die Ressourcen begrenzt sind.

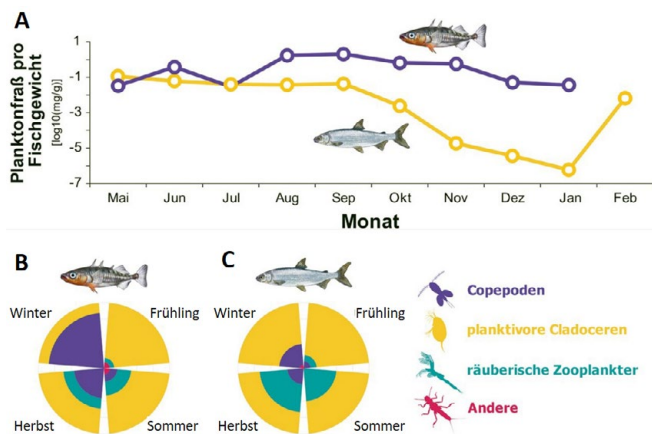


Abb. 10: (A) Saisonaler Zooplanktonfraß pro Gramm Fischgewicht bei Stichlingen (violett) und Felchen (gelb), und saisonaler Beitrag der Krebstier-Zooplanktonarten des Bodensees zur Ernährung von (B) Stichlinge und (C) Felchen. Planktivore Cladoceren umfassen die verschiedenen *Daphnia*-Arten und *Bosmina*, räuberische Zooplankter *Leptodora* und *Bythotrephes* (Daten aus Ogorelec et al. 2022).

Die Quaggamuscheldichten im Bodensee werden in den kommenden Jahrzehnten höchstwahrscheinlich massiv zunehmen

Die Quaggamuschel (*Dreissena rostriformis*) ist eine invasive Süßwassermuschel in Europa und Nordamerika, welche auf hartem Substrat lebt. In nur fünf Jahren hat die Quaggamuschel den Bodensee, wie auch den Genfersee vollständig besiedelt. In acht weiteren Schweizer und österreichischen Seen wurde sie bereits nachgewiesen. Im Bodensee findet man in Wassertiefen von 10-30 m mittlerweile bis zu 25'000 Muscheln pro m². Auch an der tiefsten Stelle des Sees gibt es bereits Vorkommen, jedoch noch in geringen Mengen. Die Muscheln sind effiziente Filtrierer, sie fressen Algen, das Futter von Zooplankton. Dies hat weitere Konsequenzen für Fische, welche dadurch zu weniger Nahrung kommen. Außerdem verstopfen die Muscheln Infrastrukturanlagen von Trinkwasserbetrieben und Wärmeanlagen, was Schäden in Millionenhöhe verursacht. Neben dem Bodensee wurde das Ausbreitungsmuster von Quaggamuscheln im Genfer- und Bielersee im Rahmen eines anderen Projekts untersucht. In allen Seen wurden die Probestellen entlang Transekten festgelegt, welche vom Ufer bis in die Tiefe verlaufen. Dies mit dem Ziel, das Ausbreitungsmuster dieser Seen mit demjenigen in den Großen Seen in Nordamerika, die seit einigen Jahrzehnten von der Art befallen wurden, zu vergleichen. Die Analysen zeigen, dass die Biomasse der Quaggamuschel im Bieler-, Bodensee- und Genfersee in den nächsten 25 Jahren höchstwahrscheinlich um den Faktor 8-12 zunehmen wird (Abb. 10). Wie in Nordamerika wird dieser Anstieg wahrscheinlich durch eine Verlagerung zu größeren Individuen und größere Tiefen gekennzeichnet sein. Es ist zu befürchten, dass diese schnelle Ausbreitung der Quaggamuschel in den kommenden Jahrzehnten ähnliche gravierende Auswirkungen auf große mitteleuropäische Seen haben wird wie die Eutrophierungsperiode in der Mitte des 20. Jahrhunderts.

