



SeeWandel

Leben im Bodensee –
gestern, heute und morgen



SeeWandel
Klima

Modellierung der Folgen
von Klimawandel und
Neobiota für den Bodensee

SeeWandel Faktenblatt No. 05 | Januar 2026

Bild: © Fischereiforschungsstelle Baden-Württemberg



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung



eawag
aquatic research



Universität
Konstanz



Interreg
Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein



Kofinanziert
von der
Europäischen
Union



Internationale
Gewässerschutzkommission
für den Bodensee



Der Brotfisch des Bodensees – Besonderheiten und Gefährdung des Bodenseefelchens

Die verschiedenen Felchenarten sicherten seit Jahrhunderten eine ertragreiche Berufsfischerei am Bodensee, weshalb sie auch als deren wichtigste „Brotfische“ bezeichnet werden. In SeeWandel wurden spannende Erkenntnisse zur Genetik der Felchenarten und Veränderungen des Erbguts gewonnen. Der Bestand der Felchen im See und damit auch ihr fischereilicher Ertrag sind vor allem von diversen Umweltvariablen abhängig, die auch die Verfügbarkeit der Hauptnahrung (Zooplankton) beeinflussen. Die Umweltbedingungen im Bodensee haben sich innerhalb der letzten 60 Jahre stark verändert. Auch die Felchen-Fangerträge waren starken Schwankungen unterworfen. Die Eutrophierung (übermäßige Nährstoffbelastung) hatte das Aussterben einer Felchenart zur Folge. Nach 2005 ist der Nährstoffgehalt wieder gleichbleibend niedrig auf einem natürlichem Niveau. Seit ca. 2010 sind die Felchen-Fangerträge auf einen historischen Tiefstand gefallen. Dieses Phänomen kann möglicherweise mit neuen Wirkfaktoren erklärt werden, wie der Nahrungsüberlappung mit dem Stichling, der 2012 in das Freiwasser eindrang. Stichlinge beeinflussen unter Umständen auch direkt und indirekt die Vermehrung und die Rekrutierung (das Nachwachsen) der nächsten Felchengeneration. Im Rahmen von SeeWandel wurden diese Beobachtungen genauer erforscht und Lösungen für die Kontrolle der auf die Bestände negativ wirkenden Faktoren gesucht. Nachdem 2022 die Fangerträge der Felchen eingebrochen sind, ergriff die IBKF Maßnahmen zum Schutz der Felchenbestände in der Hoffnung, dass sich diese wieder so weit erholen, sodass eine nachhaltige Bewirtschaftung wieder möglich ist.



Felchendiversität im Bodensee

Diese und viele Regionalnamen beschreiben die artenreiche Gruppe der Coregonen, die zu den lachsartigen Fischen zählen. Die drei heute im Bodensee vorkommenden Felchenarten sind sich äußerlich ähnlich (Abb. 1), ihre Lebensweise und Reproduktionsbiologie unterscheiden sich aber deutlich [1-3].

Der **Blaufelchen** (*Coregonus wartmanni*) ist ein Schwarmfisch, der bis in Tiefen von ca. 60 m die großräumige ökologische Nische des Freiwassers (Pelagial) als Zooplanktonfresser nutzt. Blaufelchen laichen im Frühwinter meist innerhalb weniger Tage in Schwärmen in den oberen Wasserschichten. Ein laichreifes Weibchen von 30-35 cm Länge produziert im Schnitt 10.000-15.000 Eier, die nach der Befruchtung auf den Seeboden absinken und sich dort entwickeln. Die Larven schlüpfen im Frühjahr. Blaufelchen werden bis 60 cm lang und ca. 10 Jahre alt [3]. Sie waren bisher die wichtigsten „Brotfische“ für die Bodensee-Berufsfischerei.



Der **Gangfisch** (*Coregonus macrophthalmus*) ist äußerlich schwer vom Blaufelchen zu unterscheiden, er hält sich aber eher in Seegrundnähe mittlerer Tiefenstufen auf. Gangfische laichen im Winter über mehrere Wochen hinweg „auf der Halde“ über 5-30 m Wassertiefe. Auch Gangfische sind für die Berufsfischerei von großer Bedeutung.



Der **Sandfelchen** (*Coregonus arenicolus*) ist mit einer Länge bis 70 cm und einem Gewicht bis 4 kg der größte Vertreter der Coregonen im Bodensee. Er besitzt eine geringere Zahl an Kiemenreusendornen, was auf seine Ernährung mit größeren Bodenorganismen hinweist. Sandfelchen laichen Mitte November bis Mitte Dezember, als einzige in ufernahen Flachwasserzonen des Sees. Sandfelchen werden selten gezielt gefangen.



Der **Bodensee-Kilch** (*Coregonus gutturosus*) gilt seit 1970 als ausgestorben. Er war der kleinste der Bodensee-Coregonen. Sein geringer Wuchs bei hoher Lebenserwartung von über 10 Jahren war seiner Lebensweise im kalten Tiefenwasser des Sees (in wahrscheinlich bis deutlich über 120 m Wassertiefe) geschuldet, wo er sich von Bodenorganismen ernährte. Kilche laichten bereits im Sommer, auch dies vorwiegend in großen Wassertiefen. Ihr typischer Kropf auf vielen Darstellungen („Kropffelchen“) bekamen die Fische erst, wenn sich ihre Schwimmblase beim Hochziehen aus großen Wassertiefen aufblähte. Aufgrund ihrer Lebensweise fanden sich Kilche nur selten in den Netzen der Berufsfischerei wieder.



