

# MIKROVERUNREINIGUNGEN IM ZUGERSEE

## ÜBERPRÜFUNG EINES REGIONALEN ENTWÄSSERUNGS- KONZEPTS MITHILFE EINER SPURENSTOFFBILANZIERUNG

Um den Zugersee vor der zunehmenden Eutrophierung zu bewahren, wurden in den 1970er-Jahren sämtliche in den See einleitenden Kläranlagen aufgehoben und das Abwasser über eine Ringleitung auf die zentrale ARA Schönau in Cham geleitet. Dieses System trägt aktuell viel zum Schutz des Zugersees vor Mikroverunreinigungen bei. Mit einer aktiven Bewirtschaftung der vorhandenen Speichervolumen bei Regen, kann der Stoffeintrag über Mischwasserentlastungen minimiert werden.

Christian Götz\*, Envilab AG  
Bernd Kobler, GVRZ

### RÉSUMÉ

#### MICROPOLLUANTS DANS LE LAC DE ZOUG – CONTRÔLE D'UN CONCEPT D'ÉVACUATION AVEC BILAN DES MICROPOLLUANTS

Afin de protéger le lac de Zoug de l'eutrophisation accrue, toutes les stations d'épuration qui déversent dans le lac ont été supprimées dans les années soixante-dix et les eaux usées ont été acheminées le long d'un circuit vers la STEP Schönau à Cham. Ce système contribue aujourd'hui grandement à la protection du lac de Zoug contre les micropolluants. Une exploitation active des volumes de stockage existants en cas de pluie permet de minimiser l'apport de substances dû aux décharges des eaux mixtes. Un bilan des substances sur l'ensemble du bassin versant montre que le développement de la STEP Schönau a permis de réduire nettement la charge des micropolluants qui parviennent dans les eaux. Cela permet également de soulager de manière sensible la Lorze, seul cours d'eau qui, d'après les études actuelles, présente des concentrations de micropolluants critiques du point de vue écotoxicologique. Concernant le lac de Zoug, il ne faut pas perdre de vue les apports de substances issus de l'agriculture. Si les concentrations actuelles respectent les critères de qualité, elles ont toutefois, en raison du temps de séjour prolongé dans les eaux et de l'exploitation agricole intensive des surfaces dans le bassin versant, nettement augmenté par rapport aux autres lacs suisses.

### EINLEITUNG

Der erste signifikante Anstieg der Nährstoffbelastung des Zugersees geht bis ins 19. Jahrhundert zurück. Durch Industrialisierung und Tourismus stieg der Phosphorgehalt um 1850 auf rund 0,04 mg/l, was bereits einem eutrophen (nährstoffreichen) See entsprach. Mit dem Bevölkerungswachstum und durch Einträge aus der Landwirtschaft nahm die Belastung des Zugersees weiter zu und erreichte um 1980 mit 0,2 mg-P/l ein Maximum [1]. Um den Eintrag von Nährstoffen aus der Siedlungsentwässerung nachhaltig zu reduzieren, wurde 1977 mit dem Bau einer Ringleitung um den ganzen Zugersee begonnen. Dieses Projekt wurde schliesslich mit dem Endausbau der zentralen Abwasserreinigungsanlage (ARA) 1998 abgeschlossen. Im gleichen Zeitraum wurde auch das Trennsystem im gesamten Einzugsgebiet weiterentwickelt. Heute verfügt der Gewässerschutzverband der Region Zugersee-Küssnachersee-Ägerisee (GVRZ) über eine zentrale ARA mit einer Kapazität von 180 000 Einwohnergleichwerten (EWG) und einem Verbandsleitungsnetz, in dem die verfügbaren Speichervolumen bei Regen aktiv bewirtschaftet werden.

Der Zugersee weist im Vergleich zu anderen Schweizer Seen in ruraler und urbaner Umgebung eine hohe Wasseraufenthalts-

\* Kontakt: christian.goetz@envilab.ch

zeit auf: rund 15 Jahre. Zudem ist der See unterhalb einer Tiefe von 100 Meter praktisch permanent dichtegeschichtet. Selbst im Winter wird das Tiefenwasser kaum mit dem Oberflächenwasser vermischt. Dies führt in Bezug auf Nährstoffe zu einer langsamen Erholung des Sees. Trotzdem konnte nach Umsetzung der entsprechenden Massnahmen zwischen den Jahren 2000 und 2010 der Phosphorinhalt im See von 415 auf 273 Tonnen markant gesenkt werden [1].

### MIKROVERUNREINIGUNGEN

Obwohl der Ausbaustandard der Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung in der Schweiz hoch ist, gelangen nach wie vor Schmutzstoffe aus kommunalem und gewerblichem Abwasser (z. B. über ARA und Mischwasserentlastungen) sowie aus diffusen Quellen (z. B. Landwirtschaft) in die Gewässer. Diese sogenannten Mikroverunreinigungen können sich bereits bei tiefen Konzentrationen negativ auf Wasserlebewesen auswirken und können sie die Gewässer als Ressourcen für die Trinkwassergewinnung beeinträchtigen. Mit der revidierten Gewässerschutzverordnung vom 1. Januar 2016 wurde deshalb der erweiterte Ausbau zur Entfernung dieser Stoffe in schweizweit ca. 100 ARA verankert.

Die zentrale Kläranlage des GVRZ, die ARA Schönau Cham, fällt aufgrund ihrer Ausbaugrösse unter diese neue Regelung. Sie muss daher in den nächsten Jahren Massnahmen zur Elimination dieser Mikroverunreinigungen umsetzen. Dabei soll der Reinigungseffekt, gemessen anhand ausgewählter Substanzen und bezogen auf das Rohabwasser, bei mindestens 80% liegen. Indes stellt sich dem GVRZ mit Blick auf das Gesamtsystem die Frage, ob alleine die Massnahme auf Stufe der Kläranlage einen ganzheitlichen Gewässerschutz gewährleistet. So könnten potenzielle Einträge aus Trennsystemen oder aus Entlastungen bei Regen nach wie vor den Zugersee belasten.

