

17
09

> Mikroverunreinigungen in den Gewässern

*Bewertung und Reduktion der Schadstoffbelastung
aus der Siedlungsentswässerung*



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

17
—
09

> Mikroverunreinigungen in den Gewässern

*Bewertung und Reduktion der Schadstoffbelastung
aus der Siedlungsentwässerung*

Avec résumé en français – Con riassunto in italiano – With summary in English

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Autoren

René Gälli, Jutta Schmid-Kleikemper (BMG Engineering AG),
Christoph Ort (Eawag), Michael Schärer (BAFU)

Begleitung BAFU

Bettina Hitzfeld, Sébastien Lehmann, Christian Leu, Paul Liechti,
Edith Oosenbrug, Sonia Pellegrini, Michael Schärer, Ulrich Sieber,
Christoph Studer

Zitiervorschlag

Gälli René, Ort Christoph, Schärer Michael 2009:
Mikroverunreinigungen in den Gewässern. Bewertung und Reduktion
der Schadstoffbelastung aus der Siedlungsentwässerung. Umwelt-
Wissen Nr. 0917. Bundesamt für Umwelt, Bern. 103 S.

Übersetzungen

F: David Fuhrmann, 2014 Bôle

I: Giovanna Planzi, 6648 Minusio

E: James Morris, Blackawton (GB)

Gestaltung

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Titelfoto

Kläranlage mit Versuchsanstaltungen (Christoph Ort, Eawag)

Download PDF

www.umwelt-schweiz.ch/uw-0917-d

(eine gedruckte Fassung ist nicht erhältlich)

Code: UW-0917-D

© BAFU 2009

> Inhalt

Abstract	5		
Vorwort	6		
Avant-propos	7		
Prefazione	8		
Introduction	9		
Zusammenfassung	10		
Résumé	16		
Riassunto	22		
Summary	28		
<hr/>			
1	Einleitung	33	
<hr/>			
2	Ausgangslage und Handlungsbedarf	36	
2.1	Generelle Herausforderungen für den stofflichen Gewässerschutz	36	
2.2	Potenzielle Mikroverunreinigungen und deren Umweltrelevanz	40	
2.3	Handlungsbedarf	44	
<hr/>			
3	Belastungslage Mikroverunreinigungen in der Schweiz	45	
3.1	Umweltbeobachtungen	45	
3.2	Datengrundlage	45	
3.3	Kurzbeschreibung Stoffflussmodell	48	
3.3.1	Systemabgrenzung	49	
3.3.2	Eingangsrößen	49	
3.4	Beispiel Carbamazepin und Diclofenac	52	
3.5	Auswertung von Langzeitabflussmessungen	55	
3.6	Gültigkeit des Modells, Abschätzung für weitere Substanzen	56	
3.7	Fazit	58	
3.8	Kostenschätzung von Massnahmen in zentralen Abwasserreinigungsanlagen	58	
<hr/>			
4	Forschungsprojekte MicroPoll 1	62	
4.1	Einleitung	62	
4.2	Priorisierung von Mikroverunreinigungen	63	
4.2.1	Überblick	63	
4.2.2	Biozide als Mikroverunreinigungen in Abwasser und Gewässern	64	
4.2.3	Verringerung der Schadstoffbelastung durch Pharmaka mittels Urinseparierung und ökotoxikologische Relevanz	67	
4.2.4	Priorisierung von Umwandlungsprodukten von Mikroverunreinigungen	70	
4.3	Identifikation von Mikroverunreinigungen mit biologischen Testsystemen	72	
4.3.1	Einleitung	72	
4.3.2	Methodenentwicklung zum Effektmonitoring in aquatischen Ökosystemen	75	
4.3.3	Umwelttoxikologische Untersuchungen zur Erkennung des Gefahrenpotentials von pharmazeutischen Mikroverunreinigungen im Wasser	76	
4.4	Heutige Siedlungsentwässerung	77	
4.4.1	Einleitung	77	
4.4.2	Zustand, Kosten und Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung	78	
4.5	Technischer Wandel in der Siedlungsentwässerung	80	
4.5.1	Einleitung	80	
4.5.2	Umsetzung eines nachhaltigen Siedlungsentwässerungskonzeptes am Beispiel der Stadt Winterthur	80	
4.5.3	Chancen für den Wandel zu einer regenerativen Abwasserwirtschaft	82	
4.6	Neues Organisationsmodell	85	
4.6.1	Neues Organisationsmodell zur Förderung einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft in der Schweiz	85	
<hr/>			
5	Schlussfolgerungen	88	
5.1	Umweltzustand	88	
5.2	Handlungsoptionen	88	
5.2.1	Massnahmen an der Quelle	89	
5.2.2	Zentraler Ansatz (end-of-pipe)	90	
5.2.3	Dezentraler Ansatz	91	
5.2.4	Organisatorische Massnahmen	92	
5.3	Erwartungen bezüglich Wirkung und Effizienz von Massnahmen	92	
5.4	Weiterer Handlungsbedarf	96	

Verzeichnisse	98
Abkürzungen	98
Glossar	98
Abbildungen	99
Tabellen	100
Literatur	100

> Abstract

Over the past few years a situation analysis on micropollutants in watercourses has been carried out on the initiative of the FOEN through various research projects. This report summarises the results of these studies. The research groups obtained more detailed knowledge of the pollution situation, enabling them to make reliable model predictions and indicate possible options for action, their anticipated effects and the resultant costs – with particular focus on the technical optimization of municipal waste water treatment. It became evident that significant reductions in micropollutant levels can only be made by combining a number of measures on multiple levels.

Keywords:

Micropollutants, waste water

In den letzten Jahren wurde auf Initiative des BAFU mittels verschiedener Forschungsprojekte eine Situationsanalyse bezüglich Mikroverunreinigungen in den Gewässern durchgeführt. Dieser Bericht fasst die Resultate dieser Studien zusammen. Die Forschungsgruppen haben genauere Erkenntnisse zur Belastungslage gewonnen, konnten zuverlässige Modellvorhersagen machen und zeigten mögliche Handlungsoptionen, deren zu erwartende Wirkungen und die resultierenden Kosten auf – mit speziellem Fokus auf die technische Optimierung der Abwasserreinigung. Dabei zeigte sich, dass nur durch eine Kombination mehrerer Massnahmen auf unterschiedlichen Ebenen die Gewässerbelastung mit Mikroverunreinigungen markant verringert werden kann.

Stichwörter:

Mikroverunreinigungen,
Abwasser

Divers projets de recherche réalisés ces dernières années à l'initiative de l'OFEV ont servi à évaluer la présence de micropolluants dans les eaux de notre pays. Le présent rapport fait la synthèse de ces études. Les groupes de recherche ont pu ainsi préciser leurs connaissances en la matière, élaborer des modèles de prévision fiables, proposer des interventions possibles avec leurs effets probables et les coûts qu'elles impliqueraient – avec une focalisation particulière sur l'optimisation technique de l'épuration des eaux usées dans les milieux urbains. Il est apparu que seul un ensemble de mesures combinées à divers niveaux sera susceptible de réduire de manière substantielle la charge de micropolluants dans nos cours d'eau.

Mots-clés:

Micropolluants, eaux usées

Negli ultimi anni, su iniziativa dell'UFAM è stata effettuata un'analisi della situazione dei microinquinanti nelle acque attraverso vari progetti di ricerca. Il presente rapporto riassume i risultati di questi studi. I gruppi di ricerca hanno acquisito conoscenze più precise sulle condizioni d'inquinamento, formulato previsioni affidabili basate su modelli e illustrato le opzioni possibili, gli effetti prevedibili e i relativi costi, in particolare per quanto riguarda l'ottimizzazione della depurazione delle acque di scarico. È emerso che solo una combinazione di più misure adottate a vari livelli permetterà di ridurre sensibilmente la concentrazione di microinquinanti nelle acque.

Parole chiave:

Microinquinanti, acque di scarico

> Vorwort

Die natürlichen Funktionen unserer Flüsse und Seen sind vielfältig: Sie gestalten Landschaften und sind wichtige Erholungsräume, transportieren Wasser und Geschiebe, sind wichtige Ökosysteme mit grosser natürlicher Vielfalt und erneuern unsere Grundwasserreserven. Um sie auch künftig optimal zur Trinkwasserversorgung, Bewässerung und Stromproduktion nutzen zu können und Menschen, Tiere, Umwelt und Infrastrukturen wirksam vor den Gewalten des Wassers zu schützen, müssen die Gewässer nachhaltig bewirtschaftet werden. Dabei stehen gemäss dem Leitbild Fließgewässer drei Entwicklungsziele im Vordergrund:

- > Ausreichender Raum und eine natürliche Gestaltung der Gewässer
- > Gewährleistung einer naturnahen Wasserführung und eines naturnahen Geschiebehaushalts
- > Sicherstellung einer genügenden Wasserqualität

Dieser Bericht ist ganz dem Thema Wasserqualität gewidmet, mit speziellem Fokus auf die Gewässerbelastung mit Mikroverunreinigungen aus der Siedlungsentwässerung. Es wird eine Analyse der Belastungslage der Schweizerischen Oberflächengewässer präsentiert, welche sich auf einer gesamtschweizerischen Modellrechnung sowie auf den Resultaten verschiedener Messkampagnen abstützt. Diese Situationsanalyse wurde im Rahmen des im Jahre 2006 gestarteten Projektes «Mikroverunreinigungen in den Gewässern – Strategie MicroPoll» des BAFU durchgeführt. Der Bericht gibt zusätzlich eine Übersicht über die Auswirkungen von Mikroverunreinigungen in Gewässern und zeigt auf, mit welchen Massnahmen in der Siedlungsentwässerung die Gewässerbelastung deutlich reduziert werden kann.

Willy Geiger
Vizedirektor
Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

> Avant-propos

Nos cours d'eau et nos lacs ont maintes fonctions à leur actif: ils façonnent le paysage et offrent de précieux espaces de détente, transportent l'eau et charrient des alluvions, constituent des écosystèmes essentiels par leur grande diversité naturelle, renouvellent la nappe phréatique, donc nos réserves d'eau souterraine. Il s'agit d'appliquer à cette ressource vitale les principes de la gestion durable si nous voulons perpétuer de façon optimale ses diverses utilisations – surtout production d'électricité, boisson et irrigation – tout en assurant une protection efficace de l'environnement, de ses habitants et des infrastructures contre la violence des eaux. Ainsi le document «Cours d'eau suisses: idées directrices» définit les trois grands objectifs suivants:

- > procurer aux cours d'eau un espace suffisant, laissé autant que possible à l'état naturel
- > assurer un régime hydrologique (débits) proche de l'état naturel, charriage compris
- > garantir une qualité d'eau suffisante

Centré sur le thème «qualité de l'eau», le présent rapport examine plus précisément le problème que posent les micropolluants contenus dans les eaux des systèmes d'assainissement. Il présente la situation actuelle des eaux superficielles en Suisse en se basant sur une modélisation de ces sources de pollution, ainsi que sur les résultats de plusieurs campagnes de mesure. Cette analyse de situation a été réalisée dans le cadre du projet «Micropolluants dans les eaux – stratégie MicroPoll» lancé par l'OFEV en 2006. Par ailleurs, ce rapport passe en revue les effets produits par les micropolluants présents dans nos eaux et décrit les mesures à prendre dans les réseaux d'évacuation des eaux urbaines pour faire nettement baisser cette charge polluante.

Willy Geiger
sous-directeur
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

> Prefazione

Le funzioni naturali dei nostri fiumi e laghi sono molteplici: plasmano il paesaggio e sono importanti spazi di svago, trasportano acqua e materiale solido di fondo, sono preziosi ecosistemi con una grande diversità naturale e rigenerano le nostre riserve di acque sotterranee. Per poterli sfruttare anche in futuro in modo ottimale per l'approvvigionamento di acqua potabile, l'irrigazione e la produzione di energia elettrica e proteggere efficacemente le persone, gli animali, l'ambiente e le infrastrutture dalle forze dell'acqua, le acque devono essere gestite in modo sostenibile. Conformemente alle linee guida per la gestione dei corsi d'acqua svizzeri, gli obiettivi di sviluppo prioritari sono tre:

- > spazio sufficiente e sviluppo naturale dei corsi d'acqua;
- > regime di deflusso e bilancio del materiale solido di fondo il più possibile naturali;
- > garantire una qualità sufficiente dell'acqua.

Il presente rapporto è interamente dedicato alla qualità dell'acqua, con un'attenzione speciale alla presenza di microinquinanti provenienti dallo smaltimento delle acque urbane. Presenta un'analisi delle concentrazioni di inquinanti nelle acque superficiali svizzere, la quale è stata effettuata sulla base di un modello di calcolo comprendente l'intero territorio svizzero e basato sui risultati di varie campagne di misurazione. L'analisi è stata effettuata nell'ambito del progetto «Microinquinanti nelle acque – Strategie MicroPoll» dell'UFAM, avviato nel 2006. Il rapporto traccia inoltre un quadro delle ripercussioni dei microinquinanti sulle acque, evidenziando le misure da adottare nell'ambito dello smaltimento delle acque urbane per ridurre sensibilmente l'inquinamento delle acque.

Willy Geiger
vicedirettore
Ufficio federale dell'ambiente (UFAM)

> Introduction

Rivers and lakes in Switzerland have a variety of natural functions: They shape landscapes, are important leisure areas, carry water and sediments, are important eco systems with great natural diversity and replenish groundwater reserves. To maintain these watercourses for future use for power generation, drinking water provision and irrigation, and to protect people, animals, the environment and infrastructure effectively from the force of the water, watercourses have to be sustainably managed. The Guiding Principles for Swiss Watercourses focus on three development goals:

- > Ensuring the watercourses are given adequate space, left in as natural a state as possible
- > Guaranteeing near-natural water flows and bed load balances
- > Guaranteeing adequate water quality

This report is devoted to the topic of water quality, with particular focus on water pollution by micropollutants from urban wastewater. It contains an analysis of the state of pollution of Swiss surface waters which is based on land wide modelling and the results of various measurement campaigns. This situation analysis was carried out within the FOEN project «Micropollutants in Watercourses – MicroPoll Strategy» initiated in 2006. The report also includes an overview over the impact of micropollutants on watercourses and identifies measures that can be taken regarding urban wastewater to significantly reduce water pollution.

Willy Geiger
Vice Director
Federal Office for the Environment (FOEN)

> Zusammenfassung

Auf Initiative des BAFU wurde mittels verschiedener Forschungsprojekte eine Situationsanalyse bezüglich Mikroverunreinigungen in den Gewässern durchgeführt. Dieser Bericht fasst die Resultate dieser Studien zusammen.

Dank dem guten Ausbaustandard der Siedlungsentwässerung (Kanalisationen, Regenrückhaltebecken und Abwasserreinigungsanlagen) hat sich die Wasserqualität der schweizerischen Gewässer in den letzten Jahrzehnten deutlich verbessert. Insbesondere hatten die Massnahmen eine starke Reduktion des Nährstoffeintrags zur Folge. Der Eintrag von organischen Spurenstoffen über die Siedlungsentwässerung ist jedoch nach wie vor eine Herausforderung für den Gewässerschutz. Unzählige Stoffe können in sehr tiefen Konzentrationen (Nano- bis Mikrogramm pro Liter) in den Gewässern nachgewiesen werden und werden daher als organische Mikroverunreinigungen bezeichnet. Auch in Fischen und im Trinkwasser lassen sich organische Mikroverunreinigungen nachweisen.

Ausgangslage

In der Schweiz sind über 30 000 Stoffe im täglichen Gebrauch. Darunter fallen Stoffe wie beispielsweise Pflanzenschutzmittel, Biozide, Pharmaka oder Inhaltsstoffe von Konsumentenprodukten (Körperpflegeprodukte, Reinigungsmittel etc.), die in unzähligen Anwendungen in Industrie, Gewerbe und Haushalt eingesetzt werden. Eine systematische Übersicht über Mengen, Verwendung, Emissionen, Umweltverhalten und Toxizität dieser Stoffe existiert nicht.

Woher stammen die Mikroverunreinigungen?

Der Eintrag in die Gewässer erfolgt sowohl über die Siedlungsentwässerung als auch über diffuse Emissionen wie beispielsweise die Landwirtschaft. Dieser Bericht fokussiert jedoch auf die Siedlungsentwässerung. Schwer abbaubare Stoffe, welche ins Abwasser gelangen, passieren die Abwasserreinigungsanlage (ARA) häufig unverändert. Auch leicht abbaubare Stoffe gelangen zeitweise via Regenentlastungen in die Gewässer oder werden in ARAs, die nicht auf dem neusten Stand der Technik sind, nur unvollständig abgebaut. Entwässern mehrere ARAs in dasselbe Gewässer, kommt es zu einer Akkumulation von Mikroverunreinigungen entlang der Fließstrecke oder in stehenden Gewässern. In Gebieten, wo Fließgewässer zur Trinkwassergewinnung genutzt werden oder Grundwasservorkommen infiltrieren, können Mikroverunreinigungen ins Trinkwasser gelangen. Die Schweiz hat im weiteren als Wasserschloss Europas eine besondere Oberliegerverantwortung gegenüber den Nachbarstaaten. Täglich werden mit dem gereinigten Abwasser Mikroverunreinigungen ins benachbarte Ausland exportiert.

Wie gelangen Mikroverunreinigungen in die Gewässer?

Mikroverunreinigungen können bereits in sehr tiefen Konzentrationen nachteilige Wirkungen auf Wasserlebewesen ausüben. Ob ein Stoff Probleme in Gewässern verursacht, wird weitgehend durch seine physikalisch-chemischen und ökotoxikologischen Eigenschaften bestimmt. Stoffe, die gut wasserlöslich und schwer oder nicht abbaubar sind, können in der Regel in den Gewässern nachgewiesen werden. Die Stoffeigen-

Was bewirken Mikroverunreinigungen in Gewässern?

schaften und die ins Abwasser emittierte Menge bestimmen somit die im Auslauf der ARAs zu erwartenden Konzentrationen. Hohe Konzentrationen treten insbesondere in kleinen Fließgewässern auf, wenn grosse ARAs oder mehrere ARAs ihr Abwasser einleiten. Ob die in Gewässern auftretenden Konzentrationen eine Gefährdung für Wasserlebewesen darstellen, kann anhand der ökotoxikologischen Eigenschaften der Stoffe abgeschätzt werden. Spezifische Effekte, wie sie beispielsweise durch hormonaktive Stoffen verursacht werden, können bereits im Bereich von Nanogramm pro Liter auftreten. Entsprechende Effekte wurden in Schweizer Fließgewässern nachgewiesen. Bisher existieren nur für wenige dieser Stoffe Daten zur Abschätzung der Umweltauswirkungen. Meistens handelt es sich dabei um Stoffe, die eine gezielte Wirkung auf Organismen haben und daher einem Zulassungsverfahren unterliegen (z. B. Pflanzenschutzmittel).

In Gewässern kann eine grosse Vielzahl von Mikroverunreinigungen nachgewiesen werden. Dies bedeutet, dass die Gesamtwirkung aller dieser Mikroverunreinigungen die Auswirkungen auf Wasserorganismen bestimmt. Weiter müssen neben den eingesetzten Stoffen selbst auch deren Umwandlungsprodukte in die Beurteilung der Problematik mit einbezogen werden.

Wichtige Erkenntnisse aus den Forschungsprojekten

Belastung der Gewässer und deren Auswirkungen

In sechs Studien wurde eine Übersicht bezüglich Mikroverunreinigungen in den Gewässern erarbeitet. Die Resultate sind in diesem Kapitel kurz zusammengefasst.

Belastungslage Schweiz

Da es schwierig und sehr aufwendig ist, mit Messungen die Belastungslage von Mikroverunreinigungen in sämtlichen relevanten Gewässern der Schweiz zu erfassen, wurde ein Nationales Stoffflussmodell entwickelt und mithilfe von Messdaten überprüft. Dieses Modell ermöglicht, für zahlreiche Stoffe abzuschätzen, wie weit die Siedlungsentwässerung zur Gewässerbelastung beiträgt. Die Auswertungen ergaben für einzelne Stoffe lokal derart hohe Konzentrationen, dass eine Schädigung von Wasserlebewesen nicht ausgeschlossen werden kann. Das Modell wurde neben der Erkennung von lokal stark belasteten Gewässerabschnitten auch zur Beurteilung von technischen Massnahmen bei ARAs verwendet.

Mit unterschiedlichen Methoden wurden für verschiedene Stoffgruppen gewässerrelevante Stoffe und Umwandlungsprodukte identifiziert.

Welche Mikroverunreinigungen sind relevant?

Da für Biozide keine Zahlen zu den eingesetzten und in Gewässer gelangenden Mengen verfügbar waren, wurden entsprechende Erhebungen bei Herstellern und Verbrauchern durchgeführt. Anhand dieser Daten wurde ein einfaches Priorisierungsverfahren entwickelt, das eine Erkennung von gewässerrelevanten Stoffen erlaubt. Dieses Vorgehen kann auch auf andere Stoffgruppen übertragen werden.

Da neben den Ausgangsstoffen auch deren Umwandlungsprodukte in Gewässern relevant sein können, wurde ein Modell entwickelt, das die Bildung und Verteilung

von Umwandlungsprodukten in der Umwelt abschätzt. Bei Pflanzenschutzmitteln wie auch bei Pharmaka zeigte sich, dass Umwandlungsprodukte einen relevanten Beitrag zur Gewässerbelastung leisten können, obwohl sie meist weniger giftig sind als die Ausgangsprodukte. Bei gesetzlich vorgeschriebenen Stoffbewertungen sollten deshalb Umwandlungsprodukte routinemässig mit beurteilt werden, oder es sollte zumindest eine erste grobe Modellabschätzung des Umweltverhaltens durchgeführt werden.

Zur Beurteilung der Gewässerqualität werden neben chemischen Analysen oft ökotoxikologische Untersuchungen mit Fischen, Wasserflöhen, Algen etc. an Gewässer- und Abwasserproben durchgeführt. Die meisten Standardtests sind auf die akute Toxizität von Stoffen ausgerichtet (hohe Konzentrationen und kurze Expositionszeit) und daher nicht geeignet, um chronische Belastungen durch Mikroverunreinigungen zu beurteilen. Zwei Projekte untersuchten alternative Testsysteme zur Beurteilung von Gewässerbelastungen. Es zeigte sich aber, dass sowohl die Messung des oxidativen Stress', ermittelt mit Fischzellen, als auch die Untersuchung der Entwicklung von Zebrafisch-Embryonen zu wenig empfindlich auf die geprüften Mikroverunreinigungen (Pharmaka, Biozide, Pflanzenschutzmittel) reagierten.

Biologische Testverfahren zur Beurteilung von Mikroverunreinigungen in Gewässern

Massnahmen zur Reduktion der Gewässerbelastung

Die heutige Siedlungsentwässerung in der Schweiz weist einen Wiederbeschaffungswert von ca. 100 Milliarden Franken (Mrd. CHF) auf. Um die Funktionsfähigkeit des Systems zu erhalten und laufend an den Stand der Technik anzupassen, fallen gegenwärtig jährliche Kosten von ca. 1,7 Mrd. CHF an. Aufgrund des prognostizierten steigenden Erneuerungsbedarfs stellte sich die Frage, mit welchen organisatorischen und technischen Massnahmen gleichzeitig Gewässerbelastungen mit Mikroverunreinigungen reduziert werden können.

In einem der Projekte wurde der Einfluss von organisatorischen Massnahmen untersucht. Daraus konnte der Schluss gezogen werden, dass eine Effizienzsteigerung des Siedlungsentwässerungssystems, wie es zurzeit in der Schweiz betrieben wird, möglich ist. Dies kann beispielsweise durch den Zusammenschluss von kleinen Gemeinden zu einem grösseren Einzugsgebiet mit einer zentralen Abwasserreinigungsanlage und durch ein effizienteres Einzugsgebietsmanagement geschehen. Grössere Einzugsgebiete erleichtern Massnahmen zur Professionalisierung der Siedlungsentwässerung, wie beispielsweise die gemeinsame Nutzung von fachlich hoch qualifiziertem Betriebspersonal, welches durch seine Arbeit eine Verbesserung der Reinigungsleistung von Abwasserreinigungsanlagen und gleichzeitig eine Kostenreduktion bewirkt.

Organisatorische Massnahmen in der Siedlungsentwässerung

Grundsätzlich können technische Massnahmen in dezentrale Massnahmen (Abwasservorbehandlung am Ort der Entstehung) und zentrale Massnahmen (Optimierung der bestehenden zentralen Abwasserreinigungsanlagen) unterschieden werden, wobei im Rahmen dieses Projektes nur die dezentralen Massnahmen im Sinne einer Alternative zum bestehenden zentralen System betrachtet wurden.

Technische Massnahmen in der Siedlungsentwässerung

Bei den dezentralen Massnahmen wurde unterschieden zwischen Massnahmen bei massgeblichen Emittenten (z. B. Spitälern) und einem vollständig dezentralen System

der Siedlungsentwässerung, bei dem jedes Haus über eine eigene «ARA» mit separater Fassung und Reinigung von Urin, Fäkalien und Grauwasser verfügt.

Am Beispiel des Kantonsspitals der Stadt Winterthur konnte nachgewiesen werden, dass dezentrale Massnahmen nicht angezeigt sind, da der Anteil der Emissionen des Kantonsspitals verglichen mit den Gesamtemissionen eher gering ist. Es zeigte sich, dass dezentrale Massnahmen nur dort sinnvoll sind, wo eine oder mehrere Punktquellen (z. B. Spital, Alterspflegeheim) einen grossen Anteil an der Gesamtfracht bei den Arzneimitteln in einem Einzugsgebiet ausmachen. Dezentrale Massnahmen sind bereits heute bei vielen Industriebetrieben implementiert, die eine eigene Abwasser(vor)-behandlungsanlage betreiben.

In einem weiteren Projekt wurde die Auswirkung von so genannten NoMix-Toiletten auf den Eintrag von Pharmaka in Gewässer untersucht. Bei dieser Technologie wird der Urin separat gesammelt und entsorgt, so dass im Urin enthaltene Mikroverunreinigungen (insbesondere Pharmaka) nicht ins Abwasser gelangen. Es zeigte sich, dass vom Menschen eingenommene Pharmaka nur zu 60–70 % über den Urin ausgeschieden werden und somit die Einträge aus Haushalten ins Abwasser mit der NoMix-Toilette nicht gänzlich verhindert werden können. Hinzu kommt, dass alle übrigen im Haushalt eingesetzten, und allenfalls problematischen, Publikumsprodukte wie Waschmittel direkt ins Abwasser und damit in die öffentliche Kanalisation gelangen.

In einem zusätzlichen Projekt wurde die heutige Siedlungsentwässerung mit Kanalisationssystem und zentraler Abwasserreinigung mit einem hypothetischen dezentralen System verglichen, welches ohne Kanalisationssystem auskommt und bei dem die Abwasseraufbereitung in den einzelnen Gebäuden integriert ist. Die aus den Haushalten stammenden Mikroverunreinigungen werden entsprechend behandelt oder gesammelt und extern entsorgt (Urin, Fäkalien). Die Resultate zeigten, dass eine Abkehr vom heutigen System nicht sinnvoll ist. Neben den deutlich höheren Kosten und langen Übergangszeiten bei einer Umstellung wäre auch mit betrieblichen Problemen zu rechnen. Ein dezentrales System ist hingegen allenfalls geeignet für kleinräumige, entlegene Siedlungen ohne bereits bestehende entsprechende Infrastruktur.

Schlussfolgerungen

Der Eintrag von Mikroverunreinigungen aus der Siedlungsentwässerung beeinträchtigt Pflanzen und Tiere der Gewässer sowie die Qualität der Trinkwasservorkommen in Seen und im flussnahen Grundwasser. Es gibt klare Hinweise für nachteilige Einwirkungen in den Gewässern. So führen hormonaktive Stoffe zu einer Verweiblichung von männlichen Fischen. Die Tatsache, dass für hunderte bis tausende Mikroverunreinigungen in den Gewässern nur ungenügendes Wissen vorliegt, unterstreicht den deutlichen Handlungsbedarf. Bei den Trinkwasserressourcen besteht zur Zeit keine Gefährdung für die Bevölkerung, trotzdem müssen aus Gründen des vorsorglichen Verbraucherschutzes Massnahmen getroffen werden.

Schlussfolgerungen

Die Existenz von Mikroverunreinigungen in Schweizer Gewässern lässt erkennen, dass regulatorische Massnahmen, zum Beispiel auf Stufe der Chemikaliengesetzgebung und

der Gewässerschutzverordnung, in ihrer heutigen Form zu kurz greifen und lediglich geeignet sind, die Anwendung einzelner Stoffe und Stoffgruppen zu regulieren. «Erzieherische Massnahmen» wie Pfandsysteme, Verbraucherinformation und die Anpassung von Entsorgungswegen können mithelfen, Emissionen zu reduzieren. Es sollte durch gezielte Öffentlichkeitsarbeit ein breites Bewusstsein für das Thema Mikroverunreinigungen bei der Industrie und bei den Konsumenten geschaffen werden und somit die Akzeptanz für weitergehende Massnahmen erhöht werden. Die Anzahl verwendeter Stoffe in Produkten dürfte in Zukunft weiter zunehmen. Ihre Verbrauchsmengen dürften ebenfalls ansteigen, dies einerseits wegen steigender Bevölkerungszahl und andererseits wegen der höheren Lebenserwartung (Medikamente und Körperpflegeprodukte).

Der Zeitpunkt für weiterreichende Massnahmen in der Siedlungswasserwirtschaft ist günstig, da diesbezüglich Erneuerungen anstehen. Für den Unterhalt und die Erneuerung des bestehenden Systems werden hohe Kosten anfallen. Im Rahmen der Planung dieser Arbeiten können notwendige Massnahmen zur Reduktion von Mikroverunreinigungen einbezogen werden. Daher sollte jetzt in Erwägung gezogen werden, mit welchen technischen Massnahmen das heutige System optimiert werden kann. Die zur Anwendung gelangenden Verfahren sollten folgende Charakteristika aufweisen:

- > «Breitbandwirkung» gegen möglichst viele Mikroverunreinigungen
- > Flexibilität bei der Implementierung in die bereits vorhandene Verfahrenstechnik
- > Einfach realisierbare Erweiterung zur bestehenden Infrastruktur
- > Akzeptables Kosten-Nutzen-Verhältnis

Durch zentrale Massnahmen auf der ARA (z. B.: Ozonung oder Aktivkohlebehandlung) kann ein grosser Teil der Mikroverunreinigungen eliminiert werden. Im Vordergrund stehen Massnahmen zur Frachtreduktion und zur Verbesserung der Wasserqualität. Dies betrifft

- > grosse ARAs zur Reduktion grosser Frachten (Oberliegerverantwortung, Reduktion der Stofffrachten ins Meer),
- > ARAs an Gewässerabschnitten mit ungenügender Verdünnung des eingeleiteten gereinigten Abwasser, sowie
- > ARAs an Gewässern die für die Trinkwassernutzung von Bedeutung sind (Seen mit wichtigen Trinkwasserfassungen, Flüsse mit Uferinfiltration ins Grundwasser im Bereich von Trinkwasserfassungen)

Es ist zu erwarten, dass nach einer sorgfältigen Kosten-Nutzen-Abschätzung rund 100 ARAs mit mehr als 10000 Einwohnerwerten ausgebaut werden müssten, um die genannten Zielsetzungen zu erreichen. Dieser Ausbau ist mit Investitionskosten von schätzungsweise 1,2 Mrd. CHF verbunden. Die zu erwartenden Mehrkosten (Betrieb und Investitionen, inklusive Filtrationsstufe) für die heutigen Abwasserreinigung liegen bei 5–10 % für grössere ARAs und bei 15–25 % für kleinere ARAs.

Spezifische dezentrale und organisatorische Massnahmen können einen zusätzlichen Beitrag zur Lösung des Problems Mikroverunreinigungen in Gewässern leisten. Unter

den Voraussetzungen der heutigen Siedlungswasserwirtschaft liegt der Schwerpunkt bei der technischen Verbesserung der bestehenden Abwasserreinigungsanlagen. Nur eine erhöhte Effizienz der Abwasserreinigung ermöglicht die Elimination eines Grossteils der Mikroverunreinigungen.

Im Rahmen des Projektes «Mikroverunreinigungen in Gewässern» erarbeitet das BAFU gemeinsam mit kantonalen Fachstellen, Forschungsanstalten, Verbänden und der Industrie Grundlagen zur Beurteilung von zentralen technischen Massnahmen. In grosstechnischen Versuchen werden weitergehende Reinigungsstufen evaluiert (Ozonung und Behandlung mit Aktivkohle). Die Beurteilung der Verfahren umfasst die Bestimmung der Elimination von zahlreichen Mikroverunreinigungen, die Überwachung der Ökotoxizität im gereinigten Abwasser sowie die Erhebung von betrieblichen und betriebswirtschaftlichen Kenngrössen. Zusätzlich werden Kriterien für die Überprüfung der Effizienz von verfahrenstechnischen Massnahmen sowie zur Beurteilung des Einflusses oben erwähnter Massnahmen auf die Gewässerqualität erarbeitet.

Technische Massnahmen
in der Erprobung

Weitere wichtige Handlungsfelder sind:

- > Reduktion der Emissionen von Mikroverunreinigungen aus diffusen Quellen
- > Erarbeitung einer systematischen Übersicht über Mikroverunreinigungen (inkl. Einbezug von einer Vielzahl von Mikroverunreinigungen in die Gewässeruntersuchung)
- > Erarbeitung von Methoden zur ökotoxikologischen Bewertung von Gewässerbelastungen

Hinweis:

*Im Teil «Verzeichnisse» finden Sie ein **Glossar**, welches die wichtigsten Fachbegriffe erklärt.*

> Résumé

Plusieurs projets de recherche ont été lancés ces dernières années à l'initiative de l'OFEV pour évaluer la présence de micropolluants dans les eaux de notre pays. Le présent rapport fait la synthèse de ces études.

La mise en place de systèmes efficaces d'évacuation des eaux urbaines (canalisations, bassins de rétention des eaux de pluie et stations d'épuration des eaux usées) a permis une importante amélioration de la qualité des eaux en Suisse. Ces mesures ont notamment réduit dans de fortes proportions les apports en éléments fertilisants. Mais les éléments traces organiques qui passent la barrière des systèmes d'assainissement restent un défi à relever par les instances responsables de la protection des eaux. Une multitude de substances présentes dans des concentrations infimes (de l'ordre du microgramme ou du nanogramme par litre), et appelées, de ce fait, micropolluants, peuvent être décelée dans les eaux. On trouve également de ces micropolluants organiques dans les poissons ainsi que dans l'eau potable.

Contexte

En Suisse, on compte plus de 30 000 substances présentes dans toutes sortes de produits d'usage courant – tels que biocides, produits phytosanitaires, médicaments, produits de consommation (produits de beauté ou de nettoyage, etc.) – pour des applications elles-mêmes très diverses dans l'industrie, le commerce ou la sphère privée. Il n'existe pas de répertoire systématique sur les quantités, les utilisations, les émissions, l'impact environnemental et la toxicité de ces substances.

D'où les micropolluants proviennent-ils?

Les apports de micropolluants résultent des systèmes d'évacuation des eaux urbaines ainsi que des émissions diffuses émanant notamment de l'agriculture. Le présent rapport se concentre cependant sur les systèmes d'assainissement. Les substances difficilement dégradables charriées par les eaux usées traversent la plupart du temps telles quelles la station d'épuration (STEP); et les substances facilement dégradables aboutissent dans les eaux à certains moments par les déversoirs d'orage, ou ne sont que partiellement dégradées par les STEP techniquement dépassées. Si plusieurs STEP déversent les eaux qu'elles traitent dans le même milieu, il en résulte une accumulation de micropolluants le long du cours d'eau ou dans le lac récepteur. Dans les zones où des cours d'eau servent de source d'eau potable ou s'infiltrent dans la nappe souterraine, on peut retrouver des micropolluants dans l'eau de boisson. La Suisse se doit en outre d'assumer la responsabilité particulière que lui confère sa position de «château d'eau» du continent européen, en amont des Etats qui l'entourent: jour après jour des micropolluants s'écoulent vers les pays voisins avec les eaux épurées.

Comment les micropolluants parviennent-ils dans les eaux?

Même en concentrations très faibles, les micropolluants peuvent avoir des effets néfastes sur les organismes aquatiques. Les problèmes que risque de causer une substance donnée dépendent essentiellement de ses propriétés physico-chimiques et écotoxicologiques. Toutes les substances solubles dans l'eau et difficilement ou non dégradables peuvent généralement être détectées dans les eaux. Les concentrations prévisibles à la

Quels sont les effets des micropolluants sur les eaux?

sortie d'une STEP sont ainsi déterminées par les propriétés de la substance considérée et par la quantité présente dans les eaux usées. On en observe notamment des concentrations élevées dans les petits cours d'eau récepteurs de grandes STEP ou de STEP successives. Quant à savoir si ces concentrations représentent un danger pour les organismes aquatiques, cela peut s'évaluer sur la base des caractéristiques écotoxicologiques de la substance considérée. On a constaté de façon probante dans des cours d'eau en Suisse qu'il suffit parfois d'une concentration de l'ordre du nanogramme par litre pour que se produisent les effets spécifiques des perturbateurs endocriniens par exemple. Mais on ne dispose à ce jour des données nécessaires pour évaluer les atteintes à l'environnement que pour quelques-uns de ces micropolluants; il s'agit le plus souvent de substances qui exercent un effet ciblé sur des organismes, donc soumises à une procédure d'homologation (p. ex. produits phytosanitaires).

Comme les micropolluants présents dans les eaux sont extrêmement nombreux et divers, il faut savoir que l'impact subi par les organismes aquatiques correspond à l'effet global de ces substances. Et en plus des substances de départ, il convient d'inclure leurs métabolites (produits de leur dégradation) dans l'évaluation de cette problématique.

Résultats importants des projets de recherche

La pollution des eaux et ses effets

Comme il serait difficile et extrêmement coûteux de mesurer avec précision la charge en micropolluants de toutes les eaux du pays, on a procédé à une modélisation des flux de substances. Testé à l'aide de valeurs mesurées, ce modèle national permet d'estimer pour de nombreuses substances quel est l'apport des réseaux d'évacuation des eaux urbaines à la pollution des cours d'eau et des lacs. Les calculs effectués ont révélé par endroits des concentrations telles que l'on ne peut exclure des atteintes aux organismes aquatiques. Ce modèle a servi d'une part à mettre en évidence des charges polluantes localement élevées dans certains tronçons de cours d'eau, d'autre part à évaluer les effets d'améliorations techniques apportées à des STEP.

Evaluation de la charge polluante

Des méthodes adaptées aux catégories chimiques en cause ont permis d'identifier des substances polluantes et leurs métabolites.

Quels sont les micropolluants importants?

Comme on ne disposait pas de chiffres relatifs aux biocides utilisés et aux quantités de ces substances parvenant dans les eaux, des enquêtes à ce sujet ont été faites auprès des fabricants et des utilisateurs. On a utilisé les informations obtenues pour élaborer une méthode simple de définition des priorités, laquelle permet de reconnaître les biocides importants en termes de pollution des eaux. Cette procédure est également applicable à d'autres catégories de substances.

Comme les métabolites issus des processus de dégradation des substances initiales peuvent s'avérer nocifs en eux-mêmes dans les eaux, on a créé un modèle destiné à évaluer la formation et la dispersion de ces métabolites dans l'environnement. Il apparaît ainsi que les dérivés de produits phytosanitaires et de médicaments peuvent contri-

buer de façon appréciable à la charge polluante des eaux, tout en étant dans l'ensemble moins toxiques que les substances de départ. Il convient donc que les évaluations prescrites par la législation englobent systématiquement les métabolites des substances à identifier, ou tout au moins une première appréciation modélisée de leur comportement environnemental.

Parallèlement aux analyses chimiques, on évalue souvent les propriétés écotoxicologiques des eaux en examinant leurs effets sur des poissons, des daphnies, des algues, etc. d'échantillons prélevés dans des eaux usées, des cours d'eau ou des lacs. Les tests courants s'intéressent en général à la toxicité aiguë des substances (concentrations élevées et brève durée d'exposition), et ne conviennent donc pas pour estimer les charges chroniques de micropolluants. Deux projets ont étudié d'autres façons d'évaluer la pollution des eaux; mais on a constaté que la mesure du stress oxydant déterminée sur des cellules de poissons aussi bien que l'examen de développement d'embryons de poisson-zèbre constituent des méthodes trop peu sensibles à l'impact des micropolluants testés (médicaments, biocides ou produits phytosanitaires).

