

Mikroverunreinigungen im Zuger- und Ägerisee

Standortbestimmung, Bilanzierung der Stoffeinträge und Beurteilung des Handlungsbedarfs



Zofingen, im September 2015

Im Auftrag des Gewässerschutzverbands
der Region Zugersee-Küssnachtsee-Ägerisee (GVRZ)



Mikroverunreinigungen im Zuger- und Ägerisee

Standortbestimmung, Bilanzierung der Stoffeinträge und Beurteilung des Handlungsbedarfs

Auftraggeber:

Gewässerschutzverband der Region Zugersee-Küssnachersee-Ägerisee (GVRZ)

Co-Finanzierung des Projekts:

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Autor:

Christian Götz, ENVILAB AG, Mühlethalstrasse 25, 4800 Zofingen, christian.goetz@envilab.ch

Co-Autoren:

Heinz Singer, EAWAG, Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf

Johanna Otto, EAWAG

Fachliche Begleitung:

Bernd Kobler, GVRZ

Bruno Mathis, AfU Zug

Mattias Fricker, AVS Zug

Christina Vogelsang, AfU Schwyz

Susanne Pfenninger, AVS Zug

Analytik:

Johanna Otto, Bernadette Vogler und Heinz Singer, EAWAG Dübendorf

Mattias Fricker, AVS Zug

Informationen / Kontakt:

Bernd Kobler, Geschäftsführer GVRZ, bernd.kobler@gvrz.ch

Bruno Mathis, Abteilungsleiter Wasser, Amt für Umweltschutz Kanton Zug, bruno.mathis@zg.ch

ENVILAB AG

Mühlethalstrasse 25, CH-4800 Zofingen

Telefon +41 (0)62 823 29 51, Fax +41 (0)62 823 73 52

www.envilab.ch, info@envilab.ch

| Version | Datum | Dateiname | Sachbearbeitung | Freigabe |
|---------|------------|---------------------------|-----------------|----------------|
| 2.4 | 16.09.2015 | Z3336-Bericht Version 2.4 | Christian Götz | Christian Götz |

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | ZUSAMMENFASSUNG | 5 |
| 2 | EINLEITUNG | 7 |
| 2.1 | Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser | 7 |
| 2.2 | Spurenstoffe aus unterschiedlichen Quellen | 8 |
| 2.3 | Region Zugersee, Küssnachtersee und Ägerisee – ARA Schönau | 9 |
| 2.4 | Fragestellung | 10 |
| 3 | VORGEHEN UND MESSKONZEPT | 12 |
| 3.1 | Standortbestimmung und erste Übersicht | 12 |
| 3.2 | Messkampagne - Erhebung der Belastungslage und der wichtigsten Eintragspfade anhand von Tracerstoffen | 13 |
| 3.3 | Beurteilung der Belastung | 15 |
| 3.3.1 | Beurteilungsschema | 15 |
| 3.3.2 | Qualitätskriterien | 16 |
| 3.4 | Beschreibung der wichtigsten Eintragspfade | 19 |
| 3.4.1 | Massenbilanz - Seemodellierung | 19 |
| 4 | ERGEBNISSE DER ORIENTIERUNGSMESSUNGEN UND DER MESSKAMPAGNE | 21 |
| 4.1 | Substanzinventarisierung ARA Schönau im 2010 | 21 |
| 4.2 | Orientierungsmessungen Zugersee 2013 | 22 |
| 4.2.1 | Probenahme Herbst 2013 | 22 |
| 4.2.2 | Ergebnisse der Orientierungsmessungen Zugersee | 22 |
| 4.3 | Ergebnisse der Messkampagne | 24 |
| 4.3.1 | Stoffauswahl | 24 |
| 4.3.2 | Konzentrationen der Tracerstoffe | 26 |
| 5 | BEURTEILUNG DER GEWÄSSERBELASTUNG | 27 |
| 5.1 | Kommunales Abwasser | 27 |
| 5.1.1 | Eintrag von kommunalem Abwasser | 27 |
| 5.1.2 | Mischwasserentlastungen oder Abwasser der früheren ARA? | 29 |
| 5.1.3 | Spitalabwasser | 31 |
| 5.2 | Regenkanäle | 31 |
| 5.3 | Landwirtschaft | 32 |
| 5.3.1 | Pestizide aus der Landwirtschaft | 33 |
| 5.3.2 | Pestizide aus verschiedenen Quellen | 33 |
| 6 | STOFFFLUSS- UND SEENMODELLIERUNG | 34 |

| | | |
|-------|---|----|
| 6.1 | Eintrag von Abwasser über Mischwasserentlastungen in den Zugersee | 34 |
| 6.1.1 | Messungen einzelner Entlastungen | 34 |
| 6.1.2 | Abwassertracer: Acesulfam | 35 |
| 6.1.3 | Mittlere entlastete Mischwassermengen in den Zugersee | 37 |
| 6.2 | Stoffbilanzen für Stoffe aus Mischwasserentlastungen für den Zugersee | 37 |
| 6.3 | Befund Benzotriazol | 39 |
| 6.4 | Atrazin: Entwicklung der Konzentrationen im Zugersee in den nächsten Jahren | 40 |
| 6.5 | Massenbilanz für Stoffe aus dem kommunalen Abwasser in der Lorze | 41 |
| 6.5.1 | Abflussdaten | 41 |
| 6.5.2 | Massenbilanz – Jahresfrachten | 42 |
| 7 | SCHLUSSFOLGERUNGEN | 44 |
| 7.1 | Beurteilung des Handlungsbedarfs | 44 |
| 7.2 | Ausbau der ARA Schönau | 45 |
| 7.3 | Weitere Abklärungen für den Zugersee | 46 |
| 8 | LITERATURVERZEICHNIS | 48 |

ANHANG

- Anhang 1 Messdaten Auslauf ARA Schönau 2010 (Substanzinventarisierung)
- Anhang 2 Messdaten Zugersee 2013 (Substanzinventarisierung)
- Anhang 3 Messdaten AVS Zug
- Anhang 4 Frachtberechnungen Lorze
- Anhang 5 Eliminationsraten in weitergehenden Verfahren

1 ZUSAMMENFASSUNG

Einleitung und Zielsetzung

Nach dem aktuellen Entwurf zur Anpassung der Gewässerschutzverordnung (GSchV) v. 22.12.2014 wird der GVRZ gefordert sein die ARA Schönau für die Elimination von Mikroverunreinigungen aufzurüsten. Gleichzeitig stellen sich die Fragen ob in diesem Zusammenhang auch Massnahmen im Einzugsgebiet notwendig werden könnten und wie hoch der ökologische Nutzen dieser Aufrüstung für das gesamte Einzugsgebiet ist. Potenziell nötige Massnahmen im Einzugsgebiet und im Abwasserkanalnetz, das ebenfalls von GVRZ betrieben wird, sollen rechtzeitig erkannt werden. Das regionale Abwasserkanalnetz umfasst rund 75 km Hauptsammelkanäle, 20 Abwasserpumpwerke und 10 Regenüberlaufbecken.

Methoden

In dieser Arbeit wurde mithilfe von gezielten Messkampagnen und einer Massenbilanz über das gesamte Einzugsgebiet die Belastung des Zuger-, des Ägerisees und der Lorze mit Mikroverunreinigungen aus verschiedenen Quellen abgeschätzt. Dabei wurden Stoffeinträge aus Mischwasserentlastungen und Regenkanälen, dem Auslauf der ARA Schönau, sowie Einträge durch Oberflächenabfluss und Drainagen aus landwirtschaftlichen Flächen bilanziert.

Resultate

Die Konzentrationen von Stoffen aus kommunalem Abwasser sind sowohl im Zuger- als auch im Ägerisee gering. Der Abwasseranteil im Zugersee ist um die 0.1%, derjenige vom Ägerisee noch tiefer (nicht quantifizierbar). Die stoffliche Wasserqualität ist gemäss dem Beurteilungskonzept der Eawag von 2012 als sehr gut einzustufen. Eine Auffälligkeit ist allerdings die hohe Konzentration des Korrosionsschutzmittels Benzotriazol im Zugersee. Diese ist mit 400 ng/L zwar ökotoxikologisch nicht kritisch, ist aber rund 100mal höher als man aufgrund des Abwasseranteils erwarten würde. Es sollte daher abgeklärt werden, ob noch eine gegenwärtige Quelle für diesen Stoff im Einzugsgebiet existiert oder ob die hohen gemessenen Konzentrationen aus einer früheren Einleitung stammen. Aktuell ist das Amt für Umweltschutz des Kantons Zug dabei solche Abklärungen vorzunehmen. Im Ägerisee wurde Benzotriazol nicht in erhöhten Konzentrationen gefunden.

Die Belastung der Lorze mit Stoffen aus kommunalem Abwasser ist flussabwärts der Einleitstelle der ARA Schönau relativ hoch. Das Schmerzmittel Diclofenac überschreitet in der Lorze regelmässig das korrespondierende Qualitätskriterium für Oberflächengewässer von 50 ng/L. Die stoffliche Wasserqualität der Lorze ist aufgrund dessen als ungenügend einzustufen. Mit Hilfe von Szenarienanalysen konnte gezeigt werden, dass dieses Problem mittels des Ausbaus der ARA Schönau mit einem weitergehenden Verfahren zur Elimination von Mikroverunreinigungen gelöst werden könnte.

Die Belastung des Aegeri- und Zugersees mit den meisten aktuell in der Landwirtschaft eingesetzten Pflanzenschutzmitteln ist vergleichbar mit andern Seen in ruralen Gebieten, wie beispielsweise dem Bodensee. In der Gegenüberstellung zum Vierwaldstättersee, welcher vergleichsweise mehr Wasser aus Berggebieten aufweist, sind die Konzentrationen aber generell höher. Auffällig sind im Zugersee insbesondere die hohen gemessenen Atrazin- und Desethyl-Atrazin Konzentrationen. Atrazin ist in der Landwirtschaft seit rund 4 Jahren nicht mehr zugelassen und wurde im Gleisbereich bereits 1989 zuerst durch Diuron, danach durch Glyphosat ersetzt. Aufgrund der hohen mittleren Wasseraufenthaltszeit im Zugersee von ca. 30 Jahren, sind früher eingesetzte Stoffe immer noch nachweisbar und werden nur langsam aus dem See ausgetragen. Die erhöhten Atrazinkonzentrationen könnten somit aus früheren landwirtschaftlichen Applikationen, aus Anwendungen im Gleisbereich, oder aus beiden Verwendungen stammen. Unter anderem werden auch die bei Regen anfallenden Abwässer der Gleisanlage Bahnhof Rotkreuz über den Rotkreuzstollen auf die Zugerseeseite geführt. Aufgrund der vorliegenden Daten und der Stoffflussanalyse kann die Quelle aber nicht eindeutig zugeordnet werden.

Fazit

Für das Einzugsgebiet des Zuger- und des Ägerisees ergeben sich aus der vorliegenden Studie die folgenden Kernaussagen und Handlungsempfehlungen:

- I. Die Aufhebung der direkt in den Zugersee einleitenden ARA und die Ableitung des Abwassers über die Ringleitung des GVRZ zeigen sich als effektive Massnahmen zur Verminderung von Spurenstoffen aus kommunalem Abwasser im Aegeri- und Zugersee. Es besteht momentan kein zusätzlicher Handlungsbedarf zur Verminderung der Einleitung von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser über die Entlastungen des Ringsystems.
- II. Der geplante Ausbau der ARA Schönau mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe für organische Spurenstoffe ist eine zielführende und sinnvolle Massnahme um die Wasserqualität im gesamten Einzugsgebiet inkl. der Lorze weiter zu verbessern.
- III. Landwirtschaftliche Einleitungen und Einleitungen von Gleisabwasser und Regenkanälen sind Themen, die für den Zugersee noch genauer betrachtet werden sollten. Die gemessenen Werte und die taxierten Stoffbilanzen weisen darauf hin, dass die Einträge im Vergleich zu anderen Seen, wie z.B. dem Vierwaldstättersee oder dem Bodensee teilweise höher sind. Dabei wäre es insbesondere sinnvoll, Glyphosat, das aktuell meisteingesetzte Pflanzenschutzmittel und der Ersatzstoff für Atrazin im Gleisbereich, in die Betrachtungen miteinzubeziehen und Orientierungsmessungen im Zugersee durchzuführen.
- IV. Die Messungen von Spurenstoffen im Zugersee sollten periodisch wiederholt werden, z.B. in Abständen von 2-4 Jahren. Dabei soll auch ein besonderes Augenmerk auf neue Stoffe, z.B. Glyphosat, gelegt werden.

2 EINLEITUNG

2.1 Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser

Organische Spurenstoffe in natürlichen Gewässern stehen in Politik, Vollzug und in der jüngsten Umweltforschung mehr und mehr im Zentrum des Interessens. Neben verschiedenen Messkampagnen und Studien, in welchen organische Spurenstoffe in diversen Gewässern nachgewiesen wurden, werden auch negative Effekte dieser Substanzen im tieferen $\mu\text{g/L}$ und teilweise bereits im ng/L Bereich nachgewiesen (Hirsch, et al., 1999; Escher, et al., 2008; Götz, et al., 2010; Longrée, et al., 2011; DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe, 2002; Umweltministerium Baden-Württemberg, 2008). Diese organischen Spurenstoffe werden aufgrund des Konzentrationsbereiches welcher typischerweise im ng/L bis $\mu\text{g/L}$ Bereich liegt auch Mikroverunreinigungen genannt.

Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser, also Arzneimittelrückstände, Haushaltschemikalien, Biozide und weitere Stoffe mit Ursprung im Siedlungsgebiet, haben einen grossen Anteil an den in Gewässern gefundenen anthropogenen organischen Spurenstoffen (Gälli, et al., 2009; Abegglen, et al., 2012; Longrée, et al., 2011; DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), 2008). Für Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser können vier Haupteintragspfade in die Gewässer unterschieden werden: (1) Eintrag mit gereinigtem Abwasser über Kläranlagen; (2) Eintrag mit ungereinigtem Abwasser über Mischwasserentlastungen bei Kapazitätsüberschreitungen der Kanalisation und der Kläranlagen; (3) Eintrag durch Leckagen in der Kanalisation oder Fehllanschlüsse; und (4) Eintrag mit verschmutztem Niederschlagswasser von Dächern oder versiegelten Flächen durch Regenkanäle. Da viele Mikroverunreinigungen in konventionellen Kläranlagen nicht gut abgebaut werden und mengenmässig der grösste Anteil an Abwasser durch Kläranlagen in die Gewässer eingetragen wird, stellt generell der Eintrag über Kläranlagen für die meisten Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser den wichtigsten Eintragspfad dar (Gälli, et al., 2009). Dies ist in den hier untersuchten Fällen Zuger- und Ägerisee anders, da beide keine direkte oder indirekte (in einem Zufluss) ARA-Einleitung aufweisen. Die spezielle Situation für Zuger- und Ägerisee wird unter Kapitel 2.3 genauer ausgeführt.

Um der Problematik von Rückständen von Arzneimittel, Haushaltschemikalien, Bioziden etc. in den Gewässern, sogenannten Mikroverunreinigungen, zu begegnen, arbeitet das Bundesamt für Umwelt BAFU seit einigen Jahren daran, den Handlungsbedarf zu evaluieren und Handlungsstrategien zu entwickeln (Schärer, et al., 2010; Abegglen, et al., 2012). Für Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser wurde ein Handlungsbedarf identifiziert und es wurden bereits entsprechende gesetzliche Anpassungen vorbereitet: Am 25. April 2012 hat der Bundesrat und das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) in einer Medienmitteilung die wichtigsten Eckpunkte einer geplanten Änderung der Gewässerschutzge-

setzung kommuniziert (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, 2012). Dabei stehen Massnahmen bei Kläranlagen im Vordergrund. Grössere Anlagen und Anlagen an kritischen Gewässerabschnitten sollen mit einer weitergehenden Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen ausgerüstet werden. Die ARA Schönau Cham fällt mit mehr als 80'000 angeschlossenen Einwohnerinnen und Einwohnern aufgrund ihrer Grösse zwingend unter die Kläranlagen, die für einen Ausbau vorgesehen werden (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, 2012).

2.2 Spurenstoffe aus unterschiedlichen Quellen

Mikroverunreinigungen können aus verschiedensten Quellen und über unterschiedliche Eintragspfade in die Gewässer gelangen. Unter anderem über gereinigtes Abwasser (ARA), über ungereinigtes Abwasser (Mischwasserentlastungen), über Regenentwässerungssysteme aus dem Siedlungsgebiet oder von Strassen und Geleisen oder auch durch Oberflächenabfluss und Drainagen von landwirtschaftlichen Flächen.

Um die Einträge von Mikroverunreinigungen in oberirdische Gewässer zu quantifizieren, die richtige Erhebungsstrategie auszuwählen und um mögliche Reduktionsstrategien zu entwickeln, ist es essentiell, eine Übersicht über Quellen und Eintragspfade von Mikroverunreinigungen zu haben. Das BAFU hat in den letzten Jahren das Projekt „Mikroverunreinigungen aus diffusen Quellen“ lanciert, in welchem alle Quellen und Eintragspfade neben den im Projekt Micropoll untersuchten Eintrag über Kläranlagen genauer angeschaut werden. Wichtige Quellen und Eintragspfade sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Quellen und Eintragspfade von Mikroverunreinigungen, sowie damit verbundene Landnutzungen. Angepasst nach (Strahm, et al., 2013).

| Quelle | Eintragspfad | Landnutzung | Anteil der Fläche an der Gesamtfläche der Schweiz |
|---|--|--|---|
| Siedlung | ARA Mischwasserüberläufe Regenkanäle | Siedlungsflächen ¹ | 5.70% |
| Verkehr | Gleisabwasser Strassenabwasser | Strasse Eisenbahn | 2.03% 0.02% |
| Deponien | Sickerwasser | Deponien | 0.06% |
| Landwirtschaft (Agrarwirtschaft & Nutztierhaltung) | Oberflächenabfluss Drainagen | Obst Reben Ackerland Übrige Grünflächen | 0.58% 0.38% 8.90% 21.56% |
| Aktivitäten in und am Wasser | Direkt | Wasser | - |
| Atmosphäre | Atmosphärische Deposition | | |

Die betrachteten Seen im Einzugsgebiet der ARA Schönau weisen alle keine direkten Einleitungen von gereinigtem Abwasser über ARA mehr auf. Die Eintragspfade, die untersucht werden müssen sind daher diffuse Einträge inkl. Einträge über Mischwasserentlastungen.

2.3 Region Zugersee, Küsnachtersee und Ägerisee – ARA Schönau

Nach den oben vorgestellten aktuellen Kriterien des Entwurfs zur Anpassung der GSchV fällt die ARA Schönau in Cham unter die Anlagen, die mit einer weitergehenden Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen ausgerüstet werden müssten.

Die ARA Schönau reinigt das Abwasser von rund 143'000 Einwohnern der Kantone Zug, Schwyz und Luzern und ist die einzige Kläranlage des Kantons Zug. Sie leitet das Abwasser unterhalb des Zugersees in die Lorze ein. D.h. sowohl in den Zuger- wie auch in den Küsnachter- und den Ägerisee wird seit der Aufhebung der regionalen ARA und der Fertigstellung der Ringleitungen kein gereinigtes Abwasser mehr eingeleitet.

Die Kläranlage Schönau wird vom Gewässerschutzverband der Region Zugersee-Küsnachtersee-Ägerisee (GVRZ) betrieben. Der GVRZ verwaltet und betreibt auch das rund 75 Kilometer lange Ringsystem, welches das gesamte Abwasser der Region auf die ARA Schönau führt. In der Abbildung 1 sind das Kanalsystem der gesamten Region und die ARA Schönau abgebildet.

¹ Für detaillierte Auswertungen wurde die Siedlung weiter unterteilt in Dachflächen, Fassadenflächen, Verkehrsflächen und Grünflächen

Verschiedene Untersuchungen wie beispielsweise die Analyse von Nährstoffen zeigen, dass die Situation des Zugersees beispielhaft ist und dass die Massnahme der Zusammenfassung sämtlichen Abwassers auf die ARA Schönau bezüglich Gewässerschutz sehr erfolgreich war. Für Mikroverunreinigungen gibt es aber noch wenige Untersuchungen im See und im Einzugsgebiet. Anhand von Messungen von Mikroverunreinigungen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie ist die aktuelle Situation betreffend Mikroverunreinigungen im Zugersee und im Ägerisee und besteht Handlungsbedarf? Wie ist die Situation im Vergleich zu anderen Seen mit Trinkwassergewinnung wie beispielsweise dem Bodensee?
- Welches sind die vergleichsweise wichtigsten Quellen und Eintragspfade für Mikroverunreinigungen für den Zugersee?
- Durch die Ringleitung um den Zugersee kann bei Regenwetter ungereinigtes Abwasser über Mischwasserentlastungen in den See gelangen. Gelangen dadurch relevante Frachten in den See?
- Bei einem Ausbau der ARA Schönau mit einer Stufe zur weitergehenden Entfernung von Mikroverunreinigungen aus dem Abwasser würde die Fracht an Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser verringert. Wie ist diese Massnahme bzw. Frachtreduktion für die Region zu bewerten? Zur Beantwortung dieser Fragestellung ist es essentiell die verschiedenen Eintragspfade zu bilanzieren.

3 VORGEHEN UND MESSKONZEPT

Um die verschiedenen Fragen zu beantworten wurde in mehreren Stufen vorgegangen. In Abbildung 2 ist das Vorgehen schematisch abgebildet. Die verschiedenen Stufen werden im Folgenden kurz erläutert.