Dabei steht die Frage im Mittelpunkt, was das in den 1970er-Jahren für die Nährstoffreduktion gebaute Ringleitungssystem in Bezug auf diese neuen Schadstoffe bringt. Ist der Fokus auf den Ausbau der ARA für die Region Zugersee zweckmässig oder sind andere Quellen und Eintragspfade wichtiger? Um diese Fragen zu beantworten, wurde eine Massenbilanz für verschiedene quellenspezifische Leitsubstanzen erstellt, basierend

auf einer umfassenden Messkampagne [2]. Um die Entwicklung der Konzentrationen im See über die nächsten zwanzig Jahre abzuschätzen, kam ein einfaches Seenmodell zum Einsatz. Die Arbeiten in diesem Projekt wurden durch ein Fachgremium, bestehend aus Vertretern der Kantone Zug, Schwyz und Luzern sowie der Eawag, begleitet.

### EINTRAGSPFADE

Einer der wichtigsten Eintragspfade für Mikroverunreinigungen, der Eintrag über gereinigtes Abwasser, wurde durch den Bau der Ringleitung für den Zugersee beseitigt. Die ARA Schönau leitet das gereinigte Abwasser unterhalb des Sees direkt in die Lorze ein. Es sind aber auch andere Quellen und Eintragspfade für Spurenstoffeinträge von Belang. Das BAFU hat deren Bedeutung für die Oberflächengewässerqualität im kürzlich erschienenen Bericht *Mikroverunreinigungen aus diffusen Quellen für die ganze Schweiz* abgeschätzt [3]. Im Fall des Zugerseegebiets sind die Einträge über Mischwasserentlastungen (Mischsystem), die direkten Einträge durch die Entwässerung des Siedlungsraums durch Regenkanäle (Trennsysteme), die Einträge

von Nähr- und Spurenstoffen durch Oberflächenabfluss und Drainagen von landwirtschaftlichen Flächen und auch Einträge von Strassen- und Gleisabwasser von Relevanz. In *Figur 1* sind die verschiedenen Eintragspfade schematisch auf einer Karte des Zugerseegebiets dargestellt.

### MESSUNGEN IM ZUGERSEE

Für eine erste Beurteilung der Wasserqualität wurde durch die Eawag und das AVS Zug eine Messkampagne im Zugersee durchgeführt. Für diese Orientierungsmessungen kam eine analytische Methode der Eawag zum Einsatz, mit der rund 500 Stoffe gleichzeitig erfasst wurden. Bei diesen Messungen wurden 6 Biozide, 29 Pestizide, 9 perfluorierte Tenside, 8 Industrie-, Haushaltschemikalien oder Lebensmittelzusatzstoffe und 19 Arzneimittel gefunden. Im Auslauf des Zugersees wurden generell die höchsten Konzentrationen gefunden. Diese Resultate erlaubten bereits erste Schlussfolgerungen über potenziell problematische Quellen und Eintragspfade im Einzugsgebiet. Basierend auf diesen Messungen wurde eine Stoffliste festgelegt, die in

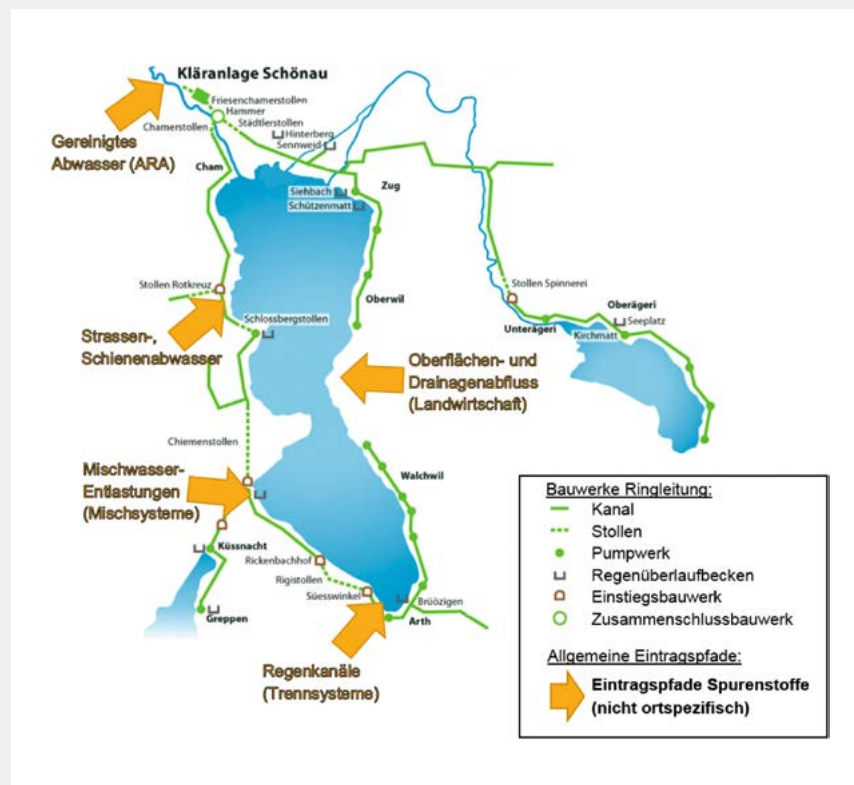


Fig. 1 Ringleitung des Einzugsgebiets der ARA Schönau und schematische Darstellung verschiedener Eintragspfade von Mikroverunreinigungen