Tests biologiques pour l'évaluation des micropolluants dans les eaux

Mesures à prendre pour réduire la charge polluante des eaux

Les infrastructures d'assainissement de la Suisse possèdent actuellement une valeur économique de remplacement qui se chiffre à quelque 100 milliards de francs. Et l'on compte environ 1,7 milliard de francs par année pour assurer le bon fonctionnement du système et adapter celui-ci à l'évolution technique. Dans la perspective des nombreuses rénovations qui seront prochainement nécessaires, on s'est demandé quelles mesures organisationnelles et techniques permettraient simultanément de réduire la charge des eaux en micropolluants.

L'un des projets évoqués plus haut a porté sur les effets prévisibles de mesures organisationnelles. Selon ses conclusions, il est possible d'améliorer l'efficacité du système d'évacuation des eaux urbaines tel qu'il est exploité actuellement en Suisse. Cela pourrait se faire par exemple en regroupant des petites communes pour former un bassin versant plus étendu avec une station d'épuration centrale, et en rationalisant la gestion du réseau. Le fait d'accroître la superficie des bassins versants techniques facilite la professionnalisation de l'assainissement des eaux usées, notamment avec le recours collectif à du personnel d'exploitation hautement qualifié dont le travail améliore l'efficacité et l'économicité des stations d'épuration.

Mesures organisationnelles dans les systèmes d'évacuation des eaux urbaines

Du côté des mesures techniques, on peut faire une distinction de principe entre interventions locales (traitement préalable des eaux usées là où elles sont produites) et interventions centrales (optimisation des installations d'épuration existantes). Le projet dont il est question ici se contentait d'examiner en quoi des mesures locales pourraient apporter des solutions de rechange au système centralisé tel qu'il fonctionne actuellement.

Mesures techniques dans les systèmes d'évacuation des eaux

Pour ce qui est des mesures à caractère local, on a envisagé d'une part les mesures susceptibles d'être prises au niveau de sources d'émissions importantes (p. ex. hôpitaux), d'autre part le principe d'un système entièrement décentralisé dans lequel cha-

que maison aurait sa propre «STEP» avec captage et épuration séparés de l'urine, des matières fécales et des eaux grises.

L'exemple examiné de l'hôpital cantonal à Winterthour (ZH) a montré que des mesures décentralisées ne seraient pas indiquées en l'occurrence, du fait que les quantités de substances polluantes émises par un tel établissement ne constituent qu'une part relativement faible des émissions globales. Il s'avère que des mesures locales ne se justifient que si une ou plusieurs sources ponctuelles (p. ex. hôpital, home médicalisé) représentent une bonne partie de la charge globale en substances médicamenteuses pour le bassin versant considéré. Par ailleurs, de nombreux sites industriels ont d'ores et déjà mis en place leur propre installation de (pré)traitement des eaux usées.

Un autre projet a étudié l'effet des «WC NoMix» sur les apports de composés pharmaceutiques dans les eaux. Cette technologie de collecte et de traitement séparés des urines empêche des micropolluants (résidus de médicaments notamment) de se retrouver dans les eaux usées. On a constaté que 60 à 70 % seulement des médicaments absorbés par l'être humain sont éliminés par voie urinaire, de sorte que les toilettes NoMix ne retiennent pas entièrement ces rejets dans les eaux usées des ménages. De plus, les produits de consommation courante utilisés par les ménages et pouvant poser des problèmes – lessives par exemple – passent directement dans les eaux et les canalisations publiques.

Enfin, un dernier projet a comparé le système actuel d'évacuation des eaux urbaines avec réseau de canalisations et épuration centralisée des eaux avec un hypothétique système décentralisé sans canalisations et traitement de l'eau intégré à chaque bâtiment. Les micropolluants issus des ménages seraient traités de façon ciblée ou collectés et évacués vers l'extérieur (urines, matières fécales). Les résultats de cette étude indiquent qu'il ne serait pas judicieux d'abandonner le système actuel. Outre les coûts nettement plus élevés et la phase de transition nécessairement longue qu'impliquerait ce bouleversement, il faudrait s'attendre à des problèmes d'exploitation. Par contre, un système décentralisé pourrait éventuellement convenir pour de petites agglomérations isolées et encore dépourvues d'une infrastructure appropriée.

Conclusions

Les micropolluants véhiculés par le réseau d'évacuation des eaux urbaines ont des effets nuisibles sur les plantes et les animaux aquatiques ainsi que sur la qualité des réserves d'eau potable captée dans des lacs ou dans la nappe phréatique à proximité de cours d'eau. Il y a des indices clairs de nocivité pour les eaux. On constate par exemple que des perturbateurs endocriniens provoquent une féminisation de poissons mâles. Le fait que nous ayons actuellement des connaissances insuffisantes sur les centaines ou les milliers de micropolluants présents dans nos eaux constitue en lui-même une raison d'agir. Dans l'état actuel des choses, les micropolluants trouvés dans les ressources d'eau potable ne présentent aucun danger pour la population de notre pays; mais des mesures de précaution devront être prises pour protéger les consommateurs contre une éventuelle aggravation de la charge polluante.

Conclusions

La présence de micropolluants dans les eaux suisses révèle des lacunes dans la réglementation actuelle – notamment au niveau de la législation sur les produits chimiques et de l’ordonnance sur la protection des eaux – qui se limite à l’utilisation de certaines substances ou catégories de substances. Des mesures «éducatives» telles que systèmes de consigne, information des consommateurs et adaptation des cheminements de l’évacuation des eaux peuvent contribuer à réduire les émissions. Il faudrait sensibiliser par des campagnes ciblées les responsables de l’industrie et les consommateurs à la problématique des micropolluants, afin que tous comprennent la nécessité de prendre des mesures plus poussées. Il est probable que le nombre de substances utilisées dans des produits de tout genre augmentera encore à l’avenir. Et leurs quantités seront également à la hausse parallèlement à la croissance démographique d’une part, à la progression de l’espérance de vie d’autre part (médicaments et produits de soins corporels).

Le moment est favorable pour prendre les mesures qui s’imposent dans la gestion des eaux urbaines, du fait que le réseau d’assainissement a maintenant besoin d’être modernisé. La rénovation et l’entretien du système existant coûteront cher. On a la possibilité d’intégrer à la planification de ces travaux les mesures requises pour réduire les quantités de micropolluants dans les eaux. Il conviendra ainsi d’examiner quelles mesures techniques permettront d’optimiser le système actuel. Les méthodes à prendre en considération devront présenter les caractéristiques suivantes:

- > action «à large spectre» contre le plus grand nombre possible de micropolluants,
- > intégration en souplesse dans les procédés techniques existants,
- > extension des infrastructures actuelles facile à réaliser,
- > rapport coût/rendement acceptable.

On pourra éliminer une part importante des micropolluants par des mesures centrales, prises au niveau des STEP (p. ex. ozonation ou traitement au charbon actif). Les mesures à envisager en priorité auront essentiellement pour effets de réduire la charge polluante et d’améliorer la qualité de l’eau. Les installations concernées sont:

- > les STEP de grande capacité, afin de réduire les fortes charges (responsabilité inhérente à la situation d’amont, réduction des rejets en mer);
- > les STEP situées sur des tronçons de cours d’eau ne permettant pas une dilution suffisante des eaux épurées qu’ils reçoivent;
- > les STEP situées à proximité d’eaux utilisées comme ressource en eau potable (lacs comportant d’importants captages d’eau potable, cours d’eau présentant une infiltration dans la nappe souterraine à proximité de captages d’eau potable).

Selon toute vraisemblance, une étude de rentabilité approfondie conduira à admettre la nécessité de moderniser une centaine de STEP dépassant 10 000 équivalents-habitants pour atteindre les objectifs évoqués plus haut. Ces travaux de modernisation impliqueront des investissements estimés à 1,2 milliard de francs. Les coûts supplémentaires à prévoir (investissements et exploitation, y compris phase de filtration) pour l’épuration des eaux usées se situeront entre 5 et 10 % pour les grandes STEP, et entre 15 et 25 % pour les petites installations.

Des mesures spécifiques, à caractère organisationnel et local, peuvent apporter un complément de solution au problème des micropolluants dans les eaux. Mais dans les conditions qui prévalent actuellement pour la gestion des eaux urbaines en Suisse, la priorité doit aller à l'amélioration technique des stations d'épuration existantes. Seule une efficacité accrue des opérations d'épuration permettra d'éliminer la majeure partie des micropolluants.

Dans le cadre du projet «micropolluants dans les eaux», l'OFEV travaille – en collaboration avec les services cantonaux, les stations de recherche, les associations intercommunales et l'industrie – à l'élaboration des bases nécessaires pour évaluer les innovations techniques à apporter aux STEP. Cela se fait sous forme d'essais à l'échelle industrielle de systèmes d'épuration supplémentaires (ozonation et traitement au moyen de charbon actif). L'évaluation des procédés consiste à déterminer la quantité de micropolluants que les méthodes testées permettent d'éliminer, à surveiller l'écotoxicité des eaux épurées et à relever certains paramètres techniques et économiques de l'exploitation. En outre, des critères permettant de contrôler l'efficacité de procédés techniques et d'évaluer l'influence sur la qualité des eaux des mesures évoquées ci-dessus sont élaborés.

Mesures techniques à l'essai

Les autres champs d'action importants sont:

- > réduire les émissions de micropolluants provenant de sources diffuses,
- > dresser un tableau systématique des micropolluants (et inclure un grand nombre de ces substances dans l'analyse des eaux),
- > élaborer des méthodes d'évaluation écotoxicologique de la pollution des eaux.

> Riassunto

Su iniziativa dell'UFAM sono stati avviati vari progetti di ricerca che hanno analizzato la situazione dei microinquinanti nelle acque. Il presente rapporto riassume i risultati di questi studi.

Negli ultimi decenni, grazie alla buona qualità degli impianti di smaltimento delle acque urbane (canalizzazioni, bacini di raccolta dell'acqua piovana e impianti di depurazione delle acque), la qualità delle acque svizzere è notevolmente migliorata. Le misure hanno permesso in particolare di ridurre sensibilmente l'apporto di sostanze nutritive. Nell'ambito della protezione delle acque resta tuttavia da risolvere il problema dell'immissione di elementi organici in tracce attraverso gli scarichi. Nelle acque possono infatti essere presenti innumerevoli inquinanti in concentrazioni molto basse (dell'ordine di microgrammi o nanogrammi per litro), noti appunto come microinquinanti organici. I microinquinanti organici sono rilevabili anche nei pesci e nell'acqua potabile.

Situazione iniziale

In Svizzera sono utilizzate giornalmente oltre 30000 sostanze. Tra queste figurano, ad esempio, prodotti fitosanitari, biocidi, farmaci o componenti di beni di consumo (prodotti per il corpo, detersivi, ecc.) utilizzati in innumerevoli applicazioni industriali, artigianali e domestiche. Non esiste una raccolta sistematica di dati sulle quantità, sull'utilizzazione, sulle emissioni, sul comportamento nell'ambiente e sulla tossicità di queste sostanze.

Da dove provengono i microinquinanti?

Queste sostanze sono immesse nelle acque sia attraverso gli impianti di smaltimento delle acque urbane che attraverso emissioni diffuse, ad esempio nell'agricoltura. Il presente rapporto si concentra tuttavia sugli impianti di smaltimento delle acque. Le acque di scarico contengono sostanze difficilmente degradabili che gli impianti di depurazione delle acque (IDA) spesso non riescono a trattare e, di conseguenza, giungono nei corsi d'acqua. Nelle acque confluiscono anche sostanze facilmente degradabili convogliate nelle canalizzazioni dall'acqua piovana o non completamente degradate dagli IDA non conformi allo stato attuale della tecnica. Se più IDA defluiscono nelle stesse acque si verifica un accumulo di microinquinanti sia lungo i corsi d'acqua o che negli specchi d'acqua. Nelle zone in cui i corsi d'acqua sono utilizzati per la produzione di acqua potabile o vi è un'infiltrazione nelle falde acquifere, i microinquinanti possono inquinare l'acqua potabile. La Svizzera, considerata la riserva idrica dell'Europa, ha inoltre una responsabilità particolare nei confronti dei Paesi limitrofi: attraverso le acque di scarico depurate vi esportiamo ogni giorno i microinquinanti.

Come fanno i microinquinanti a finire nelle acque?

I microinquinanti possono essere nocivi per gli organismi acquatici anche in concentrazioni minime. Il grado di nocività che una sostanza ha per le acque dipende in gran parte dalle sue proprietà fisico-chimiche ed ecotossicologiche. Di norma, la presenza nei corsi d'acqua di sostanze facilmente solubili e difficilmente o non degradabili può essere dimostrata. Le proprietà delle sostanze e le quantità immesse nelle acque deter-

Cosa provocano i microinquinanti nelle acque?

minano pertanto le concentrazioni che ci si attendono nelle acque rilasciate dagli IDA. Elevate concentrazioni si registrano in particolare nei corsi d'acqua piccoli quando gli IDA grandi o più IDA vi rilasciano le loro acque depurate. Le proprietà ecotossicologiche delle sostanze permettono di valutare se le concentrazioni rilevate nelle acque rappresentano un pericolo per gli organismi acquatici. Effetti specifici, come ad esempio quelli provocati dai perturbatori endocrini, possono verificarsi già a livello di nanogrammi al litro. Effetti corrispondenti sono stati riscontrati nei corsi d'acqua svizzeri. Sinora i dati disponibili con cui valutare l'impatto ambientale riguardano solo poche sostanze. In genere, si tratta di sostanze che hanno un effetto mirato sugli organismi e, di conseguenza, sono soggette a una procedura di omologazione (ad esempio i prodotti fitosanitari).

Nelle acque possono essere presenti numerosi microinquinanti. Le ripercussioni per gli organismi acquatici sono quindi determinate dall'effetto complessivo di tutti questi microinquinanti. Inoltre, la valutazione della problematica deve tener conto non solo delle sostanze impiegate ma anche dei loro prodotti di trasformazione.

Importanti risultati dei progetti di ricerca

Inquinamento delle acque e sue ripercussioni

Essendo difficile e molto dispendioso misurare le concentrazioni di microinquinanti in tutte le acque svizzere importanti, è stato dapprima elaborato e poi testato, con l'ausilio di dati ottenuti con delle misurazioni, un modello nazionale dei flussi di sostanze. Questo modello permette di stimare per numerose sostanze il contributo dato dagli impianti di smaltimento delle acque urbane all'inquinamento delle acque. Per singole sostanze, le analisi hanno rivelato concentrazioni locali così elevate che non si possono escludere danni per gli organismi acquatici. Oltre che per identificare i tratti localmente molto inquinati, il modello è stato utilizzato anche per valutare le misure tecniche a livello degli IDA.

L'inquinamento in Svizzera

Con vari metodi sono stati identificati, per vari gruppi di sostanze, le sostanze e i prodotti di trasformazione che hanno un'incidenza sulle acque.

Quali sono i microinquinanti dannosi?

Siccome per i biocidi si disponeva di dati sulle quantità impiegate e riversate nelle acque, sono stati svolti appositi rilevamenti presso i fabbricanti e i consumatori. In base ai dati raccolti è stata elaborata una semplice procedura di priorizzazione (?) che consente di identificare le sostanze con un'incidenza sulle acque. Questa procedura può essere applicata anche ad altri gruppi di sostanze.

Poiché oltre alle sostanze di partenza possono avere un'incidenza sulle acque anche i loro prodotti di trasformazione, è stato sviluppato un modello che stima la formazione e la distribuzione di prodotti di trasformazione nell'ambiente. Per i prodotti fitosanitari e i farmaci è emerso che i prodotti di trasformazione possono contribuire in modo rilevante all'inquinamento delle acque, pur essendo, in genere, meno tossici dei prodotti di partenza. Nell'ambito delle valutazioni delle sostanze prescritte dalla legge occorre quindi tener conto sistematicamente anche dei prodotti di trasformazione o

almeno procedere a una prima stima grossolana del comportamento nell'ambiente mediante un modello.

Per valutare la qualità delle acque, oltre alle analisi chimiche sono spesso effettuate anche indagini ecotossicologiche su pesci, pulci d'acqua, alghe, ecc. su campioni di acque e acque di scarico. La maggior parte dei test standard è incentrata sulla tossicità acuta delle sostanze (concentrazioni elevate e tempi di esposizione brevi) e di conseguenza non è adatta per valutare gli inquinamenti cronici da microinquinanti. Due progetti hanno esaminato sistemi di test alternativi per valutare l'inquinamento delle acque. È emerso però che sia la misurazione dello stress ossidativo, determinato utilizzando cellule di pesci, sia l'analisi dell'evoluzione degli embrioni di pesce zebra reagiscono in modo troppo poco sensibile ai microinquinanti considerati (farmaci, biocidi, prodotti fitosanitari).

Test biologici per valutare i microinquinanti nelle acque

Misure di riduzione dell'inquinamento delle acque

Gli attuali impianti di smaltimento delle acque urbane in Svizzera hanno un valore di sostituzione di circa 100 miliardi di franchi. I costi per conservare la funzionalità del sistema e adeguarla continuamente allo stato della tecnica si aggirano su 1,7 miliardi di franchi all'anno. Dato il previsto incremento del bisogno di rinnovo è d'obbligo chiedersi quali siano le misure organizzative e tecniche che, al contempo, permettono di ridurre il tenore di microinquinanti nelle acque.

In uno dei progetti è stato analizzato l'influsso delle misure organizzative. Lo studio è giunto alla conclusione che è possibile aumentare l'efficienza del sistema svizzero di smaltimento delle acque urbane. Si può ad esempio raggruppare piccoli Comuni per formare un comprensorio più grande con un impianto centrale di depurazione delle acque di scarico e una gestione più efficiente. Comprensori più grandi agevolano le misure di professionalizzazione degli impianti di smaltimento delle acque urbane, come ad esempio l'uso congiunto di personale operativo altamente qualificato, che con il suo lavoro migliora l'efficienza depurativa degli impianti di depurazione delle acque e, allo stesso tempo, riduce i costi.

Misure organizzative nell'ambito dello smaltimento delle acque urbane

Le misure tecniche si suddividono sostanzialmente in misure decentrate (pretrattamento delle acque di scarico alla fonte) e misure centrali (ottimizzazione degli impianti centrali di depurazione delle acque), ma nell'ambito di questo progetto sono state considerate unicamente le misure decentrate intese quale alternativa al sistema centrale esistente.

Misure tecniche nell'ambito dello smaltimento delle acque urbane

Le misure decentrate sono state suddivise in misure presso grandi emittitori (ad esempio gli ospedali) e sistemi completamente decentrati di impianti di smaltimento delle acque urbane, in cui ogni casa dispone di un proprio «IDA» con captazione e depurazione separate delle urine, delle feci e delle acque grigie.

L'esempio dell'ospedale cantonale della città di Winterthur ha permesso di dimostrare che le misure decentrate non sono adatte, poiché la quota delle emissioni dell'ospedale cantonale è relativamente esigua rispetto alle emissioni complessive. È emerso che le

misure decentrate hanno senso solo dove una o più sorgenti puntuali (ad esempio ospedale, casa per anziani) rappresentano una percentuale consistente del carico totale di farmaci in un bacino imbrifero. Già oggi sono adottate misure decentrate in numerosi stabilimenti industriali, dotati di un proprio impianto di (pre)trattamento delle acque.

In un altro progetto è stato esaminato l'impatto dei cosiddetti gabinetti NoMix sull'apporto di farmaci nelle acque. Si tratta di una tecnologia in cui l'urina è raccolta e smaltita separatamente, in modo tale che i microinquinanti in essa contenuti (in particolare i farmaci) non finiscano nelle acque di scarico. È emerso che solo il 60–70 per cento dei farmaci assunti dall'uomo è espulso attraverso le urine e quindi i gabinetti NoMix non permettono di eliminare completamente gli apporti delle economie domestiche nelle acque di scarico. A ciò si aggiunge il fatto che tutti gli altri prodotti destinati al pubblico utilizzati in casa ed eventualmente problematici, come i detersivi, finiscono direttamente nelle acque di scarico e quindi nella canalizzazione pubblica.

In un altro progetto, l'attuale smaltimento delle acque urbane con un sistema di canalizzazione e depurazione centrale delle acque di scarico è stato confrontato con un ipotetico sistema decentrato, che fa a meno del sistema di canalizzazione e in cui il trattamento delle acque di scarico è integrato nei singoli edifici. I microinquinanti prodotti dalle economie domestiche sono trattati adeguatamente oppure raccolti e smaltiti esternamente (urina, feci). I risultati hanno mostrato che non avrebbe senso abbandonare il sistema attuale. Oltre ai costi nettamente più alti e ai lunghi periodi di transizione, un'eventuale conversione creerebbe anche problemi d'esercizio. Un sistema decentrato è adatto tutt'al più per piccoli insediamenti remoti privi di un'infrastruttura corrispondente.

Conclusioni

L'apporto di microinquinanti provenienti dagli impianti di smaltimento delle acque urbane danneggia le piante e gli animali che vivono nelle acque nonché la qualità delle riserve di acqua potabile nei laghi e nelle falde acquifere vicino ai fiumi. Vi sono chiari indizi di ripercussioni negative sulle acque. I perturbatori endocrini, ad esempio, portano a una femminizzazione dei pesci maschi. Il fatto che per centinaia o addirittura migliaia di microinquinanti nelle acque siano disponibili solo conoscenze insufficienti evidenzia il forte bisogno d'intervento. Benché al momento non vi sia alcun pericolo per la popolazione a livello delle riserve di acqua potabile, occorre adottare delle misure preventive volte a proteggere i consumatori.

Conclusioni

L'esistenza di microinquinanti nelle acque svizzere indica che le misure normative in vigore, ad esempio a livello della legislazione sui prodotti chimici e dell'ordinanza sulla protezione delle acque, non sono abbastanza incisive e consentono unicamente di disciplinare l'utilizzazione di singole sostanze e gruppi di sostanze. Misure «educative» come i sistemi di cauzione sui vuoti, le informazioni per i consumatori e l'adeguamento delle vie di smaltimento possono contribuire a ridurre le emissioni. Attraverso delle relazioni pubbliche mirate bisognerebbe sensibilizzare l'industria e i consumatori nei confronti dei microinquinanti, preparando così il terreno per ulteriori misure. In futuro, il numero di sostanze utilizzate nei prodotti è destinato ad aumentare. Anche le

quantità di consumo dovrebbero crescere, da un lato sulla scia della crescita demografica e dall'altro per via dell'innalzamento della speranza di vita (farmaci e prodotti per il corpo).

È il momento giusto per prendere ulteriori misure nell'ambito della gestione delle acque urbane: sono infatti imminenti delle ristrutturazioni. Per la manutenzione e il rinnovo del sistema esistente sono previsti investimenti ingenti. Nell'ambito della pianificazione di questi lavori è possibile includere le necessarie misure di riduzione dei microinquinanti. Adesso bisognerebbe quindi valutare le misure tecniche in grado di ottimizzare il sistema attuale. I metodi adottati devono soddisfare i seguenti requisiti:

- > un'«azione ad ampio spettro» contro il maggior numero possibile di microinquinanti;
- > la flessibilità a livello di implementazione nella tecnica già esistente;
- > l'ampliamento dell'infrastruttura esistente realizzabile facilmente;
- > il rapporto costi/benefici accettabile.

Misure centrali a livello degli IDA (ad esempio ozonizzazione o trattamento con carbone attivo) permettono di eliminare buona parte dei microinquinanti. La priorità va alle misure di riduzione del carico e miglioramento della qualità dell'acqua. Tali misure interessano:

- > i grandi IDA per ridurre grandi carichi (responsabilità del rivierasco a monte, riduzione dei carichi riversati in mare),
- > gli IDA su tratti con una diluizione insufficiente delle acque di scarico depurate emesse, nonché
- > gli IDA che scaricano in acque utilizzate per la produzione di acqua potabile (laghi con importanti captazioni di acqua potabile, fiumi con infiltrazione nelle falde acquifere nei pressi di captazioni di acqua potabile).

Si stima che un'accurata analisi dei costi e dei benefici identificherebbe circa 100 IDA con più di 10000 abitanti-equivalenti che richiedono un intervento per raggiungere gli obiettivi menzionati. Gli investimenti necessari per questi interventi sono stimati a 1,2 miliardi di franchi. I maggiori costi previsti (esercizio e investimenti, struttura di filtraggio compresa) per gli attuali impianti di depurazione delle acque di scarico si aggirano sul 5–10 per cento per i grandi IDA e sul 15–25 per cento per quelli più piccoli.

Misure decentrate e organizzative specifiche possono fornire un contributo supplementare alla soluzione del problema dei microinquinanti nelle acque. Nelle condizioni attuali di gestione delle acque urbane, la priorità va al miglioramento tecnico degli impianti di depurazione delle acque esistenti. Solo una maggior efficienza della depurazione delle acque permette di eliminare buona parte dei microinquinanti.

Nell'ambito del progetto «microinquinanti nelle acque», l'UFAM elabora basi per valutare le misure tecniche centrali in collaborazione con organismi cantonali, istituti di ricerca, associazioni e l'industria. In sperimentazioni tecniche su grande scala sono valutati livelli di depurazione supplementari (ozonizzazione e trattamento con carbone

Sperimentazione di misure tecniche

attivo). La valutazione dei metodi comprende la determinazione dell'eliminazione di numerosi microinquinanti, il monitoraggio dell'ecotossicità nelle acque di scarico depurate nonché il rilevamento di valori di riferimento operativi ed economici. Inoltre, sono stati elaborati criteri per verificare l'efficacia delle misure tecniche e procedurali e valutare l'influsso delle misure sulla qualità delle acque menzionate sopra.

Altri importanti campi d'intervento sono i seguenti:

- > la riduzione delle emissioni di microinquinanti da fonti diffuse;
- > l'elaborazione di un'analisi sistematica dei microinquinanti (compresa l'inclusione di numerosi microinquinanti nell'analisi delle acque);
- > l'elaborazione di metodi di valutazione ecotossicologica dell'inquinamento delle acque

> Summary

A situation analysis of micropollutants in Swiss water bodies has been carried out on the initiative of the Federal Office for the Environment (FOEN). This report summarises the results of the different studies.

Starting point

Water quality in Swiss water bodies has considerably improved over recent decades. The nutrient loads have been significantly reduced by expanding and upgrading municipal waste water infrastructure (sewers, stormwater tanks and wastewater treatment plants). However, the input of organic trace contaminants through municipal drainage continues to present a water quality challenge. The numerous substances present in water in very low concentrations (nanograms or micrograms per litre) are denoted as micropollutants. Some organic micropollutants have even been found in fish and drinking water.

Over 30,000 substances are in daily use in Switzerland as ingredients of plant protection products, biocides, pharmaceuticals and consumer products (body care products, cleaning agents etc.) in numerous industrial, commercial and domestic applications. A systematic overview is missing on the quantities, the uses, the emissions, the behaviour in the environment and the toxicity of these substances.

Where do the micropollutants come from?

Input into the aquatic environment occurs through the urban drainage system and from diffuse sources, such as agriculture. This report focuses on urban drainage. Persistent substances may pass the wastewater treatment plant (WWTP) unchanged. In addition, input of easy degradable substances occurs through WWTPs that are not state of the art and periodically through storm water or combined sewer overflows. If several WWTPs drain into the same water body, micropollutants can accumulate along the stretch or in lakes. Even groundwater used as drinking water may be contaminated by micropollutants from urban drainage via infiltration of polluted surface water. As the water tower of Europe, Switzerland also has an upstream responsibility towards its neighbours. Micropollutants are continuously exported out of the country with the treated wastewater in rivers.

How do micropollutants reach the aquatic environment?

Micropollutants may have adverse effects on aquatic life even at very low concentrations. Usage, physical-chemical and ecotoxicological properties determine whether a substance causes problems in the aquatic environment. The concentration of a compound in the WWTP effluent is determined by the load into the wastewater treatment plant and the physico-chemical properties of the compound. Generally, substances that are water soluble and persistent are not removed in WWTPs and can therefore be detected in natural waters. High concentrations occur principally in small streams with a high fraction of treated wastewater. The comparison of the exposure with ecotoxicologically based thresholds allows to assess the risk to affect the aquatic life. Specific effects for example by hormonally active substances, can occur at levels as low as the nanogram per litre range. Such effects have been identified in Swiss surface waters. So

What is the effect of micropollutants in the water?

far, only for a few of these substances exist sufficient data allowing to evaluate their influence on the aquatic environment. Particularly, data are available for substances that have a specific effect on organisms and that are therefore subject to a regulatory procedure (e.g. plant protection products).

Many different micropollutants are simultaneously present in water bodies. Therefore, the overall toxicity of the mixture of micropollutants determines the impact on aquatic life. Furthermore, in order to understand the overall effect, both the parent substances as well as their transformation products have to be considered.

Important findings from the research projects

Pollution of water bodies and its effects

Six studies established an overview on micropollutants in Swiss surface waters. The results of these projects are summarised below.

It is difficult and very cost intense to measure the extent of micropollutant contamination in all the relevant water bodies in Switzerland. Therefore, a National Material Flow Model was developed and verified with measured data. The model allows to evaluate the contribution of urban drainage to total water pollution for many substances. The analyses showed that damage of aquatic organism cannot be excluded from exposure to micropollutants in small streams with a high fraction of treated wastewater. The model was used to identify heavily polluted stretches of water and to assess technical measures at WWTPs.

Concentration
ins Swiss Surcae waters

Various methods were applied in two projects to identify classes of compounds, substances and transformation products with aquatic relevance.

What micropollutants
are relevant?

As no data were available on the biocide quantities used or discharged into the aquatic environment, surveys were carried out among manufacturers and users. Based on these data, a simple prioritisation method was developed and used to identify 21 substances with a high relevance for aquatic systems. This procedure can be applied to other groups of chemicals.

Since appreciable quantities of both parent compounds and their transformation products may occur in water bodies, a model was developed to evaluate the formation and distribution of transformation products in the environment. It was shown for both plant protection products and pharmaceuticals that transformation products can have a significant impact on water pollution, although they are generally less toxic than the parent compounds. Therefore, substance evaluation as part of the regulatory process should include routine analysis of transformation products or at least initial rough modelling of their behaviour in the environment.

Ecotoxicological tests with fish, water fleas, algae etc. are often carried out to evaluate the water quality of water and wastewater samples, in addition to chemical analyses. Most standard tests are intended to determine acute substance toxicity (high concentra-

Biological test methods
for analysis of micropollutants
in water courses

tions and short exposure times), which makes them unsuitable for analysis of chronic effects caused by micropollutants. Two projects investigated alternative test systems including analysis of the development of zebra fish embryos and the measurements of the oxidative stress using fish cells. The main finding was that both methods were insufficiently sensitive to the micropollutants tested (pharmaceuticals, biocides, plant protection products) at concentrations occurring in waste water or polluted surface waters.

Measures to reduce water pollution

The current urban drainage infrastructure in Switzerland has a replacement value of about CHF 100 billion. It costs about CHF 1.7 billion annually to maintain the system and keep the technology up to date. The predicted increasing need for renewal is pointing to the question of additional organisational and technical measures reducing water contamination by micropollutants. Such measures were studied in four research projects that are summarised in the following sections.

One of the projects studied the potential of organisational measures. It concluded that the efficiency of the urban drainage system currently in use in Switzerland can be increased. This can be achieved by connecting small communities to a central wastewater treatment plant of larger catchments and by more efficient infrastructure management. Larger catchments simplify municipal drainage professionalization measures such as joint use of highly qualified operating personnel who can work to improve the performance of wastewater treatment plants and simultaneously reduce costs.

Organisational measures
in municipal drainage

Technical measures can be divided into decentralised measures (wastewater pre-treatment at source) and centralised measures (optimisation of existing central treatment plants). The following three projects focused on decentralised measures as an alternative to the existing centralised system. The relevance of measures at critical sources (e.g. hospitals) was evaluated and the potential of toilets separating urine was investigated. Finally, a fully decentralised system was evaluated of municipal drainage in which every building has its own “WWTP” with a separate collection and treatment of urine, faeces and grey water

Technical measures
in municipal drainage

The example of the Cantonal hospital in the city of Winterthur indicated that decentralised measures are not appropriate, since emissions from the hospital are quite low expressed as percentage of the total emissions. Obviously, decentralised measures only make sense where one or more point sources (e.g. hospital, nursing home) represent a high proportion of the total pharmaceuticals load in a catchment. Decentralised measures are already implemented at many industrial plants which have their own wastewater (pre)treatment plants.

The second project investigated the impact of NoMix toilets on the input of pharmaceuticals into the aquatic environment. This system collects and disposes of the urine separately so that micropollutants (particularly pharmaceuticals) contained in it do not enter the wastewater. The project revealed that only 60–70 % of the pharmaceuticals ingested by humans are excreted through the urine, therefore the NoMix toilet cannot

totally prevent domestic input into wastewater. In addition, all the other problematic consumer products used in the home such as cleaning agents go directly into the wastewater and then into the public sewers.

The third project compared current municipal drainage by a sewer system and central wastewater treatment with a hypothetical decentralised system which operates without a sewer system and integrates wastewater treatment within each individual building. The micropollutants contained in domestic/household wastewater are suitably treated or collected and disposed of externally (urine, faeces). The results showed that a change from the current system is not worthwhile. Apart from the much higher costs and the long transition periods required for conversion, operational problems could also be expected. A decentralised system would however be suitable for small, remote communities with a lack of wastewater infrastructure.

Conclusions

The input of micropollutants from urban drainage affects aquatic organisms and the quality of drinking water resources in lakes and in groundwater adjacent to rivers. There is evidence for harmful effects to aquatic organisms in Swiss surface waters caused by micropollutant exposure. Hormonally active substances cause feminization of male fish. The fact that little is known about hundreds or thousands of micropollutants emphasises the clear need for action. Currently, measured levels of micropollutants in Swiss drinking water do not indicate unacceptable risk to the population. However, because relatively little is known, measures have to be taken for reasons of precautionary consumer protection.

The occurrence of micropollutants in Swiss water bodies demonstrates that regulatory measures such as chemical legislation and the Water Protection Ordinance do not go far enough in their present form and are only suitable for controlling the use of individual substances and material groups. Educational measures such as deposit systems, consumer awareness programs and modification of disposal channels can help to reduce emissions. Initiatives should be taken to create widespread awareness of micropollutants in industry and among consumers and therefore to increase acceptance of more stringent measures. The number of substances used in products and their consumption is likely to rise in future due to increases in population and longer life expectancy (pharmaceuticals and body care products).

The research projects summarised in this report demonstrate that specific decentralised and organisational measures can contribute to solve the problem of micropollutants in the aquatic environment. However, measures should mainly focus on improving existing WWTPs. It is only possible to remove the majority of micropollutants through increased wastewater purification efficiency.

At the time, the initiation of more far-reaching measures in the urban wastewater sector is beneficial because infrastructure replacement is due. The planning for these projects should include measures necessary to reduce micropollutant loads. Consideration

Conclusions and
Recommendations

should be given now to the technical measures capable of improving the current system. The methods applied should have the following characteristics:

- > Broad range effect against as many micropollutants as possible
- > Flexibility of implementation in the existing process engineering
- > Easily achievable upgrading of existing infrastructure
- > Acceptable cost/benefit ratio

It is known from public literature that measures at the WWTP (e.g. ozone or activated carbon treatment) can eliminate a broad range of micropollutants. In order to apply these techniques most efficiently as part of a Swiss waste water treatment strategy one should focus on load reduction and water quality improvement. The measures should apply to

- > Large WWTPs, to reduce high loads (upstream responsibility, reducing loads discharged into the sea),
- > WWTPs on stretches of water with inadequate dilution of the treated wastewater discharged, and
- > WWTPs on water bodies with significance for drinking water use (lakes used as important drinking water reservoirs, rivers with bank infiltration into groundwater around drinking water wells)

A preliminary cost/benefit analysis indicates that approximately 100 WWTPs larger than 10,000 population equivalents would have to be upgraded in order to achieve the objectives outlined above. These upgrades involve investment costs estimated at CHF 1.2 billion. The anticipated additional costs (operation and investment including filtration stage) for the existing wastewater treatment are 5–10 % for larger and 15–25 % for smaller WWTPs.

Within the project “Micropollutants in the aquatic environment”, the FOEN collaborates with cantonal water pollution control agencies, research institutions, professional associations and industry to define principles for the assessment of centralised technical measures. Further treatment steps (ozone and activated carbon treatment) are being evaluated in large-scale trials. The assessment includes determination of the elimination capacity for many micropollutants, monitoring of ecotoxicity in the treated wastewater and collecting key operational and economic parameters. Criteria for checking the efficiency of technical measures and an assessment of the effect of the above measures on water quality are also being prepared.

Technical measures in testing

Other main activities of the FOEN in the area of micropollutants are:

- > Reduction of micropollutant emissions from diffuse sources
- > Preparation of a systematic overview on micropollutants (including a large number of micropollutants in the water quality monitoring)
- > Preparation of methods for ecotoxicological evaluation of water pollution

1 > Einleitung

Dank dem hohen Ausbaustandard der Siedlungsentwässerung (Kanalisationen, Regenrückhaltebecken und Abwasserreinigungsanlagen) und der Abwasserreinigung hat sich die Wasserqualität der Schweizer Bäche, Flüsse und Seen in den letzten 50 Jahren stark verbessert. Die Infrastrukturen befinden sich heute auf einem hohen technischen Stand. 1965 waren nur gerade 14 % der Einwohnerinnen und Einwohner der Schweiz an eine zentrale Abwasserreinigungsanlage (ARA) angeschlossen, im Jahr 2005 bereits 97 %.

Guter Ausbaustandard der Siedlungsentwässerung in der Schweiz

Mit dem Ausbau der Siedlungsentwässerung (z. B. Regenbecken) und der Abwasserreinigungsanlagen sind Gewässerbelastungen aus der Abwasserentsorgung massiv vermindert worden, vor allem solche durch Nährstoffeinträge (Stickstoff in Form von Ammonium und Nitrat, Phosphat), gelöste organische Substanzen wie Waschmittel, Schwermetalle, aber auch ungelöste Stoffe wie Schlamm etc.^[1]. Schäumende und stinkende Gewässer sowie Algenteppiche in Seen gehören der Vergangenheit an. Hierzu waren hohe Investitionen in Infrastrukturbauten nötig (Kanalisationsnetze, Abwasserreinigungsanlagen etc.)^[2].

Problem der Nährstoffeinträge in Gewässer gelöst

Aktuell stellt der Eintrag von synthetischen, organischen Spurenstoffen in die Gewässer eine grosse Herausforderung dar. Dies betrifft primär synthetische organische Stoffe des täglichen Gebrauchs. In der Schweiz werden gegenwärtig insgesamt über 30 000 synthetische organische Stoffe verwendet. Viele davon gelangen mit dem Abwasser über die Kanalisationen, Regenentlastungen, Abwasserreinigungsanlagen, aber auch über andere Pfade direkt in die Gewässer, wo sie in sehr tiefen Konzentrationen nachgewiesen werden können (Nanogramm bis Mikrogramm pro Liter bzw. Milliardenstel bis Millionstel Gramm pro Liter, wobei ein Nanogramm pro Liter ungefähr der Verdünnung von 1 Kilogramm im Volumen des Bielersees entspricht). Bei diesen sogenannten Mikroverunreinigungen handelt es sich beispielsweise um Restmengen von Stoffen aus dem Pflanzen- und Materialschutz, um Arzneimittel und um Konsumprodukte (Körperpflegeprodukte, Reinigungsmittel). Schwermetalle werden zwar ebenfalls zu den Mikroverunreinigungen gezählt, führen jedoch in der Schweiz nur vereinzelt zu lokalen Gewässerbelastungen und werden deshalb im Rahmen dieses Berichtes nicht behandelt.

