



**Uferschutzverband
Thuner- und Brienersee**

Sogar die Flöhe sind im Brienersee einmalig

Erst vor sechzig Jahren haben sich Wasserflöhe (Daphnien) dauerhaft im Brienersee angesiedelt. Die Nachkommen dieser Einwanderer, die zur damals in allen Schweizer Seen verbreiteten Art *Daphnia longispina* gehörten, sind auch heute noch da. Und ihr Bestand ist mittlerweile ein Unikum: Denn während sich in allen anderen Seen seit der Mitte des 20. Jahrhunderts weitere Daphnien-Arten ausgebreitet und mit *Daphnia longispina* gekreuzt haben, konnten sich im Brienersee diese anderen Arten bis heute nicht etablieren, und man findet dort ausschliesslich Daphnien mit dem ursprünglichen *longispina*-Erbgut.

Als in den 1950er Jahren das auf fossile Energien gegründete Wirtschaftswachstum einsetzte, nahmen nicht nur Güterproduktion und Verkehr rasanter zu als je zuvor, sondern auch die unerwünschten Nebenprodukte: Abfälle, Abgase und Abwasser. Erste Auswirkungen wurden in den stark belasteten Gewässern schnell sichtbar. Giftige Stoffe verursachten Fischsterben. Vor allem aber wurde Phosphor dank der Erschliessung fossiler Phosphat-Lager plötzlich in grossen Mengen verfügbar und in Kunstdüngern, Waschpulver und diversen anderen Produkten massenhaft eingesetzt. Normalerweise setzt Phosphor als limitierendes Spurenelement dem Algenwachstum in natürlichen Gewässern Grenzen. Nun aber brachten ausgewaschener Dünger und Waschmittel nicht nur die Bäche zum Schäumen, sondern führten auch zu einem ungebremsten Algenwachstum in den Seen. Abgestorbene Algen lagerten sich am Seegrund ab und wurden dort von Bakterien, die sich ihrerseits ungebremst vermehren konnten, zersetzt. Beim Zersetzungsprozess wird unter anderem Sauerstoff verbraucht. Das war in manchen Fällen so viel, dass das System kippte und die tieferen Wasserschichten, bei kleineren Seen sogar das ganze Gewässer, für Fische und andere Wasserlebewesen unbewohnbar wurden. Ausserdem vermehrten sich in den Seen, die aus dem ökologischen Gleichgewicht geraten waren, zum Teil giftige Cyanobakterien (Blualgen). Während solcher «Algenblüten» musste das Baden verboten und Trinkwasserfassungen ausser Betrieb genommen werden.

Irreversible Folgen der Gewässerverschmutzung

Diese sichtbaren Folgen der Gewässer-Überdüngung wurden mit dem Bau von Kläranlagen, dem Verbot von phosphathaltigen Waschmitteln und Vorschriften für den Düngereinsatz weitgehend rückgängig gemacht.

Zunächst kaum wahrgenommen wurden zum Teil irreversible Dauerfolgen: der Verlust und die Veränderungen der Artenzusammensetzung sowie die Reduktion der biologischen Vielfalt durch invasive Arten und durch die Hybridisierung vormals getrennter Arten. Wo die tiefen Wasserschichten unbewohnbar geworden waren, starben die Arten aus, die diese Lebensräume genutzt hatten, oder sie teilten neu die höheren Wasserschichten mit ihren Verwandten, die schon vorher dort gelebt hatten. Durch die vielen Nährstoffe in den höheren Wasserschichten wurden diese Lebensräume homogener, so dass vormals getrennte Arten die Grundlage für ihre spezialisierten Lebensweisen verloren, sich zu kreuzen begannen und zum Teil ganz in Hybridenschwärmen aufgingen. Damit wurden jahrtausendelange Entwicklungen zunichte gemacht, in denen sich separate, an die optimale Nutzung ganz bestimmter ökologischer Nischen angepasste Arten gebildet hatten. Auf diese Weise verloren die Schweizer Seen insgesamt einen Drittel ihrer Felchenarten, wie Ole Seehausen, Pascal Vonlanthen und ihr Team von der Universität Bern und der Eawag (dem Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs) 2012 im Fachblatt «Nature» berichteten (1). In einzelnen Seen wie etwa dem Genfersee hat sogar keine einzige der ursprünglichen Felchenarten überlebt. Daneben vermehrten sich in den Seen, die am stärksten mit Phosphat belastet und auch am stärksten von der Klimaerwärmung betroffen waren, einige neue Arten, die mit den neuen Bedingungen besser zurecht kamen als die heimischen. Dazu gehören auch neu oder vermehrt auftretende Arten des Zooplanktons, die auf höhere Nährstoffkonzentrationen angewiesen sind und die als wichtige Nahrungsgrundlage vieler grösserer Tiere zu den auffälligeren Veränderungen etwa in Bestandesgrössen und Zusammensetzung der Fischarten führten.