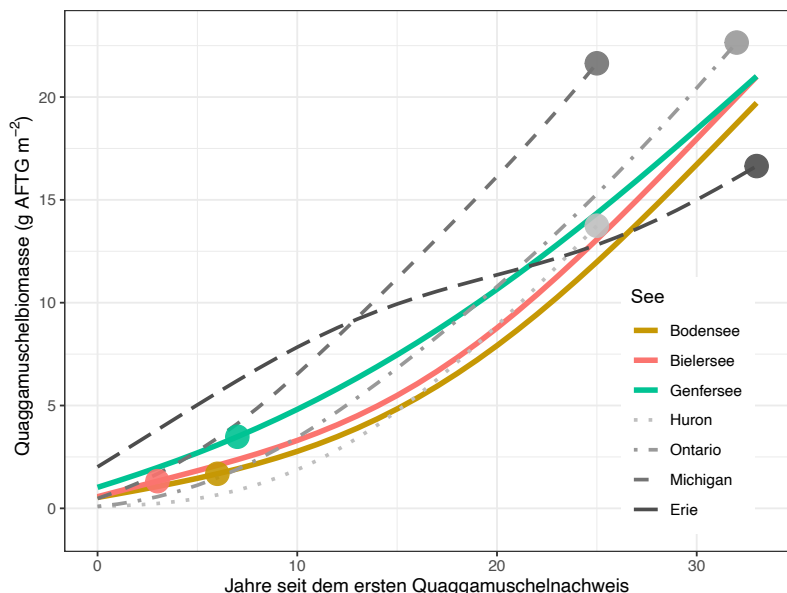


Abb. 10: Die potenzielle Zukunft der Quaggamuschel-Populationen in drei mitteleuropäischen Seen (Bodensee, Bielersee und Genfersee) im Vergleich mit vier nordamerikanischen Seen. Die vorhergesagte Biomasse der Quaggamuscheln pro Quadratmeter in jedem See über einen Zeitraum von 33 Jahren basiert auf Beobachtungen in Seebecken mit unterschiedlicher Morphometrie (Verhältnis Seebreite-Seetiefe). Jede Linie stellt den Mittelwert der vorhergesagten Biomasse an allen Standorten in jedem See dar. Die Abbildung zeigt, dass die Biomasse der Quaggamuscheln in Zukunft wahrscheinlich zunehmen wird, wobei es jedoch Unterschiede zwischen den Seebecken hinsichtlich des Ausmaßes dieser Zunahme gibt (Kraemer et al. 2023).



Im Genom der drei rezenten Bodensee-Felchenarten konnten Genabschnitte des ausgestorbenen Kilch nachgewiesen werden. Dies könnte dem Gangfisch, einer der drei Felchenarten, ermöglichen sich an das Leben in der Tiefe an zu passen

Detaillierte taxonomische und genomische Arbeiten sind auch für ein Seen-Management wichtig, wie Untersuchungen von Daphnien und Felchen in SeeWandel zeigen. Genomische Untersuchungen ermöglichen es, sowohl Veränderungen von Arten über die Zeit wie auch Unterschiede zwischen Populationen aus verschiedenen Wassertiefen genauer zu betrachten. Dies zeigte, dass eine Felchenart des Bodensees (*Coregonus gutturosus*) während der Eutrophierung zwar ausgestorben ist, dass aber ein Teil des Erbgutes dieser ausgestorbenen endemischen Art in den anderen Arten fortbesteht. Durch die Re-Oligotrophierung des Ökosystems konnte wahrscheinlich verhindert werden, dass weitere Felchenarten (Abb. 11) komplett kollabieren und der Genaustausch zwischen den Arten zum Verlust weiterer Arten führt. Die Variationen, die während der Eutrophierung zwischen den Arten ausgetauscht wurden, bilden eine mögliche Grundlage für weitere evolutionäre Vorgänge wie beispielsweise eine erneute Anpassung an die tieferen Regionen des Sees. Dies ist interessant, da es aufzeigt, wie Zyklen von Artendifferenzierung und Artenvermischung genetische Variation, als Grundlage von Anpassungen, erhalten können. Es zeigt auch auf, dass Anstrengungen zur Restaurie-

rung Erfolge zeigen, da – obwohl es zu Durchmischungen der Arten kam – die bestehenden Arten immer noch genetisch und ökologisch differenziert sind. Da Veränderungen der Umweltbedingungen weit verbreitet sind, tragen diese Untersuchungen auch dazu bei, die Konsequenzen solcher Veränderungen besser zu verstehen. Letztlich muss man erkennen, dass evolutionäre Prozesse eine wichtige Rolle für die Erhaltung der Biodiversität spielen.