Heutige Herausforderung im Gewässerschutz: Mikroverunreinigungen

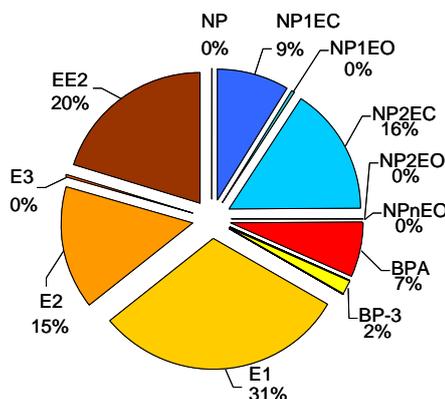
Mit modernen analytischen Methoden können immer mehr dieser Substanzen in den Gewässern im Spurenbereich nachgewiesen werden^[3]. Die Summe der Einzelstoffkonzentrationen dieser Verbindungen in den Oberflächengewässern beträgt bis zu einigen 100 Mikrogramm pro Liter. Synthetische organische Stoffe, die neu auf den Markt kommen oder erst seit kurzem in Oberflächengewässern nachgewiesen werden können, werden als «emerging contaminants» (neu aufkommende Schadstoffe) bezeichnet. Mikroverunreinigungen können sich schon in sehr tiefen Konzentrationen nachteilig auf Wasserorganismen auswirken, wie das Beispiel der hormonaktiven Substanzen zeigt^[4] (siehe Box 1).

«Emerging contaminants»

Box 1: Hormonaktive Substanzen

Eine wichtige Gruppe der organischen Spurenstoffe sind die hormonaktiven Stoffe. Darunter fallen die so genannten Östrogene (beispielsweise Ethinylestradiol, ein Wirkstoff der Antibabypille), die bereits in sehr niedrigen Konzentrationen negative, verweiblichende Auswirkungen auf Wasserorganismen haben können. So führte die Zugabe von Ethinylestradiol in einem Teich in einer Konzentration von 5–6 ng/l bereits nach einem Jahr zum Zusammenbruch einer Population von Fischen (Goldelritzen)^[5]. Die Konzentration dieser Substanz in Schweizer Gewässern liegt im Normalfall jedoch unter 1 ng/l. Maximal wurden jedoch schon Konzentrationen von 12 ng/l gemessen, so dass lokale Effekte nicht auszuschliessen sind.

Allerdings summiert sich die Wirkung verschiedener hormonaktiver Stoffe so, dass bei einer Bewertung des Gewässerzustands die gesamte Palette hormonaktiver Stoffe in Betracht gezogen werden muss. Nebstehende Abbildung zeigt den modellierten, relativen Beitrag verschiedener hormonaktiver Stoffe zur gesamten, normierten Hormonaktivität in der Glatt unterhalb von Dübendorf im Jahr 2007 (0,1 ng/l; basierend auf einem Hefezellen-Test, dem sog. YES-Test (Yeast Estrogen Screening)).



NP: Nonylphenol, NPnEO: Nonylphenoethoxylat, NP1EC, NP1EO, NP2EC, NP2EO: Abbauprodukte von Nonylphenoethoxylat, BPA: Bisphenol A, BP-3: Benzophenone-3 (UV-Filter), E1, E2, E3: natürliche menschliche Hormone (Östrogene), EE2: Ethinylestradiol (Wirkstoff aus hormonellen Empfängnisverhütungsmitteln)

Bei den nachgewiesenen Mikroverunreinigungen fehlen oft die Grundlagen, um die gesundheitlichen und umwelttoxikologischen Risiken abschätzen zu können. Auch sind die Kenntnisse über das Verhalten dieser Substanzen im System Siedlungsentwässerung und im Gewässer noch mangelhaft. Dies erschwert die Beurteilung und Priorisierung der Mikroverunreinigungen.

Methoden für den Nachweis von Mikroverunreinigungen

Bezüglich Mikroverunreinigungen besteht in der Schweiz Handlungs- oder Forschungsbedarf in folgenden Bereichen:

Erfassen und Bewerten des Gewässerzustands
Forschungsbedarf bezüglich Mikroverunreinigungen

- > Erarbeiten eines Beurteilungskonzeptes für Mikroverunreinigungen im Rahmen der Gewässerschutzgesetzgebung;
- > Weiterentwicklung verschiedener spurenanalytischer und biologischer Messmethoden zur Beurteilung der Qualität der Gewässer bezüglich Mikroverunreinigungen;

- > Beurteilung technischer Möglichkeiten zur Optimierung der Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung^[6] sowie Abschätzung, inwieweit diese zeitlich, technisch, organisatorisch und finanziell realisiert werden können.

Die Problematik der Mikroverunreinigungen kann generell auf unterschiedlichen Ebenen angegangen werden. Folgende Handlungsoptionen führen zu einer Reduktion der Einträge von Mikroverunreinigungen in die Gewässer:

Mögliche Handlungsoptionen

- > Reduzieren des Verbrauchs von bedenklichen Stoffen durch Stoffverbote, Anwendungseinschränkungen oder Änderung des Konsumverhaltens
- > Vermeiden an der Quelle, so dass Stoffe nicht ins Abwasser gelangen (z. B. mittels lokaler Vorbehandlung beim Emittenten)
- > Verhindern, dass Stoffe mit dem gereinigten Abwasser aus Abwasserreinigungsanlagen in die Gewässer gelangen

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei vielen technischen Massnahmen diffuse Einträge nicht erfasst werden. Als «diffus» werden Einträge bezeichnet, wenn sie über grosse Bereiche verteilt und daher nicht punktgenau lokalisierbar sind, wie dies z. B. bei der Abwassereinleitung einer Abwasserreinigungsanlage möglich ist (Beispiele: Auswaschung von Pflanzenschutzmitteln aus Böden, Auswaschung von Schadstoffen aus der Atmosphäre). Ebenfalls stellt sich die Frage der Finanzierung sowie der gesellschaftlichen Akzeptanz zusätzlicher Massnahmen.

Zielsetzung

Um den aufgezeigten Forschungsbedarf anzugehen, startete das BAFU das Projekt «Verringerung der Schadstoffbelastung der Gewässer und Ressourcenschonung – MicroPoll1». In verschiedenen Forschungsprojekten wurde dabei die Situation bezüglich Mikroverunreinigungen in der Schweiz untersucht. Im Weiteren wurde im Rahmen des im 2006 gestarteten Folgeprojekts «Strategie Micropoll – Mikroverunreinigungen in den Gewässern» eine Situationsanalyse bezüglich Mikroverunreinigungen in den Gewässern durchgeführt. Ziel des vorliegenden Berichts ist es, die Resultate dieser Studien zusammenzufassen und Handlungsoptionen zur Reduktion der Schadstoffbelastung aufzuzeigen. Der Bericht fokussiert insbesondere auf das Vorkommen organischer Mikroverunreinigungen in den Gewässern und auf die Systeme der Siedlungsentwässerung.

2 > Ausgangslage und Handlungsbedarf

2.1 Generelle Herausforderungen für den stofflichen Gewässerschutz

Durch menschliche Aktivitäten wird eine unüberschaubar grosse Zahl von Stoffen in Umlauf gebracht. In der EU sind beispielsweise etwas über 100 000 chemische Stoffe ins Altstoffverzeichnis EINECS (European Inventory of Existing Commercial Substances) eingetragen. Zusammen mit den Neustoffen sind deutlich über 100 000 chemische Stoffe bekannt. Von diesen sind schätzungsweise rund 30 000 mengenmässig bedeutsam, das heisst, sie werden in Mengen von über einer Tonne pro Hersteller und Jahr in der EU hergestellt oder in die EU importiert. Eine ähnlich grosse Zahl von Stoffen ist auch in der Schweiz im Umlauf. Angesichts der enormen Zahl von Stoffen verwundert es nicht, dass weder in der EU noch in der Schweiz eine Übersicht über Mengen, Verwendung, Emissionen, Umweltverhalten und Toxizität der Einzelstoffe und deren Wirkung auf Mensch und Umwelt existiert. Es ist deshalb schwierig vorherzusagen, welche Mengen von Mikroverunreinigungen in die Umwelt gelangen, in welchen Konzentrationen sie in Gewässern auftreten können und welche Effekte sie auf Mensch und Umwelt haben können.

Vielzahl von Stoffen

Im Rahmen verschiedener Messkampagnen der Kantone, des Bundes, verschiedener Forschungsanstalten, der Universitäten und der internationalen Gewässerschutzkommissionen (z. B. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, IKSRL; Commission internationale pour la protection des eaux du lac Léman, CIPEL) wurde eine Vielzahl von Substanzen in Oberflächengewässern und sogar in Lebewesen wie Fischen nachgewiesen. Auch im Grundwasser werden im Rahmen des nationalen Netzes zur Beobachtung der Grundwasserqualität (NAQUA) unter anderem Pflanzenschutzmittel und Medikamente gemessen. Die Anwesenheit dieser Stoffe in Gewässern zeigt, dass das heutige System zur Siedlungsentwässerung an seine Grenzen stösst, wenn es um die Elimination von Mikroverunreinigungen geht^[7]. Damit stellt sich die Frage, ob die bestehende Siedlungsentwässerung so optimiert werden kann, dass viele dieser Substanzen abgebaut werden können oder ob die Verwendung fraglicher Substanzen weiter einzuschränken ist.

Der Verbrauch von Produkten, die synthetische organische Stoffe enthalten, wie auch die Komplexität ihrer Zusammensetzung nehmen stetig zu. Auch werden ständig neue Substanzen in unzähligen Anwendungen in Haushalten, Industrie und in der Landwirtschaft in Verkehr gebracht. Dies hat zur Folge, dass bis zu mehrere Tausend dieser Stoffe über die Siedlungsentwässerung und auf diffusen Pfaden in Flüsse, Seen und in das Grundwasser gelangen^[8] (Abb. 1). Zu den Einträgen über die Siedlungsentwässerung gehören sowohl die Einträge über Ausläufe der Abwasserreinigungsanlagen als auch Direkteinträge in Gewässer aus der Kanalisation (Regenüberläufe, Lecks). Zahlreiche Stoffe werden in den ARAs bei heutigem Stand der Technik nicht oder nur

Vielzahl von Eintragspfaden

Einige bekannte, besonders risikoreiche Stoffgruppen wurden bereits in den meisten Ländern eingeschränkt oder verboten, wie beispielsweise die persistenten organischen Schadstoffe gemäss der Stockholm-Konvention («Persistent Organic Pollutants»; POPs)^[9] oder in den betreffenden Gesetzeswerken gelistete Stoffe (EU: 76/769/EWG^[10]; Schweiz: Chemikalien-Risiko-Reduktionsverordnung^[11]). Angesichts der Vielzahl verschiedener Stoffe kann die Anwendung aller Stoffe im Einzelnen nicht geregelt werden. Auch die neue Chemikaliengesetzgebung «Registration, Evaluation, Authorisation and Restrictions of Chemicals» (REACH)^[12] in der EU wird die Situation bezüglich Emissionen von Spurenstoffen voraussichtlich nicht wesentlich verbessern.

Regulierung der Stoffe

Das schweizerische Gewässerschutzgesetz hat den Schutz aller unter- und oberirdischen Gewässer vor nachteiligen Einwirkungen zum Ziel^[13]. Gemäss Anhang 1 der Gewässerschutzverordnung soll die Wasserqualität «so beschaffen sein, dass im Wasser, in den Schwebstoffen und in den Sedimenten keine künstlichen, langlebigen Stoffe enthalten sind»^[14]. Im Weiteren sollen «andere Stoffe, die Gewässer verunreinigen können und die durch menschliche Tätigkeit ins Wasser gelangen können,

Mikroverunreinigungen in der schweizerischen Gewässerschutzgesetzgebung

- > in Pflanzen, Tieren, Mikroorganismen, Schwebstoffen oder Sedimenten nicht angereichert werden,
- > keine nachteiligen Einwirkungen auf die Lebensgemeinschaften von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen und auf die Nutzung der Gewässer haben,
- > die biologischen Prozesse zur Deckung der physiologischen Grundbedürfnisse von Pflanzen und Tieren, wie Stoffwechselfvorgänge, Fortpflanzung und geruchliche Orientierung von Tieren, nicht beeinträchtigen,
- > im Gewässer nur in nahe bei Null liegenden Konzentrationen vorhanden sein, wenn sie dort natürlicherweise nicht vorkommen.»

Zu diesem Zweck müssen die Anforderungen an die Wasserqualität nach Anhang 2 der Gewässerschutzverordnung eingehalten werden. Die Gewässerschutzverordnung enthält jedoch keine numerischen Anforderungen für eine Beurteilung der Gewässerbelastung durch Mikroverunreinigungen, mit Ausnahme der organischen Pestizide. Gemäss Gewässerschutzgesetz legt der Bundesrat die Anforderungen an die Wasserqualität fest. Unter anderem ist der Grundgedanke der Gewässerschutzverordnung für die Wasserqualität die Festlegung von Anforderungen auf der Basis von ökotoxikologischen Grundlagen. Sie schreibt das grundsätzliche Vorgehen vor, wenn ein Gewässer die Anforderungen an die Wasserqualität nicht erfüllt (Art. 47 GSchV) und richtet sich bezüglich Untersuchungsmethoden nach anerkannten Normen, wie z. B. den Vorgaben des CEN (Europäisches Komitee für Normung).

Im Gegensatz zur Schweizerischen Gesetzgebung sieht die Wasserrahmenrichtlinie der EU explizit eine Beurteilung der chemischen Gewässerqualität anhand EU-weit gültiger Umweltqualitätsstandards für prioritäre Stoffe vor^[15]. Zusätzlich sind die EU-Mitgliedstaaten bei der Beurteilung des ökologischen Zustands von Gewässern aufgefordert, so genannte flussgebietspezifische Grenzwerte für synthetische sowie natürliche Schadstoffe festzulegen^[15]. Die EU-Mitgliedstaaten müssen Monitoringprogramme für Oberflächengewässer etablieren und nachweisen, dass die Grenzwerte eingehalten werden bzw. ergriffene Massnahmen zur Erreichung der Grenzwerte führen. In

Deutschland beschäftigt sich die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) mit der Erstellung einer Liste gewässerrelevanter Stoffe und der Herleitung von Qualitätskriterien nach dem Verfahren der Wasserrahmenrichtlinie (z. B.^[16]).

Die Belastung der Gewässer mit Mikroverunreinigungen und deren Risiken für Mensch und Umwelt müssen zunächst bewertet werden, bevor die zweckmässigen Massnahmen definiert werden können. Es ist damit zu rechnen, dass verschiedene Entwicklungen wie die zunehmende Anwendung von Arzneimitteln aufgrund der Überalterung der europäischen Bevölkerung das Problem in Zukunft verstärken werden^[17]. Die Schweiz steht im stofflichen Gewässerschutz vor ähnlichen Herausforderungen wie die EU-Mitgliedstaaten im Rahmen des Vollzuges der EU-Wasserrahmenrichtlinie.

Um die Gewässer umfassend schützen zu können, muss deren Zustand genau bekannt sein. Der Zustand der Gewässer lässt sich gesamthaft beurteilen auf Grund der Hydrologie, Ökomorphologie, Biodiversität und der chemischen Wasserqualität. Die Wasserqualität wird durch Siedlungen, durch Strassen ausserhalb von Siedlungen und durch diffuse Einträge aus der Landwirtschaft (windbedingte Drift, Erosion, Versickerung) beeinflusst. Die Siedlungsentwässerung, auf die sich dieser Bericht beschränkt, ist also nur einer von vielen Aspekten. Nicht zu vergessen sind die in diesem Bericht nur am Rande erwähnten Pflanzenschutzmittel, deren Einträge in Gewässer erheblich und deren Verbrauchsmengen und Ökotoxizität vergleichsweise gut bekannt sind. Ein umfassendes, gesamtschweizerisches Konzept zur Beurteilung der Qualität der Gewässer befindet sich in Entwicklung: Das BAFU und die EAWAG bearbeiten in Zusammenarbeit mit kantonalen Fachstellen Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer (Modul-Stufen-Konzept^[18]). Dieses Konzept zur integralen Beurteilung des Gewässerzustandes ist aus Teilmethoden aufgebaut und umfasst Untersuchungen der Hydrologie, der Struktur der Gewässer (Ökomorphologie), der Wasserchemie und Ökotoxikologie, sowie der Lebensgemeinschaften von Tieren, Pflanzen und Mikroorganismen. Die einzelnen Methoden sind jedoch noch weiter zu verfeinern und in der Praxis zu erproben. Insbesondere ist noch zu definieren, wie die Ergebnisse verschiedener Methoden zusammenfassend dargestellt und interpretiert werden können.

Die Wasserqualität bezüglich der Belastung mit Mikroverunreinigungen kann grundsätzlich mit folgenden Methoden beurteilt werden:

- > Einzelstoffbewertung: Dies ist die klassische Methode zur Beurteilung der Wasserqualität bezüglich der als relevant erkannten Stoffe. Sie stösst im Falle der Mikroverunreinigungen an ihre Grenzen, da nur ein Bruchteil der in den Gewässern vorkommenden Substanzen identifiziert werden kann. Für die heute bekannten organischen Spurenstoffe – mit Ausnahme der Pflanzenschutzmittel – fehlt ein rechtlich abgestütztes, gesamtschweizerisches Beurteilungskonzept.
- > Bewertung von Mischungen: Im Falle der hormonaktiven Stoffe ist es möglich, die spezifische Wirkung (Beispiel östrogene Aktivität, siehe Box 1) einer Stoffmischung durch die Summe der Wirkungen der Einzelstoffe zu erklären. Da für die Mehrheit der Mikroverunreinigungen die spezifische Wirkung nicht bekannt ist, kann eine gemessene Wirkung nur selten anhand der gemessenen Einzelstoffe erklärt werden.

Herausforderungen
im stofflichen Gewässerschutz

Gewässerzustand beinhaltet mehr
als nur die Wasserqualität

Internationale
Gewässerschutzkommissionen

Daher können die Auswirkungen von komplexen Stoffmischungen in belasteten Gewässern auf Wasserlebewesen nur in Einzelfällen prognostiziert werden.

- > Anwendung biologischer Testverfahren: Die Gewässerqualität wird mittels biologischer Tests an Gewässerproben beurteilt. Biologische Testresultate sind jedoch oft schwer interpretierbar und die Empfindlichkeit der Verfahren ist oft ungenügend.
- > Beurteilung der Gewässerökologie: Gewässer können hinsichtlich ihrer Ökologie beschrieben werden (Bewuchs mit Algen, Artenzusammensetzung, Fischbestand etc.). In der Regel wird die Gewässerökologie durch viele Faktoren beeinflusst. Etwasige Beeinflussungen durch Mikroverunreinigungen können daher nur in Einzelfällen mit speziellen ökologischen Untersuchungsmethoden beurteilt werden^[18].
- > Modellierung der aktuellen Belastung: Um einen Gesamtüberblick der Schadstoffbelastung aller Fliessgewässer zu erhalten, müssen Modellprognosen die existierenden Umweltbeobachtungen ergänzen.

Die Schweiz ist Mitglied verschiedener internationaler Gewässerschutzkommissionen (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, IKSR; Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, IGKB; Commission internationale pour la protection des eaux du lac Léman, CIPEL; Commissione Internazionale per la Protezione delle Acque Italo-Svizzere, CIP AIS; Commission for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic, OSPAR). Die internationalen Abkommen der Anliegerstaaten haben zum Ziel, die Qualität dieser Grenzgewässer zu verbessern. Die IKSR beispielsweise hat eine Reihe von relevanten Stoffen definiert, deren Konzentrationen im Rhein unter bestimmte Zielvorgaben gesenkt werden sollen^[19].

2.2 Potenzielle Mikroverunreinigungen und deren Umweltrelevanz

Fachexperten verschiedener Länder sind sich einig, dass Mikroverunreinigungen Probleme in den Gewässern verursachen^[17]. Dies lässt sich anhand von Einzelbeispielen zeigen; eine umfassende Darstellung der Probleme ist aufgrund der Vielzahl von Stoffen und der grösstenteils unbekanntenen Toxizität aber noch nicht möglich. Bei geringer Verdünnung des gereinigten Abwassers im Oberflächengewässer wurden regional erhöhte Konzentrationen von Mikroverunreinigungen beobachtet (z. B. bei Einleitungen einer grossen ARA in einen kleinen Bach)^[17].

Umfassende Darstellung des Problems noch nicht möglich

Die physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften bestimmen weitgehend, ob eine Substanz in Oberflächengewässern in messbaren Konzentrationen auftritt^[8]. Adsorbierbare Stoffe, d. h. Stoffe, die sich an der Oberfläche von Festkörpern wie Sedimenten und Schlämmen anlagern, verursachen in gelöster Form in Gewässern meist nur lokale Belastungen (z. B. Moschusduftstoffe, polychlorierte Biphenyle (PCB), Schwermetalle). Zum einen werden sie teilweise bereits in der ARA durch Adsorption an den Klärschlamm entfernt. Zum anderen tendieren sie dazu, sich in Gewässern an Schwebstoffe zu binden und mit den Schwebstoffen zu sedimentieren. Gut abbaubare Stoffe sind ebenfalls weniger relevant, da sie bereits in der ARA weitgehend eliminiert werden (z. B. natürliche und synthetische Östrogene). Sie können aber bei ARAs, die nicht dem Stand der Technik entsprechen, trotzdem in relevanten Mengen in Gewässer

Stoffeigenschaften

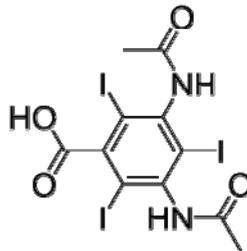
gelangen. Werden solche Stoffe entlang von Fließgewässern regelmässig an verschiedenen Stellen eingetragen, so können trotzdem über eine lange Fließstrecke erhöhte Konzentrationen auftreten. Bei diesem Phänomen spricht man von Pseudopersistenz. Zudem können auch gut abbaubare Stoffe, beispielsweise aufgrund der zu geringen Effizienz/Menge der für den Abbau verantwortlichen Enzyme, nicht mehr weiter abgebaut werden und dann in sehr geringen Konzentrationen vorkommen.

Die wichtigsten Mikroverunreinigungen sind jedoch die gut wasserlöslichen, schwer- oder nicht-abbaubaren (persistenten) Stoffe, die sich zudem schlecht an Schwebstoffe oder Sedimente anlagern (Beispiele: Box 2). Falls diese Stoffe aufgrund ihrer Verwendung in grösseren Mengen ins Abwasser gelangen, können in Gewässern hohe Konzentrationen auftreten (z. B. Medikamente, Biozide, Inhaltsstoffe von Waschmitteln). Viele dieser Stoffe gelangen kontinuierlich über die ARAs in die Gewässer.

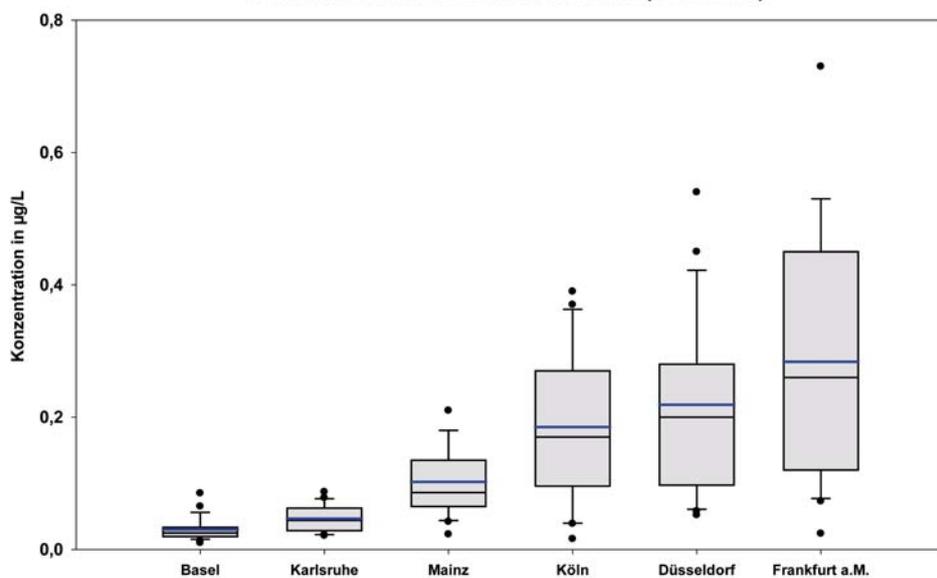
Wichtigste
Mikroverunreinigungen:
wasserlöslich, persistent

Box 2: Bekannte persistente Mikroverunreinigungen

Röntgenkontrastmittel
(Beispielstruktur: Amidotrizoesäure)

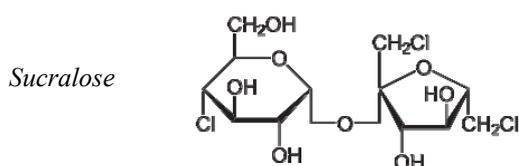


Amidotrizoesäure in Rhein und Main (2002-2003)



Quelle: TZW-Schriftenreihe - Band 29 "Vorkommen und Bewertung von Arzneimittelrückständen in Rhein und Main"

Röntgenkontrastmittel dienen dazu, die Darstellung von Strukturen und Funktionen des Körpers in bildgebenden Verfahren (Röntgendiagnostik) zu verbessern. Iodorganische Röntgenkontrastmittel wie Amidotrizoensäure, Iopamidol, Iopromid und Iomeprol weisen in Deutschland unter den Arzneimittelwirkstoffen die höchsten Gewässerkonzentrationen auf. Beispielsweise liegt der Spitzenwert von Amidotrizoensäure in Oberflächengewässern oberhalb von $1 \mu\text{g/l}$ ^[20]. Iodorganische Röntgenkontrastmittel sind biologisch nicht abbaubar, werden also als persistent beurteilt. Iopamidol und Iopromid wurden im ng/l-Bereich auch in Trinkwasser gefunden^[20]. Die obenstehende Boxplot-Grafik veranschaulicht, wie die aus zahlreichen Messwerten ermittelte Konzentration von Amidotrizoensäure dem Rhein entlang flussabwärts von Basel bis Frankfurt stetig zunimmt. Ein Boxplot liest sich folgendermassen: Das Rechteck umschließt 50% der Messwerte und wird vom Median (schwarze horizontale Linie) so unterteilt, dass die Hälfte der Messwerte über, die andere Hälfte unter dem Median liegt. Dicht über dem Median ist in blauer Farbe der Mittelwert eingezeichnet. Die einzelnen Punkte werden als Ausreisser interpretiert.



Sucralose, auch Splenda genannt, ist eine chlororganische Verbindung, welche als Süsstoff in Lebensmitteln eingesetzt wird. Eine schwedische Studie zeigt, dass dieser Süsstoff in Wasserproben praktisch überall vorhanden ist und in ARAs und Oberflächengewässern kaum abgebaut wird (Abbaurate $< 10\%$)^[21]. Es handelt sich also um einen persistenten Stoff. Konzentrationen in Oberflächengewässern lagen im Bereich Nanogramm bis Mikrogramm pro Liter^[21]. Die Wirkung auf Wasserorganismen ist jedoch bisher noch unklar^[22].

Bisher wurden vor allem Stoffe, die eine beabsichtigte Wirkung auf Organismen haben (z. B. Biozide, Pflanzenschutzmittel, Arzneimittel) sowie die Gruppe der hormonaktiven Substanzen, wie beispielsweise Steroidhormone (Wirkstoffe hormoneller Empfängnisverhütungsmittel), Atrazin, Bisphenol A, bromierte Flammschutzmittel, UV Filter und Nonylphenoethoxylate^[23], bezüglich ihrer Relevanz als Mikroverunreinigungen untersucht. Die hormonaktiven Stoffe waren Gegenstand des Nationalen Forschungsprogramms NFP50^[24, 25].

Eine grobe Abschätzung der Relevanz eines Stoffes erlaubt die so genannte Umwelt-risikoabschätzung^[8]. Als Basis dienen dabei ökotoxikologische Daten, welche ein Mass für den Grad der Auswirkungen von chemischen Stoffen auf Wasserorganismen (z. B. Fische) sind. Aus diesen Daten wird unter Einbezug von Sicherheitsfaktoren eine in der Umwelt maximal tolerierbare Konzentration geschätzt (predicted no-effect concentration, PNEC). Zusätzlich wird aus Mengen-Verwendungsdaten und Daten über die biologische Abbaubarkeit der Stoffe die Umweltkonzentration vorhergesagt (predicted

Untersuchte
Mikroverunreinigungen

Umweltrisikoaabschätzung
Schonung
von Trinkwasservorkommen
und Oberliegerverantwortung

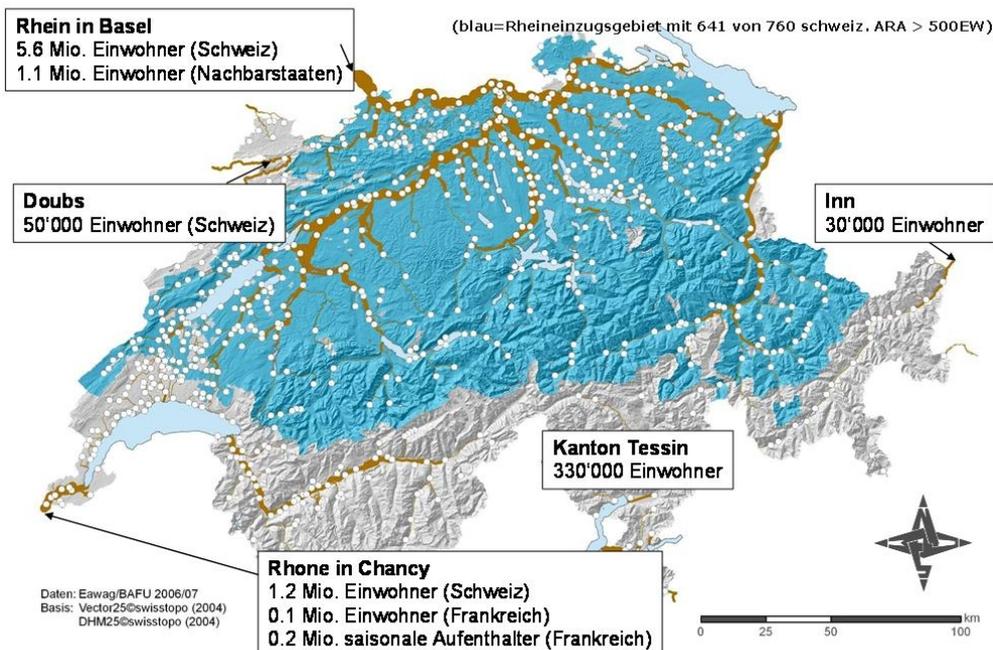
environmental concentration, PEC). Alternativ kann die Umweltkonzentration auch gemessen werden (measured environmental concentration, MEC). PEC- bzw. MEC und PNEC-Werte werden dann ins Verhältnis gesetzt (PEC/PNEC oder MEC/PNEC). Übersteigt die vorhergesagte oder gemessene Umweltkonzentration die tolerierbare Konzentration, können negative Effekte des Stoffes auf Wasserorganismen nicht ausgeschlossen werden.

Die Anreicherung von schwer abbaubaren Verbindungen in den Gewässern ist problematisch. Solche Stoffe können über die Uferinfiltration ins Grundwasser gelangen und stellen auch für die Trinkwasseraufbereitung eine zunehmende Herausforderung dar. Die IKSР hat sich deshalb mit dem Programm 2020 zum Ziel gesetzt, die Trinkwassergewinnung mit einfachen Mitteln zu ermöglichen. Die Zielvorgaben der Rheinstoffliste orientieren sich unter anderem an dieser Zielsetzung.

Die Schweiz hat als Wasserschloss Europas eine besondere Oberliegerverantwortung gegenüber den Nachbarstaaten. Täglich werden mit dem gereinigten Abwasser Mikroverunreinigungen ins benachbarte Ausland exportiert (Abb. 2).

Abb. 2 > Abwasserelexport aus der Schweiz

Anzahl Einwohner pro Flusseinzugsgebiet bis zur Landesgrenze, Abflussmengen des Abwassers (braun) und Abwasserreinigungsanlagen (weisse Punkte)



Karten reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA081360)

2.3 Handlungsbedarf

Ein Handlungsbedarf bezüglich Mikroverunreinigungen aus der Siedlungsentwässerung ist für die Schweiz vor allem in folgenden Bereichen gegeben:

1. Entwicklung von Modellen und Monitoringkonzepten, um neben existierenden Umweltbeobachtungen eine Gesamtübersicht über die Belastungslage in der Schweiz erstellen zu können;
2. Entwicklung eines Erhebungs- und Beurteilungskonzeptes für Mikroverunreinigungen in Gewässern;
3. Bereitstellen zusätzlicher Grundlagen zur Abschätzung toxikologischer und ökotoxikologischer Risiken von Mikroverunreinigungen sowie deren Umwandlungsprodukten und Gemischen sowie Entwickeln von Methoden zu ihrer Priorisierung;
4. Weiterentwicklung spurenanalytischer Methoden und biologischer Testverfahren zur Erfassung der Belastung der Gewässer mit Mikroverunreinigungen;
5. Beurteilung von technischen und organisatorischen Massnahmen zur Optimierung der Siedlungsentwässerung und Prüfung auf ihre zeitliche, technische, organisatorische und finanzielle Realisierbarkeit;
6. Ausdehnung der Öffentlichkeitsarbeit zwecks Aufklärung der Verbraucher, damit diese verantwortlich handeln, beispielsweise über eine Änderung der Verbrauchsgewohnheiten und über die Beachtung vorgeschriebener Entsorgungswege^[17].

3 > Belastungslage Mikroverunreinigungen in der Schweiz

Autoren: C. Ort, M. Schärer, H. Siegrist, J. Hollender

3.1 Umweltbeobachtungen

Eine Übersicht über das Vorhandensein von Mikroverunreinigungen in Gewässern ist die Basis für die Beurteilung von möglichen Risiken und für das Festlegen von Massnahmen. Deshalb hat das BAFU eine Studie initiiert, um die Belastungslage der Schweizerischen Gewässer abzuschätzen. Mit dieser Studie sollte gleichzeitig ein Teil des in Kapitel 2.3 festgestellten Handlungsbedarfs abgedeckt werden.

Zustand der Gewässer

Nationale wie kantonale Fachstellen sind am Zustand der Gewässer in ihrer Obhut interessiert und wollen über die unterschiedlichen Eintragspfade von Schadstoffen im Bild sein (z. B. Industrie-Betriebe, Landwirtschaft oder ARAs). In verschiedenen Forschungsprojekten wurden – bisher mit sehr unterschiedlichen Zielen – Proben aus Flüssen, Seen, Grundwasser und gar Trinkwasser auf Mikroverunreinigungen untersucht.

In diesen Studien werden meistens Schadstoffkonzentrationen bestimmt und, falls vorhanden, mit Qualitätskriterien (PNEC) verglichen. Der Vorteil von Messwerten liegt darin, dass sie die momentane, tatsächliche Belastung der Gewässer wiedergeben. Sie ermöglichen eine Beurteilung der tatsächlichen Reinigungsleistung der ARAs. Der logistische und materielle Aufwand für repräsentative Probenahmen über einen längeren Zeitraum ist jedoch beträchtlich. Ausserdem erfordert die Analytik aufwändige Aufbereitungsschritte der Umweltproben vor der eigentlichen Analyse und teure technische Geräte (z. B. LC-MS-MS). Durch personelle und finanzielle Rahmenbedingungen bleiben daher Umweltbeobachtungen stets räumlich und zeitlich limitiert. Dies soll aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass sorgfältig erhobene und systematisch dokumentierte Messwerte ein sehr wertvolles Archiv und eine hilfreiche Grundlage darstellen. Auch in Zukunft ist die Analytik der Spurenstoffe unabdingbar. Nur so kann die Einhaltung von zukünftigen Richtlinien, Verordnungen oder Gesetzen im Vollzug überwacht werden. Fortschritte in der Analysetechnik führen dazu, dass eine immer grössere Zahl von Substanzen mit wenigen, einfachen Methoden rationell quantifiziert werden können.

Grenzen von Messkampagnen zur Dokumentation der tatsächlichen Belastungslage

3.2 Datengrundlage

In einer Datenbank, angelegt im Rahmen des Projektes Fischnetz, wurden für den Zeitraum zwischen 1974 und 2001 rund 1,2 Millionen Messwerte eingetragen, um für spezifische Fragestellungen Auswertungen durchführen zu können^[26]. Es handelt sich dabei vor allem um hydrologische Daten (ca. 400 000) und Parameter aus dem Mess-

Datenbank als Basis

netz NADUF (Nationale Daueruntersuchung der schweizerischen Fliessgewässer^[27]) mit mehr als 850 000 Werten. Viele dieser Werte betreffen klassische Parameter wie Nährstoffe, Temperatur, Leitfähigkeit und pH-Wert u.a. Bis 2001 sind aus Forschungsprojekten lediglich rund 750 sowie aus kantonalen Studien etwa 1000 Messwerte zu Mikroverunreinigungen systematisch zusammengestellt worden (Pestizide, hormonaktive Substanzen und vereinzelt Wirkstoffe aus Medikamenten).

Diese Datenbank wurde mit grossem Aufwand aktualisiert. Die Datenbank enthält aktuell insgesamt über 13 000 Messwerte von Mikroverunreinigungen. Sie können den Substanzgruppen Korrosionsinhibitoren (> 700 Werte), hormonaktive Stoffe (> 1300 Werte), Pflanzenschutzmittel (> 6500 Werte), pharmazeutische Wirkstoffe (> 4000 Werte) und Verschiedene (z. B. EDTA und NTA, > 500 Werte) zugeordnet werden. Eine Übersicht ist für ausgewählte Substanzen in Tab. 1 dargestellt. Neben Verkaufsmengen sind auch gemessene Maximalwerte im gereinigten Abwasser und in Oberflächengewässern angegeben. Verschiedene Substanzen weisen eine komplizierte Anwendungs- und Eintragsdynamik auf. Beispielsweise können Konzentrationen von Pestiziden zu bestimmten Zeitpunkten, etwa bei Regenereignissen, sehr hoch sein. Pestizide werden in der Landwirtschaft primär während einer bestimmten Anwendungsperiode eingesetzt und werden hauptsächlich dann abgeschwemmt. Erhöhte Konzentrationen werden für landwirtschaftliche Pestizide in der Regel nur während Regenereignissen festgestellt. Andere Stoffe werden hingegen kontinuierlich in die Gewässer eingetragen. Ein Beispiel dafür sind Rückstände von Medikamenten, die täglich vielerorts verwendet werden und über ARAs in die Gewässer gelangen. Hier sind zeitlich weniger starke Fracht- und Konzentrationsschwankungen nachweisbar.

Über 13 000 Messwerte
von Mikroverunreinigungen

Tab. 1 > Zusammenfassung der Werte aus der Datenbank für organische Mikroverunreinigungen

Alle Werte in µg/l. Bestimmungsgrenze: Minima und Maxima werden von Matrix (ARA, Zulauf oder Ablauf, oder Oberflächengewässer) und Analyseverfahren bestimmt.

