

Integrierte Bilanzierung der Spurenstoffbelastung von Fließgewässern mit StoffFLUSS

Karim Sedki¹, Anja Multhaupt², Henning Knerr², Ulrich Dittmer¹

¹ RPTU Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau,
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Kaiserslautern, Deutschland
² tectraa - Zentrum für innovative Abwassertechnologien
an der RPTU Kaiserslautern-Landau e. V., Kaiserslautern, Deutschland

Kurzfassung: Die Spurenstoffbelastung von Gewässern ergibt sich für verschiedene Spurenstoffe aus unterschiedlichen Quellen. Das Bilanzmodell StoffFLUSS ermöglicht es, tages- und pegelgenau aus einwohnerspezifischen Frachten Konzentrationen in Gewässerkörpern zu errechnen. Auf dieser Basis ist es möglich, Empfehlungen zur Ausgestaltung und Standortwahl von weitergehenden Abwasserbehandlungsverfahren zu formulieren. Im Zuge des INTERREG-Projektes QualiSûre wird das Modell weiterentwickelt, um neben dem Eintragspfad Kläranlage auch Mischwasserüberläufe zu berücksichtigen. Den Anlass dazu geben Messungen in Gewässerkörpern. Diese weisen darauf, dass für Spurenstoffe aus dem häuslichen Abwasser, für die von einer nahezu vollständigen Elimination auf der Kläranlage ausgegangen werden kann, Mischwasserüberläufe einen relevanten Eintragspfad darstellen können.

Key-Words: Stoffflussmodellierung, Spurenstoffe, Bilanzierung, Mischwasserüberlauf, Weitergehende Abwasserbehandlung

1 Einführung

Die Konzentrationen von Spurenstoffen weisen in vielen europäischen Gewässern auf eine Überschreitung der Qualitätskriterien (z. B. Umwelt-Qualitäts-Normen - UQN) für die aquatische Umwelt hin. Die gezielte Elimination von Spurenstoffen aus kommunalem Abwasser mit weitergehenden Reinigungsverfahren (z. B. Ozonung, Adsorption) wird daher in der EU-Kommunalabwasserrichtlinie (gestaffelt bis 2045 Anlagen > 10.000 E; Rat der Europäischen Union 2024) gefordert. Diese Verfahren sind end-of-pipe-Lösungen, die aufgrund der Ausgestaltung des Großteils der Entwässerungssysteme in Zentraleuropa die Gewässerbelastung im Kläranlagenablauf effektiv reduzieren können (Venditti et al. 2022). Bei Regenwetterzufluss werden die Gewässer zusätzlich durch Emissionen aus

Überlaufbauwerken des Entwässerungssystems mit schmutzwasser- (z. B. Ibuprofen) und oberflächenbürtigen (z. B. Mecoprop) Substanzen belastet (Launay et al. 2016). Einige dieser Substanzen werden in kommunalen Kläranlagen gut bis sehr gut eliminiert (z. B. Ibuprofen) und gelangen daher nahezu ausschließlich durch Mischwasserüberläufe in die Gewässer (Mutzner et al. 2022). Die emittierte (Spurenstoff-) Belastung kann daher nur durch dezentrale Maßnahmen (z. B. Retentionsbodenfilter an den Mischwasserüberläufen) verringert werden.

2 Veranlassung

Das Bilanzmodell StoffFLUSS wurde im Zuge der INTERREG-Projekte EmiSûre (IP 013-2-03-049) und CoMinGreat (IP 072-2-03-207) als Planungsinstrument zur Analyse und Prognose der Spurenstoffbelastung von Fließgewässern und für die Auswertung von Effekten verschiedener Reinigungsverfahren entwickelt (Venditti et al. 2022). Zur Bilanzierung der Belastung aus Punktquellen (gesamtes Einzugsgebiet einer Kläranlage mit der Summe aller Emissionen aus Kläranlage und Mischwasserüberläufen als eine kontinuierliche (mittlere jährliche) Einleitung) wurde es als Knoten-Kanten-Modell konzipiert. Unter Annahme eines Fließgleichgewichts mit Massenerhaltung wird in einzelnen Gewässerabschnitten für verschiedene Abflusssituationen die Gewässerbelastung berechnet. Die eingeleitete Fracht aus dem Teileinzugsgebiet des jeweiligen Gewässerabschnitts wird dabei linear über die Fließstrecke einer Kante verteilt (Knerr et al. 2020).