Abb. 1: Felchenarten des Bodensees [Fotos O. Selz].



Das Erbgut der Bodenseefelchen

Genetische Vielfalt – die Vielfalt innerhalb einer Art – ist essenziell für das Fortbestehen von Arten und Populationen und deren Anpassungsfähigkeit. Sie wird von einer Vielzahl von evolutionären Prozessen beeinflusst, aber auch von Lebensraumverlust, Klimawandel, Umweltverschmutzung und sich schnell vermehrende Krankheiten sowie von Managementmaßnahmen und Eingriffen. Im Gegensatz zu Populationen mit geringer genetischer Vielfalt, sind Populationen mit einer großen genetischen Vielfalt im Allgemeinen widerstandsfähiger gegenüber Krankheiten und anpassungsfähiger bei Umweltveränderungen und Klimawandel.

Historische Sammlungen bieten Einblicke in die genetische Vielfalt vergangener Zeiten, bevor z. B. große Umweltveränderungen eingetreten sind. Sie sind daher von immensem Wert um Veränderungen zu erkennen und zu verstehen. Information über das Erbgut bereits ausgestorbener Felchenarten und Populationen konnten aus historischen Fischschuppen, die bis 1929 zurückreichen, gewonnen werden.

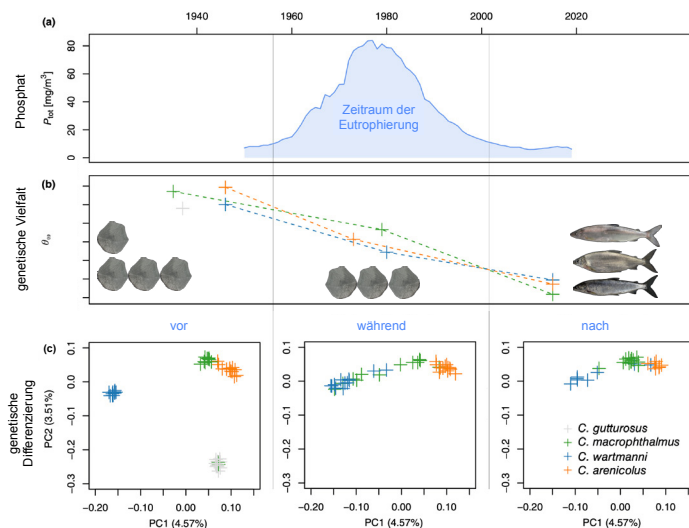


Abb. 2: Gesamtphosphatkonzentration als Maß der Eutrophierung des Bodensees (a) und genetische Vielfalt (b) im Zeitverlauf. Die genetische Vielfalt fasst die Vielfalt innerhalb einer Population zusammen. Jedes Kreuz repräsentiert eine Population einer Art zu einem bestimmten Zeitpunkt. Grau: Bodensee-Kilch (*C. gutturosus*), grün: Gangfisch (*C. macrophthalmus*), blau: Blaufelchen (*C. wartmanni*), orange: Sandfelchen (*C. arenicolus*). Drei Hauptkomponentenanalyse (c) stellen die Veränderungen in der Populationsstruktur der Bodenseefelchen im Zeitverlauf dar [4]. In (c) repräsentiert jedes Kreuz einen individuellen Fisch, wobei genetisch ähnliche Fische als Kreuze nahe beieinander stehen. Weiter auseinander stehende Kreuze verdeutlichen größere genetische Distanz und Differenzierung zwischen den Fischen. Die genetischen Informationen wurden aus Schuppenproben (Zeitpunkte vor und während der Eutrophierung) und gefangenen Fischen (nach der Eutrophierung) gewonnen (siehe Bilder in b).

Im Verlauf der Eutrophierung (Abb. 2a) ist der Bodensee-Kilch als Art ausgestorben, und auch die genetische Vielfalt der drei verbliebenen Felchenarten hat zwischen 1930 und 2010 deutlich abgenommen (Abb. 2b) [4]. Die genetische Populationsstruktur (Abb. 2c) deutet darauf hin, dass sich vor der Eutrophierung Blaufelchen und Kilch genetisch stark von den Gangfischen und Sandfelchen unterschieden haben. Im Laufe der Zeit (und der Re-Oligotrophierung) haben sich die drei verbliebenen Arten weiter angenähert.