Gruppe	Substanzname	Verkaufsmenge in der Schweiz [kg/a]	Bestimmungsgrenze (min-max) [µg/l]	Anzahl Messwerte Oberflächengewässer (% davon über Bestimmungsgrenze)	Anzahl Messwerte Ablauf ARA (% davon über Bestimmungsgrenze)	maximale Konzentration [µg/l] Oberflächengewässer mit Ort und Datum	maximale Konzentration Ablauf ARA [µg/l]
Korrosionsinhibitoren	Benzotriazol	16 000	0,003–2	350 (99 %)	35 (100 %)	5,44 Glatt bei Oberglatt ZH, 2.2.2003	91,000
	Methylbenzotriazol		0,041–0,2	321 (97 %)	24 (100 %)	1,2 Steinach SG/TG, 21.9.2007	2,770
Hormonaktive Stoffe	Ethinylestradiol	158	0,0003–0,05	92 (4 %)	53 (11,3 %)	0,12 Glatt bei Zellersmühle AR, 1.1.2005	2,800
	Estradiol		0,0002–0,05	85 (12 %)	53 (47 %)	0,01 Thur bei Oberbüren TG, 1.1.2005	0,017
	Estron		0,0008–0,05	109 (28 %)	56 (84 %)	0,027 Glatt bei Zellersmühle AR, 1.1.2005	0,051
	Bisphenol A		0,005–0,73	70 (63 %)	52 (90 %)	4,8 Furtbach ZH, 23.6.2007	4,890
	Nonylphenol		0,001–0,5	510 (89 %)	244 (99 %)	38,063 Rhein bei Laufenburg AG, 30.5.1983 (nach 1986: 1.296, Furtbach, 8.1.2008)	2,200

Gruppe	Substanzname	Verkaufsmenge in der Schweiz [kg/a]	Bestimmungsgrenze (min-max) [$\mu\text{g/l}$]	Anzahl Messwerte Oberflächengewässer (% davon über Bestimmungsgrenze)	Anzahl Messwerte Ablauf ARA (% davon über Bestimmungsgrenze)	maximale Konzentration [$\mu\text{g/l}$] Oberflächengewässer mit Ort und Datum	maximale Konzentration Ablauf ARA [$\mu\text{g/l}$]
Pflanzenschutzmittel	Atrazin		0,003–0,03	1411 (92 %)	81 (49 %)	1,34 Flaacher Bach ZH, 5.4.2000	20,660
	Carbendazim	26 000 ^a	0,005–0,05	64 (55 %)	25 (60 %)	0,281 Glatt bei Flawil SG, 16.8.2007	5,929
	Diazinon		0,005–0,03	1192 (30 %)	78 (44 %)	0,3 Ellikerbach ZH, 25.9.2000	1,180
	Diuron	20 000 ^a	0,005–0,03	678 (13 %)	28 (39 %)	1,402 Glatt bei Flawil SG, 16.8.2007	0,210
	Irgarol	24 000 ^a	0,005–0,03	859 (1 %)	23 (30 %)	0,011 Glatt bei Flawil SG, 16.8.2007	0,166
	Isoproturon		0,006–0,06	708 (18 %)	31 (26 %)	8,44 Ellikerbach ZH, 5.4.2000	37,402
	Mecoprop		0,01–0,3	170 (48 %)	24 (88 %)	0,778 Furtbach ZH, 18.6.2007	2,030
	Terbutryn	27 000 ^a	0,005–0,03	1218 (10 %)	28 (71 %)	0,130 Furtbach ZH, 17.7.2000	0,120
Pharmazeutische Wirkstoffe	Amidotrizoesäure	487	0,05–0,1	47 (26 %)	43 (26 %)	1,5 Glatt bei Zellersmühle AR, 1.1.2005	3,500
	Atenolol	3 165	0,01–0,1	56 (70 %)	39 (100 %)	2,565 Furtbach ZH, 18.6.2007	1,700
	Azithromycin		0,005–1,4	48 (2 %)	44 (50 %)	0,012 Furtbach ZH, 1.11.2004	0,700
	Bezafibrat	693	0,002–0,1	61 (18 %)	36 (64 %)	0,042 Furtbach ZH, 20.6.2007	1,500
	Carbamazepin	4 373	0,002–0,1	489 (21 %)	69 (100 %)	0,84 Steinach SG/TG, 21.9.2007	0,748
	Clarithromycin	1 400	0,002–0,05	69 (52 %)	53 (100 %)	0,123 Furtbach ZH, 23.6.2007	14,600
	Clindamycin		0,002–0,05	52 (21 %)	17 (100 %)	0,036 Steinach SG/TG, 1.1.2005	0,180
	Clofibrinsäure	21	0,005–0,1	85 (0 %)	56 (95 %)	-	0,400
	Dehydrato-Erythromycin		0,005–0,1	33 (18 %)	9 (66 %)	0,052 Jonen ZH, 1.11.2004	0,120
	Diclofenac	4 573	0,05–0,1	140 (61 %)	76 (100 %)	0,641 Vedeggio TI, 4.9.2007	2,399
	Ibuprofen	24 047	0,005–2	140 (14 %)	72 (75 %)	0,13 Vedeggio TI, 4.9.2007	7,000
	Mefenaminsäure	19 287	0,01–0,05	2 (0 %)	4 (100 %)	-	2,352
	Metoprolol	3 172	0,01–0,2	38 (37 %)	17 (100 %)	0,066 Furtbach ZH, 1.11.2004	0,750
	Naproxen		0,005–0,15	140 (21 %)	60 (98 %)	0,142 Furtbach ZH, 18.6.2007	3,278
	Propranolol	732	0,005–0,06	38 (13 %)	10 (90 %)	0,022 Furtbach ZH, 1.11.2004	0,120
	Roxithromycin		0,002–0,11	33 (9 %)	25 (24 %)	4,859 Vedeggio TI, 4.9.2007	9,913
	Sotalol	760	0,005–0,2	55 (60 %)	42 (100 %)	0,249 Furtbach ZH, 18.6.2007	1,300
	Sulfadiazin		0,005–0,15	33 (6 %)	24 (21 %)	0,004 Vedeggio TI, 4.9.2007	0,025
	Sulfamethazin		0,004–0,11	19 (5 %)	33 (15 %)	0,029 Glatt bei Flawil SG, 16.8.2007	0,040
	Sulfapyridin		0,005–0,026	19 (74 %)	33 (100 %)	0,109 Furtbach ZH, 23.6.2007	0,328
Sulfamethoxazol	2079	0,005–0,05	69 (60 %)	24 (100 %)	0,11 Steinach SG/TG, 21.9.2007	0,530	
Trimethoprim	700 ^b	0,005–0,67	69 (34 %)	36 (92 %)	0,076 Furtbach ZH, 23.6.2007	0,180	
Komplexbildner	EDTA		< 0,2	248 (81 %)	10 (100 %)	46,0 Aubonne bei Allaman, 29.6.1989 34,0 Witibach bei Grenchen, 3.10.2007	29,100
	NTA		< 0,2	253 (72 %)	10 (100 %)	80,0 Aubonne bei Allaman, 3.1.1990 22,0 Witibach bei Grenchen, 22.6.2007	9,100

^a Verbrauchsmenge für Einsatz als Biozide: Schätzung aus BIOMIK Teil 1 [28]Bürgi D., Giger W., Knechtenhofer L., Meier I. 2007: Biozide als Mikroverunreinigungen in Abwasser und Gewässern – Teilprojekt 1: Priorisierung von bioziden Wirkstoffen. FRIEDLIPARTNER AG. Zürich. p. 189.

^b Blum et al.

Mit den vorhandenen Messwerten kann die verallgemeinerte Frage «Wie stark sind die Oberflächengewässer in der Schweiz mit Mikroverunreinigungen aus der Siedlungsentwässerung belastet?» nicht generell beantwortet werden. Dazu bräuchte es systematische Langzeitbeobachtungen an zahlreichen Gewässerstellen. Auch mit vielen zusätzlichen Messungen kann nun nicht rasch eine repräsentative, schweizweite Aussage gemacht werden: Neben einem erheblichen finanziellen Aufwand wird dies auch durch die hohe zeitlichen Variabilität der Abflüsse in Fliessgewässern erschwert. Für eine flächendeckende, zuverlässige und schnelle Beurteilung wird ein Modell vorgeschlagen, welches sowohl die mehreren tausend Kilometer Fliessgewässer wie auch hunderte von ARAs abdeckt und mit den vorhandenen Messwerten verifiziert werden kann. Darum wurde ein computerbasiertes Stoffflussmodell entwickelt, welches nachstehend beschrieben ist^[29]. Neben der Abschätzung des Ist-Zustandes erlaubt das Stoffflussmodell auch die Erstellung von Zukunftsszenarien, Kosten-/Nutzenanalysen und die optimierte, gezielte Auswahl von zukünftigen Standorten für ein effizientes repräsentatives Monitoring.

Schnelle, flächendeckende
Beurteilung

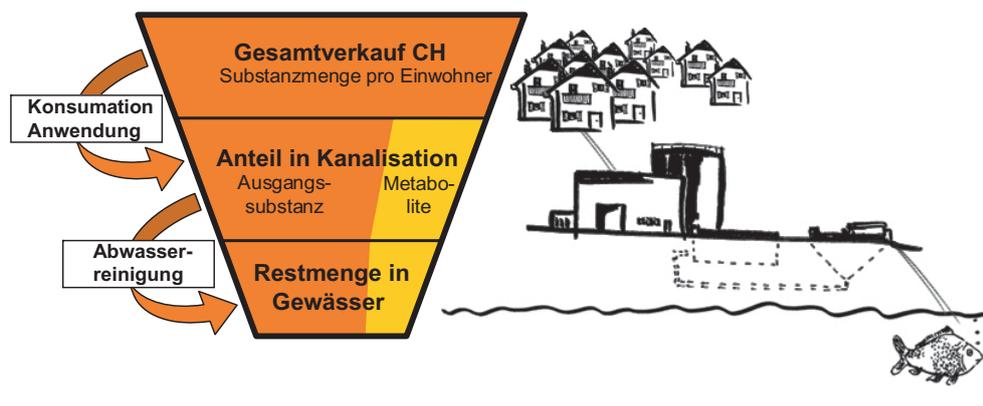
3.3 Kurzbeschreibung Stoffflussmodell

Ziele des Stoffflussmodells

- > Abschätzung von Schadstofffrachten für jeden Punkt in Schweizer Oberflächengewässern (Ist-Zustand)
- > Identifizierung stark belasteter Fliessgewässerabschnitte (Schadstofffrachten und Berechnung von Konzentrationen bei unterschiedlichen Abflusszuständen, Vergleich von PECs mit PNECs)
- > Berechnung von Zukunftsszenarien, um die Wirksamkeit von Massnahmen zur Reduktion von Mikroverunreinigungen aus kommunalen ARA abzuschätzen und deren Einsatz zu optimieren (einzugsgebietsweise Kosten/Nutzen-Analysen)
- > Identifikation von Indikatorsubstanzen, deren Vorkommen im Gewässer sich mit einem einfachen Modell ohne viele Parameter gut prognostizieren lässt

Obschon Schadstoffkonzentrationen [Masse pro Volumen] die ökotoxikologisch relevante Grösse sind und in Umweltproben direkt bestimmt werden, macht es durchaus Sinn, nicht nur diese, sondern auch **Schadstofffrachten** [Masse pro Zeit] zu bestimmen. Nur so kann überprüft werden, ob die verwendeten Modellvorstellungen realistisch sind oder nicht. Gibt das Modell für eine bestimmte Substanz plausible Resultate, kann das Vorkommen einer neuen, ähnlichen Substanz gut abgeschätzt werden. Weiter kann eine aktuell analysierte Probe aus einem Fliessgewässer besser eingeordnet werden: Entspricht die Schadstofffracht den Erwartungen, ist sie normal, unüblich hoch oder tief?

Abb. 3 > Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Modellrechnung, basierend auf mittleren landesweiten Verbrauchsmengen einer Substanz



3.3.1 Systemabgrenzung

Als Grundlage wird das topologische Gewässernetz der Schweizer Oberflächengewässer des Bundesamtes für Landestopografie swisstopo verwendet. Das digitalisierte Netzwerk weist eine Gesamtlänge von rund 90 000 Kilometern auf. 742 kommunale ARAs, welche für mehr als 500 Einwohnergleichwerte ausgelegt wurden, behandeln das Abwasser von 97 % der Schweizer Bevölkerung^[30]. Diese ARAs und die daran angeschlossenen Einwohner sind im Modell berücksichtigt. Über 600 ARAs leiten das gereinigte Abwasser in Bäche und Flüsse ein und knapp 100 Anlagen direkt in Seen. Insgesamt führen 6000 Kilometer Fließgewässer gereinigtes Abwasser mit sich.

742 kommunale ARAs
6000 Kilometer Fließgewässer
mit gereinigtem Abwasser

3.3.2 Eingangsgrößen

Die Verbrauchszahlen einer Substanz spielen eine zentrale Rolle. Wenn nicht anderes bekannt ist, wird angenommen, dass die konsumierte Menge auch der Verkaufsmenge entspricht (Verkaufsmengen siehe Tab. 1). Für Wirkstoffe in Medikamenten können die Verkaufszahlen von professionellen Marktforschungsinstituten erworben werden. Auch für bestimmte Inhaltsstoffe von Reinigungsmitteln oder Kosmetika liegen Zahlen bei den entsprechenden Verbänden vor.

Verbrauchszahlen

Bei Haushaltprodukten, die in Dusche und Bad, Waschküche oder Küche angewandt werden, fließt der allergrößte Teil in die Kanalisation. Auch pharmazeutisch wirksame Stoffe in Medikamenten, welche von Menschen eingenommen werden, gelangen bei der Ausscheidung in die Toilette und anschließend in die Kanalisation. Daher kommt es hauptsächlich darauf an, welcher Teil der Ausgangssubstanz nach der Anwendung unverändert in die Kanalisation gelangt. Dieser kann sehr stark variieren: Beim Benzotriazol (Korrosionsschutz in Maschinengeschirrspülmitteln) sind dies praktisch 100 %, bei gewissen Medikamenten hingegen nur wenige Prozente. Ein Beispiel anhand eines Schmerzmittels: Der Anteil unverändert ausgeschiedenen Diclofenacs

Stoffe gelangen unverändert in die Kanalisation

Beispiel Diclofenac
Metaboliten

beträgt 16 % (Mittelwert aus^[31], 1 % im Urin und 15 % in den Fäkalien). Neben der Ausgangssubstanz werden auch Umwandlungsprodukte, sogenannte Metaboliten, ausgeschieden (für Definition und weitere Details zu Metaboliten siehe Kapitel 4.2.3 und 4.2.4). Bei Diclofenac machen die wichtigsten bekannten Metaboliten 65 % aus (50 % im Urin und 15 % in Fäkalien). Diese 65 % haben bezüglich der Ausgangssubstanz aber nur ein ökotoxikologisches Potenzial von 20 % der gesamten angewendeten Menge an Ausgangssubstanz. Darum wird für die Abschätzung des Risikopotentials mit $16\% + 20\% = 36\%$ der verkauften Diclofenac-Menge gerechnet. Für den Vergleich von Modellprognosen mit Umweltproben werden hingegen nur die 16 % berücksichtigt, da in Umweltproben in der Regel nur die Ausgangssubstanz gemessen wird.

Mit der heutigen Verfahrenstechnik auf kommunalen ARAs werden viele Mikroverunreinigungen nicht oder nur teilweise eliminiert. Diese Eliminationsrate wird als Transferkoeffizient im Stoffflussmodell berücksichtigt (prozentuale Elimination). Für Diclofenac beispielsweise ist der durchschnittliche Abbau in einer konventionellen ARA etwa 25 %^[32]. Da praktisch keine Angaben über das Verhalten von Metaboliten in ARAs vorhanden sind, wird in erster Näherung davon ausgegangen, dass die Metaboliten in gleicher Masse wie die Ausgangssubstanz eliminiert werden. Das Modell berücksichtigt nur die Situation bei trockener Witterung und erlaubt (noch) keine Aussagen zur Belastung bei Regenüberläufen aus der Mischkanalisation.

Ungenügender Abbau in ARAs

Die Restmengen von organischen Spurenstoffen, welche mit konventionellen Abwasserreinigungsverfahren nicht eliminiert werden können, gelangen mit dem gereinigten Abwasser in die Oberflächengewässer. Sie werden mit dem Anteil natürlichen, unbelasteten Wassers in einem Fluss oder See verdünnt. Da bei Minimalabfluss Q_{347} die schlechteste Verdünnung herrscht, wurde die Belastungslage für diesen Zustand erhoben. Mit Q_{347} wird der Abfluss eines Gewässers an einer bestimmten Stelle bezeichnet, welcher an 347 Tagen im Jahr (95 % der Zeit) erreicht oder überschritten wird, gemittelt über 10 Jahre. Für ARAs, bei denen keine Abflussmessstelle in der Nähe vorhanden ist, wurden die Werte für Q_{347} interpoliert^[33]. Damit liegt für über 80 % aller ARAs, die in ein Fließgewässer einleiten, eine Schätzung für Q_{347} vor. Abb. 4 (links) zeigt die lokalen Verdünnungsfaktoren. Die Verdünnungsfaktoren sind ein Mass dafür, wie stark das gereinigte Abwasser verdünnt wird, oder um wie viel geringer die Schadstoffkonzentrationen des gereinigten Abwassers nachher im Gewässer sind. Bei über 150 ARAs wird das gereinigte Abwasser weniger als zehnmal verdünnt. Da aber oberhalb der meisten ARAs bereits gereinigtes Abwasser eingeleitet wird, und das Wasser oberhalb deren Einleitstellen vorbelastet ist, ist zusätzlich der kumulierte Verdünnungsfaktor bestimmt worden (Abb. 4 rechts). So beurteilt, ist der Verdünnungsfaktor bei über 230 ARAs kleiner als zehn. Diese Grafik zeigt deutlich, dass die Verdünnung regional sehr verschieden ist (Mittelland vs. Berggebiet) und dass sie für persistente Substanzen nicht nur lokal beurteilt werden soll. Als persistent sind hier Substanzen bezeichnet, die Halbwertszeiten in einer ähnlichen Grössenordnung oder grösser als die Aufenthaltszeiten im betrachteten System (Schweizer Oberflächengewässer) aufweisen.

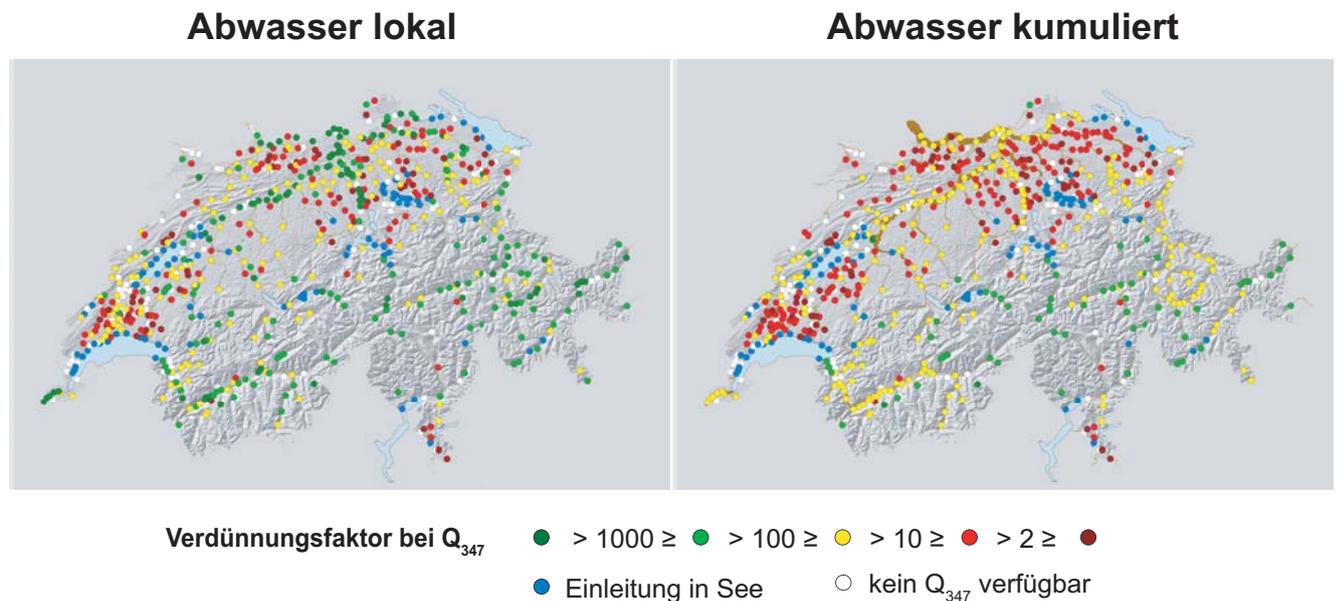
Bei Minimalabfluss Q_{347}
herrscht schlechteste
Verdünnung

Abb. 4 > Verdünnungsfaktoren für die ARAs der Schweiz

Links: Lokale Verdünnungsfaktoren (VF_L) bei Trockenwetterabfluss $Q_{ARA,TW}$ in den ARAs ($VF_L = Q_{347}/Q_{ARA,TW}$) – dabei wird angenommen, dass alles Wasser im Fluss oberhalb der Einleitung einer ARA «sauber», unbelastet ist.

Rechts: Kumulierte Verdünnungsfaktoren (VF_K) – dabei wird das gereinigte Abwasser aller ARAs entlang dem Fließpfad aufkumuliert ($VF_K = Q_{347}/\Sigma Q_{ARA,TW}$). Q_{347} = Niederwasserabflussmenge (enthält auch $Q_{ARA,TW}$).

Deutlich sichtbar sind die regionalen Unterschiede zwischen dem dicht besiedelten Mittelland und dem dünn besiedelten, niederschlagsreichen und schmelzwassergepufferten Berggebiet.



Karten reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA081360)

Für das Verhalten der Mikroverunreinigungen in Gewässern wird im Modell vereinfachend angenommen, dass die Stoffe nicht abgebaut werden. Im Modell werden die berechneten Stofffrachten in den Ausläufen der ARAs darum dem Fließpfad entlang, in Flüssen und Seen, stromabwärts addiert. Diese vereinfachte Annahme wird mit vorhandenen Umweltbeobachtungen (Konzentrationen umgerechnet in Frachten) überprüft. Die Halbwertszeiten für den Abbau in Gewässern sind für viele Substanzen grösser, oder in der gleichen Grössenordnung wie die Fließzeiten in Schweizer Flüssen, so dass kein markanter Abbau zu erwarten ist. Die Fließzeiten in Schweizer Bächen und Flüssen sind kleiner als ein Tag^[34].

Verhalten der Mikroverunreinigungen in natürlichen Gewässern
Kein markanter Abbau zu erwarten

Alternativ dazu kann im Modell auch ein Abbau in Seen berücksichtigt werden, weil dort die Aufenthaltszeiten deutlich grösser sind als in den Flüssen. Ein Beispiel dafür ist der photolytische Abbau von Diclofenac. Die Halbwertszeit beträgt bis zu acht Tage im Sommer und bis 30 Tage im Winter^[35]. Die Berechnungen mit und ohne Berücksichtigung des Abbaus in Seen haben aber gezeigt, dass es keine grossen Unterschiede zwischen den beiden Varianten gibt, ausser natürlich für Frachten und Konzentrationen direkt bei Seeausläufen. Auf die Anzahl der Überschreitungen von PNECs unterhalb von ARAs hat der Abbau in Seen aber keinen grossen Einfluss. Dies deshalb, weil die kritischen Stellen (grosse ARAs im dicht besiedelten Gebiet und mit schlechter Ver-

dünnung) hauptsächlich, aber nicht ausschliesslich, an kleinen bis mittleren Fließgewässern zu erwarten sind, welche nicht von Seen gespiesen werden.

3.4 Beispiel Carbamazepin und Diclofenac

Beide pharmazeutischen Wirkstoffe, Carbamazepin und Diclofenac, finden in der Schweiz breite Anwendung. Carbamazepin ist ein Antiepileptikum und Diclofenac ein Schmerzmittel. Erst im mg/l-Bereich ist Diclofenac akut toxisch gegenüber Wasserorganismen^[20]. Dagegen führte eine Langzeit-Exposition von Fischen bereits ab einer Konzentration von 1 µg/l zu Organveränderungen^[16]. Ausserdem konnte eine Akkumulation von Diclofenac in Organen und Geweben der untersuchten Fische nachgewiesen werden^[20]. Mit den Werten aus Tabelle 2, dem Fließgewässernetz und den im Modell berücksichtigten ARAs wird prognostiziert, wie viel Carbamazepin beziehungsweise Diclofenac an einer bestimmten Stelle zu erwarten ist. In Abbildung 4 sind diese Prognosen für unterschiedlich grosse Einzugsgebiete gemessenen Frachten gegenübergestellt. Bis auf wenige Ausnahmen stimmen die Prognosen sehr gut mit den tatsächlich gemessenen Frachten überein. Eine Streuung um den Faktor zwei ist für Haushaltchemikalien und Medikamente nicht unüblich und entspricht der zu erwartenden zeitlichen Variabilität an einem definierten Standort^[36].

Prognosen stimmen sehr gut mit gemessenen Frachten überein

Tab. 2 > Modelleingangsgrößen für die Medikamente Diclofenac und Carbamazepin

Substanz Anwendung	Verkaufsmenge [kg/a] ^a	Anteil unverändert ausgeschiedene Ausgangssubstanz ^b	Mittlere Fracht Zulauf ARA	Elimination in ARA mit konventionellen Reinigungsverfahren ^d	Mittlere Fracht Ablauf ARA	Zusätzliches ökotoxikologisches Potenzial von Metaboliten äquivalent zur Ausgangssubstanz ^b	PNEC ^f
Diclofenac Schmerzmittel	4000	16 %	ca. 240 µg/Ed	25 %	ca. 180 µg/Ed	20 %	0,1 µg/l
Carbamazepin Antiepileptikum	4400	10 % ^c	ca. 160 µg/Ed	0 % (20 % bis -20 %) ^e	ca. 160 µg/Ed	26 %	0,5 µg/l

^a Mittelwert aus den Jahren 2000 und 2004^[37]

^b Summe in Urin und Fäkalien^[31]

^c Da nur eine Angabe über den unveränderten Anteil ausgeschieden im Urin gemacht ist in der Referenz¹, wurde der Anteil in den Fäkalien geschätzt (siehe auch noch Bemerkung^e).

^d Durchschnitt aus 9 ARAs^[32]. Dieser Mittelwert wird durch 14 weitere ARAs gestützt welche im Rahmen einer nationalen Messkampagne durchgeführt wurden^[38].

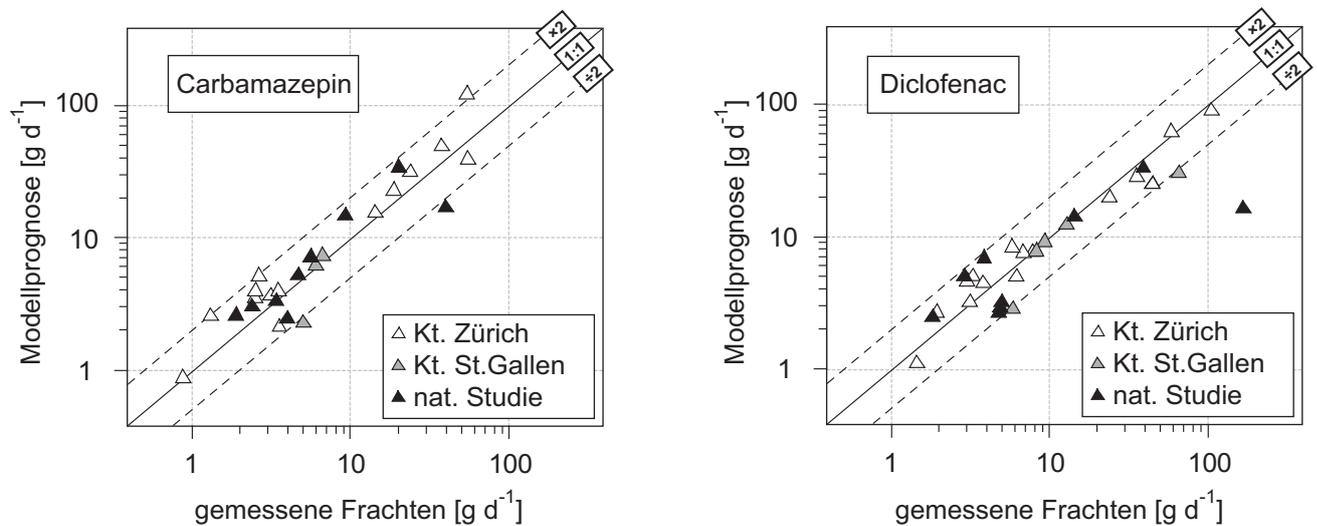
^e Durchschnitt aus 9 ARAs^[32]. Ein Teil von Metaboliten (Glucuronidkonjugat) kann in ARAs auch in die Ausgangssubstanz zurückgewandelt werden^[38].

^f Bund- und Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Deutschland^[16].

Abb. 5 > Carbamazepin und Diclofenac in Fließgewässern

Prognostizierte Frachten basierend auf der an der ARA im entsprechenden Einzugsgebiet angeschlossenen Anzahl Einwohner auf linker y-Achse und Messung auf x-Achse. Die Modellvorhersagen weichen nur selten um mehr als einen Faktor zwei von den gemessenen Frachten ab. Eine Streuung in dieser Größenordnung ist für Haushaltchemikalien und Medikamente nicht unüblich und entspricht der zu erwartenden zeitlichen Variabilität an einem Standort.

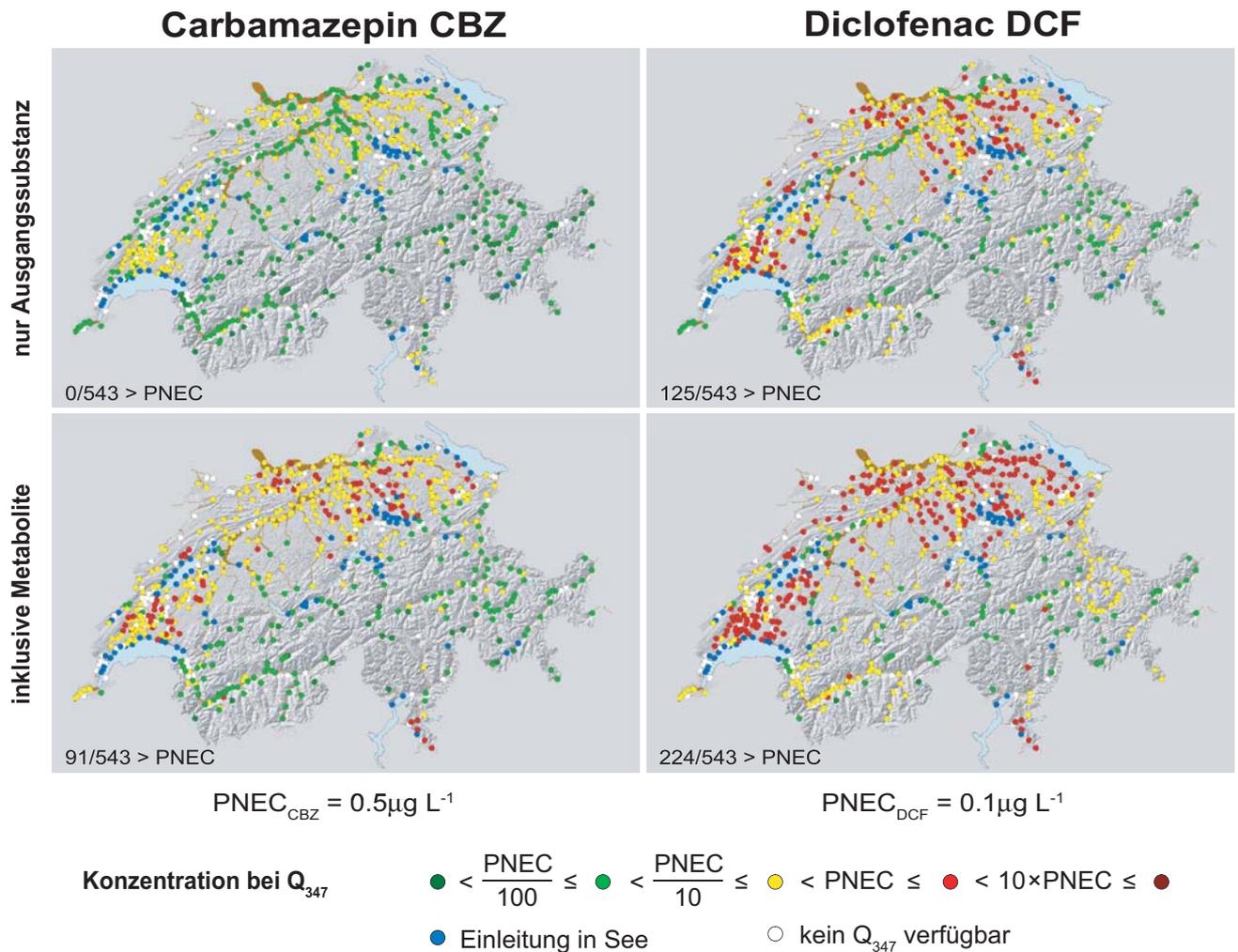
Tagesfrachten für verschiedene, unterschiedlich grosse Flusseinzugsgebiete



Dank der guten Übereinstimmung von Modellprognosen mit einzelnen Umweltbeobachtungen kann nun eine Vorhersage für alle anderen Fließgewässerabschnitte unterhalb von ARAs gemacht werden. In Abb. 6 sind Konzentrationen (Quotient aus Frachten/Minimalabfluss Q_{347}) dargestellt.

Abb. 6 > Konzentrationen von Carbamazepin (links) und Diclofenac (rechts) für die Ausgangssubstanz alleine (oben) und das gesamte Risikopotenzial inklusive Metabolite (unten)

Rot sind die Fliessgewässerabschnitte unterhalb ARAs, in welchen der PNEC der jeweiligen Substanz bei Q_{347} überschritten ist. Für Carbamazepin ist dieser Wert $PNEC_{CBZ} = 0,5 \mu\text{g/l}$ und für Diclofenac $PNEC_{DCF} = 0,1 \mu\text{g/l}$ [16].



Karten reproduziert mit Bewilligung von swisslopa (BA081360)

Die Auswertung bezüglich Schadstoffkonzentrationen erfolgt anhand der 543 ARAs, für die unterhalb der Einleitungsstelle der Minimalabfluss Q_{347} im Fliessgewässer vorliegt. Wird nur die Ausgangssubstanz alleine betrachtet, kommt es bezüglich Carbamazepin zu keiner Überschreitung des $PNEC_{CBZ} = 0,5 \mu\text{g/l}$ [16]. Die Diclofenac-Konzentrationen hingegen sind in Fliessgewässerabschnitten unterhalb von über 100 ARAs grösser als $PNEC_{DCF} = 0,1 \mu\text{g/l}$.

Werden die Metaboliten und deren ökotoxikologisches Risikopotenzial mit berücksichtigt, erhöht sich die Anzahl Überschreitungen markant: bezüglich Carbamazepin werden bei Q_{347} knapp 100 (rund 15%) Überschreitungen verzeichnet, bezüglich Diclo-

fenac gar über 200 (über 35 %). Diese Abschätzungen sind jedoch mit Unsicherheiten behaftet.

3.5 Auswertung von Langzeitabflussmessungen

Mit Recht könnte argumentiert werden, dass Q_{347} einem «worst case» entspricht. Um diese generelle Vermutung zu widerlegen, erstreckt sich die nachfolgende Auswertung auf die letzten 20 Jahre. Sie bezieht sich auf die Abflussverteilung (Hydrograph) im Fließgewässer, anstatt nur auf die Konzentration bei Minimalabfluss zu fokussieren. Es wird analysiert, an wie vielen Tagen pro Jahr $PNEC_{DCF}$ theoretisch überschritten worden wäre, unter der Annahme, dass der Verbrauch von Diclofenac für alle Jahre gleich war.

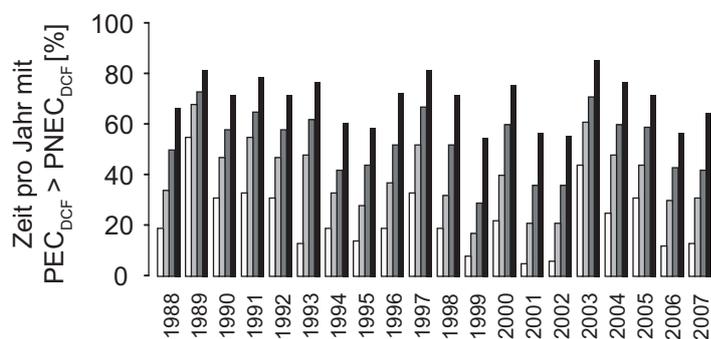
Verdünnung
unter Berücksichtigung
der realen Abflussverteilung

Abb. 7 (links) zeigt das Beispiel der Abflussmessstation in der Ergolz bei Liestal vor und nach der ARA Füllinsdorf. Mit dem Modell wird berechnet, wie viel Diclofenac in diesem Fließgewässerabschnitt pro Tag zu erwarten ist (inklusive Metaboliten). Für diese Diclofenacmenge wird bestimmt, welcher mittlere Tagesabfluss mindestens hätte erreicht werden müssen, damit $PNEC_{DCF}$ nicht überschritten worden wäre. Im letzten Schritt sind dann die Anzahl Tage ermittelt worden, an welchen dieser kritische Abfluss unterschritten war. Es zeigt sich, dass der Abfluss in der Ergolz während einem grossen Teil der Zeit eine nur «ungenügende Verdünnung» aufweist und damit $PNEC_{DCF}$ in 30 % bis 70 % der Zeit theoretisch überschritten wird.

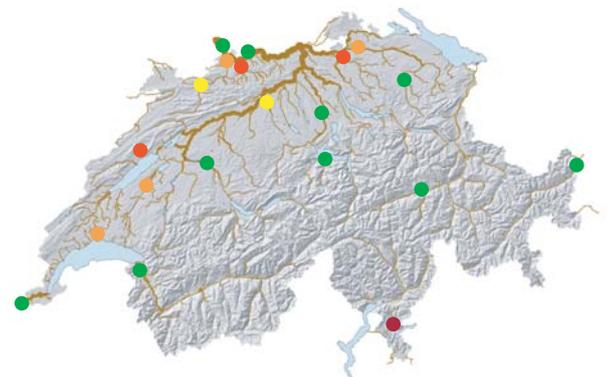
Abb. 7 > Auswertung von 20 Jahren Abflussdaten in der Ergolz bei Liestal

Theoretische Überschreitungsdauer des $PNEC_{DCF}$ für 20 Abflussmessstationen

X-Achse: Jahr; Y-Achse: Anzahl Tage an denen $PNEC_{DCF} = 0,1 \mu\text{g/l}$ theoretisch überschritten wurde (in Prozent pro Jahr)



Ergolz, ARA Füllinsdorf
 □ oberhalb (nur DCF) ■ unterhalb (nur DCF)
 □ oberhalb (DCF+Met.) ■ unterhalb (DCF+Met.)



Zeit pro Jahr mit $PEC_{DCF} > PNEC_{DCF}$ (DCF+Met.)
 ● nie ● nur in trockenen Jahren
 ● 10-30% ● 30-70% ● >70%

Viele Langzeitabflussmessstationen in der Schweiz befinden sich an grösseren Fliessgewässern oder Flüssen und Bächen, wo keine ARA einleitet, also nicht da, wo eine ungenügende Verdünnung erwartet wird. Trotzdem wurde für eine gezielte Auswahl von 20 Abflussmessstationen die vorgängig beschriebene Auswertung durchgeführt. In Abb. 7 (rechts) ist das Resultat dargestellt; für diese 20 Fliessgewässerabschnitte ist das Bild konsistent mit Abb. 6 (unten rechts): An allen Stellen, wo die Auswertung der Langzeitabflussmessungen «null Tage» liefert, wurde auch bei Q_{347} keine Überschreitung von $PNEC_{DCF}$ prognostiziert. Überall dort hingegen, wo bei Q_{347} eine Überschreitung von $PNEC_{DCF}$ zu erwarten ist, wird dieser nicht nur während einer kurzen Dauer – gemäss Q_{347} -Definition mindestens während 5 % der Zeit (etwas mehr als zwei Wochen) – sondern über mehrere Wochen bis Monate pro Jahr überschritten.

3.6 Gültigkeit des Modells, Abschätzung für weitere Substanzen

Umwandlung und Abbau von Medikamenten im Körper können von Individuum zu Individuum stark schwanken. Die Abbauleistung in den ARAs variiert zudem zwischen verschiedenen Anlagen und ist über die Zeit nicht konstant. Viele Menschen in einem ARA-Einzugsgebiet und mehrere ARAs in einem Flusseinzugsgebiet gleichen dies statistisch gesehen aus. Darum kann mit durchschnittlichen Transferkoeffizienten für Metabolisierung und Abbauleistung gut von der verkauften Menge auf die unverändert in die Kanalisation gelangende Fracht geschlossen werden und eine realistische Vorhersage der zu erwartenden Frachten in den Gewässern gemacht werden (Annahme: Anteil der unverbrauchten Medikamente der im Abfall landet ist klein). Die Konzentration der Ausgangssubstanz in Umweltproben wird in erster Näherung auch als Indikator für die Metaboliten verwendet. Einfache Transferkoeffizienten genügen, um von der verkauften Menge auf den Anteil, welcher unverändert in die Kanalisation gelangt, zu schliessen. Das Modell konnte erfolgreich mit verschiedenen Substanzen getestet werden. Grundsätzlich lässt es sich auf alle Substanzen anwenden, die

Ausgangssubstanz
Indikator für Metabolite

- > ein einfaches Anwendungsmuster haben, das heisst, wenn sie im Untersuchungsgebiet räumlich und zeitlich gleichmässig eingesetzt werden;
- > schwer abbaubar sind und keine grossen Senken aufweisen (wie zum Beispiel Sedimentation von Schwebstoff-gebundenen Substanzen im Gewässer);
- > ausschliesslich im Siedlungsbereich angewendet werden, das heisst, der Eintrag in die Gewässer erfolgt grösstenteils über die ARAs (nicht diffus wie zum Bsp. Pestizide aus der Landwirtschaft).