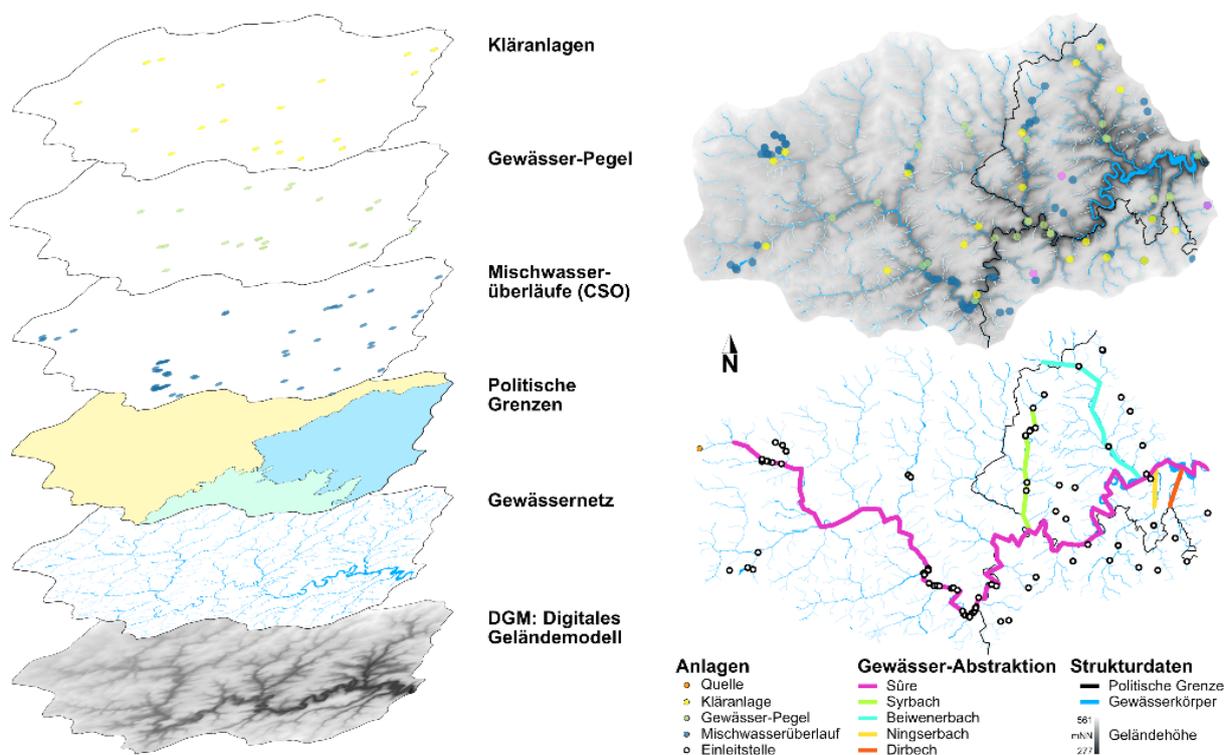


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet mit Anlagenstandorten ((li.), reale Strukturen (re. o.) und abstrahierte Modellstruktur der ersten Iteration (re. u.).

Das Modell wird mit dem Einzugsgebiet des Sauerstausees in Luxemburg und Belgien (vgl. Abbildung 1) weiterentwickelt. Dabei stehen die Priorisierung der Maßnahmenbedarfe und der Umfang der Maßnahmen zur weitergehenden Mischwasserbehandlung und Abwasserreinigung im Fokus.

