

Einflüsse des urbanen Raums auf Oberflächengewässer

Brigitte Helmreich

Zusammenfassung

Der urbane Raum hat sowohl quantitativ wie auch qualitativ einen erheblichen Einfluss auf Oberflächengewässer. Historisch wurden sowohl das Schmutzwasser aus den Haushalten und der Industrie als auch die Niederschlagsabflüsse befestigter Flächen über die Kanalisation abgeleitet und nach einer Behandlung punktuell in die Oberflächengewässer eingeleitet. Aufgrund unvollständiger Behandlung in Kläranlagen (Misch- und Trennsystem) oder Regenklärbecken (Trennsystem) sowie durch Mischwasserüberläufe gelangen zum Teil erhebliche Frachten an gewässerrelevanten Stoffen in die Oberflächengewässer. Stoffliche Belastungen aus den Niederschlagsabflüssen befestigter Flächen sind insbesondere durch Dachmaterialien zu erwarten, die aus gewässerrelevanten Stoffen bestehen oder diese beinhalten. Ebenso gibt es befestigte Flächen, die aufgrund ihrer Nutzung verunreinigt werden (z.B. durch Verkehrsaktivitäten). Diese Stoffe werden mit den Regenereignissen abflusswirksam. Gelangen Mischwasserüberläufe in Oberflächengewässer, so werden nicht nur niederschlagsbedingte Stoffe eingetragen, sondern auch das Schmutzwasser aus den Haushalten und der Industrie. Auch in Kläranlagenabläufen ist trotz weitestgehender Behandlung mit dem Eintrag von Stoffen in die Oberflächengewässer zu rechnen. Umweltqualitätsnormen geben Hinweise zum Handlungsbedarf. Durch die Entseiegelung befestigter Flächen kann im urbanen Raum der Eintrag von Schadstoffen in Oberflächengewässer reduziert werden.

Summary

Impact of urban space on surface waters

Urban space has a significant impact on surface waters, both quantitatively and qualitatively. Historically, both the sewage from households and industry and the stormwater runoff from paved areas were drained via the sewage system and, after treatment, selectively discharged into the surface water. Due to incomplete treatment in sewage treatment plants (mixed and separated system) or rainwater treatment tanks (separated system) as well as through combined water overflows, some water-relevant substances are discharged into the surface waters. Pollutant loads from the stormwater runoff of paved areas are to be expected in particular from roofing materials that consist of or contain substances relevant to water quality. Besides, there are paved areas that are contaminated due to their use (e.g. through traffic activities). If mixed water overflows get into surface waters, not only stormwater-related substances are carried in, but also sewage from households and industry. Despite extensive treatment, the discharge of substances into surface waters can also be expected in sewage treatment plant effluents. Environmental quality standards provide information on the need for action. In urban areas, the unsealing of paved areas can reduce the entry of pollutants into surface waters.

✉ Prof. Dr. Brigitte Helmreich, Technische Universität München, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft, Am Coulombwall 3, 85748 Garching; b.helmreich@tum.de

Einführung

Beim Eintrag von Schadstoffen in Oberflächengewässer wird zwischen diffusen Quellen und Punktquellen unterschieden. Zu den diffusen Quellen zählen z. B. Niederschlagsabflüsse befestigter Flächen (Straßen, Dächer, etc.), die nicht kanalisiert oder versickert werden, Schiffsverkehr und Abflüsse von Flächen, die für Ackerbau oder Tierhaltung genutzt werden. Zu den Punktquellen, auf die sich dieser Beitrag im Wesentlichen beschränken wird, gehören die stofflichen Einträge aus Regenwasserkanälen, aus Mischwasserüberläufen und aus den Abläufen kommunaler Kläranlagen sowie – im Folgenden nicht weiter betrachtet – Abläufe industrieller Kläranlagen.

Typischerweise gibt es zwei Arten von Kanalsystemen, die Trenn- und die Mischkanalisation. Beide haben Vor- und Nachteile, wobei in Deutschland nach § 55 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) ein Neubau von Mischsystemen i. d. R. nicht mehr erlaubt ist, da Niederschlagswasser ortsnah versickert, verrieselt oder direkt oder über eine Kanalisation ohne Vermischung mit Schmutzwasser in ein Gewässer eingeleitet werden soll, soweit dem weder wasserrechtliche noch sonstige öffentlich-rechtliche Vorschriften noch wasserwirtschaftliche Belange entgegenstehen.

Das Trennsystem besteht aus zwei Kanälen: Einem Kanal für Schmutzwasser aus den Haushalten und ggf. der Industrie sowie einem zweiten Kanal für gesammeltes Niederschlagswasser befestigter Flächen z. B. von Straßen und Dächern. Das Schmutzwasser wird in Kläranlagen weitestgehend gereinigt und anschließend in die Gewässer eingeleitet, die Ausläufe der Regenwasserkanäle werden direkt, ggf. nach einer zentralen Behandlung in Regenklärbecken, in die Oberflächengewässer eingeleitet. Bei der Behandlung in Regenklärbecken wird lediglich ein Teil der partikulären Stoffe, nicht aber gelöste Stoffe wie beispielsweise gelöste Schwermetalle entfernt. Auch feinstpartikuläre Stoffe, auf denen oftmals Schwermetalle gebunden sind, können sich in Regenklärbecken nur unzureichend absetzen.

Im Mischsystem wird das Schmutzwasser mit den gesammelten Niederschlagsabflüssen gemischt und wird als sogenanntes Mischwasser in einem Kanal transportiert, wodurch das Regenwasser ebenfalls zu Abwasser wird. Das Mischwasser wird über Kläranlagen weitestge-

hend gereinigt und danach in die Oberflächengewässer eingeleitet. Bei starken Regenereignissen reicht jedoch das Volumen des Mischwasserkanals aufgrund der Dimensionierung nicht aus, daher werden Regenrückhalteräume oder Regenüberlaufbecken in diesem Kanalsystem benötigt. Bei Regenüberlaufbecken kommt es zu einer gezielten direkten Mischwassereinleitung in die Oberflächengewässer, d. h. unbehandeltes Abwasser (Schmutzwasser mit Niederschlagswasser gemischt) wird in die Gewässer abgeschlagen.