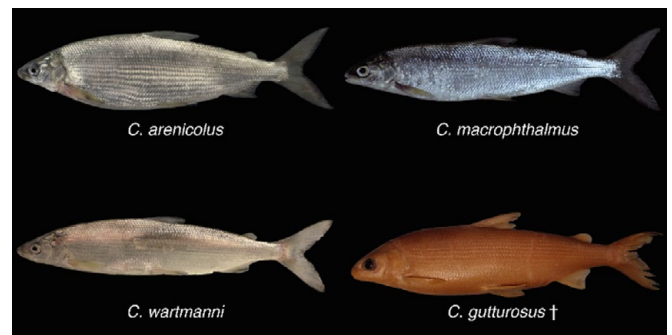


Abb. 11: Eine der ehemals vier Felchenarten im Bodensee - *Coregonus gutturosus* - ist vor rund 40 Jahren, während der Eutrophierung des Bodensees, ausgestorben (Fotos: Oliver Selz).



Der weitere Rückgang der Felchenfänge der Fischerei hängt höchstwahrscheinlich mit dem invasiven Dreistachligen Stichling zusammen. Die Ausbreitung der invasiven Quaggamuschel wird diesen Prozess eher beschleunigen

Der invasive Stichling ersetzt seit 2012 den Felchen als dominierende Art im Freiwasser des Bodensees. Aus bisher ungeklärten Gründen besiedelte der Stichling 2012 explosionsartig das Pelagial des Bodensee-Obersees nach Jahrzehnten eher unauffälliger Existenz in seinem angestammten Habitat, dem Litoral. Die ursprüngliche Leitart und der Brotfisch der Berufsfischerei wird massiv weniger gefangen, ein Zusammenhang mit der Stichlingsinvasion ist im Moment die beste Erklärung.

In dem ungestörten Zustand (Abb. 12) ohne Stichling wurde das Wachstum und die Bestandsstärke der Felchen hauptsächlich durch den limitierenden Nährstoff Phosphor, die Temperatur in der euphotischen Zone sowie die innerartliche Konkurrenz bestimmt. Zooplanktondichten (Wasserflöhe, Hüpferlinge) waren höher und damit hatten die Felchen im pelagischen Lebensraum genügend Beute.

Seit 2012 ist der Lebensraum der Felchen durch die Invasion der Stichlinge (Abb. 13) stark beeinflusst. Stichlinge fressen das gleiche Plankton wie Felchen. Seit der Stichlingsinvasion hat sich die Zusammensetzung des Planktons verändert. Auch greifen die Stichlinge in die Felchenrekutierung in noch zu ermittelndem Maße als Räuber von Ei und Larve ein. Zudem hat sich die Schichtung und Oberflächentemperatur durch den Klimawandel verändert, so dass die Felchen diese Bereiche zur Nahrungsaufnahme in den Sommermonaten wahrscheinlich meiden. Die Folge: stark rückläufiges Wachstum, verringerte Bestandsstärke, Einbruch der Fischereierträge. Das ökonomische Fortbestehen der Berufsfischerei am Bodensee in der jetzigen Form ist daher gefährdet.

Viele Berufsfischer mussten bereits in den letzten Jahren ihren Beruf aufgeben oder führen ihn nur noch in geringem Ausmaß aus. Der Berufsstand hat sich in dem letzten Jahrzehnt nahezu halbiert (Abb. 14). Positiv zu werten ist, dass manche BerufsfischerInnen versuchen, neue Vertriebswege aufzugleisen, sie vermarkten nun z.B. intensiver Rotaugen und andere Fischarten. Grundsätzlich sieht es im Moment danach aus, dass in der Zukunft mit einem nochmals deutlich reduzierten Fischereiertrag am Bodensee zu rechnen ist, als dies heute der Fall ist. Es wurden mögliche Optionen theoretisch aufgezeigt, um die dargelegten Stichlingeffekte zu begrenzen. Dies beinhaltet Anpassungen beim Besatz- und Laichfishmanagement sowie gezielte Befischungsstrategien. Umsetzung und/oder Pilotstudien stehen aus.