3 Zielsetzung

Im Zuge des INTERREG-Projekts QualiSûre (IP INTGR100051) soll die räumliche Verteilung der Punktquellen als Klassen mit kontinuierlicher Einleitung (Kläranlagen) und mit schwallartiger Einleitung (Mischwasserüberläufe) im Bilanzmodell StoffFLUSS weiter differenziert werden. Das Ziel dieser Erweiterung ist einerseits die Verbesserung der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Emissionen und damit auch die realitätsnähere Abbildung der Belastung der Nebengewässer durch Emissionen aus Mischwasserüberläufen. Andererseits sollen ereignisspezifische Belastungsspitzen durch Mischwasserüberläufe Berücksichtigung finden, die bisher anteilig auf den kontinuierlichen Kläranlagenablauf angerechnet werden.

Untersuchungen von Bertels et al. (2023) für Regionen mit geringer Datenverfügbarkeit zeigen im Kontext der Stoffflussbilanzierung, dass ein Emulatoren-basierter Ansatz zu vergleichbaren Ergebnissen führen kann wie aufwändige hydrodynamische Modelle. Ein Emulator wie das Bilanzmodell StoffFLUSS ist die Vereinfachung eines aufwändigen hydrodynamischen Modells. Durch die Vereinfachung werden weniger Eingangsgrößen benötigt. Gleichzeitig bietet der Emulator in diesem Fall eine geringere räumliche und zeitliche Auflösung. Es werden mit diesem Ansatz über die Standorte der Mischwasserüberläufe und Einleitstellen in Gewässer hinaus nur wenige Informationen über die Entwässerungssysteme im Einzugsgebiet des betrachteten Gewässers benötigt.

Um die Dynamik der Mischwasserüberlaufereignisse im Bilanzmodell zu erfassen, werden über den vereinfachten Ansatz hinaus, aufbauend auf einer Auswertung vorhandener Messdaten, empirische und wahrscheinlichkeitsbasierte Ansätze in das Modell eingebunden, um unsichere und fehlende Informationen und Messdaten zu substituieren.

Mit dem erweiterten Modell soll es möglich sein, über die Bewertung der Kläranlagen hinaus auch die Behandlungsbedürftigkeit der Mischwasserüberläufe und die Notwendigkeit, diese den weitergehenden Reinigungsprozessen auf der Kläranlage zuzuführen, detailliert zu bewerten.

4 Modellansatz

Das Modell StoffFLUSS berücksichtigt ausgewählte Teilaspekte, um einzelne Gewässerabschnitte und die darin stattfindenden Stoffumsatzprozesse zu beschreiben: Für die Berechnung der Konzentrationsverläufe über die

Gewässerfließstrecke werden substanzspezifische Stoffrückhalt- und -abbauvorgänge angesetzt. Nebengewässer werden in die Berechnung des Hauptgewässers eingehängt. Die gewässerweise Betrachtung wird über Abflusskenngrößen realisiert. Dazu werden die Konzentrationen entlang der Fließstrecke mit stationär ermittelten Frachten für die hydrologischen Kenngrößen MQ und MNQ der Gewässerabflussregionalisierung und dem daraus ermittelten MedianQ berechnet. MedianQ ist das Ergebnis für die Betrachtung eines diskretisierten Jahres. Darüber hinaus können mit StoffFLUSS Stoffkonzentrationen an einzelnen Pegeln anhand stationär ermittelter Frachten und zeitlich hochaufgelöster Pegelabflussdaten tagessgenau ermittelt werden.

StoffFLUSS verwendet ein Regressionsmodell 1. Ordnung und berechnet aus Abbauraten je Stoff und Gewässerabschnitt die Konzentration zum Vergleich mit Qualitätszielen (z. B. UQN). Die Emissionsfrachten je Stoff werden dazu aus den Prozessen auf der Kläranlage bilanziert. Ausgehend von einer einwohnerspezifischen Tagesfracht und der Anzahl der Einwohner im Einzugsgebiet, wird die verbleibende Fracht im KA-Ablauf aus der Entfernung je Prozessschritt auf der KA berechnet. Der modulare Aufbau ermöglicht es, beliebige Behandlungsanlagen auf der KA einzubinden und damit z. B. das Potenzial eines Ausbaus mit weitergehender Reinigung oder quellenorientierten Maßnahmen zu ermitteln. Weitere Eingangsgrößen sind die Fließlänge und Fließgeschwindigkeit des Gewässerabschnittes sowie der Anteil der Überlauffracht, die am netzabschließenden Bauwerk des Entwässerungssystems bei Regenwetter an der Kläranlage vorbei direkt ins Gewässer geleitet wird (vgl. Abbildung 2).