Spezialfall Brienersee

Im Brienersee, dem saubersten der grossen Schweizer Seen, etablierten sich während der hohen Phosphat-Einträge der 1950er bis 1970er Jahre mit den Daphnien eine neue Art von Krebstierchen, die für Fische nahrhafter ist als die vorher schon vorhandenen Copepoden und anderen Planktonarten. In der



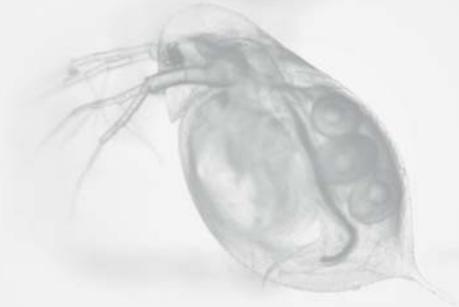
Im Brienzensee hat eine einmalige Fauna überlebt.

Folge wuchsen vor allem die Felchen schneller – wobei die langsamerwüchsig-igen Brienzlige von den schnellerwüchsig-igen Grossfelchen bald überholt wurden. So stiegen die durchschnittlichen Jahreserträge an grösseren Felchen von 170 Kilogramm in den 1930er Jahren auf 3,81 Tonnen in den 1950er und 19,92 Tonnen in den 1960er Jahren, während die Brienzligfänge in derselben Periode von 1,77 Tonnen zwar zunächst bis auf 5,58 Tonnen anstiegen, dann aber wieder auf 2,73 Tonnen zurückgingen (2).

Allerdings blieb die Phosphat-Belastung des Brienzensees selbst während dem Höhepunkt der Gewässerverschmutzung in den 1960er und 1970er Jahren relativ gering und dauerte auch nicht so lange wie in den Mittellandseen, so dass die meisten, möglicherweise sogar alle Fischarten überlebt haben. Und seit der See nach dem Bau der Kläranlagen wieder fast so sauber geworden ist wie vor hundert Jahren, sind auch die Felchenerträge wieder auf das damalige Niveau gesunken, während die kleinen Brienzlige wieder zum häufigsten Fisch im Brienzensee wurden.

Eine Veränderung im Brienzensee wurde allerdings (noch) nicht rückgängig gemacht: Daphnien, die vor den 1950er Jahren nur sporadisch vorkamen, haben sich während der Eutrophierungsperiode auf Dauer eingerichtet – auch wenn der Bestand heute nur noch klein ist und ähnlich wie im Hochwasserjahr 1999 wiederholt einbricht (3).

Daphnien



Daphnien (Wasserflöhe) sind eine Gattung von Krebstieren, die ökologisch eine zentrale Position im Plankton vieler Süßwasserseen weltweit einnehmen. Sie schweben im Wasser und ernähren sich von ebenfalls frei schwebenden Algen, die nur eine bis wenige Zellen gross sind (Phytoplankton). Daphnien und übriges tierisches Plankton werden wiederum vor allem von Fischen und räuberischen Insektenlarven gefressen, die im offenen Wasser leben. Wegen ihrer zentralen Rolle im Nahrungs-Netz der Seen sind die winzigen Krebschen wichtige Indikatoren für den ökologischen Zustand und Veränderungen von Gewässern.

Daphnien vermehren sich meist ungeschlechtlich durch Jungfernzeugung (Parthenogenese): Ein Daphnienschwarm besteht üblicherweise aus weiblichen Tieren, aus deren unbefruchteten Eiern wieder weibliche Tiere mit identischem Erbgut (Klone) schlüpfen. Verschlechtern sich allerdings die Lebensbedingungen für eine Population, entstehen auch männliche Tiere, und der Schwarm beginnt, befruchtete Eier zu produzieren. In Tümpeln, die jeden Winter bis zum Grund durchfrieren, findet dieser Prozess regelmässig jeden Herbst statt, während andere Daphnien-Populationen jahrzehntelang ausschliesslich aus Klonen bestehen.

Die Mutterdaphnien legen jeweils nach der Befruchtung durch die Männchen maximal zwei Eier in einer festen Schutzhülle ab, in der sie in einem Starrezustand Frost ebenso überstehen wie hohe Temperaturen und Trockenheit. Werden die Umweltbedingungen wieder freundlicher für Daphnien, erwachen diese Dauerstadien («Ephippien») aus ihrer Starre. Ein normaler Stoffwechsel setzt ein, und aus den Eiern schlüpft eine neue

Daphnien-Generation, die sich genetisch von ihren Eltern unterscheidet. Das kann nach einem Winter sein, wenn der Tümpel wieder auftaut, oder auch viele Jahre später, wenn zum Beispiel ein Ephippium, das am Seegrund verschüttet wurde, freigespült wird und wieder mit Licht und Sauerstoff in Kontakt kommt. Nach bisherigen Beobachtungen können Ephippien selbst nach 40–60, vereinzelt sogar nach einigen hundert Jahren wieder aktiviert werden.

