

PD Dr. Piet Spaak; Dr. Josephine Alexander; Lale Baehni; Dr. Lyubov E. Burlakova; Dr. Stuart R. Dennis; Dr. Philine G. D. Feulner; Sylvie Flämig; Dr. Linda Haltiner; Prof. Dr. Alexander Karatayev; Dr. Vadim Karatayev; Dr. Benjamin Kraemer; Silvan Rossbacher; Raphael Stöckl

Voralpine Seen und Trinkwasser-versorgung durch Muscheln bedroht

Die Quaggamuschel wurde 2015 erstmalig im Genfersee nachgewiesen. Seitdem hat sich diese ursprünglich aus dem Dnepr stammende invasive Art in den voralpinen Seen rasant ausgebreitet. Was bedeutet das für die Ökosysteme und die regionale Wasserversorgung?

In nur fünf Jahren hat die Quaggamuschel den Bodensee und Genfersee vollständig besiedelt, in sechs weiteren Schweizer Seen sowie in verschiedenen voralpinen Seen in Österreich wurde sie bereits nachgewiesen. Im Bodensee und Genfersee

findet man in Wassertiefen von 10–30 m mittlerweile auf jedem Quadratmeter bis zu 25.000 Muscheln. Auch an den tiefsten Stellen der Seen gibt es bereits Vorkommen. Die Muscheln verstopfen die Infrastrukturanlagen von Wasserwerken

und thermischen Nutzungen, was Schäden in Millionenhöhe verursacht. Da das Ausbreitungsmuster der Schweizer Seen vergleichbar mit dem der Großen Seen in Nordamerika ist, muss mit weitreichenden Folgen gerechnet werden.



Bild 1 Der Bodensee bei Sipplingen: Die Bodenseewasserversorgung mit Sitz auf dem Sipplinger Berg muss ihre Entnahmeleitungen und Aufbereitungstechnik künftig quaggamuschelsicher gestalten.

Quelle: IMAGO / imagebroker



Bild 2 Zwei invasive Arten im Bodensee: der Kamberkrebs (*Faxonius limosus*) – ein amerikanischer Flusskrebs – und der mit der Quagga-Dreikantmuschel dicht bedeckte Grund des Bodensees

Quelle: IMAGO / bodenseebilder.de

Invasive Dreissena-Muscheln

Die Quaggamuschel (*Dreissena rostriformis*) und die Zebamuschel (*D. polymorpha*) sind invasive Süßwassermuscheln in Europa und Nordamerika. Die 1–25 mm großen Muscheln haften mittels Byssusfäden an Hartsubstrat wie Steinen, Baustrukturen oder Booten. Im Gegensatz zur Zebamuschel kann sich die Quaggamuschel auch in weichem Substrat ansiedeln. Ihren Ursprung haben die beiden Arten in der Schwarzmeerregion. Die Quaggamuschel verbreitete sich in den 1940er-Jahren vom Delta des Dnepr in die Flüsse der Ukraine und Russlands. Vermutlich im Ballastwasser von Frachtschiffen erreichte sie zusammen mit der Zebamuschel in den 1980er-Jahren die Großen Seen in den USA /1/.

Invasive Muscheln in Europa und der Schweiz

In Westeuropa verbreitete sich zunächst die Zebamuschel. Sie gelangte in den 1960er-Jahren in die Schweizer Seen und etablierte sich flächendeckend. Die Quaggamuschel erreichte den Westen Europas wahrscheinlich über den Main-Donau-Kanal (1992 modernisiert) und möglicherweise auch via Transport von Nordamerika über den transatlantischen Seeweg zurück nach Europa

(ungefähr 2004) /2/. Im Jahr 2014 erreichte sie erstmals die Schweiz. Der erste Nachweis der Quaggamuschel in der Schweiz wurde durch eine Umwelt-DNA-Probe im Rhein in der Nähe von Basel erbracht /3/, es folgten Genfersee (2015), Bodensee

(2016), Neuenburgersee (2017), Bielersee (2019), Lac Hongrin (2019) und Murtensee (2021) /4/ (Bild 3).

Gravierende ökologische Auswirkungen

Zebra- und Quaggamuscheln können großen Einfluss auf aquatische Ökosysteme nehmen, zum Beispiel auf deren Nahrungsnetz. Da sie schnell in enorm großer Zahl vorkommen und effizient Nährstoffe aus dem Wasser filtrieren, fressen sie dem heimischen Zooplankton die Nahrung (Algen) weg. Die Zooplankton-Arten sind wiederum Futterorganismen für Fische. Darum können viele Muscheln nicht nur eine massive Änderung für das Ökosystem, wie weniger Produktion und Umlagerung von Nährstoffen, sondern möglicherweise auch weniger Fische zur Folge haben. Beide Muschelarten verdrängen zudem einheimische Muschelarten, die kompliziertere Fortpflanzungsstrategien haben und sich nicht so rasch anpassen können. Weil die Muscheln so effizient filtrieren, wird das Wasser klarer. Dies bevorteilt Wasserpflanzen in der Uferzone von Seen.