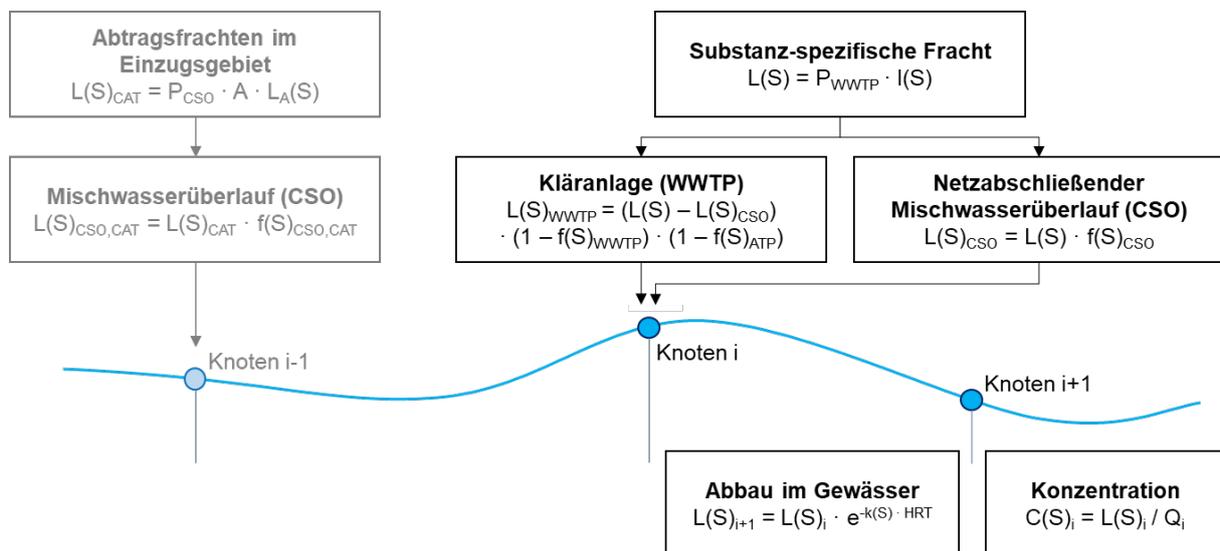


Abbildung 2: Schema des StoffFLUSS-Modells und der geplanten Erweiterung (in Anlehnung an Venditti et al. 2022).

Um das Modell an die tatsächlich in den Gewässerabschnitten nachweisbaren Stoffkonzentrationen anzugleichen, werden im QualiSûre-Projekt Messkampagnen an

ausgewählten Mischwasserüberläufen in die Sauer und Nebengewässer durchgeführt. In Anlehnung an Mutzner et al. (2022) und Kuch & Steinmetz (2012) sollen neben den schmutzwasserbrütigen Substanzen, die in kommunalen Kläranlagen gut abbaubar sind, (z. B. Coffein, Ibuprofen und Triclosan) auch schlecht abbaubare Substanzen (z. B. Bezafibrat, Carbamazepin und Metoprolol) aufgrund ihrer Häufigkeit und guten Bilanzierbarkeit sowie oberflächenbürtige Substanzen (z. B. Diuron, Carbendazim, Mecoprop, Benzotriazol und Terbutryn) untersucht werden. Für oberflächenbürtige Substanzen ist zudem zu berücksichtigen, dass diese teilweise partikelgebunden auftreten und infolge Sedimentation im Mischwasserüberlaufbecken anteilig zurückgehalten werden können. Durch die Bilanzierung der schmutzwasserbrütigen Substanzen an den Emissionspunkten der Mischwasserüberläufe ist es möglich, anstelle von kostenintensiven weitergehenden Verfahren auf der Kläranlage oder an Mischwasserüberläufen quellenbezogene Maßnahmen zu entwickeln.