Da es sich bei den Bodenseefelchen um evolutionär gesehen eher junge Arten handelt, ist eine Paarung bzw. Hybridisierung der einzelnen Arten möglich. Eine solche Vermischung zwischen den Arten könnte die Ursache für die Veränderung in der Populationsstruktur darstellen. In der Tat wurde im Erbgut der nach der Eutrophierung gefangenen Felchen genetische Variation des Kilchs gefunden und auch Hinweise, dass durch die Eutrophierungsfolgen (Lebensraumverlust in der Tiefe, Veränderung der Nahrungsgrundlage u. a.) vermehrt genetischer Austausch zwischen den drei überlebenden Arten stattgefunden hat [5, 6]. Während der Eutrophierung kam es zu schwerwiegenden Veränderungen im See. Die Produktivität im Freiwasser (Pelagial) stieg an und am Seeboden kam es zur Zersetzung großer Mengen organischen Materials. Infolgedessen wurde der Sauerstoff immer knapper. Diese Veränderungen im Lebensraum der Bodenseefelchen, u. a. der Verlust des Lebensraums und Verschiebungen im verfügbaren Beuteartenspektrum, sind mögliche Gründe für das Aussterben des Kilchs, die Hybridisierung zwischen den Arten, und den Verlust an genetischer Vielfalt innerhalb der Arten.



Mit dem Rückgang der Nährstoffbelastung hat sich auch der ehemalige Kilch-Lebensraum nahe des Seebodens wieder erholt. Unter den heutigen Gangfischen finden sich nun morphologische Unterschiede (Kopf- und Maulform) zwischen Individuen aus verschiedenen Tiefenstufen. Einzelne Gangfische, die in bis zu 90 m Wassertiefe gefangen wurden, zeigen erste Anzeichen einer genetischen Veränderung, möglicherweise eine Anpassung an größere Tiefen, wie sie auch im Erbgut des Kilchs gefunden wurde [7]. Begünstigt durch die genetische Vermischung mit dem Kilch, legt dies auch für die Gangfische eine Anpassung an tiefe Lebensräume des Bodensees nahe. Dennoch deutet die Abnahme der genetischen Vielfalt in allen Arten (Abb. 2b) darauf hin, dass es für die Bodenseefelchen eher schwer werden könnte, sich in Zukunft an weitere Umweltveränderungen anzupassen.

Genetische Informationen (1) offenbaren historische Prozesse durch welche Biodiversität entstanden ist, (2) erkennen den Verlust an genetischer Vielfalt und damit den Verlust an Anpassungsfähigkeit, und (3) können helfen Biodiversität für die Zukunft zu erhalten. Die Analysen der genetischen Vielfalt der Bodenseefelchen zeigen die Relevanz von evolutionären Prozessen und den Nutzen einer Integration von genomischen Methoden für das Management und den Artenschutz.



Geschichte der schwankenden Felchenerträge

Substantielle Veränderungen, wie die Eutrophierung des Bodensees ab Mitte der 1950er-Jahre, hatten starke Auswirkungen auf den Felchenbestand und damit auch auf den Felchenertrag der Berufsfischerei [8, 9]. Die Fangstatistik des Bodensee-Obersees zeigt diesen Zusammenhang deutlich (Abb. 3).

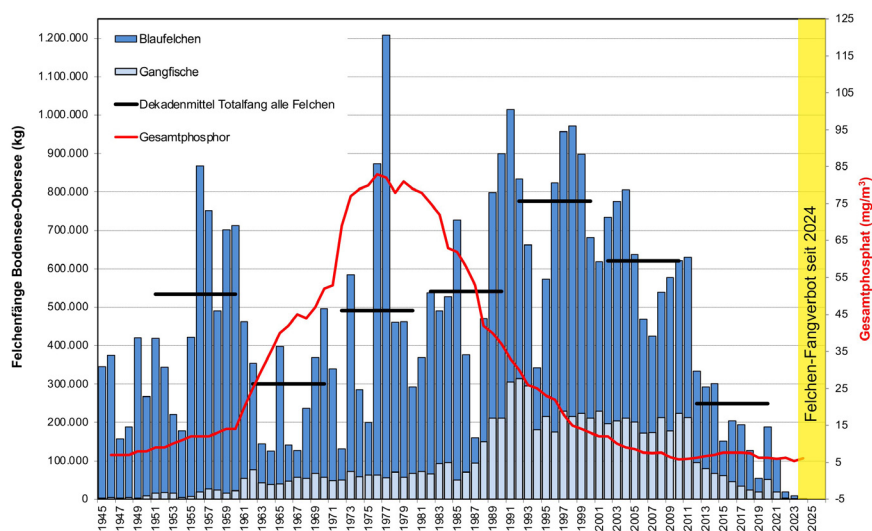


Abb. 3: Fangstatistik der zwei wichtigsten Felchenarten im Bodensee-Obersee von 1945 bis heute. Die rote Kurve zeigt die Entwicklung der Phosphorkonzentration [Datenquelle: IBKF - Internationale Bevollmächtigtenkonferenz für die Bodenseefischerei]. 2024/25 wurden nur Testfänge durchgeführt.

Mit dem Nährstoffanstieg kam es zunächst zu erheblichen Schwankungen der Felchen-Fangerträge in beide Richtungen. Mit sinkender Belastung (Re-Oligotrophierung) stabilisierten sich die Erträge zunächst auf hohem Niveau, danach kam es zu einer kontinuierlichen Abnahme. Ab 2010, zeitgleich mit einer Massenvermehrung von Stichlingen im Freiwasser, sanken die Fangerträge bei gleichbleibenden Phosphatwerten auf ein historisches Tief. Im Jahr 2023 wurden insgesamt nur noch 9,891 kg Felchen im Obersee gefangen. Dies führte zu einem Felchenfang-Verbot ab 2024.



