

Elimination von organischen Schadstoffen und Nährstoffen in einem Schilffiltersystem

Fabienne Maire^{1,2}, Isolde Wackernagel¹, Thomas Gutmann³, Christian Bossart³,
Lena Mutzner¹

¹ *Eawag, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, 8600 Dübendorf, Schweiz*

² *ETH Zurich, Institute of Environmental Engineering, 8049 Zürich, Schweiz*

³ *Müller Ingenieure AG, 8157 Dielsdorf, Schweiz*

Kurzfassung: Mischwasserentlastungen belasten Gewässer mit Nährstoffen und hydrophilen organischen Schadstoffen wie Pestiziden oder Industriechemikalien. Die Studie untersucht die Eignung von verschiedenen Passivsammlern zur Erfassung der Konzentration von organischen Schadstoffen sowie die Reinigungsleistung eines Schilf-Sandfilters mit Schönungsteich. Laborversuche zeigen, dass HLB-Disks meist höhere Sammelraten aufweisen, insbesondere bei Stoffen mit $\log K_{ow} > 2$. Die Schadstoffaufnahme verlief über 24 Stunden überwiegend linear, auch unter variierenden Bedingungen und kurzen Trockenphasen. Erste Ergebnisse aus der laufenden Feldstudie weisen auf eine Phosphatelimination im Filtersystem hin sowie auf Nitrifikation (Nitratanstieg). Die laufenden Untersuchungen dienen der Feldvalidierung von Passivsammlern weiter bewerten und die Effizienz des Systems zur organischen Schadstoff- und Nährstoffentfernung modellgestützt quantifizieren.

Key-Words: Passivsammler, Mischwasserentlastung, Schadstoffelimination, organische Mikroverunreinigungen, Regenabwasser

1 Einführung

Mischwasserentlastungen stellen eine bedeutende Eintragsquelle für Nährstoffe und organische Schadstoffe in aquatische Ökosysteme dar und können die Wasserqualität sowie aquatische Organismen beeinträchtigen [1, 2]. Neben Schwermetallen und Nährstoffen wie Nitrat und Phosphat rücken zunehmend hydrophile organische Mikroverunreinigungen, darunter Pestizide, Biozide, Zusatzstoffe aus Reifenabrieb und Industriechemikalien, in den Fokus der Umweltforschung [3]. Regenwasserbehandlungssysteme, wie bepflanzte Schilfbecke, können die Gewässerbelastung durch die Behandlung von urbanem Oberflächenabfluss und entlastetem Mischwasser reduzieren [4]. Allerdings fehlen bisher systematische

Feldstudien, die die Effizienz solcher Systeme für hydrophile organische Schadstoffe unter realen Bedingungen untersuchen. Dies ist unter anderem auf Herausforderungen zurückzuführen, die eine kontinuierliche, repräsentative Probenahme erschweren (Abgelegenheit der Standorte, hohe Variabilität der Stoffkonzentration, hohe Kosten und Aufwand automatisierter Probenahme).

Passivsammler bieten hier ein vielversprechendes Werkzeug. Sie ermöglichen die zeitgemittelte Erfassung und empfindliche Detektion von Schadstoffen durch Anreicherung und können ohne Stromversorgung betrieben werden. Während ihre Eignung zur Messung hydrophober Substanzen bereits gezeigt wurde [5], bestehen Forschungsdefizite hinsichtlich ihrer Anwendung für hydrophile organische Stoffe. Dies gilt insbesondere für schwer abbaubare mobile toxische Stoffe, die aufgrund ihrer Persistenz und Mobilität besonders besorgniserregend für Wasserressourcen sind [6]. Deren Vorkommen im urbanen Oberflächenabfluss ist bislang kaum erforscht. Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Studie zwei zentrale Ziele: (1) Die Entwicklung und Validierung einer Probenahmemethode für hydrophile organische Schadstoffe in Regenwasserbehandlungssystemen mittels Passivsammler. (2) Die Untersuchung der Elimination von Nährstoffen und organischen Schadstoffen in einem Schilf-Sandfiltersystem mit nachgeschaltetem Schönungsteich im Rahmen einer Feldstudie.