Noch sehr viel länger bleiben die dauerhaften Schutzhüllen in den Sedimenten am Seegrund erhalten, so dass in ungestörten Sedimentschichten ein «Daphnien-Archiv» liegt. Solche Archive untersucht die Gruppe von Piet Spaak am Schweizerischen Wasserforschungsinstitut Eawag, die anhand der Ephippien nicht nur die «Daphniengeschichte» rekonstruieren, sondern damit auch Aussagen über die Entwicklung eines Sees als Ökosystem insgesamt machen kann.

Die Schweizer Seen sind heute vor allem von den drei nahe verwandten Daphnien-Arten *Daphnia longispina*, *D. galeata* und *D. cucullata* besiedelt. Piet Spaak und sein Team von der Abteilung Gewässerökologie der Eawag konnte mit der Untersuchung von Ephippien aus Sedimentbohrkernen zeigen, dass höchst wahrscheinlich alle «Daphnien-Seen» von Oberitalien bis zum Bodensee ursprünglich von der auf kaltes und sauerstoffreiches Wasser spezialisierten *Daphnia longispina* besiedelt waren. *Daphnia galeata*, die sich bei reichlichem Futterangebot und wärmeren Temperaturen schneller vermehren kann, hat sich erst seit der Mitte des 20. Jahrhunderts ausgebreitet. Hybride der beiden Arten werden heute in allen ehemaligen «*Daphnia-longispina*-Seen» gefunden – in manchen Seen gibt es kaum noch andere Daphnien. Die Gewässerökologen konnten auch belegen, dass *Daphnia galeata* und Hybride in schwach mit Phosphat belasteten Seen wie dem Walen-, dem Vierwaldstätter- und dem Thunersee weniger häufig auftreten. Ausserdem zeigte Christian Rellstab in seiner Dissertation bei Piet Spaak, dass im Brienzensee vor den 1940er Jahren gar keine beständige Daphnienpopulation vorhanden war (4). Erst mit höheren Phosphateinträgen in der Zeit des «Wirtschaftswunders» konnte sich *Daphnia longispina* etablieren, die bis heute die einzige Daphnien-Art im Brienzensee geblieben ist.

«Wir können nur versuchen, zu verstehen – wir können nicht Evolution spielen»

Seen sind komplexe Ökosysteme. Welche Auswirkungen menschliche Eingriffe wie hohe Phosphateinträge, Mikroverunreinigungen, das Einschleppen neuer Arten oder auch der Klimawandel haben, erkennt man oft nicht direkt. In einem Interview mit der UTB-Jahrbuchredaktion gibt der Gewässerökologe Piet Spaak Einblick in die Erforschung von Daphnien und den Beitrag, den sie zu einem besseren Verständnis von aquatischen Ökosystemen und ihren Veränderungen leistet. Und er warnt vor der Vorstellung, Umweltveränderungen gezielt steuern zu können. Denn Seen sind so komplexe Systeme, dass jeder Eingriff unberechenbare Folgen hat. Und aus dem unbeabsichtigten «Grossversuch» mit der weltweiten Gewässerverschmutzung weiss man, dass manche Folgen irreversibel sind.

*Der Brienzersee ist der einzige Alpenrandsee, in dem bis heute nur eine Daphnien-Art vorkommt, die auf kaltes und nährstoffarmes Wasser spezialisierte *Daphnia longispina*. Welche Bedeutung hat das für das Ökosystem und die Forschung?*

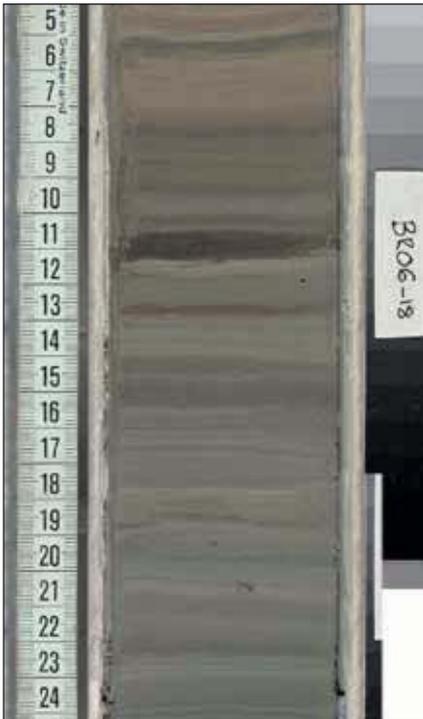
Piet Spaak: Der Brienzersee ist wissenschaftlich wertvoll, weil nur hier die Frage geklärt werden konnte, ob sich *Daphnia galeata* tatsächlich nur in eutrophen Seen festsetzen kann; ohne die Daten vom Brienzersee war das ja nur eine Hypothese. Christian Rellstabs Untersuchungen an den drei saubersten Seen der Schweiz zeigten, dass der Anteil an *Daphnia-galeata*-Erbgut in den Populationen um so kleiner war, je sauberer der See war. Im Brienzersee fand Christian Rellstab zwar Ehippien (Dauereier) von Hybriden, aber im Unterschied zu allen anderen Seen nie reine *D. galeata*-Ehippien. Das zeigt, dass *D. galeata* versuchte, sich zu etablieren, dass es ihr aber nicht gelungen ist. Zudem zeigte Christian Rellstab mit der Untersuchung von Sediment-Bohrkernen, dass es im Brienzersee vor den 1940er Jahren überhaupt keine dauernden Daphnien-Populationen gab, dass sich also das Ökosystem Brienzersee meist ohne Daphnien entwickelt hat. In einer Untersuchung um 1900 hat zwar der Eidgenössische Fischerei-Inspektor und ETH-Zoologe Johannes Heuscher an einzelnen Stellen Daphnien gefunden. Diese Vorkommen reichten damals aber offensichtlich nicht, um eine stabile Population aufzubauen, die ihr Überleben mit Ehippien gesichert hätte.