Einflussfaktoren auf den Felchenbestand

Es gibt viele mögliche Gründe und Mechanismen für diesen Ertragsrückgang und damit auch den Bestandsrückgang der Felchen im Bodensee.

Veränderungen des Nahrungsspektrums:

Die einzelnen Felchenarten und Altersstufen benötigen für ihr Wachstum das jeweils richtige Nahrungsangebot zur richtigen Jahreszeit [8, 10]. Solange sie im Freiwasser leben, sind sie immer auf Zooplankton angewiesen und zeigen Vorlieben für verschiedene Planktonarten und -größen [11]. Der Speiseplan der mehr bodenorientierten Felchen und der in den Flachwasserbereich ziehenden Jungfische enthält auch große Teile benthischer Nahrung, wie z. B. Insektenlarven, Würmer und Flohkrebse. Neu ist, dass große Felchen gelernt haben Quaggamuscheln zu fressen [12]. Seit über zehn Jahren zeigen sich nun deutliche Veränderungen in der Zusammensetzung der Hauptnahrung (Zooplankton) im See [11]. Große räuberische Planktonarten, aber auch *Daphnia longispina*, wurden immer seltener [13, 14]. Experimente (Abb. 4) bestätigten, dass diese Wasserflohart zunimmt, wenn Zooplankton fressende Fische fehlen [13]. Nimmt – wie im Bodensee beobachtet – sowohl der Bestand der Felchen als auch der von *D. longispina* ab, legt dies nahe, dass noch weitere Planktonfresser eine entscheidende Rolle eingenommen haben.

Stichlinge als mögliche Konkurrenten:

Seit ca. 2012 besiedelten Stichlinge invasiv das Freiwasser des Bodensees [15]. 2014 und 2019 repräsentierten sie rund 90 % aller im Freiwasser des Obersees gefangenen Fische [16, 17]. Sowohl Felchen als auch Stichlinge fressen im Experiment bevorzugt großes Zooplankton wie *D. longispina* und verhindern so die Verdrängung kleinerer Zooplanktonarten (Abb. 4b, c). Auch im See kam es höchstwahrscheinlich zur Konkurrenz zwischen Felchen und Stichlingen um dieselbe Nahrungsressource [11, 18–20]. Obwohl Stichlinge kleiner sind und sich erst später im Jahr fortpflanzen, können sie bereits bei geringer Größe von 2 cm die großen und auch von Felchen begehrten Zooplankter fressen [11]. Zudem sind Stichlinge auch im Winter aktiv [11] und beeinflussen daher möglicherweise den Zeitpunkt der Frühjahrsentwicklung des Zooplanktons, was genauer in „SeeWandel-Klima“ untersucht wird.

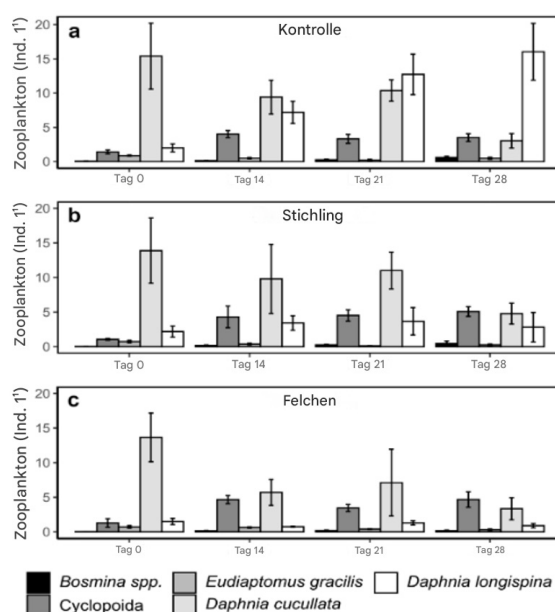


Abb. 4: Durchschnittliche Dichte der Planktonarten im Kontrollumfeld ohne Prädatoren (a), sowie mit Stichling (b) oder Felchen (c) [18].

Veränderungen des raumzeitlichen Auftretens der Nahrung:

Ein in vielen Seen gezeigtes Muster ist, dass hoher Fraßdruck durch Fische zu kleinerem Zooplankton führt [14]. Tatsächlich sank auch im Bodensee die durchschnittliche Zooplanktongröße fast zeitgleich mit der massiven Ausbreitung des Stichlings im Freiwasser. Insbesondere die kleine, als Beute weniger bevorzugte *Daphnia cucullata* (Abb. 4) dominiert seither die Zooplanktongesellschaft [13, 18]. Die Art konzentriert sich im Sommer in den wärmeren Oberflächenschichten, denen die wärmesensiblen Felchen vermutlich ausweichen [17]. Wird diese Hypothese bestätigt, bewegt sich ein Teil der Nahrung außerhalb der Reichweite der Felchen. Die räumliche Überlappung von Zooplankton und Felchen insbesondere während Hitzewellen im Sommer ist – neben möglichen zeitlichen Veränderungen durch Änderungen im saisonalen Auftreten (s. o.) – ebenfalls Forschungsgegenstand in „SeeWandel-Klima“.