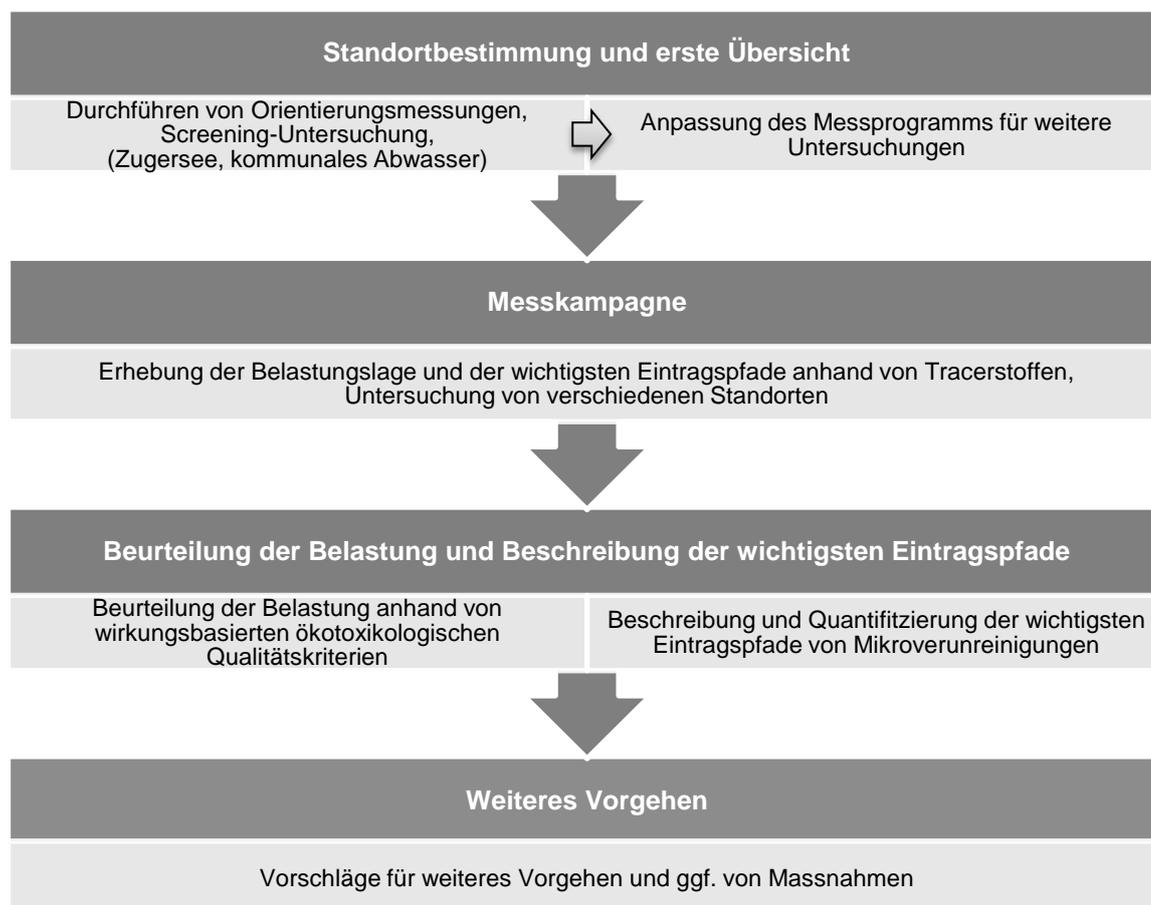


Abbildung 2: Schematische Beschreibung des Vorgehens.

3.1 Standortbestimmung und erste Übersicht

Im Zuger- als auch im Ägerisee sind bisher keine systematischen Messungen von polaren Mikroverunreinigungen aus verschiedenen Quellen vorhanden. Um eine erste Übersicht zu bekommen und die Belastungslage der beiden Seen mit anderen Schweizer Seen vergleichen zu können, sollen in einem ersten Schritt drei Mischproben vom Zugersee auf Mikroverunreinigungen aus verschiedenen Quellen untersucht werden. Dabei sollen im oberen Zugersee zwei Tiefen untersucht (5m und 150m) und im Auslauf vom Zugersee eine Probe analysiert werden. Im Weiteren kann eine Untersuchung der Eawag vom 2010 vom ARA Auslauf herangezogen werden. Aufgrund dieser Er-

gebnisse wird die Stoffauswahl für die Messkampagne definiert und es werden erste Abschätzungen durchgeführt.

3.2 Messkampagne - Erhebung der Belastungslage und der wichtigsten Eintragspfade anhand von Tracerstoffen

Insgesamt wurden zu drei verschiedenen Zeitpunkten und an vier Stellen Oberflächenwasserproben entnommen. Im oberen Seebecken des Zugersees werden vom Amt für Verbraucherschutz (AVS) Zug regelmässig Tiefenprofile entnommen und auf verschiedene Parameter überprüft. An dieser Stelle wurden dementsprechend diese Probenahmen kombiniert und verschiedene Tiefen gemessen um die vertikale Verteilung der Konzentrationen der Mikroverunreinigungen abschätzen zu können. In Abbildung 2 sind die vier untersuchten Messpunkte eingetragen: (1) Tiefenprofil im oberen Becken des Zugersees, (2) Auslauf Zugersee, (3) Lorze unterhalb ARA Schönau und (4) Ägerisee.



Abbildung 3: Probenahmepunkte für Messkampagne: (1) Tiefenprofil im oberen Becken des Zugersees, (2) Auslauf Zugersee, (3) Lorze unterhalb ARA Schönau und (4) Ägerisee.

Kommunales Abwasser zeigt in Bezug auf Stoffe aus häuslichem Abwasser eine relativ konstante Zusammensetzung. Stoffe aus Siedlungsflächen, wie beispielsweise Herbizide aus Fassaden oder Hausgärten können hingegen deutlich variieren. Um die Zusammensetzung des Rohabwassers und damit auch die Eintragspfade besser korrelieren zu können, ist es wichtig als Grundlage verschiedene Messungen des Rohabwassers zu haben. Dabei wurden Mischproben, im Zulauf der ARA Schönau bei Trockenwetter und auch nach einem Regenereignis untersucht. In der Tabelle 2 sind die Anzahl Messungen; Zeitpunkte und die verantwortlichen Akteure zusammengefasst.

Tabelle 2: Messungen von Mikroverunreinigungen für das Projekt „Mikroverunreinigungen im Zuger- und Ägerisee“ durch das AVS Zug inkl. den Orientierungsmessungen der Eawag.

| Matrix / Probeort | Zeitpunkt Probenahme | Anzahl | Probenahme durch | Messung durch |
|---|--|----------------|------------------|---------------|
| Rohabwasser / Zulauf ARA Schönau Gereinigtes Abwasser / Ablauf ARA Schönau | Bei Trockenwetter Bei Regenwetter | 4 | GVRZ | AVS Zug |
| Wasser / Oberer Zugersee (1) Tiefe: 5m (Oberflächenwasser) | 19.11.2013 | 1 | AVS Zug / Eawag | Eawag |
| | 11.02.2014 03.04.2014 04.06.2014 | 3 ² | AVS Zug | AVS Zug |
| | 19.11.2013 | 1 | AVS Zug / Eawag | Eawag |
| Wasser / Oberer Zugersee (1) Tiefe: 150m (Tiefenwasser) | 11.02.2014 03.04.2014 04.06.2014 | 3 ³ | AVS Zug | AVS Zug |
| | 19.11.2013 | 1 | AVS Zug / Eawag | Eawag |
| Wasser / Auslauf Zugersee (2) | 28.02.2014 04.04.2014 04.06.2014 | 3 | AVS Zug | AVS Zug |
| | 20.02.2014 04.04.2014 05.06.2014 | 3 | AVS Zug | AVS Zug |
| Wasser / Lorze unterhalb ARA (3) | 28.02.2014 04.04.2014 05.06.2014 | 3 | AVS Zug | AVS Zug |
| Wasser / Ägerisee (4) | 28.02.2014 04.04.2014 05.06.2014 | 3 | AVS Zug | AVS Zug |

² Das AVS Zug führt monatlich eine Probenahme auf dem See durch. In diesem Rahmen können die benötigten Proben entnommen werden.

³ Das AVS Zug führt monatlich eine Probenahme auf dem See durch. In diesem Rahmen können die benötigten Proben entnommen werden.

3.3 Beurteilung der Belastung

3.3.1 Beurteilungsschema

Die Stoffkonzentrationen im Zugersee werden für die ökotoxikologische Beurteilung mit wirkungsbasierten Qualitätskriterien verglichen. Die Risikobewertung erfolgt anhand von Einzelstoffen durch den Vergleich einer Umweltkonzentration (EC) mit dem Qualitätskriterium (QK) der entsprechenden Substanz. Dabei wird ein Risikoquotient bestimmt. Der Risikoquotient (RQ) wird folgendermassen berechnet:

$$\text{RQ} = \text{EC} / \text{QK}$$

Wenn der Risikoquotient grösser als 1 ist, können nachteilige Einwirkungen auf Wasserlebewesen nicht mehr ausgeschlossen werden. Basierend auf den Risikoquotienten können Zustandsklassen der Wasserqualität der Vorfluter definiert werden. Hier werden die in Götz et al. (GWA 7/2010) im Rahmen des Beurteilungskonzeptes für das Bundesamt für Umwelt (BAFU) im Projekt „Strategie Micropoll“ definierten Klassen verwendet. Das System mit fünf Zustandsklassen ist an die Beurteilungsschemen des Modul-Stufen-Konzeptes (MSK) angelehnt.

Tabelle 3: Wirkungsbasierte Beurteilung der chemischen Wasserqualität für Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser angelehnt an das Modul Nährstoffe des Modulstufenkonzeptes des BAFU.

| Zustandsklassen | Bedingung/Beschreibung | | Einhaltung Qualitätskriterium |
|-----------------|--|--------------|--|
| sehr gut | die Umweltkonzentration (EC) ist grösser oder gleich einem Hundertstel des Qualitätskriteriums, aber kleiner als ein Zehntel des Qualitätskriteriums | RQ < 0,1 | Qualitätskriterium eingehalten |
| gut | die Umweltkonzentration (EC) ist grösser oder gleich einem Zehntel des Qualitätskriteriums aber kleiner als das Qualitätskriterium | 0,1 ≤ RQ < 1 | |
| mässig | die Umweltkonzentration (EC) ist grösser oder gleich dem Qualitätskriterium aber kleiner als das Zweifache Qualitätskriterium | 1 ≤ RQ < 2 | Qualitätskriterium überschritten (nicht eingehalten) |
| unbefriedigend | die Umweltkonzentration (EC) ist grösser oder gleich dem zweifachen Qualitätskriterium aber kleiner als das zehnfache Qualitätskriterium | 2 ≤ RQ < 10 | |
| schlecht | die Umweltkonzentration (EC) ist grösser oder gleich dem zehnfachen Qualitätskriterium | RQ ≥ 10 | |

Das Qualitätskriterium ist für die Zustandsklassen „sehr gut“ und „gut“ erfüllt und für die Zustandsklassen „mässig“, „unbefriedigend“ und „schlecht“ nicht erfüllt. Wenn die ARA direkt in den See einleiten wird die entsprechende Einleitstelle nicht einzeln beurteilt, da angenommen wird, dass das eingeleitete Abwasser sich im See verteilt. Der See wird mit Hilfe eines Seenmodells separat modelliert und beurteilt.

3.3.2 Qualitätskriterien

Im Auftrag des BAFU hat das schweizerische Zentrum für angewandte Ökotoxikologie (Oekotoxzentrum) in den letzten drei Jahren für verschiedene Stoffe wirkungsbasierte Umweltqualitätskriterien auf der Basis von ökotoxikologischen Daten aus der Literatur hergeleitet. Das Oekotoxzentrum tauscht seine Daten und Erfahrungen zu Qualitätskriterien mit mehreren EU-Nationen aus. Der Informationsaustausch soll zu einer Harmonisierung der Qualitätsstandards beitragen und redundante Arbeiten verhindern.

„Umweltqualitätskriterien sind Richtwerte für die Konzentration einzelner Chemikalien, die eingehalten werden sollten, um ein vorgegebenes Qualitätsziel zu erfüllen. Sie werden auf Basis der akuten und chronischen Schädigung von Umweltorganismen mit Hilfe von Risikobewertungsmodellen abgeleitet. Qualitätskriterien werden in der Umweltregulation verwendet, um Umweltkontaminationen einzuschränken und die Auswirkungen bestehender Kontaminationen besser beurteilen zu können.“ (<http://www.oekotoxzentrum.ch/expertenservice/qualitaetskriterien/index>)

Vorschläge des Ökotoxzentrums für Qualitätskriterien für verschiedene Arzneimittel und Steroidhormone, Pestizide, Industriechemikalien und Komplexbildner sind auf deren Homepage publiziert und werden laufend aktualisiert.

Für die in dieser Arbeit modellierten Arzneimittel Carbamazepin, Diclofenac und Sulfamethoxazol, sowie für das Korrosionsschutzmittel Benzotriazol existieren solche Qualitätskriterienvorschläge. Für die anderen modellierten Substanzen gibt es zurzeit noch keine wirkungsbasierten Qualitätskriterien.

Tabelle 4: Aktuelle Qualitätskriterienvorschläge des Oekotoxentrums (Stand November 2014, <http://www.oekotoxzentrum.ch>). Teil 1

| Substanz | CAS Nummer | Akutes Qualitätskriterium (MAC-EQS) | Chronisches Qualitätskriterium (AA-EQS) |
|--|--------------------------|-------------------------------------|---|
| Arzneimittel und Steroidhormone | | | |
| 17-alpha-Ethinylestradiol | 57-63-6 | nicht vorgeschlagen | 0.037 ng/l |
| 17-beta-Estradiol | 50-28-2 | nicht vorgeschlagen | 0.4 ng/l |
| Atenolol | 29122-68-7 | 330 µg/l | 150 µg/l |
| Azithromycin | 83905-01-5 | 0.09 µg/l | 0.09 µg/l* |
| Bezafibrat | 41859-67-0 | 76 µg/l | 0.46 µg/l* |
| Carbamazepin | 298-46-4 | 2550 µg/l | 0.5 µg/l |
| 10,11-Dihydro-10,11-Dihydroxy-Carbamazepin | 58955-93-4 | aktuell nicht möglich | aktuell nicht möglich |
| Ciprofloxacin | 85721-33-1 | 363 ng/l | 89 ng/l |
| Clarithromycin | 81103-11-9 | 0.11 µg/l | 0.06 µg/l* |
| Diatrizoat (3,5-Diacetylamino-2,4,6-trijodbenzoesäure) | 117-96-4 | aktuell nicht möglich | aktuell nicht möglich |
| Diclofenac | 15307-86-5, (15307-79-6) | nicht vorgeschlagen | 0.05 µg/l* |
| Erythromycin | 114-07-8 | 2.3 µg/l | 0.04 µg/l |
| Estron | 53-16-7 | nicht vorgeschlagen | 3.6 ng/l |
| Ibuprofen | 15687-27-1, (31121-93-4) | 23 µg/l | 0.3 µg/l* |
| Iomeprol | 78649-41-9 | aktuell nicht möglich | aktuell nicht möglich |
| Iopamidol | 60166-93-0 | aktuell nicht möglich | aktuell nicht möglich |
| Iopromide | 73334-07-3 | aktuell nicht möglich | aktuell nicht möglich |
| Irbesartan | 138402-11-6 | 19100 µg/l | 704 µg/l |
| Mefenaminsäure | 61-68-7 | 40 µg/l | 4 µg/l* |
| Metformin | 657-24-9 | 9100 µg/l | 1000 µg/l |
| Metoprolol | 37350-58-6 | 76 µg/l | 64 µg/l |
| Naproxen | 22204-53-1, (26159-34-2) | 370 µg/l | 1.7 µg/l(*) |
| Propranolol | 01.09.4199 | 12000 ng/l | 160 ng/l |
| Sotalol | 3930-20-9 | aktuell nicht möglich | aktuell nicht möglich |
| Sulfamethazin | 57-68-1 | 30 µg/l | 30 µg/l |
| Sulfamethoxazol | 723-46-6 | 2.7 µg/l | 0.6 µg/l |
| Trimethoprim | 738-70-5 | 1100 µg/l | 60 µg/l |
| Valsartan | 137862-53-4 | 9000 µg/l | 560 µg/l |

*Für diese Substanzen könnte zusätzlich ein sekundäres Intoxikationsrisiko bestehen, welches numerisch noch nicht berücksichtigt wurde.

#Für einige Substanzen sind das chronische (AA-EQS) und das akute (MAC-EQS) Qualitätskriterium identisch. Dies kann der Fall sein, wenn die akute Toxizität und die chronische Toxizität nicht weit auseinanderliegen. Wenn dann für die Berechnung des MAC-EQS ein höherer Assessmentfaktor benutzt wird als für die Berechnung des AA-EQS (100 statt 10) wäre der MAC-EQS tiefer als der AA-EQS. In solchen Fällen wird gemäss der technischen Vorschrift für die Herleitung von EQS der MAC-EQS auf den AA-EQS angehoben.

Tabelle 7 (Fortsetzung)

| Substanz | CAS Nummer | Akutes Qualitätskriterium (MAC-EQS) | Chronisches Qualitätskriterium (AA-EQS) |
|------------------------------|--|-------------------------------------|--|
| Pestizide | | | |
| AMPA (Abbauprodukt) | 1066-51-9 | 1500 µg/l | 1500 µg/l |
| Boscalid | 188425-85-6 | 11.6 µg/l | 11.6 µg/l |
| Carbendazim | 10605-21-7 | 0.57 µg/l | 0.34 µg/l |
| Chlortoluron | 15545-48-9 | 0.85 µg/l | 0.6 µg/l |
| Cypermethrin | 52315-07-8 | 6*10 ⁻⁴ µg/l | 8*10 ⁻⁵ µg/l |
| 2,4-D | 94-75-7 | 1.3 µg/l | 0.2 µg/l |
| Diethyltoluamid (DEET) | 134-62-3 | 410 µg/l | 41 µg/l |
| Diazinon | 333-41-5 | 0.015 µg/l [#] | 0.015 µg/l [#] |
| Dimethoat | 60-51-5 | 0.977 µg/l | 0.07 µg/l |
| Diuron | 330-54-1 | 0.06 µg/l | 0.02 µg/l |
| Ethofumesat | 26225-79-6 | 26 µg/l | 22 µg/l |
| Glyphosat | 1071-83-6 | 300 µg/l (SSD) | 108 µg/l (SSD) |
| Imidacloprid | 138261-41-3 | 0.1 µg/l | 0.013 µg/l |
| Irgarol (Cybutryn) | 28159-98-0 | 0.013 µg/l | 0.0023 µg/l |
| Isoproturon | 34123-59-6 | 1.2 µg/l | 0.32 µg/l |
| Linuron | 330-55-2 | 1.37 µg/l | 0.26 µg/l |
| MCPA | 94-74-6 | 15.2 µg/l | 1.34 µg/l |
| Mecoprop-P | 16484-77-8 | 187 µg/l | 3.6 µg/l |
| Metamitron | 41394-05-2 | 39 µg/l | 4.0 µg/l |
| Pirimicarb | 23103-98-2 | 1.6 µg/l | 0.09 µg/l |
| Propamocarb | 25606-41-1 | 1030 µg/l | 1030 µg/l |
| Tebuconazol | 107534-96-3 | 1.4 µg/l | 1.2 µg/l |
| Terbutylazin | 5915-41-3 | 1.28 µg/l | 0.22 µg/l |
| Terbutryn | 886-50-0 | 0.34 µg/l | 0.065 µg/l |
| Triclosan | 3380-34-5 | 0.02 µg/l [#] | 0.02 µg/l [#] |
| Industriechemikalien | | | |
| Benzothiazol | 95-16-9 | 246 µg/l | 238 µg/l |
| Benzotriazol | 95-14-7; (273-02-9) | 120 µg/l | 30 µg/l |
| Bisphenol A (BPA) | 80-05-7 | nicht vorgeschlagen | 1.5 µg/l |
| Methylbenzotriazol | 29878-31-7, 29385-43-1, (64665-57-2) | 200 µg/l | 75 µg/l |
| Nonylphenol | 25154-52-3, 84852-15-3 | 3270 ng/l | 13 ng/l |
| Perfluoroktansulfonat (PFOS) | 1763-23-1 | 36 µg/l | 230 ng/l* (basiert auf direkter aquatischer Langzeittoxizität); Biota-EQS = 9.1 µg/kg |
| Komplexbildner | | | |
| EDTA | 60-00-4 | 12100 µg/l | 2200 µg/l |
| NTA | 139-13-9, (5064-31-3) | 9800 µg/l | 190 µg/l |

*Für diese Substanzen könnte zusätzlich ein sekundäres Intoxikationsrisiko bestehen, welches numerisch noch nicht berücksichtigt wurde.

#Für einige Substanzen sind das chronische (AA-EQS) und das akute (MAC-EQS) Qualitätskriterium identisch. Dies kann der Fall sein, wenn die akute Toxizität und die chronische Toxizität nicht weit auseinanderliegen. Wenn dann für die Berechnung des MAC-EQS ein höherer Assessmentfaktor benutzt wird als für die Berechnung des AA-EQS (100 statt 10) wäre der MAC-EQS tiefer als der AA-EQS. In solchen Fällen wird gemäss der technischen Vorschrift für die Herleitung von EQS der MAC-EQS auf den AA-EQS angehoben.

Für die Beurteilung der Belastungslage und des Handlungsbedarfs wurden die chronischen Qualitätskriterien verwendet.

3.4 Beschreibung der wichtigsten Eintragspfade

In den Zuger-, in den Küsnachter- und den Ägerisee werden seit der Aufhebung der regionalen ARA und der Fertigstellung der Ringleitungen kein gereinigtes Abwasser mehr eingeleitet. Abwassereinleitungen in die genannten Seen können nur durch Mischwasserentlastungen erfolgen. Neben den kommunalen Kläranlagen ist die Landwirtschaft ebenfalls eine potenziell wichtige Quelle für organische Verunreinigungen. Durch die Auswertung des von der Eawag durchgeführte Stoffscreenings, die länger angelegte Messkampagne verschiedener Tracerstoffe und die Auswertung der Frachten mit einer einfachen Massenbilanz werden die verschiedenen eintragspfade mit einander verglichen und deren Bedeutung bewertet. Für die Bewertung der Wichtigkeit der verschiedenen Stoffeinträge kommen neben den Massenbilanzen auch die ökotoxikologischen Bewertungskriterien zum Einsatz. Die Massenbilanz wird anhand eines einfachen Seenmodells (MASASlight) gerechnet.

3.4.1 Massenbilanz - Seemodellierung

Die Massenbilanzen wurden über einen längeren Zeitraum abgeschätzt und es wurden Jahresmittelwerte der Einträge ermittelt. Als Modellsoftware für die Seemodellierung wurde das Programm *MASASlight* (Modeling Anthropogenic Substances in Aquatic Systems) von Markus Ulrich, Eawag Dübendorf. In der Seenuntersuchung vom Bodensee, in welcher verschiedene Seetiefen und Probenahmeorte analysiert und mit dem hier angewandten Modell *MASASlight* Combi-Box verglichen wurden, hat sich gezeigt, dass man mit diesen einfachen Modellannahmen die im See gemessenen Konzentrationen gut erklären kann (Singer, et al., 2009; Longrée, et al., 2011; Moschet, 2010). Für die Parametrisierung des Modells müssen verschiedene Angaben über den See, wie Oberfläche, Volumen, Wasseraufenthaltszeit etc. bekannt sein. In der Tabelle 5 sind die benötigten Parameter für den Zugersee, den Küsnachtersee (resp. den gesamten Vierwaldstättersee) und den Ägerisee wiedergegeben.