Sowohl im Trenn- wie auch im Mischsystem werden die Kläranlagenabläufe (Klarwasser) in die Gewässer eingeleitet. Der Klarwasseranteil eines Oberflächengewässers kann dabei je nach der Größe des Gewässers sehr unterschiedlich sein (Drewes et al. 2018).

Die zentrale Ableitung des Niederschlagswassers aus Siedlungen und dessen Einleitung in ein Oberflächengewässer geraten immer häufiger in die Kritik, da nicht nur Schadstoffe eingetragen werden, sondern auch der natürliche lokale Wasserhaushalt in den Siedlungen unterbrochen wird. Dieser wird durch einen vor Ort charakteristischen Anteil an Verdunstung, Versickerung und Abfluss bestimmt. Heute wird oft vom Konzept der »wassersensiblen« bzw. »wasserbewussten Stadt« gesprochen. Damit ist u. a. gemeint, das Wasser verstärkt in der Stadt zu halten, so dass der lokale Wasserhaushalt (Verdunstung, Versickerung und Abfluss) vor Ort unterstützt wird.

Stoffliche Belastungen in Regenwassereinleitungen

Regenwasser selbst enthält typischerweise Verunreinigungen durch atmosphärische Hintergrundbelastungen (Primärbelastung), aber vor allem kommen Verunreinigungen durch den Kontakt mit versiegelten (befestigten) Flächen wie Dächer, Fassaden, Straßen, Hofflächen und Parkplätze hinzu (Sekundärbelastung). Der Kontakt mit befestigten Flächen und damit die Schadstoffbelastung kann mithilfe der wassersensiblen Stadt reduziert werden, indem bei baulichen Aktivitäten auf die Versiegelung von Flächen möglichst verzichtet wird, so dass es gar nicht erst zu dieser Sekundärkontamination kommen kann. Eine weitere Möglichkeit, die aquatische Umwelt zu schützen, ist die dezentrale

Behandlung von Niederschlagsabflüssen vor Ort. Wenn möglich, soll anschließend verdunstet und versickert werden.

Schadstoffe aus Dachabflüssen

Typische Beispiele für Dächer, von denen gewässerrelevante Stoffe abgeschwemmt werden, sind Kupfer- und Zinkdächer (Galster & Helmreich 2022). Hier ist mit hohen Konzentrationen an gelöstem Kupfer bzw. Zink im mg/L-Bereich im Niederschlagsabfluss zu rechnen. Ähnlich verhält es sich mit Holzschindeldächern, die mit zink- oder kupferhaltigen Holzschutzmitteln behandelt wurden (Degenhart & Helmreich 2022). Diese geben Schwermetalle wie Zink oder Kupfer ab, ebenfalls in gelöster Form. Aber auch Gründächer, die ein Tool der wassersensiblen Stadtplanung sind, können Schadstoffe mit dem Niederschlagabfluss abgeben, wenn sie z. B. auf Bitumendachbahnen aufgebracht sind, welche Mecoprop (MCP, Methylchlorphenoxypropionsäure) als Durchwurzelungsschutz enthalten (Burkhardt et al. 2007). Um zu wirken, muss MCP in Lösung gehen und fließt dann im $\mu\text{g/L}$ - bis mg/L-Bereich vom Dach ab.

Als Beispiel für den stofflichen Eintrag in Oberflächengewässer aus Niederschlagsabflüssen werden im Folgenden Schwermetalldächer betrachtet. Auch wenn auf einem Kupferdach bereits eine schöne blaue Patina entstanden ist, wäscht sich unter typischen mitteleuropäischen Klimabedingungen immer noch jährlich durchschnittlich $1,3 \text{ g Cu/m}^2$ Dachfläche ab. Bei Zinkdächern liegt die jährliche Abschwemmrates bei $3,0 \text{ g Zn/m}^2$ (Hillenbrand et al. 2005). Gemäß einer Studie des Umweltbundesamtes liegt die Emission von Kupferdachabflüssen in Deutschland bei jährlich $85,2 \text{ t Cu}$, diejenige von Zinkdächern bei 682 t Zn ; davon gelangen jährlich

$58,9 \text{ t Cu}$ bzw. 481 t Zn über Regenwasserkanäle, Mischwasserüberläufe und Kläranlagenabläufe in Oberflächengewässer (Hillenbrand et al. 2005, Tab. 1). Diese enorme Menge ließe sich reduzieren, wenn das Niederschlagswasser vor Ort behandelt und versickert bzw. nach der Behandlung ins Oberflächengewässer eingeleitet wird.

Biozide aus Fassadenabflüssen

Seit einigen Jahren rücken auch die Fassaden mehr in den Fokus, da auf ihnen Biozide zur Unterdrückung von Algen-, Moos- und Schimmelbildung aufgetragen werden. Auch diese müssen in Lösung gehen, um zu wirken, sollen aber auch möglichst lange in der Fassade bleiben. Dadurch kommt es über viele Jahre zu einer Ausschwemmung der Biozide, von denen einige biologisch schwer abbaubar sind. Die Fassadenabflüsse werden meist vor Ort versickert, gelangen aber zum Teil auch in die Kanalisation. Zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik haben wir biozidhaltige Fassadenabflüsse untersucht. Die Konzentrationen der eingesetzten Biozide Carbendazim, Octylisothiazolinon (OIT) und Diuron lagen im Bereich von mehreren $100 \mu\text{g/L}$ (Vega-Garcia et al. 2020, Abb. 1). Werden diese Stoffe gesammelt und über die Kanalisation abgeführt, landen sie letztendlich in den Fließgewässern, sei es über den Regenwasserkanal oder über die Kläranlagenabläufe, da sie in der Kläranlage nicht biologisch abbaubar sind.

Aber auch der Abbau derartiger Stoffe heißt nicht, dass nicht noch problematische Metabolite (Transformationsprodukte) vorhanden sein können. Das Octylisothiazolinon z. B. ist auch nach dem Abbau der Seitenkette noch ein stabiles, organisches Molekül, das lediglich jetzt nicht mehr als solches gemessen wird.