Circuit de la STEP Schönau et représentation schématique des différentes voies d'apport de micropolluants

| Stoff  | Wichtigste Quelle/<br>Eintragspfade          | Konzentrationen in ng/l (Mittelwerte Eawag und AVS Zug) |                                       |   |          |  |
|--|--|---|---------------------------------------|---|----------|--|
|  |  | Zugersee<br>Ablauf                                      | Zugersee süd-<br>liches Becken<br>5 m | Zugersee süd-<br>liches Becken<br>150 m | Ägerisee | Lorze, nach<br>Einleitung der<br>ARA Schönau |
| <b>Tracerstoffe für gereinigtes Abwasser (Einträge aus ARA, im Fall von Zugersee und Ägerisee auch sehr gut geeignet als konservative Tracer für ungereinigte Mischwasserentlastungen)</b> |  |   |                                       |   |          |  |
| <b>Acesulfam</b> (Süsstoff)  | Häusliches Abwasser                          | 16  | 14                                    | 12                                      | <BG*     | 1000   |
| <b>Benzotriazol</b> (Korrosionsschutz)   | Häusliches Abwasser<br>und Industrieabwasser | 360   | 370                                   | 460                                     | 2,3      | 630  |
| <b>Carbamazepin</b> (Antiepileptikum)  | Häusliches Abwasser                          | 3,2   | <0,8                                  | 1,4                                     | <BG      | 13   |
| <b>Diclofenac</b> (Analgetikum)  | Häusliches Abwasser                          | <BG   | <BG                                   | <BG                                     | <BG      | 99   |
| <b>Tracerstoffe für ungereinigtes Abwasser (Mischwasserentlastungen)</b>   |  |   |                                       |   |          |  |
| <b>Cyclamat</b> (Süsstoff)   | Häusliches Abwasser                          | 16  | 16                                    | 19                                      | <BG      | 56   |
| <b>Koffein</b> (Genussmittel)  | Häusliches Abwasser                          | 50  | 36                                    | 19                                      | 13       | 53   |
| <b>Tracerstoffe für Einträge aus Regenkanälen (Trennsysteme), Mischwasserentlastungen und Landwirtschaft</b>   |  |   |                                       |   |          |  |
| <b>Diuron</b> (Herbizid)   | Diverse                                      | 5,6   | 3,0                                   | 5,2                                     | <BG      | <BG  |
| <b>Mecoprop</b> (Herbizid)   | Regenkanäle (Materialschutz), Getreide       | 19  | 13                                    | 12                                      | <BG      | 32   |
| <b>Tracerstoffe für aktuelle Einträge aus der Landwirtschaft</b>   |  |   |                                       |   |          |  |
| <b>2,6-Dichlorbenzamid</b><br>(Herbizid-Abbauprodukt)  | Abbauprodukt, Forst                          | 9,6   | 9,4                                   | 10                                      | 2,1      | 11   |
| <b>Metolachlor</b> (Herbizid)  | Mais   | 3,3   | 3,3                                   | 0,9                                     | <BG      | <BG  |
| <b>Terbuthylazin</b> (Herbizid)  | Mais, diverse                                | 6,2   | 7,1                                   | 4,8                                     | <BG      | 8,0  |
| <b>Tracerstoffe für frühere Einträge aus der Landwirtschaft und frühere Einträge von Gleisen</b>   |  |   |                                       |   |          |  |
| <b>Atrazin</b> (Herbizid)  | Mais, Gleise (nicht mehr zugelassen)         | 24  | 26                                    | 32                                      | <BG      | 24   |
| <b>Atrazin-Desethyl</b><br>(Herbizid-Abbauprodukt)   | Mais, Abbauprodukt                           | 21  | 22                                    | 27                                      | <BG      | 13   |

\*<BG: kleiner als die analytische Bestimmungsgrenze

Tab. 1 Stoffauswahl für die Messkampagne in der Region Zugersee. Daten aus [3]

Sélection de substances pour la campagne de mesure dans la région du lac de Zoug. Données de [3]

einer Messkampagne vom Februar bis Juni 2014 vom AVS Zug analysiert wurde. Neben den Positivbefunden in der Substanzinventarisierung der Eawag wurde darauf geachtet, dass mit der getroffenen Stoffauswahl möglichst viele der unterschiedlichen Eintragspfade (vergl. Fig. 1) abgedeckt wurden.

Die Resultate der Orientierungsmessungen und der Messkampagne mit Angabe der wichtigsten stoffspezifischen Eintragspfade und Quellen sind in Tabelle 1 aufgelistet. Generell wurden im Ägerisee die tiefsten und in der Lorze die höchsten Konzentrationen gemessen.

## BILANZIERUNG DER EINTRAGSPFADE

Mit der Gegenüberstellung der im See gemessenen Konzentrationen und den aus der Massenbilanz und Seenmodellierung erwarteten Werten konnte beurteilt werden, ob alle Quellen der entsprechenden Tracerstoffe bekannt sind und auch abgebildet werden können. Zudem konnte geklärt werden, ob weitere noch unbekannt, aber relevante Quellen und Eintragspfade existieren. Mithilfe des Abwassertracers Acesulfam (künstlicher Süsstoff) konnte zudem der Gesamtinhalt an Abwasser im Zugersee und somit der jährliche Eintrag an Mischwasser abgeschätzt werden. Im Weiteren wurde durch den Vergleich der gemessenen Konzentrationen mit denen in anderen Schweizer Seen die Gesamtsituation und der Handlungsbedarf betreffend die einzelnen Eintragspfade beurteilt. Die verschiedenen Einträge von Spurenstoffen werden im Folgenden für das Zugerseegebiet genauer beleuchtet.