Tabelle 5: Zusammenfassung der für die Seemodellierung mit MASASlight verwendeten Parameter.
Quelle der Daten: (Aqua Plus, 2004; Götz, 2013)

| Parameter | Einheit | Zugersee | Küsnachtersee (Kennzahlen Vierwaldstättersee ohne Aplanachersee) | Ägerisee |
|----------------------------|-------------------|---------------|---|-------------|
| Oberfläche | km ² | 38.44 | 110 | 7.30 |
| Volumen | m ³ | 3'200'000'000 | 11'880'000'000 | 360'000'000 |
| Maximale Tiefe | m | 198 | 214 | 83 |
| Mittlere Tiefe | m | 83.2 | 117 | 48.9 |
| Abfluss | m ³ /s | 7.1 | 109 | 1.5 |
| Wasseraufenthaltszeit | Jahre | 14.7 | 3.4 | 6.8 |
| Übergang Epi- /Hypolimnion | m | 20 | 20 | - |

In diesem Projekt wurden nur der Stofffluss und die Konzentrationen für den Zugersee modelliert. Da keine Messdaten vorhanden sind konnte der Ägerisee nicht modelliert werden. Die Belastung im Küssnachersee wurde bereits 2013 im Projekt „Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser im Vierwaldstättersee und der Luzerner Reuss - Beurteilung des Einzugsgebiets und des Sees“ dargestellt und beurteilt (Götz, 2013).

Für die Modellierung des Zugersee wurde die zwei-box Variante von *MASASlight* verwendet. Dabei wird angenommen, dass der See nie vollständig durchmischt. Im Weiteren wurde angenommen, dass die Schadstoffeinträge über die Landwirtschaft oder die Mischwasserentlastungen zu 100% ins Epilimnion eingetragen werden. Es wurde angenommen, dass der Schadstoffaustausch zwischen Epilimnion und Hypolimnion nur durch Diffusion der Stoffe erfolgt und im Hypolimnion kein Abbau und auch keine Advektion der Wassermassen erfolgt. Das Wasser des Epilimnions wird mit $7.1 \text{ m}^3/\text{s}$ erneuert.

4 ERGEBNISSE DER ORIENTIERUNGSMESSUNGEN UND DER MESSKAMPAGNE

4.1 Substanzinventarisierung ARA Schönau im 2010

Beim Substanzscreening im Jahr 2010, welches von der Eawag im Auftrag des BAFU in den grössten Schweizer ARA durchgeführt wurde, waren Stoffe aus häuslichem Abwasser im Fokus. In erster Linie wurden dabei Arzneimittel und deren Abbauprodukte angeschaut. In Tabelle 6 sind die gemessenen Substanzen und die Angabe des Medians über alle untersuchten ARA angegeben (vollständige Tabelle in Anhang 1).

Tabelle 6: Messung Auslauf ARA Schönau 24h-Sammelprobe v. 24.02.2010 (SPE, LC-Orbitrap)

| CAS-Nummer | Parameter | Bestimmungs-grenze ng/L | Messwert ARA Schönau ng/L | Median Kampagne 2010 ng/L | Quotient |
|-------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|----------|
| 29122-68-7 | Atenolol | 5.0 | 970 | 880 | 1.10 |
| 298-46-4 | Carbamazepin | 10 | 460 | 370 | 1.24 |
| 81103-11-9 | Clarithromycin | 15 | 410 | 375 | 1.09 |
| 15307-86-5 | Diclofenac | 5.0 | 1'000 | 1'000 | 1.00 |
| 60142-96-3 | Gabapentin | 1000 | 1'300 | 1'900 | 0.68 |
| 58-93-5 | Hydrochlorothiazid | 70 | 1'200 | 1'200 | 1.00 |
| 84057-84-1 | Lamotrigin | 10 | 630 | 395 | 1.59 |
| 137-58-6 | Lidocain | 10 | 220 | 225 | 0.98 |
| 657-24-9 | Metformin | 10 | 1'900 | 2'650 | 0.72 |
| 37350-58-6 | Metoprolol | 20 | 330 | 350 | 0.94 |
| 3930-20-9 | Sotalol | 5.0 | 210 | 330 | 0.64 |
| 723-46-6 | Sulfamethoxazol | 10 | 390 | 245 | 1.59 |
| 144-83-2 | Sulfapyridin | 20 | 200 | 125 | 1.60 |
| 27203-92-5 | Tramadol (+ O-Desvenlafaxin) | 10 | 940 | 995 | 0.94 |
| 93413-69-5 | Venlafaxin | 5.0 | 240 | 270 | 0.89 |
| 83-15-8 | 4-Acetamidoantipyrin | 10 | 1'300 | 1'300 | 1.00 |
| 1672-58-8 | 4-Formyl-aminoantipyrin | 10 | 610 | 650 | 0.93 |
| 56392-14-4 | Atenolol acid (Metoprolol acid) | 20 | 810 | 1'550 | 0.52 |
| 58955-93-4 | Carbamazepin-dihydro-dihydroxy | 25 | 1'300 | 1'100 | 1.18 |
| 135308-74-6 | N,O-Didesvenlafaxin* | 150 | 150 | 230 | 0.65 |
| 93413-62-8 | O-Desvenlafaxin (+ Tramadol) | 10 | 940 | 995 | 0.94 |
| 164265-78-5 | Valsartansäure | 80 | 1'000 | 240 | 4.16 |
| 10605-21-7 | Carbendazim | 15 | 49 | 35.5 | 1.38 |
| 330-54-1 | Diuron | 10 | 33 | 29.5 | 1.11 |
| 134-62-3 | N,N-diethyl-3-methylbenzamide | 10 | 100 | 110 | 0.91 |
| 886-50-0 | Terbutryn | 5.0 | 19 | 19 | 1.00 |
| 92-41-1 | 2,7-Naphthalindisulfonsäure | 400 | 680 | 680 | 1.00 |
| 95-14-7 | Benzotriazol | 100 | 3600 | >4'000 | - |
| 55589-62-3 | Acesulfam | 50 | >4'000 | >4'000 | - |
| 56038-13-2 | Sucralose | 50 | 2'800 | 2'800 | 1.00 |

Die Untersuchungen im ARA Auslauf zeigen keine speziellen Auffälligkeiten. Im Allgemeinen sind die Konzentrationen in der ARA Schönau bei Trockenwetter Nahe am Median über alle untersuchten ARA.

4.2 Orientierungsmessungen Zugersee 2013

4.2.1 Probenahme Herbst 2013

Am 19. November 2013 wurden im Rahmen dieses Projekts im Einzugsgebiet des Zugersees vom AVS zusammen mit der Eawag verschiedene Proben entnommen. In einer Auswahl ich welchen zur ersten Orientierung eine breite Palette an Spurenstoffen gemessen wurde.

Tabelle 7: Probenahme vom 19.11.2013 in der Region Zugersee. Proben für Orientierungsmessungen / Standortbestimmung betr. Mikroverunreinigungen aus diversen Quellen.

| Ort | Proben | Analysen |
|--|-------------------------|--|
| Südliches Seebecken | 5m (Epilimnion) | Substanz-Screening Eawag |
| | 100m (Hypolimnion) | Rückstellprobe |
| | 150m (Hypolimnion) | Substanz-Screening Eawag |
| Mittleres Seebecken (zwischen Risch und Chiemen) | 5m (Epilimnion) | Rückstellprobe |
| | 100m (Hypolimnion) | Rückstellprobe |
| Seeauslauf Lorze bei Cham | Flussmitte (Oberfläche) | Substanz-Screening Eawag (Mischprobe) |
| | Ost (Oberfläche) | |
| | West (Oberfläche) | |

4.2.2 Ergebnisse der Orientierungsmessungen Zugersee

Für die Bestimmung von rund 500 Substanzen mit der aktuellen Orbitrap Methode der Eawag Ende 2013, wurden drei der im Zugersee gezogenen Proben ausgewertet (sie-

he oben). Alle Positivbefunde sind in Anhang 2 zusammengefasst und alle Stoffe, die in mindestens einer der untersuchten Wasserproben eine Konzentration von >1 ng/L aufwiesen in Tabelle 8.

Tabelle 8: Substanzinventarisierung Zugersee. Positivbefunde mit Konzentrationen >1 ng/L in mindestens einer der untersuchten Wasserproben.

| Name | Wirkstoffgruppe | Zugersee Ablauf | Zugersee südliches Becken 5m | Zugersee südliches Becken 150m |
|---|-------------------------|--------------------|---------------------------------------|---|
| Carbendazim | Biozid | 3.6 | 4.3 | 3.7 |
| Diuron | Biozid | 5.6 | 3 | 5.2 |
| Irgarol-descyclopropyl | Biozid | 1.7 | 2 | 2.3 |
| N-N-diethyl-3-methylbenzamid (DEET) | Biozid | 11 | 11 | 9.8 |
| 2-6-Dichlorbenzamid | Pestizid | 8.5 | 8.8 | 9.1 |
| Atrazin | Pestizid | 30 | 29 | 42 |
| Atrazin-2-Hydroxy | Pestizid | 7.3 | 6.8 | 9.8 |
| Atrazin-Desethyl | Pestizid | 23 | 22 | 30 |
| Atrazin-desethyl-2-hydroxy | Pestizid | 2.5 | 2.6 | 3.9 |
| Atrazin-Desisopropyl | Pestizid | 8.4 | 9.6 | 12 |
| Azoxystrobinsaeure | Pestizid | 1.3 | 1.6 | 1 |
| MCPA | Pestizid | 3.7 | 3.7 | 2.4 |
| Mecoprop | Pestizid | 19 | 20 | 12 |
| Metolachlor | Pestizid | 3.3 | 3.3 | 0.9 |
| Metolachlor-ESA | Pestizid | 12 | 11 | 8.5 |
| Prometryn/Terbutryn | Pestizid | 1.0 | 1.1 | 1.3 |
| Propazin-2-hydroxy&Terbutylazin-2-hydroxy | Pestizid | 9.2 | 11 | 11 |
| Simazin | Pestizid | 5.5 | 5.4 | 8.9 |
| Simazin-2-hydroxy | Pestizid | 1.8 | 1.7 | 2.3 |
| Terbutylazin | Pestizid | 9.6 | 8.9 | 6.3 |
| Terbutylazin-desethyl | Pestizid | 6.2 | 6.3 | 3.7 |
| Perfluorhexansaeure (PFHxA) | PFC | 1.9 | 1.5 | 1.1 |
| Perfluorhexansulfonsaeure (PFHxS) | PFC | 2 | 1.8 | 1.5 |
| Perfluoroctansaeure (PFOA) | PFC | 1.9 | 1.7 | 1.5 |
| Perfluoroctansulfonsaeure (PFOS) | PFC | 6.5 | 5.7 | 6.3 |
| Tetraglyme | Industriechemikalie | 3.6 | 3.5 | 2.3 |
| Triethylphosphat | Industriechemikalie | 26 | 18 | 23 |
| 4&5-Methyl-Benzotriazol | Korrosionsschutzmittel | 11 | 10 | 9.6 |
| Benzotriazol | Korrosionsschutzmittel | 420 | 400 | 480 |
| Acesulfam | Lebensmittelzusatzstoff | 16 | 14 | 12 |
| Cyclamat | Lebensmittelzusatzstoff | 16 | 16 | 19 |
| Coffein | Lebensmittelzusatzstoff | 87 | 65 | 32 |
| Saccharin | Lebensmittelzusatzstoff | 5.3 | 3.5 | <3 |
| Bezafibrat | Arzneimittel | 3.4 | <0.8 | 1 |
| Carbamazepin | Arzneimittel | 3.2 | <0.8 | 1.4 |
| Lamotrigin | Arzneimittel | 7.4 | <2 | 2.3 |
| Metformin | Arzneimittel | 14 | 12 | 10 |
| Phenazon (Antipyrin- ID 2519) | Arzneimittel | 13 | 1.6 | 6.6 |
| Tramadol&O-Desvenlafaxin | Arzneimittel | 7.7 | <2 | 3.3 |
| Trimethoprim | Arzneimittel | 5 | <1 | 3 |

Es wurden insgesamt 6 Biozide, 29 Pestizide, 9 perfluorierte Tenside (PFT), 8 Industrie-, Haushaltschemikalien oder Lebensmittelzusatzstoffe, und 19 Arzneimittel gefunden. Generell wurden im Auslauf des Zugersees die höchsten Konzentrationen gefunden.

Die Stoffe die die höchste Konzentration aufwiesen waren Benzotriazol und Koffein. Koffein ist ein Tracer für den Eintrag von ungereinigtem Abwasser und gelangt hauptsächlich durch Mischwasserüberläufe in die Gewässer, da es in der biologischen Stufe in ARA gut abgebaut wird. Benzotriazol ist ungewöhnlich hoch und muss aus einer zusätzlichen Quelle neben dem häuslichen Abwasser stammen.

4.3 Ergebnisse der Messkampagne

4.3.1 Stoffauswahl

Aufgrund der Orientierungsmessungen im November 2013 wurde eine Stoffliste definiert, welche in der Messkampagne v. Februar bis Juni 2014 analysiert wurde. Neben den Positivbefunden in der Substanzinventarisierung wurde darauf geachtet, dass mit der getroffenen Stoffauswahl möglichst viele unterschiedliche Quellen und Eintragspfade abgedeckt werden können. Die Stoffauswahl mit Angabe der wichtigsten Eintragspfade und Quellen, Informationen zum Gebrauch der Stoffe und den Resultaten aus den Orientierungsmessungen ist in Tabelle 9 wiedergegeben.

Tabelle 9: Stoffauswahl für die Messkampagne 2014 im Einzugsgebiet des Zugersees und der Lorze unterhalb von Cham.

| Stoff | CAS-Nr. | Informationen | Wichtigste Quelle / Eintragspfade | Orientierungsmessungen | | |
|---|------------|---|--|-------------------------|--------------------------------------|--|
| | | | | Zugersee Ablauf ng/L | Zugersee südliches Becken 5m ng/L | Zugersee südliches Becken 150m ng/L |
| Tracerstoffe für gereinigtes Abwasser (Einträge aus ARA, im Fall von Zugersee und Ägerisee auch sehr gut geeignet als konservative Tracer für ungereinigtes Mischwasserentlastungen) | | | | | | |
| Acesulfam (Süssstoff) | 55589-62-3 | Künstlicher Süsstoff, sehr gut geeignet als Abwassertracer. Auch im Grundwasser gefunden | Häusliches Abwasser | 16 | 14 | 12 |
| Benzotriazol (Korrosionsschutz) | 95-14-7 | Korrosionsschutzmittel mit Anwendungen im Haushalt und der Industrie. Unter Anderem in Geschirrspülmittel, Enteiser (Flughafen), etc. | Häusliches Abwasser und Industrieabwasser | 420 | 400 | 480 |
| Carbamazepin (Antiepileptikum) | 298-46-4 | Sehr persistent. Geeigneter Abwassertracer auch im Grundwasser. | Häusliches Abwasser | 3.2 | <0.8 | 1.4 |
| Diclofenac (Analgetikum) | 15307-86-5 | Schmerzmittel, häufig eingesetzt. Für aquatische Ökotoxikologie problematisch | Häusliches Abwasser | <BG | <BG | <BG |
| Sucralose (Süssstoff) | 56038-13-2 | Künstlicher Süsstoff, Verbrauch steigend | Häusliches Abwasser | <BG | <BG | <BG |
| Tracerstoffe für ungereinigtes Abwasser (Mischwasserentlastungen) | | | | | | |
| Cyclamat (Süssstoff) | 139-05-9 | Künstlicher Süsstoff. In ARA gut abbaubar (>95%), daher vor allem über Mischwasserentlastungen eingetragen | Häusliches Abwasser | 16 | 16 | 19 |
| Koffein (Genussmittel) | 58-08-2 | In ARA sehr gut abbaubar (>98%), daher vor allem über Mischwasserentlastungen eingetragen | Häusliches Abwasser | 87 | 65 | 32 |
| Tracerstoffe für Einträge aus Regenkanälen (Trennsysteme) oder Mischwasserentlastungen | | | | | | |
| Diuron (Herbizid) | 330-54-1 | Diverse Anwendungen im Materialschutz, Siedlungsbereich (Totalherbizid) und auch in der Landwirtschaft | Diverse | 5.6 | 3 | 5.2 |
| Mecoprop (Herbizid) | 16484-77-8 | Materialschutz (Flachdächer und andere Bitumenbahnen) und teilw. Rasen in der Siedlung. In der Landwirtschaft nur im Getreide. | Regenkanäle (Materialschutz), Getreide | 19 | 20 | 12 |
| Terbutryn (Herbizid) | 886-50-0 | Materialschutz (Fassaden, Dispersionsfarben) | Fassaden | <BG | <BG | <BG |
| Tracerstoffe für aktuelle Einträge aus der Landwirtschaft | | | | | | |
| 2,6-Dichlorbenzamid (Herbizid-Abbaup.) | 2008-58-4 | Abbauprodukt von Dichlobenil (Anbau von Ziergehölzen und in forstlichen Pflanzgärten) | Abbauprodukt, Forst | 8.5 | 8.8 | 9.1 |
| Metolachlor (Herbizid) | 51218-45-2 | Maisherbizid | Mais | 3.3 | 3.3 | 0.9 |
| Terbutylazin (Herbizid) | 5915-41-3 | Vorauflauf-Herbizid im Sorghum-, Citrus-, Mais-, Wein- und Apfelanbau sowie im Forst und auf Nichtkulturland | Mais, diverse | 9.6 | 8.9 | 6.3 |
| Tracerstoffe für frühere Einträge aus der Landwirtschaft und frühere Einträge von Geleisen | | | | | | |
| Atrazin (Herbizid) | 1912-24-9 | Wurde nur im Maisanbau angewendet (Heute nicht mehr zugelassen). | Mais, nicht mehr zugelassener Stoff, Totalherbizid Geleise | 30 | 29 | 42 |
| Atrazin-Desethyl (Herbizid-Abbaup.) | 6190-65-4 | Abbauprodukt von Atrazin | Mais, Abbauprodukt | 23 | 22 | 30 |

4.3.2 Konzentrationen der Tracerstoffe

Insgesamt wurden pro Probenahmeort inkl. den Orientierungsmessungen 3 – 4 Zeitpunkte beprobt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 inkl. der Angabe der Mittelwerte und 90%-Perzentile pro Probepunkt angegeben.

Tabelle 10: Alle Messwerte der Messkampagnen 2013/2014 inkl. Angabe der Mittelwerte und 90%-Perzentile.

| Probenahmeort | Datum | Acesulfam | Benzotriazol | Carbamazepin | Diclofenac | Sucralose | Cyclamat | Koffein | Diuron | Mecoprop | Terbutryn | 2,6-Dichlorbenzamid | Atrazin | Atrazin-Desethyl | Metolachlor | Terbutylazin |
|------------------|-----------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|-----------|--------------|---------------|--------------|---------------------|--------------|------------------|--------------|--------------|
| Zugersee 5m | 19.11.2013 | 14 | 400 | <0.8 | <6 | <4 | 16 | 65 | 3.0 | 20 | <1 | 8.8 | 29 | 22 | 3.3 | 8.9 |
| | 11.02.2014 | <50 | 411 | <5 | nb** | <50 | <50 | 26 | <5 | 10 | <5 | 10.5 | 24 | 21 | <5 | 4.9 |
| | 03.04.2015 | <50 | 318 | <5 | nb | <50 | <50 | 24 | <5 | 12 | <5 | 8.9 | 23 | 21 | <5 | 6.9 |
| | 04.06.2015 | <50 | 331 | <5 | nb | <50 | <50 | 30 | <5 | 9.7 | <5 | 9.4 | 27 | 22 | <5 | 7.7 |
| | Mittelwert* | 14 | 365 | <5 | <6 | <50 | 16 | 36 | 3.0 | 13 | <5 | 9.4 | 26 | 22 | 3.3 | 7.1 |
| | 90% Perzentil* | 14 | 407 | <5 | <6 | <50 | 16 | 53 | 3 | 17 | <5 | 10 | 28 | 22 | 3.3 | 8.4 |
| Zugersee 150m | | 12 | 480 | 1.4 | <6 | <4 | 19 | 32 | 5.2 | 12 | <1 | 9.1 | 42 | 30 | 0.9 | 6.3 |
| | 11.02.2014 | <50 | 390 | <5 | nb | <50 | <50 | 14 | <5 | 12 | <5 | 11 | 27 | 26 | <5 | 4.2 |
| | 03.04.2015 | <50 | 368 | <5 | nb | <50 | <50 | 11 | <5 | 13 | <5 | 10 | 29 | 23 | <5 | 5.3 |
| | 04.06.2015 | <50 | 598 | <5 | nb | <50 | <50 | 17 | <5 | 12 | <5 | 10 | 32 | 28 | <5 | 3.3 |
| | Mittelwert | 12 | 459 | 1.4 | <6 | <50 | 19 | 19 | 5.2 | 12 | <5 | 10 | 32 | 27 | 0.9 | 4.8 |
| | 90% Perzentil | 12 | 551 | <5 | <6 | <50 | 19 | 27 | 5.2 | 13 | <5 | 11 | 38 | 29 | 0.9 | 5.9 |
| Zugersee Auslauf | | 16 | 420 | 3.2 | <6 | <4 | 16 | 87 | 5.6 | 19 | <1 | 8.5 | 30 | 23 | 3.3 | 9.6 |
| | 28.02.2015 | <50 | 374 | <5 | nb | <50 | <50 | 33 | <5 | <10 | <5 | 10 | 26 | 21 | <5 | 6.0 |
| | 04.04.2015 | <50 | 308 | <5 | nb | <50 | <50 | 32 | <5 | <10 | <5 | 10 | 22 | 19 | <5 | 4.8 |
| | 04.06.2015 | <50 | 317 | <5 | nb | <50 | <50 | 49 | <5 | <10 | <5 | 10 | 19 | 19 | <5 | 4.2 |
| | Mittelwert | 16 | 355 | 3.2 | <6 | <50 | 16 | 50 | 5.6 | 19 | <5 | 9.6 | 24 | 21 | 3.3 | 6.2 |
| | 90% Perzentil | 16 | 402 | <5 | <6 | <50 | 16 | 72 | 5.6 | 19 | <5 | 10 | 28 | 22 | 3.3 | 8.2 |
| Ägerisee | 28.02.2015 | <50 | 1.9 | <5 | nb | <50 | <50 | 8.4 | <5 | <10 | <5 | 1.9 | <5 | <5 | <5 | <5 |
| | 04.04.2015 | <50 | 3.2 | <5 | nb | <50 | <50 | 19 | <5 | <10 | <5 | 2.4 | <5 | <5 | <5 | <5 |
| | 05.06.2015 | <50 | 1.7 | <5 | nb | <50 | <50 | 12 | <5 | <10 | <5 | 2.0 | <5 | <5 | <5 | <5 |
| | Mittelwert | <50 | 2.3 | <5 | nb | <50 | <50 | 13 | <5 | <10 | <5 | 2.1 | <5 | <5 | <5 | <5 |
| | 90% Perzentil | <50 | 2.92 | <5 | nb | <50 | <50 | 17 | <5 | <10 | <5 | 2.31 | <5 | <5 | <5 | <5 |
| Lorze | 20.02.2015 | 1'130 | 490 | 8.7 | 98 | 288 | <50 | 48 | <5 | <5 | <5 | 9.9 | 23 | 12 | <5 | 4.4 |
| | 04.04.2015 | 1'340 | 537 | 21 | 113 | 361 | <50 | 36 | <5 | <5 | <5 | 10 | 24 | 13 | <5 | 5.6 |
| | 05.06.2015 | 540 | 859 | 9.1 | 87 | 315 | 56 | 77 | <5 | 32 | <5 | 13 | 24 | 13 | <5 | 14 |
| | Mittelwert | 1'000 | 629 | 13 | 99 | 321 | 56 | 53 | <5 | 32 | <5 | 11 | 24 | 13 | <5 | 8 |
| | 90% Perzentil | 1'280 | 790 | 19 | 109 | 349 | 56 | 70 | <5 | 32 | <5 | 12 | 24 | 13 | <5 | 12 |

*Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze wurden nicht berücksichtigt.

