

# Eckdaten zu Fachartikel im A&G

Die **Fachartikel** sind technisch-wissenschaftlicher Natur, sie stellen Ergebnisse und Schlussfolgerungen dar oder behandeln theoretische Aspekte eines Themas, das die Branche betrifft. Sie sollen an einer Erhebung oder gemessene Daten anknüpfen. Sie dürfen keinerlei Werbung beinhalten. Ein wissenschaftlicher Bericht wird im Allgemeinen in der dritten Person verfasst.

Bei Fachartikeln umfasst das Textmaterial:

- Titel max. 5 Worte (Haupttitel), Untertitel nach Bedarf
- Lead max. 3 Sätze, od. max. 500 Zeichen (inkl. Leerschläge)
- Ausführliche Zusammenfassung ca. 1200-1500 Zeichen, max. 3000 Zeichen (wird von Redaktion auf Französisch übersetzt)
- Bezug auf die Abbildungen und Tabellen im Text vermerken und Legendenvorschläge anbringen
- Länge nicht begrenzt, aber es gelten folgende Richtwerte: Textumfang rund 15 000 bis 18 000 Zeichen (inkl. Leerschläge) oder bis maximal 15 Seiten (mit MS Word 12 Punkte-Schrift und 1,5 Punkte Zeilenabstand)

# Deckblatt

Beitrag Titel: Neue Massnahme zur Regenwasserbehandlung

Autor1 Name: Burkhardt

Autor1 Vorname: Michael

Firma: HSR Hochschule für Technik Rapperswil

Adresse: Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil

Mail: michael.burkhardt@hsr.ch

Telefon: +41 55 222 4870

Autor2 Name: Schmidt

Autor2 Vorname: Stella

Firma: HSR Hochschule für Technik Rapperswil

Adresse: Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil

Mail: stella.schmidt@hsr.ch

Autor3 Name: Gohl

Autor3 Vorname: Matthias

Firma: HSR Hochschule für Technik Rapperswil

Adresse: Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil

Mail: info@watim.net

Autor4 Name: Zenker

Autor4 Vorname: Armin

Firma: FHNW Hochschule für Life Sciences

Adresse: Gründenstrasse 40, 4132 Muttenz

Mail: armin.zenker@fhnw.ch

Autor5 Name: Schmocker

Autor5 Vorname: Martin

Firma: Gemeinde Ostermundigen

Adresse: Bernstrasse 65d, 3072 Ostermundigen

Mail: martin.schmocker@ostermundigen.ch

Autor6 Name: Zbinden

Autor6 Vorname: Daniel

Firma: Gemeinde Ostermundigen

Adresse: Bernstrasse 65d, 3072 Ostermundigen

Mail: daniel.zbinden@ostermundigen.ch

Autor7 Name: Loretz

Autor7 Vorname: Adrian

Firma: Watersys

Adresse: Industriering 17, 3250 Lyss

Mail: a.loretz@watersys.ch

Autor8 Name: Bigler

Autor8 Vorname: Roland

Firma: Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern (AWA)

Adresse: Reiterstrasse 11, 3011 Bern

Mail: roland.bigler@bve.be.ch

Autor9 Name: Boller

Autor9 Vorname: Markus

Firma: aQa Engineering

Adresse: Grundackerstrasse 3a, 3804 Walisellen

Mail: markus.boller@emeriti.eawag.ch

# Neue Massnahmen zur Regenwasserbehandlung

Grosstechnische Erfahrung mit unterirdischer Retention und nachgeschaltetem Adsorberfilter

Lead (Maximum 3 Sätze oder 500 Zeichen total)

Eine zukunftsweisende Regenwasserbewirtschaftung sollte technologisch so ausgerichtet sein, dass die heutigen Emissionen anorganischer und organischer Schadstoffe im urbanen Bereich erfolgreich aus abfliessendem Regenwasser entfernt werden. Im Rahmen eines Entwicklungsprojektes wurde erst in Laborversuchen ein Material mit hoher hydraulischer Leitfähigkeit und hohem Stoffrückhalt ermittelt. Ausgehend von den Ergebnissen dieser Versuche wurden die geeignetsten Materialien in einer unterirdischen Anlage zur Retention und Behandlung von Regenwasser eingebaut und unter realen Bedingungen erfolgreich getestet.