## KOMMUNALES ABWASSER

Als gut geeigneter Tracer für kommunales Abwasser hat sich Acesulfam, ein weit verbreiteter künstlicher Süsstoff, bewährt [4]. Anhand des von Bürge *et al.* [4] publizierten Zusammenhangs zwischen der Acesulfamkonzentration und dem Abwasseranteil bekannter Gewässer kann aus einer gemessenen Acesulfamkonzentration direkt auf den Anteil an häuslichem Abwasser in einem Gewässer geschlossen werden. Dabei wird angenommen, dass der Konsum dieses künstlichen Süsstoffes in der ganzen Schweiz homogen verteilt ist und im untersuchten Einzugsgebiet keine zusätzliche Quelle vorhanden ist. Im oberen Zugerseebecken wird so der Anteil an kommunalem Abwasser auf 0,08–0,09% geschätzt (entspricht einer Acesulfamkonzentration von 12–14 ng/l), im unteren Becken, beim Auslauf, auf rund 0,1% (entspricht einer Acesulfamkonzentration von 16 ng/l). Bezogen auf die Menge Abwasser, die durch Mischwasserentlastungen jährlich in den See gelangt, kommt man über eine Massenbilanz mittels Acesulfam auf eine jährlich entlastete Menge von maximal 800 000 m<sup>3</sup>. Dieser Eintrag von verdünntem Mischwasser entspricht etwa 3% der jährlich auf die Kläranlage geleiteten Gesamtwassermenge und stimmt mit der Summe der gemessenen Wassermengen der einzelnen Entlastungen gut überein. Im Vergleich zu anderen Schweizer Seen mit einer vergleichbaren Bevölkerungsdichte ist der Anteil an kommunalem Abwasser im Zugersee somit sehr tief. Der Abwasseranteil vom Bodensee liegt beispielsweise bei zirka 2%, der vom Vierwaldstättersee (Hauptbecken) bei rund 0,8%. Die Ringleitung mit der aktiven Bewirtschaftung der vorhan-

denen Speichervolumen bei Regen trägt also im Vergleich zur früheren Situation viel dazu bei, den Zugersee in Bezug auf Spurenstoffe und auch Nährstoffe aus kommunalem Abwasser zu schützen.

Die Lorze bei Hagendorn, also nach der Einleitung der ARA Schönau, weist im Mittel einen Abwasseranteil von rund 6–8% auf. Das bedeutet, dass im Gegensatz zum Zugersee, der nur sehr schwach mit Abwasser belastet ist, die Lorze im Durchschnitt einen bedeutenden Anteil an Abwasser führt. Dieser kann bei Minimalabfluss  $Q_{347}$  auch über 10% betragen. Die Wasserqualität der Lorze unterhalb der ARA-Einleitung ist somit im Moment ungenügend. Diclofenac, ein weit verbreitetes Schmerzmittel, überschreitet z.B. regelmässig das ökotoxikologische Qualitätskriterium von 50 ng/l: An allen Messtagen während der Messkampagne wurden Konzentrationen höher als 50 ng/l gemessen.

Um über das gesamte Einzugsgebiet die wichtigsten Eintragungspfade für Stoffe aus kommunalem Abwasser zu identifizieren, wurde eine Massenbilanz für verschiedene Tracerstoffe erstellt. Dabei wurden die mittleren gemessenen Stoffkonzentrationen mit den entsprechenden hydraulischen Abflussmengen kombiniert und so die Stofffrachten in kg/Jahr berechnet (Fig. 2).

Die Summe der berechneten Einträge aus Zugerseeauslauf und ARA stimmen für die meisten Stoffe gut mit den aus den Messwerten in der Lorze berechneten jährlichen Frachten überein. Für die typischen Tracerstoffe für gereinigtes Abwasser Acesulfam und Carbamazepin sowie für andere schwer abbaubare Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser wie Diclofenac und Sucralose zeigt die Massenbilanz, dass rund 99% der Stofffrachten aktuell über den Auslauf der ARA Schönau, resp. teilweise über die der ARA vorgelagerten Entlastungen, direkt in die Lorze eingeleitet werden. Der geplante Ausbau der ARA Schönau mit einer zusätzlichen Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen wird somit die Fracht an organischen Stoffen, die ins Gewässer gelangt, im gesamten Einzugsgebiet stark reduzieren. Namentlich wird dadurch die Lorze – das ökotoxikologisch am stärksten belastete Gewässer im Einzugsgebiet – deutlich entlastet. Für Benzotriazol, ein Korrosionsschutzmittel, das in der Regel hauptsächlich aus kommunalem Abwasser stammt, weisen sowohl die

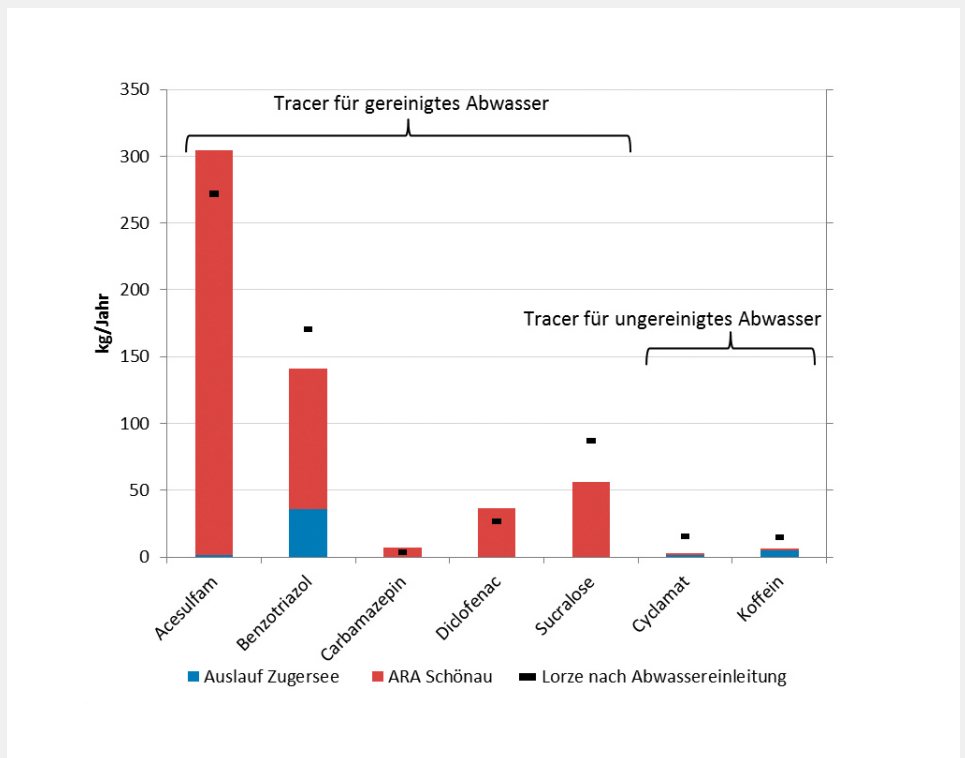


Fig. 2 Massenbilanz für Stoffe aus kommunalem Abwasser  
Bilan massique des substances issues des eaux usées communales