Warum wurde aus den Daphnien-Vorkommen um 1900 keine ständige Population?

Schwer zu sagen. Möglicherweise verschwanden solche instabilen Bestände mangels Futter wieder. Vielleicht wurden sie auch immer gleich von Fischen gefressen – schliesslich sind Daphnien perfektes Fischfutter.

Wie sehr musste der Phosphateintrag zunehmen, damit sich Daphnien dauernd im Brienersee festsetzen konnten? Mit dem Bevölkerungswachstum, der Entsumpfung des Haslitals und der ersten Blüte des Tourismus nahmen die Phosphateinträge in den Brienersee ja wohl schon im 19. Jahrhundert zu?

Der Einfluss dieser Prozesse auf den Phosphathaushalt wurde nie untersucht. Aber offensichtlich reichten die damaligen Phosphateinträge nicht für den Aufbau eines stabilen Daphnien-Bestandes, wie die Untersuchungen der See-sedimente belegen.



An der Abfolge von hellen Winter- und dunklen Sommer-Ablagerungen eines Sedimentkerns lässt sich die Geschichte eines Sees ablesen. In den Brienersee-Sedimenten (Bild) zum Beispiel tauchen Dauereier von Daphnien erst in den Schichten der letzten 70 Jahren auf.

(Foto: Christian Rellstab, Eawag, zvg)

Wie viel Phosphat braucht es, damit sich Daphnien dauernd festsetzen können?

Damit sich *Daphnia longispina*, die ursprüngliche Art der Alpenrandseen, festsetzen kann, braucht es sehr wenig – die Konzentrationen liegen unter der Menge, die wir noch messen können, also unter einem Mikrogramm Phosphat pro Liter.

Verschwinden die Daphnien derzeit wieder aus dem Brienersee? Schliesslich liegen seine Phosphatkonzentrationen auch jetzt wieder unter einem Mikrogramm pro Liter.

Im Unterschied zu Heuschers Zeit gibt es heute noch Ehippien im Brienersee, die jederzeit wieder einen neuen Bestand aufbauen können – so wie nach den Hochwassern 1999/2000, die einen Grossteil des Bestandes weggeschwemmt hatten. Bei den tieferen Nährstoffkonzentrationen und kleineren Daphnien-Populationen dauert die Erholung aber eine Weile. Wenn wir die Daphnien nicht immer sehen, heisst das nicht, dass es keine mehr gibt. Vielleicht liegt der Bestand einfach unter der Detektionsgrenze – das heisst, er ist nicht dicht genug, dass wir in den fünf Kubikmetern Wasser, die wir als Probe nehmen, Daphnien finden.

Wann ist Daphnia galeata in die Schweizer Seen eingewandert?

Vermutlich kam diese Art seit jeher immer wieder mal in einen oder anderen See vor – aber in so kleinen Beständen, dass sie nicht gefunden wurden und auch keine Ehippien im Sediment hinterliessen. Messbare Bestände tauchten erst mit der Eutrophierung der Seen um die Mitte des 20. Jahrhunderts auf. Ähnlich dürfte es sich auch mit *Daphnia pulicaria* verhalten, die seit einigen Jahrzehnten im Bodensee beobachtet wird und die vorher nur aus kleinen, nährstoffreichen Teichen bekannt war.

Wie unterscheidet sich die Invasion von Daphnia longispina im Brienersee von den Daphnia-galeata-Invasionen in den anderen Seen?

Weil es im Brienersee vorher keine Daphnien gab, konnte *Daphnia longispina* bei ihrer Ankunft auch mit keiner anderen Art hybridisieren. Und weil keine andere Art folgte, blieb *Daphnia longispina* im Brienersee in ihrer ursprünglichen Form erhalten – im Gegensatz zu den anderen Schweizer Seen.



Linke Abbildung: Eine *Daphnia longispina* aus dem Brienersee.
(Foto: Christian Rellstab, Eawag, zvg). **Rechte Abbildung:** *Daphnia galeata* lässt sich von *Daphnia longispina* unter dem Mikroskop anhand der Kopf-Form unterscheiden. (Foto: Piet Spaak, Eawag, zvg)

Gibt es eigentlich einen Unterschied zwischen biologischen Invasionen in Seen und in anderen Ökosystemen?