Tab. 1. Kupfer- und Zinkeinträge aus Metalldachabflüssen in Oberflächengewässer und Böden Deutschlands; * stoffliche Klärschlammverwertung sowie Dachabläufe ohne Anschluss an eine Kanalisation. – Nach Hillenbrand et al. 2005.

	Kupfer [t/a]	Zink [t/a]
Summe Emissionen im Dachablaufwasser	85,2	682
Summe der Einträge in Oberflächengewässer	58,9	481
Regenwasserkanäle	32,1	257
Mischwasserüberläufe	21,4	172
Kläranlagenabläufe	5,4	52
Summe der Einträge in den Boden*	17,1	132

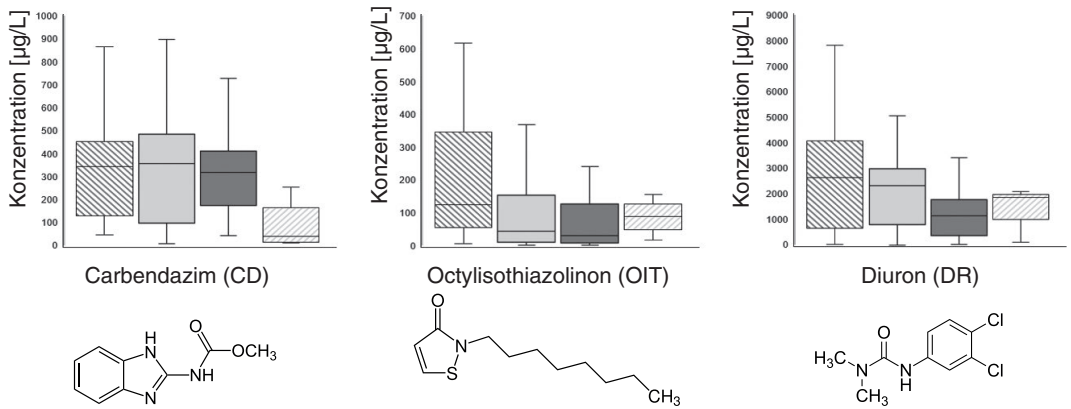


Abb. 1. Konzentrationen von Carbazidazim, Octylisothiazolinon und Diuron im Niederschlagsabfluss von Modellhaus-Fassaden, die nach verschiedenen Himmelsrichtungen orientiert sind. Ausrichtung der Fassade: \diagup Nord, \blacksquare Süd, \blacksquare West, \square Ost. – Nach Vega-Garcia et al. 2020.

Abflüsse aus Verkehrsflächen

Bei den Verkehrsflächenabflüssen kommen zu Zink und Kupfer weitere Schwermetalle wie Blei, Nickel, Chrom, Cadmium, Palladium und Platin hinzu sowie organische Stoffe (Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe [PAK], Benzothiazole, Mineralölkohlenwasserstoffe, Antiklopfmittel [Methyl-/Ethyl-tert-butylether], Pflanzenschutzmittel) und, im Winterdienst, Chloride und Cyanide, die als Antisackmittel in Tausalzen eingesetzt werden.

Wie stark sich das Verbot von verbleitem Benzin (1988) bzw. Superbenzin (1996) und das Verbot von Bleigewichten in Rädern (bis 2005) ausgewirkt haben, zeigt eine Literaturstudie aus unserem Haus (Huber et al. 2016; Abb. 2). Bei Zink und Kupfer ist dies leider nicht der Fall, Zink wird als Zinkoxid zum Vulkanisieren der Reifen und Kupfer für die Bremscheiben eingesetzt.

Bei Kupfer und bei Zink ist die Emission mit 932 bzw. 2078 Tonnen/Jahr insgesamt sehr hoch (Tab. 2, Hillenbrand et al. 2005), aber das meiste davon landet nicht in Oberflächengewässern (103 bzw. 306 t/a), sondern wird außerorts z. B. auf den Autobahnen und Landstraßen emittiert, wo es nicht über eine Kanalisation gesammelt und eingeleitet wird, sondern i. d. R. über die Bankette in den Boden bzw. zum Grundwasser versickert.

Stoffliche Belastungen in Kläranlagenabläufen

Trotz mehrstufiger Behandlung in Kläranlagen wird das Schmutzwasser oder das Mischwasser nicht vollständig gereinigt. Im Kläranlagenablauf verbleiben biologisch schwer oder nicht abbaubare organische Stoffe, ein Teil der Nährstoffe und einige Schwermetalle. Der Eintrag von

Tab. 2. Kupfer- und Zinkeinträge durch Verkehrsflächenabflüsse in Oberflächengewässer und Böden Deutschlands. * Stoffliche Klärschlammverwertung sowie Verkehrsflächenabläufe ohne Anschluss an eine Kanalisation. – Nach Hillenbrand et al. 2005.

	Kupfer [t/a]	Zink [t/a]
Summe Emissionen Fahrzeugverkehr	932	2078
Summe der Einträge in Oberflächengewässer	103	306
Regenwasserkanäle	50,8	158
Mischwasserüberläufe	33,4	105
Kläranlagenabläufe	8,4	32
Summe der Einträge in den Boden*	397	1772