**nb: nicht bestimmt

Die gemessenen Konzentrationen werden in den nächsten beiden Kapiteln im Einzelnen analysiert und diskutiert.

5 BEURTEILUNG DER GEWÄSSERBELASTUNG

5.1 Kommunales Abwasser

5.1.1 Eintrag von kommunalem Abwasser

Als gut geeigneter Tracer für kommunales Abwasser hat sich Acesulfam, ein weit verbreiteter künstlicher Süsstoff, bewährt (Bürge, et al., 2009). Anhand des publizierten Zusammenhangs zwischen der Acesulfamkonzentration und dem Abwasseranteil bekannter Gewässer, kann aus einer gemessenen Acesulfamkonzentration auf den Anteil an häuslichem Abwasser in einem beliebigen Gewässer in der Schweiz geschlossen werden. Dabei wird angenommen, dass der Konsum dieses künstlichen Süsstoffs in der ganzen Schweiz homogen verteilt ist und im untersuchten Einzugsgebiet keine zusätzliche Quelle vorhanden ist. In der Abbildung 4 ist der Zusammenhang zwischen Acesulfam und dem Abwasseranteil dargestellt.

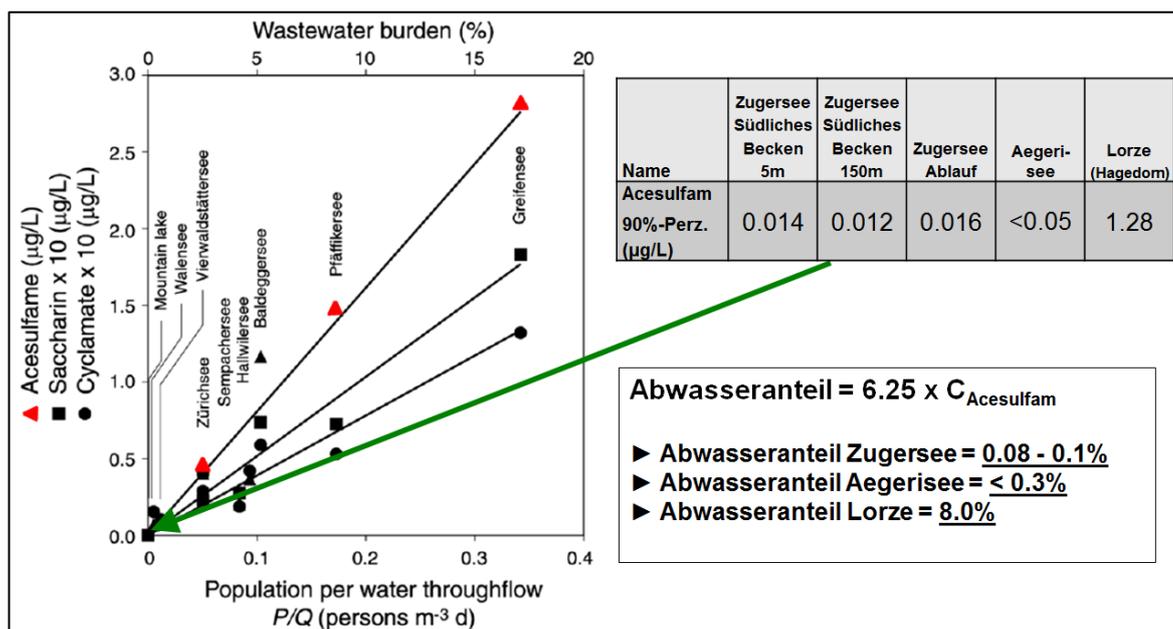


Abbildung 4: Schätzung des Anteils an häuslichem Abwasser des Zugersees aufgrund der Messung von Acesulfam (90%-Perzentil aus den verschiedenen Messungen).

Im oberen Zugerseebecken wird der Anteil an kommunalem Abwasser auf 0.08-0.09% geschätzt im unteren Becken, beim Auslauf, auf rund 0.1%. Im Vergleich zu den meisten anderen Schweizer Seen ist dieser damit sehr tief. Im Aegerisee konnte Acesulfam nicht quantifiziert werden, da die in der Messkampagne angewandte Methode eine Bestimmungsgrenze von 50 ng/L aufwies und der Aegerisee für das Substanzscreening nicht berücksichtigt wurde. Es kann aber aus dem Ergebnis <50ng/L abgeleitet werden, dass der Abwasseranteil tiefer als 0.3% sein muss. Die Lorze bei Hagedorn, also nach der Einleitung der ARA Schönau, weist einen Abwasseranteil von rund 8%, wenn man das 90%-Perzentil der gemessenen Werte für die Berechnung zu Grunde legt.

Das heisst, dass im Gegensatz zu Zuger- und Aegerisee, welche beide nur sehr schwach mit Abwasser belastet sind, die Lorze einen erheblichen Abwasseranteil aufweist.

Um die Konzentrationen der typischen Stoffe aus kommunalem Abwasser ökotoxikologisch zu bewerten, werden die 90%-Perzentile mit den wirkungsbasierten Qualitätskriterien verglichen. Die Qualitätskriterien der einzelnen Stoffe sind in Kapitel 3.3.2 (oben) zusammengefasst. Während Acesulfam, Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac und Sucralose hauptsächlich aus dem häuslichen und teilweise aus dem industriellen Abwasser stammen, kommt Mecoprop über das Meteorwasser in die Kanalisation und auf die ARA. In Abbildung 5 sind die resultierenden Risikoquotienten abgebildet. Wenn der Risikoquotient grösser als 1 ist, kann eine Gefährdung von Wasserlebewesen nicht mehr ausgeschlossen werden.

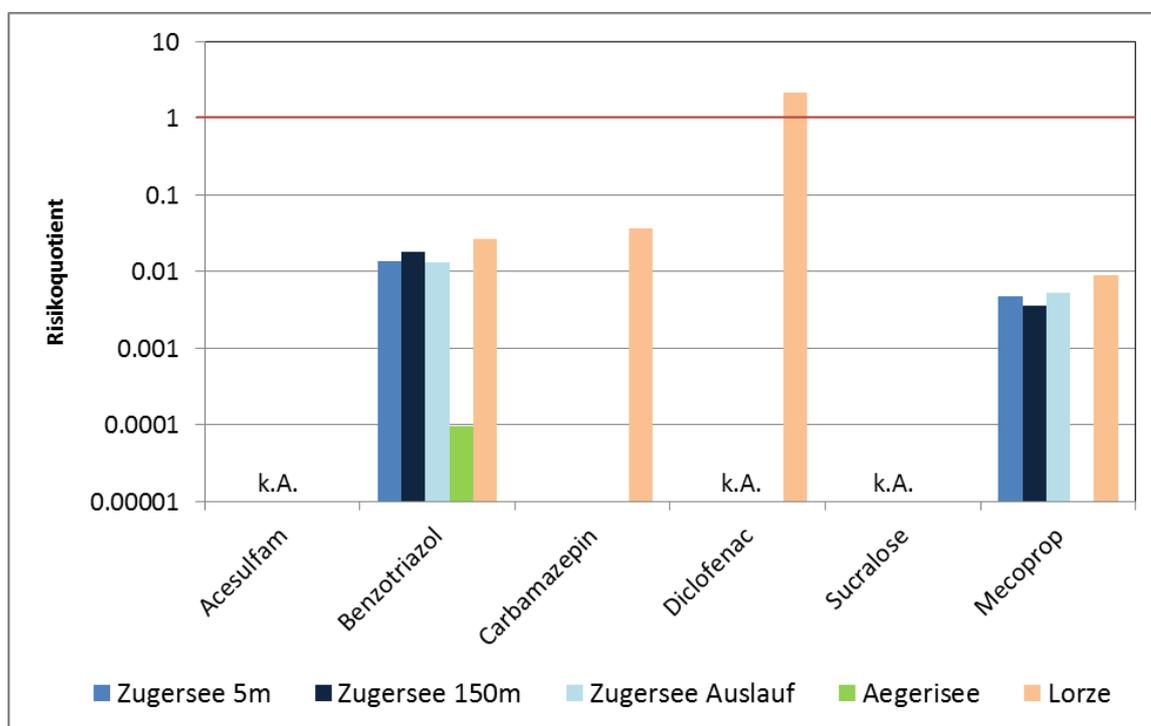


Abbildung 5: Risikoquotienten für typische Siedlungsstoffe an den untersuchten Standorten. Wenn der Risikoquotient >1 ist, kann eine Gefährdung von Wasserlebewesen nicht mehr ausgeschlossen werden. k.A.: Es kann kein Risikoquotient angegeben werden, entweder weil kein Qualitätskriterium für den entsprechenden Stoff vorhanden ist, oder weil kein 90%-Perzentil bestimmt werden konnte.

Mit Ausnahme von Diclofenac, waren die Risikoquotienten an den untersuchten Standorten für alle Stoffe tiefer als 0.1.

Diclofenac überschreitet das Qualitätskriterium von 50 ng/L in der Lorze an allen drei Messtagen (20.02, 04.04 und 05.06.2014). Der Risikoquotient mit der 90%-Perzentil-Konzentration beträgt 2.18 und ist somit deutlich erhöht. Hingegen konnte Diclofenac in keiner der untersuchten Proben aus dem Zuger- oder Aegerisee nachgewiesen werden.

5.1.2 Mischwasserentlastungen oder Abwasser der früheren ARA?

Um zu überprüfen ob der Abwasseranteil von rund 0.1% im Zugersee von den aktuellen Mischwasserentlastungen kommt oder aufgrund der früheren Einleitungen von Abwasser über ARA zu Stande kommt, können Tracerstoffe für ungereinigtes Abwasser (Mischwasserentlastungen) mit der Acesulfamkonzentration verglichen werden. Als Tracerstoffe für ungereinigtes Abwasser wurden Koffein und der künstliche Süsstoff Cyclamat ausgewertet (vergl. Tabelle 9, im Abschnitt 3.2). Da Cyclamat und Koffein in kommunalen ARA sehr gut abgebaut werden, kommen sie zum grössten Teil aus Mischwasserentlastungen, auch in Gewässern mit direkten ARA Einleitungen. Zum Vergleich mit anderen Gewässern wurden Werte herangezogen, die im Rahmen vom Projekt „Nationale Beobachtung Oberflächengewässerqualität (NAWA) - Problembezogene Spezialbeobachtung (SPEZ)“ erhoben wurden (Longrée, et al., 2013). Der Anteil an ungereinigtem Abwasser wurde wie folgt abgeschätzt:

$$f_{\text{Mischwasserentlastung}, i} = \frac{C_{\text{Koffein}, i} / C_{\text{Koffein}, \text{ARA-Zulauf}}}{C_{\text{Acesulfam}, i} / C_{\text{Acesulfam}, \text{ARA-Zulauf}}}$$

In Abbildung 6 ist die Abschätzung der Anteile der Mischwasserentlastungen am gesamten kommunalen Abwasser über das Verhältnis von Koffein zu Acesulfam wiedergegeben.

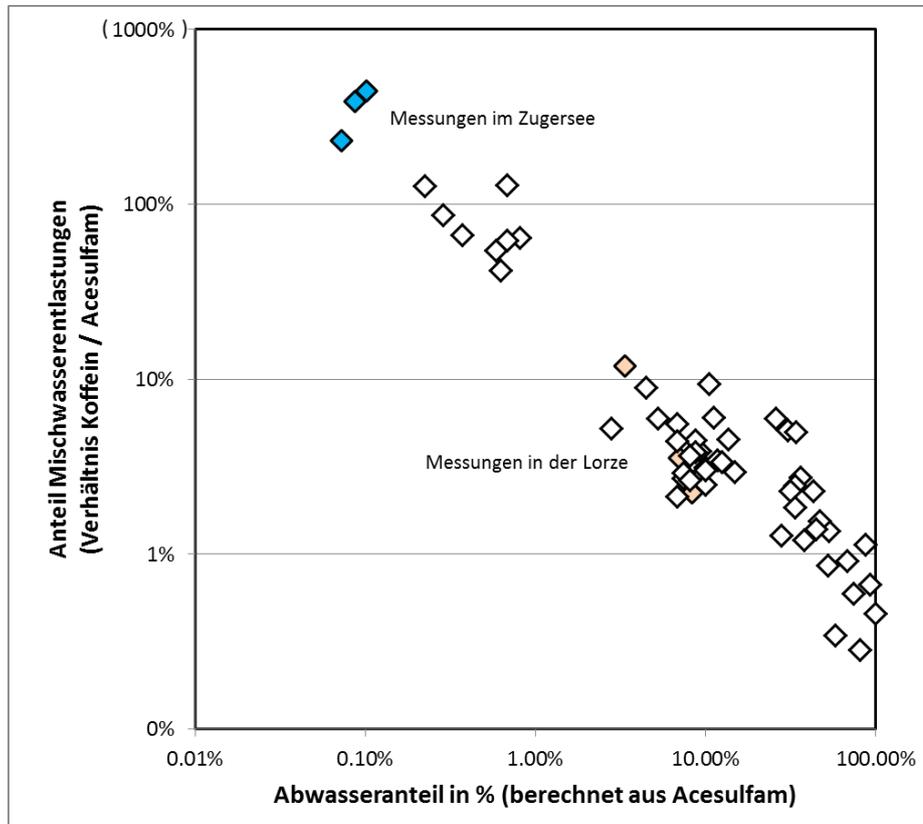


Abbildung 6: Abschätzung des Anteils an Mischwasserentlastungen am gesamten Anteil an kommunalem Abwasser über das Verhältnis von Koffein zu Acesulfam.

Mit dem Verhältnis von Cyclamat zu Acesulfam wurde analog der Anteil der Mischwasserentlastungen berechnet (Abbildung 7).

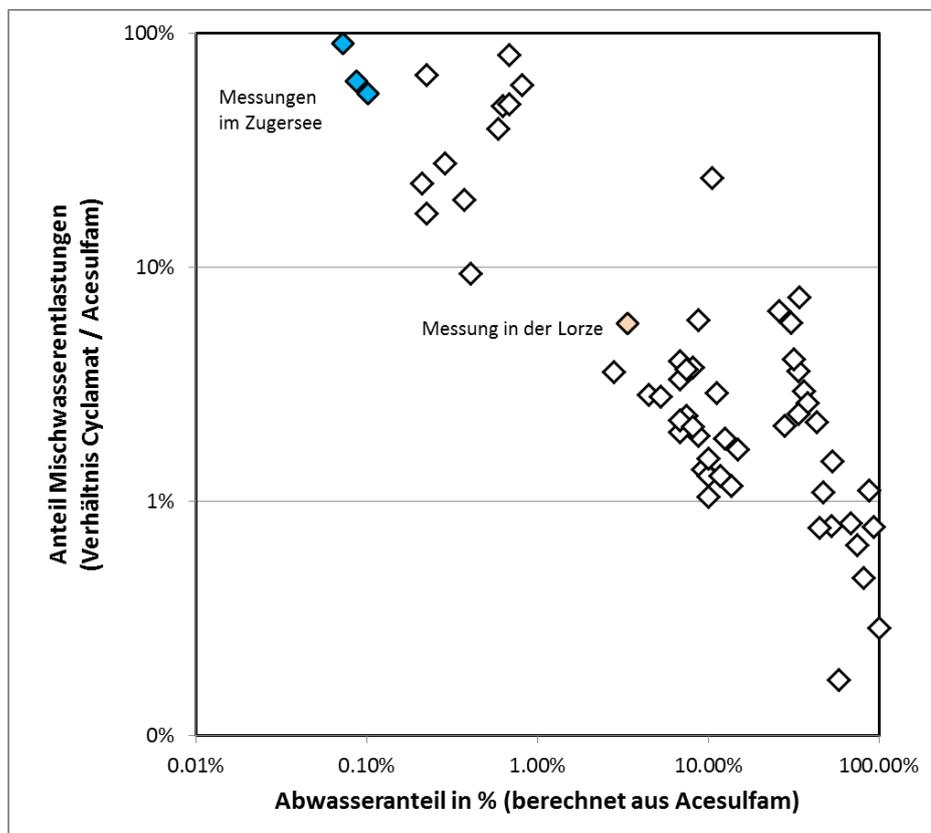


Abbildung 7: Abschätzung des Anteils an Mischwasserentlastungen am gesamten Anteil an kommunalem Abwasser über das Verhältnis von Cyclamat zu Acesulfam.

Aus diesen Vergleichen geht hervor, dass abgeschätzte Abwasseranteil für den Zugersee von 0.08 bis 0.1% zu einem dominanten Anteil aufgrund der aktuellen Mischwassereinleitungen zu Stande kommt und nicht aufgrund früherer Einleitungen von regionalen Kläranlagen. Diese Einleitungen sind trotz der langen Wasseraufenthaltszeit und der eingeschränkten Mischung des Tiefenwassers mit dem Wasser des Epilimnions nicht mehr nachweisbar. Die kann auch damit zu tun haben, dass im Dezember 1999 der Sturm Lothar eine einmalige verstärkte Mischung des Oberflächenwassers mit dem Tiefenwasser bewirkte (AquaPlus, 2004). Diese Durchmischung hat das „stoffliche Gedächtnis“ des Sees sicherlich verkürzt, was wahrscheinlich dazu beiträgt, dass man auch im Tiefenwasser die ehemaligen Abwassereinleitungen nicht mehr nachweisen kann.

Der Anteil an ungereinigtem Abwasser in der Lorze bei Hagendorn bewegt sich zwischen 2% und 11%. Einen Durchschnittlichen Anteil an ungereinigtem Abwasser am gesamten Abwasseranteil von um die 2% weist die Lorze bei Trockenwetter (Probenahmen v. 20.02.2014 und 04.04.2014) auf. Die gemessenen Koffeinkonzentrationen in der Lorze an diesen Tagen entsprechen den Konzentrationen im Auslauf des Zuger-

sees. D.h. dass der Anteil an ungereinigtem Abwasser bei Trockenwetter entsprechend aus dem Zugersee kommt, welcher die Konzentrationen dieser Stoffe über die Jahre ausgleicht und nicht direkt wetterabhängig ist. Am 05.06.2014 hingegen wird aufgrund der Verhältnisse Koffein zu Acesulfam und Cyclamat zu Acesulfam in der Lorze ein Anteil an ungereinigtem Abwasser von rund 10% abgeschätzt. Dies könnte aufgrund des erhöhten Niederschlags v. 03. Juni 2014 zustande gekommen sein, wenn die Entlastungen in der Nähe von Auslauf die 2 Tage zuvor angesprungen sind, könnte das die erhöhten Koffein- und Cyclamat-Konzentration erklären. Neben der erhöhten Koffeinkonzentration war die Acesulfamkonzentration hingegen am 05.06.2015 um rund einen Faktor 2 tiefer an diesem als an den anderen zwei Tagen. Dies kommt durch die deutlich grössere Verdünnung in der Lorze zu Stande.

Koffein und Cyclamat werden beide in der aquatischen Umwelt abgebaut. Die im Zugersee, im Ägerisee und in der Lorze gefundenen Konzentrationen sind nach heutigem Wissen ökotoxikologisch nicht relevant.

5.1.3 Spitalabwasser

Als Spitalabwassertracer können beispielsweise Kontrastmittel verwendet werden. Verschiedene Kontrastmittel waren auch im Screeningprogramm der Eawag enthalten. Es wurde aber Keines oberhalb der Bestimmungsgrenzen gefunden. Daraus lässt sich ableiten, dass keine übermässige Belastung von Spitalabwasser im Zugersee vorhanden ist, was aufgrund dessen, dass keine ARA mehr in den Zugersee einleitet und die Stoffe aus kommunalem Abwasser alle tiefe Konzentrationen aufweisen, zu erwarten war. Für die spezifischen Messungen in der Messkampagne des AVS im 2014 wurden diese Stoffe nicht mehr berücksichtigt.

5.2 Regenkanäle

In Trennkanalisationen wird das Regenwasser aus der Siedlungsfläche separat gefasst und direkt unbehandelt durch Regenkanäle eingeleitet. Die bewirtschaftbare Ringkanalisation um den Zugersee erlaubt zusätzlich die Mischkanalisation so zu bewirtschaften, dass bei erhöhten Wassermengen aufgrund von Regenfällen, der „First-Flush“ auf die ARA geleitet werden kann und danach insbesondere Regenwasser entlastet wird. Dadurch werden aber gewisse Mikroverunreinigungen, z.B. Biozide welche im Gebäudeschutz auch Flachdächern oder Fassaden angewendet werden, oder auch Pestizide, die in Hausgärten, Böschungen und Grünflächen im Siedlungsgebiet zur Anwendung kommen teilweise unbehandelt in die Gewässer geleitet. Anhand der Konzentrationen von typischen im Aussenbereich von Siedlungen eingesetzten Stoffen, kann abgeschätzt werden, ob dieser Eintragspfad eine erhöhte Relevanz hat für den Zugersee. Typische Vertreter dieser Stoffkategorie sind Diuron (auch wichtige landwirtschaftliche Einträge), Mecoprop oder Terbutryn (vergl. Tabelle 9 oben).

Die mittleren Konzentrationen von Diuron im Zugersee lag bei 4 ng/L und die von

Mecoprop bei 15 ng/L. Terbutryn wurde in keiner der untersuchten Proben nachgewiesen.

Die Konzentrationen von Diuron und Mecoprop liegen im Zugersee in allen untersuchten Proben unterhalb dem ökotoxikologischen Qualitätskriterium. Dies gilt auch für Terbutryn, welches in allen Fällen <5 ng/L war, wobei Terbutryn ein chronisches Qualitätskriterium (AA-EQS) von 65 ng/L aufweist. Ökotoxikologisch sind die gefundenen Stoffe aus den Regenentlastungen für den Zugersee nach aktuellem Wissensstand also nicht problematisch.