Es handelt sich also um Stoffe, bei denen ein gleichmässig verteilter, kontinuierlicher Eintrag aus den kommunalen ARAs des Untersuchungsgebiets zu erwarten ist.

Im Rahmen der Modellstudie wurde eine nationale Messkampagne durchgeführt. Die Resultate zeigten, dass auch Substanzen, für die keine Verbrauchszahlen vorhanden sind, verbreitet in vergleichbaren Frachten aus ARAs in die Gewässer eingetragen werden. Wenn für eine Substanz die Verkaufsmenge nicht bekannt ist, jedoch die Ablaufmengen pro Einwohner aus ARAs einigermassen konstant sind, kann auch

direkt mit diesen Ablaufwerten eine Fließgewässerbelastung berechnet werden. So konnte die Konzentration im Gewässer von einem breiteren Spektrum von Substanzen mit Kriterien zur Beurteilung der Wasserqualität verglichen werden (Tab. 3). Diese Substanzen werden kaum abgebaut und kumulieren sich deshalb entlang dem Fließpfad. Die Schadstofffrachten korrelieren gut mit der Anzahl Einwohner im Flusseinzugsgebiet.

Tab. 3 > Substanzen, auf welche das vorgestellte Modell anwendbar ist

Vergleich von Verbrauchsmengen (Erhebung durch ein Marktforschungsinstitut), berechneten und gemessenen Stofffrachten, Qualitätszielen und Modellberechnungen.

Zahlen (ohne einzelne Ausreisser) sind als Grössenordnungen zu verstehen und können z. T. markant variieren (von ARA zu ARA, von Tag zu Tag)

Substanz und Einsatzgebiet	Verbrauchsmenge ^a [µg/Ed]	Durchschnittliche Menge in Auslauf ARA und in Gewässer [µg/Ed] ^b	Qualitätsziele PNEC [µg/l]	Vorsorgliche Zielwerte [µg/l]	Anzahl Überschreitungen ohne Berücksichtigung von Metaboliten
Atrazin (Pflanzenschutz)	k.A.	10	0,6 ^[39]		0
				0,1 ^[40]	0
Benzotriazol (Korrosionsinhibitor)	5800	4100		1 ^[40]	263
				0,1 ^[41]	481
Carbamazepin (Pharmaka)	1650	160	0,5 ^[16]		0
				0,1 ^[40]	
Clarithromycin (Pharmaka)	520	100	0,03 ^d		215
				0,1 ^[40]	97
Diazinon (Biozide, Pflanzenschutz)	k.A.	20	0,003 ^[42]		52
				0,1 ^[40]	0
Diclofenac (Pharmaka)	1500	180	0,1 ^[16]		125
Östradiol (E2) und E2-Äquivalente (hormonelle Wirkung)		1,0	0,001 ^[43]		80
Mecoprop (Pflanzenschutz, Materialschutz)	k.A.	90	18 ^[44]		0
				0,1 ^[40]	38
Sotalol (Pharmaka)	329	260		0,1 ^[40]	179
Sulfamethoxazol inkl. Acetyl-Sulfamethoxazol (Pharmaka)	860	120	0,59 ^c		34
				0,1 ^[40]	70

^a Verbrauchsdaten zu Pharmaka^[37]

^b Modellvorhersage oder/und Resultate nationale Messkampagne^[29]

^c Abgeleitet gemäss WRRL (Europ. Wasserrahmenrichtlinie), ^[45] aus ^[46] und ^[47]

^d Abgeleitet gemäss WRRL (Europ. Wasserrahmenrichtlinie), ^[45] aus ^[48]

3.7 Fazit

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen, dass erwartungsgemäss vor allem kleine bis mittlere Fliessgewässer im dicht besiedelten Mittelland durch Mikroverunreinigungen aus der Siedlungsentwässerung belastet sind. Das Vorkommen etwa eines Dutzends von Substanzen lässt sich gut mit dem beschriebenen Modell abschätzen. Je nach Verbrauchsmenge, Abbau in ARAs und dem Verhältnis von PEC/PNEC ergibt sich eine unterschiedliche Beurteilung der Problematik. Hinzu kommt, dass sich sowohl Produkte (Neuerscheinungen, Marktablösung) wie auch PNECs (laufende Forschung) ständig ändern können. Substanzen, auf die das Modell erfolgreich angewendet wurde, können als aktuelle Indikatoren für die Gesamtbelastung aus der Siedlungsentwässerung verstanden werden.

3.8 Kostenschätzung von Massnahmen in zentralen Abwasserreinigungsanlagen

Modellrechnungen

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Wasserqualität kann in der Schweiz ausgehend von den Resultaten in Kapitel 3 die Ausbaustrategie «Wasserqualität» verfolgt werden. Dabei sollen bestimmte ARAs mit zusätzlichen Reinigungsstufen zur Entfernung von organischen Spurenstoffen aus dem Abwasser ausgestattet werden, wie zum Beispiel eine Behandlung mit Ozon oder mit Pulveraktivkohle. Wird Diclofenac als Indikator für die Wasserqualität ausgewählt und wird die Vorgabe gemacht, dass $PNEC_{DCF}$ nie und nirgends mehr überschritten werden (ohne Berücksichtigung der Metaboliten; siehe Abb. 6), dann müssten insgesamt rund 100 ARAs an kleinen bis mittleren Fliessgewässern im dicht besiedelten Mittelland ausgebaut werden (siehe Tab. 4). Da viele kleine ARAs betroffen sind, beträgt die Reduktion der Diclofenac-Gesamtfracht nur rund 15 %.

Wasserqualität

Zusätzlich kann aufgrund der Oberliegerverantwortung und zur Schonung von Trinkwasservorkommen (Grundwasser und Seen) die Strategie «Frachtreduktion» verfolgt werden. Die Auswahl erfolgt dabei primär anhand der Grösse der ARAs: Je grösser die ARA ist, desto grösser ist auch die Frachtreduktion, unabhängig davon, wo die ARA in ein Oberflächengewässer einleitet. Beim Indikatorstoff Diclofenac kann davon ausgegangen werden, dass mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe für alle ARAs etwa 95 % der Stoffmenge eliminiert werden. Würden beispielsweise alle ARAs mit mehr als 10000 Einwohnerwerten ausgebaut – insgesamt 197 Anlagen –, könnte die Stofffracht aus den ARAs in die Gewässer um mehr als 80 % reduziert werden. Bezüglich der Zielgrösse $PNEC_{DCF}$ werden mit dieser Strategie allerdings nur 45 % der Überschreitungen behoben.

Frachtreduktion

Tab. 4 > Unterschiedliche Ausbaustrategien

Vergleich der Strategie «Wasserqualität», die auf das Vermeiden von Überschreitungen abzielt und sich auf kritische Gewässerabschnitte konzentriert, mit der Strategie «Frachtreduktion», bei der ohne Berücksichtigung der lokalen Belastungslage mit dem Ausbau der grössten ARAs eine möglichst grosse Reduktion der Gesamtfracht erreicht werden soll.

Strategie	Anzahl auszubauende ARAs	Frachtreduktion	Reduktion überschrittener Wasserqualitätswert	Investitionskosten [Mrd. CHF]
Wasserqualität $C_{DCF} < PNEC_{DCF}$	109	-15 %	100 %	0,7–0,9
Frachtreduktion ARA > 10000 EW	197	> 80 %	45 %	1,6–1,9
Kombiniert $C_{DCF} < PNEC_{DCF}$ + ARA > 100000EW	119	-40 %	100 %	0,9–1,1

Im Rahmen einer detaillierten Studie wurden Varianten zu den beiden vorgängig erläuterten «Basis-Strategien» evaluiert und die zu erwartenden Kosten berechnet^[49]. Die wirkungsvollste Strategie – mit der gleichzeitig eine ausreichende Wasserqualität und ein Schutz der Trinkwasservorkommen angestrebt werden kann – ist die Kombination der beiden Strategien «Wasserqualität» und «Frachtreduktion», wobei in der genannten Studie für eine Frachtreduktion nur die ARAs mit mehr als 100 000 Einwohnerwerten berücksichtigt wurden. Die Investitionskosten für die obgenannten Szenarien wurden je nach verwendeter Reinigungsstufe und Strategie auf 0,7–1,9 Mrd. CHF geschätzt.

Kombinierte Strategie

Ausblick

Die aufgeführten Szenarien sind als illustrative Beispiele zu verstehen, die auf bestimmten Annahmen basieren und als einfache Abschätzung mit den heute verfügbaren Daten berechnet wurden. Bei einer konkreten Umsetzung eines Massnahmenprogramms müssten jedoch zusätzliche Aspekte berücksichtigt werden.

- > **ARA-Grösse:** Der Betrieb einer zusätzlichen Reinigungsstufe wie Ozonung oder Pulveraktivkohlebehandlung ist bei kleinen ARAs mit unverhältnismässig grossem Aufwand verbunden. Eine Berücksichtigung von ARAs mit einer durchschnittlichen Belastung von weniger als 10 000 Einwohnerwerten ist daher kaum sinnvoll. Sind bei kleineren ARAs Massnahmen zur Elimination von organischen Spurenstoffen notwendig, ist ein Anschluss an eine nahegelegene Anlage zu prüfen. Ansonsten empfiehlt sich ein genügend hohes Schlammalter (mindestens weitgehende Nitrifikation).
- > **Technische Anforderungen an bestehende ARAs:** Eine Anwendung von zusätzlichen Reinigungsstufen ist betriebstechnisch und wirtschaftlich nur bei ARAs mit einem guten Ausbaustandard sinnvoll (mindestens weitgehende Nitrifikation). Zudem ist nach heutigem Kenntnisstand eine Filtrationsstufe (z. B. Sandfilter, Membranfilter) notwendig, der die weitergehende Reinigungsstufe vorgeschaltet werden kann. Dies gewährleistet eine ausreichende Sicherheit und Effizienz des Verfahrens. Der zusätzliche Einbau einer Filtrationsstufe führt zu deutlichen Mehrkosten. Allenfalls können hier aber auch kostengünstigere Varianten, wie z. B. Textilfilter zur Anwen-

derung kommen. Den technischen Anforderungen kann wohl am Besten entsprochen werden, wenn weitergehende Verfahren in erster Linie im Rahmen der natürlichen Erneuerung von ARAs oder bei modernen ARAs realisiert werden. So können unverhältnismässige Investitionen vermieden werden.

- > *Kosten-Nutzen-Analysen:* Grundsätzlich gelten die Bestimmungen der Gewässerschutzgesetzgebung für alle ober- und unterirdischen Gewässer. Aufgrund der mit technischen Massnahmen verbundenen Kosten sollten jedoch bei der Planung Kosten-Nutzen-Betrachtungen im Einzelfall vorgenommen werden. Dabei müssen im Speziellen die lokalen Verhältnisse berücksichtigt werden. Da die Beeinträchtigung der Qualität der Gewässer viele Ursachen hat, ist es entscheidend sicherzustellen, dass getätigte Investitionen den bestmöglichen Nutzen für die Gewässer haben. Für die Strategie «Frachtreduktion» ist es sinnvoll, sich ausschliesslich auf die ARAs mit den grössten Frachten zu beschränken (z. B. ARAs > 100 000 EW), sowie auf die ARAs, die in Gewässer einleiten, die für die Trinkwasserversorgung von Bedeutung sind. Durch genauere Abklärungen im Rahmen einer Massnahmenplanung wird so die Anzahl der betroffenen ARAs deutlich reduziert. Im Weiteren haben technische Massnahmen bei ARAs nicht von hoher Dringlichkeit in Einzugsgebieten, wo andere Beeinträchtigungen der Gewässer überwiegen, zum Beispiel starke Defizite im Bereich Ökomorphologie oder Beeinträchtigungen aufgrund diffuser Stoffeinträge aus der Landwirtschaft. So wird beispielsweise bei rund einem Drittel der Fliessgewässer, bei denen das Qualitätsziel von Diclofenac überschritten wird, mehr als 20 % der Fläche des Einzugsgebietes ackerbaulich genutzt. In diesen Gewässern sind vermutlich Einträge von organischen Spurenstoffen aus der Landwirtschaft von grosser Bedeutung. Diese Beispiele unterstreichen die Notwendigkeit von Einzelfallbetrachtungen, um den Ausbau von Kläranlagen auf andere Massnahmen abzustimmen. Dies umfasst zusätzlich auch Abklärungen bezüglich Massnahmen im Kanalisationsnetz (beispielsweise Bau von genügend Regenbeckenkapazität, Sanierung von undichten Kanalisationssystemen).

Eine integrale Planung auf Einzugsgebietsebene, wie es schon in einigen Regionen angewendet wird, ist das richtige Instrument, um verschiedene Massnahmen gegeneinander abzuwägen und eine ausgewogene Lösung zu erarbeiten. Einzugsgebietsmanagement erfordert die Zusammenarbeit benachbarter Gemeinden und Kantone und stellt eine neue Herausforderung dar. Eine zukünftige Optimierung der Siedlungsentwässerung kann da auch auf vorhandenen Erfahrungen aufbauen (siehe Kapitel 4.6).

Einzugsgebietsmanagement

Das BAFU geht davon aus, dass nach sorgfältigen Kosten-Nutzen-Abschätzungen rund 100 ARAs mit mehr als 10 000 Einwohnerwerten ausgebaut werden müssten, um die Zielsetzungen Frachtreduktion und Wasserqualität zu erreichen. Dies umfasst einen Ausbau

Handlungsbedarf
bei rund 100 ARAs

- > der grössten ARAs der Schweiz (durchschnittliche Belastung von mehr als 100 000 EW) zur Reduktion der grossen Frachten (Oberliegerverantwortung, Reduktion grosser Frachten ins Meer),
- > ARAs an Gewässerabschnitten mit ungenügender Verdünnung des eingeleiteten gereinigten Abwasser, sowie

-
- > von ARAs an Gewässern, die für die Trinkwasserversorgung von Bedeutung sind (Seen mit wichtigen Trinkwasserfassungen, Flüssen mit Uferinfiltration ins Grundwasser im Bereich von Trinkwasserfassungen).

Alternativ zum Einbau eines technischen Verfahrens kann je nach Situation auch eine ARA aufgehoben und das Abwasser mit einer Verbindungsleitung an eine in der Nähe liegende Anlage angeschlossen werden, welche ausreichend dimensioniert ist und ein Verfahren zur Entfernung von organischen Spurenstoffen aufweist. Ein Massnahmenpaket zum Ausbau von 100 ARAs und dem Anschluss ausgewählter kleiner ARAs an grössere ARAs ist mit Investitionskosten von schätzungsweise 1,2 Mrd. CHF verbunden. Für die gesamte Schweiz würden die zusätzlichen jährlichen Kosten der Abwasserreinigung um 130 Mio. CHF zunehmen, welches einer Steigerung von 6% entspricht. Die zu erwartenden jährlichen Mehrkosten (Betrieb und Investitionen, inklusive Filtrationsstufe) für die heutigen Abwasserreinigungsanlagen sind vergleichsweise gering und liegen je nach Grösse bei 5–10% für grössere ARAs und bei 15–25% für kleinere ARAs.

4 > Forschungsprojekte MicroPoll 1

4.1 Einleitung

Um den Handlungsbedarf der in Kapitel 2.3 genannten Punkte 3 bis 5 anzugehen, hat das BAFU im Juni 2004 die folgenden Forschungsschwerpunkte ausgeschrieben:

1. «Erkennung und Priorisierung von Mikroverunreinigungen»
2. «Quantifizierung von Stoffflüssen relevanter Mikroverunreinigungen»
3. «Massnahmen an der Quelle»
4. «Mögliche Wandlung der Siedlungsentwässerung»

Die eingereichten Projektskizzen wurden bewertet, und neun Projekte wurden für die Finanzierung ausgewählt. In Tab. 5 findet sich eine Übersicht der Forschungsschwerpunkte mit den ausgewählten Projekten, von denen im Folgenden jedes kurz vorgestellt wird.

Tab. 5 > Forschungsprojekte MicroPoll1

Schwerpunkt/Projekt	Projektverantwortliche(r)	Kapitel
Erfassung und Priorisierung von Mikroverunreinigungen		4.2
Biozide als Mikroverunreinigungen in Abwasser und Gewässern	Leo Morf, GEO Partner; Daniel Bürgi, Friedli Partner AG	4.2.2
Verringerung der Schadstoffbelastung durch Pharmaka mittels Urinseparierung und ökotoxikologische Relevanz	Judit Lienert, Beate Escher, Eawag	4.2.3
Priorisierung von Umwandlungsprodukten von Mikroverunreinigungen	Martin Scheringer, ETH Zürich/Eawag; Kathrin Fenner, Eawag	4.2.4
Identifikation von Mikroverunreinigungen mit biologischen Testsystemen		4.3
Methodenentwicklung zum Effektmonitoring in aquatischen Ökosystemen	Katja Knauer, Patricia Holm, Uni Basel	0
Umwelttoxikologische Untersuchungen zur Erkennung des Gefahrenpotenzials von pharmazeutischen Mikroverunreinigungen im Wasser	Daniel Dietrich, Uni Konstanz	4.3.3
Heutige Siedlungsentwässerung		4.4
Zustand, Kosten und Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung	Max Maurer, Eawag	4.4.2
Technischer Wandel in der Siedlungsentwässerung		4.5
Umsetzung eines nachhaltigen Siedlungsentwässerungskonzeptes am Beispiel der Stadt Winterthur	Ruedi Moser, Gebr. Hunziker AG	4.5.2
Chancen für den Wandel zu einer regenerativen Abwasserwirtschaft	Kurt Sprecher, GEO Partner	4.5.3
Neues Organisationsmodell		4.6
Neues Organisationsmodell zur Förderung einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft in der Schweiz	Olivier Chaix, Bonnard & Gardel	4.6.1

Die Erkenntnisse aus den Forschungsprojekten werden jeweils nach folgendem Schema beschrieben: Einer kurzen Übersicht oder Beschreibung der Methodik folgen ein oder mehrere Absätze mit den Resultaten sowie die Schlussfolgerungen der Projektnehmer. In einem letzten Absatz «Bewertung und Diskussion» wird die Bedeutung der Ergebnisse im grösseren Zusammenhang (z. B. Vorgehen bezüglich Mikroverunreinigungen und Gewässerschutz in der Schweiz) bewertet und diskutiert.

4.2 Priorisierung von Mikroverunreinigungen

4.2.1 Überblick

Im Rahmen der verschiedenen Projekte wurden anhand der Stoffgruppen der Pharmaka, Pflanzenschutzmittel und Biozide verschiedene Priorisierungsmethoden für eine Vielzahl von Stoffen entwickelt (Tab. 6). Zusätzlich zu den hier entwickelten Methoden sind ein im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP50 entwickeltes Modell^[23] aufgeführt sowie das in Kapitel 3 beschriebene Modell. Die jeweiligen Methoden lassen sich grundsätzlich auch auf andere Stoffe/Stoffgruppen anwenden. Das grösste Problem bei sämtlichen diesen Methoden ist die Datenunsicherheit bezüglich Verbrauchsmengen und Anwendung der Stoffe. Zudem war die Datenbeschaffung zum Teil sehr aufwändig (umfangreiche Recherchen, Umfragen bei Herstellern etc.).

Priorisierungsmethoden

Tab. 6 > Priorisierungsmethoden-Vergleich

Projekt	Erprobte Stoffgruppe	Priorisierung basierend auf	Methode	Nicht einbezogene Aspekte	Probleme
Bürgli/Morf 4.2.2	Biozide	Verbrauchsmengen, Abbaubarkeit, Bioakkumulation, aquatische Toxizität, PEC/PNEC-Abschätzungen	Semiquantitative Abschätzungen	Umwandlungsprodukte	Datenunsicherheit, wenig Umweltmessungen zur Validierung
Lienert/Escher 4.2.3	Pharmaka	Ökotoxikologisches Risiko von Ausgangssubstanzen und Umwandlungsprodukten	Abschätzungen basierend auf Metabolisierung und Ausscheiderate	Abbaubarkeit, Verbrauchsmengen	Datenunsicherheit
Scheringer/Fenner 4.2.4	Umwandlungsprodukte von Pflanzenschutzmitteln	Abbau, Abbaupfade, Verteilungskoeffizient Kohlenstoff-Wasser, Ökotoxizität	Modellrechnung für Schadstofftransport und -abbau	Verbrauchsmengen	Datenunsicherheit, Abschätzung fehlender Daten
Modellstudie Schweiz (Kap. 3.3)	Pharmaka, Östrogene etc.	PEC/PNEC-Abschätzung	Messungen/Stoffflussbetrachtung	Abbauprozesse im Gewässer	wenig Umweltmessungen zur Validierung
NFP50 ^[23]	Hormonaktive Stoffe	Verschiedene Methoden zur Erfassung der Hormonaktivität	Messungen/Stoffmodellierung basierend auf Stoffflüssen und Fugazität		Abschätzung fehlender Daten

Ein Mengenverfolgungssystem wäre für eine Vielzahl von Stoffen hilfreich, um über eine bessere Datengrundlage für die Priorisierung von Mikroverunreinigungen in der Schweiz zu verfügen. Für einige Produktgruppen wie z. B. Pharmaka sind genaue Verkaufs- und Anwendungszahlen verfügbar. Über das Produktregister der Anmeldestelle für Chemikalien werden Mengenbereiche umweltgefährlicher chemischer Industrieerzeugnisse erfasst. Für andere Produkte, wie z. B. Kosmetika und Biozide, sind jedoch die in der Schweiz in Verkehr gebrachten Mengen nicht bekannt.

Mengenverfolgungssystem
für Chemikalien

Stoffdaten zur Abbaubarkeit und Ökotoxikologie sind für viele Stoffe nicht vorhanden oder nicht zugänglich. Die diesbezügliche Datenlage für biozide Wirkstoffe sowie für viele Industriechemikalien sollte sich im Laufe der kommenden Jahre etwas verbessern, z. B. aufgrund der Anforderungen der Biozidrichtlinie und der REACH-Verordnung in der EU. Für ca. 30 000 Stoffe werden Basisdaten zu Stoffeigenschaften und Ökotoxikologie bis 2018 vorliegen. Trotz REACH werden Daten zu ca. 70 000 der insgesamt 100 000 Altstoffe weiterhin nur partiell oder nicht vorhanden sein.

Datenlage Stoffdaten

Modelle können wichtige Hinweise geben, welche Stoffe bei Messkampagnen in Gewässern am ehesten zu beurteilen wären. Dazu müssen die Stoffmodelle durch Messungen verifiziert, validiert und weiterentwickelt werden, so dass sie eine Vielzahl von Stoffen und Anwendungen abdecken können.

Nutzen der Modelle

4.2.2 Biozide als Mikroverunreinigungen in Abwasser und Gewässern

Projektleitung: Leo Morf (GEO Partner AG), Daniel Bürgi (FRIEDLIPARTNER AG)

Übersicht

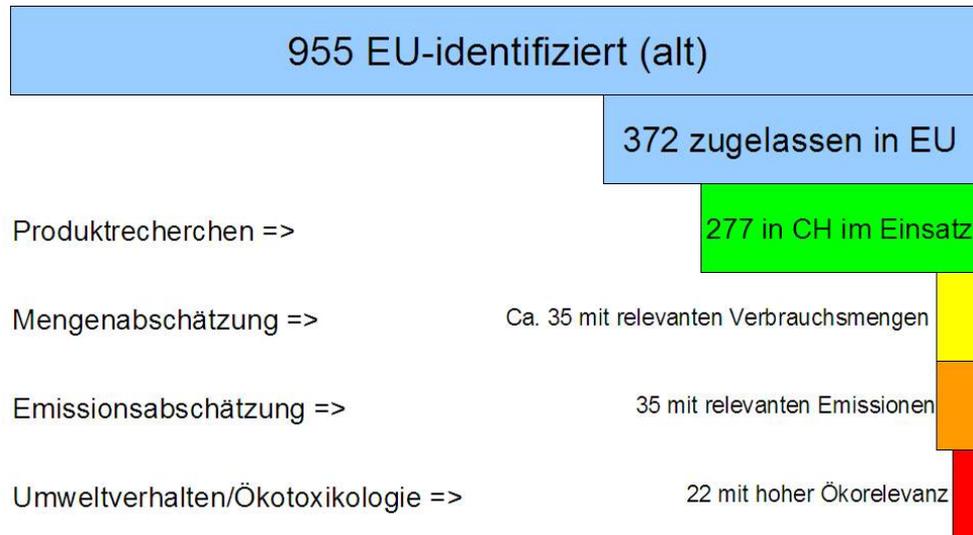
Das Projekt gliederte sich in zwei Teilprojekte:

1. Priorisierung von Bioziden in der Schweiz^[28]
2. Exemplarische Stoffflussanalyse für ausgewählte Biozide (quartäre Ammoniumverbindungen, QAV)^[50].

Die Datenrecherchen zu den verwendeten Stoffen und deren Verbrauchsmengen ergaben, dass in der Schweiz 277 biozide Wirkstoffe in Verwendung sind (Abb. 8) und insgesamt rund 7400 Tonnen dieser Wirkstoffe pro Jahr in der Schweiz verbraucht werden. Dabei sind ca. 10% der verschiedenen Wirkstoffe für über 95% der Verbrauchsmenge verantwortlich. Mehr als zwei Drittel der Verbrauchsmenge bestehen aus Alkoholen (Ethanol, Propanol) und instabilen oxidativen Bioziden (Chlor, Ozon, Peroxide). Die Verbrauchsmengen der übrigen, zum Teil nicht gut abbaubaren Biozide liegt mit ca. 2000 Tonnen pro Jahr in der gleichen Grössenordnung wie der Verbrauch an Pflanzenschutzmitteln in der Schweiz. Die abgeschätzten Mengen beinhalten eine relativ grosse Unsicherheit, weil die Datenverfügbarkeit schlecht war und daher zahlreiche Annahmen getroffen werden mussten.

Resultate Priorisierung Biozide:
hoher Verbrauch von Bioziden in
der Schweiz

Abb. 8 > Priorisierung von Bioziden in der Schweiz



(modifiziert nach [28])

Für die Priorisierung der 277 Wirkstoffe in der Schweiz wurde ein dreistufiges Priorisierungsverfahren benutzt, das auf den Kriterien Emissionsmengen, Umweltverhalten und Ökotoxizität basiert (Abb. 8). Im ersten Priorisierungsschritt wurden aus der Gesamtmenge der 277 eingesetzten Wirkstoffe diejenigen 35 Wirkstoffe ausgewählt, welche gemäss den Emissionsabschätzungen der vorliegenden Studie in erheblichen Mengen (> 5 t/a) emittiert werden. Für diese 35 Substanzen wurden in einem zweiten Priorisierungsschritt das Umweltverhalten, insbesondere das Abbauverhalten, beurteilt. Gut abbaubare Substanzen (z. B. Ethanol) wurden nicht näher betrachtet. Aufgrund der Emissionsmengen und des Abbauverhaltens wurden 22 potentiell umweltgefährdende Wirkstoffe zur näheren Betrachtung ausgewählt (Borsäure, Glutaraldehyd, Quartäre Ammoniumverbindungen (QAV), Guanidin-Derivate (PHMB), Isothiazolinone (OIT, BIT), Dichlofluamid, Alkylamine, IPBC, Formaldehyd, Propiconazol, Terbutryn, Carbendazim, Irgarol, Diuron, Bronopol, Zink-Pyrithion, Permethrin, Kupferoxid, Imidazolidine (DMDM), OPBA und DEET). Für die 22 ausgewählten Substanzen wurden chemisch-physikalische und ökotoxikologische Daten ermittelt. Aufgrund der abgeschätzten Umweltgefährdung und zusätzlicher Kriterien (Metaboliten, Expositionsmessungen, Datenlage, Einsatz in anderen Anwendungen ausserhalb des Biozidbereichs, etc.) wurden schliesslich im dritten Priorisierungsschritt drei Prioritätsgruppen gebildet.

22 Wirkstoffe umweltrelevant

Das in dieser Studie verwendete Priorisierungssystem kann auf weitere Stoffgruppen angewendet werden, falls konsistente Daten zu Verbrauchsmengen und Stoffeigenschaften verfügbar sind. Insbesondere Verbrauchsdaten sind oft mit grosser Unsicherheit behaftet und bedingen einen relativ grossen Recheraufwand. Zur Bewertung der Genauigkeit der vorgenommenen Abschätzungen und somit der Bedeutung der Biozide als Mikroverunreinigungen fehlen Messwerte für biozide Wirkstoffe in Ge-

Schlussfolgerungen
Priorisierung Biozide

wässern. Der vorliegende Bericht gibt aber gute Anhaltspunkte, nach welchen bioziden Wirkstoffen bei einer Messkampagne vornehmlich zu suchen wäre.

Im Teilprojekt *Priorisierung* wurden unter anderem die QAV als sehr umweltrelevant erkannt. Für fünf ausgewählte relevante Biozide dieser Gruppe wurde daher eine detaillierte Stoffflussanalyse durchgeführt (vier Benzalkoniumchloride und Didecyl-dimethylammoniumchlorid (DDAC-10)). Es konnte abgeschätzt werden, dass der Verbrauch dieser fünf Wirkstoffe in der Schweiz in bioziden Anwendungen zusammen ca. 120 t/a beträgt, wobei die Oberflächendesinfektionsmittel alleine knapp die Hälfte davon ausmachen. Zwei Drittel der gesamten Verbrauchsmenge der fünf QAV sind vermutlich nicht-bioziden Anwendungen zuzuordnen. Das heisst, ein grosser Teil der eingesetzten Gesamtmenge wird z.B. als oberflächenaktive Stoffe oder in Reinigungsmitteln verwendet und ist nicht über die Biozidprodukteverordnung geregelt. Die detaillierte Stoffflussanalyse zeigte, dass grosse Mengen dieser Stoffe längere Zeit im Gebrauch verbleiben, wie beispielsweise in Holzelementen, bei denen QAV als Holzschutzmittel verwendet werden. Ein grosser Teil der verbrauchten Menge gelangt ins Abwassersystem. Da QAV in der ARA aber gut abgebaut werden, machen die via Abwasserpfad in die Gewässer eingetragenen Mengen nur rund 10% der Gesamtemissionen in die Umwelt aus. 90% der Emissionen werden beispielsweise über Regenentlastungen, Lecks in der Kanalisation oder Gülle in die Gewässer bzw. in den Boden eingetragen. Insgesamt gelangen etwa 9% der in bioziden Anwendungen eingesetzten Menge in die Umwelt. Zusätzliche Modellrechnungen zeigten, dass mitunter höhere Konzentrationen der Benzalkoniumchloride Wasserorganismen gefährden können (PEC > PNEC). Für DDAC-10 ist dies weniger wahrscheinlich.

Die Unsicherheiten bei den Verbrauchszahlen und den Emissionen sind gross. Wichtige Gründe dafür sind fehlende Informationen zu Verbrauchsmengen in einzelnen Anwendungsbereichen und das Fehlen systematischer Messkampagnen in der Schweiz (z. B. Spitalabwasser). Die bei der Priorisierung der Biozide geschätzten Verbrauchsmengen konnten mit der detaillierten Überprüfung bestätigt werden. Die Erhebung von Verbrauchszahlen und Stoffdaten hat sich als sehr aufwändig herausgestellt. Die Einrichtung eines zentralen Chemikalienregisters würde die Übersicht über eingesetzte und in Gewässer emittierte Stoffe stark erleichtern. Da nur ein kleiner Teil der Gesamtemissionen der QAV über ARAs in die Gewässer eingetragen wird, dürften sich Massnahmen zur Verbesserung der Effizienz von ARAs (End-of-Pipe-Lösungen) nur geringfügig auf die Gewässerbelastung auswirken. Ausnahmen sind Gewässer, bei denen eingeleitetes gereinigtes Abwasser einen Grossteil der Wassermenge ausmacht.

Die Datenunsicherheit begrenzt die Aussagekraft von Stoffflussanalysen, wie sie hier exemplarisch durchgeführt wurden. Die abgeschätzte Grössenordnung, z. B. des Gewässereintrags, ist jedoch als realistisch einzuschätzen. Dank des Biozidwirkstoffprogramms in der EU^[51] werden in Zukunft mehr Daten zur Gefährdung von Wasserorganismen und Daten über das Verhalten in Abwasser und Umwelt zur Verfügung stehen. Falls genauere Daten zu den Verbrauchsmengen eingeholt werden sollen, müssten die Hersteller verpflichtet werden, beim Stellen des Zulassungsantrags genaue Daten zu Menge und Art der Anwendung anzugeben. Entsprechende Rechtsgrundlagen müssten geprüft werden. Um die Bedeutung der Biozide für den Gewässerschutz

Resultate Stoffflussanalyse:
quartäre Ammoniumverbindungen

Schlussfolgerungen
Stoffflussanalyse

Bewertung und Diskussion:
Datenlücken; Messkampagnen

besser abschätzen zu können, sind spezifische Messungen in Oberflächengewässern notwendig. Dazu müssen insbesondere Messkampagnen an Gewässerabschnitten, wo eine Belastung zu erwarten ist, durchgeführt werden. Für die betrachteten QAV sind dies beispielsweise Gewässer, in welche gereinigte Abwässer von Spitälern und der lebensmittelverarbeitenden Industrie eingeleitet werden. Solche Messungen können auch zur Verifizierung und Verfeinerung von Stoffflussmodellen herangezogen werden.

4.2.3 Verringerung der Schadstoffbelastung durch Pharmaka mittels Urinseparierung und ökotoxikologische Relevanz

Projektleitung: Judit Lienert, Beate I. Escher (Eawag)

In diesem Projekt^[52] wurde eine Screening-Methode zur Abschätzung des ökotoxikologischen Risikos von Pharmaka entwickelt und der Beitrag der Urinseparierung (NoMix-Technologie) zur Reduktion von Pharmaka in Gewässern abgeschätzt. Dabei wurden die Verbrauchsmengen der Pharmazeutika sowie die Umwandlung und die Ausscheidung der Wirkstoffe im menschlichen Körper berücksichtigt. Die Methode kann aufgrund der bereits vorliegenden Kenntnisse einfach angewendet werden.

Methodik:

Screening von Pharmaka

Das Risikopotenzial der Ausscheidungsprodukte (Wirkstoffe und Umwandlungsprodukte = Metaboliten) für Wasserorganismen war bei der Mehrheit der 42 betrachteten Wirkstoffe geringer als das der Wirkstoffe selbst^[31]. Nur für wenige Wirkstoffe ist basierend auf den verfügbaren Daten eine spezifische Wirkung auf Wasserflöhe, Algen oder Fische zu erwarten.

Resultate: ökotoxikologisches Risiko für Umwandlungsprodukte

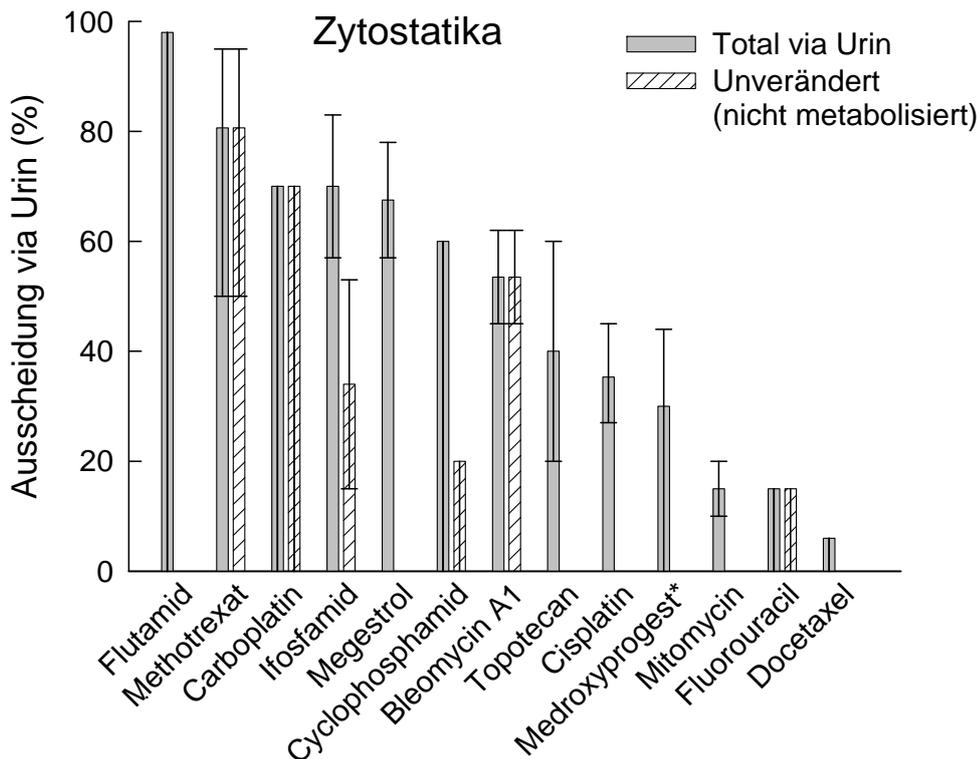
Die Ausscheidungsrate über den Urin für 212 Wirkstoffe betrug im Mittel 64 % ($\pm 27\%$)^[53]. Der Anteil ist jedoch sehr variabel, auch innerhalb der Wirkstoff-Klassen (Abb. 9). Beispielsweise werden Röntgenkontrastmittel zu 90–100 % über den Urin ausgeschieden und Zytostatika (Krebsmittel) zu 6–98 % (Abb. 9). Aufgrund von Daten zu 30 Wirkstoffen wurde zusätzlich abgeschätzt, dass das ökotoxikologische Risikopotenzial von Pharmaka in Urin und Fäkalien etwa gleich hoch ist^[31].

Ausscheidung von Pharmaka und Beitrag der Urinseparierung

Abb. 9 > Ausscheidungsgrad von Krebsmitteln (Zytostatika) via Urin

Gesamtanteil, der mit dem Urin ausgeschieden wird (Total via Urin), und Anteil der Ausgangssubstanz (Unverändert).

Die Balken zeigen den Durchschnitt der Ausscheidung via Urin eines Wirkstoffes, die Fehlerbalken die Minimal- und Maximalwerte einzelner Produkte des jeweiligen Wirkstoffs.



Das Beispiel der Beta-Blocker (Blutdrucksenker) zeigte, dass unbeabsichtigte, spezifische Wirkungen von Pharmaka auf Wasserorganismen nicht auszuschließen sind^[54]. Labortests ergaben, dass Beta-Blocker die Photosynthese von Algen hemmen können. Die Metabolisierung kann aber auch eine Entgiftung von Beta-Blockern bewirken. Z. B. führt die Metabolisierung des Beta-Blockers Propranolol im menschlichen Körper zu einer starken Abnahme der Ökotoxizität gegenüber Algen, wie eine Modellierung auf der Basis der chemischen Struktur der Umwandlungsprodukte zeigte. Im Falle der Beta-Blocker Atenolol und Metoprolol zeigten die Umwandlungsprodukte hingegen eine ähnlich hohe Algentoxizität wie die Ausgangssubstanzen.

Beispiel: Beta-Blocker

Die Abtrennung und separate Behandlung des Urins mit Hilfe spezieller NoMix Toiletten (Urinseparierung) ist eine Massnahme zur dezentralen Abwasserbehandlung^[55]. Das übrige Abwasser enthält somit nur noch Fäkalien, Regen- und Grauwasser und wird in der ARA gereinigt. Da etwa 60–70 % der Pharmaka über den Urin ausgeschieden wird, kann mit der Urinseparierung die Belastung von Abwasser mit Pharmaka signifikant vermindert werden. Dabei würde etwa die Hälfte des ökotoxikologischen Risikos von Pharmaka nicht mehr in die ARAs gelangen^[31]. Es ist zu erwarten, dass an

Schlussfolgerungen:
Effizienz dezentraler Abwasserbehandlung für Pharmaka

Fäkalien adsorbierte Pharmaka in der ARAs eher mit dem Klärschlamm entfernt werden – eine Hypothese, die zu überprüfen ist.