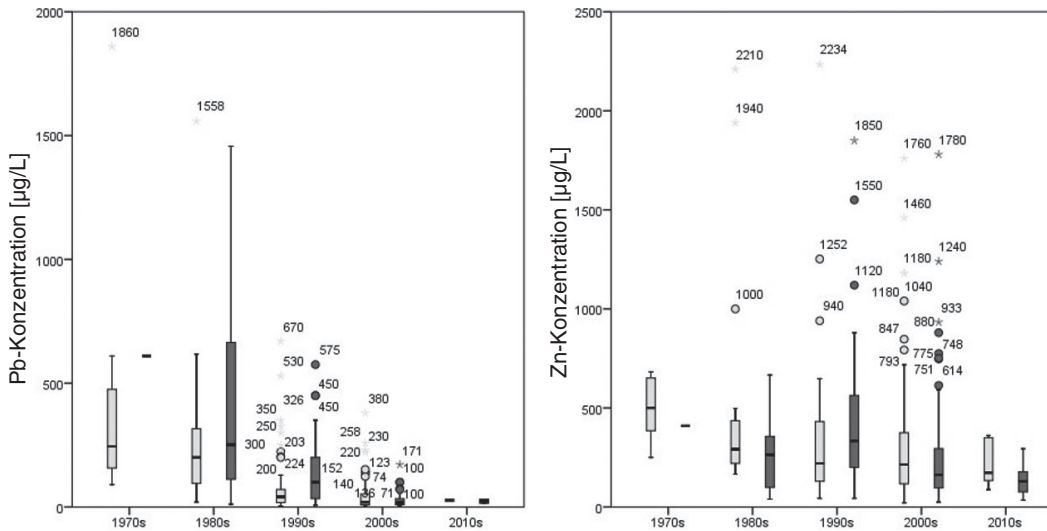


Abb. 2. Konzentrationen von Blei und Zink in den Verkehrsflächenabflüssen, Entwicklung über die 1970er bis 2010er Jahre. ■ Mittelwert; ■ Medianwert. Internationale Literaturstudie (Blei: n = 194 für Mittelwerte und n = 146 für Medianwerte; Zink: n = 206 für Mittelwerte und n = 148 für Medianwerte). – Nach Huber et al. 2016.

Stoffen in Oberflächengewässer mit den Kläranlagenabläufen ist in Deutschland über die Abwasserverordnung (AbwV) geregelt, die je nach Anlagengröße nur die Einleitung bestimmter Konzentrationen oder Frachten erlaubt. Dabei werden aber nicht einzelne Spurenstoffe oder Schwermetalle erfasst, sondern Parameter wie der chemische und der biochemische Sauerstoffbedarf (Tab. 3). Je größer ein Klärwerk ist, desto

niedriger sind die einzuhaltenen Grenzwerte, da die von einem Klärwerk eingeleitete Fracht mit zunehmender Anlagengröße steigt. Für Phosphor haben nur Klärwerke der Größenklassen 4 und 5 einen Anforderungswert.

Im Fall von Phosphor hat sich gezeigt, dass mit den heute in kommunalen Klärwerken zur Verfügung stehenden Techniken bereits Werte < 0,5 mg/L im Kläranlagenablauf erreicht werden

Tab. 3. Anforderungen an das Abwasser für die Einleitungsstelle in Abhängigkeit von der Größe der Abwasserbehandlungsanlagen gemäß AbwV; CSB: Chemischer Sauerstoffbedarf; BSB₅: Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen; NH₄-N: Ammoniumstickstoff; N_{ges}: Stickstoff, gesamt, als Summe von Ammonium-, Nitrit- und Nitratstickstoff; P_{ges}: Phosphor gesamt.

Größe der Anlagen	CSB [mg/L]	BSB ₅ [mg/L]	NH ₄ -N [mg/L]	N _{ges} [mg/L]	P _{ges} [mg/L]
	Qualifizierte Stichprobe oder 2-Std.-Mischprobe				
Größenklasse 1: < 60 kg/d BSB ₅	150	40	–	–	–
Größenklasse 2: 60 bis 300 kg/d BSB ₅	110	25	–	–	–
Größenklasse 3: > 300 bis 600 kg/d BSB ₅	90	20	10	–	–
Größenklasse 4: > 600 bis 6000 kg/d BSB ₅	90	20	10	18	2
Größenklasse 5: > 6000 kg/d BSB ₅	75	15	10	13	1

können (Huber et al. 2018). Wenn der Gesetzgeber also die Werte verschärft, so könnten die Klärwerke dies schaffen, ohne dass eine zusätzliche Technik entwickelt werden muss.

Bei den organischen Stoffen sind viele biologisch abbaubar, aber letztlich gelangen immer noch 10 % in die Gewässer (Abb. 3). Dabei handelt es sich um schwer oder nicht abbaubare Stoffe z. B. aus dem Bereich der Pharmazeutika, Biozide, Industriechemikalien, etc. Auch hier ließe sich über die vierte Reinigungsstufe noch einiges verbessern (vgl. Beitrag Werner 2023 in diesem Band). Diclofenac beispielsweise wird biologisch in der typischen kommunalen Kläranlage nicht abgebaut und gelangt – ohne eine vierte Reinigungsstufe – mit dem Kläranlagenablauf in das Gewässer. In einer Studie am Bayerischen Landesamt für Umwelt wurde der Ablauf von 9 Klärwerken entlang des Main-Dreiecks untersucht. Die größte Anlage, an die 26 742 Einwohner angeschlossen waren, lieferte dabei z. B. eine tägliche Fracht von knapp 9 g Diclofenac, die in den Main eingeleitet werden (Letzel et al. 2009).

Stoffliche Belastungen aus den Mischwasserüberläufen

Wie eingangs erwähnt, sind Mischwasserkanäle, bei denen Schmutzwasser und Niederschlagsabflüsse gemischt werden, bei Starkregenereignissen überlastet. Kanäle werden nur für eine definierte Jährlichkeit dimensioniert; bei Regenereignissen, die diese Jährlichkeiten überschreiten, erfolgt eine Zwischenspeicherung in Regenrückhaltebecken oder Regenüberlaufbecken.

- In den Regenrückhaltebecken wird der Abfluss zunächst gesammelt und anschließend, nach dem Regenereignis, gedrosselt ins Klärwerk weitergeleitet.
- Regenüberlaufbecken schlagen dagegen gezielt Mischwasserüberläufe mehrmals pro Jahr direkt in das Fließgewässer ab. Auf die Wirkungsweise von dabei verwendeten Durchlaufbecken, Fangbecken und Stauraumkanälen kann im Folgenden nicht näher eingegangen werden kann.