5 Fallstudie

Das Untersuchungsgebiet ist das Einzugsgebiet der oberen Sauer, das für die Modellierung schematisiert wurde (vgl. Abbildung 3). Dazu wurden alle Einleitstellen, Gewässerpegel und Zusammenflüsse als Knoten und die Gewässerabschnitte des Haupt- sowie ausgewählter Nebengewässer dazwischen als Kanten definiert. Die realen Fließstrecken werden den Kanten zugeordnet, um die Fließzeiten und damit die hydraulischen Aufenthaltszeiten für den Stoffabbau im Gewässer zu simulieren.

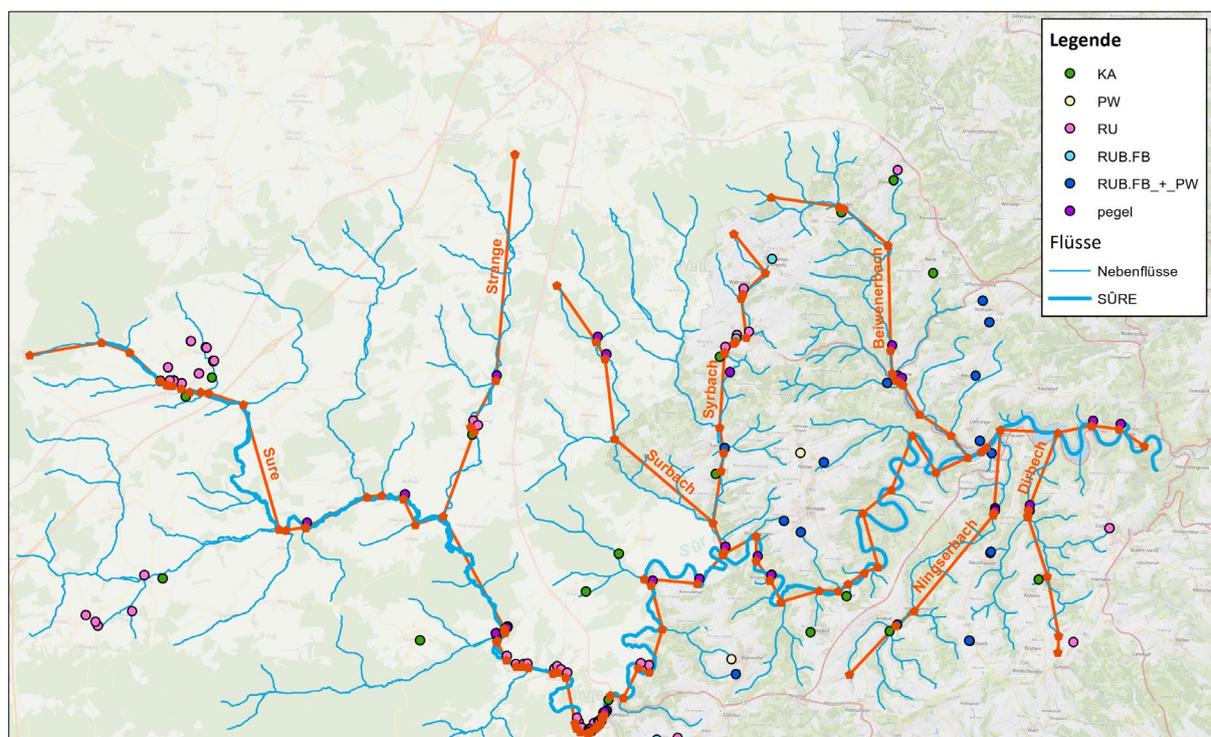


Abbildung 3: Modellstruktur des Untersuchungsgebiets in StoffFLUSS.

Für erste Simulationen mit dem Untersuchungsgebiet wurden die Halbwertszeiten und daraus resultierenden Abbauraten ausgewählter Spurenstoffe verwendet (Tabelle 1).

Tabelle 1: Halbwertszeiten und Abbauraten ausgewählter Spurenstoffe.