Die Resultate zeigen, dass ökotoxikologische Wirkungen von Pharmaka weitgehend unbekannt und insbesondere spezifische Wirkungen ohne ökotoxikologische Tests kaum vorhersagbar sind. Aufgrund der veränderten ökotoxikologischen Wirkung der Umwandlungsprodukte sollten deshalb bei Risikoabschätzungen für Pharmaka (z. B. im Rahmen von Zulassungsverfahren) nicht nur die Ausgangssubstanzen, sondern auch die Umwandlungsprodukte beurteilt werden (siehe auch Kapitel 4.2.4).

Der vorgestellte Ansatz erlaubt mit gewissen Einschränkungen eine Priorisierung der Wirkstoffe relativ zueinander. Ausserdem wird für jeden Wirkstoff ein Risikoquotient gebildet, der eine Abschätzung des tatsächlichen Risikopotenzials auf Wasserorganismen ermöglicht. Zusätzlich zum betrachteten ökotoxikologischen Risiko sollten die Abbaubarkeit in der ARA und Umwelt, Mischungseffekte von verschiedenen Wirkstoffen sowie mögliche chronische Effekte mitbetrachtet werden. Damit liesse sich die Bedeutung von Pharmawirkstoffen und ihren Abbauprodukten als Mikroverunreinigungen besser beurteilen und eine genauere Priorisierung vornehmen.

Die Reduktion des Eintrags von Pharmaka in die Gewässer über Urinseparierung ist nur beschränkt wirksam. Nicht zurückgehalten werden hierbei mit dem Abwasser entsorgte Medikamente, deren Anteil gemäss einer deutschen Umfrage signifikant sein kann^[56]. In der Schweiz hingegen scheint der Anteil der via Abwasser entsorgten Medikamente wesentlich tiefer oder sogar vernachlässigbar zu sein. Gemäss einer Umfrage bei 500 Personen in einer öffentlichen Bibliothek entsorgen nur 1% der Befragten regelmässig Medikamente im WC, während 13% diese in den Kehricht geben und 76% sie zurück zur Verkaufsstelle bringen^[31]. Zusätzlich ist der mit dem Urin ausgeschiedene Anteil für verschiedene Pharmaka sehr unterschiedlich, was sich auf die Effektivität der Urinseparierung auswirkt. Eine gezielte Anwendung für gewisse Wirkstoffe (z. B. Röntgenkontrastmittel) oder bei Punktquellen (z. B. Spitäler) sollte geprüft werden. Nicht zu vergessen sind die vielen Mikroverunreinigungen, die nicht übers WC ins Abwasser gelangen.

Ein weiterer Ansatz ist die Anpassung der Rechtsgrundlagen für die Zulassungsverfahren mit dem Ziel, Umwandlungsprodukte in der vorgeschriebenen Risikoabschätzung ebenfalls mit einzubeziehen. In den Leitlinien der European Medicines Agency (EMA)^[57] sind heute in einer ersten Phase der Risikoabschätzung nur die Ausgangssubstanzen zu prüfen. Wenn in der ersten Phase kein Risiko erkannt wird (PEC < 0,01 µg/l), muss die zweite Phase, in der die wichtigsten Umwandlungsprodukte zu beurteilen wären, meist nicht mehr durchgeführt werden.

Pharma- und Veterinärwirkstoffe beeinflussen gezielt bestimmte biologische Abläufe in Menschen oder Nutztieren. Es ist entscheidend, wie stark dieselben Wirkungen auch bei Wasserorganismen auftreten^[58]. Beispielsweise führen hormonaktive Stoffe bei Mensch und verschiedenen Tierarten zu gleichartigen Wirkungen. Natürliche und synthetische Östrogene (hormonaktive Substanzen) wirken beispielsweise auch auf Fische. Eine diesbezügliche systematische Untersuchung verschiedener Pharmawirk-

Umwandlungsprodukte beachten

Bewertung und Diskussion:
Priorisierung von Pharmaka

Effizienz der Urinseparierung

Risikoabschätzung von Pharmaka

Wirkungen von Pharmaka
auf Nicht-Zielarten

stoffe würde die Identifikation von Problemstoffen erleichtern^[58]. Trotzdem können zufällige spezifische Wirkungen, welche nur «zufällig» entdeckt werden, nicht ausgeschlossen werden (z. B. die Wirkung von Beta-Blockern auf Algen^[54]).

Die Relevanz von Umwandlungsprodukten für den Gewässerschutz wird anhand von Pflanzenschutzmitteln in Kapitel 4.2.4 diskutiert.

4.2.4 Priorisierung von Umwandlungsprodukten von Mikroverunreinigungen

Projektleitung: Martin Scheringer (ETH Zürich); Kathrin Fenner (ETH Zürich/Eawag)

Mikroverunreinigungen können im Gewässer durch biologische und chemische Prozesse zu Umwandlungsprodukten abgebaut werden. Um die Bedeutung von Mikroverunreinigungen in Gewässern beurteilen zu können, ist es wichtig zu wissen, ob eine Ausgangssubstanz selbst oder ihre Umwandlungsprodukte (oder Abbauprodukte) in Kontakt mit Wasserorganismen, z. B. Fischen, kommen. Für die Priorisierung von Umwandlungsprodukten müssen diejenigen der Umwandlungsprodukte identifiziert werden, die wegen ihrer schlechten Abbaubarkeit, ihrer Ökotoxizität und/oder ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften in Gewässern bedeutsam sein könnten. In diesem Projekt wurden zwei Modelle entwickelt, mit denen Bildung und Verteilung von Umwandlungsprodukten in der Umwelt abgeschätzt werden können^[59,60]. Die Modelle wurden auf 16 Wirkstoffe von Pflanzenschutzmitteln mit guter Datenlage bezüglich entstehender Umwandlungsprodukte und ihren Eigenschaften angewendet (z. B. Atrazin, Diuron, Dicamba, Bromoxynil-Oct).

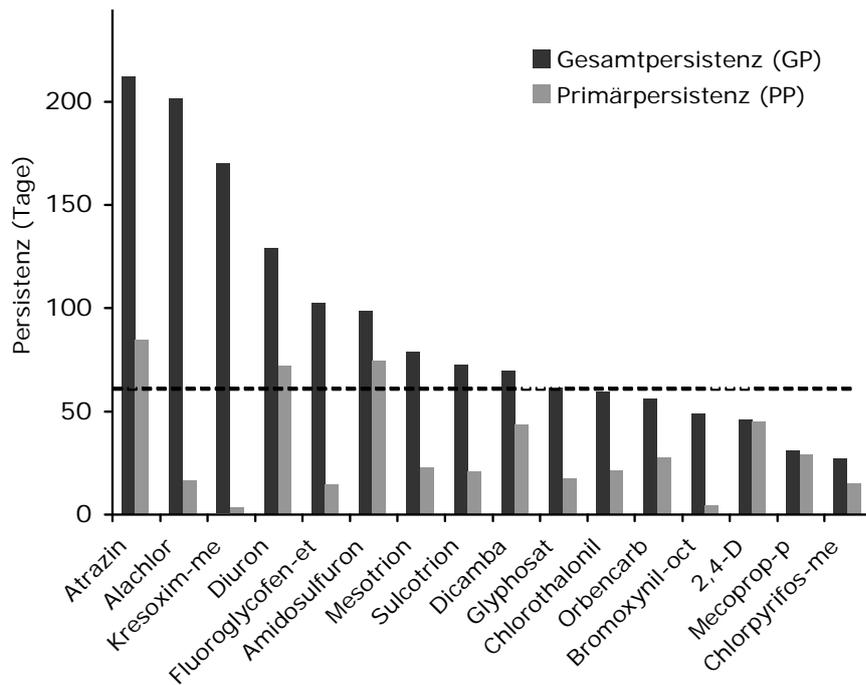
Es zeigte sich, dass Umwandlungsprodukte einen relevanten Beitrag zur Gesamtpersistenz von Pflanzenschutzmitteln leisten (Abb. 10). Die mit Hilfe des Modells berechneten relativen Konzentrationsverhältnisse von Ausgangsverbindung und Umwandlungsprodukten in Oberflächengewässern wurden durch den Vergleich mit Messdaten bestätigt. Bei 3 von 5 betrachteten Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffen besaßen die Umwandlungsprodukte im Vergleich zu den Ausgangsstoffen eine geringere spezifische Ökotoxizität. Umwandlungsprodukte von zwei der betrachteten Pflanzenschutzmittel jedoch wiesen eine erhöhte Ökotoxizität und ein erhöhtes Risiko für Wasserorganismen auf. Die gemessene Toxizität von Umwandlungsprodukten von Diuron gegenüber Wasserflöhen war beispielsweise höher als die von Diuron selbst^[59]. Weiter war das modellierte Risiko der Summe aller Umwandlungsprodukte von Dicamba höher als dasjenige von Dicamba selbst. Ausser für Dicamba und Diuron waren die Umwandlungsprodukte immer polarer und daher besser wasserlöslich als ihre Ausgangssubstanzen. Da im Normalfall mit zunehmender Polarität die unspezifische Toxizität abnimmt, kann davon ausgegangen werden, dass die Toxizität dieser Umwandlungsprodukte geringer ist als für die Ausgangssubstanzen.

Modellabschätzungen

Resultate: relevanter Beitrag von Umwandlungsprodukten zu Gesamtpersistenz und Ökotoxizität

Abb. 10 > Persistenz für 16 Pflanzenschutzmittel

PP = Persistenz oder Langlebigkeit der Ausgangssubstanz alleine,
 GP = Persistenz der Ausgangssubstanz plus Umwandlungsprodukte



Zusätzlich wurden bestehende, im Internet frei verfügbare, Modelle geprüft, mit denen einzelne Stoffeigenschaften abgeschätzt werden können (Halbwertszeiten im Boden, Verteilungskoeffizienten zwischen Wasser und organischem Kohlenstoff, Vorhersage von Abbaupfaden). Die Untersuchungen zeigten, dass wichtige Stoffeigenschaften mit Hilfe von bestehenden Modellen aus der Struktur der chemischen Stoffe prinzipiell berechnet werden können. Die so modellierten Daten können als Inputdaten für die in diesem Projekt entwickelten Modelle verwendet werden. Die Unsicherheiten der abgeschätzten Daten und der Modellierung ergeben jedoch eine erhebliche Ungenauigkeit in den modellierten Stoffkonzentrationen.

Vorhersage von
Stoffeigenschaften

Die Ergebnisse zeigen die Relevanz von Umwandlungsprodukten von Pflanzenschutzmitteln auf. Die Autoren empfehlen generell bei gesetzlich vorgeschriebenen Stoffbewertungen routinemäßig zu überprüfen, ob potentiell umweltgefährdende Umwandlungsprodukte gebildet werden. Für viele Stoffe und ihre Umwandlungsprodukte stehen allerdings nur begrenzt Stoffdaten zur Verfügung. Anhand des in dieser Studie entwickelten Modells kann für solche Stoffe eine erste grobe Abschätzung des Umweltverhaltens durchgeführt werden.

Schlussfolgerungen: <
hohe Relevanz von
Umwandlungsprodukten

Auf dem Gebiet der Identifikation und Priorisierung von Umwandlungsprodukten besteht weiterer Forschungsbedarf. Die Umwandlungsprodukte der meisten Ausgangsprodukte von Mikroverunreinigungen sind schlecht untersucht oder unbekannt (z. B. Biozide, Pharmaka). Eine Überprüfung der Modelle anhand weiterer Stoffgruppen

Bewertung und Diskussion:
Einbezug von
Umwandlungsprodukten
in gesetzliche Regelwerke

würde die Anwendbarkeit der Modelle bei der Priorisierung von Umwandlungsprodukten von Mikroverunreinigungen untermauern. Die Ergebnisse könnten anschliessend verwendet werden, um zu beurteilen, ob eine Bewertung der Ökotoxizität und Persistenz von Umwandlungsprodukten in gewisse gesetzliche Regelwerke einbezogen werden müsste. Dies ist heute schon in der Biozid- und Pflanzenschutzmittelgesetzgebung in der EU und der Schweiz der Fall. Im Gegensatz hierzu ist zurzeit jedoch die Berücksichtigung von Umwandlungsprodukten bei der Beurteilung persistenter, bioakkumulierender und toxischer Stoffe gemäss europäischer REACH-Verordnung nicht vorgesehen.

Auch im Gewässerschutz sollte die Relevanz der Umwandlungsprodukte zunehmend berücksichtigt werden. Beispielsweise sollten bei der Messung von Mikroverunreinigungen auch bekannte Umwandlungsprodukte mitbestimmt werden. Die Relevanz der Umwandlungsprodukte für die Gewässerschutzgesetzgebung sollte anhand dieser Messergebnisse evaluiert werden: Grenzwerte, wie sie beispielsweise in der Wasserrahmenrichtlinie festgelegt wurden, gelten jeweils nur für die Ausgangssubstanzen. Relevante Umwandlungsprodukte sollten in Zukunft bei der Festlegung von Grenzwerten mitberücksichtigt werden.

Relevanz
von Umwandlungsprodukten
für den Gewässerschutz

4.3 Identifikation von Mikroverunreinigungen mit biologischen Testsystemen

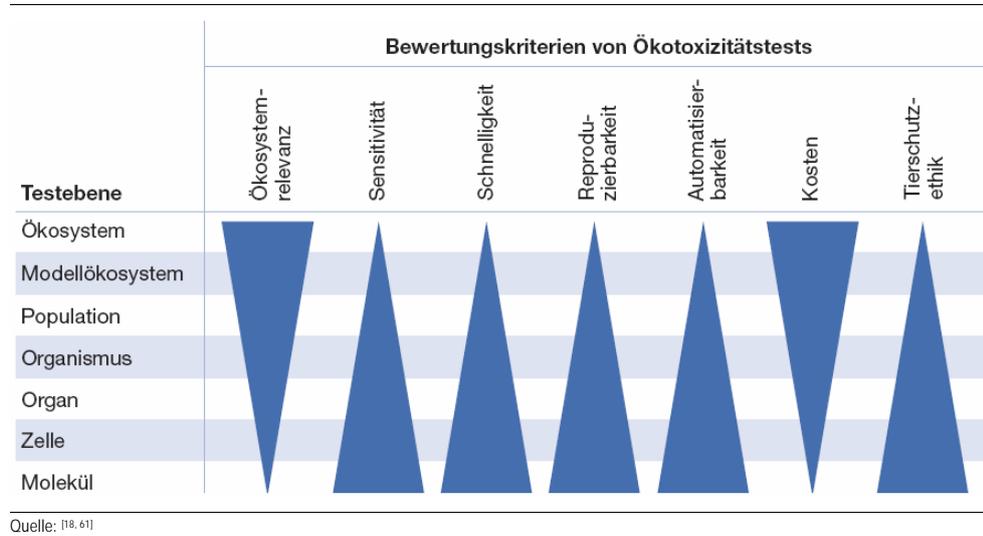
4.3.1 Einleitung

Bei Ereignissen wie z. B. beim Unfall vom 1. November 1986 in Schweizerhalle können organische Schadstoffe in hohen Konzentrationen in Gewässern auftreten, die sofort akut toxisch auf Organismen wirken. Im Gegensatz dazu kann der Einfluss von Mikroverunreinigungen auf Organismen meist erst bei längerfristiger Exposition festgestellt werden. Dabei spricht man von chronischen Wirkungen. Bei Tests auf akute Wirkung handelt es sich um Kurzzeittests mit hohen Chemikalienkonzentrationen. Diese sind relativ günstig und weniger aufwändig als Tests zur Ermittlung der chronischen Toxizität, die über längere Zeiträume und bei tieferen Konzentrationen durchgeführt werden. Für die meisten Stoffe liegen in der Regel nur Ergebnisse zur akuten Toxizität vor, da diese bei der Gefahreinstufung gemäss Chemikaliengesetzgebung herangezogen werden. Um die Wirkungen von Mikroverunreinigungen auf Wasserorganismen nachzuweisen, wurden eine Reihe verschiedener Testsysteme entwickelt. Diese untersuchen unterschiedliche toxikologische Effekte auf verschiedenen Ebenen des Ökosystems, von der Ebene des Ökosystems selbst über einzelne Populationen und Organismen bis hin zu Zellen und Molekülen (Abb. 11). Die Wirkung von Schadstoffen, die einen Organismus und letztlich ein Ökosystem beeinflussen, zeigt sich zunächst auf molekularer Ebene, z. B. als Schäden an Proteinen oder an der DNA. Werden diese Schäden nicht repariert, können sie sich auf Zellen, Organe und den Gesamtorganismus auswirken. Schliesslich können Effekte auch in Populationen und Ökosystemen nachgewiesen werden, z. B., indem Populationen kleiner werden oder Krankheiten zunehmen^[61]. In der Reihenfolge Ökosystem → Molekül

Testsysteme
für Mikroverunreinigungen

nehmen die Relevanz für das Ökosystem und die Testkosten ab, während z. B. Sensitivität, Schnelligkeit und Reproduzierbarkeit der Tests tendenziell zunehmen (Abb. 11). Kurzzeittests auf der zellulären Ebene können als Frühwarnsysteme genutzt werden, um potentielle Belastungen/Gefahren zu erkennen. Die Bedeutung dieser Effekte für ein Ökosystem sind noch nicht vorhersagbar.

Abb. 11 > Übersicht Ökotoxizitätstests



Eine Reihe von Tests wurde standardisiert (z. B. OECD, ISO, DIN) und wird eingesetzt, um die Wirkung industrieller Chemikalien auf Organismen zu testen (Ebene Organismus in Abb. 11). Die meisten Resultate stammen von Tests zur Bestimmung der akuten Toxizität, die sich jedoch aufgrund ihrer geringen Empfindlichkeit als ungeeignet erweisen, um die Toxizität von Stoffen im Spurenbereich zu testen. In Entwicklung sind noch verschiedene wirkungsspezifische Tests, welche eine höhere Empfindlichkeit aufweisen, jedoch jeweils nur eine oder eine beschränkte Anzahl von Wirkungen erfassen. Diese Testsysteme können eventuell zur Früherkennung von möglichen Wirkungen auf die Umwelt genutzt werden.

Tests können mit einzelnen Stoffen, definierten Gemischen von Stoffen und mit Wasserproben aus der Umwelt durchgeführt werden. Bei Umweltproben kann jedoch die Unterscheidung zwischen Effekten, die durch Mikroverunreinigungen hervorgerufen werden und Hintergrundeffekten, die durch die Wasserproben selbst hervorgerufen werden (z. B. pH-Wert, Salzgehalt etc.), schwierig sein. Daher wird in manchen Testsystemen eine Aufreinigung oder Aufkonzentrierung der Umweltproben vorgenommen, welche die Hintergrundeffekte minimieren sollen (z. B. [62]). Je nach verwendeter Methode kann sich die stoffliche Zusammensetzung der Probe verändern und es kann ein Teil der Mikroverunreinigungen verloren gehen.

Standardtests –
wirkungsspezifische Tests

Tests mit Chemikalien –
Wasserproben

Box 3: Eine Analogie: Was hat Krankheit mit Ökotoxikologie zu tun?

Eine Vielzahl von Krankheiten und Beschwerden der Menschen können durch verschiedene Ursachen ausgelöst werden. Was verursacht eine Allergie, Kopfweh oder Krebs? Nicht immer ist klar, was diese Krankheiten bewirkt hat. Ganz ähnlich verhält es sich in der Ökotoxikologie, wenn z.B. festgestellt wird, dass Wasserproben aus einem Fluss sich negativ auf die Entwicklung von Mückenlarven auswirken, oder wenn eine gesamte Fischpopulation in einem See Fehlentwicklungen aufweist. In diesen Beispielen müssen nicht unbedingt Mikroverunreinigungen die Ursache für die Effekte sein. Aber wenn Mikroverunreinigungen verantwortlich sind, kommen eine grosse Anzahl verschiedener Stoffe in Frage, welche oft in geringen Konzentrationen vorkommen und auch im Gemisch nicht vorhersagbare Effekte auf Organismen haben können.

Mittlerweile stehen einige wirkungsspezifische Methoden und Tests zur Erfassung der Ökotoxizität von Mikroverunreinigungen in Gewässern zur Verfügung. Beispielsweise sind dies der YES-Test (Abb. 12) und die Vitellogenin-Induktion für hormonaktive Stoffe, die Photosynthese-Inhibition für Photosynthese-Hemmer, der Acetylcholinesterase-Test für organische Phosphorsäureester etc. Eine umfassende ökotoxikologische Bewertung der Gewässer ist jedoch derzeit noch nicht möglich. Beispielsweise sind aufgrund der Vielzahl von Stoffen Mischungseffekte kaum identifizier- und beurteilbar. Die Effekte von Mischungen können sich entweder gegenseitig aufheben (antagonistische Effekte), sich gegenseitig verstärken (synergistische Effekte), oder sich addieren (additive Effekte)^[63]. Stoffe mit dem gleichen Wirkmechanismus wirken in der Regel additiv.

Ein antagonistischer Effekt auf die Photosynthese und Vermehrung von Mikroalgen wurde beispielsweise für eine Antifouling-Mischung, bestehend aus einer Tributylzinnverbindung, Irgarol und einem Isothiazolinon, beobachtet^[64]. Ein synergistischer Effekt konnte für die akute Toxizität eines Gemisches von Pflanzenschutzmitteln auf Wasserflöhe nachgewiesen werden^[65]. Additive Effekte treten beispielsweise bei den hormonaktiven Stoffen auf (siehe Box 1).

Umfassende ökotoxikologische Bewertung von Gewässern noch nicht möglich; Mischungseffekte

Abb. 12 > YES-Test zeigt Hormonaktivität

YES-Test durchgeführt in Mikrotiterplatten. Die Proben werden in verschiedenen Verdünnungen getestet (von links nach rechts höhere Verdünnung). Bei hoher östrogenen Aktivität verfärbt sich die Probe rot.

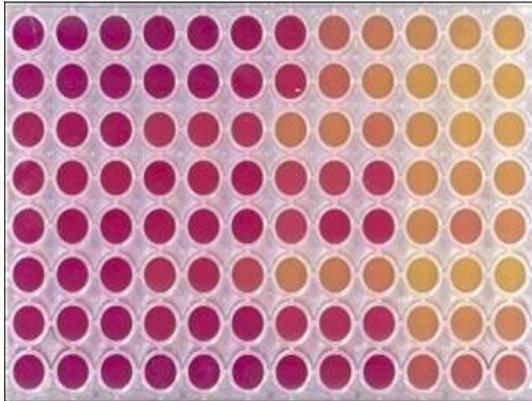


Foto: Etienne Vermeirssen, Eawag

4.3.2 Methodenentwicklung zum Effektmonitoring in aquatischen Ökosystemen

Projektleitung: Katja Knauer, Patricia Holm (Uni Basel)

Die Schweizer Gewässer sind mit einer Vielzahl von Mikroverunreinigungen belastet. In diesem Projekt wurde untersucht, ob sich Wirkungen von Mikroverunreinigungen in Gewässern mit Hilfe des Parameters «oxidativer Stress» erfassen lassen. Aufgrund der Einwirkung von Stoffen können reaktive Sauerstoffspezies gebildet werden, welche in Zellen zur Schädigung von DNA, Proteinen und Lipiden führen können. Der oxidative Stress wurde erfasst zum einen als Konzentration reaktiver Sauerstoffspezies (ROS)^[66] und zum anderen als Aktivität des Enzyms Superoxiddismutase (SOD)^[67], welches zum Schutz der Zellen den Abbau der ROS katalysiert.

Methodik

Laborversuche zeigten, dass sich oxidativer Stress in Fischzelllinien der Regenbogenforelle und in Algen nachweisen lässt. Signifikante Effekte traten jedoch erst bei Konzentrationen im µg/l bis mg/l-Bereich auf, wenn Zellen mit Substanzen wie Kupfer, dem bioziden Wirkstoff Triclosan, den Pflanzenschutzmitteln Atrazin, Diuron und Isoproturon oder dem Schmerzmittel Diclofenac belastet wurden. Die Sensitivität des Indikators «oxidativer Stress» liegt somit bezüglich der Wirkung von einzelnen Mikroverunreinigungen nur in Einzelfällen im Bereich von den in Fließgewässern gemessenen Konzentrationen (z. B. Kupfer). Wasserproben aus einem mit Herbiziden belasteten Bach, dem Seebach im Kanton Bern, wurden im Labor auf eine potentielle Stresswirkung auf die Zellen untersucht. Dabei wurden erhöhte ROS Konzentrationen in den Fisch- aber nicht in den Algenzellen gemessen. Eine Korrelation zu den gemessenen chemischen Daten war jedoch nicht möglich.

Resultate: Effekte erst bei hohen Konzentrationen von Chemikalien

Für eine längerfristige Exposition der Zellen im Freiland wurden spezielle Kammern entwickelt, so dass weitere Untersuchungen im Gewässer selbst durchgeführt werden

konnten. Vorerst wurden Messungen in unbelasteten Gewässern vorgenommen, da es für den Einsatz des Parameters «oxidativer Stress» in einem Umweltmonitoring grundsätzlich notwendig ist, den Einfluss von Umweltfaktoren wie z. B. Licht und Temperatur zu kennen.

Die Methode der ROS Messung kann als eine «easy-to-use» Methode bezeichnet werden. Es handelt sich um einen unspezifischen Stressindikator, der jedoch nur begrenzt geeignet erscheint, um Mikroverunreinigungen anzuzeigen. Obwohl in Organismen im Freiland oxidativer Stress beobachtet werden konnte, erlaubt dies jedoch keine direkten Rückschlüsse auf das Vorhandensein von Mikroverunreinigungen, da oxidativer Stress als unspezifischer Biomarker komplexen Regelmechanismen unterliegt. Eine entsprechende Korrelation erfordert daher zusätzlich analytisch-chemische Daten.

Weiterhin sind unspezifische Reaktionen des Systems oft erst bei höheren Konzentrationen von Chemikalien nachweisbar, wie diese Studie am Beispiel des oxidativen Stresses zeigte. Somit werden Wirkungsmechanismen-spezifische Tests benötigt, mit denen die Gewässerqualität integral für eine relevante Stoffgruppe mit entsprechendem Wirkmechanismus beurteilt werden kann. Weit fortgeschritten ist beispielsweise die Bestimmung der östrogenen Aktivität in Gewässern mittels YES-Test, Vitellogenin-Induktion etc. Dabei zeigt sich, dass Tests an Organismen in der Regel weniger empfindlich sind als spezifische Untersuchungen beispielsweise auf molekularer Ebene.

Im Rahmen einer Bewertung des Umweltrisikos durch Mikroverunreinigungen könnte der Parameter «oxidativer Stress» durch eine Reihe von spezifischen Parametern ergänzt werden (Multiparameter Ansatz), die möglicherweise eine Charakterisierung der Mikroverunreinigungen möglich machen.

Schlussfolgerungen:
Aussagekraft für Anwendung
in Gewässern unklar

Bewertung und Diskussion:
Qualitätsziele und empfindlichere
Methoden benötigt

4.3.3 Umwelttoxikologische Untersuchungen zur Erkennung des Gefahrenpotentials von pharmazeutischen Mikroverunreinigungen im Wasser

Projektleitung: Daniel Dietrich (Uni Konstanz)

In diesem Projekt wurde das Gefährdungspotential von Diclofenac (Entzündungshemmer; beobachtete Umweltkonzentrationen im Bereich von ng/l bis 1 µg/l) für Fische abgeklärt. Dazu wurden Zebrafische aller Entwicklungsstufen gegenüber Diclofenac exponiert und die jeweiligen Effekte bezüglich z. B. Vermehrung und Embryonalentwicklung, Lebensfähigkeit oder Verhalten der Tiere, untersucht. Zusätzlich wurden die Organe begutachtet sowie mögliche Veränderungen der Menge bestimmter Enzyme und Botenstoffe, die von Diclofenac beeinflusst werden, analysiert. Zuletzt wurde die Aktivierung/Deaktivierung bestimmter Zielgene in Abhängigkeit einer Diclofenac Exposition untersucht, diese Analysen dauern jedoch zurzeit noch an.

Methodik

Die durchgeführten Versuche zeigten, dass Diclofenac gegenüber Zebrafischen im Bereich umweltrelevanter Konzentrationen nicht akut toxisch war. Bei ausgewachsenen Zebrafischen wurden bei bis zu 5 mg/l Diclofenac keine Erhöhung der Mortalität, Veränderungen des Verhaltens oder der Organe festgestellt; die Reproduktion (Anzahl und Befruchtungsrate von Eiern) der Tiere war bei 100 µg/l Diclofenac nicht beeinflusst. Effekte auf die Entwicklung von Zebrafischembryonen traten erst bei Konzentrationen auf, die dem 400- bis 1000-fachen der höchsten bisher gemessenen Umweltkonzentration entsprechen. Quantitative Veränderungen der von Diclofenac beeinflussten Enzyme oder Botenstoffe wurden nicht beobachtet. Zusätzlich durchgeführte Tests mit Fischzellen zeigten ebenfalls keine Toxizität von Diclofenac in umweltrelevanten Konzentrationen. Dies bedeutet aber nicht, dass die untersuchten Pharmaka nicht trotzdem ein Problem in Gewässern darstellen könnten. Neueste Ergebnisse weisen auf Effekte von Diclofenac auf die Genexpression bei Zebrafischen hin; die Abklärung der umwelttoxikologischen Relevanz dieses Befunds ist Gegenstand der aktuellen Forschung. Darüber hinaus müssen bei einer Risikoabschätzung chronische (Langzeit-) Effekte, im speziellen Effekte über mehrere Generationen, sowie die Auswirkungen von Stoffgemischen berücksichtigt werden.

Auch wenn Diclofenac bei den gegenwärtigen Umweltkonzentrationen keine Gefahr für Fische darzustellen scheint, besteht weiterhin Forschungsbedarf, um geeignete Methoden zur Beurteilung des Zustandes von Gewässern bezüglich (auch anderer) Mikroverunreinigungen zu entwickeln. Um ein flächendeckendes Monitoring zu ermöglichen, müssen die entwickelten Methoden standardisiert werden und einfach durchführbar sein. Die bisher entwickelten Methoden sind keine Standardmethoden, in ihrer Durchführung aufwendig oder sehr teuer. Eine entsprechende Vereinfachung und Standardisierung von Erfolg versprechenden Methoden sollte angestrebt werden. Aus Sicht des Tierschutzes wären dabei Methoden, bei denen mit Zellkulturen gearbeitet wird, Testmethoden mit höheren Organismen vorzuziehen, allerdings ist die biologische Aussagekraft (Reproduktionserfolg, allgemeine Fitness der Tiere, etc.) bzw. ökologische Relevanz (Erhalt gesunder Fischpopulationen) solcher zellulären Systeme limitiert.

Resultate und
Schlussfolgerungen:
keine akute Toxizität der
untersuchten Pharmaka,
Hinweise auf subzelluläre Effekte

Bewertung und Diskussion:
Bedarf an Standardmethoden

4.4 Heutige Siedlungsentwässerung

4.4.1 Einleitung

Um technische und organisatorische Massnahmen bei der Siedlungsentwässerung bezüglich Mikroverunreinigungen sowie deren Kosten definieren zu können, ist es wichtig, den Ist-Zustand des schweizerischen Systems zur Abwasserentsorgung zu kennen. Ein Ansatz zur Erhebung von Daten sowie eine erste Datensammlung wurden durch das nachfolgend beschriebene Projekt erarbeitet.

4.4.2 Zustand, Kosten und Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung

Projektleitung: Max Maurer, Anja Herlyn (Eawag)

Im Projekt wurden konzeptionelle Grundlagen erarbeitet, um die Kosten, den Zustand und den Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung systematisch analysieren zu können^[68]. Hierzu wurde ein Erfassungskonzept erarbeitet und anschliessend eine grosse Anzahl von Daten über das schweizerische Abwasserentsorgungssystem erfasst und ausgewertet (z. B. Abb. 13).

Der gesamte Wiederbeschaffungswert der schweizerischen Abwasserentsorgung wird auf rund 100 Mrd. CHF geschätzt^[30]. Die ARAs tragen dazu mit einem Wiederbeschaffungswert von 10 Mrd. CHF und die Kanalisation mit 54 Mrd. CHF bei. Die restlichen Werte befinden sich in privater Hand (Liegenschaftsentwässerung und Hausinstallationen). Die jährlichen Kosten (Betriebskosten, Abschreibung, Verzinsung) von 1,7 Mrd. CHF teilen sich etwa hälftig auf die Kanalisation und ARAs auf. Die spezifischen Betriebskosten der Abwasserentsorgung sind stark abhängig von der Grösse der ARA und des Einzugsgebietes. Bezogen auf Einwohner und Jahr ist der Betrieb grosser ARAs deutlich günstiger, während kleine Einzugsgebiete günstigere Betriebskosten für die Kanalisation aufweisen.

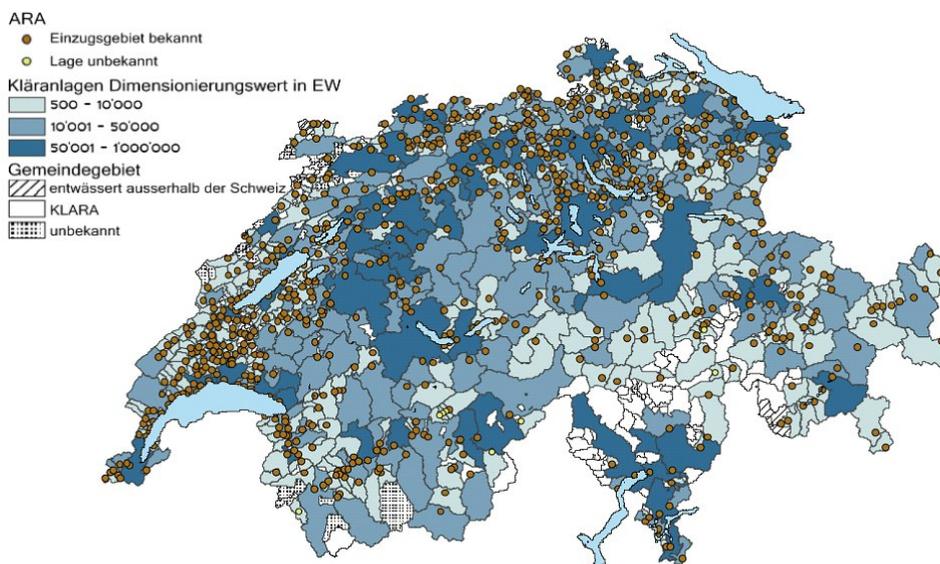
Insgesamt sind 2530 Gemeinden an 759 ARAs mit mehr als 500 Einwohnerwerten angeschlossen (siehe Abb. 13). Dabei reinigen 81 grosse ARAs mit mehr als 50'000 Einwohnerwerten 62 % des Abwassers. Die Gesamtlänge der öffentlichen Kanalisation beträgt rund 47'000 km, zusätzlich zu den geschätzten 42'000 km Leitungen der Liegenschaftsentwässerung.

Methodik

Resultate: Kosten und Wiederbeschaffungswert der Schweizer Abwasserentsorgung

Abb. 13 >ARAs-Einzugsgebiete der Schweiz

Die Farbtönungen codieren die Grösse der ARAs: Je dunkler, desto grösser.
EW = Einwohner, KLARAs = Kleinabwasserreinigungsanlagen



Die Schweiz verfügt über eine gut ausgebaute und leistungsfähige Abwasserentsorgung. Insbesondere für die Kanalisation wird aufgrund der Altersstruktur in den nächsten Jahrzehnten ein erhöhter Erneuerungsbedarf verbunden mit hohen Kosten erwartet. Der Sanierungsbedarf bei den ARAs konnte aufgrund fehlender Daten bezüglich ihres Zustandes nicht abgeschätzt werden. Während sich in den städtischen Gebieten eine ältere Infrastruktur findet, sind auf dem Land die Bauten zumeist deutlich jünger. Dies führte zu bisher relativ geringem Unterhalts- und Sanierungsbedarf in ländlichen Gebieten, was sich in Zukunft ändern wird. In rund 25 % der Abwasseranlagen stehen in den nächsten Jahren Sanierungen an. Dies macht deutlich, dass die Abwasserentsorgung sich derzeit von einer Aufbauphase in eine Unterhaltsphase wandelt. Zu den damit verbundenen Herausforderungen zählen der professionelle Unterhalt der Infrastruktur, die Senkung von Kosten, die Erarbeitung neuer Techniken und Konzepte und die Optimierung von Betrieb und Unterhalt. Hierzu sind gute Fachkräfte, ein professionelles Management und eine verantwortungsbewusste Verwaltung erforderlich.

Ein professionelles Management der Siedlungsentwässerung ist zentral, damit die Qualität der Gewässer mit optimalem Mitteleinsatz effizient auf hohem Niveau gehalten und verbessert werden kann. Die in diesem Projekt ermittelten Daten bieten eine gute Grundlage, Handlungsansätze und Strategien bezüglich Siedlungswasserwirtschaft und Mikroverunreinigungen in der Schweiz zu entwickeln. Für gewisse Fragestellungen wäre eine Vervollständigung des erhobenen Inventars eventuell erforderlich. Der aktuelle, erhöhte Erneuerungsbedarf für die Siedlungsentwässerung in der Schweiz bietet eine gute Gelegenheit, die bestehende Infrastruktur auf die langfristigen Bedürfnisse hin weiter zu entwickeln und zu erneuern. Dazu gehört auch der Einbezug von neuen Technologien und alternativen Systemen. Die Resultate machen aber auch die starke organisatorische Fragmentierung der schweizerischen Siedlungswasserwirtschaft deutlich. Im Hinblick auf den hohen Sanierungsbedarf ist eine Förderung von integrierten Entscheidungsstrukturen auf Einzugsgebietsebene wichtig für eine nachhaltige Entwicklung der schweizerischen Abwasserentsorgung.

Schlussfolgerungen: zukünftig erhöhter Erneuerungsbedarf

Bewertung und Diskussion: professionelles Management; Erneuerungsbedarf als Chance für Umstrukturierung

4.5 Technischer Wandel in der Siedlungsentwässerung

4.5.1 Einleitung

Für einen technischen Wandel in der Siedlungsentwässerung sind zwei sich ergänzende Ansätze denkbar:

1. Massnahmen bei wichtigen Emittenten (z. B. Spitälern);
2. vollständig dezentrales System der Siedlungsentwässerung, bei dem jedes Haus eine eigene «ARA» mit separater Fassung und Reinigung von Urin, Fäkalien und Grauwasser hat.

Im Rahmen dieser Ausschreibung beschäftigten sich die unten beschriebenen Projekte mit diesen zwei Ansätzen der Umsetzung technischer Massnahmen in der Siedlungsentwässerung.

4.5.2 Umsetzung eines nachhaltigen Siedlungsentwässerungskonzeptes am Beispiel der Stadt Winterthur

Projektleitung: Ruedi Moser (Gebr. Hunziker AG)

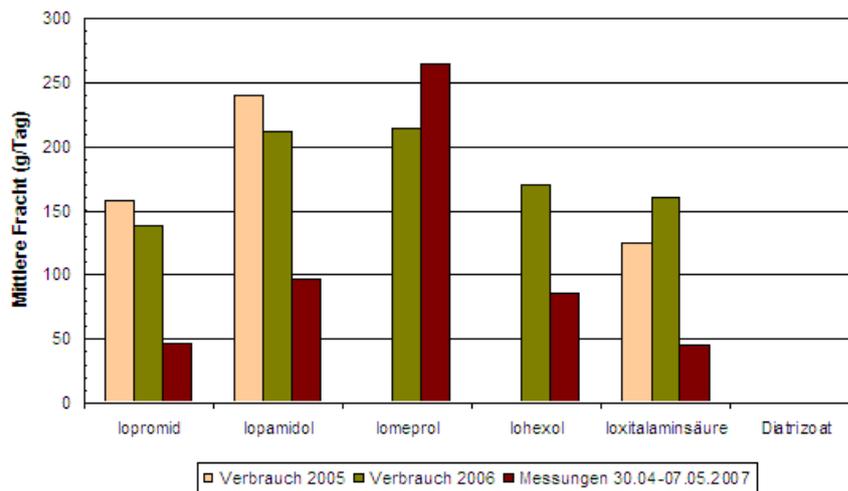
Ziel dieses Projektes war, am Beispiel des Einzugsgebietes der Stadt Winterthur ein nachhaltiges Siedlungsentwässerungskonzept unter Einbezug von dezentralen Massnahmen zu entwerfen^[69]. Hierzu wurde zunächst der Ist-Zustand des Siedlungsentwässerungssystems der Stadt Winterthur erfasst. Weniger als 2,5 % des Abwassers gelangen über die Regenentlastungen direkt in die Gewässer, was einem hohen Ausbaustandard des Systems entspricht. Daher gelangen mehr als 90 % der Schadstoffe in die ARAs und werden dort teilweise eliminiert.