In einer Studie des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), bei der zahlreiche Mischwasserüberläufe an 10 Standorten in Bayern untersucht worden waren, lag der CSB im Median

(volumengewichtet) bei 62 mg/L, der gesamte gebundene Stickstoff (TN_b) bei 7,0 mg/L und der P_{ges} bei 0,92 mg/L (Nickel & Fuchs 2020). Die Konzentration des CSB mag im Vergleich zu den Grenzwerten der Abwasserverordnung (Tab. 3) nicht als allzu hoch erscheinen, aber dabei ist Folgendes zu beachten: Es kommt zwar durch den Starkregen zu einer hohen Verdünnung, aber mit den Mischwasserüberläufen werden auch biologisch abbaubare organische Stoffe eingetragen. Beim CSB im Ablauf eines Klärwerks handelt es sich hingegen um nicht oder schwer abbaubare Stoffe (vgl. Abb. 3). In der Natur werden die leicht abbaubaren organische Stoffe der Mischwasserüberläufe ebenso wie in den Kläranlagen von Mikroorganismen abgebaut, d. h., es kommt zu einer Sauerstoffzehrung im Gewässer. Eine Reduzierung der Gewässerbelastung an Mischwasserüberläufen kann durch eine Behandlung der Überläufe in Retentionsbodenfiltern erfolgen, um die Fließgewässer zu schützen. Am besten ist es natürlich, Mischwasserentlastungen zu vermeiden, indem keine Mischkanalisation mehr gebaut wird. Bei einem bestehenden Mischwassersystem, wie es z. B. hier in München der Fall ist, ist eine Änderung jedoch aufgrund verschiedener Ursachen sehr schwierig.

In den vom KIT untersuchten Mischwasserüberläufen wurden Schwermetalle und, trotz der hohen Verdünnung durch den Starkregen, die Pestizide bzw. Biozide Mecoprop (MCP), Carbendazim, Terbutryn und Triclosan nachgewiesen, die aus der Abwaschung aus Dächern bzw. aus Gebäudefassaden stammen (Nickel & Fuchs 2020).

Vergleich urbaner Eintragspfade

Der Gesamtabfluss aus urbanen Eintragspfaden in Oberflächengewässer liegt in Bayern bei jährlich $2,3 \times 10^9 \text{ m}^3$ (Nickel & Fuchs 2020). Davon stammten ca. 74,3 % aus kommunalen Kläranlagenabläufen, ca. 14,2 % aus Regenwassereinleitungen und ca. 11,5 % aus Mischwasserüberläufen. Der Anteil von Regenwassereinleitungen oder Mischwasserüberläufen an der Gesamteinleitung ist daher zwar relativ niedrig, aber durch sie werden bestimmte Stoffe gezielt eingebracht, die sich vermeiden ließen (Nickel & Fuchs 2020). Die Stickstoff- und Phosphoreinträge in bayerische Oberflächengewässer stammen zu über 80 % aus Klärwerken und könnten durch

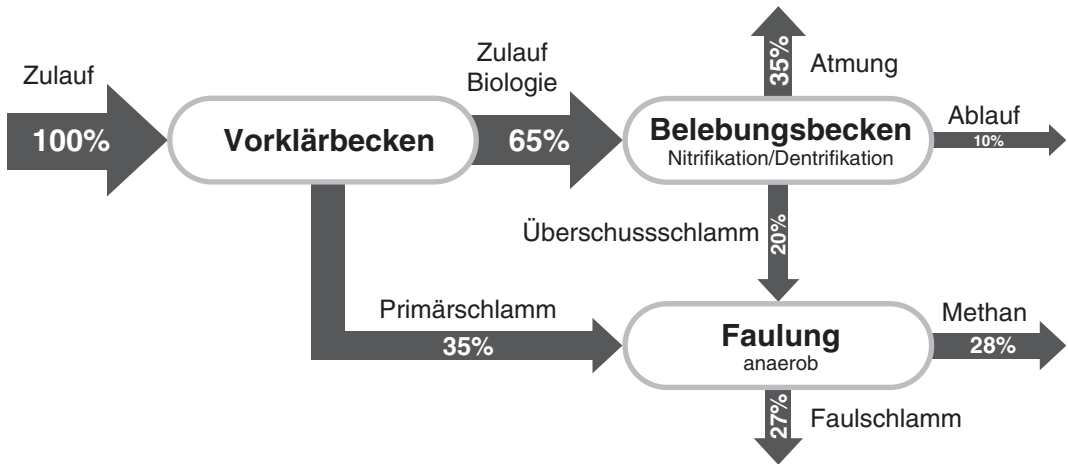


Abb. 3. Vereinfachte Darstellung des Verbleibs des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) in einem Klärwerk. Bei der Klärschlammfäulung werden 28% des CSB in Form von Methan emittiert.

strengere Vorgaben reduziert werden (s. oben). Bei Blei dagegen stammen über 60% des Frachtanteils aus Regenwasserableitungen und ca. 30% aus Mischwasserüberläufen. In Kläranlagen bindet Blei sehr gut am Belebtschlamm und kann so weitgehend entsorgt werden. Blei wurde z. B. bis 2015 als Stabilisator bei PVC eingesetzt, und gelangt daher über ältere Fallrohre am Dach, die aus PVC sind, in die Regenwasserableitungen (Degenhart & Helmreich 2022). Auch Cadmium und Quecksilber stammen zu ca. 50% bzw. 40% aus Regenwasserableitungen und zu ca. 30% aus Mischwasserüberläufen.

Zu den pharmazeutischen Wirkstoffen, die bei der Studie des KIT in den Mischwasserentlastungen gefunden wurden, gehören Diclofenac, das mit $0,25 \mu\text{g/L}$ enthalten war (volumengewichteter Median) und das ggf. in den Gewässern photolytisch, d. h. durch starke Sonneneinstrahlung, noch abgebaut werden kann, sowie das Antiepileptikum Carbamazepin ($0,068 \mu\text{g/L}$). Weiter wurden Benzotriazole im Bereich von $0,22$ – $1,4 \mu\text{g/L}$ nachgewiesen, die als typische Korrosionsschutzmittel z. B. in Spülmaschinentabs oder in der Industrie eingesetzt werden, und weitere Stoffe wie Acesulfam ($2,8 \mu\text{g/L}$), ein synthetischer, hitzebeständiger Süßstoff (Nickel & Fuchs 2020).

In der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) gibt es sog. Umweltqualitätsnormen für flussgebietspezifische Schadstoffe zur Beurteilung des ökologischen Zustands und des ökologi-

schen Potenzials. Sie stellen einen Richtwert dar, unterhalb dessen keine schädlichen Wirkungen auf Gewässerorganismen zu erwarten sind. Aus ihnen lassen sich Risikoquotienten berechnen (vgl. Beitrag Werner 2023 in diesem Band); hier sind vor allem die polyzyklischen aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), die aus den Abflüssen aus dem Verkehrsbereichen stammen (s. oben), kritisch zu sehen.