2 Material und Methoden

2.1 Methodenentwicklung im Labor: Evaluierung von Passivsammlern als Probenahmemethode

Zur Untersuchung der Eignung von Passivsammlern für die Erfassung hydrophiler organischer Schadstoffe wurden Experimente in einer Regenwasserrinne durchgeführt. Dabei kamen zwei Sorptionsphasen (HLB und SDB-RPS, AttractSPE®) zum Einsatz, die in Edelstahlgehäusen montiert und für bis zu 24 Stunden mit Schadstoffen versetztem Regenwasser exponiert wurden. Die Schadstoffmischung umfasste 40 Substanzen (Pestizide, Biozide, Industriechemikalien, darunter 16 PMT/vPvM-Stoffe). Die chemische Analyse erfolgte mittels Flüssigchromatographie gekoppelt mit hochauflösender Massenspektrometrie (LC-HRMS/MS) unter Verwendung isotoopenmarkierter Standards.

Im ersten Experiment wurden Sammelraten (R_s) unter konstanten Bedingungen (Fließgeschwindigkeit, Stoffkonzentration und Temperatur) wie folgt bestimmt:

$$M_s = C_w R_s t$$

wobei M_s die akkumulierte Schadstoffmasse, C_w die Schadstoffkonzentration im Wasser und t die Expositionszeit ist. Basierend auf diesen Ergebnissen, wurde die Aufnahmeleistung beider Materialien verglichen. Das zweite Experiment simulierte ein Konzentrationsprofil eines Regenerereignisses mit abnehmenden

Schadstoffkonzentrationen, um die Zuverlässigkeit der Passivsammler unter variablen Bedingungen zu untersuchen. Im dritten Experiment wurde der Einfluss von Trockenphasen (3h und 12 h) zwischen zwei Expositionsphasen untersucht, um potenzielle Desorptionseffekte oder Veränderungen in der Anreicherung zwischen zwei aufeinanderfolgende Regenereignisse zu erfassen. Die Ergebnisse bildeten die Grundlage zur Bewertung der Feldanwendbarkeit der Passivsammler unter realen Umweltbedingungen.

2.2 Aufbau des Feldstandorts

Im Zeitraum zwischen Frühjahr und Herbst 2025 wird ein Schilffiltersystem mit nachgeschaltetem Schönungsteich untersucht, welches als Pilotprojekt für die Behandlung von Mischwasserentlastungen dient. Ziel ist es, die Eliminationsleistung für organische Schadstoffe und Nährstoffe unter realen Bedingungen zu untersuchen.

Die Probenahme erfolgt an drei Messstellen entlang des Systems: im Zulauf zum Schilffilter (S1), im Ablauf des Schilffilters / Zulauf des Schönungsteichs (S2) und im Ablauf des Schönungsteichs (S3) (vgl. Abbildung 1).

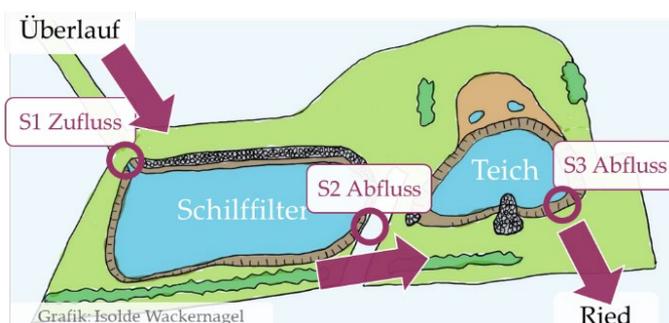


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Mischwasserentlastung mit Schilfteich-Sandfilter und Schönungsteich in Neerach (ZH). Die roten Kreise zeigen die Probenahmestellen (S1–S3) an.

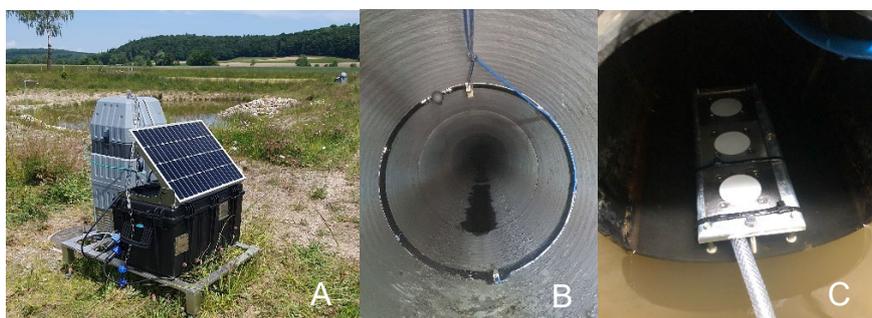


Abbildung 2: Probennehmer und Sensoren: (A) Automatischer Probennehmer mit Brennstoffzelle zum Betreiben der integrierten Kühlung. (B) Zulauf Schilffilter (S1) mit NIVUS Sensoren und Ansaugschlauch des Probennehmers. (C) Passivsammler im Ablauf des Schilffilters (S2).