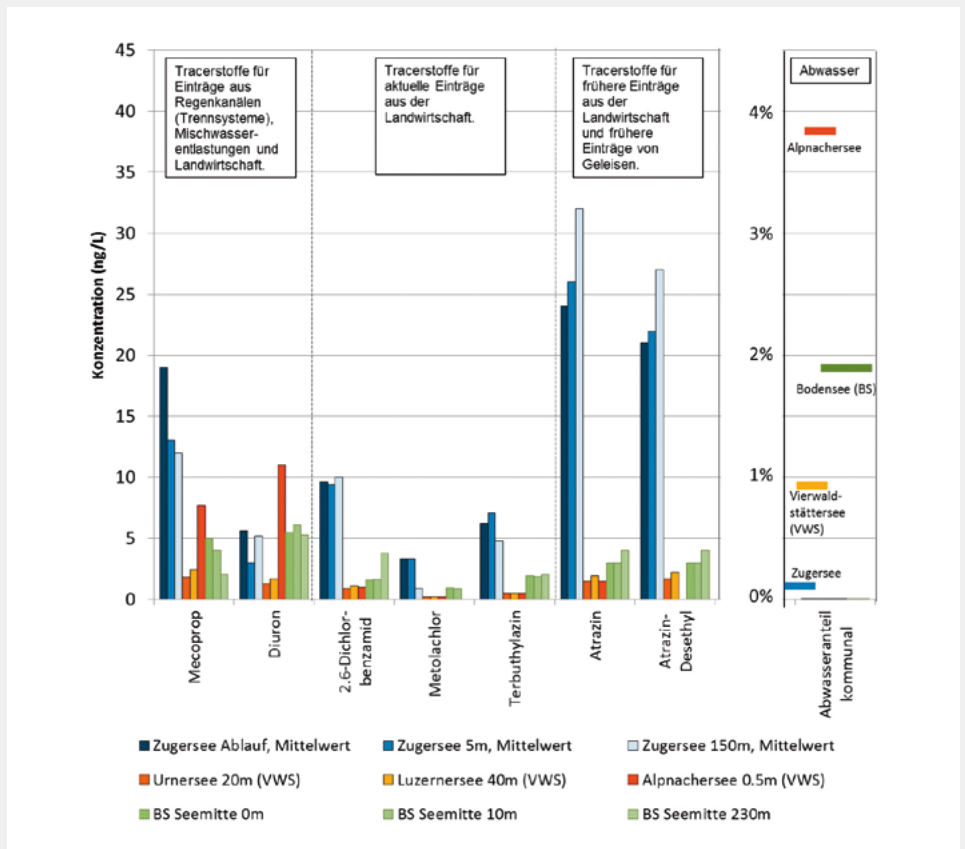


Fig. 3 Links: Konzentrationen von verschiedenen Bioziden, Pflanzenschutzmitteln und Abbauprodukten im Zuger-, Vierwaldstätter- und Bodensee [2, 5, 6]. Rechts: Angabe der geschätzten Anteile an kommunalem Abwasser in den verschiedenen Seen

A gauche: concentrations de différents produits biocides, phytosanitaires et de décomposition dans les lacs de Zoug, des Quatre-Cantons et de Constance [2, 5, 6]. A droite: indication des proportions estimées d'eaux usées communales dans les différents lacs

gemessenen Konzentrationen als auch die Massenbilanz auf eine zusätzliche Quelle hin. Dieser Befund wird nachfolgend detaillierter besprochen.

#### DIFFUSE EINTRÄGE

Neben den Einträgen über das Abwassersystem sind diffuse Einträge von Stoffen im Zugerseegebiet von Bedeutung. Als diffuse Eintragspfade werden beispielsweise Stoffeinträge über Oberflächenabfluss und Drainagen von landwirtschaftlichen Flächen oder Einleitungen von Gleis- oder Strassenabwasser bezeichnet (Fig. 1). In der Messkampagne wurden auch Tracerstoffe für diese diffusen Eintragspfade, gemäss der Auflistung in Tabelle 1, analysiert. Die Mittelwerte der gemessenen Konzentrationen dieser Stoffe im Zugersee sind in Figur 3 wiedergegeben. Zum Vergleich und zur Einordnung der Ergebnisse sind Messungen aus dem Vierwaldstättersee und dem Bodensee mit angegeben. Im Gegensatz zu den Konzentrationen von Stoffen aus kommunalem Abwasser, die im Zugersee sehr tief sind, weisen die gemessenen Tracerstoffe, die für diffuse Einträge stehen, vergleichsweise hohe Konzentra-

tionen auf. Vornehmlich zeigt sich dies bei Stoffen, die aus landwirtschaftlichen Anwendungen stammen. Insbesondere sind die Konzentrationen an Atrazin und Desethyl-Atrazin im Zugersee auffällig hoch. Atrazin wurde früher sowohl in der Landwirtschaft als auch für die Unkrautbekämpfung auf Gleisbetten eingesetzt. Atrazin ist in der Landwirtschaft seit rund vier Jahren nicht mehr zugelassen (Verwendungsfrist 31.12.2011) und wurde im Gleisbereich bereits 1989 zuerst durch Diuron, danach durch Glyphosat ersetzt. Die erhöhten Atrazinkonzentrationen könnten somit aus früheren landwirtschaftlichen Anwendungen oder aus Anwendungen im Gleisbereich stammen (Box 1). Mit den vorliegenden Daten lässt sich die ursprüngliche Quelle und der Eintragspfad nicht mehr rekonstruieren. Keines der im Seewasser gemessenen Pflanzenschutzmittel lag über dem entsprechenden ökotoxikologischen Qualitätskriterium. Ein akuter Handlungsbedarf ist daher auch für Mikroverunreinigungen aus der Landwirtschaft nicht gegeben. Da die Konzentrationen der gemessenen Pflanzenschutzmittel aber deutlich über denen von vergleich-

baren Seen liegen, sollte die Situation regelmässig überprüft und dokumentiert werden. Dies nicht zuletzt, weil die hohe Wasseraufenthaltszeit resp. der tiefe Durchfluss des Zugersees die Akkumulation solcher Stoffe begünstigt.