Grundsätzlich gibt es immer eine Nische, in die ein neuer Organismus reinpasst; und wenn dieser Neuankömmling einen Vorteil hat – weil er zum Beispiel die vorhandenen Ressourcen besser nutzen kann, oder weil die natürlichen Feinde fehlen – wird er «invasiv». Statistisch gesehen passiert das in einem von tausend Fällen und wird meist dadurch begünstigt, dass der Mensch das betreffende Ökosystem relativ schnell verändert hat. In Gewässern kommen solche Invasionen wohl nicht häufiger vor als in anderen Ökosystemen. Aber wenn Organismen wie zum Beispiel die Zebramuscheln gut mit dem neuen Lebensraum zurecht kommen, breiten sie sich sehr schnell aus, weil wichtige Faktoren wie Temperatur oder Nährstoffgehalt in einem Gewässer über weite Strecken relativ homogen sind.

*Was bedeutet die Invasion von *Daphnia galeata* für die betroffenen Seen?*

Wir müssen hier unterscheiden zwischen der Ausbreitung der Art und dem, was dieser Vorgang über den Zustand der Ökosysteme aussagt, der die Ausbreitung überhaupt erst ermöglicht.



Ephippium mit zwei Eiern (Foto: Markus Möst, Eawag, zvg)

Der Lebensraum einer Tier- oder Pflanzenart hat grundsätzlich keine fixen Grenzen, sondern verändert sich laufend, weil sich entweder die Lebensbedingungen verändern, oder weil die Tiere und Pflanzen weiterwandern und sich dabei mit der Zeit selber verändern. Wanderungen gehören zu den Faktoren, die Evolution – und damit die Entstehung von Biodiversität – vorantreiben. Problematisch ist die Ausbreitung einer neuen Art für ein Ökosystem erst dort, wo der Mensch Organismen über grössere Distanzen transportiert, die sie natürlicherweise unmöglich überwinden können. Denn damit lässt er der Evolution keine Zeit, Regulationsmechanismen zu entwickeln.

Die Ausbreitung von *Daphnia galeata* ist kein Problem dieser Art. *Daphnia galeata* wurde nicht von weither eingeschleppt und kann sich auch nicht ungebremst vermehren. Sie eignet sich so gut als Fischfutter wie *Daphnia longispina* – eher noch besser. Denn in einem sauberen See kann *Daphnia longispina* ihre Position in der Vertikalen bis zu 50 Meter täglich verändern, um den Fischen auszuweichen. *Daphnia galeata* weicht den Fischen viel weniger aus; ihre Überlebensstrategie ist die schnelle Vermehrung – deshalb profitierte sie ja auch stärker von der Gewässer-Eutrophierung als *Daphnia longispina*.

*Dann sollten wir eigentlich froh sein, dass sich im Zuge der Gewässer-Eutrophierung *Daphnia galeata* in den meisten Seen ausgebreitet hat?*

Seen haben für die Menschen viele Funktionen. Sie dienen auch der Trinkwasserversorgung und der Erholung. Zudem kann man die genetische Vielfalt von Wasserlebewesen bei einer langfristigen Betrachtung der Entwicklung von Wasserqualität und Fischbeständen nicht ausser Acht lassen. Welche Interessen an einem See wie stark gewichtet werden, ist eine politische Frage.

Die Eawag hat entschieden gegen Versuche mit einem «Phosphat-Management» Stellung genommen – das heisst, gegen eine geringere Phosphat-Ausfällung in den Kläranlagen zur Steigerung der Fischerträge mit einem Versuch im Brienzersee.

Wir zeigen, welche Risiken solche Entscheide für die Seen als Ökosysteme haben – und dass Folgen wie zum Beispiel Hybridisierungen und der damit verbundene Verlust von Arten und Erbgutvarianten irreversibel sind. Und die Folgen von höheren Phosphat-Einträgen kennen wir ja seit Jahrzehnten, ist doch die weltweite Gewässerverschmutzung ein unbeabsichtigter Grossversuch.

Hybridisierungen geben der Evolution von Arten eine neue Richtung. Könnte das nicht auch ein Vorteil werden – etwa in Hinblick auf den Klimawandel?

Hybridisierung ist eine Möglichkeit für Arten, Gene auszutauschen, was sonst nicht so einfach geht. Natürlich kann man sich vorstellen, dass dabei auch mal ein «Superfloh» entsteht, der den gesamten Lebensraum übernimmt – so, wie die Klone eines *Daphnia-pulex-Daphnia-pulicaria*-Hybrids aus Nordamerika, die in Kenia die *Daphnia pulex*-Populationen dominieren. Sobald aber solche Klone mit einer anderen Art hybridisieren – etwa bei Rückkreuzungen mit einer Elternart – entstehen neue Erbgutkombinationen, die nicht unbedingt erfolgreich sein müssen. Barbara Keller hat für ihre Dissertation in meiner Gruppe zum Beispiel Daphnien aus dem Greifensee untersucht und herausgefunden, dass aus Hybrid-Ephippien weniger Tiere schlüpfen als aus den Ephippien der Eltern-Arten.