5.3 Landwirtschaft

Um die Belastung des Zugersees durch Pestizide aus der Landwirtschaft abschätzen und einordnen zu können, wurden die im Zugersee gemessenen Konzentrationen mit anderen grossen Schweizer Seen verglichen. Dazu wurden Daten aus Studien des Vierwaldstättersees und des Bodensees aus der Literatur verwendet (Singer, et al., 2009; Singer, et al., 2010). In Abbildung 8 sind die Konzentrationen verschiedener Pestizide abgebildet. Die Konzentrationen im Zugersee sind blau dargestellt.

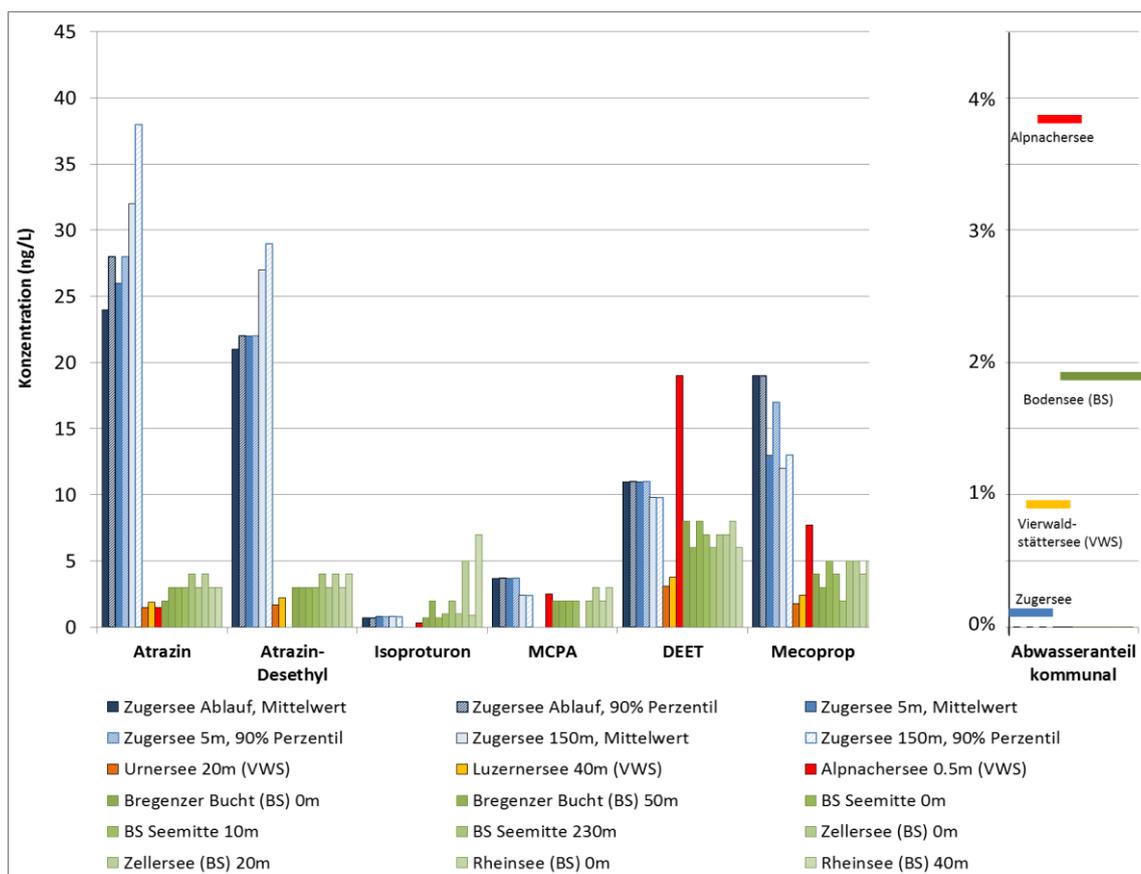


Abbildung 8: Links: Konzentrationen von verschiedenen Pestiziden und einem Pestizid-Abbauprodukt (Desethyl-Atrazin) im Zuger-, Vierwaldstätter- und Bodensee. Rechts: Angabe der geschätzten Abwasseranteile der verschiedenen Seen.

Atrazin, Desethyl-Atrazin und Mecoprop wurden sowohl im Substanzscreening der Eawag als auch in den Proben im 2014 vom AVS bestimmt. Isoproturon, MCPA und DEET wurden nur im Substanzscreening der Eawag bestimmt.

5.3.1 Pestizide aus der Landwirtschaft

Die Herbizide Isoproturon und MCPA stammen hauptsächlich aus landwirtschaftlichen Anwendungen. Atrazin, welches für den Gebrauch als Pflanzenschutzmittel und auch für andere Anwendungen nicht mehr zugelassen ist, wurde als Maisherbizid und bis zur Anwendungseinschränkung 1994 auch in grossen Mengen auf Eisenbahngleisen eingesetzt. Seit 2008 darf es auch nicht mehr als Maisherbizid verkauft, und seit 2011 nicht mehr eingesetzt werden.

Die Konzentrationen von Atrazin und dem korrespondierenden Abbauprodukt Desethylatrazin sind deutlich höher als im Vierwaldstätter- oder Bodensee. Die im Vergleich zu anderen Seen stark erhöhten Atrazinkonzentrationen im Zugersee sind wahrscheinlich zu einem grossen Teil auf frühere Anwendungen zurückzuführen. Der Zugersee hat eine deutlich längere Wasseraufenthaltszeit als der Vierwaldstätter- und der Bodensee.

Die Konzentrationen von aktuell eingesetzten Herbiziden wie Isoproturon und MCPA bewegen sich in der gleichen Grössenordnung wie im Vierwaldstätter- und im Bodensee. Im Gegensatz zu den Stoffen aus kommunalem Abwasser, welche im Zugersee deutlich tiefer liegen als in den anderen Seen, sind die Einträge durch die Landwirtschaft vergleichbar.

5.3.2 Pestizide aus verschiedenen Quellen

Diethyltoluamid (DEET) und Mecoprop können sowohl aus landwirtschaftliche Quellen wie aus verschiedenen Anwendungen im Siedlungsgebiet stammen. Mecoprop wird beispielsweise auch als Fassadenschutz und auf Flachdächern als Durchwurzelungsschutz eingesetzt. Insbesondere die Mecoprop Konzentration ist im Zugersee im Vergleich zu den andern Seen relativ hoch. Dies könnte entweder auf den Verbrauch in der Landwirtschaft, auf Einleitungen von Meteorwasser über Regenkanäle (bei Trennsystemen), oder auch auf direkte Abschwemmungen aus dem Siedlungsgebiet zurückzuführen sein. Aus Mischwasserentlastungen können diese relativ hohen Einträge nicht primär stammen, da sonst andere Stoffe aus kommunalem Abwasser ebenfalls höher sein müssten.

6 STOFFFLUSS- UND SEENMODELLIERUNG

6.1 Eintrag von Abwasser über Mischwasserentlastungen in den Zugersee

Die über Mischwasserentlastungen in den Zugersee eingeleitete Abwassermenge pro Jahr ist nicht genau bekannt und muss, um die in den See eingetragenen Stofffrachten modellieren zu können, abgeschätzt werden. Die eingetragene Mischwassermenge in den Zugersee wurde hier mit zwei unterschiedlichen Methoden abgeschätzt: (1) über die Summe der einzelnen Entlastungen (Daten 2008-2013) und (2) über die Konzentrationen von Abwassertracern im Zugersee.

6.1.1 Messungen einzelner Entlastungen

Seit dem Jahr 2008 wird der grösste Teil der Entlastungen systematisch erfasst. In der Abbildung 9 sind die aktuellen Daten zu den Entlastungen dargestellt.

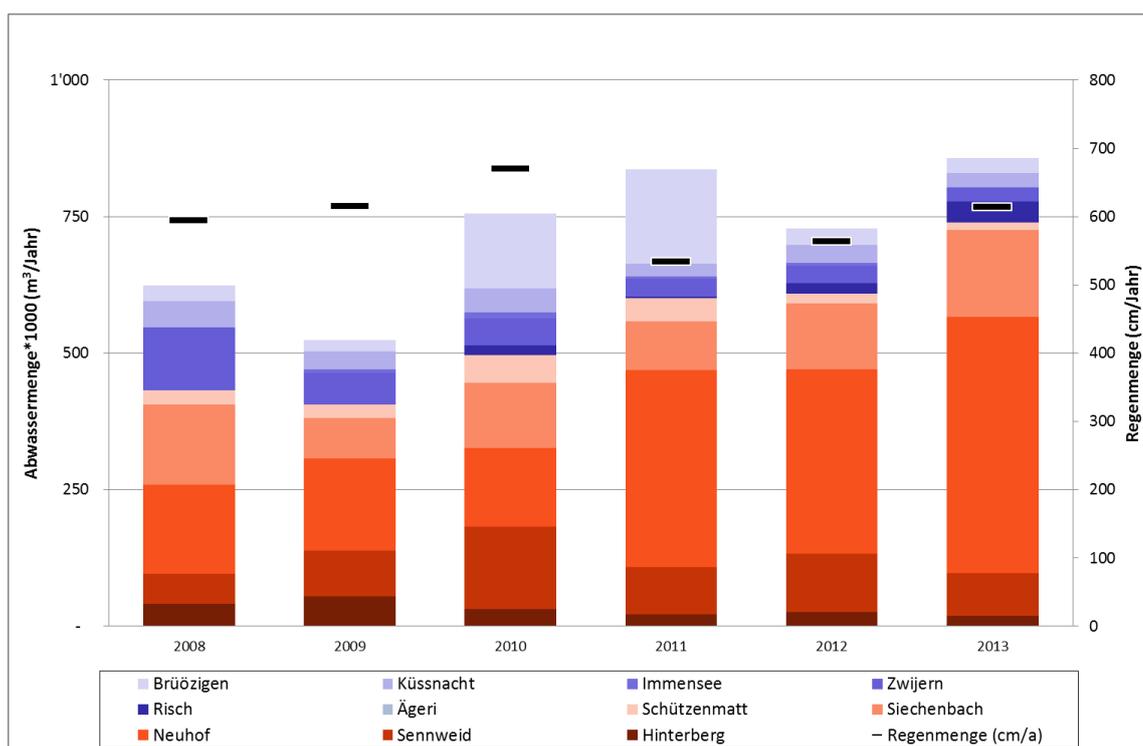


Abbildung 9: Entlastete Mischwassermengen von 2008 bis 2013. Schwarz dargestellt sind die Regenmengen der entsprechenden Jahre. Quelle: Daten und Darstellung vom GVRZ.

Die blau eingefärbten Entlastungsmengen stammen aus dem Abwasserstrang „Chamer Stollen“. Sie entsprechen also eher dem hinteren Seebecken. Diese Menge wird vermutlich eher unterschätzt, da wesentliche Entlastungsbauwerke noch nicht messtechnisch erfasst sind (insbesondere Bereich Arth). Nach der Abschätzung des GVRZ werden ca. 70% der entlasteten Mengen gemessen.

Die rot eingefärbten Entlastungsmengen stammen aus dem Abwasserstrang „Städtler

Stollen“ welcher die Bereiche Steinhausen, Baar, Stadt Zug bis hinauf zu Menzingen, und Ägeri miteinschliesst. Diese Mengen gehen ausschliesslich in das vordere Seebecken im Bereiche Stadt Zug bis Cham. Diese Daten erfassen nach Abschätzungen des GVRZ den grössten Teil der effektiv entlasteten Mengen (ca. 90%).

Um die mittlere entlastete Wassermenge abzuschätzen wurden die entsprechenden Abwasserstränge über die Jahre 2008 – 2013 gemittelt, anschliessend mit der Abschätzung des GVRZ korrigiert (70% resp. 90%) und dann addiert (Tabelle 11).

Tabelle 11: Abschätzung der entlasteten Mischwassermengen über die Messungen einzelner Entlastungen.

| | Chamer Stollen | Städteler Stollen | Gesamter Zugersee |
|--|----------------|-------------------|-------------------|
| Mittlere Menge gemessen 2008-2013 [1000*m ³ /Jahr] | 173 | 547 | |
| Erfasste Menge am Gesamteintrags (geschätzt) [%] | 70% | 90% | |
| Mittlere Menge korrigiert 2008-2013 [1000*m ³ /Jahr] | 248 | 608 | 856* |

*Die gesamte entlastete Menge in den Zugersee wurde aus der Summe der korrigierten Mengen vom Chamer und Städteler Stollen berechnet.

Mit dieser Abschätzung kommt man auf eine mittlere entlastete Menge von insgesamt rund **850'000 m³/Jahr**.

6.1.2 Abwassertracer: Acesulfam

Total wurden im Jahre 2012 in der Kläranlage Schönau 21'552'979 m³ Abwasser gereinigt und es waren rund 141'000 Einwohner an die Anlage angeschlossen (GVRZ, 2012). Wenn angenommen wird, dass ca. 4% des im Mischsystem anfallenden Abwassers in den Zugersee entlastet wird, kommt man auf einen Eintrag von rund 860'000 m³ Mischwasser pro Jahr, was in diesem Fall ca. 5'600 Einwohnern entspricht. Daraus kann ein Eintrag von Acesulfam in den Zugersee von rund 23 kg/Jahr abgeleitet werden, wenn von einer mittleren Konzentration im ungereinigten Abwasser von 25 µg/L ausgegangen wird. Analog kann die Acesulfam Fracht für 2%, 3%, 5% und 10% Mischwassereintrag berechnet werden (Tabelle 12).

Tabelle 12: Eingabeparameter für die Seenmodellierung mit unterschiedlichen Annahmen betr. den in den Zugersee entlastetem Mischwassermengen.

| | Eintrag Mischwasser in Zugersee [m ³ /Jahr] | Acesulfamfracht in Zugersee [kg/Jahr] | Anfangs- konzentration Epilimnion [ng] | Anfangs- konzentration Hypolimnion [ng] |
|--------------|--|---|---|--|
| Szenario 2% | 430'000 | 12 | 14 | 12 |
| Szenario 3% | 650'000 | 18 | 14 | 12 |
| Szenario 4% | 860'000 | 23 | 14 | 12 |
| Szenario 5% | 1'100'000 | 29 | 14 | 12 |
| Szenario 10% | 2'400'000 | 60 | 14 | 12 |

Die in Tabelle 12 angegebenen Szenarien wurden als Inputparameter für die 2-box Version von *MASASlight* (vergl. Abschnitt 3.4.1) verwendet und es wurde die Konzentrationsentwicklung über 20 Jahre mit diesen unterschiedlichen Annahmen berechnet. Es wurde angenommen, dass die gesamte über Mischwasserentlastungen eingetragene Stofffracht ins Epilimnion eingetragen wird. Die Resultate der verschiedenen Szenarien sind in Abbildung 10 wiedergegeben.

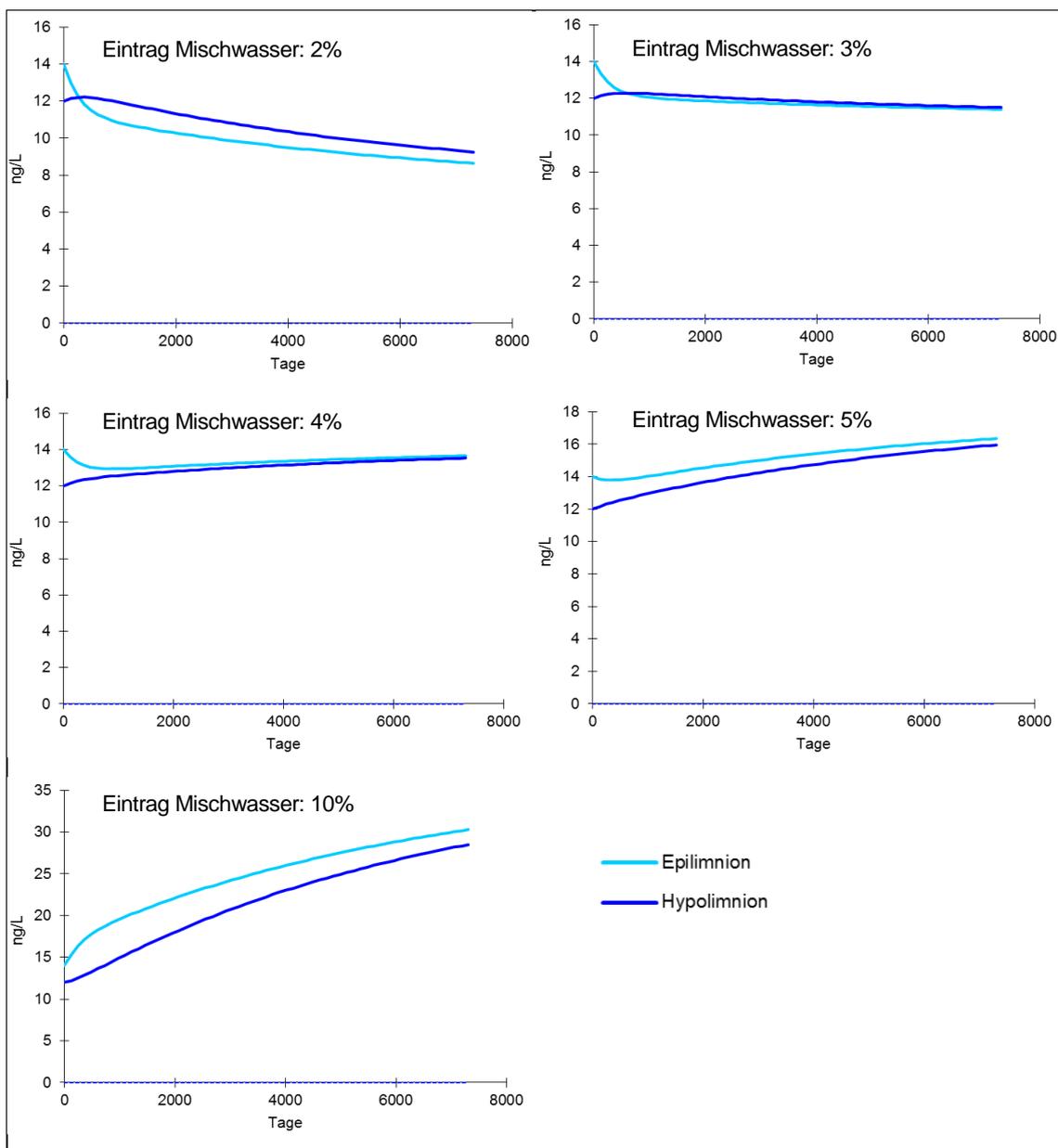


Abbildung 10: Berechnete Konzentrationen von Acesulfam mit für verschiedene Annahmen betr. der Mischwassereinleitung. Es wurde angenommen, dass der See in den nächsten 20 Jahren nie vollständig durchmischt (Modellgrundlage: *MASASlight*, 2-Box Modell).

Wenn mit einem Eintrag von 750'000 m³/Jahr Mischwasser in den Zugersee gerechnet wird, würde sich die Acesulfam Konzentration im Gleichgewicht befinden. Wenn man davon ausgeht, dass die früheren ARA Einträge für Acesulfam keinen relevanten Einfluss mehr auf die Konzentration im Zugersee haben und der Acesulfam Konsum in den letzten Jahren ungefähr gleich war, kann man über die Acesulfam Konzentration im See auf die eingeleitete Menge Mischwasser schliessen. Dabei kommt man auf rund **3.5% resp. 750'000 m³/Jahr** Mischwassereintrag.

6.1.3 Mittlere entlastete Mischwassermengen in den Zugersee

Mit der Abschätzung der entlasteten Mischwassermengen über die Summe der bekannten Entlastungen und mit der Abschätzung über den Abwassertracer Acesulfam kommt man auf sehr ähnliche Ergebnisse.

Für die Berechnung der Stoffbilanzen wird im Folgenden von einer mittleren entlasteten Mischwassermenge in den Zugersee von **800'000 m³/Jahr** ausgegangen.

6.2 Stoffbilanzen für Stoffe aus Mischwasserentlastungen für den Zugersee

Mit der Annahme eines Mischwassereintrags von rund 800'000 m³/Jahr, den im See gemessenen Konzentrationen und den im ungereinigten Abwasser bestimmten Konzentrationen können für alle Substanzen aus kommunalem Abwasser, für die Messwerte vorliegen, die Konzentrationsverläufe im Zugersee abgeschätzt werden. Für Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac und Mecoprop liegen für die ARA Schönau vom Jahr 2014 und 2015 viele Messwerte vom Zulauf vor, welche im Rahmen von Pilotuntersuchungen mit einer PAK-Pilotanlage erhoben wurden (Tabelle 13).

Tabelle 13: Gemessene Konzentrationen im Zulauf der ARA Schönau v. 30.09.2014 bis am 15.04.2015. Gemessen wurden jeweils 48h-Sammelproben. Konzentrationen sind in ng/L angegeben.

| Datum | Benzotriazol | Carbamazepin | Diclofenac | Mecoprop |
|---------------------|---------------|--------------|--------------|------------|
| 30.09 - 02.10.2014 | 9'430 | 295 | 1'830 | 155 |
| 08.10 - 09.10.2014 | 5'920 | 262 | 1'640 | 205 |
| 28.10. - 29.10.2014 | 9'450 | 346 | 1'710 | 69 |
| 11.11. - 13.11.2014 | 15'200 | 262 | 1'880 | 67 |
| 19.11. - 20.11.2014 | 7'270 | 209 | 1'860 | 116 |
| 10.12 - 12.12.2014 | 11'800 | 359 | 1'790 | 54 |
| 09.02 - 10.02.2015 | 12'800 | 439 | 2'170 | 72 |
| 07.02 - 08.03.2015 | 7'900 | 430 | 1'900 | <100 |
| 17.03. - 18.03.2015 | 13'700 | 398 | 2'150 | <100 |
| 24.03. - 25.03.2015 | 10'600 | 398 | 2'180 | <100 |
| 08.04. - 10.04.2015 | 18'100 | 340 | 2'250 | 268 |
| 14.04 - 15.04.2015 | 19'500 | 453 | 2'680 | 72 |
| Mittelwert | 11'806 | 349 | 2'003 | 120 |

Aus den mittleren Konzentrationen der Stoffe in ungereinigtem Abwasser kann eine Maximalfracht, welche in den Zugersee gelangt, berechnet werden.