Klimawandel und Siedlungsentwicklung

Für den Zeitraum 2017 bis 2035 werden aufgrund des demographischen Wandels weitere Abwanderungen im Nordosten und Osten Deutschlands erwartet, während vor allem für den Süden und Südwesten, aber auch für Großstädte wie Berlin, Hamburg, Frankfurt und Leipzig eine Zuwanderung von 10% und mehr prognostiziert wird (Sixtus et al. 2019). In den Städten führt dies zu Nachverdichtung und Neubau und damit zu einer weiteren Flächenversiegelung. Zu erwarten sind damit eine Zunahme der Schadstoffbelastung durch mehr befestigte Flächen sowie eine Zunahme der Abwassermenge in Kommunen und Industrie durch die steigende Einwohnerzahl, verbunden mit einer negativen Auswirkung auf die Gewässergüte.

Zusätzlich ist durch die Folgen des Klimawandels in einigen Regionen mit stärkeren und/oder lang andauernden Niederschlägen und

damit zunehmender Überlastungsgefahr der Kanalisation zu rechnen, in anderen Regionen nehmen die Anzahl der Trockenwettertage sowie die Hitzeentwicklung zu. Wir sind jetzt an einem Punkt angekommen, an dem wir weg vom traditionellen Sammeln und Ableiten der Niederschlagsabflüsse kommen und in Richtung wassersensible Siedlungsplanung handeln müssen. Dennoch werden oft weiterhin Bauvorhaben geplant, in denen z. B. das Niederschlagswasser und seine nachhaltige Bewirtschaftung nicht berücksichtigt werden.

In Bayern wird derzeit sehr viel in dieser Richtung angestoßen. Beispielsweise führt das Bayerische Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr in Kooperation mit dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz ein Modellvorhaben zur »Klimaanpassung im Wohnungsbau« mit 10 Modellprojekten für geförderten Mietwohnungsbau durch, das wir zusammen mit anderen Partnern wissenschaftlich begleiten dürfen. Hier wird versucht, mit Hilfe der Optimierung der grau-grün-blauen Infrastruktur u. a. den lokalen Wasserhaushalt zu unterstützen, so dass es zu keiner zusätzlichen Ableitung von Niederschlagswasser in Oberflächengewässer kommt. Das Forschungsvorhaben hat zum Ziel, Klimaanpassungen im bezahlbaren Wohnungsbau umzusetzen. Die 10 Modellvorhaben sind über ganz Bayern verteilt, so dass alle klimatischen Herausforderungen erfasst werden.

Mehr Menschen in einer Stadt bedeutet aber auch mehr pharmazeutische und andere Wirkstoffe im Abwasser bzw. größere Abwassermengen. Damit verbunden ist der Anteil von Klarwasser in Fließgewässern. In einer Studie für das Umweltbundesamt wurde der Klarwasseranteil für verschiedene Flusseinzugsgebiete untersucht (Drewes et al. 2018). Beim Main ist der Anteil der Pegel, die bei einem mittleren Abfluss (MQ) einen Klarwasseranteil von < 5 % haben, mit fast 60 % relativ hoch, aber beim mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) beträgt er nur noch knapp 30 % (Drewes et al. 2018). Der Anteil des Klarwassers am Gesamtabfluss steigt somit beim Niedrigwasserabfluss. Beim Neckar haben ca. 60 % aller untersuchten Pegel beim MQN einen Klarwasseranteil von 50–100 %.

In Anbetracht der gerade für Nordbayern prognostizierten längeren Trockenperioden mit immer weniger Wasser in den Flüssen sind künftig noch öfter MNQ-Bedingungen und ein noch höherer Klarwasseranteil zu erwarten. Bei uns in der Siedlungswasserwirtschaft steht dabei die Gefährdung der Trinkwasserversorgung im Mittelpunkt, aber ebenso gilt es natürlich auch die Lebewesen zu schützen, die im oder am Wasser leben. Gleichzeitig erhöht sich bei künftig vermehrt auftretenden Starkregenereignissen und lang andauernden Regenperioden das Risiko der Mischwasserentleerungen und es wird zu mehr Regenwassereinleitungen kommen – auch dies für uns eine große Herausforderung.

Fazit

Als »Take Home Message« lässt sich festhalten:

- Im urbanen Raum belasten sehr viele Punktquellen die Oberflächengewässer stofflich.
- Ein Abbau aller Stoffe in den Kläranlagen ist nicht möglich. Daher ist eine komplette Vermeidung von nicht oder schwer abbaubaren Stoffen anzustreben, z. B. durch den Einsatz von Schmerzmitteln oder anderen Pharmazeutika mit abbaubaren Wirkstoffen.
- Eine Regenwasserbewirtschaftung vor Ort (Stichwort »wassersensible Stadt«) kann zur Reduzierung der Einleitungen beitragen. Wir haben die benötigten Techniken, um Schadstoffe zurückzuhalten und teilweise Materialien zurückzugewinnen und zu regenerieren.
- Siedlungsentwicklung und Klimawandel können zukünftig zu einer Erhöhung der Schadstoffbelastung in Gewässern führen.
- Eine Entsiegelung von Flächen reduziert die stoffliche Belastung der Oberflächengewässer.
- Umweltqualitätsnormen geben der Siedlungswasserwirtschaft Hinweise zum Handlungsbedarf. Die Politik muss hier mitbestimmen. Die Kosten müssen natürlich weiterhin tragbar sein, aber sie müssen auch angepasst werden, um benötigte Investitionen z. B. in Kläranlagen zu ermöglichen.