Im Vergleich zur Zebamuschel ist die Quaggamuschel toleranter gegenüber tiefen Sauerstoffwerten /5/ und Temperaturen. Dies ermöglicht es ihr, in tiefere Bereiche

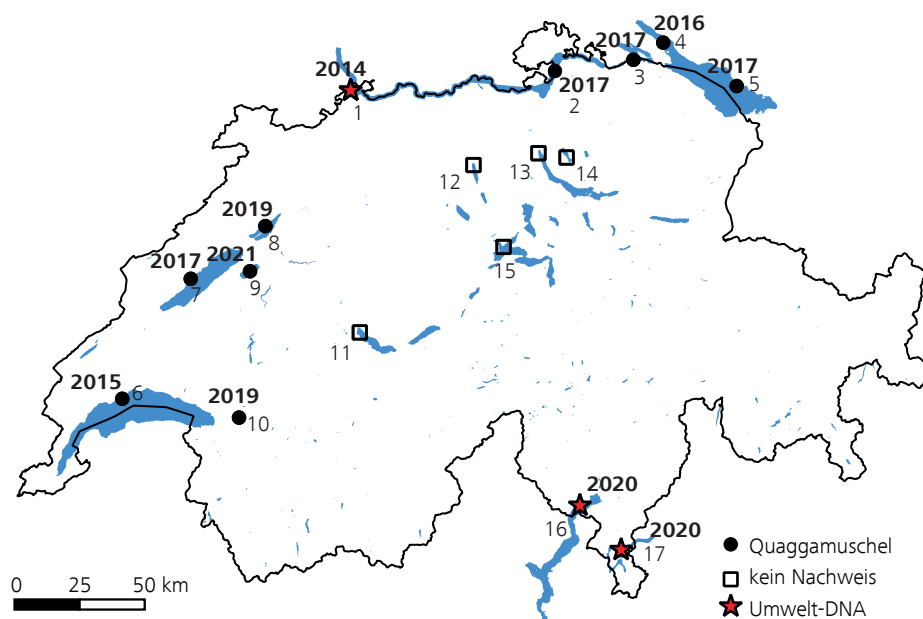


Bild 3 Verbreitung der Quaggamuschel in Schweizer Seen (Stand 2022): Die Zahlen bezeichnen die Gewässer und die Probenahmestellen - (1) Rhein, Basel, (2) Rhein/Rheinau, (3) Unterer Bodensee/Stein am Rhein, (4) Überlinger See/Wallhausen, (5) Oberer Bodensee/Langenargen, (6) Genfersee, (7) Neuenburgersee, (8) Bielersee, (9) Murtensee, (10) Lac Hongrin, (11) Thunersee, (12) Hallwilersee, (13) Zürichsee/Limmat, (14) Greifensee, (15) Vierwaldstättersee, (16) Lago Maggiore, (17) Luganersee. Die Jahreszahlen geben das Jahr der Erstentdeckung an. Seen ohne Symbole wurden nicht beprobt.

Quelle: /4/ überarbeitet, Bundesamt für Landestopografie (Karte)

eines Sees, in denen Zebramuscheln nicht leben können, vorzudringen. In den tieferen Bereichen ist die Quaggamuschel zudem vor Prädation durch Wasservögel und Fische geschützt. Anders als die Zebramuschel reproduziert sich die Quaggamuschel auch im Winter und kann auch weiches Substrat besiedeln. Durch ihre Konkurrenzstärke und das Besetzen von verfügbarem Habitat können enorme Bestände der Quaggamuschel entstehen. Entsprechende ökologische Folgen sind demnach noch bedeutsamer als die der Zebramuschel.

Ökonomische Folgen der Quaggamuschel

Auch die ökonomischen Folgen der Quaggamuschelinvansion sind im Vergleich zu denen der Zebramuschel gravierender. Es können Millionenschäden an Anlagen für Trinkwasser und zur Wärme-/Kältegewinnung entstehen. Beispielsweise wurden Ansaugröhren von Wasserwerken in den vergangenen Jahrzehnten in rund 80 m Tiefe in Seen verlegt, da diese Tiefe als „zebramuschelsicher“ galt. Sofern genügend Sauerstoff vorhanden ist, dringt die Quaggamuschel allerdings in alle Seetiefen vor und besiedelt somit auch tiefer liegende Infrastruktur. Dies führt zu großen Problemen, da diese Anlagen nicht einfach zu

reinigen sind. Gefahr besteht auch, wenn Seewasser direkt in Anlagen benutzt wird und nicht durch einen Wärmetauscher vom Rest der Installation getrennt ist. Dann könnten Quaggamuscheln auch Verteilnetze und geschlossene Leitungssysteme besiedeln und hohe Kosten verursachen. Aufseiten der Fischerei wird befürchtet, dass durch die Ausbreitung der Quaggamuschel die Fangerträge weiter zurückgehen.

Herkunft und Verbreitung der Quaggamuschel in der Schweiz

2014 wurden in Umwelt-DNA-Proben vom Rhein bei Basel zum ersten Mal Quaggamuscheln nachgewiesen. In den darauffolgenden Jahren wurden sie in mehreren Schweizer Seen entdeckt (Bild 3). Daraus ergibt sich die Frage, ob die Quaggamuschel von Basel ausgehend die Schweizer Seen besiedelt hat oder ob es mehrere „Einschleppungsereignisse“ gab, die sich zur gleichen Zeit abspielten. Um dies zu untersuchen, wurden für eine Studie /6/ Quaggamuscheln aus verschiedenen Seen gesammelt, um mit molekularbiologischen Methoden die Verwandtschaft zwischen diesen Populationen zu untersuchen. Wenn es nur ein „Einschleppungsereignis“ gegeben hat, ist zu erwarten, dass die Muscheln

aller besiedelten Seen ein ähnliches genetisches Muster zeigen.

DNA von Muschelindividuen aus Boden-, Neuenburger- und Genfersee, Rhein und aus Norddeutschland wurde extrahiert und anschließend genotypisiert /6/. So konnten genetische Unterschiede zwischen den Quaggamuschel-Populationen im Genfersee, Neuenburgersee und Rhein/Bodensee (Ober- und Untersee) nachgewiesen werden /6/. Dies weist darauf hin, dass entweder zwischen den Populationen dieser Seen nur beschränkt genetischer Austausch stattfindet oder die Populationen in Genfer-, Neuenburger- und Bodensee von unterschiedlichen Ursprungspopulationen abstammen. Die Populationen aus dem Bodensee (Komplex aus Ober- und Untersee), Rhein und aus Norddeutschland sind andererseits genetisch sehr ähnlich (Bild 4 A). Dies weist darauf hin, dass zwischen diesen Populationen genetischer Austausch stattfindet oder die Muscheln von der gleichen Ursprungspopulation abstammen.