Tabelle 14: Stofffrachten, welche über Mischwasserentlastungen jährlich in den Zugersee gelangen.

| | Benzotriazol | Carbamazepin | Diclofenac | Mecoprop |
|---|---------------------|---------------------|-------------------|-----------------|
| Konzentration in ungereinigtem Abwasser [ng/L] | 11'806 | 349 | 2'003 | 120 |
| Fracht in den Zugersee bei einem Mischwassereintrag v. 800'000 m ³ /Jahr [kg/Jahr] | 9.4 | 0.28 | 1.6 | 0.10 |

Die reale Fracht ist eher tiefer, da die pro Jahr eingeleiteten 800'000 m³ mit Regenwasser verdünnt sind und die mittleren Konzentrationen im eingeleiteten Mischwasser daher eher tiefer sind als die im ungereinigten Abwasser auf der ARA Schönau gemessenen Werte. Die hier getätigten Stoffbilanzen stellen also eher eine Worst-Case Situation dar.

Mit Hilfe von *MASASlight* kann aus den vorliegenden Eintragsfrachten Steady-State Konzentrationen für den Zugersee berechnet werden. Die Zeit bis zum Erreichen eines Stoffgleichgewichts bei gleichbleibendem Eintrag beträgt im Zugersee aufgrund des tiefen Durchflusses fast 50 Jahre (Modellparametrisierung vergl. Abschnitt 3.4.1). Durch den Vergleich dieser Konzentrationen mit den aktuell im Zugersee gemessenen Werten, kann abgeschätzt werden ob sich die Stoffkonzentrationen im Gleichgewicht befinden. Daraus können Hinweise gewonnen werden ob (1) die früheren Einleitungen durch ARA noch nachweisbar sind und (2) ob zusätzliche Quellen für die betrachteten Stoffe existieren.

Tabelle 15: Steady-State Konzentrationen im Zugersee und Vergleich mit gemessenen Konzentrationen

| | | Benzotriazol | Carbamazepin | Diclofenac | Mecoprop |
|--|------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-----------------|
| Steady-State Konzentration im Zugersee [ng/L] | | 5.7 | 0.17 | 0.98 | 0.06 |
| Mittelwert der gemessenen Konzentrationen [ng/L] | Zugersee 5m | 365 | <5 | <6 | 13 |
| | Zugersee 150m | 459 | 1.4 | <6 | 12 |
| | Zugersee Auslauf | 355 | 3.2 | <6 | 19 |

Die modellierten Konzentrationen von Carbamazepin und Diclofenac stimmen relativ gut überein mit den tatsächlich im See gemessenen Werten, sind aber bei Carbamazepin tiefer. Dies kann damit erklärt werden, dass bei der langen Zeitspanne bis zum Fließgleichgewicht, welche der Zugersee aufweist, die früheren Abwassereinleitungen

für Carbamazepin noch einen Einfluss haben. Carbamazepin wurde in der Schweiz 1963 als Arzneimittel zugelassen und wurde daher bereits vor der Aufhebung der ARA, die in den Zugersee einleiteten verwendet und in die Gewässer eingetragen.

Die gemessenen Konzentrationen von Benzotriazol sind deutlich höher, als die welche aufgrund der Mischwassereinleitung erwartet werden. Benzotriazol wird im nächsten Kapitel detailliert diskutiert.

Mecoprop wird neben dem Eintrag über Mischwasser substantiell über Regenkanäle und aus Abschwemmungen aus landwirtschaftlichen Anwendungen eingetragen. Die Einträge über Mischwasser scheinen im Vergleich zu den anderen Quellen und Eintragungspfade im Fall von Mecoprop für den Zugersee nur von geringfügiger Relevanz zu sein.

6.3 Befund Benzotriazol

Die Screening-Analyse hat ergeben, dass der Stoff Benzotriazol in aussergewöhnlich hohen Konzentrationen im Zugersees vorkommt. Durchschnittlich wurden 450 ng/l im Oberflächen- und Tiefenwasser gefunden. Benzotriazol wird als Korrosionsschutzmittel in Haushalts-Geschirrspülmittel und in industriellen Prozessabwässern eingesetzt. Die aussergewöhnlichen Konzentrationsbefunde vom November 2013 wurden durch eine erneute Probenahme im Juni 2014 und eine wiederholte Analyse an der Eawag mit einer parallelen Messung durch ein unabhängiges Labor (Envilab) bestätigt (siehe Abbildung 11). Die Grössenordnung der Konzentrationen um die 400 ng/L wurde im Weiteren von Messungen des AVS der Proben von Januar bis Juni 2014 bestätigt (vergl. Abschnitt 4.3.2, Tabelle 10).

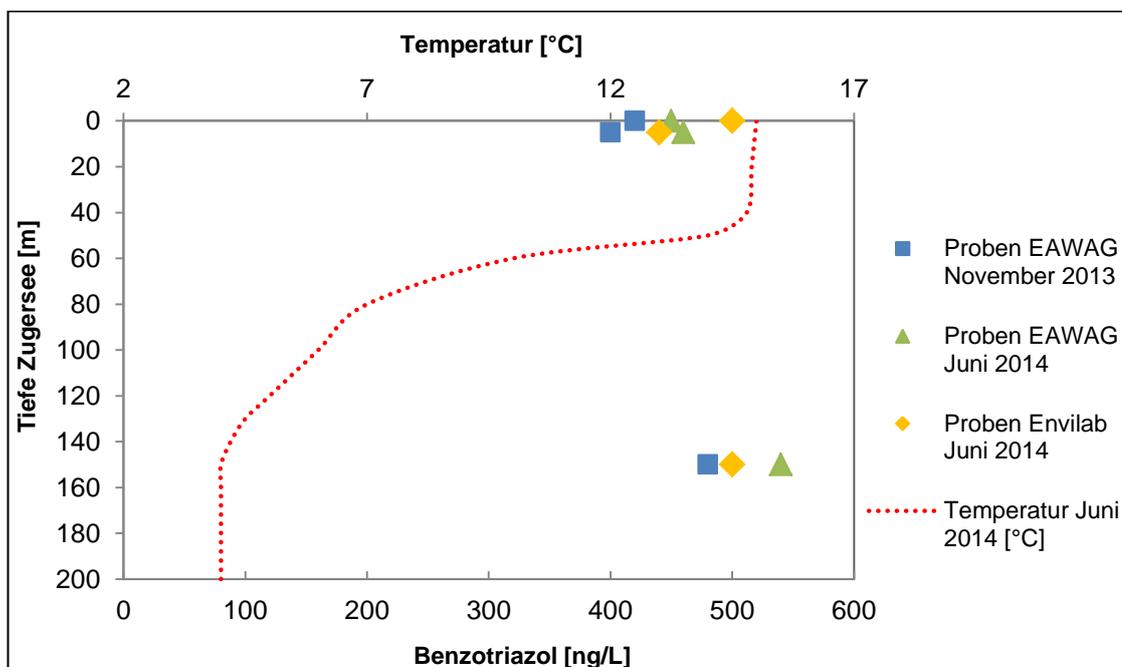


Abbildung 11: Messung der Benzotriazolkonzentration im Zugersee vom November 2013 und Juni 2014 durch die EAWAG mit den Bestätigungsmessungen.

Damit liegt die gemessene Benzotriazol-Konzentration des Zugersees mit 450 ng/L etwa 100mal über der Konzentration, die man aufgrund der anderen gemessenen Abwassertraccer (z.B. Acesulfam, Carbamazepin) erwarten würde (vgl. Abbildung 12).

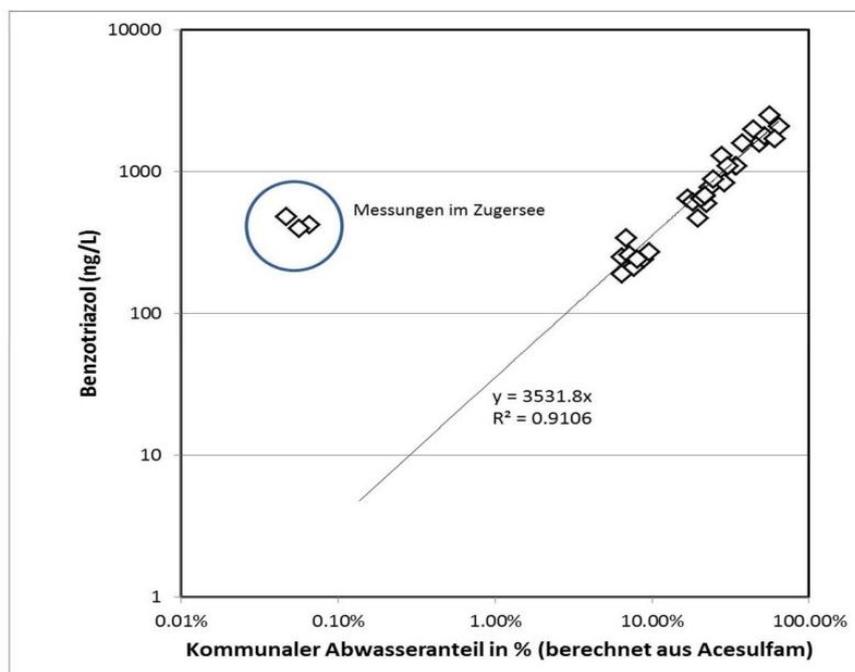


Abbildung 12: Vergleich der Benzotriazolkonzentrationen mit dem Abwasseranteil ermittelt für verschiedene Gewässer (Fließgewässer aus der NAWA Studie der Eawag, Aqua & Gas, No 3, 2014). Der Abwasseranteil und die Konzentration von Benzotriazol korrelieren normalerweise. Die erwartete Benzotriazolkonzentration im Zugersee würde etwa 5 ng/L betragen.

Bei einem Wasservolumen von 3.2 km³ enthält der Zugersee damit etwa 1.45 Tonnen Benzotriazol mehr als durch den Eintrag von kommunalem Abwasser erklärt werden kann. Die enorme zusätzlich vorhandene Benzotriazol-Menge von 1.45 t kann nicht durch die geringen Abwasserableitungen aus den derzeitigen Mischwasserentlastungen erklärt werden (siehe oben). 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. Neben potenziellen aktiven Quellen, könnte auch sein, dass das derzeit im See befindliche Benzotriazol vor der Installation der Abwasserringleitung über gereinigtes oder ungereinigtes Abwasser direkt oder indirekt über eine mittlerweile nicht mehr existierende Emissionsquelle eingetragen wurde. Dies kann mit dem aktuellen Wissensstand nicht abschliessend geklärt werden.

6.4 Atrazin: Entwicklung der Konzentrationen im Zugersee in den nächsten Jahren

Weil Atrazin in der Schweiz nicht mehr zugelassen ist (vergl. oben), wurde der Eintrag im Seenmodell gleich Null gesetzt. Mit dem Seenmodell kann so berechnet werden 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 vorhergesagte Konzentrationsverlauf über die nächsten 20 Jahre ist in Abbildung 13 wiedergegeben.

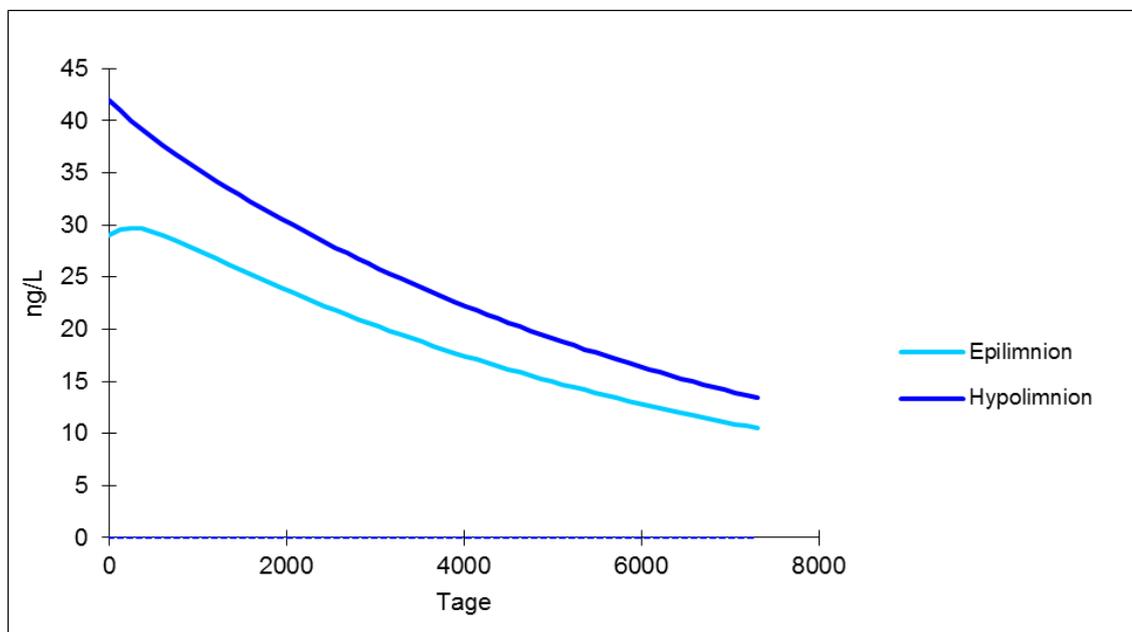


Abbildung 13: Vorhersage der Atrazinkonzentration in den nächsten 20 Jahren in Epi- und Hypolimnion. Es wurde angenommen, dass kein neuer Eintrag stattfindet und dass der See in den nächsten 20 Jahren nie vollständig durchmischt (Modellgrundlage: MASAS*light*, 2-Box Modell).

Gemäss der Berechnung mit dem Seenmodell wird die Atrazinkonzentration in 20 Jahren im Zugersee auf ca. 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 möglicher problematischer Substanzen genau zu kennen und zu minimieren.

6.5 Massenbilanz für Stoffe aus dem kommunalen Abwasser in der Lorze

6.5.1 Abflussdaten

In der Lorze sind zwei hydrologische Messstationen des BAFU vorhanden, eine ober- und eine unterhalb der Einleitung der ARA Schönau, Cham: Lorze – Zug, Letzi (Nr. 2477) und Lorze – Frauenthal (Nr. 2125). In der Abbildung 14 sind die Jahressganglinien des Abflusses in m³/s vom Jahr 2014 dieser beiden Stationen wiedergegeben.

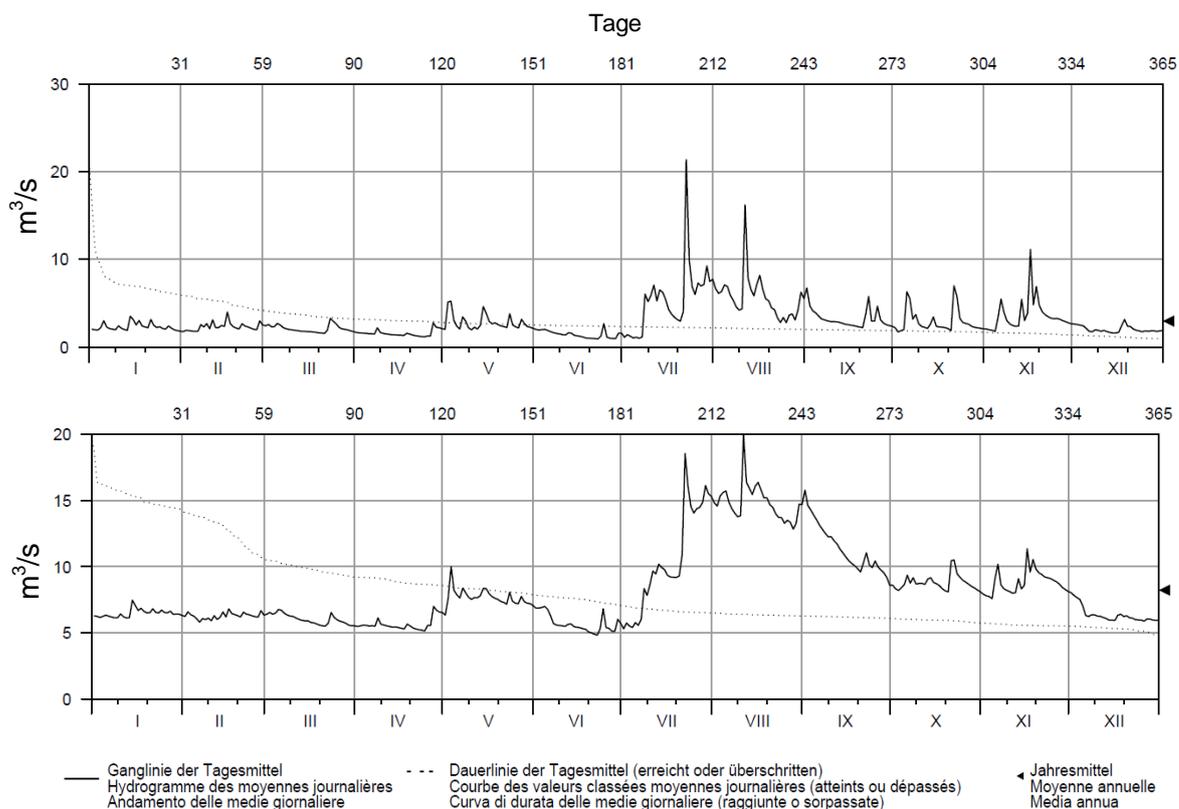


Abbildung 14: Jahresganglinien der Abflussmessungen an den Stationen Lorze – Zug, Letzi (Nr. 2477) und Lorze – Frauenthal (Nr. 2125). Graphik von <http://www.hydrodaten.admin.ch>.

Der mittlere Abflusswert für die Station Lorze – Zug, Letzi (Nr. 2477) im 2014 betrug 2.96 m³/s und der der Station Lorze – Frauenthal (Nr. 2125) 8.22 m³/s. Im Mittel über die letzten vier Jahre waren die Abflusswerte 3.2 m³/s bei Letzi und 8.6 m³/s bei Frauenthal (BAFU, 2015).

6.5.2 Massenbilanz – Jahresfrachten

Zum Erstellen einer Massenbilanz für Stoffe aus kommunalem Abwasser für die Lorze werden die Daten von Auslauf des Zugersees, dem Ablauf der ARA Schönau und die Messungen in der Lorze bei Hagendorn herangezogen. Die Massenbilanzen wurden gemittelt über ein Jahr abgeschätzt.

In Abbildung 15 sind die Frachten in der Lorze gemittelt über ein Jahr abgebildet. Die Frachtberechnungen sind in Anhang 4 aufgeführt. Die Balken zeigen die Summe der berechneten Frachten aus Auflauf Zugersee und ARA Schönau. Zum Vergleich und zur Plausibilisierung der berechneten Summe der Frachten, sind die aus den Messdaten in der Lorze bei Hagendorn ermittelten Frachten angegeben (schwarze Rechtecke).

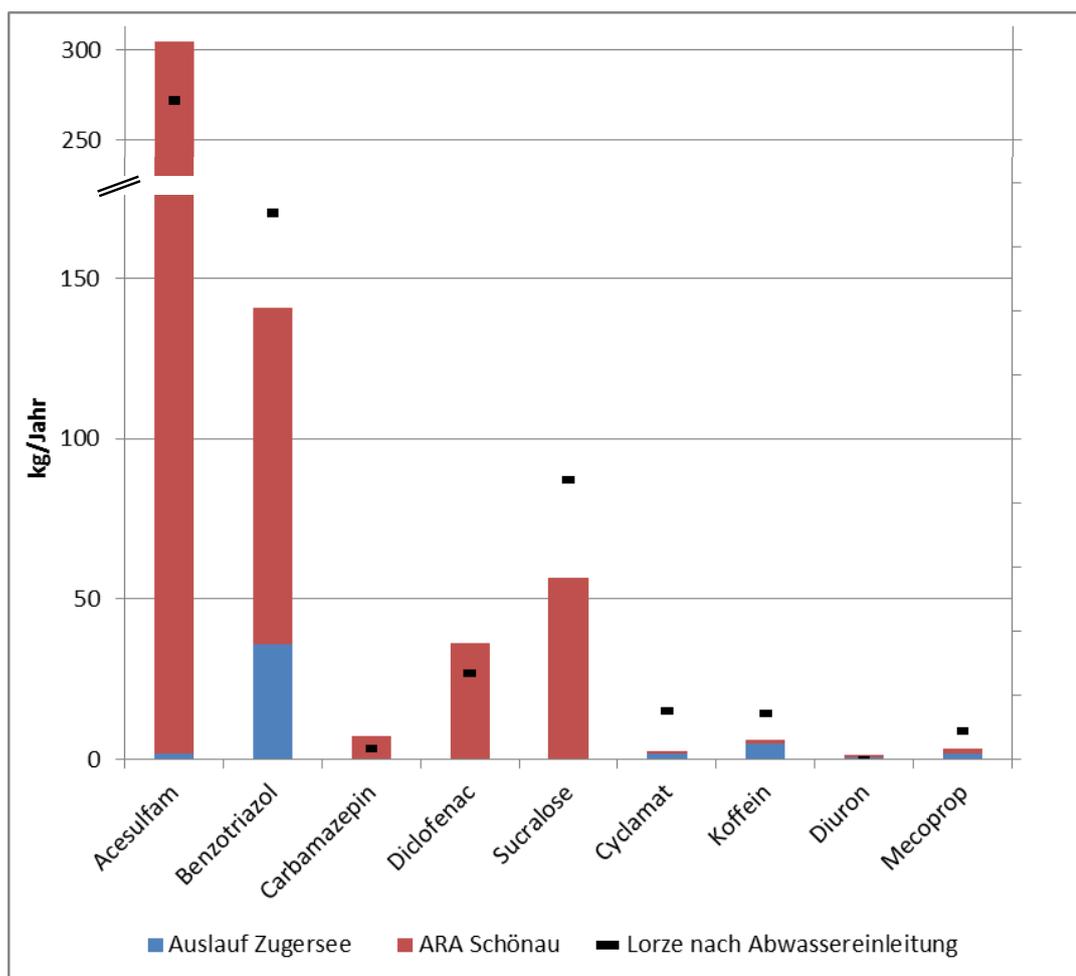


Abbildung 15: Frachten in der Lorze gemittelt über ein Jahr. Die Berechnungen sind in Anhang 4 abgegeben.

Die Tracerstoffe für kommunales Abwasser Acesulfam, Carbamazepin, Diclofenac und Sucralose stammen gemäss den hier getätigten Abschätzungen zu mehr als 95% aus dem Ablauf der ARA Schönau.

Diclofenac ist der einzige der betrachteten Stoffe, welcher ökotoxikologisch relevant ist und das Qualitätskriterium in der Lorze überschreitet (vergl. Abschnitt 5.1.1, Abbildung 5). Diclofenac konnte im Auslauf des Zugersees nicht nachgewiesen werden und weist dort somit eine Konzentration von <6 ng/L auf. Der Anteil der ARA Schönau an der Fracht in der Lorze beträgt somit $>97\%$. Wenn die Stofffracht von Diclofenac in der Lorze auf den Trockenwetterabfluss Q_{347} von $3'680$ L/s⁴ der Lorze unterhalb der Einleitung der ARA Schönau geteilt wird, erhält man eine Konzentration von rund 300 ng/L. Die Wasserqualität der Lorze betreffend organische Spurenstoffe ist aufgrund dieser Konzentration nach dem Beurteilungskonzept der Eawag für organische Spurenstoffe von 2011 als unbefriedigend einzustufen (vergl. Abschnitt 3.3.1).