Literatur

- AbwV – Abwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 20. Januar 2022 (BGBl. I S. 87) geändert worden ist.
- Burkhardt, M., T. Kupper, S. Hean, R. Haag, P. Schmid, M. Kohler & M. Boller. 2007. Biocides used in building materials and their leaching behavior to sewer systems. – *Water Science and Technology*, 56(12): 63–67. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.807>.
- Degenhart, J. & B. Helmreich. 2022. Review on inorganic pollutants in stormwater runoff of non-metal roofs. – *Frontiers of Environmental Chemistry*, 3:884021. <https://doi.org/10.3389/fenvc.2022.884021>.
- Drewes, J. E., S. Karakurt, L. Schmid, M. Bachmaier, U. Hübner, V. Clausnitzer, R. Timmermann, P. Schätzl & S. McCurdy. 2018. Dynamik der Klarwasseranteile in Oberflächengewässern und mögliche Herausforderung für die Trinkwassergewinnung in Deutschland. – Umweltbundesamt, Berlin, Texte 59/2018, 117 S.
- Galster, S. & B. Helmreich. 2022. Copper and zinc as roofing materials – A review on the occurrence and mitigation measures of runoff pollution. – *Water*, 14(3):291. <https://doi.org/10.3390/w14030291>.
- Hillenbrand, T., D. Toussaint, E. Böhm, S. Fuchs, U. Scherer, A. Rudolphi, M. Hoffmann, J. Kreißig & C. Kotz. 2005. Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden – Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen. – Umweltbundesamt, Dessau, Texte 19/05, 279 S.
- Huber, M., A. Welker & B. Helmreich. 2016. Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff: Occurrence, influencing factors, and partitioning. – *Science of The Total Environment*, 541: 895–919. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.033>.
- Huber, M., M. Muntau, J. E. Drewes, B. Helmreich, K. Athanasiadis & E. Steinle. 2018. Analyse einer möglichst weitestgehenden Phosphorelimination bei kommunalen Kläranlagen in Deutschland. – *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 65: 298–310.
- Letzel, M., G. Metzner & T. Letzel. 2009. Exposure assessment of the pharmaceutical diclofenac based on long-term measurements of the aquatic input. – *Environment International*, 35(2): 363–368. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.09.002>.
- Nickel, J. & S. Fuchs. 2020. Qualitative Untersuchung von Mischwasserentlastungen in Bayern. Schlussbericht. – Forschungsvorhaben im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU); KIT, Karlsruhe, 20 S.
- OGewV – Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), die zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I, S. 2873) geändert worden ist.
- Sixtus, F., M. Slupina, S. Sütterlin, J. Amberger & R. Klingholz. 2019. Teilhabeatlas Deutschland: ungleichwertige Lebensverhältnisse und wie die Menschen sie wahrnehmen. – Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung & Wüstenrot-Stiftung, Berlin, 86 S.
- Vega-Garcia, P., R. Schwerd, C. Scherer, C. Schwitala, S. Johann, S. H. Rommel & B. Helmreich. 2020. Influence of façade orientation on the leaching of biocides from building façades covered with mortars and plasters. – *Science of The Total Environment*, 734:139465. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139465>.
- Werner, I. 2023. Risiken und Effekte von Mikroschadstoffen auf aquatische Organismen. – In: Bayer. Akademie der Wissenschaften (Hrsg.): Gefährdung und Schutz von Oberflächengewässern. Pfeil, München: 43–56.
- WHG – Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 12 des Gesetzes vom 20. Juli 2022 (BGBl. I S. 1237) geändert worden ist.

Diskussion

B. Rutkowski: Wie gut ist der Kontakt der Wissenschaft zum Gesetzgeber, zur Politik? Die Forderung nach noch mehr Investitionen erst bei der Gewässerreinigung in den Kläranlagen ist ja »end of pipe«. Wie kann es zum Beispiel sein, dass immer noch Süßstoffe eingesetzt werden, die nicht abbaubar sind? Wie lässt sich da beim Gesetzgeber der Kontakt zur Wissenschaft verbessern, um die Forderungen noch etwas stärker zu gewichten?

B. Helmreich: Das ist eine gute Frage. Letztendlich treffen Sie da einen sehr wunden Punkt. Bei den Schwermetallen schlagen wir natürlich bessere Behandlungsanlagen und Ähnliches vor, aber dann sagt uns zum Beispiel die Wirtschaftsvereinigung Metalle, dass Schwermetalle in ihren Augen gar kein Problem sind. Auch in der pharmazeutischen Industrie sind Macht und Einfluss auf die Wirtschaft groß, ebenso in der Autoindustrie mit den vielen von ihr abhängigen Arbeitsplätzen. Die Politik kann sehr viel tun, aber auch hier haben wir gelernt, dass es sehr offene Kommunen gibt, die z.B. Prognosen erstellen lassen, die vorkalkulieren lassen, was in nächster Zeit auf sie zukommt, und die ihre Kosten gut planen, aber auch andere Kommunen, die das alles gar nicht wissen wollen. Je kleiner eine Kommune ist, umso schwieriger wird es. Auch spielt eine Rolle, dass eine Bürgermeisterin oder ein Bürgermeister, die oder der wiedergewählt werden will, nicht unbedingt die Abwassergebühren erhöhen möchte. Letztendlich könnte man vieles verbieten. Sicherlich könnte man z.B. auf Zinkdächer verzichten, aber es handelt es sich auch um langlebige und gut bearbeitbare Materialien. Oder nehmen Sie die Münchner Frauenkirche: Sie hat ein schönes Kupferdach, das aus historischen Gründen bei einer Erneuerung auch wieder mit Kupferblechen ersetzt werden muss. Es gibt also vielerlei Gründe, warum sich bei manchen Dingen nichts ändert. Andererseits arbeiten wir z.B. mit dem Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel (VDPM) zusammen, der genau wissen will, ob von seinen Materialien gewässerrelevante Stoffe freigesetzt werden. Hier wurde in eine wissenschaftliche Untersuchung im Rahmen einer Doktorarbeit

investiert. Ziel ist hier die Vermeidung von gewässerrelevanten Substanzen bei Bauprodukten in der Zukunft.

P. Holm: Können Sie zu den Retentionsfiltern noch etwas mehr sagen? Ich könnte mir vorstellen, dass bei den Kläranlagen auch der Platzbedarf ein Problem ist. Oder haben sie mit den Kläranlagen nichts zu tun?