Quaggamuscheln werden – bedingt durch ihren Lebenszyklus – höchstwahrscheinlich hauptsächlich mithilfe des Menschen von einem Gewässer zum nächsten verschleppt /7/. Die Fortpflanzung erfolgt sexuell, wobei jede Muschel im Jahr bis zu einer Million Geschlechtszellen produziert, die sich im

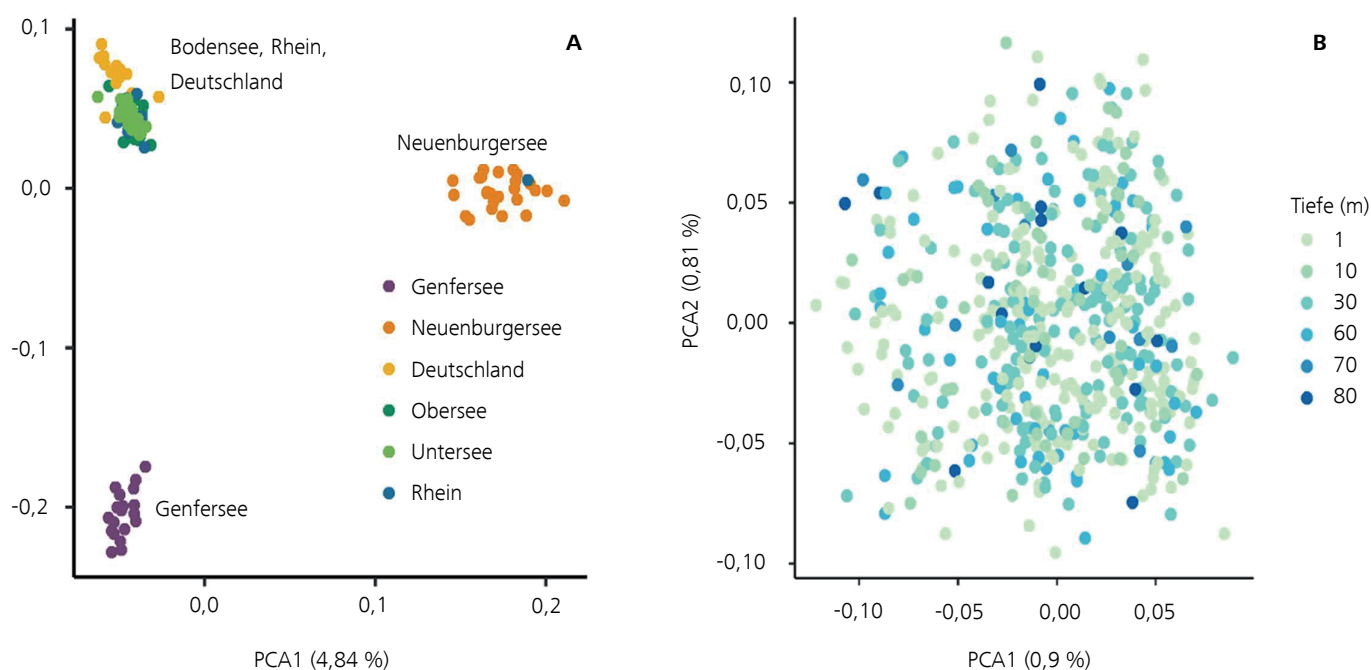


Bild 4 (A) Genetische Differenzierung zwischen Quaggamuscheln aus dem Genfersee, Neuenburgersee und Bodensee (oberer und unterer Bodensee), Rhein und aus Norddeutschland. PCA-Plot, der die genetischen Unterschiede zwischen 127 Quaggamuscheln anhand von 81.197 Loci verdeutlicht. Die Populationen sind unterschiedlich eingefärbt. **(B)** Keine genetische Differenzierung zwischen Quaggamuscheln, die über Tiefengradienten im Bodensee beprobt wurden. PCA-Plot, der die genetischen Ähnlichkeiten zwischen 549 Quaggamuscheln auf der Grundlage von 4.939 Loci zeigt. Die Farben zeigen verschiedene Entnahmetiefen an.