*Michael Burkhardt, HSR Hochschule für Technik Rapperswil*

*Stella Schmidt, HSR Hochschule für Technik Rapperswil*

*Matthias Gohl, HSR Hochschule für Technik Rapperswil*

*Armin Zenker, FHNW Hochschule für Life Sciences*

*Martin Schmocker, Gemeinde Ostermundigen*

*Daniel Zbinden, Gemeinde Ostermundigen*

*Adrian Loretz, Watersys*

*Roland Bigler, Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern (AWA)*

*Markus Boller, aQa Engineering*

**Zusammenfassung** (ca. 1200-1500 Zeichen, max. 3000 Zeichen; wird übersetzt ins Französische)

Immer mehr organische Spurenstoffe kommen im Abwasser vor. Auch Regenwasserabflüsse aus Siedlungsgebieten sind neben den bekannten anorganischen Schadstoffen durch organische belastet. Verschmutztes Regenwasser ist zu behandeln. Bisher lag der Schwerpunkt auf GUS, Schwermetallen und PAK, wobei bevorzugt Bodenfilter zum Einsatz kamen.

Im Rahmen von Labortests wurden Adsorbermaterialien hinsichtlich des Rückhalts von Pestiziden, Kupfer und Zink untersucht. Nachfolgend wurden in einer unterirdischen Regenwasserretention und –behandlungsanlage für ein neun Hektare grosses Wohnquartier in Ostermundigen die zwei besten Materialien, ein Mischadsorber und ein Adsorberharz, eingebaut und überwacht. Die Beschickung der Adsorberflächen erfolgte zu Testzwecken über eine pneumatische Regelung, damit die gleichen Zuflussmengen bilanziert werden konnten.

Dabei zeigte sich, dass die Spurenstoffe und die Schwermetalle durchschnittlich zwischen 50 und 85 % zurückgehalten wurden, bevor das Niederschlagswasser direkt versickerte. Die Ablaufwerte der unpolaren Stoffe lagen stets  $< 0.1 \mu\text{g/L}$ . Von Mecoprop und DEET wurden frachtrelevante Ereignisse ebenfalls deutlich reduziert, jedoch zeigte es sich, dass solche Verbindungen aufgrund ihrer für die Adsorption ungünstigen Stoffeigenschaften ergänzend durch Massnahmen an der Quelle reduziert werden sollten. Die hydraulische Leistungsfähigkeit nahm während der Testzeit von einem Jahr nicht ab.

Mit der Regenwasserbehandlungsanlage wurde der Nachweis erbracht, dass zentrale Anlagen mit künstlichen Adsorbermaterialien eine hinsichtlich hydraulischer Kapazität und Elimination unerwünschter Spurenstoffe ausgezeichnete Leistungsfähigkeit aufweisen. Die Anlage wurde im Januar 2017 in den regulären Betrieb übergeben.

**Stichwörter** zum Artikel (ca. 5 Wörter)

Diffuse Einträge, Pestizide, Adsorbiermaterial, Regenwasser, Behandlungsanlage

---((Hier beginnt der Artikel))

## HINTERGRUND

In unserer Zivilisation werden immer mehr synthetische organische Stoffe in Umlauf gebracht. Daher ist es nicht überraschend, dass immer mehr organische Spurenstoffe in unsere Gewässer gelangen. Dazu gehören Arzneimittel, Pflanzenschutzmittel, Biozidprodukte und zahllose Industriechemikalien [1]. Die Anzahl ist nahezu unüberschaubar gross. Kritisch für die Gewässerqualität sind vor allem Stoffe mit langer Verweilzeit, hoher Mobilität und hoher Toxizität. Für die grosse Vielfalt an Spurenstoffen kennt die Schweizer Gewässerschutzverordnung (GSchV) bisher nur numerische Anforderungen für die Gruppe der Pflanzenschutzmittel und Biozidprodukte mit 0.1 µg/L je Einzelstoff [2]. Anders in der EU Wasserrahmenrichtlinie: dort sind stoffspezifische Umweltqualitätsnormen definiert, z. B. für Diuron (0.2 µg/L Jahresdurchschnitt, 1.8 µg/L Höchstkonzentration) und Terbutryn (0.065 µg/L Jahresdurchschnitt, 0.3 µg/L Höchstkonzentration). In der GSchV kennen wir solche stoffspezifischen Anforderungen nur für Schwermetalle, wie Kupfer, Zink und Nickel, sowie seitens Oekotoxzentrum Eawag EPFL Vorschläge für organische Spurenstoffe<sup>1</sup>.