Mögliche Wirkungsfaktoren auf Vermehrung und Rekrutierung:

Im Rahmen der SeeWandel-Forschung verdichtete sich der Verdacht, dass Stichlinge auch in relevanten Mengen Felcheneier und -larven fressen. Das direkte Ausmaß auf die Felchenrekrutierung im Bodensee konnte jedoch bisher nicht quantifiziert werden. Zur Laichzeit von Gangfischen und Blaufelchen wurden

besonders hohe Dichten von Stichlingen in Bereichen der Laichareale vorgefunden [21] und Isotopen-Analysen deuteten darauf hin, dass Stichlinge v. a. im Winter Fischnahrung konsumieren [22]. In Laborversuchen fraßen zwei Drittel der Versuchs-Stichlinge Felcheneier [23]. Felchenlarven, die entwicklungsgeschichtlich einen nur gering ausgeprägten Fluchtreflex zeigen, weil sie keine Prädatoren im Freiwasser zu fürchten hatten, wurden zudem erfolgreicher erbeutet als gleich große Larven von Barschen oder Rotaugen. Erst ab einer Größe von ca. 3,6 cm konnten auch Felchen-Jungfische den Stichlingen entkommen [19, 20].

Seit Sommer 2024 werden wieder eindeutig weniger Stichlinge im Freiwasser beobachtet. Diese Entwicklung und ihre mögliche Auswirkung auf die Felchen wird weiter beobachtet.

Die unabsehbaren Folgen der Quaggamuschel-Invasion:

Ein weiterer Faktor, der sich auf den gesamten Phosphorkreislauf des Sees auswirken kann und bereits heute Einflüsse auf das Nahrungsnetz zu haben scheint [20], ist die massive Ausbreitung der invasiven Quaggamuschel. Erst 2016 im Bodensee nachgewiesen, hat sich die gebietsfremde Muschel zwischenzeitlich über den gesamten Seeboden ausgebreitet [24]. Sie filtert effizient Planktonalgen, die Nahrung des Zooplanktons [24]. Auswirkungen auf die Felchen konnten bisher nur ansatzweise untersucht werden [20]. Man kann aber befürchten, dass die Quaggamuschel das Nahrungsangebot (Zooplankton) der Fische weiter reduzieren, und damit u. U. einen negativen Einfluss auf die Felchenpopulation (insbesondere Blauflechen) haben wird.



Bodensee-Felchen werden immer kleiner

In SeeWandel wurde das Wachstum des Blaufelchens in Abhängigkeit verschiedener Wirkfaktoren (z. B. Veränderungen Nahrungsverfügbarkeit, Stichlingsinvasion im Freiwasser) modelliert (Abb. 5, 6) [25].

Mit beginnender Eutrophierung ab Mitte der 1950er Jahre nahm das Gewicht eines 30 cm langen „Portionsfelchens“ zunächst stark zu. Rund 40 Jahre später, im wieder nährstoffärmeren See, sank es wieder auf ursprüngliche Werte (Abb. 5). Fand früher die stärkste Gewichtszunahme im Spätsommer statt, wo auch das meiste Zooplankton im See war, fiel nach 2012 das Wachstum im Spätsommer bei 2-/3-jährigen Felchen teilweise oder ganz aus [26].

Mit dem Gewicht der Felchen variieren auch deren Fettgehalt und die Körperform. Zu Zeiten größter Felchengewichte wurden in den selektiven Kiemennetzen mehr „dickere“, dafür aber kürzere und damit jüngere Felchen gefangen, die zum Teil noch nicht ablaichen konnten [25]. Die Maschenweiten der Berufsfischerei wurden deshalb mehrmals erhöht, um zu verhindern, dass zu viele großwüchsige, aber dennoch zu junge Tiere in den Fang gelangten.

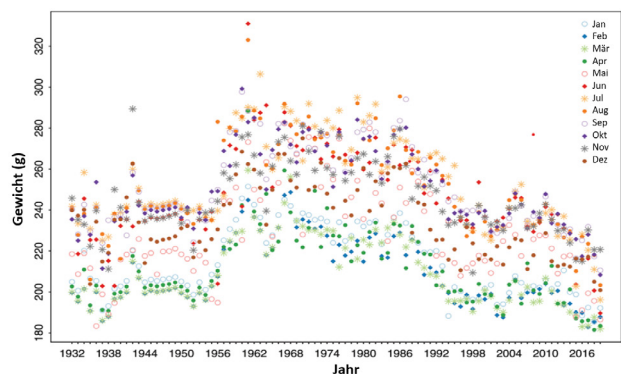


Abb. 5: Anhand von Realdaten prognostiziertes Durchschnittsgewicht eines 30 cm langen Felchens, gefangen mit einem Netz mit 38 mm Maschenweite, im Jahresverlauf im Zeitraum von 1930 bis 2019 [25].