Quelle: Farbgebung nach /6/

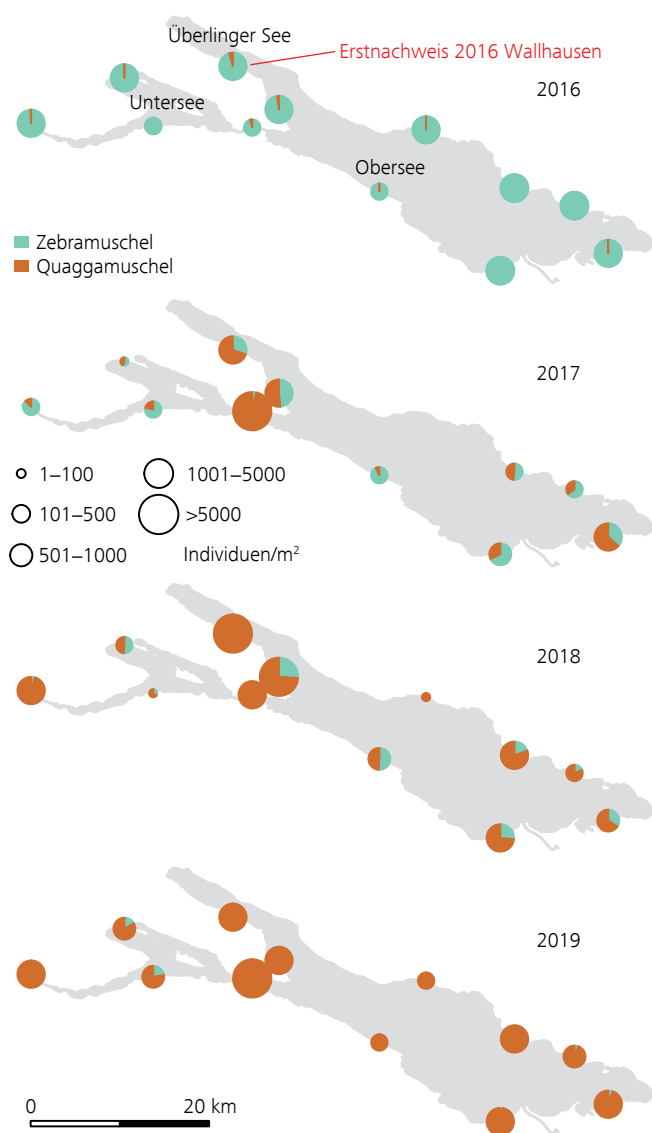


Bild 5 Quantitative Schätzungen der relativen Häufigkeit von Quagga- (braun) und Zebrauscheln (grün) im Bodensee. Die Größe des Tortendiagramms gibt die Anzahl der Muscheln an, die pro Quadratmeter an jeder Probenahmestelle gefunden wurden.

Quelle: /4/

Freiwasser treffen. Befruchtete Eizellen entwickeln sich zu Veligerlarven. Diese halten sich passiv, abhängig von der Temperatur, Tage bis Wochen in der Wassersäule auf und verteilen sich im See, bevor sie sich an ein Substrat heften. Diese Larven sind mikroskopisch klein (50–100 µm) und können mithilfe von Restwasser, das z. B. im Boot, Wasser- oder Angelsportequipment u. ä. zurückbleibt, von einem See in einen anderen verschleppt werden. Muscheln heften sich aber auch an harte Substrate, z. B. Bootsrümpfe, und können so transportiert werden. Bootstransporte könnten auch mit erklären, warum gerade die großen für Bootssport beliebten Seen in der Schweiz bereits von Quaggamuscheln befallen sind. In der Westschweiz sind zudem viele Seen bereits besiedelt, da die meisten über Flüsse miteinander verbunden sind.

Rasche Ausbreitung innerhalb eines Sees

Wie schnell sich die Quaggamuschel innerhalb eines großen Sees ausbreitet, zeigt eine Fallstudie am Bodensee. Seit geraumer Zeit wird dort jährlich in der Uferzone ein Neobiota-Monitoring durchgeführt (www.neozoen-bodensee.de) /8/. Nach dem Erstfund von Quaggamuscheln im Mai 2016 wurde das Ufer des Bodensees im Herbst 2017, 2018 und 2019 intensiv nach Quagga- und Zebrauscheln abgesehen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Quaggamuschel innerhalb von drei Jahren in der Uferzone des ganzen Bodensees ausgebreitet hat (Bild 5). Leider wurden solche systematischen Untersuchungen in anderen Schweizer Seen nicht durchgeführt, aber es ist anzunehmen, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Bodensee keine Ausnah-

me, sondern die Regel ist.

Innerhalb eines Sees wurde oft beobachtet, dass sich Quaggamuscheln aus tiefen Bereichen von denen aus weniger tiefen Bereichen unterscheiden. Quaggamuscheln aus der Tiefe sind länger, haben dünnere Schalen und längere Siphons /9/. Gleichwohl weisen sie keine genetische Differenzierung auf, wie aus einer Studie /6/, die am Beispiel Bodensee genetische Unterschiede innerhalb eines Sees untersucht hat, hervorgeht (Bild 4 B). Das bedeutet, dass die Muscheln nicht an die Tiefe angepasst sind, sondern gedeihen, egal ob die Eltern aus 1 m oder aus 250 m Tiefe stammen. Des Weiteren lässt sich schlussfolgern, dass sich die Larven im Bodensee völlig zufällig an einem Ort niederlassen. Demzufolge sind Quaggamuscheln, die auf demselben Stein leben, nicht miteinander verwandt und junge Larven, z. B. von Bregenz, können mit der Strömung zur anderen Seeseite transportiert werden und sich dort niederlassen. Die Unterschiede im Aussehen der Muscheln, die zwischen verschiedenen Tiefen beobachtet werden, sind also höchstwahrscheinlich eine Anpassung an die unterschiedlichen Umweltbedingungen.

Nordamerika und Schweiz – ein Vergleich

In den nordamerikanischen "Großen Seen", die bezüglich Tiefe, Nährstoffgehalt und Sauerstoffverteilung mit den voralpinen Seen vergleichbar sind, hat die Populationsdichte und Biomasse der Quaggamuschel in den letzten 25 Jahren stetig zugenommen. So hat sich die Quaggamuschel im Michigansee, der 100-mal größer als der Bodensee ist, aber eine vergleichbare Tiefe und Nährstoffkonzentration aufweist, seit 2000 dramatisch ausgebreitet (Bild 6). Um zu untersuchen, ob Quaggamuscheln in den Schweizer Seen ein ähnliches Entwicklungsmuster aufzeigen, wurden in drei Seen detaillierte Quagga- und Zebrauschelbeprobungen durchgeführt. Im Bodensee wurden im Oktober 2021 und 2022 an 52 Stellen Proben genommen. Im Bielersee wurden 28 Stellen im Dezember 2021 und im Genfersee 80 Stellen im Frühling 2022 beprobt. In allen Seen wurden die Probestellen entlang von Transekten festgelegt, welche vom Ufer bis in die Tiefe verlaufen.