Daneben verfügen Daphnien dank häufigen Gen-Vervielfachungen über ein Erbgut, das selbst ohne Hybridisierungen bei gewissen Umweltveränderungen sehr schnelle Anpassungen zulässt. Mein Doktorand Patrick Turko zeigt zum Beispiel mit einem Versuch, in dem er Daphnien-Klone aus unterschiedlichen

Zeiträumen vergleicht, dass sich Daphnien innert zehn bis zwanzig Jahren an höhere Bleikonzentrationen angepasst haben. Diese schnelle Anpassung an das Blei, das aus Autoabgasen in die Gewässer gelangt, könnte durch Gen-Vervielfachungen ermöglicht worden sein. Aber dabei ist noch keine neue Art entstanden. Vielmehr handelt es sich bei solch «schneller Evolution» um die Selektion erfolgreicher Erbgutvarianten, bei der zugleich andere Merkmale, die vielleicht in Zukunft nützlich geworden wären, verloren gehen.

Die wenigen Beispiele zeigen, dass wir nur versuchen können zu verstehen, was passiert ist. Wir können nicht Evolution spielen – für «Umwelt-Engineering» sind die Zusammenhänge viel zu komplex.

Wie Daphnien mit Fischen umgehen

«Das Lebensziel des Wasserfloh besteht darin, sich fortzupflanzen, bevor er gefressen wird», sagt Piet Spaak. Darin waren Daphnien in ihrer langen gemeinsamen Evolutionsgeschichte mit Fischen sehr erfolgreich, sonst wäre schon längst der letzte Wasserfloh von einem Gourmet in Fischgestalt vertilgt worden. Im Wesentlichen sind zwei Anpassungen für den Erfolg verantwortlich. Zum einen weichen Daphnien den Fischen aus und können ihre Position im Tagesverlauf vertikal um bis zu 50 Meter verändern, wenn Gefahr droht. Das Signal für Gefahr sind Fischkairomone – Botenstoffe, die für den typischen Fischgeruch verantwortlich sind. Je höher die Kairomon-Konzentration im Wasser wird, desto tiefer tauchen die Daphnien ab. Sehr weit können sie allerdings nur ausweichen, wenn das Wasser sauber ist und deshalb auch in der Tiefe genug Sauerstoff aufweist. In solch sauberen Seen lebt vor allem die relativ langsam wachsende *Daphnia longispina*, die auch besser mit der Kälte und dem reduzierten Futterangebot in der dunklen Tiefe zurecht kommt. An nährstoffreiche Gewässer angepasste Arten wie *Daphnia galeata* weichen den Fischen zwar auch ein Stück weit aus. Vor allem aber nutzen sie noch eine andere Überlebensstrategie: Sie vermehren sich sehr schnell – und sie beginnen damit umso früher und intensiver, je mehr das Wasser nach Fisch riecht.

Sandra Lass, *The Scent of Danger. Chemical Signalling and Inducible Defences in a Predator-Prey System*. Diss. ETH Zürich, 2001.

Warum wird ausgerechnet mit Wasserflöhen so viel geforscht? – Sind Daphnien bessere «Umweltindikatoren» als zum Beispiel Algen oder Fische?

Als wichtige Algenkonsumenten und als Fischfutter haben Daphnien eine zentrale Position in aquatischen Ökosystemen und erlauben deshalb Rückschlüsse auf die Gewässerökologie. Daneben hat die Beliebtheit von Daphnien in der Forschung praktische Gründe. Daphnien vermehren sich viel schneller als Fische und sind einfacher zu halten. Und weil sie sich ungeschlechtlich fortpflanzen, kann man mit Klonen arbeiten, die alle dieselben Erbeigenschaften haben; so lassen sich in Experimenten genetische Unterschiede als Ursache für unterschiedliche Reaktionen auf bestimmte Umwelteinflüsse schon einmal ausschliessen. In der Ökotoxikologie ist *Daphnia magna* zum «Labor-Haustier» geworden und ist deshalb DER Testorganismus für neue Stoffe. Das heisst allerdings nicht, dass Stoffe, mit denen *Daphnia magna* gut fertig wird, für die Umwelt unbedenklich sind. *Daphnia magna*, ursprünglich eine typische Art aus kleinen Teichen, ist sehr viel robuster als die Daphnien-Arten, die in unseren Seen vorkommen. So kann man sie zum Beispiel problemlos in Leitungswasser halten, während *Daphnia longispina* und *Daphnia galeata* das viele Kupfer im Leitungswasser überhaupt nicht vertragen. Zudem reicht es nicht, die Auswirkungen eines Stoffs – oder einer Kombination verschiedener Stoffe – nur an einer Art zu testen. So reichern unterschiedliche Arten die Stoffe, die sie resorbieren, in unterschiedlichen Organen an, wie eine Anfang 2014 publizierte Eawag-Studie zu den Auswirkungen von Pestiziden auf Wasserschnecken und Kleinkrebse zeigt.

