

# Infotag 2016

**Seenforschung –  
aktuelle Einblicke in ein  
bedeutendes Ökosystem**



# Infotag 2016

## **Seenforschung – aktuelle Einblicke in ein bedeutendes Ökosystem**

Seen haben eine bedeutende Rolle in der Schweiz, nicht nur als vielfältiges Ökosystem, sondern auch als Basis für Wirtschaft und Erholung. Am Vierwaldstättersee hat die Naturforschende Gesellschaft Luzern (NGL) vor 100 Jahren das Hydrobiologische Laboratorium gegründet. Die Seenforschung und der Gewässerschutz sollten dort vorangetrieben werden. Heute betreibt das Wasserforschungsinstitut Eawag an diesem Standort Forschung in den Bereichen Ökologie, Biodiversität, Verschmutzung und Nutzung von Seen. Der Infotag gibt einen Einblick in die aktuelle Seenforschung und wagt einen Ausblick auf wichtige zukünftige Entwicklungen.

# Programm

## Moderatoren

Dr. Philine Feulner, Abteilung Fischökologie und Evolution, Eawag  
Werner Göggel, Abteilungsleiter Gewässer, Kanton Luzern

<b>9.30</b>	<b>Begrüssung</b> Prof. Dr. Janet Hering, Direktorin der Eawag	
	<b>Grussworte</b> Erwin Leupi, Präsident der Naturforschenden Gesellschaft Luzern	
<b>9.55–10.15</b>	<b>Projet Lac – Fischgesellschaften in voralpinen Seen</b> Prof. Dr. Ole Seehausen, Abteilung Fischökologie und Evolution, Eawag	<b>04</b>
<b>10.15–10.35</b>	<b>Die Invasion der Zebra- und Quaggamuscheln in die Schweiz</b> Dr. Lukas De Ventura, ehemals Eawag, Fachstelle Oberflächengewässer, Kanton Aargau	<b>05</b>
<b>10.35–11.10</b>	<b>Kaffeepause</b>	
<b>11.10–11.20</b>	<b>Intermezzo zum 100-Jahr-Jubiläum des Hydrobiologischen Labors</b>	
<b>11.25–11.45</b>	<b>Sedimente – Archive für Wechselwirkungen zwischen Mensch und Umwelt</b> Dr. Nathalie Dubois, Abteilung Oberflächengewässer, Eawag	<b>06</b>
<b>11.45–12.05</b>	<b>Antibiotikaresistenzen in Abwasser und Gewässern</b> Dr. Helmut Bürgmann, Abteilung Oberflächengewässer, Eawag	<b>07</b>
<b>12.05–12.15</b>	<b>Diskussion</b>	
<b>12.15–13.30</b>	<b>Mittagessen</b>	
<b>13.30–13.45</b>	<b>Intermezzo zum 100-Jahr-Jubiläum des Hydrobiologischen Labors</b>	
<b>13.50–14.10</b>	<b>Heizen und Kühlen mit Energie aus Seen</b> Prof. Dr. Alfred Wüest, Abteilung Oberflächengewässer, Eawag	<b>08</b>
<b>14.10–14.30</b>	<b>Methan im Kivu-See</b> Dr. Martin Schmid, Abteilung Oberflächengewässer, Eawag	<b>09</b>
<b>14.30–14.50</b>	<b>Seeforellen und ihre fischereiliche Nutzung</b> Dr. Jakob Brodersen, Abteilung Fischökologie und Evolution, Eawag	<b>10</b>
<b>14.50–15.15</b>	<b>Kaffeepause</b>	
<b>15.15–15.35</b>	<b>Fernerkundung von Inlandgewässern – ein Einblick von oben</b> Prof. Dr. Michael Schaeppman, Geographisches Institut, Universität Zürich	<b>11</b>
<b>15.35–15.55</b>	<b>Revitalisierung an Seen – Grundlagen zum Vollzug</b> Dr. Gregor Thomas, Abteilung Wasser, Bundesamt für Umwelt	<b>12</b>
<b>15.55–16.10</b>	<b>Seenforschung vor neuen Herausforderungen</b> Prof. Dr. Bernhard Wehrli, Abteilung Oberflächengewässer, Eawag	<b>13</b>
<b>16.10–16.40</b>	<b>Schlussdiskussion und Fazit</b>	
	<b>Apéro</b>	



## Projet Lac – Fischgesellschaften in voralpinen Seen

Um die Biodiversität in den Schweizer Seen zu erhalten oder aufzuwerten, braucht es eine Bestandaufnahme der Arten. Eine Inventur der Fischfauna zeigt, dass sich die tiefen voralpinen Seen je nach Grösse, Nährstoffgehalt und Grad der ehemaligen Verschmutzung in ihrer Biodiversität unterscheiden.

Nährstoffe, exotische Arten und die Klimaerwärmung veränderten die Alpenrandseen in den letzten Jahrzehnten massiv. Viele der endemischen Fischarten gerieten unter Druck oder starben aus. Ein Ökosystemmanagement, das den Biodiversitätszielen der Schweiz und der Uno nachkommen möchte, bedarf quantitativer, standardisiert erhobener Daten über die Zusammensetzung biologischer Artengemeinschaften. Solche Daten gab es für die Fische der grossen und tiefen Alpenrandseen der Schweiz bislang nicht – trotz ihrer Bedeutung für den Naturschutz, die Fischerei und die Erholung.

Die Eawag startete deshalb zusammen mit dem Bundesamt für Umwelt und der Universität Bern 2010 das Projet Lac mit dem Ziel, solche Daten für möglichst viele Seen zu erheben. Die Daten sollten die Vielfalt der Fische, die Situation der endemischen und bedrohten Arten und wichtige Trends für das Fischereimanagement erfassen. Im Naturhistorischen Museum Bern wurde eine Sammlung konservierter Fische aus allen Seen angelegt, die künftig als Grundlage für vergleichende Untersuchungen dient. Zwischen 2010 und 2015 beprobten wir 17 Schweizer, mehrere norditalienische und französische Seen über mehrere Tage mit verschiedenen Methoden. Mehr als 50 000 Fische wurden taxonomisch identifiziert, über 25 000 fotografisch dokumentiert, mehr als 7000 in die Sammlung aufgenommen. Von mehr als 10 000 Fischen nahmen wir Gewebeproben für genetische und ökologische Untersuchungen. Für alle Arten in allen Seen erhoben wir Häufigkeit, Grössenverteilung und Biomasse und präsentierten die Daten für die Seen jeweils in einem detaillierten Bericht.

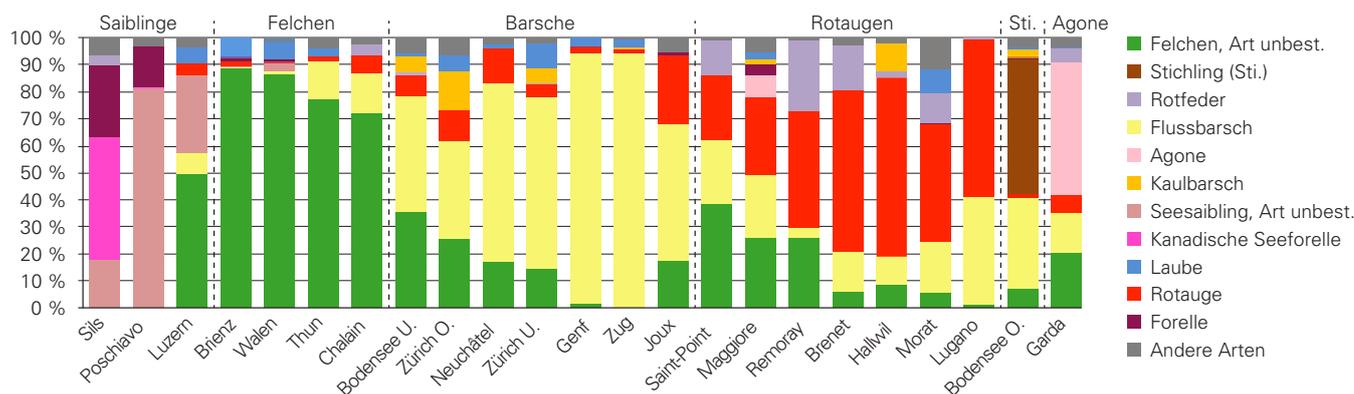
### Ausgestorben geglaubte Art wiederentdeckt

Mehr als 70 Fischarten konnten wir bei den Untersuchungen nachweisen – zwischen 6 und 35 Arten pro See. In Bezug auf Artenzusammensetzung, Häufigkeit und Biomasse unterscheiden sich die Seen je nach Grösse, Nährstoffgehalt und Grad der ehemaligen

