



Piet Spaak, Biologe,
leitet die Abteilung
Aquatische Ökologie.
Koautor: Pascal
Vonlanthen

Wie Nährstoffe Gewässer verändern

Die Reduktion der Phosphorbelastung in den Seen ist ein Erfolg im Schweizer Gewässerschutz. Um die Erträge zu erhöhen, fordern Fischereikreise nun aber für den Brienzersee und andere Gewässer eine Verminderung der Phosphorelimination in den Kläranlagen. Die Zufuhr von mehr Phosphor kann in nährstoffarmen Seen allerdings zum Aussterben und Verschmelzen von Arten führen und verändert die Gewässerökosysteme unwiederbringlich.

Dank des Baus von Kläranlagen, des Verbots von Phosphat in Waschmitteln im Jahr 1985 und der zusätzlichen Phosphatfällung in den Kläranlagen ging die Überdüngung in den Schweizer Seen während der letzten Jahrzehnte stark zurück. Dadurch verbesserte sich die Gewässerqualität deutlich und die Lebensbedingungen und die Artenzusammensetzung näherten sich wieder einem natürlichen Zustand an. Insbesondere weil Fischerinnen und Fischer die sinkenden Fangerträge in gewissen Seen teilweise mit dem Fehlen des Nährstoffs in Verbindung bringen, wird der Phosphoreintrag in jüngster Zeit wieder diskutiert. So verlangen zwei im National- und Ständerat eingereichte Motionen, dass im Rahmen eines Pilotprojekts wieder mehr Phosphor in den Brienzersee

Im Rahmen des Projekt Lac erfassten Wissenschaftler die Artenvielfalt im Brienzersee. Das Inventar offenbarte etwa, dass in dessen Tiefen an den Nährstoffgehalt angepasste kleinwüchsige Felchenarten leben.



Stefan Kubi

eingeleitet werden soll. Die Initiantinnen und Initianten versprechen sich davon eine höhere Primärproduktion (Algenwachstum) und damit auch mehr Fische [1]. Für den Vierwaldstättersee und weitere Seen macht man sich ähnliche Überlegungen.

Verdrängung und Verschmelzung von Arten. Ohne Nährstoffe wären unsere Gewässer tot und für jegliches Leben ungeeignet. Damit Lebewesen in einem See existieren können, brauchen sie ein Minimum an Nährstoffen. Diese gelangen natürlicherweise durch Erosion und Zersetzungsprozesse in ein Gewässer. Das Nährstoffangebot bestimmt auch, wie viele Organismen in einem Ökosystem leben können, das heisst, wie produktiv dieses ist. Meist ist es der am wenigsten häufig verfügbare Nährstoff, der das Wachstum beschränkt. Für das Wachstum von Algen wirkt in unseren Breitengraden fast immer Phosphor limitierend. Algen sind die wichtigsten Primärproduzenten und die wesentliche Nahrungsgrundlage der anderen Wasserorganismen im Nahrungsnetz unserer Seen. Eine bestimmte Menge an Phosphor und anderen Nährstoffen ist für ein funktionierendes Gewässerökosystem also unabdingbar. Wie gross diese Menge ist, ist von See zu See verschieden und hängt zum Beispiel vom Einzugsgebiet ab. Das Nährstoffangebot beeinflusst auch die Zusammensetzung der Arten.

Vor allem der stark gestiegene Einsatz phosphorhaltiger Waschmittel und Dünger nach dem Zweiten Weltkrieg brachten jedoch unnatürlich hohe Einträge von Phosphor aus Haushalten und aus der Landwirtschaft in viele Schweizer Gewässer mit sich. Dies führte zu einer starken Vermehrung von Algen (Algenblüten) und als Folge davon zu Sauerstoffmangel und Fischsterben. Heute sind verschiedene Seen wieder so sauber und nährstoffhaltig wie vor der Verschmutzung (Abb. 1).