⁴ Q_{347} aus Basisdaten zum nationalen Stoffflussmodell (Abegglen, et al., 2012; Ort, et al., 2009)

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

7.1 Beurteilung des Handlungsbedarfs

In Tabelle 16 sind die Befunde für die einzelnen Eintragspfade zusammengefasst. Bereiche in denen akuter Handlungsbedarf besteht sind rot, Bereiche in welchen weitere Abklärungen nötig sind, sind gelb gekennzeichnet.

Tabelle 16: Zusammenfassung der Befunde für die einzelnen Eintragspfade und Beurteilung des Handlungsbedarfs. Bereiche in denen akuter Handlungsbedarf besteht sind rot gekennzeichnet, Bereiche in welchen weitere Abklärungen nötig sind gelb.

| Eintragspfad | Tracerstoffe | Zugersee | Ägerisee | Lorze |
|--|---|--|-----------------------|---|
| 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) | Acesulfam (Süssstoff) | Tiefe Konzentrationen (mit Ausnahme von Benzotriazol) | Tiefe Konzentrationen | Teilweise Überschreitungen der Qualitätskriterien, Quelle: Einleitung ARA Schönau |
| | Benzotriazol (Korrosionsschutz) | | | |
| | Carbamazepin (Antiepileptikum) | | | |
| | Diclofenac (Analgetikum) | | | |
| | Sucralose (Süssstoff) | | | |
| Ungereinigtes Abwasser (Mischwasserentlastungen) | Cyclamat (Süssstoff) | Tiefe Konzentrationen | Tiefe Konzentrationen | Durchschnittliche Konzentrationen |
| | Koffein (Genussmittel) | | | |
| Einträge aus Regenkanälen (Trennsysteme) oder Mischwasserentlastungen | Diuron* (Herbizid) | Durchschnittliche Konzentrationen (Mecoprop aber teilweise Faktor 3-8 höher als im Bodensee oder Vierwaldstättersee) | Tiefe Konzentrationen | Durchschnittliche Konzentrationen |
| | Mecoprop* (Herbizid) | | | |
| | Terbutryn (Herbizid) | | | |
| Aktuelle Einträge aus der Landwirtschaft | 2,6-Dichlorbenzamid (Herbizid-Abbauprodukt) | Durchschnittliche Konzentrationen | Tiefe Konzentrationen | Durchschnittliche Konzentrationen |
| | Metolachlor (Herbizid) | | | |
| | Terbutylazin (Herbizid) | | | |
| Frühere Einträge aus der Landwirtschaft / Einträge von Geleisen | Atrazin (Herbizid) | Vergleichsweise hohe Konzentrationen (bis Faktor 10 höher als z.B. Bodensee, Vierwaldstättersee) | Tiefe Konzentrationen | Durchschnittliche Konzentrationen |
| | Atrazin-Desethyl (Herbizid-Abbauprodukt) | | | |

*Diuron und Mecoprop werden auch in der Landwirtschaft in relevanten Mengen eingesetzt und können ebenfalls über ARA in die Gewässer eingetragen werden.

Die Einträge von kommunalem Abwasser über Mischwasserentlastungen sind sowohl für den Zuger- als auch für den Ägerisee als gering einzustufen. Der Abwasseranteil vom Zugersee ist um die 0.1% und für den Ägerisee tendenziell noch tiefer (nicht quantifizierbar). Eine Ausnahme ist die hohe Benzotriazolkonzentration, welche nicht durch die Einleitung von üblichem kommunalem Abwasser erklärbar ist. Die Belastung der

Lorze mit kommunalem Abwasser ist hingegen nach der Einleitung der ARA Schönau erheblich. Ein weiterer auffälliger Befund sind die hohen Atrazin- und Desethyl-Atrazin Konzentrationen im Zugersee. Ebenfalls ist die Mecopropkonzentration im Vergleich zu anderen Seen wie dem Bodensee oder dem Vierwaldstättersee im Zugersee eher hoch. Ob dies aufgrund des häufig wichtigsten Eintragspfads über Mischwasserentlastungen / Regenkanäle oder durch landwirtschaftliche Einträge zu Stande kommt, kann aufgrund der vorhandenen Daten allerdings nicht beurteilt werden. Seitens der Hersteller von Fassaden- und Flachdachschutzmaterialien ist das Problem der Auswaschung bekannt und es sind Bestrebungen im Gange die Emissionen durch bessere Einbindung der Materialschutzmittel zu vermindern.

7.2 Ausbau der ARA Schönau

Nach den Vorgaben des Entwurfs zur Anpassung der Gewässerschutzverordnung (GSchV) v. 22.12.2014 fällt die ARA Schönau aufgrund der Grösse unter die Anlagen, welche mit einer weitergehenden Stufe für die Elimination von Mikroverunreinigungen ausgerüstet werden muss. Die Befunde dieser Studie in der Lorze unterstützen zudem diese Massnahme und zeigen auf, dass ein Ausbau auch aus ökologischen Kriterien sinnvoll ist: Diclofenac überschreitet beispielsweise das ökotoxikologische Qualitätskriterium von 50 ng/L an allen Probenahmetagen. Der aktuelle chemische Zustand der Lorze ist aufgrund der Überschreitung von Diclofenac gemäss dem Beurteilungskonzept der Eawag vom 2012 als ungenügend einzustufen.

Im Entwurf der GSchV ist eine Elimination einer Auswahl an Spurenstoffen von mindestens 80% gefordert. Für alle hier betrachteten plus viele weitere Stoffe wurden im Rahmen der Stoffauswahl für Leitsubstanzen zur Beurteilung der Reinigungsleistung weitergehender Verfahren die Eliminationsleistungen einer Ozonung und Pulveraktivkohlestufe bestimmt (Götz, et al., 2015). Die aus diesen Daten erfolgenden Eliminationsraten für die hier modellierten Stoffe sind im Anhang 5 angegeben. In Abbildung 16 sind die resultierenden Stoffflüsse in der Lorze nach einem Ausbau der ARA Schönau angegeben.

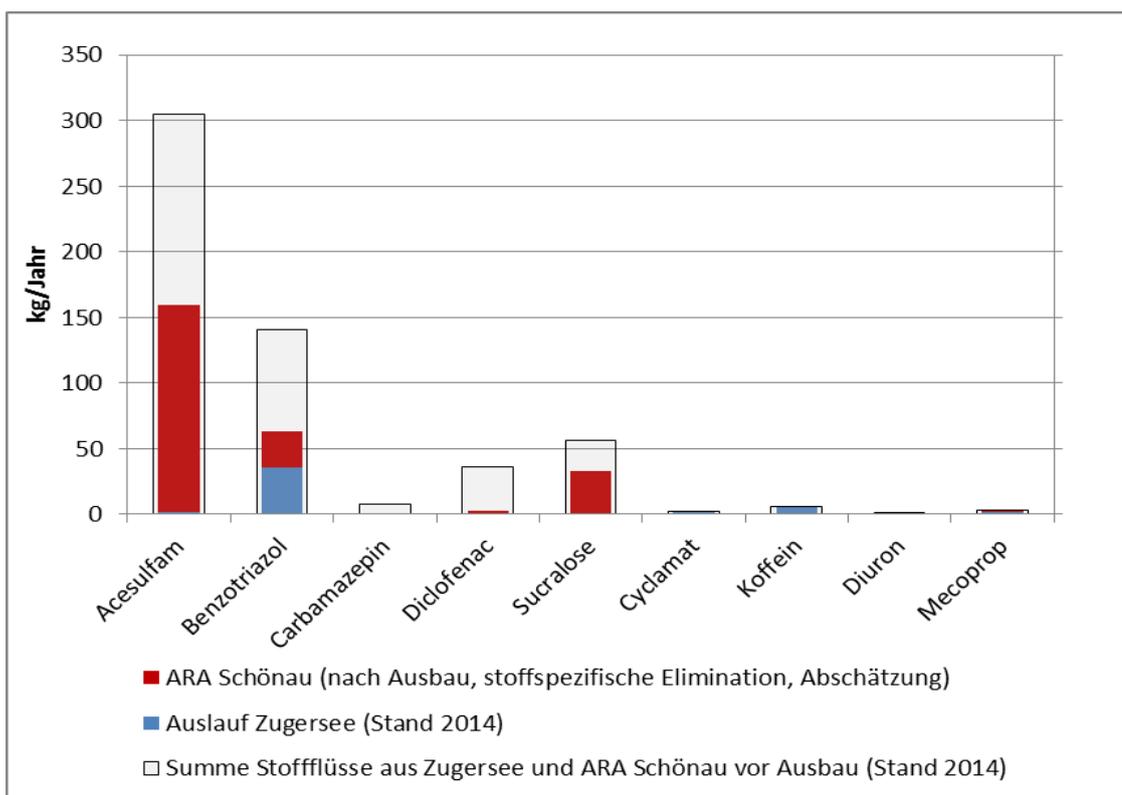


Abbildung 16: Szenarienrechnung. Geschätzte Frachten nach dem Ausbau der ARA Schönau mit einer weitergehenden Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen.

Wenn man den Stofffluss von Diclofenac nach dem Ausbau durch den Trockenwetterabfluss Q_{347} dividiert, erhält man eine Konzentration von 20 ng/L, das Qualitätskriterium von 50 ng/L könnte nach einem Ausbau somit über das ganze Jahr eingehalten werden.

Mit dem Ausbau der ARA Schönau, welcher aufgrund der Grösse der Anlage gem. aktuellem Entwurf der GSchV sowieso durchgeführt werden muss (Ziel Frachtreduktion, Oberliegerverantwortung), wird auch die Lorze ökotoxikologisch entlastet.

7.3 Weitere Abklärungen für den Zugersee

Im Zuger- und im Ägerisee besteht betreffend den Einleitungen von organischen Spurenstoffen aus kommunalem Abwasser über die Entlastungen des Ringsystems kein zusätzlicher Handlungsbedarf. Die Strategien des GVRZ, welche bei der Bewirtschaftung des Ringsystems angewendet werden, erweisen sich bisher nach den aktuellen Messdaten und den daraus folgenden Massenbilanzen zu urteilen, als erfolgreich. Typische abwasserbürtige Stoffe wie Acesulfam, Carbamazepin und Diclofenac sind nur in tiefen Konzentrationen messbar oder unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenzen.

Eine Ausnahme bildet die Einleitung von Benzotriazol in den Zugersee. Die Benzotria-

zolkonzentration ist aussergewöhnlich hoch und es sollte abgeklärt werden ob noch eine aktuelle Quelle für diesen Stoff im Einzugsgebiet existiert oder ob die hohe Konzentration aus einer früheren Einleitung stammen könnte. Aktuell ist das Amt für Umweltschutz des Kantons Zug daran solche Abklärungen vorzunehmen. Im Ägerisee hingegen wurde Benzotriazol nicht in erhöhten Konzentrationen gefunden.

Ein weiterer Auffälliger Befund waren die hohen Konzentrationen an Atrazin und Desethyl-Atrazin im Zugersee. Atrazin wurde früher in der Landwirtschaft und für die Unkrautbekämpfung auf Gleisbetten eingesetzt. Atrazin ist in der Landwirtschaft seit rund 4 Jahren nicht mehr zugelassen (Verwendungsfrist 31.12.2011) und wurde im Gleisbereich bereits 1989 zuerst durch Diuron, danach durch Glyphosat ersetzt. Die erhöhte Atrazinkonzentration könnte somit aus früheren landwirtschaftlichen Anwendungen oder auch aus Anwendungen im Gleisbereich stammen. Die hohe Atrazinkonzentration könnte unter anderem auch durch die Gleisanlage Bahnhof Rotkreuz verursacht worden sein. Diese Abwässer werden bei Regen über den Rotkreuzstollen direkt auf die Zugerseeseite gebracht. Mit den Screening-Messungen der Eawag, welche rund 100 Pflanzenschutzmittel enthalten, wurden keine auffällig hohen Konzentrationen von aktuell zugelassenen Pestiziden gefunden, welche als Ersatzstoffe für Atrazin in der Landwirtschaft verwendet werden. Ein Stoff welcher aus analytischen Gründen allerdings nicht im Screening enthalten ist, ist Glyphosat. Glyphosat wird seit 1992 als Ersatzstoff für Atrazin im Gleisbereich eingesetzt und ist auch in der Landwirtschaft das meistverkaufte Herbizid. Insbesondere falls die relativ hohen Atrazinkonzentrationen im Zugersee von früheren Anwendungen im Gleisbereich stammen würden, müsste aktuell auch eine relativ hohe Glyphosatkonzentration im Zugersee gefunden werden. Es wäre deshalb sinnvoll in einigen Zugerseeproben, welche routinemässig vom AVS Zug entnommen und gemessen werden Glyphosat bestimmen zu lassen. Falls hohe Konzentrationen im See gefunden werden, könnte in einem zweiten Schritt durch Abklärungen betreffend der Anwendung im Einzugsgebiet eruiert werden ob diese vom Einsatz auf Gleisbetten oder aus der Landwirtschaft stammen.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- Abegglen, Christian und Siegrist, Hansruedi. 2012. *Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser - Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen*. Bern : Bundesamt für Umwelt, 2012. Umwelt-Wissen Nr. 1214: 210S.
- . 2012. *Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. Publikation Umwelt-Wissen Nr. 1214*. Bern : Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2012.
- Aeschbach-Hertig, Werner. 1994. *Helium und Tritium als Tracer für physikalische Prozesse in Seen*. s.l. : ETH Zürich, 1994. Diss. ETH Nr. 10714.
- Aqua Plus. 2004. *Untersuchung der Fließgewässer und Seen im Kanton Zug und im Einzugsgebiet des Zugersees - Zusammenstellung der Untersuchungen bis ins Jahr 2000*. Zug : s.n., 2004.
- BAFU. 2015. Hydrologische Grundlagen und Daten. [Online] 2015. [Zitat vom: 05. 05 2015.] <http://www.hydrodaten.admin.ch>.
- Bürge, Ignaz, 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*. 43(12):4381-5, 2009.
- DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW). 2008. *Bestimmung organischer und anorganischer Spurenstoffe im Bodensee*. s.l. : Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), 2008.
- DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe. 2002. *Pharmaka und Hormone in Grund-, Oberflächengewässern und Böden in Baden-Württemberg*. s.l. : Abschlussbericht Projekt-Nr. U33-00.01 - Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2002.
- Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation. 2012. *Mikroverunreinigungen: Spezialfinanzierung für ARA-Ausbau in der Vernehmlassung*. s.l. : Medienmitteilung 25.04.2012, 2012.
- Escher, Beate, et al. 2008. Toxic equivalent concentrations (TEQs) for baseline toxicity and specific modes of action as a tool to improve interpretation of ecotoxicity testing of environmental samples. *J. Environ. Monit.* 2008, 612-621.
- Gälli, René, Ort, Christoph und Schärer, Michael. 2009. *Mikroverunreinigungen in den Gewässern. Publikation Umwelt-Wissen*. Bern : Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2009.
- Götz, Christian. 2013. *Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser im Vierwaldstättersee*. s.l. : Aufsichtskommission Vierwaldstättersee, AK-VWS, 2013.
- Götz, Christian, et al. 2010. *Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser - Kombination von Expositions- und ökotoxikologischen Effektdaten*. s.l. : Gas, Wasser, Abwasser. GWA 7/2010, 2010.
- Götz, Christian, Kase, Robert und Hollender, Juliane. 2011. *Mikroverunreinigungen - Beurteilungskonzept für organische Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser*. Studie im Auftrag des BAFU. . Dübendorf : Eawag, 2011.

- Götz, Christian, Otto, Johanna und Singer, Heinz. 2015. Überprüfung des Reinigungseffekts - Auswahl geeigneter organischer Spurenstoffe. *aqua und gas*. 2/2015, 2015.
- GVRZ. 2012. *Jahresbericht 2012*. s.l. : GVRZ Kläranlage Schönau Friesencham Cham, 2012.
- Hirsch, R., et al. 1999. Occurrence of antibiotics in the aquatic environment. *Science of the Total Environment*. 1999, 225: 109-118.
- Longrée, Philipp, et al. 2011. Organische Mikroverunreinigungen im Bodensee. *GWA*. 2011, 7/2011.
- Longrée, Philipp, Simovic, Jelena und Singer, Heinz. 2013. *Screening von Pharmazeutika, Haushalts- und Industriechemikalien in ausgewählten Einzugsgebieten des nationalen SPEZ Messnetzes für Oberflächengewässer*. Dübendorf : EAWAG, 2013.
- Moschet, Christoph. 2010. *Georeferenced Mass Flux Modelling of Selected Micropollutants in the Catchment of Lake Constance*. Dübendorf : Master-Thesis, Eawag, 2010.
- Ort, Christoph, Hollender, Juliane und Siegrist, Hansruedi. 2009. Model-Based Evaluation of Reduction Strategies for Micropollutants from Wastewater Treatment Plants in Complex River Networks. *Environmental Science and Technology*. 43(9), 2009, Bde. 3214-3220.
- Otto, Johanna, Singer, Heinz und Götz, Christian. 2014. *Substanzen zur Überprüfung des Reinigungseffekts weitergehender Abwasserbehandlungsverfahren - Studie im Auftrag des BAFU*. Dübendorf und Zofingen : Eawag / Envilab, 2014.
- Schärer, Michael, Sieber, Ueli und Müller, Stephan. 2010. *Weitere Massnahmen gegen Mikroverunreinigungen*. s.l. : Gas, Wasser, Abwasser. GWA 7/2010, 2010.
- Singer, Heinz, et al. 2009. *Multikomponenten-Screening für den Rhein bei Basel*. s.l. : Eawag im Auftrag des BAFU, internes Dokument, 2009.
- Singer, Heinz, et al. 2009. *Screening-Messungen von organischen Mikroverunreinigungen im Bodensee - Substanzinventarisierung für das Freiwasser. In Zusammenarbeit mit der IGKB und dem AfU Graubünden*. Dübendorf : Eawag, 2009.
- Singer, Heinz, et al. 2010. *Screening-Messungen von organischen Spurenstoffen im Vierwaldstättersee*. Dübendorf : Eawag, 2010.
- Strahm, Ivo, et al. 2013. Landnutzung entlang des Gewässernetzes - Quellen für Mikroverunreinigungen. *aqua & gas*. 2013, Bd. N5/13.
- Umweltministerium Baden-Württemberg. 2008. *Perfluorierte Tenside in Baden-Württemberg - Zwischenbericht*. s.l. : Umweltministerium Baden-Württemberg, 2008.

Anhang 1

Messdaten Auslauf ARA Schönau 2010 (Substanzinventarisierung)

| Messung Auslauf ARA Schönau 24h-Sammelprobe v. 24.02.2010 (SPE, LC-Orbitrap), Angaben in ng/L | | | | | |
|---|---------------------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|----------|
| CAS-Nummer | Namen | Bestimmungsgrenze ng/L | Messwert ARA Schönau ng/L | Median Kampagne 2010 ng/L | Quotient |
| 58-15-1 | 4-Dimethylaminoantipyrin (Aminopyrin) | 60 | | | |
| 29122-68-7 | Atenolol | 5.0 | 970 | 880 | 1.10 |
| 83905-01-5 | Azithromycin | 5.0 | <i>(180)</i> | 165 | 1.09 |
| 41859-67-0 | Bezafibrat | 5.0 | 33 | 175 | 0.199 |
| 298-46-4 | Carbamazepin | 10 | 460 | 370 | 1.24 |
| 83881-52-1 | Cetirizin | 10 | 30 | 55 | 0.55 |
| 81103-11-9 | Clarithromycin | 15 | 410 | 375 | 1.09 |
| 18323-44-9 | Clindamycin | 35 | <i>(140)</i> | 140 | 1.00 |
| 76-57-3 | Codein | 25 | 140 | 150 | 0.93 |
| 50-18-0 | Cyclophosphamid | 10 | | | |
| 147-94-4 | Cytarabin | 75 | | | |
| 50-02-2 | Dexamethason | 10 | | | |
| 439-14-5 | Diazepam | 15 | | | |
| 15307-86-5 | Diclofenac | 5.0 | 1'000 | 1'000 | 1.00 |
| 133040-01-4 | Eprosartan | 15 | | 380 | |
| 1070-11-7 | Ethambutol | 1000 | | | |
| 107868-30-4 | Exemestan | 20 | | | |
| 49562-28-9 | Fenofibrat | 100 | | | |
| 86386-73-4 | Fluconazol | 50 | | | |
| 54910-89-3 | Fluoxetin | 20 | | | |
| 54-31-9 | Furosemid | 90 | | 170 | |
| 60142-96-3 | Gabapentin | 1000 | 1'300 | 1'900 | 0.68 |
| 95058-81-4 | Gemcitabin | 50 | | | |
| 1403-66-3 | Gentamicin | 1600 | | | |
| 58-93-5 | Hydrochlorothiazid | 70 | 1'200 | 1'200 | 1.00 |
| 15687-27-1 | Ibuprofen | 1600 | | 2'200 | |
| 3778-73-2 | Ifosfamid | 10 | | | |
| 53-86-1 | Indomethacin | 10 | 43 | 92 | 0.47 |
| 66108-95-0 | Iohexol | 500 | | 1'970 | |
| 78649-41-9 / 62883-00-5 | lomeprol + Iopamidol | 3000 | | | |
| 73334-07-3 | Iopromid | 250 | <i>(1'400)</i> | 2'500 | 0.56 |
| 138402-11-6 | Irbesartan | 1000 | | | |
| 22071-15-4 | Ketoprofen | 50 | 79 | 145 | 0.54 |
| 84057-84-1 | Lamotrigin | 10 | 630 | 395 | 1.59 |
| 102767-28-2 | Levetiracetam | 100 | 120 | 280 | 0.43 |
| 137-58-6 | Lidocain | 10 | 220 | 225 | 0.98 |
| 114798-26-4 | Losartan | 600 | | 800 | |
| 61-68-7 | Mefenamic acid | 10 | 85 | 295 | 0.29 |
| 657-24-9 | Metformin | 10 | 1'900 | 2'650 | 0.72 |
| 83-43-2 | Methylprednisolon | 25 | | | |
| 7232-21-5 | Metoclopramid | 50 | | 74 | |
| 37350-58-6 | Metoprolol | 20 | 330 | 350 | 0.94 |
| 443-48-1 | Metronidazol | 50 | 54 | 110 | 0.49 |
| 71320-77-9 | Moclobemid | 10 | 26 | 26 | 1.00 |