Verschmutzung (siehe Abbildung). Felchen überwiegen bis in die grössten Tiefen, aber nur in den saubersten Seen. Barsche und Karpfenfische dominieren die heute oder in Vergangenheit nährstoffreicheren Seen. In den Flachwasserzonen der meisten Seen dominieren weit verbreitete Karpfen- und Barschartige. Dagegen kommen viele Arten der Tiefwasserzonen nur in einzelnen Seen vor, wo sie im Laufe der Evolution durch Anpassung an die extremen Lebensräume entstanden sind. Hier handelt es sich vor allem um Felchen und Saiblinge, die auf die erste Besiedlung nach der Eiszeit zurückgehen. Diese Arten finden im Flachwasser und in den Flüssen der Schweiz heute keine geeigneten Lebensbedingungen mehr. Nährstoffreiche Seen haben oft eine hohe Fischbiomasse im flachen Wasser, bieten aufgrund mangelnden Sauerstoffs aber keine Lebensgrundlage für Fische im tiefen Wasser. Die meisten dieser Seen haben ihre ehemaligen Tiefwasserfischarten verloren. Dank der gezielten Beprobung an ehemaligen Standorten konnten wir mehrere Exemplare des ausgestorben geglaubten Tiefwasser-saiblings des Bodensees (*Salvelinus profundus*) wiederentdecken. Im Tiefenwasser der am wenigsten von Nährstoffeinträgen betroffenen Seen fanden wir unbekannt Ökotypen und möglicherweise mehrere neue Arten von Felchen, Saiblingen und Gropfen. Diese untersuchen wir nun über die nächsten Jahre mit genomischen und morphologischen Methoden.

### Der Mensch hat die Fischgesellschaften massiv verändert

Bereits jetzt zeigt sich, dass menschliche Einflüsse die Fischgesellschaften der Alpenrandseen massiv verändert haben. Wechselwirkungen zwischen veränderten Nährstoffgehalten und der veränderten Sauerstoffversorgung, dem Verlust endemischer Arten und der Einwanderung exotischer Arten prägen derzeit die Struktur und Funktion dieser Ökosysteme. Die meisten Seen, die einmal mit Nährstoffen angereichert wurden, haben endemische Tiefwasserfischarten verloren. Gleichzeitig scheinen diese Seen besonders zahlreich von exotischen Flach- und Warmwasserarten besiedelt zu werden. Damit kommt es in den Schweizer Seen zu einer Homogenisierung der Biodiversität und der Ökosysteme. Eine Herausforderung für die Zukunft wird es sein, den Einfluss dieser Veränderungen auf die Funktion der Ökosysteme zu erforschen.



Kleinere Seen in höheren Lagen werden von Saiblingen dominiert, während in nährstoffarmen tiefen Voralpenseen vor allem Felchen vorkommen. In Seen, die mit Nährstoffen angereichert sind oder es bis vor kurzem waren, überwiegen Barsche, Karpfenartige oder Stichlinge.



## Die Invasion der Zebra- und Quaggamuscheln in die Schweiz

Überlandtransporte von Freizeitbooten können die invasiven Zebra- und Quaggamuscheln in alle schiffbaren Gewässer der Schweiz verbreiten. Eine vorgängige Reinigung der Boote würde dies verhindern. Für die Früherkennung und Überwachung invasiver Arten braucht es zudem verlässliche Nachweismethoden. Mit einem neuen Verfahren lassen sich die beiden Muschelarten anhand von Wasserproben identifizieren.

Eine vielfältige Artengemeinschaft in unseren Gewässern gewährleistet, dass wir saubere Seen und Flüsse geniessen können und sauberes Trinkwasser zur Verfügung haben. Invasive Arten sind oft eine Bedrohung für diese Lebensgemeinschaften. Um Massnahmen gegen die Verbreitung und die negativen Auswirkungen invasiver Arten zu planen, ist es wichtig, diese frühzeitig zu entdecken und deren Verbreitungswege zu kennen.

### Pro Jahr rund 700 riskante Bootstransporte

Die aus dem Schwarzen Meer stammende Zebra- oder Wandermuschel (*Dreissena polymorpha*) wächst in der Schweiz seit den 1960er-Jahren in vielen Gewässern, auf Bootsrümpfen, Steinen, Hafenumauern, aber auch in Trinkwasseraufbereitungsanlagen und sogar auf einheimischen Muscheln. Sie verursacht hohe Unterhaltskosten und ökologische Schäden, weil sich durch ihre Anwesenheit die Artzusammensetzung verändert. Die Quaggamuschel (*Dreissena rostriformis bugensis*) ist eine nahe Verwandte der Zebra- oder Wandermuschel mit ebenfalls grossem Schadenspotenzial. Die Art hat bereits den Rhein bis Basel und den Bodensee besiedelt, und es ist zu erwarten, dass sie sich weiter ausbreitet.

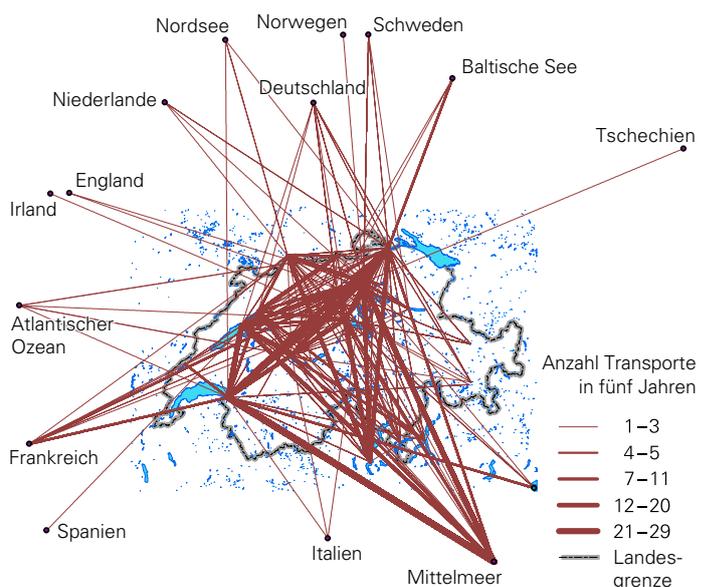
In den letzten zehn Jahren wurde oft beobachtet, dass sich gebietsfremde Tierarten sprunghaft von einem See zum nächsten ausbreiten, meistens ausgehend von den grossen Grenzseen. Im Rahmen einer Eawag-Studie haben wir untersucht, welche Rolle der Transport von Freizeitbooten bei der Ausbreitung der Zebra- und Quaggamuschel in Schweizer Gewässern spielt. Wir interviewten Bootsbesitzer zum beobachteten Muschelbewuchs an ihren Booten, zu ihren Gewohnheiten beim Bootstransport und der Bootsreinigung. Mithilfe von neun kantonalen Schiffsverkehrsämtern verschickten wir über 10 000 Fragebogen an zufällig ausgewählte Bootsbesitzer, wovon 3561 den Fragebogen beantworteten. Zudem bestimmten wir in fünf Häfen die Dichte des Muschelbewuchses an Booten.

Über 40 Prozent der Boote mit ganzjährigem oder saisonalem Wasserplatz waren mit Muscheln bewachsen. Von diesen wurden rund 5 Prozent über Land transportiert und lagen dabei weniger als zwei Tage trocken. Bei ihnen besteht ein Risiko, dass anhaftende Muscheln lebend von einem Gewässer in ein anderes transportiert werden. Eine Hochrechnung ergab, dass es in der Schweiz jährlich zirka 800 Überlandtransporte solcher Hochrisikoboote gibt. Am häufigsten werden die Boote zwischen den grösseren Seen transportiert (siehe Abbildung). Es ist daher wahrscheinlich, dass diese Seen als Drehscheibe für die Verbreitung der Muscheln dienen.

Die Umfrage veranschaulichte, dass die Bootsbesitzer eine hohe Bereitschaft zeigen, die Muscheln vor einem Transport vom Boot zu entfernen. Kosten und Aufwand schätzten sie als eher gering ein, den Nutzen dagegen als hoch. Allerdings scheint nur die Hälfte der Bootsbesitzer über effektive Reinigungsmethoden wie zum Beispiel Hochdruckreiniger zu verfügen. Bootsbesitzer sollten daher besser über das Vorgehen bei der Bootsreinigung instruiert werden. Die Bereitstellung geeigneter Reinigungsanlagen würde den Reinigungserfolg zudem stark verbessern. Mithilfe dieser Resultate werden nun Massnahmen gegen die weitere Verbreitung von gebietsfremden Arten geplant.