An allen drei Standorten S1-S3 erfassen Keilsensoren von NIVUS kontinuierlich Wasserstand, Fließgeschwindigkeit, Durchfluss sowie Wasser- und Lufttemperatur

(vgl. Abbildung 2). Für die Beprobung von fünf Entlastungsereignissen kommt eine kombinierte Probenahmestrategie zum Einsatz:

- Automatische Probenehmer entnehmen alle 2 Minuten Proben, die zu zeitlich gemittelten sowie Durchfluss-proportionalen Mischproben für die Analyse von Schadstoffen und Nährstoffen gemischt werden (6 Proben/Flasche bei S1; 14 bei S2/S3).
- Passivsammler (HLB-Disks) für die Bestimmung der zeitgemittelten Schadstoffkonzentration (TWA) über das gesamte Ereignis und zum Vergleich mit den Wasserproben.

Die chemische Analyse zur Quantifizierung hydrophiler organischer Schadstoffe erfolgt mittels LC-HRMS/MS. Zusätzlich wird der Nährstoffgehalt (Nitrit, Nitrat, Phosphat) mithilfe Ionenchromatographie bestimmt. Basierend auf diesen Daten wird die Schadstoffelimination der einzelnen Systemkomponenten berechnet.

3 Resultate und Diskussion

3.1 Messung organischer Schadstoffe mittels Passivsammler

Die Laborergebnisse zeigen, dass beide getesteten Passivsammler (HLB und SDB-RPS) grundsätzlich zur Anreicherung hydrophiler organischer Schadstoffe geeignet sind. Alle Zielsubstanzen konnten detektiert werden. Quantitativ erzielten die HLB-Disks für den Großteil der Substanzen höhere akkumulierte Schadstoffmengen und Sammelraten (R_s), was auf eine insgesamt bessere Schadstoffaufnahme hindeutet. Die Aufnahme verlief bei den meisten Substanzen über den 24-stündigen Expositionszeitraum linear, was durch eine lineare Modellierung bestätigt wurde. Für 75 % der Substanzen lag der R^2 über 0.85, bei zwei Dritteln davon über 0.95 (vgl. Abbildung 3). Damit kann von einer integrativen Probenahme während mindestens 24 Stunden ausgegangen werden.

Der Vergleich der beiden getesteten Sorptionsphasen zeigt für die meisten Schadstoffe vergleichbare Sammelleistungen. Für einzelne Stoffe mit einem $\log K_{ow} > 2$ (z. B. 1,3-Diphenylguanidin, Citalopram) wiesen die HLB-Disks jedoch deutlich höhere Sammelraten (teils $>$ Faktor 2) auf. SDB-RPS zeigte nur bei Melamin, einer sehr polaren Verbindung, bessere Resultate.

Auch unter variierenden Konzentrationen zeigten die Passivsammler eine grundsätzliche Eignung. Der Vergleich der berechneten zeitgemittelten Schadstoffkonzentration mit der gemessenen Stoffkonzentration in der Wasserprobe zeigt ähnliche Konzentrationsverläufe, allerdings mit einer systematischen Überschätzung der berechneten Konzentrationen via Passivsammler um teilweise mehr als einen Faktor zwei. Diese Abweichung lässt sich durch nicht-lineare Schadstoffaufnahme einzelner Substanzen sowie durch leicht veränderte hydrodynamische Bedingungen erklären. Die Ergebnisse eines weiteren Tests zu Trockenphasen von 3 bzw. 12 Stunden zeigten keine signifikanten Unterschiede in den akkumulierten Schadstoffmengen, was auf eine vernachlässigbare Desorption oder zusätzliche Adsorption während Trockenphasen hinweist.

Insgesamt bestätigen die Resultate die grundsätzliche Eignung von Passivsammlern zur Erfassung zeitlich gemittelter Konzentrationen hydrophiler organischer Schadstoffe – auch unter realistischen, variablen Feldbedingungen. Für eine präzise Quantifizierung ist jedoch eine substanzspezifische Kalibrierung unter feldnahen Bedingungen erforderlich.