Stoff	Halbwertszeit in Oberflächengewässern (DT ₅₀) in [d]	Abbauraten k in [1/h]	Referenz
Diclofenac	38	0.00076003	Crane et al. (2008)
Ibuprofen	1,85	0.015611423	Kunkel et al. (2008)
Carbamazepin	82	0.000352209	Oekozentrum (2023)
DEET	15	0.001925409	Oekozentrum (2023)
Diuron	48	0.00060169	Oekozentrum (2023)

Aus den errechneten Konzentrationen an den Knoten können Konzentrationsprofile für einzelne Gewässerabschnitte zur Ergebnisdarstellung erzeugt werden. Für einen Knoten können Zeitreihen des Konzentrationsverlaufs ausgegeben werden. Abbildung 4 zeigt beispielhaft ein Konzentrationsprofil und eine Zeitreihe an dem markierten Knoten für den Parameter Diclofenac.

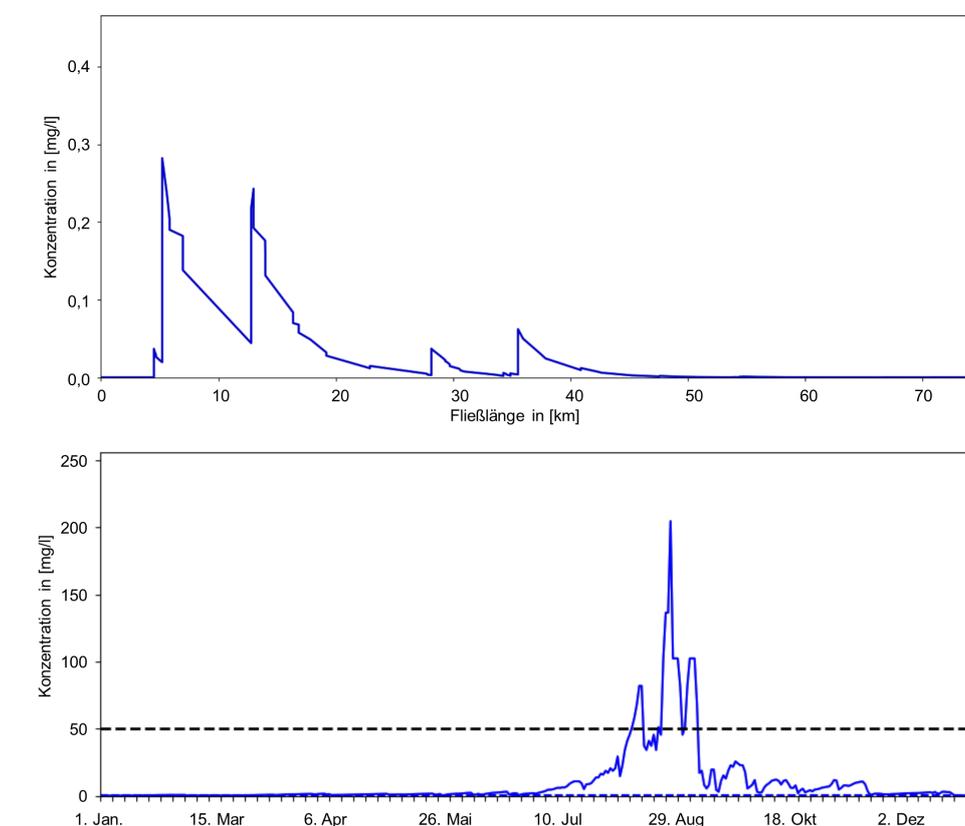


Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung eines Konzentrationsprofils entlang der Sauer (oben) und eines Konzentrationsverlaufs über ein Jahr am Pegel Volaiville (unten) für Diclofenac.