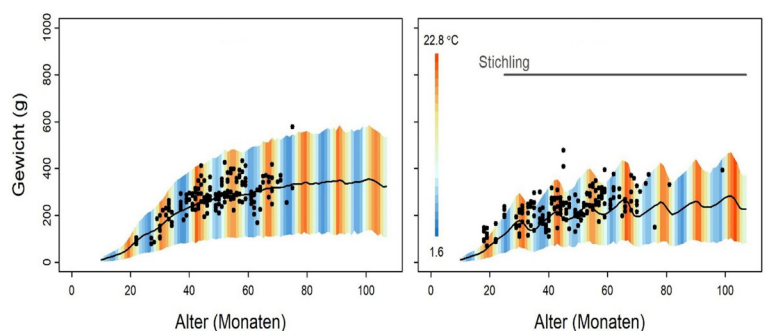


Abb. 6: Gewichtszunahme (Realdaten) für 2- bis 3-jährige Felchen ohne (links, 2005/06) und mit Stichlingen (rechts, 2012/13) im Freiwasser des Bodensees. Die verschiedenen Farben spiegeln die unterschiedliche, monatlich vorausgesagte Wassertemperatur in 5 m Wassertiefe wider [26].



Fisch mit unsicherer Zukunft

Eine Reduzierung der Maschenweiten ermöglichte in der Vergangenheit den Fang langsamwüchsiger, aber älterer Felchen. Bei weiterer Reduktion droht jedoch die Gefahr einer Überfischung. Zu den Wirkfaktoren, die künftig die Felchenbestände weiter beeinflussen werden, zählt auch schon jetzt der regionale Klimawandel. Felchen müssen höchstwahrscheinlich den steigenden sommerlichen Wassertemperaturen in tiefere Schichten ausweichen [17]. Die durchschnittliche Wassertemperatur des ganzen Sees ist jedoch innerhalb der letzten 50 Jahre um mehr als 1,2° C gestiegen [27]. Im Tiefenwasser, dem Entwicklungsraum der Felcheneier, wurde seit vier Jahren die 5° C-Grenze überschritten. Durch temperaturbedingte Veränderungen der Wasserschichtung und Seedurchmischung werden Auswirkungen auf allen Trophieebenen des Bodensees erwartet (Nährstoffe, Phyto- und Zooplankton, Fische und Zersetzer). Diesbezügliche Zusammenhänge mit der weiteren Entwicklung der Quaggamuschel-Invasion bedürfen weiterer Untersuchungen. Unter Einbeziehung der SeeWandel-Ergebnisse ist das Ziel von SeeWandel-Klima, geeignete Modelle zu erstellen, die – zusammen mit den Effekten anderer Wirkfaktoren – auch erste Prognosen für den künftigen Felchenbestand des Bodensees zulassen.

Kann der Zusammenbruch der Felchenbestände und ihrer Nutzung als Speisefisch noch einmal aufgehalten werden? Hilft den Felchen möglicherweise ihre genetische Flexibilität, um sich an neue Lebensräume und neue Umgebungsbedingungen anzupassen und auf diese Weise zu überleben? Warum sind die Felchenbestände im Bodensee-Untersee nicht in gleichem Maße eingebrochen wie im Obersee? Solche Fragen können aktuell, aufgrund der Komplexität und des Zusammenwirkens der Wirkfaktoren (wie auch Klimawandel, invasive Arten und Nährstoffänderungen), nicht abschließend beantwortet werden. Nur einige dieser Faktoren sind beeinflussbar. Hierzu zählen einerseits die Fischentnahme durch die Fischerei, zum anderen – zumindest theoretisch – das Management von Konkurrenten und Prädatoren. Zu der immer wieder diskutierten künstlichen Erhöhung des Nährstoffangebots (z. B. Zulassen größerer Phosphateinträge in den See) wird es nicht kommen, weil negative ökologische Effekte nicht ausgeschlossen und eine Gefährdung für das Trinkwasser nicht zugelassen werden kann.

Die sinkenden Felchenerträge hatten 2022 einen Punkt erreicht, an dem der ehemalige „Brotfisch“ der Berufsfischerei nicht mehr nachhaltig bewirtschaftet werden konnte. Die Internationale Bevollmächtigtenkonferenz für die Bodenseefischerei (IBKF), welche einen nachhaltigen Fischfang anstrebt, musste daher zur Erholung der Bestände ein vorerst dreijähriges Fangmoratorium (2024-2026) für die Felchenfischerei im Bodensee-Obersee aussprechen [28]. Parallel dazu findet alljährlich ein Laichfischfang geringen Ausmaßes statt, um eine Bestandsstützung durch Felchenbesatz zu ermöglichen sowie die Entwicklung des Laichfischbestands zu beobachten. Die in die Fischbrutanstalten am Bodensee gebrachten Jungfische werden dann so lange vorgestreckt (angefüttert), bis sie der Beutegröße der Stichlinge (ca. 3,5-4 cm) entwachsen sind [19, 20]. Sie werden in den See entlassen, wenn das Nahrungsangebot für die Jungfische bereits größer ist als zum natürlichen Schlupfzeitpunkt.