#### UNBEKANNTE PUNKTQUELLEN

Durch die Messungen im Zugersee konnte eine Substanz identifiziert werden, die nicht mit den oben angegebenen Eintragspfaden erklärt werden kann: das Korrosionsschutzmittel Benzotriazol. Die gemessene Benzotriazol-Konzentration im Zugersee liegt mit durchschnittlich 450 ng/l etwa hundertmal über der Konzentration, die man aufgrund der anderen gemessenen Abwassertracer (z. B. Acesulfam, Carbamazepin) und des entsprechend berechneten Abwasseranteils erwarten würde (Fig. 5).

Bei einem Wasservolumen von 3,2 km<sup>3</sup> enthält der Zugersee damit etwa 1,45 Tonnen Benzotriazol – mehr als durch den Eintrag von kommunalem Abwasser erklärt werden kann. Die enorme zusätzlich vorhandene Benzotriazolmenge von 1,45 Tonnen kann auch nicht durch Einträge aus Mischwasserentlastungen

#### LANGSAME ABNAHME VOM STOFFDEPOT IM SEE – AM BEISPIEL ATRAZIN

Weil Atrazin in der Schweiz sowohl in der Landwirtschaft als auch im Siedlungsbereich nicht mehr zugelassen ist, eignet es sich gut, um die Abnahme der Konzentrationen von Stoffen, die nicht mehr ins Gewässer eingetragen werden, abzubilden. Mit einem Seenmodell (MASASlight) wurde berechnet, wie lange es dauert, bis Atrazin im Zugersee unter eine bestimmte Konzentration sinken wird. Aktuell wurden im Tiefenwasser 42 ng/l und im Oberflächenwasser 29 ng/l gemessen. Der Konzentrationsverlauf von Atrazin im Zugersee, unter Annahme einer gleichbleibenden Wasserbilanz über die nächsten 20 Jahre, ist in Figur 4 wiedergegeben.

Gemäss der Modellrechnung wird die Atrazinkonzentration in 20 Jahren im Zugersee auf 10–15 ng/l gesunken sein, also auf rund einen Drittel von heute. Dies zeigt, dass das System Zugersee ein sehr «langes Gedächtnis» hat und es deshalb umso wichtiger ist, die Stoffeinträge problematischer Substanzen möglichst frühzeitig zu erkennen und zu minimieren.

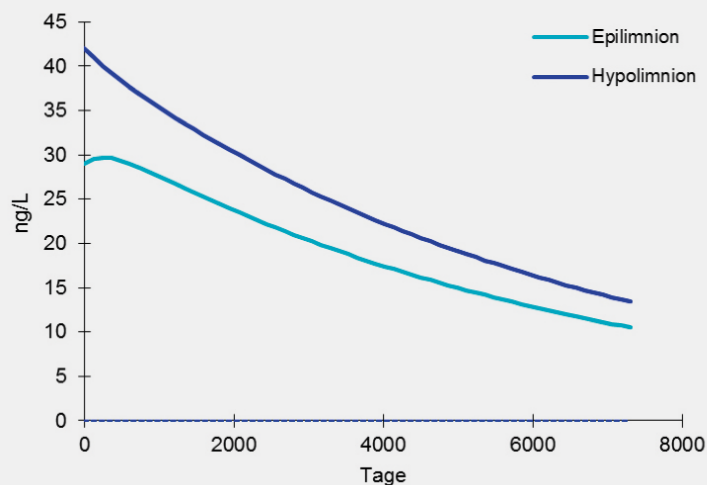


Fig. 4 Vorhersage der Atrazinkonzentration in den nächsten 20 Jahren in Epi- und Hypolimnion.

Es wurde angenommen, dass kein neuer Eintrag stattfindet und dass der See in den nächsten 20 Jahren nie vollständig durchmischt wird (Modellgrundlage: MASASlight, 2-Box-Modell)

Prévisions sur la concentration d'atrazine dans les 20 prochaines années dans l'hypolimnion et l'épilimnion. On est parti du principe qu'il n'y aura aucun nouvel apport et que le lac ne sera jamais totalement mélangé dans les 20 prochaines années (base modèle: MASASlight)