6 Ausblick

Für die Weiterentwicklung von StoffFLUSS sollen die einzelnen Mischwasserüberläufe als eigene Emissionspunkte bilanziert werden. Dazu wird ergänzend zu den Ansätzen der schmutzwasserbürtigen Substanzen ein Ansatz entwickelt, der die oberflächenbürtigen Substanzen berücksichtigt, dass eine einwohner- und flächenspezifische Frachtermittlung für die Teileinzugsgebiete der Mischwasserüberläufe und das Gesamteinzugsgebiet der Kläranlage mit dem netzabschließenden Mischwasserüberlaufbauwerk (vgl. Abbildung 1) möglich ist. Der detailliertere Ansatz berücksichtigt die Abschätzung von Teilströmen („Überlauf ins Gewässer“ und „Weiterleitung bzw. zeitverzögerte Weiterleitung nach Einstau zur KA“) auf Basis des gemessenen Einstau- und Entlastungsverhaltens von Mischwasser-überläufen mit veränderter Zeitdiskretisierung gegenüber dem bestehenden StoffFLUSS-Modell.

7 Literatur

- Bertels, D., Meester, J. de, Dirckx, G., Willems, P. (2023). Estimation of the impact of combined sewer overflows on surface water quality in a sparsely monitored area. *Water research* 244, 120498. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120498>.
- Crane, M., Watts, C., Daginnus, K., & Worth, A. (2008). Possible Application of Non-Testing Methods in Setting Environmental Quality Standards (EQS). Luxembourg. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Health & Consumer Protection.
- Launay, M. A., Dittmer, U., Steinmetz, H. (2016). Organic micropollutants discharged by combined sewer overflows - Characterisation of pollutant sources and stormwater-related processes. *Water research* 104, 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.07.068>.
- Knerr, H.; Gretzschel, O.; Valerius, B.; Srednoselec, I.; Zhou, J.; Schmitt, T. G.; Steinmetz, H.; Dittmer, U.; Taudien, Y.; Kolisch, G. (2020): Modellgestützte Bilanzierung von Mikroschadstoffen in Gewässern. *gwf-Wasser Abwasser*, 3/2020, S. 55-65.
- Kunkel, U., Radke, M. (2008): Biodegradation of acidic pharmaceuticals in bed sediments: insight from a laboratory experiment. *Environmental science & technology* 42 (19), 7273–7279. <https://doi.org/10.1021/es801562j>.
- Kuch, B., Steinmetz, H. (2012). Methodik zur Ableitung von Referenzparametern zur Bewertung des Verhaltens von organischen Spurenstoffen in Abwasseranlagen und Oberflächengewässern, in: Mikroschadstoffe u. Nährstoffrückgew. Praxiserf. u. Umsetzungspot. i. d. Abwasserreinigung. *Stuttgarter Berichte z. Siedlungswasserwirt.* 211. Kommissions-verl. Oldenburg, S. 21–37.

Mutzner, L., Furrer, V., Castebrunet, H., Dittmer, U., Fuchs, S., Gernjak, W., Gromaire, M.-C., Matzinger, A., Mikkelsen, P.S., Selbig, W.R., Vezzaro, L. (2022). A decade of monitoring micropollutants in urban wet-weather flows: What did we learn? *Water research* 223, 118968. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118968>.

Ökozentrum – Centre Ecotox (2023): Vorschläge des Ökotoxozentrums für Qualitätskriterien für Oberflächengewässer“. <https://www.oekotoxzentrum.ch/expertenservice/qualitaetskriterien/qualitaetskriterienvorschlaege-oekotoxzentrum>. (zuletzt abgerufen: 17.12.2024).

Rat der Europäischen Union (2024): Proposal for a Directive of the european parliament and of the council concerning urabn wastewater treatment (recast). Compromise text, 01. März 2024, Brüssel.

Venditti, S., Kiesch, A., Brunhoferova, H., Schlienz, M., Knerr, H., Dittmer, U., Hansen, J. (2022). Assessing the impact of micropollutant mitigation measures using vertical flow constructed wetlands for municipal wastewater catchments in the greater region: a reference case for rural areas. *Water science and technology: a journal of the International As-sociation on Water Pollution Research* 86 (1), 128–141. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.191>.

Korrespondenz an:

Dr.-Ing. Henning Knerr
Paul-Ehrlich-Str. 14, 67663 Kaiserslautern, Deutschland
Telefon: +49 (0) 631 205 3947
E-Mail: henning.knerr@rptu.de