Genetische Daten liefern Einblicke in die Dynamik und historische Veränderung der Bodenseefelchen. Der stetige Verlust an genetischer Vielfalt über die Zeit weist darauf hin, dass die Anpassungsfähigkeit in allen Bodenseefelchen-Arten abnimmt, auch wenn sich Habitate nahe des Seebodens wieder erholt haben und Gangfische bis zu 90 m Wassertiefe gefangen werden können. Um genetische Methoden in das Monitoring und Management der verschiedenen Felchenarten aufzunehmen, bedarf es der Entwicklung von kostengünstig und einfach anwendbaren Verfahren. Diese können basierend auf den vorhandenen genetischen Datensätzen entwickelt werden.



Literaturverzeichnis

- [1] Eckmann R, Rösch R (1998) Lake Constance fisheries and fish ecology. *Advances in Limnology* 53:285-301
- [2] Eckmann R (1987) A comparative study on the temperature dependence of embryogenesis in three coregonids (*Coregonus* spp.) from Lake Constance. *Aquatic Sciences* 49(3):353-362
- [3] Selz OM, Dönnz CJ, Vonlanthen P, Seehausen O (2020) A taxonomic revision of the whitefish of lakes Brienz and Thun, Switzerland, with descriptions of four new species (Teleostei, Coregonidae). *ZooKeys* 989:79-162
- [4] Frei D, Mwaiko S, Seehausen O, Feulner PGD (2023) Ecological disturbance reduces genomic diversity across an Alpine whitefish adaptive radiation. *Evolutionary Applications* 17(2):e13617
- [5] Frei D, De-Kayne R, Selz OM, Seehausen O, Feulner PGD (2022) Genomic variation from an extinct species is retained in the extant radiation following speciation reversal. *Nature Ecology and Evolution* 6(4):461-468
- [6] Rey P, Bosch N, Alexander J, DeWeber JT, Feulner PGD, Frei D, Ogorelec Ž, Seehausen O, Straile D, Spaak P (2023) Felchen im Bodensee – gestern, heute und morgen. *AQUA und GAS* 7/8:82-88
- [7] Frei D, Reichlin P, Seehausen O, Feulner PGD (2022) Introgression from extinct species facilitates adaptation to its vacated niche. *Molecular Ecology* 32(4):841-853
- [8] Internationale Bevollmächtigtenkonferenz für die Bodenseefischerei IBKF: Kugler M (2023) Bericht zur IBKF 2023. Felchenfischerei, Monitoring der Blaufelchen sowie Felchen-Laichfischfang im Jahr 2022
- [9] Internationale Bevollmächtigtenkonferenz für die Bodenseefischerei IBKF: Monatliches Monitoring der Fischbestände im Bodensee-Obersee (www.ibkf.org)
- [10] Flüchter J (1980) Review of the present knowledge of rearing whitefish (*Coregonidae*) larvae. *Aquaculture* 19(2):191-208
- [11] Ogorelec Ž, Brinker A, Straile D (2022) Small but voracious: invasive generalist consumes more zooplankton in winter than native planktivore. *NeoBiota* 78:71-97
- [12] Baer J, Spiessl C, Brinker A (2022) Size matters? Species- and size-specific fish predation on recently established invasive quagga mussels *Dreissena rostriformis bugensis* Andrusov 1897 in a large, deep oligotrophic lake. *Journal of Fish Biology* 100(5):1272-1282
- [13] Ogorelec Ž (2021) Effects of re-oligotrophication and invasive species on fish-zooplankton interactions [Dissertation]. Konstanz: University of Konstanz
- [14] Ogorelec Ž, Wunsch C, Kunzmann AJ, Octorina P, Navarro JI (2021) Large daphniids are keystone species that link fish predation and phytoplankton in trophic cascades. *Fundamental and Applied Limnology* 194(4):297-309
- [15] Eckmann R, Engesser B (2019) Reconstructing the build-up of a pelagic stickleback (*Gasterosteus aculeatus*) population using hydroacoustics. *Fisheries Research* 210:189-192
- [16] Alexander TJ, Vonlanthen P, Périat G, Raymond JC, Degiorgi F, Seehausen O (2016) Artenvielfalt und Zusammensetzung der Fischpopulation im Bodensee. *Projet Lac, Eawag, Kastanienbaum*
- [17] Bader S, Vonlanthen P, Scholz B, Brinker A (2021) SeeWandel Projekt L12 – Entwicklung und Anwendung einer Methode zur Erfassung der Fischbestände im Bodensee – Bericht für die IBKF. SeeWandel, LAZBW, Langenargen
- [18] Ogorelec Ž, Rudstam LG, Straile D (2021) 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
- [19] 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
- [20] Ros A, Dunst J, Gugele S, Brinker A (2019) Anti-predator mechanisms in evolutionarily predator-naïve vs. adapted fish larvae. *Ecosphere* 10(4):e02699
- [21] Gugele SM, Baer J, Brinker A (2020) The spatiotemporal dynamics of invasive three-spined sticklebacks in a large, deep lake and possible options for stock reduction. *Fisheries Research* 232:105746
- [22] Gugele SM, Baer J, Spießl C, Yohannes E, Blumenshine S, Roberts BJ, Mota-Ferreira MR, Brinker A (2023) Stable isotope values and trophic analysis of invasive three-spined stickleback in Upper Lake Constance points to significant piscivory. *NeoBiota* 87:73-102
- [23] Baer J, Gugele SM, Bretzel J, DeWeber JT, Brinker A (2021) All day-long: Sticklebacks effectively forage on whitefish eggs during all light conditions. *PLoS ONE* 16(8):e0255497
- [24] Spaak P, Alexander J, Baehni L, Burlakova LE, Dennis SR, Feulner PGD, Flämig S, Haltiner L, Karatayev A, Karatayev V, Kraemer B, Rossbacher S, Stöckli R (2023) Quaggamuseln bedrohen voralpine Seen. *AQUA und GAS* 6:60-65
- [25] DeWeber JT, Rösch R, Baer J, Brinker A (2021) Long-term changes in body condition and gillnet selectivity in Lake Constance pelagic spawning whitefish (*Coregonus wartmanni*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 78(7):841-851
- [26] DeWeber JT, 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* 2022:e09316
- [27] Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee IGKB (2025) 71. Kommissionstagung, Aktueller Bericht über den limnologischen Zustand des Bodensees im Jahr 2024
- [28] Internationale Bevollmächtigtenkonferenz für die Bodenseefischerei IBKF (2023) Medienmitteilung IBKF, 21. Juni 2023 Felchenbestand im Bodensee eingebrochen: IBKF beschliesst Massnahmenpaket