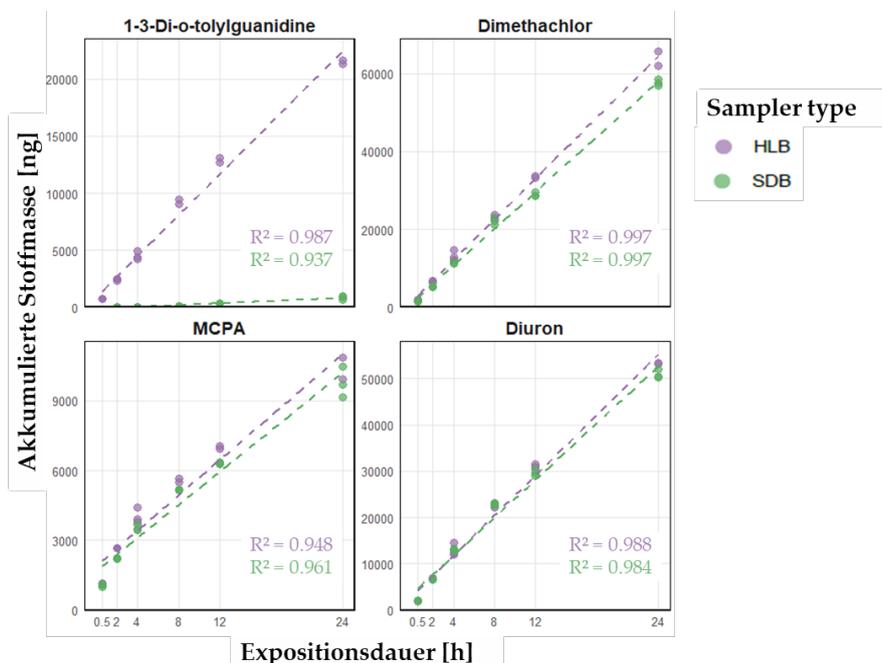


Abbildung 3: Akkumulierte Schadstoffmasse in Abhängigkeit der Expositionsdauer für vier ausgewählte Substanzen. Dargestellt sind die gemessenen Werte nach 0,5, 2, 4, 8, 12 und 24 Stunden Exposition (Punkte) sowie das jeweils gefittete lineare Modell (gestrichelte Linien).

3.2 Erste Beobachtungen zur Schadstoffelimination in der laufenden Feldstudie

Seit Mai 2025 werden die hydrologischen Parameter an allen drei Standorten kontinuierlich erfasst. Zusätzlich werden Durchfluss und Fließgeschwindigkeit in der Hauptleitung vor dem Regenüberlauf gemessen. Mischwasserentlastungen traten bei Überschreiten der Weiterleitungsmenge von 100 l/s auf. Zwischen Mai und Mitte Juli 2025 wurden sieben Entlastungen mit einer durchschnittlichen Dauer von rund 180 Minuten dokumentiert, wovon vier beprobt wurden.

Die Abflussdynamik entlang des Systems zeigte eine charakteristische Verzögerung. Etwa 30 Minuten zwischen Entlastung (S1) und erhöhtem Durchfluss im Schilffilter (S2), weitere 30 Minuten bis zum Schönungsteich (S3) (vgl. Abbildung 4).

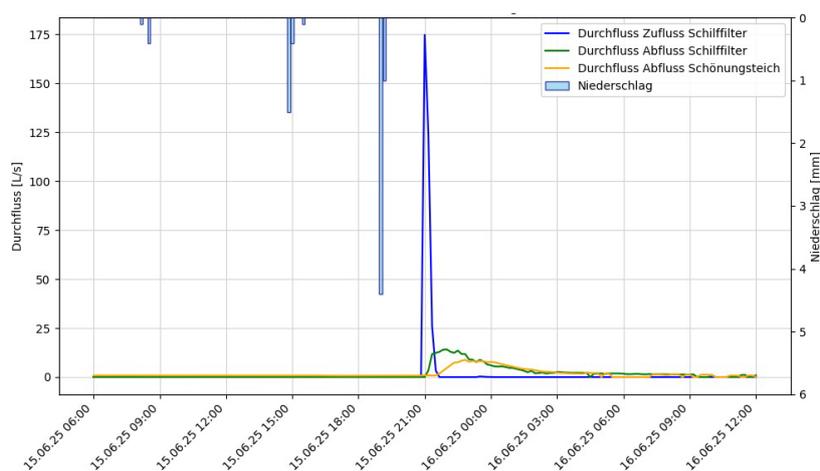


Abbildung 4: Entlastungsereignis vom 15. Juni 2025: Gemessener Durchfluss in Zulauf und Abfluss des Schilffilters sowie im Ablauf des Schönungsteichs. Die Niederschlagsdaten stammen von der nahegelegenen Wetterstation Kloten (ZH).