An jeder Stelle wurden drei Sedimentproben (Bild 7 A, B) genommen und drei Vi-

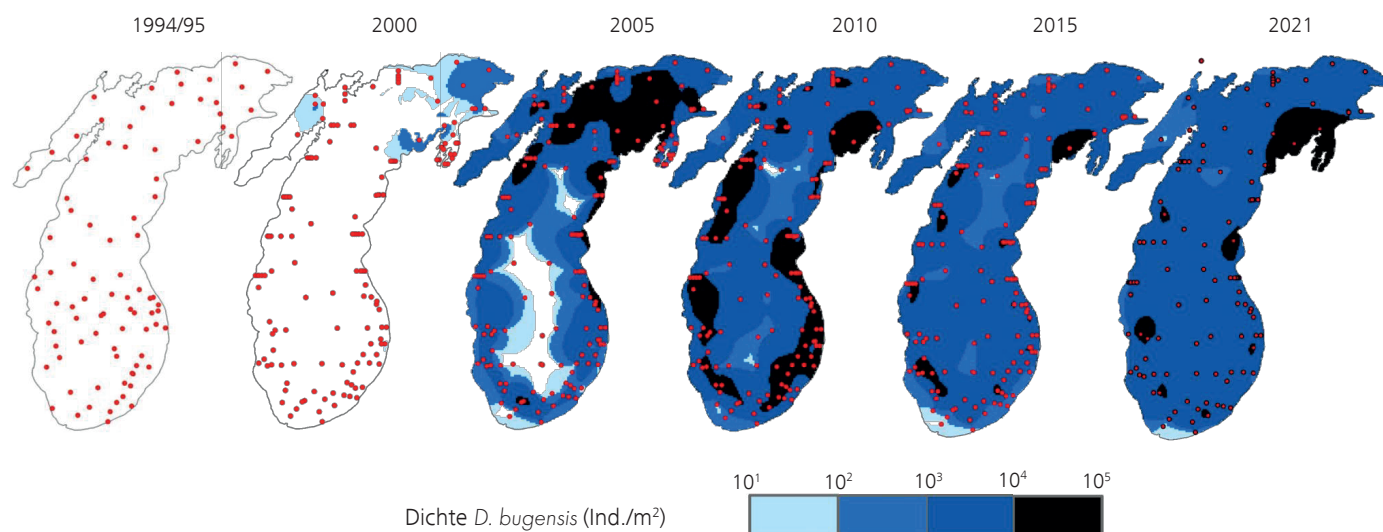


Bild 6 Quaggamusgeldichte (Anzahl pro m²) im Michigansee auf der Grundlage von seeweiten Erhebungen in den Jahren 1994/1995, 2000, 2005, 2010, 2015 und 2021. Die roten Punkte zeigen die Probenahmestellen.

Quelle: /10/

deoaufnahmen gemacht. Benutzt wurden zwei Methoden, die in den USA entwickelt wurden und dort auch verwendet werden. Mit der BIS-Methode (Benthic Information System, Bild 7 C) /11/ werden aus Videoaufnahmen Bilder vom Seegrund geschnitten und anhand derer wird die mit Quaggamuschn bedeckte Fläche bestimmt und die Muscheln werden gezählt (Bild 7 D). Die Sedimentproben wurden mit einem Ponar-Greifer nach oben geholt, gesiebt und gezählt.

Um die Folgen für Schweizer Seen besser zu verstehen und die zukünftige Ausbreitung der Quaggamuschn in den Schweizer Seen vorhersagen zu können, wurden die Erkenntnisse aus den teils 35-jährigen Datenreihen der Quaggamuschn-Population in den nordamerikanischen Großen Seen mit den Daten aus den Schweizer Seen verglichen. Die Analysen zeigen, dass die Biomasse der Quaggamuschn im Bielersee, Bodensee und Genfersee in den nächsten 25 Jahren höchstwahrscheinlich um den Faktor 8–12 zunehmen wird (Bild 8). Wie in Nordamerika wird dieser Anstieg wahrscheinlich durch eine Verlagerung zu größeren Individuen und größeren Tiefen gekennzeichnet sein. Es ist zu befürchten, dass diese schnelle Ausbreitung von Quaggamuschn in den kommenden Jahrzehnten ähnlich gravierende Auswirkungen auf große Schweizer Seen haben kann wie die Eutrophierungsperiode in der Mitte des 20. Jahrhunderts.

Handlungsbedarf und Ausblick

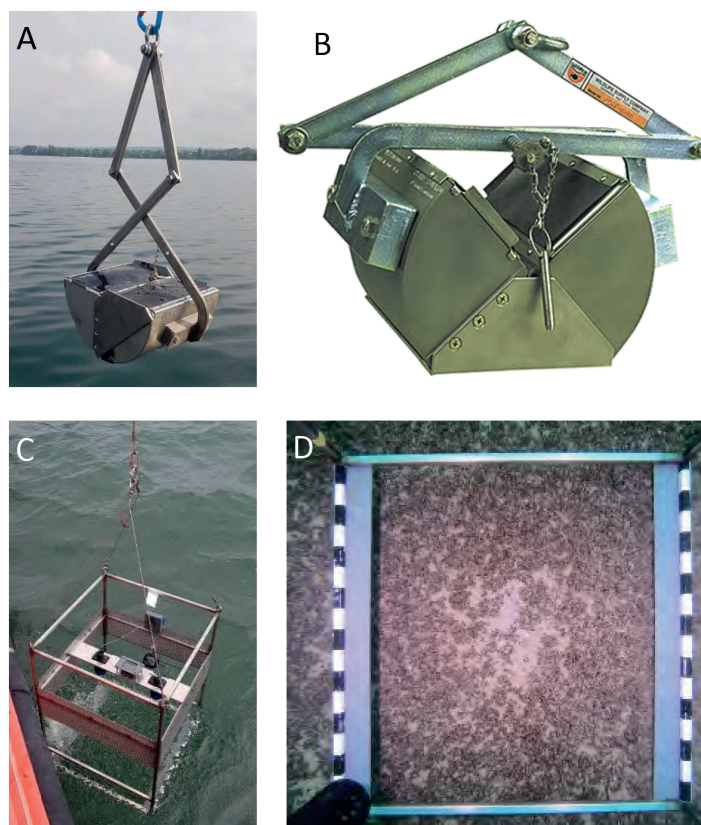
Die Quaggamuschn ist bereits in sechs große Schweizer Seen (Bodensee, Genfersee, Murtensee, Lac Hongrin, Neuenburgersee, Bielersee) eingedrungen, von zwei Seen (Lago Maggiore, Luganersee) sind eDNA-Befunde gemeldet /Proben von 2020, 13/. Hier konnten jedoch bei einer Beprobung