### Quaggamuschel erstmals in der Schweiz nachgewiesen

Beim Management invasiver Arten sind wirkungsvolle Werkzeuge für die Früherkennung und Überwachung notwendig. In einer anderen Studie testete die Eawag eine neue Methode, um Zebra- und Quaggamuscheln in Gewässern nachzuweisen. Dabei werden Wasserproben filtriert und die sogenannte Umwelt-DNA (eDNA) aus dem Filtrerrückstand extrahiert. Die Identifizierung und Quantifizierung der Muschelarten erfolgt mithilfe der Polymerase-Kettenreaktion (PCR) und der quantifizierbaren PCR (qPCR). Mit dieser Methode konnten wir die Quaggamuschel im Rheinhafen Kleinhüningen in Basel erstmals in der Schweiz nachweisen. Die Tests zeigen, dass die Methode die beiden Muschelarten zuverlässig und kostengünstig erkennt und deren Biomassen dank dem qPCR quantifizieren kann. Die Ergebnisse sollen helfen, das Ausbreitungspotenzial der beiden Muschelarten abzuschätzen und zu quantifizieren.



Anzahl Bootstransporte von Schweizer Bootsbesitzern innerhalb von fünf Jahren (Daten aus neun Kantonen mittels Fragebogen erhoben). Häufiger benutzte Transportrouten sind mit dickeren Linien dargestellt. Die Daten zeigen, dass praktische alle schiffbaren Gewässer in der Schweiz durch Überlandtransport von Freizeitbooten miteinander verbunden sind.



## Sedimente – Archive für Wechselwirkungen zwischen Mensch und Umwelt

Seit der Mensch sesshaft ist, verändert er die Landschaft. Schon vor Tausenden von Jahren führten Entwaldung und Bodenbearbeitung zu Erosion und zur Auswaschung von Nährstoffen. Die frühen menschlichen Aktivitäten beeinflussten auch Flüsse und Seen, was heute mithilfe von Sedimentarchiven zurückverfolgt werden kann. Sie zeigen, dass die Überdüngung von Gewässern nicht erst mit der Industrialisierung auftrat.

Der Einfluss der Menschen auf die Ökosysteme begann vor Tausenden von Jahren mit der Entwicklung der ersten landwirtschaftlichen Gemeinschaften und Siedlungen. Man geht davon aus, dass der Mensch seither zwischen einem Drittel und der Hälfte der Erdoberfläche verändert hat. Die Rodung von Wald für die Feld- und Viehwirtschaft hat weitreichende Konsequenzen für den Boden und führt zu einem Anstieg der Bodenerosion und Nährstoffauswaschung.

In der heutigen Zeit wird mehr fruchtbarer Boden abgetragen als neu gebildet werden kann, was eine ernsthafte Bedrohung für unsere Zukunft darstellt. Mit dem Wirtschaftswachstum der Nachkriegsjahre hat sich ein Zustand der «Great Acceleration» eingestellt: Die sozioökonomische Entwicklung und die Belastung der Umwelt schreiten seither ungebremst voran. Der Mensch hat sich zum Haupteinflussfaktor für das System Erde entwickelt. Der Zustand der Erde hat sich deutlich destabilisiert.

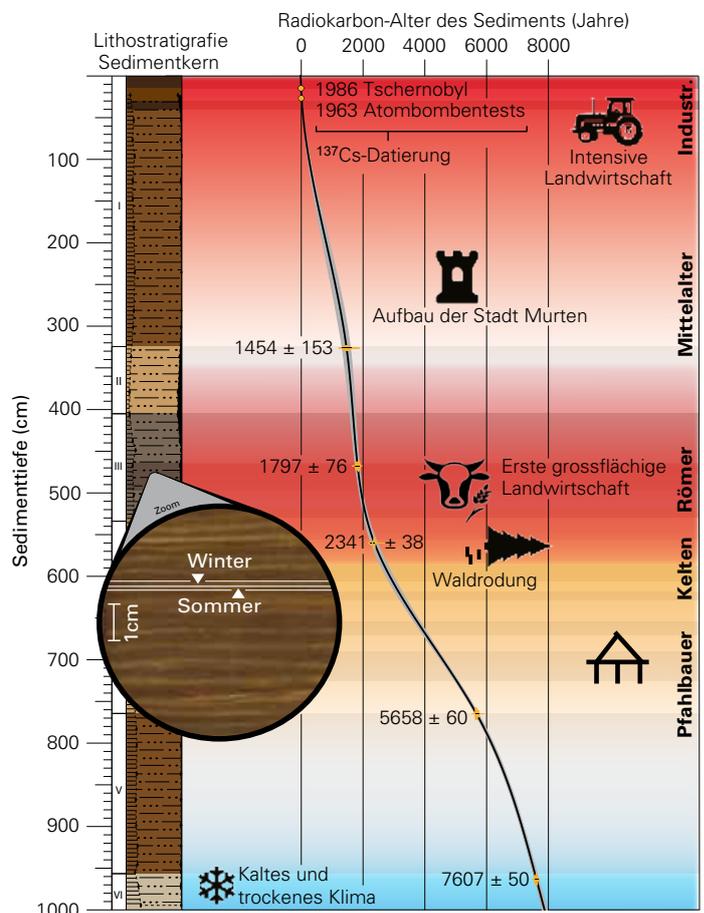
### Seesedimente: Geschichtsbücher über die Umwelt

Seeablagerungen gewähren einen Blick in die Vergangenheit und ermöglichen es, heutige Veränderungen der Erde in einem grösseren Zusammenhang zu sehen. Seesedimente bilden hochaufgelöste terrestrische Archive. Sie zeichnen Jahr für Jahr die vorherrschenden Umweltbedingungen im Einzugsgebiet der Seen auf und eignen sich hervorragend, um die Auswirkungen des Menschen auf die Umwelt zu erforschen. So gewähren zum Beispiel Untersuchungen an einem zehn Meter langen Sedimentkern aus dem Murtensee Einblicke in die Geschichte der Region.

Im Drei-Seen-Land wird seit über 2000 Jahren intensiv Landwirtschaft betrieben. Pfahlbauer, keltische Stämme und die Römer haben rund um den Murtensee, aber auch im See selber ihre Spuren hinterlassen. Für die Zeit um 100 v. Chr ist ein rasanter Wechsel der Landnutzung in den Sedimenten zu erkennen. Innert kurzer Zeit wurden grosse Mengen an Bodenmaterial in den See gespült und lagerten sich als auffällige Jahresschichten (Warven) ab. Mit dem Bodenmaterial gelangten grosse Mengen an Nährstoffen in den See und führten zu dessen Eutrophierung. Zu dieser Zeit rodeten die Römer rund um den See grossflächig den Wald, um Platz für ihre Siedlungen und Felder zu schaffen. Im Süden des Murtensees errichteten sie das antike Aventicum, die Hauptstadt der römischen Schweiz. Mit dem Untergang des Römischen Reiches und dem Einsetzen eines kälteren Klimas lies die Eutrophierung nach.

### Verschmutzungen sind ein wiederkehrendes Problem

Erst im Zuge der Industrialisierung stieg die Wasserverschmutzung im Murtensee und in vielen anderen Schweizer Gewässern wieder an. Bis ins 20. Jahrhundert wurde das Abwasser aus Siedlungen und Industrie ungeklärt in nahe Bäche, Flüsse und Seen geleitet. Die Folgen waren verheerend: Das übermässige Düngen der Felder in Kombination mit ungereinigtem Abwasser führte zur Eutrophierung zahlreicher Seen. Algen begannen zu wachsen und entzogen dem Tiefenwasser den Sauerstoff. Die Spuren der Industrialisierung sind in zahlreichen Seesedimenten – vom Lac de Joux bis zum Walensee – zu entdecken. So finden sich zum Beispiel hohe Bleikonzentrationen in den Sedimenten des Walensees, für die sehr wahrscheinlich die im 19. Jahrhundert boomende Textilindustrie entlang der Linth im Glarnerland verantwortlich ist. Schwermetalle lagerten sich aber nicht nur in den industrienahen Seen ab, sondern lassen sich auch in entfernten Gewässern nachweisen. Die Verfrachtung von Feinstaub durch den Wind spielte dabei eine zentrale Rolle. In den 1960er-Jahren wurden die ersten Kläranlagen in Betrieb genommen, was sich auch in einer Abnahme der Verschmutzungen in den Sedimenten zeigt.



Der Mensch hat im Lauf der Zeit in den Sedimenten des Murtensees verschiedene Spuren hinterlassen. Mithilfe von Sedimentkernen lässt sich die Besiedlungsgeschichte der Region und ihre Auswirkungen auf die Umwelt rekonstruieren.