Resultate: Ist-Zustand
Siedlungsentwässerungssystem
Winterthur

Im Mittel werden rund 18 % der in der Schweiz abgegebenen Arzneimittel in Spitälern angewendet. Nur wenige Medikamente werden im Spital deutlich häufiger als im Haushalt verabreicht. Dazu gehören Röntgenkontrastmittel (100 % Spital) und Zytostatika (Krebsmedikamente) >40 % Spital. Für einzelne Stoffe können daher Punktquellen wie das Kantonsspital Winterthur den Hauptemittenten darstellen. Messungen der Konzentrationen von Röntgenkontrastmitteln wie Iopromid im Spitalabwasser des Kantonsspitals Winterthur ergaben stark schwankende Emissionen von 0 bis 550 g/Tag^[69]. In den Messungen wurden 25 bis mehr als 100 % der im Mittel durch die Spitalapotheke abgegebenen Mengen wieder gefunden (Abb. 14). Messungen der gleichen Stoffe in der ARA Winterthur zeigten, dass ein beträchtlicher Teil der Röntgenkontrastmittel von ambulanten Patienten zuhause ausgeschieden wird. Bei den Zytostatika wie z. B. 5-Fluorouracil war der im Spitalabwasser wiedergefundene Anteil sehr gering (<1 %). Dies ist auf die starke Tendenz zur ambulanten Behandlung zurückzuführen. Daher sind Krebsmedikamente nicht als spitalrelevante Stoffgruppe anzusehen. Insgesamt stammen maximal 20 % der Medikamentenemissionen im Einzugsgebiet Winterthur aus dem Kantonsspital. Daher stellt das Spital nicht in der Masse eine Punktquelle dar, wie zunächst vermutet wurde.

Spital Winterthur
als Punktquelle für Pharmaka?

Abb. 14 > Vergleich der gemessenen mittleren Frachten an Röntgenkontrastmitteln mit den Verbrauchszahlen im Kantonsspital Winterthur



Quelle: [69]

In diesem Projekt wurden mehrere Konzepte zur Elimination von Mikroverunreinigungen im Spitalabwasser als dezentrale Massnahmen evaluiert. Beispielsweise wurden spezielle Toiletten zur Abtrennung des Urins vom übrigen Abwasser als schwierig anwendbar beurteilt. Im Mittel werden nämlich nur 63 % der Medikamente mit dem Urin ausgeschieden, und der Betrieb solcher Toiletten ist aufwändig (siehe auch Kapitel 4.2.3). Alternativ erlauben Vakuum-Toiletten, bei denen die Fäkalien mittels Unterdruck abgeführt werden, eine separate Speicherung und Entsorgung (z. B. durch Verbrennung) von Fäkalien und damit der in den Fäkalien gebundenen Medikamente. Diese Methode ist jedoch neu und wenig erprobt. Parallel dazu müsste auch Urin abgetrennt werden, wenn alle Medikamente aus dem Abwasser entfernt werden sollen. Um speziell nur Röntgenkontrastmittel vom Abwasser abzutrennen, können Urinsammelflaschen an die betroffenen Patienten abgegeben werden und der gesammelte Urin in einer Sonderabfallverbrennungsanlage entsorgt werden. Die Erfahrungen mit dieser Methode in einem Pilotversuch in Berlin sind positiv. Der grösste Teil der Röntgenkontrastmittel gelangt auf diese Weise gar nicht erst ins Abwasser. Um alle Arzneimittelrückstände aus dem Spitalabwasser zu entfernen, ist auch der Betrieb einer spitaleigenen Abwasserbehandlungsanlage möglich. Jedoch liegen bisher nur wenige Erfahrungsberichte vor und es existiert kein «Stand der Technik» für solche Aufbereitungsanlagen.

Evaluation dezentraler
Massnahmen im Spital

Eine grobe Kostenbetrachtung für Winterthur ergab, dass der Betrieb einer spitaleigenen ARA 40 % der Jahreskosten einer zusätzlichen Ozonungsstufe in der kommunalen ARA ausmachen würde. Allerdings würde eine solche dezentrale Massnahme nur einen Anteil von 10–20 % der Medikamente aus dem Gebiet der Stadt Winterthur eliminieren, während mit einer zentralen Lösung alle Medikamentemissionen erfasst werden würden.

Kostenbetrachtung

Zusätzlich zum Kantonsspital wurde die Relevanz zweier anderer mutmasslicher Punktquellen im Einzugsgebiet der Stadt Winterthur evaluiert, eines Alterszentrums und der KV Berufsschule. Diese haben sich bezüglich einiger betrachteter Medikamente respektive des Antibabypillen-Wirkstoffs Ethinylestradiol nicht als relevante Punktquellen bestätigt. Beispielsweise beträgt die errechnete Ethinylestradiol-Fracht der KV Berufsschule nur 1,7% der Gesamtfracht der Stadt Winterthur. Eine Separatbehandlung von östrogenhaltigem Urin erscheint daher unzweckmässig.

Evaluation weiterer Punktquellen

Ob ein Spital hinsichtlich Mikroverunreinigungen tatsächlich ein relevanter Einleiter ist, hängt vom Einzugsgebiet, dem Ausbauzustand der kommunalen ARA, der Grösse des Vorfluters und den weiteren vorhandenen Punktquellen (z. B. Alterspflegeheime) ab. Rein wirtschaftlich betrachtet scheint eine dezentrale Massnahme, wie der Betrieb einer spitaleigenen ARA am Kantonsspital Winterthur, nicht zwingend die Bestvariante zu sein.

Schlussfolgerungen:
spitaleigene ARA ökonomisch
nicht zwingend Bestvariante

Die Ergebnisse dieses Projektes zeigen, dass bei der Abtrennung von Pharmaka und deren Behandlung in einem komplexen Abwassersystem wie einem bestehenden Spital zahlreiche Schwierigkeiten zu überwinden sind. Hingegen können bei der Planung eines neuen Spitals oder bei Umbauten Massnahmen zur getrennten Abwasserreinigung von Anfang an einbezogen werden und somit einfacher und kostengünstiger realisiert werden.

Bewertung und Diskussion:
dezentrale Massnahmen am Spital
problematisch

Dezentrale Massnahmen sind durchaus sinnvoll, wenn eine oder mehrere Punktquellen (z. B. Spital, Alterspflegeheim) einen grossen Anteil an der Gesamtfracht für Arzneimittel in einem Einzugsgebiet ausmachen. Die Vorteile dezentraler Massnahmen werden noch grösser, wenn die Arzneimittel nicht in der kommunalen ARA aus dem Abwasser entfernt werden können. Daher müssen vor Implementierung solcher Massnahmen gewisse Eigenschaften des betrachteten Einzugsgebiets mit seinen Punktquellen bekannt sein. Dezentrale Massnahmen sind bereits heute bei vielen Industriebetrieben implementiert, die eine eigene Abwasser(vor)behandlungsanlage betreiben. In einem durchschnittlichen Einzugsgebiet wie Winterthur sind jedoch Punktquellen hinsichtlich der Emission von Mikroverunreinigungen von untergeordneter Bedeutung. Daher sind in solchen Einzugsgebieten zentrale Massnahmen als effizienter und kostengünstiger als Massnahmen bei Punktquellen zu bewerten.

Vorteile und Sinn
dezentraler Massnahmen

4.5.3 Chancen für den Wandel zu einer regenerativen Abwasserwirtschaft

Projektleitung: Kurt Sprecher (GEO Partner)

Das Projekt hatte zum Ziel, das bestehende, zentrale System der Siedlungsentwässerung in der Schweiz mit einem alternativen, dezentralen System zu vergleichen^[70]. Das beschriebene alternative System umfasst die Trennung von Urin, Fäkalien und übrigem Abwasser (Grauwasser) an der Quelle. Diese verschiedenen Abwasserströme werden einer separaten Behandlung zugeführt: Das Grauwasser wird lokal mittels Membrananlagen behandelt und wieder verwendet, die Urinaufbereitung erfolgt mittels Elektrodialyse und Ozonung, und Fäkalien werden in regionalen Anlagen vergärt. Die Samm-

Methodik – Vergleich mit
alternativem System

lung von Urin und Fäkalien erfolgt mittels Lastwagen. Industrieabwässer wurden bei der Betrachtung ausgeklammert. Ein vollständiger Wandel bis zum Jahr 2080 wurde angenommen. Es wurde jedoch offen gelassen, wie der Übergang vom heutigen System zum alternativen System zu gestalten wäre. Der Vergleich der beiden Systeme wurde anhand der Parameter Kosten (Ökonomie), Nutzen für den Menschen (Gesellschaft) und Umwelt (Ökologie) durchgeführt.

Ökonomisch gesehen drängt sich eine Wandlung zum alternativen System nicht auf, da das alternative System unter Berücksichtigung heutiger Randbedingungen wesentlich mehr kostet als das bestehende. Zudem müssten in der langen Übergangszeit zwei Systeme parallel betrieben werden. Wesentliche Kostenfaktoren beim alternativen System sind die Haustechnik sowie die Membrananlagen für die Grauwasserbehandlung vor Ort. Transporte spielen bei den Kosten eine eher untergeordnete Rolle.

Gesellschaftlich gesehen ist bei beiden Systemen ein gleicher Komfort zu erwarten. Somit kann davon ausgegangen werden, dass beide Systeme in der Bevölkerung akzeptiert würden. Beim alternativen System werden Abwasser-Produzenten (Privatpersonen) zu Akteuren, welches eine erhöhte Akzeptanz des neuen Systems bewirken könnte. Nicht betrachtet wurde der Aspekt der Hygiene. Bei dezentralen Systemen besteht ein erhöhtes Risiko für lokale Kontaminationen mit Mikroorganismen, welche sich auf die Gesundheit von Mensch und Umwelt auswirken können.

Das alternative System ermöglicht die Rückgewinnung von Nährstoffen wie z. B. Phosphor. Im heutigen System wird Wasser als Transportmittel für Urin, Fäkalien etc. verwendet (Schwemmkanalisation). Wenn Wasser oder auch Phosphor in Zukunft als Ressourcen knapp werden, könnte sich das beschriebene alternative System als eher lohnenswert erweisen. Phosphor würde im alternativen System als Nährstoff aus dem Urin zurück gewonnen und Wasser nicht mehr als Transportmittel «missbraucht». Ein Fragezeichen ist noch beim Energiebedarf des alternativen Systems zu setzen. Dieser wurde im vorliegenden Projekt zwar abgeschätzt. Das Ergebnis muss aber aufgrund der neuen Technologien als relativ unsicher angesehen werden. Das alternative System ist umweltgerechter, da weniger Stoffe diffus in Gewässer eingetragen werden (z. B. über undichte Kanalnetze, Mischwasserentlastungen). Das Ausmass der ökologischen Vorteile hängt entscheidend ab von der Betriebssicherheit und der Qualitätssicherung der dezentralen Anlagen für die Grauwasseraufbereitung. Auch eine Entwässerung und Reinigung von Wasser aus entwässerten Flächen (Strassen, Plätze etc.) muss im alternativen System gewährleistet sein. Durch eine teilweise Wiederverwendung von aufbereitetem Wasser dürfte der Trinkwasserverbrauch in den Siedlungen abnehmen. Falls aber die Trinkwassersysteme weiterhin bezüglich der Maximalbelastung durch die Entnahme von Löschwasser ausgelegt werden, führt dies zu längeren Aufenthaltszeiten des Trinkwassers in den Rohrleitungen (Netzschutz). Des Weiteren behandelt das beschriebene alternative System das Problem der Mikroverunreinigungen nur in einem Bereich, nämlich dem der Siedlungsentwässerung. Einträge von Mikroverunreinigungen in Gewässer wie z. B. über die Landwirtschaft werden durch das alternative System nicht reduziert.

Resultate und
Schlussfolgerungen:
Ökonomisch gesehen hat
alternatives, dezentrales System
nur wenige Vorteile

Gesellschaftliche Aspekte

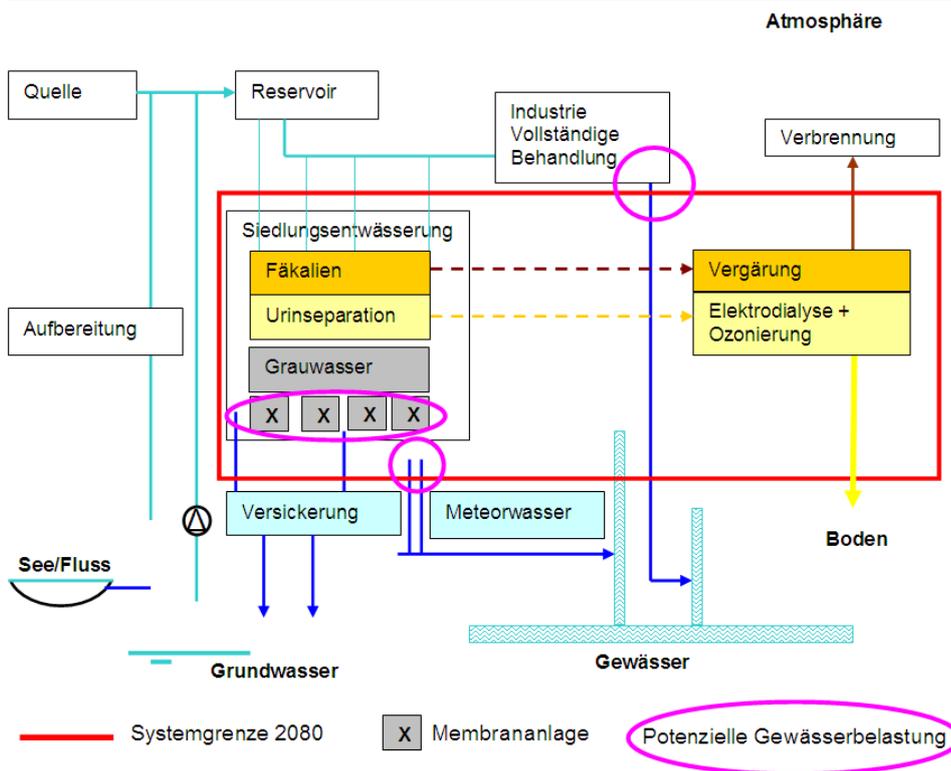
Ökologische Aspekte

Mit zahlreichen Einschränkungen scheint eine Umstellung auf das alternative System machbar. Jedoch ist mit sehr langen Übergangszeiten zu rechnen. Die Akzeptanz des alternativen Systems wird vor allem durch die Kosten bestimmt, aber auch durch das Risiko für den Einzelnen (Betrieb von Grauwasserbehandlungsanlagen in privaten Haushalten). Zudem ist der Betrieb der dezentralen Anlagen (z. B. bezüglich Effizienz) schwierig zu kontrollieren, da – im Gegensatz zu einer Heizanlage – kein Leidensdruck beim Betreiber entsteht, wenn die Anlage nicht korrekt funktioniert. Zusätzlich sind die beschriebenen neuen Technologien (Urinaufbereitung, Grauwasseraufbereitung etc.) zurzeit weder entwickelt noch genügend erprobt. Das alternative System ist denkbar für kleinräumige, entlegene Anwendungen sowie für Neubauten. Dies könnte z. B. in Pilotüberbauungen getestet werden.

Bewertung und Diskussion:
Machbarkeit des alternativen Systems

Abb. 15 > Alternatives, dezentrales System der Siedlungsentwässerung

Untersucht wurde nur die Siedlungsentwässerung (rotes Viereck).
Details sind im Text beschrieben.



4.6 Neues Organisationsmodell

Neben den in den Kapiteln 4.4 und 4.5 aufgeführten technischen Massnahmen kommen auch organisatorische Massnahmen zur Reduktion des Eintrages von Mikroverunreinigungen in die Gewässer in Frage. Mit diesen Massnahmen beschäftigte sich das im Folgenden beschriebene Projekt.

4.6.1 Neues Organisationsmodell zur Förderung einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft in der Schweiz

Projektleitung: Olivier Chaix (Bonnard & Gardel)

Ziel dieses Projektes war es, organisatorische (nicht-technische) Massnahmen vorzuschlagen, die zu einer Strukturverbesserung des Siedlungsentwässerungssystems in der Schweiz führen^[71]. Solche Massnahmen sollen dazu dienen, die Gewässerschutzgesetzgebung effizienter umsetzen zu können. Basis der Evaluation bildet der heutige Stand der Abwasserentsorgung in der Schweiz^[68]. Beispielsweise besitzen einige Kantone (z. B. Aargau, Zürich, Waadt) eine hohe Dichte kleiner ARAs, während andere Kantone (z. B. Bern, Genf, Glarus) mit weniger und grösseren ARAs organisiert sind. Kleine ARAs weisen häufig schlechte Verdünnungsverhältnisse auf, das heisst, das Wasservolumen des ARA-Abflusses ist gross im Verhältnis zum Wasservolumen des Gewässers, in welches eingeleitet wird.

Die aktuellen Herausforderungen der Siedlungsentwässerung bestehen im Kostenmanagement, in der technischen Optimierung des Systems sowie in der betrieblichen Kontrolle. Zu den zukünftigen Herausforderungen in der Siedlungswasserwirtschaft gehören die Mikroverunreinigungen, Klimaveränderungen sowie die Weiterentwicklung der Technik. Die globale Klimaerwärmung bewirkt, dass in Zukunft möglicherweise lokal weniger Wasser zur Verfügung steht. Dies hat zur Folge, dass Einzugsgebiete anders organisiert werden müssen, da beispielsweise nicht mehr genügend Wasser für eine funktionsfähige Schwemmkanalisation zur Verfügung steht. Techniken in der Siedlungswasserwirtschaft sind einer ständigen Weiterentwicklung unterworfen. Eine sukzessive Umstellung auf dezentrale Massnahmen ist generell denkbar. Um hohe Kosten und Umweltschäden zu vermeiden, müssen diese Massnahmen gut geplant eingesetzt und kontrolliert werden.

Defizite im heutigen Siedlungsentwässerungssystem der Schweiz bestehen vor allem auf kommunaler Ebene. Kleine und mittlere Gemeinden mit kleinen ARAs müssen professioneller organisiert werden, da sie z. B. selten qualifiziertes Personal zur Verfügung haben. Auf sich gestellt können sie die gegenwärtigen und zukünftigen Herausforderungen nicht bewältigen. Ein Ansatz zur Lösung des Problems ist die Neugruppierung der kleinen ARAs zu grösseren Einheiten. Dies wird durch Erfahrungen aus anderen, benachbarten Ländern bestätigt.

Es werden im Projekt drei kombinierbare Massnahmen vorgeschlagen:

Methodik und Basis des Projekts

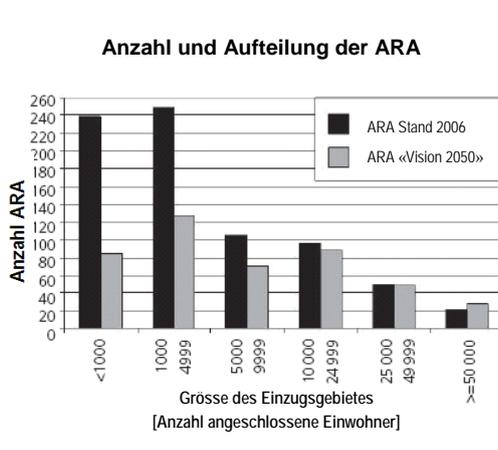
Resultate: Aktuelle und zukünftige Herausforderungen in der Siedlungswasserwirtschaft

Kleinräumigkeit als Problem

Organisatorische Massnahmen

- > ARA-Einzugsgebiete gruppieren (Vision 2050): Neugruppierung der ARA-Einzugsgebiete, so dass es mehr grosse ARAs und weniger kleine ARAs gibt (Abb. 16). Insbesondere soll die Zahl der ARAs für weniger als 5000 Einwohnerwerte mehr als halbiert werden. Diese Massnahme allein wird nach Aussage der Autoren die Konzentrationen von Mikroverunreinigungen in den Gewässern reduzieren. Gründe hierfür sind die höhere Reinigungseffizienz grösserer ARAs, und dass grössere ARAs zumeist an grösseren Vorflutern liegen, so dass das gereinigte Abwasser stärker verdünnt wird.
- > Organisation und Infrastruktur rationalisieren und regionalisieren: Eine Organisation in der Siedlungswasserwirtschaft muss eine gewisse Grösse aufweisen, damit sie effizient sein kann. Beispielsweise wird die Form einer GmbH oder AG vorgeschlagen, welche gross genug sein muss, um mit einem qualifizierten, handlungsfähigen Team ausgestattet zu sein.
- > Professionellere Organisation mittels Spezialteam: Die Autoren schlagen konkret eine Organisationsstruktur und eine optimale Grösse des Spezialteams vor. Beispielsweise werden ein Regionalverantwortlicher, ARA-Verantwortliche, Kanalisationsverantwortliche etc. benötigt. Die kritische Grösse eines Einzugsgebietes für den Einsatz eines solchen Teams beträgt ca. 25 000 Einwohner.

Abb. 16 > Verteilung der Anzahl Einwohner auf die ARA-Einzugsgebiete 2006 (schwarz) und nach der «Vision 2050»



Grundsätzlich lassen sich zwei Strategien unterscheiden, um die vorgeschlagenen Massnahmen umzusetzen. Zum einen besteht die Möglichkeit einer top-down-Strategie, welche von Bund und Kantonen ausgeht, wie beispielsweise das Schaffen von gesetzlichen Grundlagen. Zum anderen kann eine bottom-up-Strategie angewendet werden, welche von Gemeinden und Regionen ausgeht. Bei der Umsetzung der Massnahmen sollten beide Strategien ineinander greifen.

Strategien zur Umsetzung

Eine Effizienzsteigerung des heutigen Schweizer Siedlungsentwässerungssystems (finanziell, bezüglich Mikroverunreinigungen) durch organisatorische Massnahmen ist möglich. Dies kann beispielsweise durch den Zusammenschluss von kleinen Gemeinden und ein effizienteres Einzugsgebietsmanagement geschehen. Um die vorgeschlagenen Massnahmen umzusetzen, sind eine klare kantonale Strategie und eine Reformbereitschaft auf kommunaler Ebene notwendig.

Die Ergebnisse des Projektes zeigen eine zusätzliche Dimension der Handlungsoptionen bezüglich Mikroverunreinigungen auf. Die Reform des Siedlungsentwässerungssystems auf organisatorischer Ebene kann bereits zu einer Reduktion von Mikroverunreinigungen führen, ohne dass spezielle, neu entwickelte Techniken zur Abwasserreinigung eingeführt werden. Dabei sind die vorgeschlagenen Lösungen relativ einfach und mit heute vorhandenen Mitteln umsetzbar. Vorteil ist, dass das neue Organisationsmodell nicht nur hilft, das Problem der Mikroverunreinigungen zu lösen, sondern auch Kosten spart und daher eine hohe Attraktivität aufweist.

Schlussfolgerungen:
organisatorische Massnahmen

Bewertung und Diskussion:
Reduktion von Mikroverunreinigungen und Kostenersparnis durch organisatorische Massnahmen

5 > Schlussfolgerungen

5.1 Umweltzustand

Eine grosse Anzahl chemischer Stoffe kommt in den verschiedensten Bereichen zur Anwendung und gelangt auf unterschiedlichen Eintragswegen in die Schweizer Gewässer. Diese Stoffe sind als Mikroverunreinigungen in Bächen, Flüssen, Seen, im Grundwasser und sogar im Trinkwasser zu finden. Eine systematische Übersicht, um welche und wie viele Substanzen es sich hierbei handelt, existiert bisher nicht.

Mikroverunreinigungen überall

Aufgrund verbesserter Messmethoden werden zukünftig weit mehr Stoffe in Gewässern detektierbar sein als heute. Wegen der Überalterung der Gesellschaft und steigender hygienischer Ansprüche ist zu erwarten, dass beispielsweise der Verbrauch von Medikamenten und Hygieneprodukten ansteigt. Die Anzahl verschiedener Inhaltsstoffe in chemischen Produkten wird weiter zunehmen. Neue Stoffgruppen, wie z. B. die Nanopartikel, werden zu einer zusätzlichen Herausforderung. Dies bedeutet, dass Massnahmen zur Reduktion von Mikroverunreinigungen auch bezüglich dieser erwarteten Trends greifen müssen.

Mehr und neue Stoffe detektiert

Auch wenn erst eine verhältnismässig geringe Anzahl Stoffe in unseren Gewässern gemessen wurde und nur wenige Effekte auf Wasserlebewesen bekannt sind, besteht im Sinne des Vorsorgeprinzips bezüglich Reduktion der Gewässerbelastung Handlungsbedarf. Eine Reduktion des Eintrages von Mikroverunreinigungen sollte in erster Linie angestrebt werden bei Gewässern mit einem hohen Anteil an gereinigtem Abwasser, sowie bei Gewässern, die zur Trinkwassergewinnung vorgesehen sind oder die in genutzte Grundwasservorkommen infiltrieren.

Vorsorgliche Begrenzung von Mikroverunreinigungen

5.2 Handlungsoptionen

Um die Belastung der Gewässer mit Mikroverunreinigungen zu vermindern, sind Massnahmen auf unterschiedlichen Ebenen möglich. Im Wesentlichen haben sich vier Kategorien von Handlungsoptionen herauskristallisiert:

1. *Massnahmen an der Quelle* (Verbote, Einschränkungen, Minimalanforderungen, Anreizsysteme, verbrauchsoptimierte Geräte und Sensibilisierung der Benutzer) können die Menge und Anzahl in Verkehr gebrachter Problemstoffe verringern.
2. Mit *zentralen technischen Massnahmen* in ARAs (Verbesserung der Abbauleistung mit zusätzlicher Reinigungsstufe, Erhöhung der Retentionsvolumina durch grosszügig dimensionierte Regenrückhaltebecken im Kanalisationssystem) kann der Schadstoffeintrag verringert werden.

3. *Dezentrale technische Massnahmen* können z. B. so aussehen, dass jedes Haus in Zukunft mit einem eigenen Abwasseraufbereitungssystem ausgerüstet sein wird, so dass ein Siedlungsentwässerungssystem entfällt, beziehungsweise in reduzierter Form zur Ableitung von gereinigtem Wasser betrieben wird. Bei grossen Emittenten (Spitäler, Altersheime) können dezentrale technische Lösungen wie z. B. Urinseparierung angewendet werden.
4. *Organisatorische Massnahmen* wie Professionalisierung der Siedlungsentwässerung oder das Zusammenschliessen von Einzugsgebieten alleine lösen das Problem der Mikroverunreinigungen nicht, können jedoch einen wichtigen Beitrag zur Lösung lokaler Probleme und zur Kostenreduktion leisten.

Im Folgenden werden diese Optionen ausführlicher diskutiert:

5.2.1 Massnahmen an der Quelle

Das Problem der Mikroverunreinigungen kann für viele Produkte direkt an der Wurzel angepackt werden, also bereits auf den Stufen Produktdesign und Produkthanwendung, unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus von chemischen Produkten:

Gezielte Reduktion
von Problemstoffen

Dazu sind beispielsweise gesetzgeberische Massnahmen wie das Verbot und die Einschränkung des Gebrauchs besonders umweltschädlicher chemischer Stoffe erforderlich. In der Schweiz wird dieser Weg mittels der Chemikalien-Risiko-Reduktionsverordnung^[11] umgesetzt: In dieser Verordnung werden gewisse umweltschädliche Stoffe wie z. B. Nonylphenolethoxylate in ihrer Verwendung eingeschränkt. Alternativ können auch Minimalanforderungen an Stoffe, z. B. in Bezug auf ihre Abbaubarkeit, definiert werden. Dies wurde beispielsweise im Rahmen der EU-Detergenzienverordnung^[72] für Waschmittel-Inhaltstoffe umgesetzt. Letztere legt fest, dass alle in Wasch- und Reinigungsmitteln eingesetzten Tenside (waschaktive Substanzen) biologisch gut abbaubar sein müssen. Die Einschränkung von unverzichtbaren Produkten (z. B.: wichtige Medikamente) ist schwierig und muss im Einzelfall auf einer Kosten/Nutzen-Betrachtung basieren.

Rechtliche Instrumente

Ein weiteres Instrument sind Anreizsysteme für die Entwicklung von weniger schädlichen Produkten. Dieses umfasst beispielsweise Lenkungsabgaben (z. B. auf flüchtige Kohlenstoffverbindungen (volatile organic carbon, VOC)) oder Ökolabels^[17].

Anreizsysteme

Ein schwierigeres und weniger aussichtsreiches Unterfangen ist es, die Verbrauchergewohnheiten zu verändern. Als Mittel bieten sich hier gezielte Öffentlichkeitsarbeit, Verbraucherinformationen, Pfandsysteme und die Anpassung von Entsorgungswegen an.

Benutzerverhalten

Die kombinierte Wirkung dieser Instrumente wird die Hersteller motivieren, beim Produktdesign anzusetzen, indem erstens umweltschädliche Stoffe durch weniger schädliche und leichter abbaubare ersetzt werden und zweitens Verbrauchs-optimierte Produkte entwickelt werden, die mit kleineren Mengen synthetischer organischer

Produktdesign

Stoffe auskommen (Beispiele: waschmittelarme Waschmaschine, intelligente Dosiersysteme).

Bei den genannten Massnahmen ist eine disziplin- und länderübergreifende Zusammenarbeit erforderlich^[17].

5.2.2 Zentraler Ansatz (end-of-pipe)

Unter dem «end-of-pipe»-Ansatz (Deutsch: «am Ende der Röhre») werden diejenigen Massnahmen verstanden, welche bei der Verbesserung der Entfernung von Mikroverunreinigungen in der ARA ansetzen. Da ein Grossteil der Mikroverunreinigungen über die Siedlungsentwässerung in die Gewässer gelangt, kommt der ARA eine zentrale Bedeutung zu.

ARA als Schlüsselstelle
für viele Mikroverunreinigungen

Viele schwer abbaubare Stoffe erreichen je nach Anwendung kontinuierlich das Abwasser und passieren die ARAs, ohne vollständig abgebaut zu werden. Daher sind Massnahmen zur Verbesserung der Abbauleistung in der ARA geeignet, die Einträge vieler Mikroverunreinigungen zu verringern. Durch die Verbesserung der Eliminationsleistung in der biologischen Reinigungsstufe (z. B. Erhöhung des Schlammalters bei Anlagen mit geringem Schlammalter) können die Emissionen von wichtigen, relativ gut abbaubaren Mikroverunreinigungen wie Hormonen reduziert werden. Um jedoch einen Grossteil der Mikroverunreinigungen eliminieren zu können, bedarf es bei der ARA einer zusätzlichen Stufe wie beispielsweise die Behandlung mit Aktivkohle oder Ozon. Aus Labor- und Pilotversuchen ist bekannt, dass sich die beiden Technologien grundsätzlich zur Entfernung einer Vielzahl von Stoffen aus dem Abwasser eignen^[73]. Sie sollten in Grossversuchen getestet werden, um die Wirkung, die Umsetzbarkeit in der Praxis, die Umweltverträglichkeit, sowie die zu erwartenden Kosten beurteilen zu können. Das BAFU prüft im Rahmen des Projektes «Mikroverunreinigungen in den Gewässern» weitergehende technische Massnahmen für ARAs wie die Behandlung mit Aktivkohle oder Ozon im Grossmassstab.

Ein Schwachpunkt des heutigen Siedlungsentwässerungssystems (vor allem Mischsysteme) ist die Abwasserentlastung in Gewässer bei starken Regenfällen. Mit den vorgängig beschriebenen technischen Massnahmen werden die Emissionen bei Regenereignissen nicht reduziert. Deshalb ist es wichtig, dass die durch technische Massnahmen erreichbare Reduktion den verbleibenden Emissionen gegenübergestellt wird. Schätzungsweise 2,5 % des Rohabwassers gelangt bei Regenfällen über Entlastungen direkt in die Gewässer^[7]. Auch aus undichten Kanalisationen dringt in vermutlich geringerem Umfang permanent ungeklärtes Abwasser ins Grundwasser und in die Gewässer. Auf diesen Wegen gelangen auch chemische Stoffe, die in kommunalen ARAs gut abbaubar wären, in die Gewässer^[7]. Verringern lassen sich diese Einträge durch Schaffung grösserer Retentionsvolumina (Regenrückhaltebecken) und durch Sanierung undichter Kanalisationen.

Eine Optimierung der Siedlungsentwässerung lässt sich durch Massnahmen bei den ARAs im Rahmen ihrer normalen Erneuerung mittelfristig realisieren. Die mittlere

Lebensdauer der baulichen Komponenten einer ARA beträgt rund 20–30 Jahre und ist somit deutlich kürzer als die Lebensdauer der Kanalisation von etwa 80 Jahren^[7].

In den oben beschriebenen zentralen Massnahmen sind wichtige Aspekte der Ressourcenschonung (Rückgewinnung von Nährstoffen, Energieverbrauch) nicht berücksichtigt. Die Reduktion von Mikroverunreinigungen in Gewässern ist eine Schonung der Ressource Wasser, die mit dem erhöhten Energieverbrauch der zusätzlichen Verfahren verbunden ist. Im Sinne der Nachhaltigkeit sollten die Möglichkeiten zur Schonung weiterer Ressourcen wie der Nährstoffe geprüft werden.

5.2.3 Dezentraler Ansatz

Als Alternative zu zentralen Massnahmen auf der ARA sind dezentrale Massnahmen möglich. In den in Kapitel 4.5 beschriebenen Projekten wurden zwei unterschiedliche Ansätze zu dezentralen technischen Massnahmen in der Siedlungsentwässerung untersucht:

- > Neues Konzept für die Siedlungsentwässerung: «jedes Haus hat seine eigene ARA»
- > Technische Massnahmen bei relevanten Emittenten zur Reduktion von Emissionen

Die erste Option sieht vor, die Siedlungsentwässerung für die gesamte Schweiz von Grund auf neu zu planen und zu bauen. Überall dort, wo Emissionen stattfinden, werden diese Emissionen mit entsprechender Technologie behandelt. Das lokal gereinigte Abwasser muss versickert werden oder aber direkt in ein Oberflächengewässer eingeleitet werden. Ein eigentliches Entwässerungssystem für ungereinigte häusliche Abwässer entfällt. Ökologisch gesehen hat diese Massnahme, also ein neues, vollständig dezentralisiertes System in der Schweiz, gewisse Vorteile bezüglich der Ressourcenschonung (Rückgewinnung von Nährstoffen aus dem Abwasser). Die Umstellung vom heutigen auf das alternative System bedingt eine Umrüstung sämtlicher Haushalte und benötigt daher sehr viel Zeit in der Umsetzung. Dies bedeutet, dass das heutige System weiter betrieben werden muss, bis das neue dezentrale System vollumfänglich funktionsfähig ist. Die dadurch verursachten Kosten sind als sehr hoch einzuschätzen. Die technischen Verfahren für die dezentrale Abwasseraufbereitung und -entsorgung sind noch nicht ausgereift. Generell muss auch die Gewährleistung der Betriebssicherheit (Verfügbarkeit, Hygiene, Havarien, Logistik) verbunden mit den Fragen bezüglich der Verantwortlichkeit für Betrieb und Unterhalt als möglicher Stolperstein gesehen werden. Aufgrund der oben erwähnten Nachteile dürfte es schwierig sein, eine politische Akzeptanz zu erhalten. Zusätzlich gelöst werden müsste auch die Entwässerung von Strassen und Plätzen. Dezentrale Systeme sind deshalb gegenwärtig nur als mögliche Lösung bei entlegenen Siedlungen ohne entsprechende Infrastruktur und bei Neubauten vorstellbar.

Mit der zweiten Option wird die Fracht bei relevanten Emittenten durch gezielte technische Massnahmen reduziert (z. B. Separierung und Direktentsorgung von stark belasteten Abwässern, spezifische Vorreinigung), so dass die ARA und damit die Gewässer entlastet werden. Dezentrale Massnahmen bei massgeblichen Emittenten

2 Ansätze mit unterschiedlicher Tragweite

Neues Konzept: hauseigene Abwasseraufbereitung

Lokale Massnahmen bei relevanten Emittenten

sind dann sinnvoll, wenn eine oder mehrere Punktquellen einen grossen Anteil an der Gesamtfracht für Mikroverunreinigungen in einem Einzugsgebiet ausmachen (z. B. Medikamentenwirkstoffe aus Spitälern und Alterspflegeheimen). Dies ist beispielsweise der Fall bei Emittenten in abgelegenen Gebieten ohne entsprechende Infrastruktur. Technologien für die dezentrale Abwasserreinigung sind noch nicht ausgereift und sollten grundsätzlich evaluiert werden. Mittels Urinseparierung können die mit dem Urin ausgeschiedenen Schadstoffe separat gesammelt und entsorgt werden. Die im Urin enthaltenen Nährstoffe können in konzentrierter Form einer Rückgewinnung zugeführt werden.

5.2.4 Organisatorische Massnahmen

Die Optimierung der Siedlungsentwässerung durch organisatorische Massnahmen auf Stufe Abwassereinzugsgebiet ist nicht neu. Beispielsweise wird in der ARA Thunersee das Abwasser von zahlreichen Gemeinden im Einzugsgebiet des Thunersees gereinigt. Ein gezielter Zusammenschluss von kleinen ineffizienten Anlagen zu grossen Anlagen, die dem Stand der Technik entsprechen und optimal betrieben werden, ist sinnvoll. Abhängig von den geografischen Gegebenheiten ist damit verbunden auch eine optimierte Einleitung in grosse Vorfluter möglich, die ein günstigeres Verdünnungsverhältnis aufweisen. Der Weg hin zu weniger, aber grösseren und damit effizienteren Anlagen beziehungsweise grösseren Einzugsgebieten erlaubt neue Organisationsformen, bei denen beispielsweise Fachkräfte zu professionellen Einheiten zusammengefasst für den Betrieb und Unterhalt der Anlagen verantwortlich sind. Insgesamt werden langfristig deutliche Kosteneinsparungen bei gleichzeitig verbesserter Effizienz der Anlagen erwartet.

Organisatorische Massnahmen

5.3 Erwartungen bezüglich Wirkung und Effizienz von Massnahmen

Von den diversen Handlungsoptionen sind verschiedenartige Wirkungen auf die Gewässerbelastung mit Mikroverunreinigungen in unterschiedlichem Umfang zu erwarten (Tab. 7).