Ende 2022 keine Quaggamuschn nachgewiesen werden. Es scheint nur eine Frage der Zeit zu sein, bis Quaggamuschn weitere Seen besiedeln werden.

In den von Quaggamuschn befallenen Seen gibt es jetzt schon große Probleme. Dort müssen Ansaugrohre von Trinkwasserentnahmestellen so gebaut werden, dass sie von Muscheln gereinigt werden können.

Bild 7 Geräte, die für das Quaggamuschnmonitoring eingesetzt wurden:
(A) geschlossener Ponar-Sedimentgreifer,
(B) offener Ponar-Sedimentgreifer,
(C) Benthic Imaging System (BIS) mit senkrecht und zur Seite ausgerichteten Kameras und Leuchten,
(D) Beispiel eines BIS, Bild: Seegrund Bodensee

Quelle: Eawag



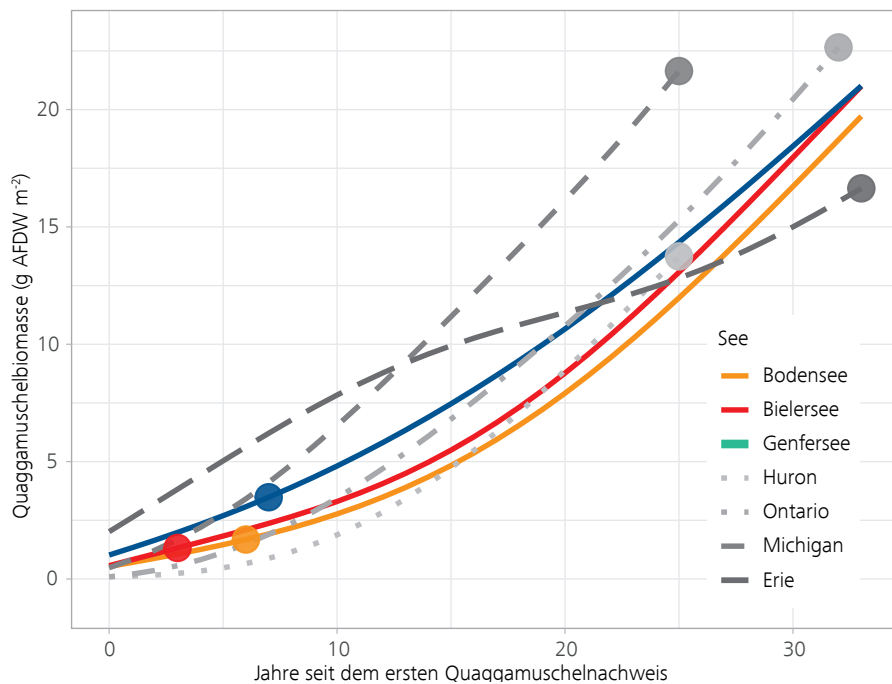


Bild 8 Die Zukunft der Quaggamuschel-Populationen in Bodensee, Bielersee und Genfersee im Vergleich mit vier nord-amerikanischen Seen: Die vorhergesagte Biomasse der Quaggamuscheln pro Quadratmeter in jedem See über einen Zeitraum von 33 Jahren basiert auf Beobachtungen in Seebecken mit unterschiedlicher Morphometrie (See-Breite-Tiefe-Verhältnis). Jede Linie stellt den Mittelwert der vorhergesagten Biomasse an allen Standorten in jedem See dar.

Quelle: /12/

Aufbereitungssysteme oder Verteilnetze müssen so konstruiert sein, dass Veligerlarven nicht passieren können (z. B. durch Mikrofiltration). Auch Anlagen für thermische Nutzungen müssen so gebaut werden, dass Quaggamuscheln die Leitungen eines Gebäudes nicht besiedeln können. In aktuell noch nicht von Quaggamuscheln befallenen Seen müssten jetzt vorbeugende Maßnahmen getroffen werden, um z. B. Installationen zu schützen.

Durch den Vergleich mit den Großen Seen Nordamerikas wächst die Befürchtung, dass die Auswirkungen der Quaggamuschel auf die Ökosysteme der Schweizer schwerwiegend sein werden (weitere Oligotrophierung, verringerte Produktion, Dezimierung der Fischerei). Quaggamuscheln werden das Gleichgewicht in den Seen weiter verschieben: weniger Plankton, weniger Fische und somit auch geringere Fischerträge.