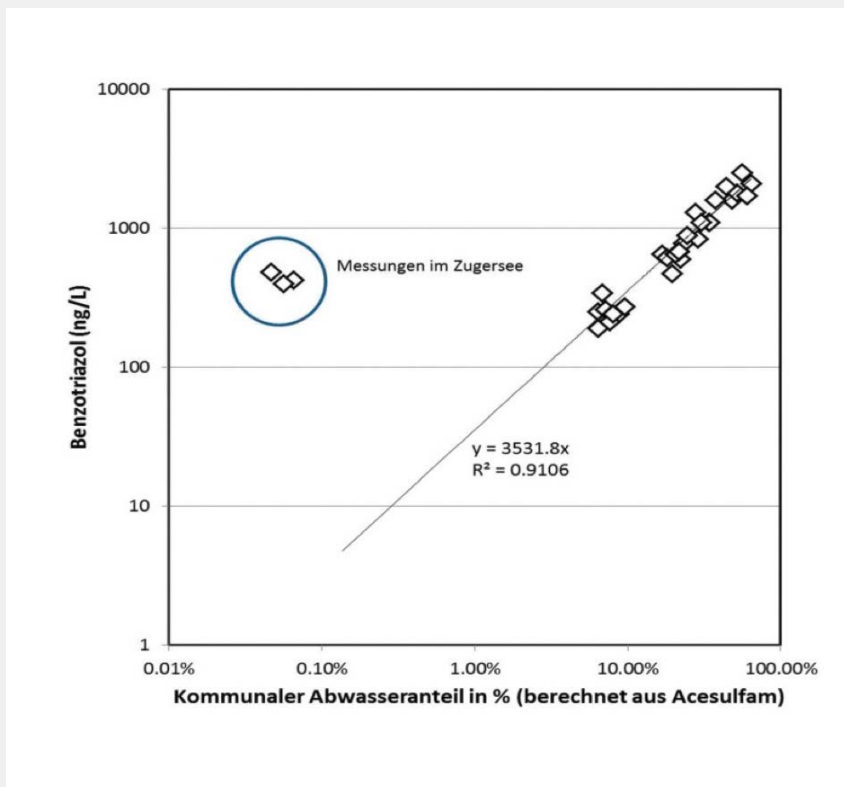


Fig. 5 Vergleich der Benzotriazolkonzentrationen mit dem Abwasseranteil ermittelt für verschiedene Gewässer (Fließgewässer aus der NAWA-Studie der Eawag [7]). Der Abwasseranteil und die Konzentration von Benzotriazol korrelieren normalerweise. Die erwartete Benzotriazolkonzentration im Zugersee würde etwa 5 ng/l betragen, liegt aber rund hundertmal höher  
 Comparaison des concentrations en benzotriazole avec la proportion d'eaux usées mesurée dans différents cours d'eau (cours d'eau dans l'étude NAWA de l'Eawag [7]). La proportion des eaux usées est en corrélation avec la concentration de benzotriazole. Cette concentration attendue dans le lac de Zoug devrait s'élever à 5 ng/l: elle est pourtant env. 100 x supérieure

erklärt werden. Sollte das im See abgelagerte Benzotriazol nach dem Bau der Ringleitung in den See eingeleitet worden sein, muss hierfür eine massive und direkte Einleitung von kontaminiertem Abwasser verantwortlich sein. In Frage käme – neben potenziell aktiven Quellen –, dass das derzeit im See befindliche Benzotriazol vor der Installation der Abwasserringleitung über gereinigtes oder ungereinigtes Abwasser direkt oder indirekt in den See gelangt ist. Aber auch Deponieabwässer, die früher noch nicht am Verbandsleitungssystem angeschlossen waren, wären möglich. Die Ursache kann mit dem aktuellen Wissensstand nicht abschliessend geklärt werden und wird aktuell vom Amt für Umwelt des Kantons Zug genauer untersucht.

**FAZIT**

In der Tabelle 2 sind die Befunde für die einzelnen Eintragspfade zusammengefasst. Themenfelder, in denen akuter Handlungsbedarf besteht, sind rot; Bereiche, in denen weitere Abklärungen nötig sind, resp. welche in den nächsten Jahren genau beobachtet werden sollen, sind gelb gekennzeichnet. Ein akuter Handlungsbedarf ist für die Lorze gegeben. Dort überschreiten gemessene Spurenstoffkonzentrationen teilweise die entspre-

| Eintragspfad   | Tracerstoffe                                | Zugersee   | Ägerisee                          | Lorze   |
|--|---|--|-----------------------------------|---|
| <b>Gereinigtes Abwasser (Tracerstoffe sind im Fall vom Zugersee und Ägerisee auch sehr gut geeignet für die Quantifizierung von Mischwasserentlastungen, da keine ARA in diese Seen einleitet)</b> | Acesulfam (Süsstoff)                        | Tiefe Konzentrationen (mit Ausnahme von Benzotriazol)  | Tiefe Konzentrationen             | Teilweise Überschreitungen der Qualitätskriterien<br>Quelle: Einleitung ARA Schönau |
|  | Benzotriazol (Korrosionsschutz)             |  |                                   |   |
|  | Carbamazepin (Antiepileptikum)              |  |                                   |   |
|  | Diclofenac (Analgetikum)                    |  |                                   |   |
|  | Sucralose (Süsstoff)                        |  |                                   |   |
| <b>Ungereinigtes Abwasser (Mischwasserentlastungen)</b>  | Cyclamat (Süsstoff)                         |  |                                   | Durchschnittliche Konzentrationen   |
|  | Koffein (Genussmittel)                      |  |                                   |   |
| <b>Einträge aus Regenkanälen (Trennsysteme) oder Mischwasserentlastungen</b>   | Diuron* (Herbizid)                          | Durchschnittliche Konzentrationen (Mecoprop aber teilweise Faktor 3-8 höher als im Bodensee oder Vierwaldstättersee) | Tiefe Konzentrationen             | Durchschnittliche Konzentrationen   |
|  | Mecoprop* (Herbizid)                        |  |                                   |   |
| <b>Aktuelle Einträge aus der Landwirtschaft</b>  | 2,6-Dichlorbenzamid (Herbizid-Abbauprodukt) | Vergleichsweise hohe Konzentrationen (bis Faktor 10 höher als z. B. Bodensee, Vierwaldstättersee)                    | Durchschnittliche Konzentrationen | Durchschnittliche Konzentrationen   |
|  | Metolachlor (Herbizid)                      |  |                                   |   |
|  | Terbutylazin (Herbizid)                     |  |                                   |   |
| <b>Frühere Einträge aus der Landwirtschaft / Einträge von Gleisen</b>  | Atrazin (Herbizid)                          |  | Tiefe Konzentrationen             | Durchschnittliche Konzentrationen   |
|  | Atrazin-Desethyl (Herbizid-Abbauprodukt)    |  |                                   |   |