Tab. 7 > Massnahmen zur Reduktion der Gewässerbelastung mit Mikroverunreinigungen und erwartete Wirkungen

Massnahme	Erwartete Wirkung bezüglich der Gewässerbelastung mit Mikroverunreinigungen
Regulatorische Massnahmen und Information	
Information für Hersteller und Anwender	Reduktion der Emissionen abhängig von Änderung der Verbrauchsgewohnheiten; beschränkt auf begrenzte Anzahl von Stoffen und Anwendungen
Vorschriften für die Herstellung und Verwendung von Stoffen und Produkten	Mittelfristig können die Emissionen von einer begrenzten Anzahl von Stoffen reduziert werden
Einschränkung oder Verbot von besonders umweltgefährlichen Stoffen	Geeignet, um Emissionen von einzelnen Stoffen zu reduzieren oder vollständig zu unterbinden
Zentrale Massnahmen	
Massnahmen bei ARAs (z. B. Ozonung, Aktivkohlebehandlung, Sandfiltration)	Eine Vielzahl von Stoffen, die über das Abwasser eingetragen werden, können eliminiert werden
Dezentrale Massnahmen	
Massnahmen bei Hauptemittenten	Geeignet, um Emissionen von einzelnen Stoffen bzw. Stoffgruppen zu reduzieren
Systemwechsel von der heute zentralen Abwasserbehandlung zu einem dezentralen System	Eine Vielzahl von Stoffen, die heute über das Abwasser in die Gewässer eingetragen werden, können eliminiert werden, aber Massnahmen nur langfristig umsetzbar
Organisatorische Massnahmen	
Optimierung des Abwassermanagements	Verbesserte Elimination abbaubarer Stoffe

Massnahmen an der Quelle (dezentrale Massnahmen) wie Urinseparierung oder Separation von Spitalabwässern wären in Einzelfällen mittelfristig realisierbar, während eine Umstellung des Entwässerungssystems erst längerfristig umsetzbar erscheint. Mit diesen Massnahmen sind erhebliche bauliche Veränderungen und Umstrukturierungen verbunden. Daher können dezentrale Massnahmen zunächst allenfalls ergänzend zu Massnahmen auf der ARA umgesetzt werden. Höchstens langfristig könnte eine Umstellung auf dezentrale Massnahmen angestrebt werden. Auch die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins ist zu der Schlussfolgerung gekommen, dass end-of-pipe-Massnahmen zur Reduktion von Mikroverunreinigungen wahrscheinlich am effektivsten sind^[17].

Tab. 8 gibt eine Übersicht über einige der genannten Massnahmen zur Reduktion der Mikroverunreinigungen in den Gewässern sowie derjenigen Stoffgruppen, deren Einträge in Gewässer reduziert werden können. Es ist jedoch zu beachten, dass nicht immer ein Effekt auf alle Vertreter der genannten Stoffgruppen erreicht werden kann. Beispielsweise werden Röntgenkontrastmittel durch eine Ozonungsstufe kaum abgebaut. Hier gilt es zu prüfen, ob sie separat gesammelt (Beispiel Urinsammelflaschen) und behandelt oder durch andere Massnahmen bei der Anwendung reduziert werden sollten. Andere Stoffe, wie Tierarzneimittel oder Pflanzenschutzmittel werden auf-

Auswirkungen von Massnahmen auf einzelne Stoffgruppen

grund ihrer Anwendung in der Landwirtschaft nur zu einem kleinen Teil über die ARAs in die Gewässer eingetragen. Auch bestimmte Biozide (z. B. QAV) werden in ARAs gut aus dem Abwasser entfernt und gelangen daher hauptsächlich über andere Eintragungspfade (z. B. Regenentlastungen aus Kanalisationen) in die Gewässer. Daher dürften sich Massnahmen zur Verbesserung der Effizienz von ARAs nur geringfügig auf die Gewässerbelastung mit diesen Stoffen auswirken. Auch hier müssen andere Massnahmen zum Einsatz kommen, wie z. B. Anwendungsvorschriften oder Stoffeinschränkungen.

Tab. 8 > Erwartete Effizienz von Massnahmen zur Reduktion von Emissionen einzelner Stoffgruppen

Ein «+» bedeutet, dass die Massnahme die Emissionen einzelner Stoffe einer Stoffgruppe reduziert.
 Ein «++» bedeutet, dass die Massnahme die Emissionen vieler Stoffe einer Stoffgruppe reduziert.

Stoffgruppe	Regulatorische Massnahmen		Zentrale Massnahmen auf ARAs		Dezentrale Massnahmen		Organisatorische Massnahmen
	Gesetzgeberische Massnahmen (z. B. Stoffverbote)	Erzieherische Massnahmen (z. B. Auflagen zur Anwendung)	Ozonung	Aktivkohle	Neues dezentrales Entwässerungssystem	Massnahmen bei relevanten Emittenten	Zusammenlegung kleinerer ARAs
Wichtige Eintragungspfade	Kanalisation und diffus	Kanalisation und diffus	Kanalisation	Kanalisation	Einzelne Haushalte	z. B.: Spital – Kanalisation	Kanalisation
Bemerkung	Einzelstoffe, z. B. sehr persistente und giftige Stoffe	Einzelstoffe oder Stoffgruppen	Sehr viele verschiedene Stoffe	Sehr viele verschiedene Stoffe	Sehr viele verschiedene Stoffe	Einzelstoffe oder Stoffgruppen	Für abbaubare Stoffe wird teilweise eine verbesserte Elimination erwartet

Stoffgruppe

Pharmaka (Humanmedizin)	+	+	++	++	++	+	+
Hormone			++	++	++		+
Körperpflegeprodukte	+	+	++	++	++		+
Wasch- und Reinigungsprodukte	+	+	++	++	++		+
Industriechemikalien	+	+	++	++	++		+
Biozide	+	+	++	++	++		+
Pflanzenschutzmittel	+	+					
Tierarzneimittel	+	+					

Der Eintrag von Mikroverunreinigungen beeinträchtigt Pflanzen und Tiere der Gewässer sowie die Qualität der Trinkwasservorkommen in Seen und im flussnahen Grundwasser. Es gibt klare Hinweise für nachteilige Einwirkungen in den Gewässern. So führen hormonaktive Stoffe zu einer Verweiblichung von männlichen Fischen, bestimmte Arzneimittelwirkstoffe führen zu Schädigungen von Fischen und Kleinkrebsen. Die Tatsache, dass für hunderte bis tausende Mikroverunreinigungen in den Gewässern nur ungenügendes Wissen vorliegt, unterstreicht den deutlichen Handlungsbedarf. Beim Trinkwasser für die Bevölkerung besteht zur Zeit keine Gefährdung, trotzdem müssen aus Gründen des vorsorglichen Verbraucherschutzes Massnahmen getroffen werden.

Gesetze und Information alleine genügen nicht

Die Existenz von Mikroverunreinigungen in Schweizer Gewässern lässt erkennen, dass regulatorische Massnahmen wie die Chemikaliengesetzgebung und die Gewässerschutzverordnung in ihrer heutigen Form zu kurz greifen und nur geeignet sind, einzelne Stoffe und Stoffgruppen zu regulieren. «Erzieherische Massnahmen» wie Pfandsysteme, Verbraucherinformation und Anpassung von Entsorgungswegen können mit-helfen, Emissionen zu reduzieren. Es sollte durch gezielte Öffentlichkeitsarbeit ein breites Bewusstsein für das Thema Mikroverunreinigungen bei der Industrie und bei den Konsumenten geschaffen werden und somit die Akzeptanz für weitergehende Massnahmen erhöht werden.

Der Zeitpunkt für weiterreichende Massnahmen in der Siedlungswasserwirtschaft ist günstig, da in diesem Bereich Erneuerungen anstehen. Für den Unterhalt und die Erneuerung des bestehenden Systems werden hohe Kosten anfallen. Im Rahmen der Planung dieser Arbeiten können notwendige und geeignete Massnahmen zur Reduktion von Mikroverunreinigungen einbezogen werden. Daher sollte jetzt in Erwägung gezogen werden, mit welchen Massnahmen die heutige Siedlungsentwässerung optimiert werden kann. Die zur Anwendung gelangenden Verfahren sollten folgende Charakteristika aufweisen:

Guter Zeitpunkt für Massnahmen

- > «Breitbandwirkung» gegen möglichst viele Mikroverunreinigungen
- > Flexibilität bei der Implementierung
- > Einfach realisierbare Erweiterung zur bestehenden Infrastruktur
- > Akzeptables Kosten/Nutzen-Verhältnis

Durch den Einbau einer zusätzlichen Reinigungsstufe in bestehende ARAs (z. B.: Ozonung oder Aktivkohlebehandlung) kann ein grosser Teil der Mikroverunreinigungen eliminiert werden. Bei der Auswahl der ARAs, welche mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe ausgerüstet werden sollten, müssen folgende Punkte berücksichtigt werden:

- > *Oberliegerverantwortung und Reduktion der Stofffrachten ins Meer (Frachtreduktion)*
Mit dem Ausbau der grössten ARAs der Schweiz kann die Gesamtfracht an Mikroverunreinigungen in den grossen Grenzgewässer deutlich gesenkt werden.
- > *Verbesserung der Wasserqualität von belasteten Gewässern*
Der Ausbau von ARAs an Gewässern mit einem hohen Anteil an gereinigtem Abwasser führt zu einer signifikanten Verbesserung der Gewässerqualität.
- > *Schutz der Trinkwasserversorgung*
In vielen Regionen der Schweiz wird Oberflächen- und Grundwasser ohne technisch aufwändige Verfahren zu Trinkwasser aufbereitet. Der Ausbau von ARAs an Gewässern, die für die Trinkwassernutzung von Bedeutung sind (Seen mit wichtigen Trinkwasserfassungen, Flüsse mit Uferinfiltration ins Grundwasser im Bereich von Trinkwasserfassungen), führt zu einer Verbesserung und Sicherung der Trinkwasserqualität.

Es wird davon ausgegangen, dass rund 100 ARAs mit mehr als 10 000 Einwohnerwerten ausgebaut werden müssten, um die Zielsetzungen Frachtreduktion und Wasser-

qualität zu erreichen. Dies betrifft ausschliesslich die grössten ARAs, ARAs an kritischen Gewässerabschnitten mit einem hohen Anteil an gereinigtem Abwasser, sowie ARAs an Gewässern, die für die Trinkwasserversorgung von Bedeutung sind. Dieser Ausbau ist mit Investitionskosten von schätzungsweise 1,2 Mrd. CHF verbunden. Die jährlichen Kosten für die Abwasserreinigung in der Schweiz würden sich damit um rund 6 Prozent erhöhen. Die zu erwartenden Mehrkosten (Betrieb und Investitionen, inklusive Filtrationsstufe) für die heutigen Abwasserreinigungsanlagen sind vergleichsweise gering und liegen je nach Grösse bei 5–10 % für grössere ARAs und bei 15–25 % für kleinere ARAs.

5.4 Weiterer Handlungsbedarf

Die Ergebnisse der vom BAFU finanzierten Forschungsprojekte zeigen, dass in vielen Bereichen zusätzlicher Handlungsbedarf zum Thema Mikroverunreinigungen besteht. Die wichtigsten Punkte:

Es gibt noch einiges zu tun

- > Erstellen einer Liste mit relevanten Mikroverunreinigungen in Gewässern und systematische Erfassung der Belastungslage in der Schweiz
 - Prüfen von Optionen für die Beschaffung von bestehenden Daten
 - Entwicklung von biologischen Testverfahren zur Beurteilung der Gewässerqualität bzw. der Umweltrelevanz der Mikroverunreinigungen
 - Entwicklung der erforderlichen Analyseverfahren
- > Evaluation geeigneter technischer und organisatorischer Massnahmen zur weitergehenden Eliminierung von Mikroverunreinigungen
 - Grosstechnische Versuche mit Prozessen wie Aktivkohle oder Ozon
 - Evaluation von Verfahren zur Abwasserbehandlung bei wichtigen Emittenten
 - Einbezug von Kriterien bezüglich Nachhaltigkeit
- > Information von Herstellern und Verbrauchern von chemischen Produkten bezüglich Mikroverunreinigungen

In den letzten Jahren wurden verschiedene Methoden entwickelt, um zu beurteilen, welche chemischen Stoffe als Mikroverunreinigungen relevant sind (Priorisierungsmethoden; siehe Kapitel 4.2). Als Hauptproblem haben sich dabei fehlende Daten erwiesen, insbesondere Daten zu den ökotoxikologischen Wirkungen, dem Verhalten der Stoffe in der Umwelt sowie zu den verwendeten Mengen der Stoffe. Es sollte geprüft werden, ob Stoffmengen in der Schweiz systematisch erfasst werden sollen (z. B. Chemikalienregister). Mögliche Synergien bei der Beschaffung der benötigten Daten im Zusammenhang mit der EU-Chemikalienverordnung REACH sollten überprüft werden. Mit Hilfe der vorhandenen Priorisierungsverfahren sollten für die schweizerischen Gewässer relevante Mikroverunreinigungen identifiziert werden, die dann im Rahmen des Gewässermonitorings berücksichtigt werden können. Die für eine einheitliche Beurteilung notwendigen Kriterien sollten in Abstimmung mit der EU erarbeitet werden.

Verfügbarkeit von Daten verbessern

Eine umfassende ökotoxikologische Gewässerbewertung ist mit den bisher entwickelten ökotoxikologischen Methoden noch nicht möglich. Es werden sensitivere Methoden benötigt, die auf Mikroverunreinigungen ansprechen und somit konkrete Aussagen bezüglich Gewässerbelastung erlauben. Diese Methoden sollten für die routinemässige Überwachung und Beurteilung von Gewässerbelastungen und der Effizienz von ARAs eingesetzt werden können (standardisiert, akzeptiert, kostengünstig). Es ist damit zu rechnen, dass in den nächsten Jahren neue relevante ökotoxikologische Effekte entdeckt werden, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Bei der ökotoxikologischen Prüfung von biologisch aktiven Stoffen wie Pharmaka, Bioziden und Pflanzenschutzmitteln sollten auch Umwandlungsprodukte systematisch einbezogen werden (z. B. im Rahmen von Zulassungsverfahren). Wirkungen von Gemischen von Mikroverunreinigungen auf Wasserorganismen können auf der heutigen Datengrundlage kaum abgeschätzt werden. Auch hier sind systematische Studien und entsprechende Modelle nötig, um Mischungswirkungen besser verstehen und vorhersagen zu können.

Fehlende sensitive Biotests

Die systematische Untersuchung der Schweizer Gewässer sollte auf die relevanten Mikroverunreinigungen ausgedehnt werden (beispielsweise im Rahmen der Monitoringprogramme von Bund und Kantonen). Die damit erhaltene Datenbasis kann zur Beurteilung der Bedeutung gewisser Stoffgruppen, wie zum Beispiel der Biozide, als Mikroverunreinigungen genutzt werden und es können ebenfalls existierende Stoffmodelle validiert werden. Diese Untersuchungen sollten wichtige Umwandlungsprodukte einschliessen. Um dieses Monitoring kostengünstig durchführen zu können, werden routinemässig einsetzbare analytische Methoden benötigt, die mit geringem Aufwand die Bestimmung von möglichst vielen relevanten Mikroverunreinigungen erlauben. Zusätzlich zur chemischen Analytik sollten die oben beschriebenen ökotoxikologischen Methoden eingesetzt werden, um eine aussagekräftige Beurteilung der Gewässerbelastung vornehmen zu können.

Überwachung der Gewässer

Im Rahmen des Projektes «Mikroverunreinigungen in Gewässern» erarbeitet das BAFU gemeinsam mit kantonalen Fachstellen, Forschungsanstalten, Verbänden und der Industrie Grundlagen zur Beurteilung von technischen Massnahmen. In grosstechnischen Versuchen werden weitergehende Reinigungsstufen evaluiert (Ozonung und Behandlung mit Aktivkohle)^[73]. Die Beurteilung der Verfahren beinhaltet die Bestimmung der Elimination von zahlreichen Mikroverunreinigungen, die Überwachung der Ökotoxizität im gereinigten Abwasser sowie die Erhebung von betrieblichen und betriebswirtschaftlichen Kenngrössen. Zusätzlich werden Kriterien für die Überprüfung der Effizienz von verfahrenstechnischen Massnahmen sowie zur Beurteilung der Gewässerqualität erarbeitet.

Evaluation von technischen Massnahmen bereits in Bearbeitung

Die Erkenntnisse aus den bisherigen Arbeiten sollten dazu verwendet werden, sämtliche Akteure im Lebenszyklus von chemischen Produkten über die «Problematik der Mikroverunreinigungen» zu informieren.

Informationsbedarf

> Verzeichnisse

Abkürzungen

ARA

Abwasserreinigungsanlage

BAFU

Bundesamt für Umwelt

BAG

Bundesamt für Gesundheit

CIP AIS

Commissione Internazionale per la Protezione delle Acque Italo-Svizzere (Internationale Kommission für den Schutz der Italienisch-Schweizerischen Gewässer)

CIPEL

Commission internationale pour la protection des eaux du lac Léman (Internationale Kommission für den Schutz des Genfersees)

DOC

engl. für dissolved organic carbon, gelöster organischer Kohlenstoff

EMA

European Medicines Agency (Europäische Arzneimittelagentur)

IGKB

Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee

IKSR

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins

LAWA

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser

MEC

Measured Environmental Concentration (gemessene Umweltkonzentration)

NADUF

Nationale Daueruntersuchung der schweizerischen Fließgewässer (www.naduf.ch)

OSPAR

Commission for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic (Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordost-Atlantiks)

PCB

Polychlorierte Biphenyle

PEC

Predicted Environmental Concentration (Vorhergesagte Umweltkonzentration)

PNEC

Predicted No-Effect Concentration (Vorhergesagte maximal tolerierbare Konzentration für die Umwelt)

QAV

Quaternäre Ammoniumverbindungen

REACH

Registration, Evaluation, Authorisation and Restrictions of Chemicals (Registrierung, Evaluierung, Zulassung und Beschränkungen von Chemikalien) – Chemikalienverordnung der Europäischen Union, am 1.6.2007 in Kraft getreten

Glossar

Adsorption

Anreicherung von Stoffen aus Flüssigkeiten oder Gasen an der Oberfläche eines Festkörpers, z. B. Sediment oder Schlamm.

Androgene

Androgene sind Sexualhormone, die eine vermännlichende Wirkung haben.

Bestimmungsgrenze

Tiefste Konzentration die in Umweltproben mit den aktuellen Methoden noch nachgewiesen werden kann (engl. LOD, limit of detection). Die kleinste Konzentration einer Substanz, die in einer Wasserprobe nachgewiesen werden kann, hängt ab von der Matrix des Mediums (natürliche Gewässer oder Abwasser), den Aufbereitungsschritten und den eingesetzten analytischen Verfahren.

Bioakkumulation

Bioakkumulation ist die Anreicherung einer Substanz in einem Organismus durch Aufnahme aus dem umgebenden Medium (z. B. Wasser bei Fischen) oder über die Nahrung.

Endpunkte, toxikologische

Ein toxikologischer Endpunkt ist die spezifische oder unspezifische Wirkung eines Stoffes auf einen Organismus, wie beispielsweise die hormonaktive Wirkung, oder der Tod eines Organismus.

Exposition

Unter Exposition versteht man das Ausgesetztsein von Mensch und Umwelt gegenüber Umwelteinflüssen (z. B. Kontakt mit einem chemischen Stoff).

Hormonaktive Stoffe

Ein Hormon ist ein biochemischer Botenstoff, der innerhalb eines Lebewesens Informationen von einem Organ oder Gewebe zum anderen übermittelt und auf diese Weise Organe oder Stoffwechselfvorgänge reguliert. Hormonaktive Stoffe sind somit alle Stoffe, die eine solche hormonelle Wirkung zeigen. Nebst den vom Organismus selbst gebildeten Hormonen können auch Stoffe aus der Umwelt, die zufällig eine solche hormonelle Wirkung haben (z. B. bestimmte Weichmacher aus Kunststoffen oder Medikamentenrückstände im Abwasser), von aussen auf ein Lebewesen einwirken und bereits in sehr niedrigen Konzentrationen störend in Entwicklung oder Stoffwechsel eingreifen.

Measured Environmental Concentration (MEC)

Gemessene Umweltkonzentration

Metabolit

Siehe Umwandlungsprodukt

Ökomorphologie

Die Ökomorphologie beschreibt die Gestalt eines Gewässers und dessen Uferbereiche nach ökologischen Gesichtspunkten. Abwechslungsreichtum und Vielfalt bestimmen den Wert eines Gewässers für die Natur ebenso mit wie die chemische Wasserqualität. Beispiele von Gestaltungsmerkmalen: Kiesbänke, kleinräumiger Wechsel aus schnell und langsam fliessenden Bereichen, Ufervegetation, Durchgängigkeit (Stauwehre und Schwellen als Wanderungshindernisse).

Ökotoxikologie

Ökotoxikologie ist eine fächerübergreifende Wissenschaft, die sich mit den Auswirkungen von Stoffen auf die belebte Umwelt befasst.

Ökotoxizität

Unter Ökotoxizität versteht man die nachteilige Auswirkung von chemischen Stoffen auf Organismen.

Östrogen

Östrogene sind Sexualhormone, die eine verweiblichende Wirkung haben.

Persistenz

Langlebigkeit; Eigenschaft von Stoffen, unverändert durch physikalische, chemische oder biologische Prozesse in der Umwelt zu verbleiben.

persistent

Adjektiv von Persistenz

Predicted Environmental Concentration (PEC)

Vorhergesagte Umweltkonzentration

Predicted No Effect Concentration (PNEC)

Maximal tolerierbare Umweltkonzentration

Priorisierung

Einordnen nach Wichtigkeit

Q₃₄₇

Abflussmenge, die, gemittelt über zehn Jahre, durchschnittlich während 347 Tagen (95 %) des Jahres erreicht oder überschritten wird und die durch Stauung, Entnahme oder Zuleitung von Wasser nicht wesentlich beeinflusst ist (gemäss Gewässerschutzgesetz Art. 4 Bst. h).

Quantifizierungsgrenze

Kleinste Konzentration, die in einer Umweltprobe mit den aktuellen Methoden noch in Zahlen zuverlässig quantifiziert werden kann (engl. LOQ, limit of quantification)

Quarternäre Ammoniumverbindungen

Als Biozid und Tensid eingesetzte Gruppe von Chemikalien

Transferkoeffizient

Der Transferkoeffizient beziffert den prozentualen Anteil eines Stoffes, der von einem Umweltkompartiment in ein anderes übertragen wird, z. B. bei Pharmaka derjenige Anteil der eingenommenen Wirkstoffmenge, die vom Körper unverändert ausgeschieden wird und über die Siedlungsentwässerung in die ARA gelangt.

Umwandlungsprodukt

Ein Umwandlungsprodukt ist ein chemischer Stoff, der durch einen chemischen und/oder biologischen Prozess aus einem Ausgangsstoff entsteht. Ein Umwandlungsprodukt kann ein Reaktionsprodukt (Konjugat) oder ein Abbauprodukt sein. Ein Konjugat eines Stoffes entsteht durch Reaktion mit einem anderen (z. B. biologischen) Molekül. Stammt das Umwandlungsprodukt aus einer biologischen Umwandlung (=Metabolisierung), wird es als **Metabolit** bezeichnet.

Abbildungen

Abb. 1

Vereinfachte Darstellung der Eintragspfade für Mikroverunreinigungen in Gewässer

37

Abb. 2

Abwasserexport aus der Schweiz

43

Abb. 3

Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Modellrechnung, basierend auf mittleren landesweiten Verbrauchsmengen einer Substanz

49

Abb. 4

Lokale Verdünnungsfaktoren für die ARAs der Schweiz

51

Abb. 5 Carbamazepin und Diclofenac in Fließgewässern	53	Tab. 3 Substanzen, auf welche das vorgestellte Modell anwendbar ist	57
Abb. 6 Konzentrationen von Carbamazepin (links) und Diclofenac (rechts) für die Ausgangssubstanz alleine (oben) und das gesamte Risikopotenzial inklusive Metabolite (unten)	54	Tab. 4 Unterschiedliche Ausbaustrategien	59
Abb. 7 Links: Auswertung von 20 Jahren Abflussdaten in der Ergolz bei Liestal. Rechts: Theoretische Überschreitungsdauer des PNEC _{DCF} für 20 Abflussmessstationen	55	Tab. 5 Forschungsprojekte MicroPoll1	62
Abb. 8 Priorisierung von Bioziden in der Schweiz	65	Tab. 6 Priorisierungsmethoden-Vergleich	63
Abb. 9 Ausscheidungsgrad von Krebsmitteln (Zytostatika) via Urin	68	Tab. 7 Massnahmen zur Reduktion der Gewässerbelastung mit Mikroverunreinigungen und erwartete Wirkungen	93
Abb. 10 Persistenz für 16 Pflanzenschutzmittel	71	Tab. 8 Erwartete Effizienz von Massnahmen zur Reduktion von Emissionen einzelner Stoffgruppen	94
Abb. 11 Übersicht Ökotoxizitätstests	73		
Abb. 12 YES-Test zeigt Hormonaktivität	75		
Abb. 13 ARAs-Einzugsgebiete der Schweiz	78		
Abb. 14 Vergleich der gemessenen mittleren Frachten an Röntgenkontrastmitteln mit den Verbrauchszahlen im Kantonsspital Winterthur	81		
Abb. 15 Alternatives, dezentrales System der Siedlungsentwässerung	84		
Abb. 16 Verteilung der Anzahl Einwohner auf die ARA-Einzugsgebiete 2006 (schwarz) und nach der «Vision 2050»	86		
Tabellen		Literatur	
Tab. 1 Zusammenfassung der Werte aus der Datenbank für organische Mikroverunreinigungen	46	[1] Müller S. 2007: Herausforderungen beim Management der Ressource Wasser und der Gewässer. Gas, Wasser, Abwasser. 11: p. 829–830.	
Tab. 2 Modelleingangsrößen für die Medikamente Diclofenac und Carbamazepin	52	[2] Müller E. 2007: Als die Bäche noch schäumten. Gas Wasser Abwasser, GWA. 9: p. 717–719.	
		[3] Hollender J. 2007: Mikroverunreinigungen – Vorkommen in Gewässern der Schweiz und Bewertung. Gas, Wasser, Abwasser. 11: p. 843–852.	
		[4] Aerni H.R., Kobler B., Rutishauser B.V., Wettstein F.E., Fischer R., Giger W., Hungerbühler A., Marazuela M.D., Peter A., Schonenberger R., Vogeli A.C., Suter M.J.F., Eggen R.I.L. 2004: Combined biological and chemical assessment of estrogenic activities in wastewater treatment plant effluents. Anal. Bioanal. Chem. 378: p. 688–696.	
		[5] Kidd K.A., Blanchfield P.J., Mills K.H., Palace V.P., Evans R.E., Lazorchak J.M., Flick R.W. 2007: Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS). 104(21): p. 8897–8901.	
		[6] Siegrist H. 2007: Mikroverunreinigungen – Technische Verfahren zur Elimination. Gas, Wasser, Abwasser. 11: p. 861–867.	
		[7] Schärer M. 2007: Mikroverunreinigungen – Erarbeitung einer Strategie. Gas, Wasser, Abwasser. 11: p. 835–841.	

- [8] Schlupe M., Thomann M., Häner A., Gälli R. 2006: Organische Mikroverunreinigungen und Nährstoffe – Eine Standortbestimmung für die Siedlungswasserwirtschaft Schriftenreihe Umwelt. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- [9] Stockholmer Übereinkommen über persistente organische Schadstoffe (POP-Konvention) 2007: In Kraft getreten für die Schweiz am 17. Mai 2004, Stand am 24. Dezember 2007: p. 54.
- [10] Rat der Europäischen Union, Richtlinie des Rates vom 27. Juli 1976 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten für Beschränkungen des Inverkehrbringens und der Verwendung gewisser gefährlicher Stoffe und Zubereitungen (76/769/EWG). 2006: p. 202.
- [11] Der Schweizerische Bundesrat, Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV) vom 18. Mai 2005 (Stand am 1. Januar 2008). 2008: p. 114.
- [12] Europäisches Parlament 2007: Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission: p. 278.
- [13] Die Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft 1991: Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG) (Stand am 7. November 2006): p. 30.
- [14] Der Schweizerische Bundesrat 2006: Gewässerschutzverordnung (GSchV) vom 28. Oktober 1998 (Stand am 7. November 2006): p. 58.
- [15] Council of the European Union 2007: Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on environmental quality standards in the field of water policy and amending Directive 2000/60/EC. Council of the European Union: p. 20.
- [16] Jahnel J., Neamtu M., Schudoma D., Frimmel F.H. 2006: Bestimmung von Umweltqualitätsnormen für potenziell gewässerrelevante Stoffe. Acta hydrochim. hydrobiol. 34: p. 389–397.
- [17] Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) 2007: Mikroverunreinigungen aus der Siedlungswasserwirtschaft – Zusammenfassung der Ergebnisse des Workshops: p. 4.
- [18] Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG). Modul-Stufen-Konzept. Verfügbar unter: <http://www.modul-stufen-konzept.ch/d/index.htm>.
- [19] Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) 2007: Stoffliste Rhein 2007: p. 15.
http://www.iksr.org/index.php?id=57&no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=233&tx_ttnews%5BbackPid%5D=53&cHash=f45e951ef3.
- [20] Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) 2007: Arzneimittel in der Umwelt – Stellungnahme. Berlin: p. 51.
www.umweltrat.de.
- [21] Brorström-Lundén E., Svenson A., Viktor T., Woldegiorgis A., Remberger M., Kaj L., Dye C., Bjerke A., Schlabach M. 2008: Measurements of Sucralose in the Swedish Screening Program 2007: PART I; Sucralose in surface waters and STP samples. Swedish Environmental Research Institute. Stockholm. p. 26.
http://www.naturvardsverket.se/upload/02_tillstandet_i_miljon/Milj%3%b6gifter/sukralos_ivl_08.pdf.
- [22] Lubick N. 2008: Artificial sweetener persists in the environment. Science News, Environmental Science & Technology. 42(9): p. 3125–3126.
- [23] Gälli R., Braun C. 2008: Integrative Risk Assessment of Endocrine Disruptors in Switzerland. Chimia (Mai 2008).
- [24] NRP50 – Endocrine Disruptors: Relevance to Humans, Animals and Ecosystems. Verfügbar unter: <http://www.nfp50.ch/>.
- [25] Trachsel M. 2008: Konsensplattform «Hormonaktive Stoffe in Abwasser und Gewässern» Schlussdokument. Nationales Forschungsprogramm «Hormonaktive Stoffe». Basel: p. 15.
- [26] Suter M.J.F., Holm P. 2004: Dem Fischrückgang auf der Spur. EAWAG, BUWAL, Kantone, SGCI, SFV, FIWI, Uni Basel.
www.fischnetz.ch.
- [27] Bundesamt für Umwelt (BAFU). Nationale Daueruntersuchung der schweizerischen Fliessgewässer, NADUF. Verfügbar unter: www.naduf.ch.
- [28] Bürgi D., Giger W., Knechtenhofer L., Meier I. 2007: Biozide als Mikroverunreinigungen in Abwasser und Gewässern – Teilprojekt 1: Priorisierung von bioziden Wirkstoffen. FRIEDLIPARTNER AG. Zürich. p. 189.
- [29] Ort C., Siegrist H., Hosbach H., Morf L., Scheringer M., Studer C. 2007: Mikroverunreinigungen – Nationales Stoffflussmodell. Gas, Wasser, Abwasser. 11: p. 853–859.
- [30] Herlyn A., Maurer M. 2007: Status quo der Schweizer Abwasserentsorgung – Kosten, Zustand und Investitionsbedarf. Gas, Wasser, Abwasser. 3: p. 171–176.

- [31] Lienert J., Güdel K., Escher B. 2007: Screening Method for Ecotoxicological Hazard Assessment of 42 Pharmaceuticals Considering Human Metabolism and Excretory Routes. *Environmental Science & Technology*, 41(12): p. 4471–4478.
- [32] Ternes T., Joss A. 2006: Human Pharmaceuticals, Hormones and Fragrances: The challenge of micropollutants in urban water management, IWA Publishing.
- [33] Staub E., Blardone M., Droz M., Hertig A., Meier E., Soller E., Steiner P., Zulliger D. 2003: Angelfang, Forellenbestand und Einflussgrößen: Regionalisierte Auswertung mittels GIS. Fischnetz-Publikation BUWAL/EAWAG Dübendorf. (Projekt 02/03).
- [34] Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2008: Fliesszeiten in Schweizer Flüssen (Abschätzung, interner Bericht). Bern.
- [35] Buser H.R., Poiger T., Müller M.D. 1998: Occurrence and fate of the pharmaceutical drug diclofenac in surface waters: Rapid photodegradation in a lake. *Environmental Science & Technology*, 32(22): p. 3449–3456.
- [36] Giger W., Schaffner C., Kohler H.P.E. 2006: Benzotriazole and tolyltriazole as aquatic contaminants. 1. Input and occurrence in rivers and lakes. *Environmental Science & Technology*, 40(23): p. 7186–7192.
- [37] IMS Health GmbH 2005: Verkaufszahlen zu Pharmawirkstoffen.
- [38] Ort C., Siegrist H., Hollender J.: Model-Based Evaluation of Reduction Strategies for Micropollutants from Wastewater Treatment Plants in Complex River Networks. *Environmental Science & Technology*, 43(9): p. 3214–3220.
- [39] Europäische Kommission 2006: Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik und zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG.
- [40] Internationale Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke im Rheineinzugsgebiet (IAWR) 2003: IAWR – Rhein – Memorandum 2003. D-50823 Köln. <http://www.iawr.org>.
- [41] Umweltbundesamt 2003: Bewertung der Anwesenheit teil- oder nicht bewertbarer Stoffe im Trinkwasser aus gesundheitlicher Sicht. Empfehlung des Umweltbundesamtes nach Anhörung der Trinkwasserkommission beim Umweltbundesamt. Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz. 46(3): p. 249–251.
- [42] Chèvre N., Loepfe C., Fenner K., Singer H., Escher B.I., Stamm C. 2006: Pestizide in Schweizer Oberflächengewässern – Wirkungsbasierte Qualitätskriterien. *GWA*, 2006(4): p. 297–307.
- [43] Escher B., Vermeirssen E. 2008: Mikroverunreinigungen in Schweizerischen Fließgewässern. Konzepte zur Beurteilung von Mischungen und Einbezug von Mischungen in die Ableitung von toxikologisch begründeten Qualitätskriterien für östrogenartig wirkende Stoffe. Bericht zuhanden Bundesamt für Umwelt (BAFU), Strategie MicroPoll, Eawag, Dübendorf, Schweiz.
- [44] IKSR – Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Ableitung von Umweltqualitätsnormen für die Rhein-relevanten Stoffe. Squa(1)08–04d.doc.
- [45] Lepper P. 2005: Manual on the Methodological Framework to Derive Environmental Quality Standards for Priority Substances in accordance with Article 16 of the Water Framework Directive (2000/60/EC). Fraunhofer-Institute Molecular Biology and Applied Ecology. Schmallenberg, Deutschland.
- [46] Ferrari B., Paxeus N. et al. 2003: Ecotoxicological impact of pharmaceuticals found in treated wastewaters: study of carbamazepine, clofibric acid, and diclofenac. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 56(3): p. 450.
- [47] Ferrari B., Mons R. et al. 2004: Environmental risk assessment of six human pharmaceuticals: Are the current environmental risk assessment procedures sufficient for the protection of the aquatic environment? *Environmental Toxicology and Chemistry*, 23(5): p. 1344–1354.
- [48] Yamashita N., Yasojima M., Nakada N., Myaima K., Komori K., Y Suzuki Y., Tanaka H. 2006: Effects of antibacterial agents, levofloxacin and clarithromycin, on aquatic organisms. *Water Science and Technology*, 53(11): p. 65–72.
- [49] Hunziker 2008: Massnahmen in ARA zur weitergehenden Elimination von Mikroverunreinigungen. Firma Hunziker i.A. Bundesamt für Umwelt BAFU. Winterthur. p. 74. <http://www.bafu.admin.ch/gewaesserschutz/03716/03720/04348/index.html?lang=de>.
- [50] Morf L., Buser A., Gubler A. 2007: Biozide als Mikroverunreinigungen in Abwasser und Gewässern – Teilprojekt 2: Stoffflussanalyse für die Schweiz: Quartäre Ammoniumverbindungen. GEO Partner AG. Zürich. p. 128.
- [51] Europäisches Parlament 1998: Richtlinie 98/8/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Februar 1998 über das Inverkehrbringen von Biozid-Produkten: p. 63.
- [52] Lienert J., Escher B. 2007: Verringerung der Schadstoffbelastung durch Pharmaka mittels Urinseparierung und ökotoxikologische Relevanz. Eawag, Dübendorf. p. 18.
- [53] Lienert J., Bürki T., Escher B. 2007: Reducing Micropollutants with Source Control: Substance Flow Analysis of 212 Pharmaceuticals in Feces and Urine. *Water Science and Technology*, 56(5): p. 87–96.

- [54] Escher B., Bramaz N., Richter M., Lienert J. 2006: Comparative Ecotoxicological Hazard Assessment of Beta-Blockers and Their Human Metabolites Using a Mode-of-Action-Based Test Battery and a QSAR Approach. *Environmental Science & Technology*. 40(23): p. 7402–7408.
- [55] Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG). Novaquatis. Verfügbar unter: www.novaquatis.eawag.ch.
- [56] Keil F. 2006: Medikamentenentsorgung in deutschen Haushalten – Erste repräsentative Umfrage zur Entsorgung von Arzneimitteln. Verfügbar unter: <http://www.isoe.de/ftp/presse/PM0906.pdf>.
- [57] European Medicines Agency (EMA) 2006: Guideline on the environmental risk assessment of medicinal products for human use. EMA. p. 12.
- [58] Ankley G.T., Brooks B.W., Huggett D.B., Sumpter J.P. 2007: Repeating history: pharmaceuticals in the environment. *Environmental Science & Technology*. 41(24): p. 8211–8217.
- [59] Scheringer M., Fenner K. 2007: Priorisierung von Umwandlungsprodukten von Mikroverunreinigungen. ETH Zürich, Eawag. Zürich. p. 16.
- [60] Gasser L., Fenner K., Scheringer M. 2007: Indicators for the Exposure Assessment of Transformation Products of Organic Micropollutants. *Environmental Science & Technology*. 41(7): p. 2445–2451.
- [61] Schweigert N. 2006: Wie können Schadstoffeinflüsse auf Fließgewässer nachgewiesen werden? *Eawag News* 51. Abwasser und Gewässerschutz Eidgenössische Anstalt für Wasser. p. 3. www.modul-stufen-konzept.ch/download/en51d_schweig.pdf.
- [62] Escher B.I., Quayle P., Muller R., Schreiber U., Mueller J.F. 2006: Passive sampling of herbicides combined with effect analysis in algae using a novel high-throughput phytotoxicity assay (Maxi-Imaging-PAM). *Journal of Environmental Monitoring*. 8: p. 456–464.
- [63] Hertzberg R.C., MacDonell M.M. 2002: Synergy and other ineffective mixture risk definitions. *The Science of The Total Environment*. 288(1–2): p. 31–42.
- [64] Arrhenius A., Backhaus T., Grönvall F., Junghans M., Scholze M., Blanck H. 2006: Effects of Three Antifouling Agents on Algal Communities and Algal Reproduction: Mixture Toxicity Studies with TBT, Irgarol, and Sea-Nine. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 50: p. 335–345.
- [65] Fernandez-Alba A.R., Guil M.D. H., Lopez G.D., Christi Y. 2002: Comparative evaluation of the effects of pesticides in acute toxicity luminescence bioassays. *Analytica Chimica Acta*. 451: p. 195–202.
- [66] Knauer K. 2007: Methodenentwicklung zum Effektmonitoring in aquatischen Ökosystemen. Universität Basel. Basel. p. 15.
- [67] Holm P. 2008: Methodenentwicklung zum Effektmonitoring in aquatischen Ökosystemen. Universität Basel. Basel. p. 17.
- [68] Maurer M., Herlyn A. 2006: Zustand, Kosten und Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung. Eawag. Dübendorf. p. 63.
- [69] Moser R. 2007: Mikroverunreinigungen – Vorbehandlung von Spitalabwasser. *Gas, Wasser, Abwasser*. 11: p. 869–875.
- [70] Sprecher K., Wieser M. 2007: Chancen für den Wandel zu einer regenerativen Abwasserwirtschaft. GEO Partner AG, Jauslin + Stebler Ingenieure AG. Zürich. p. 194.
- [71] Chaix O. 2007: Assainissement en Suisse – Régionalisation et professionnalisation. *Gas, Wasser, Abwasser*. 11: p. 877–886.
- [72] Europäisches Parlament 2004: Verordnung (EG) Nr. 648/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 31. März 2004 über Detergenzien: p. 35.
- [73] Bundesamt für Umwelt (BAFU). Projekt «Strategie MicroPoll»: Reduktion von Mikroverunreinigungen aus der Siedlungsentwässerung. Verfügbar unter: <http://www.bafu.admin.ch/gewaesserschutz/03716/03720/index.html?lang=de>.