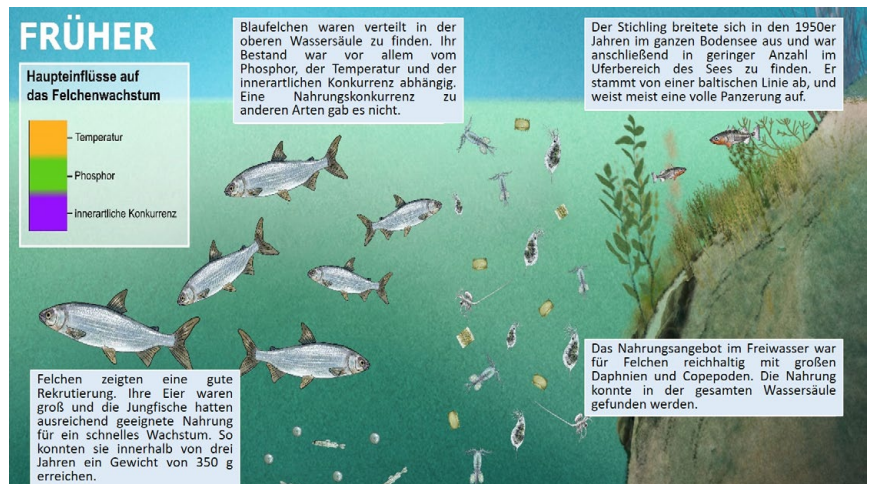


Abb. 12: Lebensraum, Nahrung und Wachstumsfaktoren der Felchen ohne Stichling.



Abb. 13: Lebensraum, Nahrung und Wachstumsfaktoren der Felchen mit Stichling.

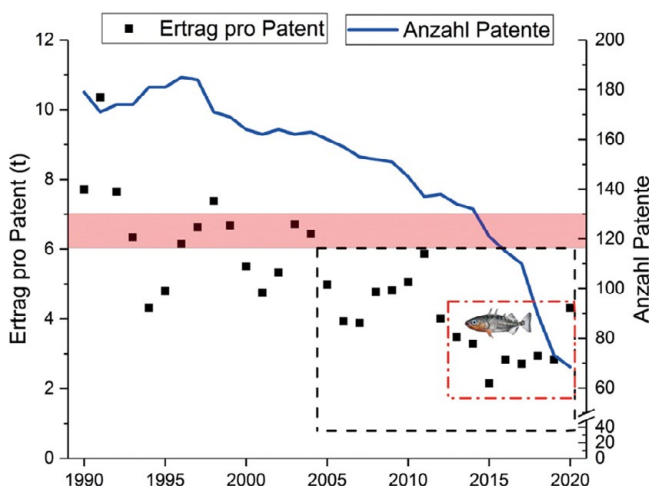


Abb. 14: Ertrag pro Patent (Fischereilizenz am Bodensee-Obersee) zwischen 1990 und 2020. Die rote Fläche gibt den Ertragsbereich an, welcher ein Fischereibetrieb für ein wirtschaftliches Überleben realisieren sollte (6 - 7 t/a). Der mit einer schwarz gestrichelten Linie umgebene Bereich ist der Zeitraum mit einem Gesamtposphorgehalt von unter $10 \mu\text{g L}^{-1}$, der mit einer rot gestrichelten Linie umgebene Bereich der Zeitraum mit dem Auftreten des Stichlings im Freiwasser (aus Baer & Brinker 2022).



SeeWandel zeigt: Monitoring ist essenziell

Um die Funktionsweise eines Ökosystems bestmöglich verstehen zu können, ist Forschung und Monitoring über längere Zeiträume unerlässlich. Letztere auch, um die Dynamik des Ökosystems aufzuzeigen und zu verstehen, welche Prozesse und Faktoren die Resilienz des Systems bestimmen. Dass der Bodensee einer der am besten untersuchten Modellseen mit guter Langzeitdatenlage ist, war ein glücklicher Umstand für SeeWandel. Für zukünftige Untersuchungen ist es somit essenziell, dass regelmäßige Erhebungen fortgeführt, aber auch entsprechend den aktuellen Änderungen angepasst und erweitert werden. SeeWandel hat nicht nur eine fundierte Datengrundlage geschaffen, von der Entscheidungstragende und auch zukünftige Projekte profitieren können, sondern auch zusätzliche Verfahren für regelmäßige Erhebungen entwickelt und bereitgestellt (u.a. wissenschaftlich fundiertes Quaggamuschel- und fischökologisches Monitoring, Erweiterung Zooplankton Monitoring). Insbesondere vor dem Hintergrund der genannten Einflüsse und Wechselwirkungen von Klimawandel und invasiven Arten ist die Fortführung dieser Untersuchungen essenziell, um Dynamiken im komplexen Ökosystemgefüge verstehen zu können. Zudem profitieren solche Untersuchungen von der ganzheitlichen Betrachtung aus verschiedenen Blickwinkeln. Dies bedarf gewisser Strukturen, die Erfahrungsaustausch und Wissenstransfer zwischen verschiedenen Akteuren ermöglichen und gewährleisten. Diese Brücke zu schlagen wurde in SeeWandel versucht und somit erste Grundsteine gelegt für ein Netzwerk, was – wenn zukünftig weiter gepflegt – eine Basis für wissenschaftlich fundiertes Gewässermanagement von größeren Seen schaffen kann.