Die Überdüngung der Gewässer (Eutrophierung) wirkte sich nicht nur negativ auf die chemische Gewässerqualität aus, sondern veränderte auch die aquatischen Ökosysteme. Diese Veränderungen sind zum Teil bis heute sichtbar. In verschiedenen Untersuchungen konnte die Eawag dokumentieren, wie sich zum Beispiel die Artenzusammensetzung bei den Wasserflöhen infolge der Eutrophierung entwickelte. Die zum Zooplankton ge-

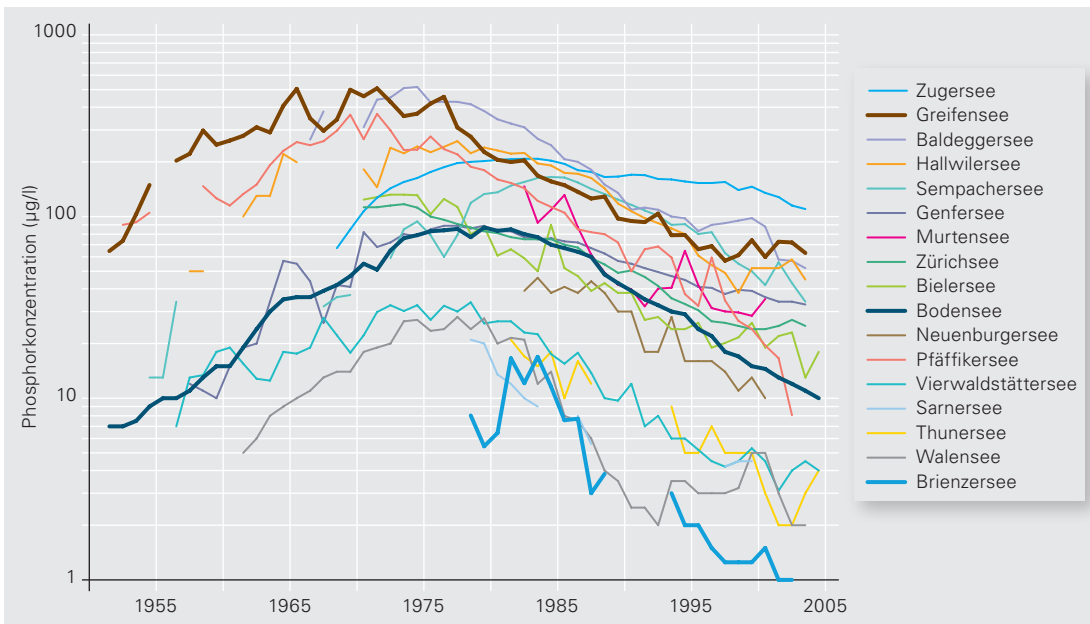


Abb. 1: Aufgrund von Gewässer-schutzmassnahmen gingen die Phosphorkonzentrationen in Schweizer Seen zurück.

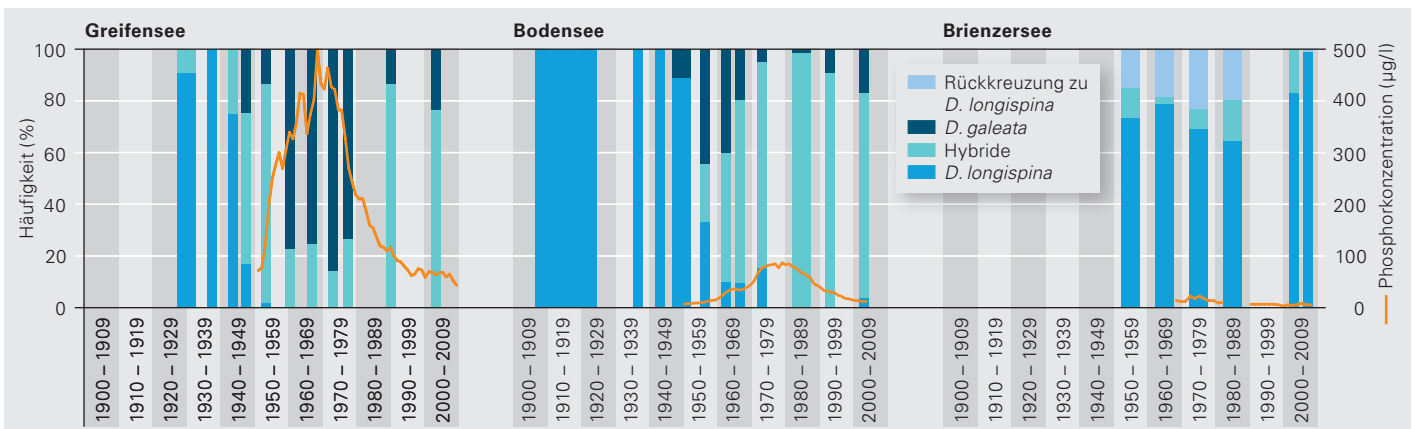
hörenden Krebstiere ernähren sich von Algen und sind für Fische eine wichtige Nahrungsquelle. Für viele Felchen etwa stellen sie die hauptsächliche Nahrung dar.