Impressum

Im Rahmen verschiedener SeeWandel Forschungsprojekte wurde zu Bodenseefelchen geforscht: „P2: Bioenergetische Modellierung der fischereilichen Einflussmöglichkeiten auf den Fischbestand des Bodensee-Obersees“ (Projektteam: T. DeWeber, A. Brinker), „P3: Auswirkungen von Re-Oligotrophierung, Klimawandel und invasiver Arten auf Fisch-Zooplankton Interaktionen und die Populationsdynamik der Felchen“ (Projektteam: Ž. Ogorelec, A. Brinker, D. Straile), „P4: Rekonstruktion des Genoms des ausgestorbenen Kilch und Charakterisierung der genetischen Grundlagen der Anpassung an den Lebensraum Profundal“ (Projektteam: D. Frei, O. Seehausen, P. Feulner), „L9: Resilienz der litoralen Lebensgemeinschaften des Bodensees: Auswirkungen von Neozoen, Trophie- und Klimaänderung“ (Projektteam: M. Sabel, D. Straile, E. Yohannes, K.-O. Rothhaupt), und „L12: Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Erfassung der Fischfauna in großen und tiefen Seen“ (Projektteam: B. Scholz, S. Bader, A. Brinker). Die aus den Forschungsprojekten gewonnenen Erkenntnisse sind Grundlage des SeeWandel/SeeWandel-Klima-Faktenblatts #5: „Der Brotfisch des Bodensees – Besonderheiten und Gefährdung des Bodenseefelchens“ Weiterführende Informationen sind verfügbar auf: www.seewandel.org.

„SeeWandel: Leben im Bodensee – gestern, heute und morgen“ (2018-2023) untersuchte den Einfluss von Nährstoffrückgang, Klimawandel, gebietsfremder Arten und anderer Stressfaktoren auf das Ökosystem Bodensee, seine Biodiversität und Funktionsweise, sowie die menschliche Nutzung am See. „SeeWandel-Klima: Modellierung der Folgen von Klimawandel und Neobiota für den Bodensee“ (2023-2027) hat zum Ziel, aktualisierte Vorhersagen der Folgen des Klimawandels – unter Einbezug der Auswirkungen von invasiven Arten – auf das Ökosystem Bodensee und dessen nachhaltige Nutzung zu liefern.

Herausgeber, Auskunft und Kontakt

SeeWandel und SeeWandel-Klima
Projektleiter Dr. Piet Spaak
Überlandstrasse 133 | CH-8600 Dübendorf
E-Mail: seewandel@seewandel.org

Autorinnen und Autoren

- Peter Rey und Niklas Bosch, Büro Hydra
- Philine Feulner, Eawag (Abschnitt Erbgut)
- Žiga Ogorelec, National Institute of Biology (NIB) & Dietmar Straile, Universität Konstanz (Abschnitt Zooplankton-Fisch Interaktionen)
- Piet Spaak und Josephine Alexander, SeeWandel und SeeWandel-Klima

Mit Unterstützung von

- Alexander Brinker & Jan Baer, Fischereiforschungsstelle Baden-Württemberg
- David Frei, Amt für Natur, Jagd und Fischerei St.Gallen
- Tyrell DeWeber, Institut für Binnenfischerei e.V. Potsdam Sacrow
- Nikolaus Schotzko, Landesfischereizentrum Vorarlberg
- Dominik Thiel & Michael Kugler, Amt für Natur, Jagd und Fischerei St.Gallen

In den SeeWandel und SeeWandel-Klima Faktenblättern werden die Einschätzungen der Autorinnen und Autoren und des Herausgebers vertreten.