Erste chemische Analysen basierend auf einem beprobten Ereignis zeigen eine deutliche Reduktion des Gesamtphosphats (von 0.3 mg/L bei S1 auf 0.05 mg/L bei S2) im Abfluss des Schilffilters. Im Ablauf (S2) lagen die Phosphatwerte überwiegend unter der Bestimmungsgrenze, was auf eine effektive Phosphatelimination hinweist. Ammonium und Nitrit waren im Zulauf (S1) und im Ablauf des Schilffilters (S2) nicht nachweisbar. Da das beprobte Ereignis während der Nacht auftrat, ist davon auszugehen, dass überwiegend Regenabwasser untersucht wurde. Somit sind generell niedrige Konzentrationen von Ammonium und Nitrit zu erwarten. Für Nitrat konnte hingegen im Ablauf (S2) gegenüber dem Zulauf (S1) erhöhte Werte nachgewiesen werden, ein Hinweis auf Nitrifikation im Schilffilter. Diese gemessenen Konzentrationen deuten insgesamt auf die Relevanz biologischer Prozesse und das Potenzial des Schilf-Sandfilters zur Nährstoffelimination hin.

4 Schlussfolgerung und Ausblick

Passivsammler erwiesen sich als geeignete Methode zur zeitintegrierten Erfassung hydrophiler Schadstoffe in Regenabwasser. HLB-Disks zeigten im Vergleich zu SDB-RPS für die meisten Substanzen höhere Sammelraten, insbesondere bei Stoffen mit $\log K_{ow} > 2$. Die Aufnahme verlief über 24 Stunden überwiegend linear, auch unter variierenden Bedingungen. Trockenphasen bis 12 Stunden beeinflussten die Akkumulation kaum. Die berechneten Konzentrationen spiegeln Konzentrationstrends im Wasser gut wider, tendieren jedoch zur Überschätzung.

Bei ersten Messungen von einem Ereignis im Feld konnte eine Reduktion der Phosphatkonzentration im Schilffilter beobachtet werden. Gleichzeitig deutet ein Anstieg von Nitrat auf Nitrifikationsprozesse hin.

In den kommenden Monaten wird das System bei weiteren Entlastungsereignissen beprobt. Ziel ist es, die Eignung von Passivsammlern unter realen Bedingungen weiter zu validieren und die Eliminationsleistung des Behandlungssystems für Nährstoffe und organische Schadstoffe quantitativ zu bewerten. Eine Modellierung des Gesamtsystems soll dabei die chemischen und hydraulischen Prozesse integrieren.

5 Literatur

1. Mutzner, L., Bohren, C., Mangold, S., Bloem, S. & Ort, C. Spatial Differences among Micropollutants in Sewer Overflows: A Multisite Analysis Using Passive Samplers. *Environ. Sci. Technol.* 54, 6584–6593 (2020).
2. Wittmer, I. K., Scheidegger, R., Bader, H.-P., Singer, H. & Stamm, C. Loss rates of urban biocides can exceed those of agricultural pesticides. *Science of The Total Environment* 409, 920–932 (2011).
3. Gasperi, J. et al. Priority pollutants in urban stormwater: Part 2 – Case of combined sewers. *Water Research* 46, 6693–6703 (2012).
4. Poggioli, M., Cavadini, G. B., Zheng, Z., Rodriguez, M. & Mutzner, L. The impact of blue-green infrastructure on trace contaminants: A catchment-wide assessment. *Water Research X* 25, 100261 (2024).
5. Mutzner, L. et al. Passive samplers to quantify micropollutants in sewer overflows: accumulation behaviour and field validation for short pollution events. *Water Research* 160, 350–360 (2019).
6. Mutzner, L., Zhang, K., Luthy, R. G., Arp, H. P. H. & Spahr, S. Urban stormwater capture for water supply: look out for persistent, mobile and toxic substances. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 9, 3094–3102 (2023).

Korrespondenz an:

Fabienne Maire
Eawag, Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf. Schweiz
Telefon: +41 58 765 52 08
E-Mail: fabienne.maire@eawag.ch