B. Helmreich: Retentionsbodenfilter sind nicht am Klärwerk. Es handelt sich um Bodenfilter, die aus verschiedenen Schichten bestehen, u. a. einer Sand- und einer Schilfschicht. Man beschickt sie z.B. mit Regenwassereinleitungen, bevor diese in ein Gewässer eingeleitet werden, oder mit Mischwasserüberläufen. Sie sind nicht mit einer Kläranlage vergleichbar, stellen aber doch einen gewissen Schutz für die Gewässer dar, und sie benötigen tatsächlich Platz, daher kann man sie nicht überall hinbauen. In Berlin wurde zum Beispiel am Halensee ein Retentionsbodenfilter an einem Ablauf von Verkehrsflächen gebaut und dadurch wurde der Halensee wieder zu einem Badegewässer. In Nordrhein-Westfalen gibt es in Bezug auf die Mischwasserüberläufe ein großes Bedürfnis, die Fließgewässer zu schützen, weil die Trinkwasserversorgung letztendlich auf ihnen beruht. Wir Bayern haben da mehr Glück mit ausreichend Grundwasser und schönem Quellwasser, hängen also bei der Trinkwasserversorgung nicht so stark von der Güte der Oberflächengewässer ab.

E. Grill: Sie haben von Zink und Kupfer gesprochen, das von Dächern stammt. Aber Zink und Kupfer sind auch Spurenelemente für alle Lebewesen. Sind die Mengen, die an Kupfer freigesetzt werden – Sie haben von 85 Tonnen pro Jahr für ganz Deutschland gesprochen – tatsächlich problematisch? Haben Sie Zahlen darüber, wie viel Kupfer die Vegetation pro Jahr aufnimmt?

B. Helmreich: Da müsste man vermutlich Peter Schröder vom Helmholtz-Zentrum München fragen, der sich damit beschäftigt hat. Was wir gemessen haben, sind Konzentrationen, die in Niederschlagswasser vom Dach herunterkom-

men. Von einem Kupferdach kommen, wenn es zu regnen anfängt, zwischen 900 μg und 6 mg pro Liter im Niederschlagsabfluss herunter und die Konzentration geht nie auf null. Ich weiß nicht, was die Lebewesen vertragen. Von Seiten des Grundwasserschutzes liegt der Geringfügigkeitsschwellenwert der LAWA bei 5,6 $\mu\text{g/L}$, da liegen wir im Kupferdachabfluss weit darüber. Kupfer scheint für manche Kleinstlebewesen sehr toxisch zu sein. Beim Zink liegen die Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA höher als bei Kupfer.

J. Geist: Tatsächlich haben viele der in Gewässern lebenden Organismen eine extrem hohe Sensitivität gegenüber Kupfer. Relevant ist das auch in Gegenden, in denen Wein oder Hopfen angebaut wird, da dort kupferhaltige Pflanzenschutzmittel oder Kupfersulfat als Fungizid eingesetzt werden, auch in der Biolandwirtschaft.

W. Tanner: Wie hoch ist der Kupfereintrag aus dem Weinbau in die Oberflächengewässer im Verhältnis zu den Kupfereinträgen von den Dächern?

B. Helmreich: In der Landwirtschaft werden vermutlich mehr als 85 Tonnen Kupfer pro Jahr eingesetzt, aber davon kommt weniger im Gewässer an, da vieles im Boden verbleibt. Kupfer bindet relativ schnell an Huminstoffe, damit wird es in der Landwirtschaft relativ schnell im Boden gebunden. Wenn allerdings eine Abschwemmung in die Gewässer stattfindet, landet es ebenfalls im Gewässer. Beim Dachabfluss kommt das Kupfer dagegen gelöst vom Dach und wir können es in den Regenwasserableitungen nicht abtrennen, außer es bindet sich noch an Partikel und sedimentiert.

J. Geist: Es ist auch noch zu bedenken, dass neben der stofflichen Belastung auch Temperatureffekte zum Beispiel durch Mischwasser eine Rolle spielen können. Von manchen Fischarten wissen wir beispielsweise, dass sie nicht laichreif werden, wenn im Winter über eine längere Zeit eine bestimmte kritische niedrige Temperatur nicht erreicht wird.

B. Helmreich: Man darf dabei nicht vergessen, dass sich mit steigender Temperatur auch weniger Sauerstoff im Gewässer löst. Wenn wir dann noch sauerstoffzehrende Stoffe im Gewässer haben, die leicht abbaubar sind, entziehen wir dem Gewässer noch zusätzlich Sauerstoff. Bei Klärwerken hoffen wir immer, dass wir im Winter über 12 Grad bleiben, da sonst die Nitrifikation nicht gut funktioniert. Im Sommer können die Temperaturen bei 16 oder 18 Grad liegen.

M. Erhardsberger: Es verwundert tatsächlich, dass man im Ökolandbau ein Kupferverbot diskutiert, obwohl insgesamt wesentlich weniger an Menge eingesetzt wird, während in Baumärkten Kupfer für Dächer mit dem Argument beworben wird, dass es so schön sauber bleibt. Das ist tatsächlich auch eine politische Frage, die man einmal diskutieren müsste. Meine eigentliche Frage ist aber eine andere. In der Praxis werden gerade kleinere Kläranlagen geschlossen, weil sie die Anforderungen nicht mehr erfüllen können, und man legt Dörfer und Städte zu einer gemeinsamen Kläranlage zusammen. Man pumpt dabei das Klärwasser, gerade auch aus Mischkanälen, in andere Ortschaften bzw. in andere Kläranlagen und überwindet damit auch für das Niederschlagswasser Wasserscheiden. Ist dies ein Thema, das man auch auf dem Schirm hat, oder hat es eigentlich keine Relevanz, da die Mengen, die dabei über die Wasserscheiden hinweg verschoben werden, so gering sind? Gibt es dazu eine Einordnungsmöglichkeit?

B. Helmreich: Das ist eine gute Frage, mit der ich mich aber selber nie beschäftigt habe. Letztendlich ist es so, dass sich Kommunen oftmals über Abwasserzweckverbände zusammenschließen, um eine gute Abwasserreinigung leisten zu können. Je kleiner die Anlagen, umso weniger Personal steht zur Verfügung und umso schlechter sind die Anlagen daher betrieben und gewartet. Das funktioniert in einem größeren Klärwerk oder bei einem Zusammenschluss mit mehr Personal alles besser. Inwieweit aber ein Zusammenschluss von Klärwerken, der über Wasserscheiden hinweggeht, ein Problem darstellt, kann ich nicht sagen. Das ist aber sicher eine spannende Frage für die Forschung.