Mit genetischen Analysen von Dauerstadien aus den Sedi-menten von gering bis stark verunreinigten Seen konnten wir re-konstruieren, dass vor dem Nährstoffeintrag durch den Menschen *Daphnia longispina* in allen untersuchten Schweizer Gewässern die vorherrschende Wasserflohart gewesen war [2, 3]. Während der Eutrophierungsphase gelang es der invasiven Art *Daphnia galeata*, sich in vielen Seen, zum Beispiel im Bodensee und im Greifensee, auszubreiten und *Daphnia longispina* zu verdrängen. Teilweise verschmolzen die beiden Arten auch miteinander und bildeten Hybride (Abb. 2). In vielen Seen kommen deshalb heute ausschliesslich *Daphnia galeata* und die Hybridform vor, auch wenn sich die Nährstoffverhältnisse wieder normalisiert haben. In Seen wie dem Brienersee, die natürlicherweise sehr wenig

Phosphor enthalten und weniger stark von der Eutrophierung betroffen waren, konnte sich *Daphnia longispina* besser halten. Allerdings haben hier Rückkreuzungen zwischen den Hybriden und *Daphnia longispina* stattgefunden. Daher besitzen heutige Individuen von *Daphnia longispina* auch genetisches Material von *Daphnia galeata* – in ihrer ursprünglichen genetischen Aus-stattung existiert die Art *Daphnia longispina* in vielen Seen nicht mehr. Mit anderen Worten: Solche Veränderungen können dauer-haft und unumkehrbar sein.

Verlust ökologischer Nischen. Mithilfe von Experimenten konn-ten wir kürzlich nachweisen, was die Ursache für die Verände-rungen in der Artenzusammensetzung war. Wir zogen Klone beider Arten aus verschiedenen Seen unter nährstoffarmen und nährstoffreichen Bedingungen im Labor auf [4]. Bei einem spär-lichen Futterangebot, wie es in nährstoffarmen (oligotrophen)

Abb. 2: Abhängig von der Phosphorkonzentration veränderte sich die Artenzusammensetzung bei den Daphnien.





Eawag

Bergung eines Sedimentbohrkerns aus dem Greifensee: Wie sich die Artenzusammensetzung bei Wasserflöhen in Abhängigkeit der Phosphorkonzentration im Lauf der Zeit veränderte, lässt sich mithilfe von Dauerstadien in den Sedimenten rekonstruieren.

Seen typisch ist, gedieh *Daphnia longispina* besser, bei eutrophen Verhältnissen hingegen *Daphnia galeata*. Das erklärt auch, warum *Daphnia longispina* nicht in allen Schweizer Seen verdrängt wurde: In den Sedimenten der wenigen Seen, die von der Eutrophierung bloss in geringem Mass betroffen waren, fanden wir nur wenige oder keine Dauerstadien von *Daphnia galeata*. So kam die Art im saubersten See der Schweiz, dem Brienersee, praktisch nie vor, obwohl sie im benachbarten Thunersee auftritt. Die Untersuchungen zeigen sogar, dass vor 1950 im Brienersee überhaupt keine ständige Daphnien-Population existiert hat. Erst mit dem (verhältnismässig geringen) Phosphoreintrag konnte sich eine dauerhafte Population von *Daphnia longispina* ansiedeln.

Das Verschwinden und Verschmelzen von Arten als Folge der Eutrophierung haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Eawag nicht nur bei Wasserflöhen beobachtet, sondern auch bei den Fischen. So konnten Pascal Vonlanthen und Ole Seehausen von der Abteilung Fischökologie und Evolution zusammen

mit Kollegen der Universität Bern jüngst nachweisen, dass die Überdüngung der Schweizer Seen die Zahl der einheimischen Felchenarten innert weniger Jahrzehnte schweizweit um 38 Prozent dezimiert hat [5]. Je höher die maximalen Phosphorkonzentrationen in den untersuchten Seen einst lagen, desto höher ist der Artenverlust (Abb. 3A).

In sieben Seen – im Genfer-, Murten-, Sempacher-, Baldegger-, Hallwiler-, Greifen- und Pfäffikersee – sind die ursprünglichen Felchenarten heute vollständig ausgestorben und wurden durch den Besatz mit anderen Felchenarten ersetzt. Keinen Artenrückgang hinnehmen mussten einzig die tiefen und von der Überdüngung weniger stark betroffenen Alpenrandseen Thuner-, Briener- und Vierwaldstättersee. Im Walen- und im Zürichsee leben heute noch je zwei von ehemals drei historisch belegten Felchenarten, im Bodensee konnten die Forschenden noch vier von fünf Arten nachweisen. Die Studie zeigt auch, dass in mindestens 25 Seen im europäischen Alpenraum teilweise mehrere endemische Felchenarten lebten, das heisst Arten, die ausschliesslich im jeweiligen See und sonst nirgends vorkamen.