Markus Möst zeigt in seiner Dissertation, die er kürzlich an Ihrer Abteilung geschrieben hat, dass bei einer sehr hohen Dosis organischer Mikro-Verunreinigungen im Wasser zum einen mehr Daphnien aus den Ephippien schlüpfen und damit auch weniger «Reserve»-Ephippien für folgende Jahre übrig bleiben, und dass zum andern mehr junge Daphnien sterben. Wie beunruhigend sind diese Ergebnisse?

Wir wollten zunächst einmal abklären, ob solche Stoffe überhaupt einen Einfluss auf die «Ei-Banken» der Daphnien haben können, und haben deshalb mit Konzentrationen gearbeitet, die 10 000 mal über denen in den Schweizer Seen lagen. Im Sediment liegen diese Ephippien ja viele Jahren bis Jahrzehnte in Gegenwart dieser Chemikalien, in unserem Versuch nur einige Tage. Dass Auswirkungen zu beobachten waren, zeigt, dass es mehr Forschung in

diese Richtung braucht. Ob auch tiefere Konzentrationen über längere Zeit Auswirkungen haben, können wir aufgrund unserer Versuche noch nicht sagen, das wäre reine Spekulation.

Wie wirken Mikroverunreinigungen, und was tut die Eawag in diesem Bereich?

Zu den Auswirkungen gibt es vor allem viele offene Fragen. In Studien mit einzelnen Stoffen und einzelnen Organismen können Effekte nachgewiesen werden. Aber es sind massenhaft unterschiedliche Stoffe in Umlauf, die in verschiedensten Kombinationen ins Wasser gelangen. Weil man darüber nur sehr wenig weiss, hat die Eawag das interdisziplinäre «EcolImpact»-Forschungsprogramm gestartet. Zudem hat das Bundesamt für Umwelt Bafu eine Untersuchung von Mikroverunreinigungen in Auftrag gegeben. Und die Eawag unterstützt Abwasserreinigungsanlagen, die im Sinne einer verantwortungsvollen Vorsorge so nachgerüstet werden, dass die Mikroverunreinigungen mit Ozon oder Kohle besser aus dem Abwasser entfernen können. Unsere Daphnien sind aber nur am Rande an EcolImpact beteiligt

Welche Daphnien-Fragen werden gegenwärtig erforscht?

Christoph Tellenbach hat mit Justyna Wolinska, die heute in Berlin arbeitet, vor allem die Koevolution von Daphnien und einem Darmparasiten untersucht. Er hat im Greifensee beobachtet, dass die höchsten Infektionsraten der Daphnien während zehn Jahren immer mit Blaualgenblüten zusammenfielen. Der Befund von Beobachtungen im Feld, dass Blaualgenfutter Daphnien anfälliger für diesen Darmparasiten macht, wurde ausserdem in Fütterungsversuchen im Labor nachgewiesen.

Nachdem wir durch die Sache mit den Parasiten auf die ökologischen Zusammenhänge von Daphnien und Blaualgen gekommen waren, haben wir im Greifensee eine Methode entwickelt, wie wir mit Hilfe von DNA aus Seesedimenten Algenblüten rekonstruieren können, um so Aussagen über die Entwicklung der Wasserqualität zu machen. Diese Methode verwenden wir gegenwärtig in einem Projekt, das mit Kohäsionsgeldern finanziert wird, für die Untersuchung der Wasserqualität von Seen auf dem Donaudelta in Rumänien.

Ein weiteres Thema ist die Aufarbeitung der historischen Sammlungen von Daphnien-Proben aus dem Greifensee, die seit den 1970er Jahren in Formalin

aufbewahrt werden, und von bis zu hundertjährigen Plankton-Trockenpräparaten vom Vierwaldstättersee. Mit den neuen genetischen Untersuchungsmethoden könnten diese alten Sammlungen wieder für aktuelle Forschungsfragen genutzt werden.

Und schliesslich wollen wir das Genom der *Daphnia galeata* entschlüsseln – eine Arbeit, die an der Basis vieler zukünftiger Projekte stehen wird.

Daphnien und Klimawandel

Markus Möst zeigt in einem Kapitel seiner Dissertation über Daphnien in Gletschenseen im Himalaya, dass die dort lebende *Daphnia dentifera* zum Schutz vor hoher UV-Strahlung entweder auf konstant tiefes Wasser angewiesen ist, in dem sie tagsüber abtauchen kann, oder auf Wassertrübung durch die «Gletschermilch». Beide Schutzmechanismen drohen durch den Klimawandel und den raschen Rückzug der Gletscher verloren zu gehen.

Dass solche Resultate aus dem Himalaya und nicht aus Schweizer Bergseen kommen, ist kein Zufall. Denn in der Schweiz wurden schon im Mittelalter Bergseen mit Fischen besetzt – gut dokumentiert ist etwa das Wirken des Klosters Engelberg. Heute gibt es in der Schweiz kaum mehr einen See, in dem Daphnien, aber keine Fische leben. Und so kann man hier auch nicht herausfinden, welche Verhaltensweisen der Daphnien vom Klima abhängen. Denn viel stärker als von der UV-Strahlung wird das Verhalten der Wasserflöhe von den Fischen beeinflusst.

Markus Möst, *Environmental change and its impact on hybridising Daphnia species complexes*, Diss. ETH Zürich, 2013.

Wann ist eine Art eine «Art»?

Früher galt in der Biologie die Definition, zwei Organismen gehörten dann zu unterschiedlichen Arten, wenn ihre Kreuzung zu keinen fruchtbaren Nachkommen führt – also wie bei Kühen und Pferden, die gar keine gemeinsamen Nachkommen zeugen können, oder wie bei Pferden und Eseln, die nur unfruchtbare Nachkommen haben. In der Praxis liess sich das allerdings für wild lebende Tiere und Pflanzen kaum überprüfen, so dass das herkömmliche System der Arten faktisch auf morphologischen Unterschieden beruht – auf Unterschieden der Formen und der damit verbundenen unterschiedlichen Funktionen. Als Erbgutuntersuchungen möglich wurden, die sich schon von der Methode her besser für das Aufspüren von Verwandtschaften eignen, stellten manche Biologen das Artkonzept grundsätzlich in Frage und gingen zeitweise von einem genetischen Kontinuum aus, das die Menschen eher willkürlich in separate Einheiten einteilen. Heute werden verschiedene Artkonzepte nebeneinander verwendet. In der Evolutionsbiologie, die in den letzten Jahren Erkenntnisse und Methoden der Genetik, Ökologie und Entwicklungsbiologie integriert hat, spricht man von unterschiedlichen Arten, wenn die betreffenden Organismen durch «Reproduktionsbarrieren» getrennt sind. Diese Barrieren müssen nicht unüberwindlich sein. Sie können im Erbgut, in der Ökologie oder im Verhalten angelegt sein oder sich auch gegenseitig verstärken. So können zum Beispiel in zwei Populationen, die sich durch die Anpassung an unterschiedliche ökologische Nischen immer weiter auseinander entwickeln, aus Gründen der Anpassung oder aus Zufall zwei unterschiedliche Farbschläge entstehen, die das Verhalten bei der Partnerwahl beeinflussen, was wiederum die Separierung der beiden Bestände verstärkt. Dieses Konzept lenkt den Blick der Forschenden auf die Evolutionsprozesse. Sie untersuchen, wie zu unterschiedlichen Zeiten eine Vielzahl genetischer Prozesse, Umweltbedingungen und Verhaltensweisen am Erbgut einer Art mitgebaut haben. Solche Untersuchungen zeigen, wie bei jeder Artbildung ein Genom (Gesamtheit des Erbgutes) mit seiner eigenen Geschichte und einer einzigartigen «Architektur» entstanden ist. Und sie zeigt, warum Arten nicht austauschbar sind: Geht eine dieser Arten verloren, ist der Verlust endgültig, weil sich Geschichte nicht wiederholen lässt.



Piet Spaak birgt einen Sedimentkern aus dem Greifensee. (Foto: Eawag, zvg)

Piet Spaak ist durch sein Interesse für Genetik zu seinem Dissertationsthema gekommen, der Untersuchung von Hybridschwärmen, die aus unterschiedlichen Daphnien-Arten im holländischen Tjeukemeer entstanden sind. Nach Forschungs- und Lehraufträgen unter anderem am Max-Planck-Institut für Limnologie in Plön und an der ETH Zürich wurde er 1999 an das Schweizerische Wasserforschungsinstitut Eawag in Dübendorf berufen, wo er heute die Abteilung Gewässerökologie leitet. Piet Spaaks erste Begegnung mit Daphnien war Zufall; heute meint er allerdings, es sei unmöglich, länger mit diesen Tieren zu arbeiten, ohne vom «Daphnien-Virus» befallen zu werden.

Anmerkungen

- (1) P. Vonlanthen, D. Bittner, A.G. Hudson, K.A. Young, R. Müller, B. Lundsgaard-Hansen, D. Roy, S. Di Piazza, C.R. Largiader, O. Seehausen: Eutrophication causes speciation reversal in whitefish adaptive radiations, in: *Nature*, Vol. 483, Seiten 357–362, 16. Februar 2012.
- (2) Nach Fritz Funk, Fische und Fischerei im Brienzer- und Thunersee, im Jahrbuch vom Thuner- und Brienzersee 1968, Seite 66 (nach den Fangstatistiken der Berufsfischer).
- (3) Rellstab C, Keller B, Girardclos S, Anselmetti FS, Spaak P (2011) Anthropogenic eutrophication shapes the past and present taxonomic composition of hybridizing *Daphnia* in unproductive lakes. *Limnology and Oceanography* 56, 292–302. Zusammenfassung: Brienzersee – Ein Ökosystem unter der Lupe, 2006 herausgegeben von der Bau-Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern, als pdf verfügbar unter [www.bve.be.ch>Wasser>Gewässerqualität>Seen>Brienzersee](http://www.bve.be.ch/Wasser/Gewässerqualität/Seen/Brienzersee).
- (4) Rellstab C (2008) *Life at low food – Population dynamics and genetic structure of Daphnia in ultra-oligotrophic Lake Brienz* PhD, ETH.