## Antibiotikaresistenzen in Abwasser und Gewässern

Die zunehmende Ausbreitung von antibiotikaresistenten Erregern bereitet weltweit Sorge. Die wichtigste Ursache für das Problem liegt im Gebrauch und Missbrauch von Antibiotika in der Human- und Veterinärmedizin. Doch es gibt auch eine Umweltkomponente: Mit menschlichen und tierischen Ausscheidungen gelangen resistente Bakterien ins Abwasser und schliesslich auch in Seen und Flüsse.

Zahlreiche Studien zeigen, dass konventionelle Abwasserreinigungsanlagen (ARA) nicht alle resistenten Bakterien aus dem Abwasser entfernen können. Das gilt ebenso für die Rückstände der Antibiotika selbst. Somit gelangen auch mit dem gereinigten Abwasser noch grössere Mengen von resistenten Bakterien und Antibiotikarückständen in die Gewässer. Die Eawag erforscht, auf welchen Wegen dies geschieht und wie sich Bakterien und Antibiotika in der Umwelt verhalten. Weiter befasst sich unsere Forschung mit Möglichkeiten, die Ausbreitung von Resistenzen über das Wasser einzuschränken.

### Abwasserreinigungsanlagen – Barriere oder Hotspot?

In ARA treffen resistente Fäkalkeime auf eine Vielzahl von Bakterien aus der biologischen Abwasserreinigung und auf einen Cocktail von Antibiotikarückständen und anderen Schadstoffen. Unter solchen Bedingungen können Resistenzgene auf bisher antibiotikasensitive Arten oder auf Umweltbakterien übertragen werden. Es liegt daher nahe, in den ARA einen Hotspot für die Ausbreitung und Neuentwicklung von Resistenzen zu vermuten.

Unsere Forschung zeigt, dass ARA in der Schweiz grundsätzlich gute Barrieren gegen Antibiotikaresistenzen darstellen. 90 bis 99 Prozent der resistenten Bakterien werden während der Reinigung entfernt. Dennoch sind solche Keime im gereinigten Abwasser noch immer viel häufiger als in den Oberflächengewässern, in welche die ARA einleiten. Es fanden sich ausserdem Hinweise, dass resistente und multiresistente Bakterien in den ARA unter bestimmten Umständen bessere Überlebenschancen haben als nicht resistente Keime. Dies scheint von der Konzentration der Antibiotika im Abwasser abzuhängen. Es kann also in den ARA tatsächlich zu einer Evolution der Resistenzen kommen.

### Breiten sich Resistenzen in der Umwelt aus?

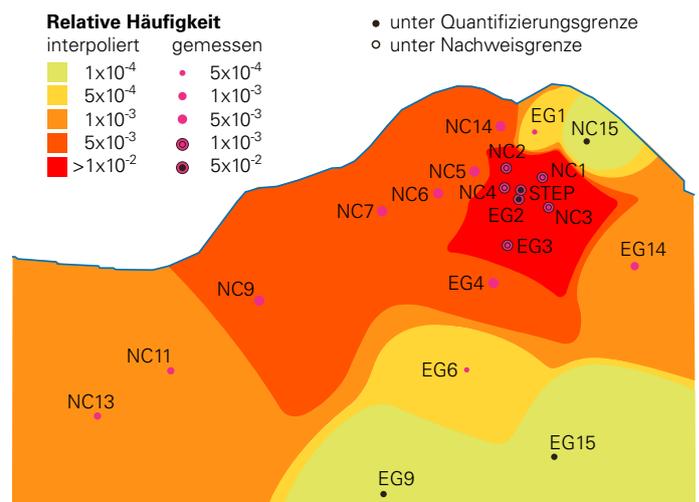
Unsere Forschung zeigt, dass die mit dem Abwasser eingebrachten resistenten Bakterien auch in der Umwelt nachweisbar sind. Zum Beispiel führt die Einleitung von Abwasser in den Genfersee zu stark erhöhten Vorkommen von Resistenzgenen im Seesediment, die sich über Hunderte von Metern nachweisen lassen (siehe Abbildung). Auch in Fließgewässern führt die Einleitung von gereinigtem Abwasser zu einem Anstieg der Resistenzen. Vergleicht man Seen in der Schweiz untereinander, so zeigt sich der Einfluss der Kläranlagen bezüglich Resistenzen auch im grösseren Massstab. Somit steht fest, dass es selbst unter den vergleichsweise guten Bedingungen in der Schweiz eine vom Menschen verursachte Belastung der Gewässer mit Antibiotikaresistenzen gibt.

### Die Wirksamkeit zusätzlicher Reinigungsstufen

In der Schweiz wird derzeit in einen Ausbau der ARA investiert, mit dem Ziel, Mikroverunreinigungen zu entfernen, zum Beispiel durch den Einsatz von Ozonung oder Pulveraktivkohle-Adsorption. Die Eawag hat untersucht, ob diese Technologien auch bei der Entfernung von Antibiotikaresistenzen erfolgreich sind. Die Ergebnisse sind zwiespältig. Die Ozonung vernichtet zwar Antibiotika und reduziert die Zahl der resistenten Bakterien deutlich, jedoch nicht vollständig. Zudem wachsen während der biologischen Nachbehandlung des ozonierten Abwassers (die für die Entfernung potenziell toxischer Zwischenprodukte der Ozonung unabdingbar ist) wiederum resistente Bakterien. Die Pulveraktivkohle hat per se keinen Einfluss auf die Bakterien, kann aber in Kombination mit einer Ultrafiltration ein vielversprechendes Verfahren sein, um sowohl Antibiotika als auch Resistenzen zu entfernen.

### Schlussfolgerungen

Antibiotikaresistenzen gelangen mit dem Abwasser in unsere Gewässer. Das unmittelbare Gesundheitsrisiko dieser Kontamination ist in der Schweiz sicher noch sehr gering. Dennoch muss man davon ausgehen, dass die Einleitung von Resistenzen und ihre Verbreitung in der Umwelt langfristig zur Zunahme resistenter Keime beiträgt. Im Sinne des Vorsorgeprinzips sollten deshalb die Möglichkeiten, die der beschlossene Ausbau der ARA bietet, genutzt werden, um die Einleitung von Antibiotikaresistenzen in unsere Gewässer zu minimieren.



Relative Häufigkeit eines Gens für Sulfonamidresistenz (sul1) im Sediment des Genfersees vor der Stadt Lausanne. Die Ausbreitung rund um die Einleitungsstelle (STEP) ist deutlich sichtbar.



## Heizen und Kühlen mit Energie aus Seen

Die grossen Seen der Schweiz werden im Winter nur selten kühler als vier bis fünf Grad Celsius und sind in dieser Jahreszeit meistens wärmer als die Luft. Sie stellen deshalb ein fast unerschöpfliches Wärmereservoir dar, das zunehmend von Anrainern genutzt wird. Berücksichtigt man die wichtigsten Vorgaben, lassen sich ökologische Nachteile weitestgehend vermeiden.

Kühlt man einen Kubikmeter Wasser um ein Grad Celsius ab, so lassen sich rund vier Megajoule an Wärmeenergie gewinnen. Bedenkt man, dass die grossen Seen der Schweiz viele Dutzend Milliarden Kubikmeter Wasser enthalten, so wird offensichtlich, dass aus unseren Seen im Winterhalbjahr viele Terawattstunden an Wärme gewonnen werden könnten (1 Wattstunde = 3600 Joule). Diese Idee und die technischen Möglichkeiten für die Realisierung bestehen seit der Erfindung der Kälte- und Wärmemaschinen. Bereits 1938 wurde zum Beispiel eine elektrisch betriebene Flusswärmepumpe in Betrieb genommen, die Wärme aus der Limmat ins Rathaus von Zürich förderte. Seither wurden jedoch nur wenige Projekte realisiert, vor allem wegen der tiefen Erdölpreise. Das zurzeit grosse Interesse an der Nutzung von Gewässern zu Heiz- und Kühlzwecken ist motiviert durch den politischen Willen, den Verbrauch an fossiler Energie zu reduzieren.