Tab. 2 Zusammenfassung der Befunde im Zuger- und Ägerisee sowie in der Lorze. Rot: Themenfelder, in denen ein akuter Handlungsbedarf besteht. Gelb: Bereiche, in denen weitere Abklärungen nötig sind  
 Résumé des résultats dans les lacs de Zoug, d'Ägeri et la Lorze. Rouge: domaines thématiques pour lesquels il est urgent d'agir. Jaune: domaines pour lesquels des explications supplémentaires sont nécessaires

chenden ökotoxikologischen Qualitätskriterien. Ein Ausbau der ARA Schönau mit einer weitergehenden Reinigungsstufe zur Elimination der Spurenstoffeinträge ist deshalb auch bereits in Planung. Mit der neuen Gewässerschutzverordnung ist der gesetzliche Rahmen für den Ausbau festgelegt, der in den nächsten Jahren erfolgen wird. Mit Modellrechnungen konnte gezeigt werden, dass bei einem durchschnittlichen Reinigungseffekt von 80%, der mit der neuen Reinigungsstufe erreicht werden muss, die Qualitätskriterien in der Lorze zukünftig eingehalten werden können [2].

Im Zuger- und im Ägerisee besteht, betreffend die Einleitungen von organischen Spurenstoffen aus kommunalem Abwasser über die Entlastungen des Ringsystems, kein spezifischer Handlungsbedarf. Die bei der Bewirtschaftung des Ringsystems angewendeten und stetig weiterentwickelten Strategien des GVRZ erweisen sich gemäss aktuellen Untersuchungen als erfolgreich. Typische Stoffe aus kommunalem Abwasser wie Acesulfam, Carbamazepin und Diclofenac sind nur in tiefen Konzentrationen messbar oder liegen sogar unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenzen.

Eine Ausnahme bildet Benzotriazol: Ob schon Benzotriazol nur eine geringe Toxizität aufweist, ist die Konzentration des Korrosionsschutzmittels im Zugersee aussergewöhnlich hoch. Anders könnte dies aber bei anderen Stoffen sein. Hier zeigt sich im Besonderen auch die Problematik des Zugersees: Einmal eingetragene Stoffe werden nur sehr langsam wieder aus

dem System entfernt. Es ist daher wichtig, die Eintragswege von Schadstoffen und deren ökotoxikologisches Potenzial zu kennen, um Probleme zu verhindern und rechtzeitig Massnahmen einleiten zu können.

Diese Problematik gilt auch für die Einträge aus der Landwirtschaft. Die Konzentrationen halten zwar aktuelle Qualitätskriterien ein, sind aber aufgrund der hohen Wasseraufenthaltszeit und der teilweise intensiven landwirtschaftlichen Nutzung der Flächen im Einzugsgebiet im Vergleich mit anderen Schweizer Seen deutlich erhöht. Sie sollten daher ebenfalls im Auge behalten werden, um eine allfällige weitere Zunahme der Konzentrationen rechtzeitig zu erkennen. Zusätzlich werden aufgrund der Verdichtung der Siedlungsflächen in verschiedenen Regionen vermehrt Trennsysteme realisiert. In diesem Fall gilt es, die Konzentrationen von Stoffen aus Siedlungsflächen, die über Regenkanäle in den See eingetragen werden, wie beispielsweise Mecoprop, zu überwachen.

Generell kann festgehalten werden, dass das vorhandene System aus Siedlungsentswässerung der Gemeinden mit der Ringleitung des Verbands bereits heute den Zugersee effektiv vor Einträgen mit Mikroverunreinigungen schützt. Zudem konnte gezeigt werden, dass sich nach einem Ausbau der ARA Schönau auch die Situation in der Lorze deutlich verbessern wird. Auf Basis der Modellrechnungen werden dort danach keine Qualitätskriterien-Überschreitungen von aktuell bekannten organischen Substanzen mehr erwartet.

#### DANK

Danke an *Heinz Singer, Johanna Otto* von der Eawag und *Mattias Fricker* vom AVS für die Durchführung der Probenahmen und Messungen.

Vielen Dank an das BAFU für die Co-Finanzierung der Studie.

Vielen Dank für die fachliche Begleitung und die wertvollen Inputs an die Begleitgruppe: *Heinz Singer, Bruno Mathis, Mattias Fricker, Christina Vogelsang, Susanne Pfenninger, Patrick Graf* und *Saskia Zimmermann*.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Wüest, A.; Müller, B. (2010): Abnahme des Phosphorgehalts im Zugersee – Stand 2010. Kastanienbaum: Eawag*
- [2] *Götz, C.; Singer, H.; Otto, J. (2015): Mikroverunreinigungen im Zuger- und Ägerisee – Standortbestimmung, Bilanzierung der Stoffeinträge und Beurteilung des Handlungsbedarfs. Zofingen: Envilab AG, im Auftrag des GVRZ*
- [3] *Braun, C. et al. (2015): Mikroverunreinigungen in Fließgewässern aus diffusen Quellen. Bern: BAFU*
- [4] *Bürge, I. et al. (2009): Ubiquitous occurrence of the artificial sweetener acesulfame in the aquatic environment: an ideal chemical marker of domestic wastewater in groundwater. Environ. Science and Technology*
- [5] *Singer, H. et al. (2010): Screening-Messungen von organischen Spurenstoffen im Vierwaldstättersee. Dübendorf: Eawag*
- [6] *Singer, H. et al. (2009): Screening-Messungen von organischen Mikroverunreinigungen im Bodensee. Dübendorf: Eawag*
- [7] *Wittmer, I. et al. (2014): Über 100 Pestizide in Fließgewässern. Aqua & Gas, No 3*

**WASSER ▽ BODEN ▽ LUFT**  
Analytische Untersuchungen und beratende Leistungen

**envilab**

ANALYTIK AUS LEIDENSCHAFT

ENVILAB AG  
Mühlethalstrasse 25, 4800 Zofingen  
T 062 745 70 50, [www.envilab.ch](http://www.envilab.ch)