Die Abnahme der Artenvielfalt bei den Felchen ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass sich zuvor eigenständige Spezies vermischten und untereinander fortpflanzten. Infolge des massiven Phosphoreintrags zwischen 1950 und 1990 erhielten viele Seen am Grund und im tiefen Wasser kaum noch Sauerstoff. Damit gingen ökologische Nischen für jene Spezialisten verloren, die sich seit der letzten Eiszeit vor rund 15 000 Jahren entwickelt und an ein Leben in grösseren Tiefen angepasst hatten. Besonders die tiefen und nährstoffarmen Seen scheinen ein einzigartiges Reservoir für die Entstehung neuer Arten zu sein. Mit dem Verschwinden dieser Lebensräume mussten die Fische in die Habitate anderer Felchenarten ausweichen und kreuzten sich mit diesen. Dadurch verloren sie innert weniger Generationen ihre genetische und funktionale Einzigartigkeit. Das kommt faktisch einer Umkehr der Artenstehung gleich. In stärker mit Phosphor belasteten Seen ist die genetische Differenzierung zwischen den verbliebenen Arten heute zudem geringer als in nährstoffarmen Gewässern (Abb. 3B). Damit gingen auch Spezialisierungen an bestimmte Laichzeiten oder besondere Ernährungsweisen verloren und die Variationen in der Gestalt der Fische wurden geringer.

Zurück in die «guten» alten Zeiten? Die Untersuchungen über die Wasserflöhe und die Felchen führen eindrücklich vor Augen, dass sich in Seen schon eine geringfügige Nährstoffanreicherung negativ auf deren natürlichen Zustand auswirken kann, indem sich das Spektrum der Arten verändert, die genetische Differenzierung verloren geht und Arten aussterben können. Ausserdem machen sie deutlich, dass solche Veränderungen unter Umständen unumkehrbar sind. So lassen sich die verschwundenen endemischen Felchenarten oder die ursprüngliche *Daphnia longispina* auch in jenen Gewässern nicht mehr zurückholen, wo sich die Nährstoffverhältnisse wieder normalisiert haben.

Mit den eingangs erwähnten Massnahmen hat die Phosphorbelastung in den meisten Schweizer Seen in den vergangenen drei Jahrzehnten wieder abgenommen. In den saubersten beziehungsweise nährstoffärmsten Seen wie dem Briener-, Walen-

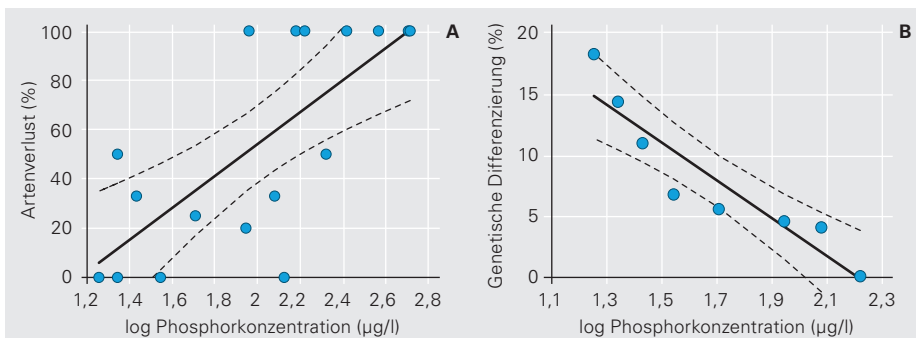


Abb. 3: Höhere Phosphorkonzentrationen führten bei Felchen zu einem grösseren Verlust von Arten (A) und zu geringeren genetischen Unterschieden zwischen den verschiedenen Populationen (B).

oder Vierwaldstättersee betragen die Phosphorkonzentrationen heute nur noch weniger als fünf Mikrogramm pro Liter (siehe Abb. 1). Aus Sicht des Gewässerschutzes ist das ein grosser Erfolg. Die Forderungen aus Fischereikreisen, die Nährstoffelimination in solchen Seen neu zu überdenken, stellen diesen nun in Frage.