Die Folgen von Klimawandel und invasiven Arten sollten zum bestmöglichen Verständnis und Management der Ökosystemfunktionen des Bodensees weiter untersucht werden

Dass sich das Ökosystem Bodensee verändert hat, ist unumstritten. Der See wird sich jedoch in seiner Funktionsweise den neuen Gegebenheiten anpassen müssen. Die Quaggamuschel und der Stichling werden möglicherweise dauerhaft bleiben, es ist zu erwarten, dass weitere gebietsfremde Arten einwandern, teilweise gefördert durch den Klimawandel. Letzterer wird auch die einheimischen Arten des Bodensees sowie die Ökosystemfunktionen beeinflussen. Was dies in seiner Komplexität letztlich auch für die Seennutzenden bedeutet, lässt sich nur schwer prognostizieren. Genau hier versucht ein neues Interreg-Forschungsprojekt anzusetzen, was – wenn gefördert – ab 2024 die Folgen des Klimawandels und invasiver Arten für das Ökosystem Bodensee und dessen Nutzung abschätzen möchte. Diese beiden Faktoren gehören zu den absehbar größten Herausforderungen für das Handeln der internationalen Gemeinschaft in Bezug auf den ganzheitlichen Schutz des Bodensees bei gleichzeitiger Nutzung unterschiedlicher Interessensgruppen. Bisher erhobene Daten in

Kombination mit neuen Daten ermöglichen die Veränderungen im Nahrungsnetz insbesondere unter Berücksichtigung der Wechselwirkung mit Klimaänderungen zu erforschen. Die Daten sollen in Simulationsmodelle einfließen, welche die sich ändernde Biologie und Ökologie des Sees für Jahrzehnte prognostizieren und zur Umsetzung eines integralen Managements und Schutz beitragen können. Doch nicht nur das Ökosystem muss sich anpassen. Auch die Seennutzenden sollten offen für Veränderung sein, um einen nachhaltigen und verantwortungsvollen Umgang mit den vielfältigen Ressourcen und Ökosystemleistungen, die uns der Bodensee bietet, zukünftig zu gewährleisten. Dafür braucht es fortlaufenden Erfahrungsaustausch und Wissenstransfer, für welchen die enge und grenzübergreifende Verflechtung von Forschung, Privatwirtschaft, Behörden und Entscheidungstragenden eine wertvolle Grundlage bildet. Mit solch einem Netzwerk kann aktuellen Herausforderungen im Bodensee und vergleichbaren Seen zeitnah begegnet werden.



Zahlreiche Veröffentlichungen für unterschiedliche Zielgruppen

SeeWandel Faktenblätter – bisher erschienen:

- Die Burgunderblutalge im Bodensee – dominierende Bewohnerin oder seltener Gast?
SeeWandel Faktenblatt No. 1 | September 2021
- Die gebietsfremde Quaggamuschel erobert den Bodensee – drohen massive Folgen für das Ökosystem?
SeeWandel Faktenblatt No. 2 | Dezember 2021
- Bodenseefische im Wandel
SeeWandel Faktenblatt No. 3 | Juli 2022
- Ist der Dreistachlige Stichling im Bodensee ein langfristiges Problem für Fische und Fischer?
SeeWandel Faktenblatt No. 4 | May 2023

Weitere Faktenblätter sind in Arbeit und werden hier veröffentlicht:
seewandel.org/publikationen/#faktenblaetter

Fachartikel in Aqua & Gas:

- Alexander, J., P. Spaak, M. Möst, D. Straile & H. Hetzenauer (2023)
Ökosystemforschung im Bodensee: Abschluss des Forschungsprojekts
«Seewandel: Leben im Bodensee – gestern, heute und morgen».
Aqua & Gas 6: 54-59
- Bucheli, M. (2021)
Interview - Piet Spaak: «Das Ökosystem Bodensee mit seinen Prozessen und Funktionen umfassend verstehen».
Aqua & Gas 4: 10-13
- Dröscher, I., T. Rennebarth, B. Wahl, F. Lüddeke & P. Teiber-Siessegger (2022)
DNA-Metabarcoding des Zooplanktons: Einsatz moderner molekularbiologischer Monitoringmethoden im Bodensee.
Aqua & Gas 7+8: 56-62
- Knapp, D. & T. Posch (2021)
Die Burgunderblutalge im Zürichsee: Populationsdynamik und Einfluss des Klimawandels.
Aqua & Gas 4: 14-21
- Rey, P., J. Alexander, N. Bosch, J.T. DeWeber, P.G.D. Feulner, D. Frei, Z. Ogorelec, O. Seehausen, D. Straile & P. Spaak (2023)
Die Felchen im Bodensee – gestern, heute und morgen.
Aqua & Gas 7+8.
- Rey, P., N. Bosch, S. Bader, B. Scholz, J. Alexander, P. Spaak & A. Brinker (2023)
Die Fischbestände des Bodensees: SeeWandel-Projekte zeigen komplexe Zusammenhänge zwischen Wirkfaktoren und Fischbestand.
Aqua & Gas 7+8.
- Schmieder, K., B. Wahl & G. Franke (2021)
Stauen Wasserpflanzen den Bodensee? Ausbreitung des einst fast verschwundenen Schweizer Laichkrauts in den Ausflussbereichen.
Aqua & Gas 7+8: 86-92.
- Spaak, P., J. Alexander, L. Baehni, L.E. Burlakova, S.R. Dennis, P.G.D. Feulner, S. Flämig, L. Haltiner, A. Karatayev, V. Karatayev, B. Kraemer, S. Rossbacher & R. Stöckli (2023)
Quaggamuscheln bedrohen voralpine Seen: Grundlegende Veränderungen der Seen möglich.
Aqua & Gas 6: 60-65.
- Spaak, P., J. Alexander, N. Bosch, Z. Ogorelec, D. Straile & P. Rey (2023)
Kleiner Fisch mit grosser Wirkung: Wie der Stichling den Lebensraum Bodensee verändert hat.
Aqua & Gas 7+8.

Weitere Veröffentlichungen sind hier zu finden (weitere sind in Arbeit):
seewandel.org/publikationen



Impressum

Herausgeber & Kontakt

SeeWandel: Leben im Bodensee – gestern, heute und morgen

Vertreten durch PD Dr. Piet Spaak

Überlandstrasse 133 | CH-8600 Dübendorf

E-Mail: seewandel@seewandel.org

Web: seewandel.org



Quellenangabe für Abbildungen

Baer, J. & A. Brinker (2022)

Wieviel weniger darf's denn sein? Düstere Zukunftsaussichten für die Bodenseefischerei, eine der größten Binnenfischereien Europas. Zeitschrift für Fischerei: 1-13.

Knapp, D. & T. Posch (2021)

Die Burgunderblutalge im Zürichsee: Populationsdynamik und Einfluss des Klimawandels. Aqua & Gas 4: 14-21.

Kraemer, B.M., S. Boudet, L.E. Burlakova, L. Haltiner, B.W. Ibelings, A.Y. Karatayev, V.A. Karatayev, S. Rossbacher, R. Stöckli, D. Straile & P. Spaak (eingereicht)

An abundant future for quagga mussels in deep European lakes. Environmental Research Letters. (Pre-print on bioRxiv: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2023.05.31.543086v1>)

Milan, M., N. Albrecht, F. Peeters, S. Wengrat, M. Wessels & D. Straile (2022)

Clockwise hysteresis of diatoms in response to nutrient dynamics during eutrophication and recovery. Limnology and Oceanography 67(9): 2088-2100.

Ogorelec, Ž., A. Brinker & D. Straile (2022)

Small but voracious: invasive generalist consumes more zooplankton in winter than native planktivore. NeoBiota 78: 71-97.



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung