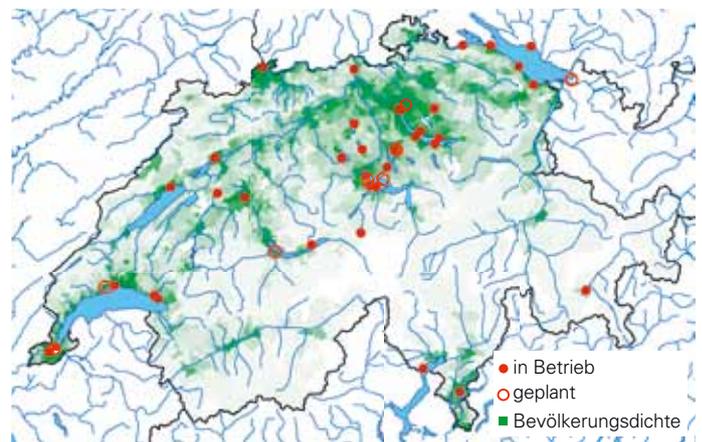
### Geringe Auswirkungen auf den Bodensee

Nutzt man Seewasser zum Heizen (im Winter) oder Kühlen (im Sommer), so wird durch die Wasserrückgabe die Temperatur im betreffenden Gewässer verändert. Die von den Umweltbehörden akzeptierte Änderung (zum Beispiel 0,5 Grad Celsius) setzt der Nutzung klare Grenzen und macht die Planung einfach. Neben der absoluten Temperatur ändern sich in Seen – je nach Design der Nutzung – jedoch auch die Temperaturprofile und somit die Dichteschichtung. Dies wiederum kann die Länge der Sommerstagnation und die Intensität der winterlichen Tiefenmischung verändern. Weil solche Veränderungen die biologische Produktion, den Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser und somit die Sedimentqualität beeinflussen können, war es uns wichtig, mittels einer detaillierten Studie zum Bodensee solche sekundären Einflüsse zu quantifizieren. Dabei zeigte sich, dass bei einer Nutzung in der Grössenordnung von einem Gigawatt – was in etwa dem Bedarf einer Million Anwohner entspricht – die ökologischen Effekte akzeptabel gering ausfallen. Die Verschiebung der jahreszeitlichen Dynamik der Schichtung beträgt nur wenige Tage, die winterliche Mischung greift nicht weniger tief und die Oberflächentemperatur wird nicht mehr als um 0,2 Grad Celsius verändert. Wir gehen davon aus, dass bei solch geringen Verschiebungen keine wichtigen biologischen Veränderungen eintreten.

### Gestiegenes Interesse seit der Energiewende

Mit den Zielen einer nachhaltigen Energieversorgung und einer Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses wird die Nutzung von Wärme oder Kälte aus Seen zunehmend attraktiv. In der Schweiz stammt noch immer der überwiegende Anteil der Energie für das Heizen von Ge-

bäuden aus nicht erneuerbaren fossilen Energieträgern. Da sich gerade an den grössten Schweizer Flüssen und Seen auch grössere Ortschaften befinden (zum Beispiel am Genfer-, Boden-, Neuenburger-, Vierwaldstätter-, Zürich-, Thuner-, Zuger- oder Bielersee), liegt die Nutzung des riesigen Wärmepotenzials der tiefen Seen am Alpenrand auf der Hand. Zwar sind die bis jetzt genutzten Wärmemengen noch klein und beschränken sich auf wenige grosse Anlagen, etwa für den Campus der ETH Lausanne und der Universität Lausanne, den Uno-Komplex in Genf, Stadtteile von Zürich oder das Fernwärmenetz CAD La Tour-de-Peilz im Kanton Waadt (siehe Abbildung). Doch neue, grössere Projekte sind derzeit in diversen Städten, beispielsweise in Genf, Luzern, Zug und Zürich, in Planung oder werden auf ihre Machbarkeit untersucht.



Die derzeit wichtigsten Anlagen zum Wärmen oder Kühlen mit Seewasser in der Schweiz.



## Methan im Kivu-See

Der Kivu-See in Ostafrika ist der einzige See weltweit, aus dem Methan zur Stromerzeugung gewonnen wird. Damit vermindert man zugleich die Gefahr, dass grosse Mengen des Gases aus dem See entweichen. Forschende der Eawag helfen mit, dass das einzigartige Ökosystem des Kivu-Sees nicht unter der Methangewinnung leidet.

Im Januar 2002 brach der Vulkan Nyiragongo im Norden des Kivu-Sees aus. Die flüssige Lava floss durch die Stadt Goma, zerstörte einen grossen Teil der Infrastruktur und forderte zahlreiche Todesopfer. Vulkanologen waren beunruhigt, dass alles noch viel schlimmer würde. Denn die Lava strömte auch in den Kivu-See. Dieser ist etwa 480 Meter tief und mit einer Fläche von 2370 Quadratkilometern etwa so gross wie die Kantone Luzern und Schwyz zusammen. In seinem Tiefenwasser sind enorme Mengen von Kohlendioxid und Methan gelöst, die auf seine Oberfläche verteilt eine mehr als 100 Meter hohe Gasschicht bilden würden. Sollten diese Gase aus dem See entweichen, wie es im Jahr 1986 beim viel kleineren Nyos-See in Kamerun geschehen war, würde dies zu einer Naturkatastrophe unvorstellbaren Ausmasses führen. Eine Notfallexpedition mit Beteiligung der Eawag untersuchte deshalb die Auswirkungen des Vulkanausbruchs auf den See und konnte Entwarnung geben. Die Messungen zeigten, dass der Lavastrom die gasreichen tiefen Schichten des Sees nicht erreichte und die Temperaturen und die Schichtung im See nur geringfügig beeinflusste.

### Stromproduktion als Prävention

Der Vulkanausbruch brachte aber die Gefahren, die mit den im Kivu-See gelösten Gasen verbunden sind, ins öffentliche Bewusstsein. Weitere Messungen offenbarten, dass die Methankonzentrationen im See seit den letzten Beobachtungen in den 1970er-Jahren deutlich zugenommen hatten und damit das Risiko für einen Gasausbruch angestiegen war. Die Lösung des Problems lag auf der Hand: Bereits seit den 1950er-Jahren existierten Pläne, das Methangas zur Stromproduktion aus dem See zu gewinnen. Sie wurden abgesehen von einer kleinen Anlage einer lokalen Brauerei aber nie verwirklicht.

Zur Methangewinnung wird das Wasser aus der Tiefe des Sees an die Oberfläche gebracht, wo sich das Gas vom Wasser trennt. Das Methan wird gereinigt und anschliessend verstromt. Eine neue Pilotanlage nahm im Januar 2009 den Betrieb auf. Die erste grössere Anlage produziert seit Anfang 2016 rund 25 Megawatt elektrischen Strom. In den nächsten Jahrzehnten wollen Ruanda und die Demokratische Republik Kongo, auf deren Gebiet der Kivu-See liegt, diese Leistung auf mehrere hundert Megawatt ausbauen. Damit lässt sich die Gaskonzentration im See auf ein ungefährliches Niveau senken.

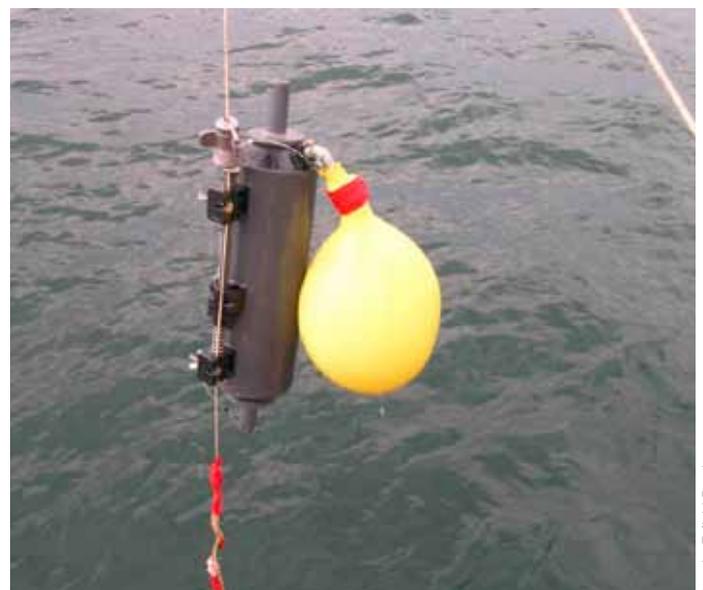
### Entgastes Wasser genügend tief in den See zurückleiten

Es stellt sich allerdings die Frage, wie die Methangewinnung den See beeinflusst. Forschende der Eawag haben seit 2002 zahlreiche Aspekte dazu untersucht. Die wichtigsten Ergebnisse lassen

sich wie folgt zusammenfassen: Grundwasserquellen erzeugen die besonders stabile Schichtung, die es ermöglicht hat, dass sich die Gase über rund 1000 Jahre im Tiefenwasser anreichern konnten. Das Methan im See entsteht zu einem grossen Teil aus dem biologischen Abbau von organischem Material im sauerstofffreien Tiefenwasser wie in einem riesigen Biogasreaktor. Messungen in den Sedimentablagerungen deuten darauf hin, dass im See vor langer Zeit auch schon Gasausbrüche stattgefunden haben. Nährstoffe werden vor allem durch internes Recycling (und nicht wie bei vielen anderen Seen mit den Zuflüssen aus dem Einzugsgebiet) vom Tiefenwasser ins Oberflächenwasser eingetragen, wo sie für das Algenwachstum verantwortlich sind.

Die aufgrund dieser Beobachtungen durchgeführten Modellrechnungen zeigen, wie sich der See unter verschiedenen Annahmen für die Methangewinnung verändern würde. Die wichtigste Erkenntnis ist, dass das entgaste Wasser genügend tief in den See zurückgeleitet werden muss. Sonst gelangen zu viele Nährstoffe in das Oberflächenwasser und können dort zu unerwünschten Algenblüten und zu Fischsterben führen. Zudem würde langfristig die Schichtung im See zu stark verändert.

Diese Befunde wurden bei der Planung der neuen Anlage berücksichtigt, womit die Methangewinnung und Entgasung des Sees ohne grössere ökologische Risiken möglich sein sollte. Ein kontinuierliches Monitoring der Auswirkungen der Methangewinnung ist aber dennoch unabdingbar, um zu überprüfen, ob die Veränderungen im See den Erwartungen aus den Modellrechnungen entsprechen. Die Eawag unterstützt das lokale Monitoring-Team bei der Auswertung ihrer Beobachtungen.



Um die Gaskonzentration in den Tiefen des Kivu-Sees zu messen, braucht es spezielle Schöpfpflöschchen. Die aus dem Wasser austretenden Gase blasen den Ballon auf.



## Seeforellen und ihre fischereiliche Nutzung

Seeforellen wandern zwischen ihren Laichgewässern und den Seen. Verschiedene Populationen weisen aber grosse Unterschiede in ihrem Lebenszyklus auf. So unterscheiden sich der Anteil wandernder Individuen und der Zeitpunkt der Wanderung zwischen den Populationen. Ein nachhaltiges Bestandsmanagement sollte dies berücksichtigen.

Seen und Flüsse sind Lebensräume, die von der Forschung und beim Bestandsmanagement von Fischen meist separat behandelt werden. Arten, die zwischen diesen Lebensräumen wandern, erfordern jedoch eine integrative Perspektive. Diese Betrachtungsweise umfasst beide Lebensräume sowie deren gegenseitigen Einflüsse. Die Seeforelle, die in der Schweiz bei Freizeit- und Berufsfischern einen hohen Stellenwert hat, ist eine solche wandernde Art. Ihre Bewirtschaftung ist zusätzlich anspruchsvoll, da sich verschiedene Populationen im Wanderverhalten unterscheiden. Diese Unterschiede betreffen sowohl den Anfang als auch die Dauer der Wanderung. Sie können schon auf engem Raum, im Extremfall sogar bei benachbarten Bächen, auftreten. Forschende der Eawag überwachen die Wanderungen verschiedener Seeforellenpopulationen zwischen Bächen und dem Vierwaldstättersee, um diesen Unterschieden auf die Spur zu kommen.

### Nicht alle wandern und nicht alle zur gleichen Zeit

Seit 2015 haben wir in Zuflüssen des Vierwaldstättersees mehr als 5000 Forellen mit kleinen Mikrochips (sogenannten PIT-Marken) markiert. Haustierhaltern sind diese Chips bekannt. Sie werden seit einiger Zeit zur Markierung von Hunden, Katzen und anderen Tieren verwendet. Jeder Chip hat einen individuellen Zahlencode. Wenn ein markierter Fisch durch eine Antennenstation schwimmt, wird der Code ausgelesen und auf einem Datenlogger gespeichert. Die Antennenstationen sind jeweils in den Bachmündungen platziert, sodass die Fische diese auf dem Weg in den See passieren müssen. So ist es möglich, verschiedene Daten über jeden einzelnen Fisch aufzuzeichnen. Man sieht zum Beispiel, ob ein Fisch überhaupt wandert, wann die Wanderung anfängt und wann er zurückkommt. Die Bauweise der Antennenstationen erlaubt es auch, die Wanderrichtung, also ob ein Fisch Richtung See oder Bach schwimmt, zu erfassen. Obwohl die Methode schon länger bekannt ist, wurden unseres Wissens noch nie so viele Populationen gleichzeitig untersucht. Damit können die Daten auch statistisch ausgewertet werden.

Schon nach einem Jahr Projektdauer zeigt sich, dass sich die Jungforellen von verschiedenen Zuflüssen in ihrem Wanderverhalten stark unterscheiden. So ist der Anteil wandernder Forellen in den verschiedenen Populationen verschieden hoch: In einigen Bächen wandert nur ein kleiner Teil der Jungforellen in den See, in anderen ist der Anteil sehr hoch und kann sogar über 50 Prozent betragen. Die meisten Jungforellen wandern im Frühjahr. Der genaue Zeitpunkt der Wanderung hängt aber ebenfalls von der Population ab und kann um mehr als zwei Monate differieren. Wenn man bedenkt, wie schnell Jungforellen im See wachsen, könnte dies die

Grösse eines Fisches entscheidend beeinflussen. Kleine Jungforellen wandern innerhalb eines Baches später als grössere. Aufgrund der unterschiedlichen Wanderzeitpunkte der Populationen, kann es dennoch vorkommen, dass ein kleiner Fisch aus einem «frühen» Bach früher im See ist als ein grosser Fisch aus einem «späten» Bach. Erwachsene Seeforellen schwimmen in der Regel in den Zufluss zurück, in dem sie geboren wurden und aufgewachsen sind. Die durchschnittliche Grösse der zurückwandernden Seeforellen unterscheidet sich stark zwischen verschiedenen Bächen.

### Die Fischerei sollte die Unterschiede berücksichtigen

Insbesondere die letzten Beobachtungen könnten für die fischereiliche Bewirtschaftung wichtig sein. So muss man davon ausgehen, dass nicht der See die Lebensbedingungen der Seeforellenpopulationen bestimmt. Entscheidend sind vielmehr die Bäche und Flüsse, aus denen die Fische stammen. Verschiedene Populationen können grosse Unterschiede in ihrem Lebenszyklus aufweisen, auch wenn sie letztendlich alle in denselben See schwimmen. Massnahmen für den Schutz der Seeforellen, zum Beispiel die Festlegung des Fangmindestmasses für die Fischerei, müssen diese Unterschiede berücksichtigen, um eine nachhaltige Nutzung dieser wertvollen Fische langfristig zu gewährleisten.



Philippe Dermond, Sergio di Michelangelo

Forschende vermessen eine aufsteigende Seeforelle. Zusätzlich zur Markierung fotografieren, messen und wägen sie den Fisch. Für genetische und chemische Untersuchungen entnehmen sie kleine Gewebeproben aus den Flossen, Muskeln und Schuppen.



## Fernerkundung von Inlandgewässern – ein Einblick von oben

Anhand von flugzeuggestützter und satellitenbasierter Fernerkundung können wir heute die globale Ausbreitung und Qualität von Oberflächengewässern erfassen und deren Änderungen verfolgen. Dieses Wissen erlaubt es, kohärente Aussagen über Ökosystemleistungen zu machen und globale Zielsetzungen wie zum Beispiel das Erreichen der Aichi-Biodiversitätsziele zu überwachen.

Die Erde gilt auch als Planet des Wassers, verfügt sie doch über 14 108 Kubikkilometer von diesem. Das Wasser ist zum grössten Teil in den Ozeanen als Salzwasser vorhanden (97,5 Prozent) oder im Eis der Antarktis und der Arktis als Süsswasser gebunden. In Seen und Flüssen befindet sich nur ein geringer Anteil der globalen Menge, nämlich 0,007 bzw. 0,003 Prozent. Gerade dieses Wasser ist aber für eine Vielzahl von Ökosystemleistungen essenziell. Seine Wichtigkeit reicht dabei weit über den direkten Nutzen für die Trinkwasserversorgung oder Erholung hinaus. Wasser beeinflusst auch den Tourismus, das regionale Klima, die biochemischen Kreisläufe, Stofftransporte usw. Kenntnisse über die verfügbare Menge, die Eigenschaften und die Qualität dieses Wassers sind von grosser Bedeutung, um Ökosystemleistungen abschätzen und deren Änderungen vorhersagen zu können.

### Satelliten ermöglichen globale Kartierung von Seen

Die bis heute inventarisierten 117 Millionen Seen bedecken flächenmässig weltweit ungefähr 3,7 Prozent der nicht vergletscherten Landoberfläche. Davon sind zirka 5 Millionen Seen nördlich von 60 Grad nördlicher Breite sowie südlich von 56 Grad südlicher Breite noch nicht genauer beschrieben. Dies liegt einerseits an fehlenden (Mess-)Daten aus diesen eher dünn besiedelten Gebieten und andererseits an den grossen Ausbreitungsschwankungen der Seen in Regionen mit vorherrschendem Permafrost. Die Kenntnis der Häufigkeit, Verteilung und Grösse von Seen ist besonders für die bessere Quantifizierung von globalen biogeochemischen Kreisläufen und für die Klimaforschung sehr wichtig.

Eine globale Limnologie, das heisst die Quantifizierung der Funktionen, Strukturen sowie Stoff- und Energiehaushalte von Seen, ist erst mit dem Aufkommen moderner Satelliten möglich geworden. Diese sind heute in der Lage, Gewässer dank hoher räumlicher und spektraler Auflösung weltweit zu erfassen. So erlaubt es die hohe räumliche Auflösung (wir sprechen dabei von Bildelementen mit einer Grösse von 3 bis 10 Metern aufgenommen aus 800 Kilometern Entfernung) mittlerweile, Seen nicht nur in ihrer Grösse und Ausbreitung zu kartieren, sondern auch deren Wasserqualität zu erfassen.

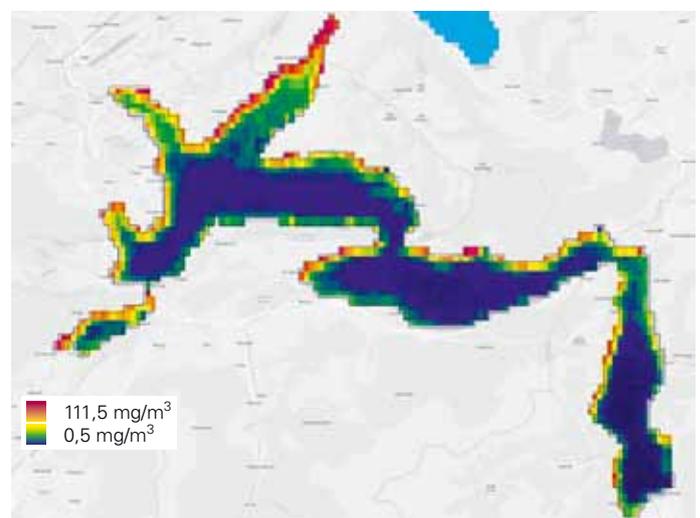
### Inhaltsstoffe und Topografie bestimmen

Aufnahmen, die das Spektrum weit über das sichtbare Licht hinaus nutzen, erlauben es, die Absorptionseigenschaften von Wasser genauer zu bestimmen. Damit lassen sich die Gehalte an Schwebestoffen, Chlorophyll oder Gelbstoff im Wasser herleiten. Die offensichtlichen optischen Eigenschaften von Wasser, insbe-

sondere die Reflexion von Licht, können Satelliten besonders gut messen. Will man jedoch auf die Inhaltsstoffe im Wasser schliessen, müssen auch die inhärenten optischen Eigenschaften bekannt sein. Das sind vor allem die Absorption und die Streuung, die direkt von den Inhaltsstoffen und deren Verteilung abhängig sind. Zusätzlich liefern Satelliten heute auch Informationen über Oberflächentemperaturen von Gewässern. Durch die Kombination von Modellen und physikalischen Messmethoden lassen sich anhand von Satellitendaten die relevanten Parameter im Wasser bestimmen. Weiter können flugzeuggestützte Instrumente mittels Lasern auch bathymetrische Messungen zur Erfassung der Unterwassertopografie durchführen.

### Fernerkundung unterstützt Entscheidungsfindung

Heute besteht seitens verschiedener internationaler Organisationen ein grosses Bedürfnis, die globale Verbreitung von Oberflächengewässern sowie deren Qualität gut zu kennen und zu überwachen. Die Fernerkundung ermöglicht eine kohärente und globale Erfassung dieser Gewässer. Damit lassen sich Ökosystemleistungen besser quantifizieren und Zusammenhänge besser verstehen. Dies wird Entscheidungsfindungen zum Thema Wasser massgeblich beeinflussen und international besser koordinieren.



Mittlere Konzentration von Chlorophyll a im Vierwaldstättersee erhoben mithilfe von Satellitendaten (2003–2011).

Daten von Diversity II (<http://www.diversity2.info/products/inlandwaters>).



## Revitalisierung an Seen – Grundlagen zum Vollzug

Das revidierte Gewässerschutzgesetz verpflichtet die Kantone zur Revitalisierung ihrer Seen. Bis 2022 müssen sie eine strategische Planung einreichen. Der Bund erarbeitet zurzeit entsprechende Planungsgrundlagen. So wird eine Methode zur Bewertung der Ökomorphologie von Seeufern und eine Vollzugshilfe entwickelt. Diese sollen bis Herbst 2016 beziehungsweise Anfang 2017 vorliegen.

Die Revision des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) im Jahr 2011 verpflichtet die Kantone dazu, ihre Gewässer zu revitalisieren. Sie sollen entsprechende Planungen durchführen und Umsetzungsfristen definieren (Art. 38a GSchG). Dies betrifft neben den Fließgewässern auch stehende Gewässer. Die Gewässerschutzverordnung (GSchV) konkretisiert die Anforderungen. So erläutert beispielsweise Artikel 41d die Vorgaben für die Planung von Revitalisierungen. Die Frist zur Einreichung einer strategischen Planung für Revitalisierungen an Seen hat der Bund von 2018 auf 2022 verschoben. Für die Seen werden derzeit die Planungsgrundlagen erarbeitet. Dies betrifft zum einen die Methode zur Bewertung der Ökomorphologie von Seeufern, zum anderen eine Vollzugshilfe für die strategische Planung.

### 1700 Seen in der Schweiz

In der Schweiz gibt es rund 1700 Seen mit einer Fläche von 0,5 Hektaren oder grösser. Darunter fallen neben den natürlichen Seen auch die künstlichen Seen wie zum Beispiel die Stauseen zur Wasserkraftnutzung in den Alpen. 83 Prozent aller Seen sind Kleinseen mit weniger als 5 Hektaren Fläche. Knapp 300 der Gewässer sind somit mittelgrosse und grosse Seen mit einer Fläche von mehr als 5 Hektaren. Die gesamte Uferlänge aller Schweizer Seen über 0,5 Hektaren entspricht rund 3100 Kilometer. Verglichen mit den verzeichneten 65 000 Kilometern Fließgewässer (gemäss Vektordatensatz Vektor25), entspricht die Uferlänge der Seen knapp 5 Prozent der Gesamtlänge der Flüsse und Bäche.

### Beurteilung des ökomorphologischen Zustands

Für die morphologische Bewertung von Seen lag bislang noch keine standardisierte Methode vor. Anders als bei der Erhebungsmethode «Ökomorphologie Fließgewässer» basiert die neu erarbeitete Methode Seen (Publikation Herbst 2016) nicht auf einer Bewertung vor Ort, sondern auf Luftbildaufnahmen (Schrägluft- und Aufsicht). Der Betrachtungsperimeter erstreckt sich beidseitig der Uferlinie: Landseitig wird die Uferzone bewertet; diese setzt sich aus dem Uferstreifen und dem Hinterlandstreifen zusammen. Seeseitig wird die Flachwasserzone bis zur sichtbaren Haldenkante bewertet. Ebenfalls beurteilt wird die Uferlinie (siehe Abbildung).

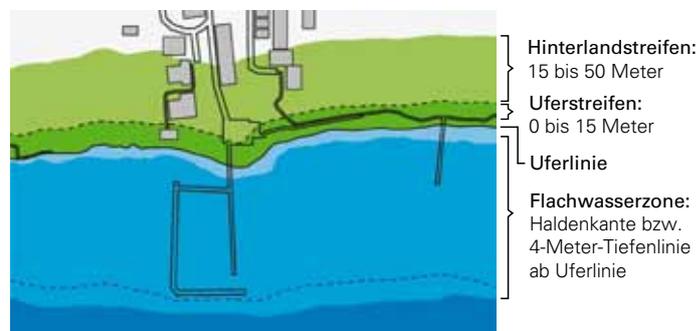
Jeder dieser vier genannten Bereiche wird mittels einer Auflistung der möglichen Ausprägungen und einer dazugehörigen fünfstufigen Bewertung (blau = natürlich bis rot = künstlich) klassifiziert. Jeder Bewertungsstufe ist dabei ein Zahlenwert zugeordnet. Teilweise fließen für die Bewertung einer Zone mehrere Unterbewertungen zusammen. Über verschiedene Aggregationsschritte werden die

einzelnen Bewertungen zusammengezogen. Dies kann für die vier Bereiche separat erfolgen oder in einer Gesamtbewertung resultieren. Die Aggregationsform variiert zwischen den einzelnen Berechnungsschritten und wurde von einer Expertenrunde optimiert.

### Vollzugshilfe «Strategische Planung Seen»

Die Kantone sind aufgefordert bis 2022 ihre strategischen Planungen zu stehenden Gewässern beim Bund einzureichen. Bereits ein Jahr zuvor ist ein Entwurf zur Stellungnahme vorzulegen. Die Planungen sind eine wichtige Grundlage, um den Subventionsbeitrag des Bundes für Revitalisierungsprojekte zu bestimmen. Um zu gewährleisten, dass die Planungen den gesetzlichen Anforderungen genügen, erarbeitet der Bund gemeinsam mit den Kantonen eine Vollzugshilfe. Die Arbeiten daran wurden, unterstützt von einer Begleitgruppe aus privaten Büros und Kantonsvertretern, im ersten Quartal 2016 aufgenommen. Da der Prozess noch im Gang ist, kann hier nur die grobe Stossrichtung vorgestellt werden.

Den Kantonen wird empfohlen, in der Planung möglichst all jene mittelgrossen und grossen Seen zu berücksichtigen, die keine ausgeprägten Pegelschwankungen aufweisen. Im Aufbau und Ablauf soll die Vollzugshilfe für Seen mit jener für Fließgewässer vergleichbar sein, also ein zweistufiges Vorgehen aus vorgeschalteter Geodaten-Analyse und anschliessender Plausibilisierung durch die kantonalen Fachstellen beinhalten. In der Geodaten-Analyse sollen die Ökomorphologie, Anlagen in der Ufer- und Flachwasserzone und Faktoren, die das ökologische Potenzial beeinflussen, miteinander verschnitten werden. Mit der Planung werden die Abschnitte mit hohem ökologischen Nutzen ausgewiesen (subventionsrelevant) und Massnahmen für die kommenden 20 Jahre definiert. Die Planungen sind alle 12 Jahre zu erneuern. Die Vollzugshilfe wird voraussichtlich Anfang 2017 verfügbar sein.



Betrachtungsperimeter der neu entwickelten Methode «Ökomorphologie Seeufer», bei der die vier Bereiche einzeln bewertet, aber auch zu einer Gesamtbewertung zusammengeführt werden können (Entwurf aus dem Methodenhandbuch).



## Seenforschung vor neuen Herausforderungen

In den letzten hundert Jahren hat sich die Seenforschung disziplinübergreifend weiterentwickelt. Heute stehen die Fachleute vor der Aufgabe, den Interessenausgleich zwischen dem Gewässerschutz und den verschiedenen Nutzern zu unterstützen. Dabei gilt es, einen kritischen Dialog über Nutzungsansprüche und deren Verwirklichung zu pflegen.

Der Luzerner Mittelschullehrer Hans Bachmann hatte vor über hundert Jahren einen Traum und er reichte diesen als konkretes Projekt beim Departement des Innern in Bern ein. Am Vierwaldstättersee sollte eine «Eidgenössische Station für Fischerei- und Gewässerkunde» entstehen mit einem dreistöckigen Gebäude und einem Betriebsbudget von 51 000 Schweizer Franken. Der Traum ging 1916 in bescheidenerem Rahmen in Erfüllung, als dank einer Schenkung ein kleines hydrobiologisches Labor mit eigenem Boot in Kastanienbaum seinen Betrieb aufnahm. Heute ist der Eawag-Standort in Kastanienbaum ein nationales und internationales Kompetenzzentrum mit etwa 80 Mitarbeitenden.

### Wissenschaftliche Quantensprünge in der Seenforschung

Die Seenforschung hat in den letzten Jahrzehnten durch einige wissenschaftliche Quantensprünge wichtige Impulse erhalten. So können wir heute durch räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Messungen einem See wesentlich präziser den Puls fühlen. Dank Fernerkundung beobachten wir sogar alle grösseren Seen der Welt mit der gleichen Methode. Die Synthese von chemischen, physikalischen und biologischen Daten mit numerischen Modellen erlaubt es, die Reaktion eines Sees auf externe Störungen detailgetreu vorherzusagen. Mit Isotopen-Methoden können wir den Weg von Substanzen und Schadstoffen durch die Nahrungsnetze verfolgen. Neuerdings ermöglichen molekulargenetische Analysen, sowohl die Evolution von Arten als auch Trends bei der Artenvielfalt mit grosser Präzision zu verfolgen. Neben all diesen disziplinären Fortschritten hat sich die Seenforschung die Fähigkeit zur interdisziplinären Zusammenarbeit bewahrt, um komplexe Probleme anpacken zu können.

### Verschiedene, sich teilweise zuwiderlaufende Nutzungsansprüche

Die verschiedenen Nutzungsansprüche an unsere Seen führen zu teilweise widersprüchlichen Anforderungen. Gewisse Berufsfischer möchten zum Beispiel den Rückgang ihrer Fangerträge mit einer Steuerung der Phosphateinträge kompensieren. Ein hoher Fischertrag steht aber im Widerspruch zur Forderung nach glasklarem Badewasser mit möglichst grosser Sichttiefe.

Seen speichern im Winter grosse Wärmemengen, die wir im Sinne einer neuen Energiestrategie nutzen könnten. Gleichzeitig gibt es Pläne, Seen als unterliegende Reservoirs für alpine Pumpspeicherkraftwerke zu nutzen. Langfristige Temperaturmessungen zeigen, dass sich die Seen als Folge des Klimawandels erwärmen. Offensichtlich brauchen wir für die Seen in Zukunft Leitlinien für Eingriffe in den Wärmehaushalt.

### Die unterschiedlichen Interessen berücksichtigen

Die beiden Themen «Phosphatmanagement» und «Wärmehaushalt» haben ein paar Gemeinsamkeiten und illustrieren, welche Entwicklungen für einen rationalen Gewässerschutz notwendig sind.

Die Nutzung von Ökosystemen benötigt einen Interessenausgleich, der mit einer breiten Perspektive alle involvierten Sektoren im Blickfeld hat. Zum Beispiel sind viele der grossen Alpenrandseen gleichzeitig auch Trinkwasserreservoirs, Magnete für den Tourismus und für Freizeitaktivitäten. Jede Nutzung eines Gewässers muss zudem den Erhalt von dessen wichtigsten Funktionen und der Biodiversität sicherstellen.

Wenn wir eine breite Perspektive einnehmen, dann dürfen wir es als Erfolg werten, dass die mittlere Phosphatkonzentration vieler Seen aufgrund von Massnahmen zur Reduktion des Nährstoffeintrags inzwischen wieder naturnahe Werte erreicht hat. Die Sichttiefen haben sich verbessert und die Trinkwassernutzung ist heute sicherer. Dank der Begrenzung der Phosphateinträge haben die nährstoffarmen Voralpenseen ihre grosse Diversität an Fischarten bis heute erhalten. Die Datenlage legitimiert zudem keine wissenschaftlich begründete Phosphatzufuhr zur Steigerung der Felchen-Erträge.

Durch den Klimawandel erwärmen sich die Seen weltweit und die Stabilität ihrer Schichtung nimmt zu – mit zum Teil problematischen Folgen für den Stoffhaushalt und die Lebensbedingungen für die Wasserorganismen. Gleichzeitig entwickeln wir Technologien zur Nutzung der Seen als Wärmespeicher und Quelle von Kühlwasser. Wiederum kann nicht eine Nutzung, zum Beispiel die Energienutzung, allein im Fokus stehen, sondern wir müssen Leitlinien für Eingriffe in den Wärmehaushalt der Seen entwickeln, welche die Ökosystemfunktionen erhalten und weitere Nutzungsziele nicht ernsthaft tangieren. Die Seenforschung wird auch in Zukunft das ganze System im Blickfeld behalten.



Getty Images

Der Vierwaldstättersee gilt als Touristenmagnet. Seit hundert Jahren wirkt er auch als Kristallisationspunkt der Seenforschung.



Die Eawag ist das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs. Rund 500 Mitarbeitende sind an den Standorten Dübendorf bei Zürich und Kastanienbaum bei Luzern tätig. Neben ihrem Engagement in der Forschung wirkt die Eawag auch in Lehre und Beratung und schlägt damit eine Brücke zwischen Wissenschaft und Praxis. [www.eawag.ch](http://www.eawag.ch)

Impressum

Redaktion: Andres Jordi

Grafik und Layout: Peter Penicka

Eawag, Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf

Telefon +41 (0)58 765 55 11, Fax +41 (0)58 765 50 68

Eawag, Seestrasse 79, 6047 Kastanienbaum

Telefon +41 (0)58 765 21 11, Fax +41 (0)58 765 21 68

[www.eawag.ch](http://www.eawag.ch)

Eawag  
Überlandstrasse 133  
8600 Dübendorf  
Telefon +41 (0)58 765 55 11  
Fax +41 (0)58 765 50 28  
[www.eawag.ch](http://www.eawag.ch)  
[info@eawag.ch](mailto:info@eawag.ch)