Die Befürworterinnen und Befürworter dieser Idee schlagen zum Beispiel für den Brienzersee einen Grenzwert für Phosphat von zwei bis fünf Mikrogramm pro Liter vor, was den Bedingungen in den 1970er-Jahren entspricht. Ihrer Ansicht nach soll diese Massnahme wieder «ein ökologisch erstrebenswertes Pflanzen- und Fischwachstum» erlauben. Denn zogen die Berufsfischer während der Periode mit erhöhtem Nährstoffeintrag jährlich im Durchschnitt gegen 15 Kilogramm Felchen pro Hektare aus dem See, ist es heute weniger als 1 Kilogramm [6]. Das führen die Initiantinnen und Initianten auf einen Nährstoffmangel im See zurück. Mit dem Ziel, die Algenproduktion und damit die Fischereierträge wieder zu erhöhen, streben sie einen teilweisen oder gar vollständigen Verzicht auf die Phosphatfällung in den Kläranlagen im Einzugsgebiet des Brienzersees an. Eine Erhöhung des Nährstoffeintrags soll zudem auch die seit 1999 regelmässig auftretenden Einbrüche der Daphnienpopulationen verhindern und damit die wichtigste Nahrung der Felchen sicherstellen.

Obwohl Daphnien in den letzten 30 Jahren für die Felchen die bedeutendste Futterquelle darstellten, konnten wir keine Dauerstadien in den Seesedimenten vor 1950 nachweisen. Auch ältere Studien über das Plankton im Brienzersee erwähnen das Fehlen der Wasserflöhe [7]. Das deutet darauf hin, dass die endemischen Felchenarten sehr wahrscheinlich ohne Daphnien als ständige Nahrungsquelle auskamen. Der heute wieder auftretende zeitweilige Rückgang der Daphnienpopulationen sollte darum als Rückkehr zu einem natürlichen Zustand angesehen werden und nicht als Bedrohung für die Felchen.

Weniger Fischfang, dafür mehr endemische Arten. Eine systematische Erfassung der Fischarten im Rahmen des Proje Lac der Eawag und des Naturhistorischen Museums Bern im Herbst 2011 brachte ans Licht, dass in den Tiefen des Brienzersees naturverlassende Felchenpopulationen leben. Die geringen Fangträge der Berufsfischer weisen also nicht auf eine generelle Fischarmut im See hin. Vielmehr sank der Aufwand der Fischerinnen und Fischer gemäss dem Fischereinspektorat des Kantons Bern seit Ende

der 1970er-Jahre laufend und beträgt heute nur noch ein Fünftel von damals. Die nicht normierte Statistik der kommerziellen Fangträge zeigt also ein verzerrtes Bild.

Vor diesem Hintergrund wird das vorgeschlagene Phosphormanagement obsolet. Die künstliche Düngung eines natürlichen Sees würde diesen zudem zu einer Fischzucht degradieren, was nicht im Sinne einer nachhaltigen Nutzung der natürlichen Ressourcen ist. Nährstoffreiche Seen mit grösserer Produktivität gibt es in der Schweiz einige, die wenigen von Natur aus nährstoffarmen Gewässer und ihre einzigartige Biodiversität gilt es dagegen zu erhalten – insbesondere wenn man die möglichen ökologischen Konsequenzen aufgrund der Erfahrungen der vergangenen 80 Jahre kennt. ○ ○ ○

- [1] Phosphatmanagement Brienzersee: 11.4091 Motion von Ständerat Werner Luginbühl, 11.4158 Motion von Nationalrat Erich von Siebenthal.
- [2] Brede N., Sandrock C., Straile D., Jankowski, T., Spaak, P., Streit B., Schwenk K. (2009): The impact of human-made ecological changes on the genetic architecture of *Daphnia* species. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106, 4758–4763.
- [3] Rellstab C., Keller B., Girardclos S., Anselmetti F., Spaak, P. (2011): Anthropogenic eutrophication shapes the past and present taxonomic composition of hybridizing *Daphnia* in unproductive lakes. *Limnology and Oceanography* 56, 292–302.
- [4] Spaak P., Fox J.A., Hairston Jr. N.G. (2012): Modes and mechanisms of a *Daphnia* invasion. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences Series B*, online veröffentlicht.
- [5] Vonlanthen P., Bittner D., Hudson A.G., Young K., Müller R., Lundsgaard-Hansen B., Roy D., Di Piazza S., Largiader C.R., Seehausen O. (2012): Eutrophication causes speciation reversal in whitefish adaptive radiations. *Nature* 482, 357–362.
- [6] Eawag (2012): Fakten zum Phosphor im Brienzersee, www.eawag.ch/phosphor_brienzersee
- [7] Flück H. (1926): Beiträge zur Kenntnis des Phytoplanktons des Brienzersees. Dissertation ETH Zürich.