| CAS-Nummer | Namen | Bestimmungs- grenze ng/L | Messwert ARA Schönau ng/L | Median Kampagne 2010 ng/L | Quotient |
|-------------|--|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------|
| 57-27-2 | Morphin | 30 | (31) | 110 | 0.28 |
| 22204-53-1 | Naproxen | 100 | | 290 | |
| 196618-13-0 | Oseltamivir | 10 | | | |
| 604-75-1 | Oxazepam | 10 | 120 | 260 | 0.46 |
| 103-90-2 | Paracetamol | 450 | | 1'800 | |
| 60-80-0 | Phenazon (Antipyrin) | 10 | | 30 | |
| 50-24-8 | Prednisolon | 5.0 | | | |
| 125-33-7 | Primidon | 150 | | 270 | |
| 525-66-6 | Propanolol | 10 | 61 | 92 | 0.67 |
| 66357-35-5 | Ranitidin | 5.0 | 79 | 95 | 0.83 |
| 155213-67-5 | Ritonavir | 30 | | 38 | |
| 80214-83-1 | Roxithromycin | 5.0 | | 561 | |
| 3930-20-9 | Sotalol | 5.0 | 210 | 330 | 0.64 |
| 68-35-9 | Sulfadiazin | 10 | | 12 | |
| 122-11-2 | Sulfadimethoxin | 10 | | | |
| 57-68-1 | Sulfamethazin | 20 | | | |
| 723-46-6 | Sulfamethoxazol | 10 | 390 | 245 | 1.59 |
| 144-83-2 | Sulfapyridin | 20 | 200 | 125 | 1.60 |
| 72-14-0 | Sulfathiazol | 5.0 | | | |
| 76-75-5 | Thiopental | 500 | | | |
| 27203-92-5 | Tramadol (+ O-Desvenlafaxin) | 10 | 940 | 995 | 0.94 |
| 738-70-5 | Trimethoprim | 5.0 | 160 | 135 | 1.18 |
| 1401-69-0 | Tylosin | 30 | | | |
| 137862-53-4 | Valsartan | 500 | | 1'700 | |
| 93413-69-5 | Venlafaxin | 5.0 | 240 | 270 | 0.89 |
| 152-11-4 | Verapamil | 15 | | 24 | |
| 402-45-9 | 4-(Trifluoromethyl)phenol | 100 | | | |
| 83-15-8 | 4-Acetamidoantipyrin | 10 | 1'300 | 1'300 | 1.00 |
| 83-07-8 | 4-Aminopyrin (=4-Aminoantipyrine 4-AA) | 1400 | | 2'250 | |
| 1672-58-8 | 4-Formyl-aminoantipyrin | 10 | 610 | 650 | 0.93 |
| 519-65-3 | AMDOPH | 10 | | | |
| 81346-71-6 | Atenolol-desisopropyl | 1600 | | | |
| 56392-14-4 | Atenolol acid (Metoprolol acid) | 20 | 810 | 1'550 | 0.52 |
| 58955-93-4 | Carbamazepin-10,11-dihydro -10,11-dihydroxy | 25 | 1'300 | 1'100 | 1.18 |
| 36507-30-9 | Carbamazepin-10,11-epoxid | 45 | 89 | 87 | 1.02 |
| 882-09-7 | Clofibrinsäure | 10 | | 35 | |
| 34245-14-2 | D617 | 5.0 | 47 | 69.5 | 0.67 |
| 42017-89-0 | Fenofibric-Acid | 5.0 | 9.1 | 57.5 | 0.15 |
| 256-96-2 | Iminostilben | 20 | | | |
| 93413-77-5 | N,N-Didesvenlafaxin | 50 | | | |
| 135308-74-6 | N,O-Didesvenlafaxin* | 150 | 150 | 230 | 0.65 |
| 127-74-2 | N4-Acetylsulfadiazin | 20 | | | |
| 24341-30-8 | N4-Acetyl-Sulfadimethoxin | 5.0 | | | |
| 100-90-3 | N4-Acetyl-Sulfamethazin | 10 | | | |
| 21312-10-7 | N4-Acetyl-Sulfamethoxazol | 8.0 | | 26.5 | |
| 127-76-4 | N4-Acetyl-Sulfathiazol | 20 | | | |

| CAS-Nummer | Namen | Bestimmungs- grenze ng/L | Messwert ARA Schönau ng/L | Median Kampagne 2010 ng/L | Quotient |
|-------------|--|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------|
| 149289-30-5 | N-Desvenlafaxin | 25 | 33 | 48.5 | 0.68 |
| 93413-62-8 | O-Desvenlafaxin (+ Tramadol) | 10 | 940 | 995 | 0.94 |
| 187227-45-8 | Oseltamivir-carboxylat | 10 | | | |
| 738557-20-2 | Ranitidin-N-oxid | 5.0 | | 14.5 | |
| 73851-70-4 | Ranitidin-S-oxid | 25 | | 56.5 | |
| 19395-41-6 | Ritalinic acid | 150 | | | |
| 164265-78-5 | Valsartansäure | 80 | 1'000 | 240 | 4.16 |
| 26530-20-1 | 2-n-Octyl-4-isothiazolin-3-on (OI) | 10 | | | |
| 64359-81-5 | 4,5-Dichloro-2-n-octyl-isothiazol- 3(2H)-on (DCOIT) | 15 | | | |
| 10605-21-7 | Carbendazim | 15 | 49 | 35.5 | 1.38 |
| 330-54-1 | Diuron | 10 | 33 | 29.5 | 1.11 |
| 28159-98-0 | Irgarol | 5.0 | | | |
| 134-62-3 | N,N-diethyl-3-methylbenzamide | 10 | 100 | 110 | 0.91 |
| 60207-90-1 | Propiconazol | 20 | | | |
| 886-50-0 | Terbutryn | 5.0 | 19 | 19 | 1.00 |
| 3380-34-5 | Triclosan | 30 | 38 | 96 | 0.39 |
| 934-32-7 | 2-Aminobenzimidazol | 20 | | | |
| | Irgarol-descyclopropyl | 15 | | | |
| 128-42-7 | 1,2-Bis-(4,4'-dinitro-2,2'- disulfosäure) -phenylethylenoxid | 100 | | | |
| 92-41-1 | 2,7-Naphthalindisulfonsäure | 400 | 680 | 680 | 1.00 |
| 120-18-3 | 2-Naphthalinsulfonsäure | 50 | 100 | 100 | 1.00 |
| 81-11-8 | 4,4'-Diaminostilbene -2,2'-disulfonsäure (DAS) | 1000 | | | |
| 119-63-1 | N-(4-Aminophenyl)-N-methyl -acetamid | 200 | | | |
| 579-10-2 | N-Methylacetanilid | 200 | | | |
| 136-85-6 | 5-Methyl-Benzotriazol | 500 | | >4'000 | |
| 95-14-7 | Benzotriazol | 1000 | | >4'000 | |
| 55589-62-3 | Acesulfam | 50 | >4'000 | >4'000 | |
| 22839-47-0 | Aspartam | 1600 | | | |
| 56038-13-2 | Sucralose | 50 | 2'800 | 2'800 | 1.00 |
| 131-57-7 | Benzophenon | 50 | 100 | 140 | 0.71 |
| 38083-17-9 | Climbazol | 150 | | 230 | |
| 256393-37-0 | Galaxolidon | 500 | 1'000 | 815 | 1.23 |
| 58-08-2 | Coffein | 250 | | 500 | |

Anhang 2

Messdaten Zugersee 2013 (Substanzinventarisierung)

Messung Zugersee, Probenahme v. 19.11.2013 (SPE, LC-Orbitrap), Angaben in ng/L

| Name | Wirkstoffgruppe | Zugersee Ablauf | Zugersee Südliches Becken 5m | Zugersee Südliches Becken 150m |
|---|------------------------|----------------------------|---|---|
| Carbendazim | Biozid | 3.6 | 4.3 | 3.7 |
| Diuron | Biozid | 5.6 | 3 | 5.2 |
| Irgarol | Biozid | <0.5 | <0.5 | 0.5 |
| Irgarol-descyclopropyl | Biozid | 1.7 | 2 | 2.3 |
| N-N-diethyl-3-methylbenzamid (DEET) | Biozid | 11 | 11 | 9.8 |
| 2-6-Dichlorbenzamid | Pestizid | 8.5 | 8.8 | 9.1 |
| Acetochlor ESA/Alachlor ESA | Pestizid | 0.5 | <0.5 | 1.3 |
| Atrazin | Pestizid | 30 | 29 | 42 |
| Atrazin-2-Hydroxy | Pestizid | 7.3 | 6.8 | 9.8 |
| Atrazin-Desethyl | Pestizid | 23 | 22 | 30 |
| Atrazin-desethyl-2-hydroxy | Pestizid | 2.5 | 2.6 | 3.9 |
| Atrazin-Desisopropyl | Pestizid | 8.4 | 9.6 | 12 |
| Azoxystrobin | Pestizid | 0.6 | 0.7 | 0.3 |
| Azoxystrobinsaeure | Pestizid | 1.3 | 1.6 | 1 |
| Chloridazon-methyl-desphenyl | Pestizid | 0.4 | <0.4 | 0.6 |
| Chlortoluron | Pestizid | 0.7 | 0.4 | 0.8 |
| Diazinon | Pestizid | <0.3 | 0.4 | <0.3 |
| Dinoseb | Pestizid | <1 | 1 | <1 |
| Isoproturon | Pestizid | 0.7 | 0.8 | 0.8 |
| MCPA | Pestizid | 3.7 | 3.7 | 2.4 |
| Mecoprop | Pestizid | 19 | 20 | 12 |
| Metolachlor | Pestizid | 3.3 | 3.3 | 0.9 |
| Metolachlor-ESA | Pestizid | 12 | 11 | 8.5 |
| Pethoxamid | Pestizid | 0.3 | 0.5 | <1 |
| Prometon/Terbumeton | Pestizid | 0.6 | 0.7 | 0.9 |
| Prometryn/Terbutryn | Pestizid | 1 | 1.1 | 1.3 |
| Propazin-2-hydroxy&Terbutylazin-2-hydroxy | Pestizid | 9.2 | 11 | 11 |
| Simazin | Pestizid | 5.5 | 5.4 | 8.9 |
| Simazin-2-hydroxy | Pestizid | 1.8 | 1.7 | 2.3 |
| Simeton | Pestizid | 0.4 | 0.6 | 0.5 |
| Tebuconazol | Pestizid | 0.2 | 0.2 | 0.1 |
| Terbutylazin | Pestizid | 9.6 | 8.9 | 6.3 |
| Terbutylazin-desethyl | Pestizid | 6.2 | 6.3 | 3.7 |

| Name | Wirkstoffgruppe | Zugersee Ablauf | Zugersee Südliches Becken 5m | Zugersee Südliches Becken 150m |
|----------------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------------------|---|
| Perfluorbutansäure (PFBA) | PFC | 0.7 | <0.5 | <0.5 |
| Perfluorbutansulfonsäure (PFBS) | PFC | 0.4 | 0.3 | 0.3 |
| Perfluordecansäure (PFDA) | PFC | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| Perfluorheptansäure (PFHpA) | PFC | 0.8 | 0.7 | 0.5 |
| Perfluorhexansäure (PFHxA) | PFC | 1.9 | 1.5 | 1.1 |
| Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS) | PFC | 2 | 1.8 | 1.5 |
| Perfluoroctansäure (PFOA) | PFC | 1.9 | 1.7 | 1.5 |
| Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) | PFC | 6.5 | 5.7 | 6.3 |
| Perfluorpentansäure (PFPA) | PFC | 0.7 | 0.4 | 0.4 |
| Tetraglyme | Industriechemikalie | 3.6 | 3.5 | 2.3 |
| Triethylphosphat | Industriechemikalie | 26 | 18 | 23 |
| 4&5-Methyl-Benzotriazol | Korrosionsschutzmittel | 11 | 10 | 9.6 |
| Benzotriazol | Korrosionsschutzmittel | 420 | 400 | 480 |
| Acesulfam | Lebensmittelzusatzstoff | 16 | 14 | 12 |
| Cyclamat | Lebensmittelzusatzstoff | 16 | 16 | 19 |
| Coffein | Lebensmittelzusatzstoff | 87 | 65 | 32 |
| Saccharin | Lebensmittelzusatzstoff | 5.3 | 3.5 | <3 |
| Benzophenon 3 | Personal Care Product | 0.9 | <0.8 | <0.8 |
| 4-(Trifluoromethyl)phenol | Arzneimittel | 0.7 | 3.2 | 3.2 |
| 4-Acetamidoantipyrin | Arzneimittel | 0.8 | 0.7 | 1.7 |
| AMDOPH | Arzneimittel | <1 | <1 | 1.1 |
| Bezafibrat | Arzneimittel | 3.4 | <0.8 | 1 |
| Carbamazepin | Arzneimittel | 3.2 | <0.8 | 1.4 |
| Clofibrinsäure | Arzneimittel | 0.9 | <0.5 | 1.6 |
| Diclofenac | Arzneimittel | 0.4 | <0.4 | <0.4 |
| Doxylamine | Arzneimittel | <1 | <1 | 1.1 |
| Hydrochlorothiazid | Arzneimittel | 0.5 | <0.5 | <0.5 |
| Lamotrigin | Arzneimittel | 7.4 | <2 | 2.3 |
| Metformin | Arzneimittel | 14 | 12 | 10 |
| Metoprolol | Arzneimittel | 4.9 | <0.5 | 4.2 |
| N-Desvenlafaxin | Arzneimittel | 4 | <1 | 1.3 |
| Phenazon (Antipyrin- ID 2519) | Arzneimittel | 13 | 1.6 | 6.6 |
| Tramadol&O-Desvenlafaxin | Arzneimittel | 7.7 | <2 | 3.3 |
| Trimethoprim | Arzneimittel | 5 | <1 | 3 |
| Valsartan | Arzneimittel | 4.9 | <0.5 | <0.5 |
| Venlafaxin | Arzneimittel | 0.7 | <0.5 | <0.5 |

Anhang 3

Messdaten AVS Zug

Resultate Mikroverunreinigungen Aegerisee, Zugersee und Lorze

Aegerisee Auslauf

| | Probe | Probe | Probe |
|-----------------------|------------|------------|------------|
| | 28.02.2014 | 04.04.2014 | 05.06.2014 |
| | ng/L H2O | ng/L H2O | ng/L H2O |
| 1,2,6 Dichlorbenzamid | 1.9 | 2.4 | 2.0 |
| Coffein | 8.4 | 18.8 | 11.6 |
| Benzotriazol | 1.9 | 3.2 | 1.7 |
| Atrazin-Desethyl | <5 | <5 | <5 |
| Carbamazepin | <5 | <5 | <5 |
| Atrazin | <5 | <5 | <5 |
| Terbutryn | <5 | <5 | <5 |
| Diuron | <5 | <5 | <5 |
| Terbutylazine | <5 | <5 | <5 |
| Metolachlor | <5 | <5 | <5 |
| Cyclamat | <50 | <50 | <50 |
| Sucralose | <50 | <50 | <50 |
| Mecoprop | <10 | <10 | <10 |
| Acesulfam K | <50 | <50 | <50 |

Zugersee 5m

| | Probe | Probe | Probe |
|-----------------------|------------|------------|------------|
| | 11.02.2014 | 03.04.2014 | 04.06.2014 |
| | ng/L H2O | ng/L H2O | ng/L H2O |
| 1,2,6 Dichlorbenzamid | 10.5 | 8.9 | 9.4 |
| Coffein | 26.1 | 23.5 | 30.2 |
| Benzotriazol | 411 | 318 | 331 |
| Atrazin-Desethyl | 21.2 | 21.2 | 21.8 |
| Carbamazepin | <5 | <5 | <5 |
| Atrazin | 24.2 | 22.7 | 27.3 |
| Terbutryn | <5 | <5 | <5 |
| Diuron | <5 | <5 | <5 |
| Terbutylazine | 4.9 | 6.9 | 7.7 |
| Metolachlor | <5 | <5 | <5 |
| Cyclamat | <50 | <50 | <50 |
| Sucralose | <50 | <50 | <50 |
| Mecoprop | 10.4 | 12.1 | 9.7 |
| Acesulfam K | <50 | <50 | <50 |

Zugersee 150m

| | Probe | Probe | Probe |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 11.02.2014 | 03.04.2014 | 04.06.2014 |
| | ng/L H2O | ng/L H2O | ng/L H2O |
| 1,2,6 Dichlorbenzamid | 11.0 | 10.1 | 10.3 |
| Coffein | 14.4 | 10.7 | 16.9 |
| Benzotriazol | 390 | 368 | 598 |
| Atrazin-Desethyl | 25.7 | 22.8 | 28.0 |
| Carbamazepin | <5 | <5 | <5 |
| Atrazin | 27.1 | 28.6 | 31.7 |
| Terbutryn | <5 | <5 | <5 |
| Diuron | <5 | <5 | <5 |
| Terbutylazine | 4.2 | 5.3 | 3.3 |
| Metolachlor | <5 | <5 | <5 |
| Cyclamat | <50 | <50 | <50 |
| Sucralose | <50 | <50 | <50 |
| Mecoprop | 12.1 | 13.4 | 12.2 |
| Acesulfam K | <50 | <50 | <50 |

Zugersee Auslauf

| | Probe | Probe | Probe |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 28.02.2014 | 04.04.2014 | 04.06.2014 |
| | ng/L H2O | ng/L H2O | ng/L H2O |
| 1,2,6 Dichlorbenzamid | 10.4 | 9.5 | 9.8 |
| Coffein | 33.4 | 31.7 | 49.1 |
| Benzotriazol | 374 | 308 | 317 |
| Atrazin-Desethyl | 20.8 | 19.3 | 19.1 |
| Carbamazepin | <5 | <5 | <5 |
| Atrazin | 25.8 | 22.1 | 18.9 |
| Terbutryn | <5 | <5 | <5 |
| Diuron | <5 | <5 | <5 |
| Terbutylazine | 6.0 | 4.8 | 4.2 |
| Metolachlor | <5 | <5 | <5 |
| Cyclamat | <50 | <50 | <50 |
| Sucralose | <50 | <50 | <50 |
| Mecoprop | <10 | <10 | <10 |
| Acesulfam K | <50 | <50 | <50 |

Lorze Hagedorn

| | Probe | Probe | Probe |
|-----------------------|------------|------------|------------|
| | 20.02.2014 | 04.04.2014 | 05.06.2014 |
| | ng/L H2O | ng/L H2O | ng/L H2O |
| 1,2,6 Dichlorbenzamid | 9.9 | 10.3 | 12.7 |
| Coffein | 48.0 | 35.5 | 76.5 |
| Benzotriazol | 490 | 537 | 859 |
| Atrazin-Desethyl | 12.1 | 12.9 | 12.7 |
| Carbamazepin | 8.7 | 20.9 | 9.1 |
| Atrazin | 23.3 | 24.1 | 23.8 |
| Terbutryn | <5 | <5 | <5 |
| Diuron | <5 | <5 | <5 |
| Terbutylazine | 4.4 | 5.6 | 13.7 |
| Metolachlor | <5 | <5 | <5 |
| Cyclamat | <50 | <50 | 56.3 |
| Sucralose | 288 | 361 | 315 |
| Mecoprop | <5 | <5 | 32.1 |
| Acesulfam K | 1132 | 1343 | 542 |

| | BG | | |
|-----------------------|------|--|--|
| | ng/L | | |
| 1,2,6 Dichlorbenzamid | 1 | | |
| Coffein | 1 | | |
| Benzotriazol | 1 | | |
| Atrazin-Desethyl | 5.0 | | |
| Carbamazepin | 5.0 | | |
| Atrazin | 5.0 | | |
| Terbutryn | 5.0 | | |
| Diuron | 5.0 | | |
| Terbutylazine | 5.0 | | |
| Metolachlor | 5.0 | | |
| Cyclamat | 50 | | |
| Sucralose | 50 | | |
| Mecoprop | 10 | | |
| Acesulfam K | 50 | | |

Anhang 4

Frachtberechnungen Lorze

| Standort | Mittlerer Jahresabfluss [m³/s] | Stoff | Mittlere gemessene Konzentration [ng/L] | Stofffracht [kg/Jahr] |
|---|---|---------------|--|--|
| Hydrodaten: Letzi (Nr. 2477) - Messdaten Stoffe: Auslauf Zugersee | 3.2 m³/s | Acesulfam | 16 | 1.6 |
| | | Benzotriazol | 355 | 36 |
| | | Carbamazepin | 3 | 0.32 |
| | | Diclofenac | <6 | <0.61 |
| | | Sucralose | <50 | <5 |
| | | Cyclamat | 16 | 1.6 |
| | | Koffein | 50 | 5.1 |
| | | Diuron | 6 | 0.57 |
| | | Mecoprop | 19 | 1.9 |
| ARA Schönau | 0.64 m³/s (20'313'342 m³/a im 2013) | Acesulfam | 15000 | 303 |
| | | Benzotriazol* | 5200 | 105 |
| | | Carbamazepin* | 350 | 7 |
| | | Diclofenac* | 1800 | 36 |
| | | Sucralose | 2800 | 57 |
| | | Cyclamat | 50** | 1.0 |
| | | Koffein | 50** | 1.0 |
| | | Diuron | 33 | 0.7 |
| | | Mecoprop* | 81 | 1.6 |
| Hydrodaten: Frauenthal (Nr. 2125) - Messdaten Stoffe: Lorze Hagendorn | 8.6 m³/s | Acesulfam | 1003 | 272 |
| | | Benzotriazol | 629 | 171 |
| | | Carbamazepin | 13 | 3 |
| | | Diclofenac | 99 | 27 |
| | | Sucralose | 321 | 87 |
| | | Cyclamat | 56 | 15 |
| | | Koffein | 53 | 14 |
| | | Diuron | <5 | <1 |
| | | Mecoprop | 32 | 9 |

*Mittelwerte von Messungen des Auslaufs Sandfilter während der Zeitperiode von 30.09.2015 – 15.04.2015. Gemessen wurden insgesamt sieben 48h-Mischproben im Auslauf Sandfilter.

**Mittelwerte aus verschiedenen Schweizer Kläranlagen, Daten aus (Otto, et al., 2014)

Anhang 5

Eliminationsraten in weitergehenden Verfahren

| | Werte aus der Literatur (Götz, et al., 2015) | | | In dieser Arbeit verwendete Werte |
|--------------|--|------|-----|-----------------------------------|
| | Biologie | Ozon | PAK | Mittelwert |
| Acesulfam | 8% | 54% | 42% | 48% |
| Benzotriazol | 31% | 63% | 85% | 74% |
| Carbamazepin | -22% | 96% | 91% | 94% |
| Diclofenac | 29% | 97% | 90% | 94% |
| Sucralose | 8% | 36% | 48% | 42% |
| Cyclamat | 100% | - | - | - |
| Koffein | 100% | - | - | - |
| Diuron | 13% | 72% | 99% | 86% |
| Mecoprop | 21% | 64% | 63% | 64% |