Es sollte alles Mögliche getan werden, um die Ausbreitung der Quaggamuschel zu verlangsamen und die Muschel davon abzuhalten, in gefährdete Seen, Stauseen, Teiche und andere Gewässer einzudringen. Öffentlichkeitskampagnen weisen inzwischen darauf hin, Boote und andere Gegenstände, die von einem Gewässer zu einem anderen transportiert werden, zu

reinigen. Leider sind diese Kampagnen in der Schweiz relativ spät gestartet, zudem sollte weiter in Aufklärung und Sensibilisierung investiert werden. Dennoch sind auch Erfolge zu verbuchen. Im Hallwilersee wurde 2021 beispielsweise eine Bootreinigungspflicht eingeführt (www.ag.ch/gewasser-neobiota). Weitere Kantone prüfen ebenfalls die Einführung einer solchen Pflicht. Die Zusammenarbeit unter den Kantonen, die für die Gewässer zuständig sind, sollte weiter gefördert werden.

Darüber hinaus braucht es auch einheitliche und damit vergleichbare Nachweismethoden sowohl für noch freie als auch schon von Quaggamuscheln befallene Seen. Zur Früherkennung sollten einheitlich gesammelte Planktonproben auf Umwelt-DNA analysiert werden. Um Quaggamuscheldichten bestimmen und die Entwicklung in besiedelten Seen verfolgen zu können, braucht es vergleichbare Probenahmemethoden und -geräte. Der Schweizer Bund unterstützt die kantonalen und weitere betroffene Behörden: In einem neuen Projekt der Eawag sollen gemeinsam Schutz-, Management- und Überwachungsmaßnahmen mit dem übergeordneten Ziel der Verhinderung und Verlangsamung der Ausbreitung der Quaggamuschel in der Schweiz (weiter-)entwickelt werden.

Wie weiter? Forschungslücken und Forschungsvorhaben am Bodensee

Ein Großteil der in diesem Artikel vorgestellten Daten wurde im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts „SeeWandel: Leben im Bodensee - gestern, heute und morgen“ erhoben (www.seewandel.org). Dieses Projekt wurde im Juni 2023 abgeschlossen. Dass sich das Ökosystem Bodensee verändert hat, ist unbestritten. Der See wird sich aber in seiner Funktionsweise an die neuen Gegebenheiten anpassen müssen. Die Quaggamuschel und eine weitere invasive Art im See, der Stichling, werden wohl dauerhaft bleiben. Mit der Einwanderung weiterer gebietsfremder Arten ist zu rechnen, zum Teil begünstigt durch den Klimawandel. Letzterer wird auch die am und im Bodensee heimischen Arten und die Ökosystemfunktionen beeinflussen. Was dies in seiner Komplexität letztlich auch für die Nutzer des Sees bedeutet, lässt sich nur schwer vorhersagen. Genau hier setzt das neue Interreg-Forschungsprojekt „SeeWandel-Klima: Modellierung der Folgen von Klimawandel und Neobiota für den Bodensee“ an, das ab 2024 die Auswirkungen von Klimawandel und invasiven Arten auf das Ökosystem Bodensee und seine Nutzung abschätzen will. Diese beiden Faktoren gehören zu den absehbar größten Herausforderungen für das Handeln der internationalen Gemeinschaft im Hinblick auf einen ganzheitlichen Schutz des Bodensees bei gleichzeitiger Nutzung durch unterschiedliche Interessensgruppen. Bisher erhobene Daten sollen mit neuen Daten kom-

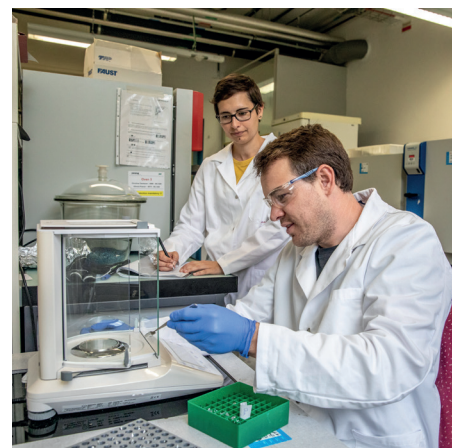


Bild 9 Die Eawag-Forschenden Linda Haltiner und Silvan Rossbacher bearbeiten eine Quaggamuschel-Probe aus dem Bodensee.

Quelle: Eawag / Esther Michel

biniiert werden, um die Veränderungen im Nahrungsnetz, insbesondere unter Berücksichtigung der Wechselwirkung mit Klimaveränderungen, zu untersuchen. Die Daten werden in Simulationsmodelle einfließen, die die Entwicklung der Biologie und Ökologie des Sees über Jahrzehnte prognostizieren und zur Umsetzung eines integralen Managements und Schutzes beitragen können. Die so gewonnenen Erkenntnisse und der Wissensschatz aus dem Bodensee wird auch anderen voralpinen Seen im Alpenraum zugutekommen und dazu beitragen, effizientere Maßnahmen zum Schutz dieser Seeökosysteme zu treffen.

Aber nicht nur das Ökosystem Bodensee muss sich anpassen. Auch die Nutzerinnen und Nutzer des Sees müssen offen für Veränderungen sein, um auch in Zukunft einen nachhaltigen und verantwortungsvollen Umgang mit den vielfältigen Ressourcen und Ökosystemleistungen des Bodensees und anderer voralpiner Seen zu gewährleisten. Dazu bedarf es eines kontinuierlichen Erfahrungsaustausches und Wissenstransfers, für den die enge und grenzüberschreitende Vernetzung von Forschung, Privatwirtschaft, Behörden und Entscheidungsträgern eine wertvolle Grundlage bildet. Mit einem solchen Netzwerk kann aktuellen Herausforderungen am Bodensee und vergleichbaren Seen zeitnah begegnet werden.

Im Projekt „SeeWandel-Klima“ werden auch die Quaggamuscheln weiter untersucht. Ziel ist es herauszufinden, wie widerstandsfähig die Quaggamuschel gegenüber verschiedenen Stressszenarien (z. B. erhöhte Temperatur, unterschiedliche Nahrungsquellen) ist, um Vorhersagen über ihre Entwicklung in einem sich verändernden Bodensee treffen zu können. Darüber hinaus werden die genetischen Mechanismen

untersucht, die dieser Anpassungsfähigkeit zugrunde liegen. So kann abgeschätzt werden, wie schnell sich die Quaggamuschel an Umweltveränderungen anpassen wird. Außerdem wird die Verbreitung der Quaggamuschel im Bodensee weiter überwacht, um zukünftige Auswirkungen auf das Ökosystem Bodensee besser abschätzen zu können. Die gesammelten Daten werden in die geplanten Modellierungsarbeiten einfließen. Die bestehende Zusammenarbeit mit dem Forschungsteam des Great Lakes Center (Prof. Dr. A. Karatayev) wird weitergeführt, um einen Vergleich der am Bodensee gewonnenen Daten mit den Daten der Großen Seen Nordamerikas zu ermöglichen.

■ **PD Dr. Piet Spaak (Korrespondenzautor)**

Eawag, Aquatische Ökologie

Piet.Spaak@eawag.ch

www.eawag.ch/en/departement/eco/

https://seewandel.org/

■ **Dr. Josephine Alexander, Dr. Linda Haltiner,**

Silvan Rossbacher, Raphael Stöckli

Eawag, Aquatische Ökologie

www.eawag.ch/en/departement/eco/

■ **Dr. Philine G. D. Feulner**

Eawag, Fischökologie und Evolution

www.eawag.ch/de/abteilung/fishec/

■ **Dr. Lyubov E. Burlakova,**

Prof. Dr. Alexander Karatayev

SUNY Buffalo State, Great Lakes Center

https://greatlakescenter.buffalostate.edu/

■ **Dr. Stuart R. Dennis**

Eawag, Informatik

■ **Sylvie Flämig**

Umweltbüro mlut

www.sf-mut.com/

■ **Dr. Vadim Karatayev**

University of Kansas

https://biosurvey.ku.edu/

■ **Dr. Benjamin Kraemer**

Universität Konstanz, Limnologisches Institut

www.limnologie.uni-konstanz.de/straille/

Literatur:

- /1/ Son, M. O. (2007): Native range of the zebra mussel and quagga mussel and new data on their invasions within the Ponto-Caspian Region. In: *Aquatic Invasions*, 2(3) 2007, p. 174–184
- /2/ Marescaux, J. et al. (2016): Unravelling the invasion pathways of the quagga mussel (*Dreissena rostriformis*) into Western Europe. In: *Biol Invasions*, 18(1) 2016, p. 245–264
- /3/ De Ventura, L. et al. (2017): Tracing the quagga mussel invasion along the Rhine river system using eDNA markers: early detection and surveillance of invasive zebra and quagga mussels. In: *Management of Biological Invasions*, 8(1) 2017, p. 101–112
- /4/ Haltiner, L. et al. (2022): The distribution and spread of quagga mussels in perialpine lakes north of the Alps. In: *Aquatic Invasions*, 17(2) 2022, p. 153–173
- /5/ Roe, S. L.; MacIsaac, H. J. (1997): Deepwater population structure and reproductive state of quagga mussels (*Dreissena bugensis*) in Lake Erie. In: *Can J Fish Aquat Sci*, 54(10) 1997, p. 2428–2433
- /6/ Haltiner, L. et al. (2023): Population genetic insights into establishment, adaptation, and dispersal of the invasive quagga mussel across perialpine lakes. In: *Evolutionary Applications*, 2023
- /7/ De Ventura, L. et al. (2016): Overland transport of recreational boats as a spreading vector of zebra mussel *Dreissena polymorpha*. In: *Biol Invasions*, 18(5) 2016, p. 1451–1466
- /8/ App, P.; Hesselschwerdt, J. (2023): Wirbellose Neozoen im Bodensee – Untersuchungsjahre 2004 bis 2022. Aufarbeitung des Neozoen-Monitorings Bodensee im Auftrag der IGKB. Hydra: Konstanz
- /9/ Dermott, R.; Munawar, M. (1993): Invasion of Lake Erie offshore sediments by *Dreissena*, and its ecological implications. In: *Can J Fish Aquat Sci*, 50(11) 1993, p. 2298–2304
- /10/ Burlakova, L. E.; Karatayev, A. Y. (2023): Lake Michigan Benthos Survey Cooperative Science and Monitoring Initiative 2021. In: *Technical Report. USEPA-GLRI GL00E02254*. 2023: Buffalo, NY
- /11/ Karatayev, A. Y. et al. (2021): Rapid assessment of *Dreissena* population in Lake Erie using underwater videography. In: *Hydrobiologia*, 848 2021, p. 2421–2436
- /12/ Kraemer, B. M. et al. (2023): An abundant future for quagga mussels in deep European lakes. In: *Environmental Research Letters*, 18(12) 2023, 124008
- /13/ Capelli, C. et al. (2023): Environmental DNA survey indicates arrival of quagga mussel in Ticino River basin. In: *Journal of Limnology*, 82(1) 2023

Danksagung

Diese Studie erhielt Unterstützung durch das Forschungsprojekt „SeeWandel: Leben im Bodensee – gestern, heute und morgen“ im Rahmen des Interreg-V-Programms „Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein (Deutschland/ Österreich/Schweiz/Liechtenstein)“, das Mittel aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung sowie Fördergelder vom Schweizer Bund und den Kantonen erhält. Es bestand keine aktive Mitwirkung seitens der Geldgeber bei der Entwicklung des Studiendesigns, der Datenerfassung und -analyse, der Entscheidung zur Veröffentlichung oder der Erstellung des Manuskripts. Das Quaggamuschel-Monitoring im Bodensee, Bieler- und Genfersee sowie im Lago Maggiore und Luganersee wurde vom Bundesamt für Umwelt Schweiz (BAFU) sowie von der Eawag unterstützt.