Der Eintrag von Spurenstoffen in die Gewässer erfolgt punktuell über Kläranlagen und diffus aus Siedlungen, Verkehr und Landwirtschaft [3, 4, 5]. Zu den diffusen Eintragungswegen zählen Dränagen, Versickerung und Direkteinleitung via Trennsystem.

Zahlreiche organische und anorganische (Schwermetalle) Spurenstoffe stammen aus Gebäudehüllen und andern urbanen Oberflächen [6, 7, 8, 9]. Sie werden bei Regenwetter teilweise freigesetzt und über die Siedlungsentwässerung in die Gewässer geleitet. Als Beispiele können folgende Spurenstoffe angeführt werden:

---

<sup>1</sup> <http://www.oekotoxzentrum.ch/expertenservice/qualitaetskriterien/qualitaetskriterienvorschlaege-oekotoxzentrum>

- Glyphosat als Herbizid in Gärten, auf Plätzen und Grünflächen oder entlang von Eisenbahnen
- Propamocarb als Fungizid auf Gemüse in privaten Gärten oder im professionellen Gemüsebau
- Mecoprop und MCPA als Durchwurzelungsschutzmittel in wurzelfesten Bitumendachbahnen und als Herbizide auf Grünflächen und in der Landwirtschaft
- Terbutryn als Biozid (Algizid) in Dach- und Fassadenfarben sowie Aussenputzen
- Benzothiazol als Vulkanisationsbeschleuniger in Gummi-Abrieb von Pneus oder anderen Kautschukprodukten
- Zink und Kupfer aus Metallblechen im Hochbau, in Biozidprodukten und als Verschleissprodukte des Strassenverkehrs.

Immer häufiger sind die Quellen ausschliesslich im urbanen Raum zu finden, wie Flammschutzmittel aus Dichtungsbahnen (Organophosphate TBEP und TCPP) oder Dämmstoffe (HBCD). Viele weitere Quellen existieren, denen stets gemeinsam ist, dass organische und anorganische Spurenstoffe in unbekannter Menge bei Regenwetter freigesetzt werden und diese bevorzugt in kleinen Vorflutern zu lokalen und zeitlich begrenzten Stossbelastungen führen. In welche Masse die mit dem Regenwasser emittierten Stoffe auch ins Grundwasser von Siedlungsräumen gelangen, lässt sich nicht genau beurteilen, da Grundwasser-Überwachungsprogramme selten darauf ausgelegt sind.

## BEHANDLUNGSGEBOT UND MASSNAHMEN

Verschmutztes Regenwasser ist gemäss Gewässerschutzgesetz zu behandeln. Eine zukunftsweisende Behandlung soll der Belastung von Grund- und Oberflächenwasser vorbeugen. Doch welche Massnahmen sind dafür zu ergreifen?

Ein heute verbreitetes Vorgehen ist, verschmutztes Regenwasser von Strassen oder Dachflächen über bepflanzte Böden versickern zu lassen. Dafür geeignete Böden müssen eine hohe Wasserleitfähigkeit und eine gute mikrobielle Aktivität aufweisen.

Hydraulisch besonders geeignet wären sandige Substrate, die zwar strukturstabil, aufgrund ihrer schwachen Rückhaltewirkung für gelöste Spurenstoffe jedoch ungeeignet sind. Deren Wirkung beschränkt sich auf die Filterwirkung zur Abtrennung partikulärer Stoffe (GUS). Tonige Böden wiederum binden gelöste Schadstoffe erheblich besser, insbesondere Schwermetalle, weisen aber zu geringe Wasserleitfähigkeiten auf, um in Versickerungsanlagen eingesetzt zu werden.

Damit Boden als Adsorber seine geforderten hydraulischen Eigenschaften dauerhaft erbringt, muss dieser bepflanzt sein. Zur Etablierung ausreichenden Bewuchses ist eine Vorlaufzeit einzukalkulieren. So lange sollte die Filteranlage nicht mit Regenabwasser beschickt werden. Bleibt das Bepflanzen aus, kolmatiert der Boden und die Durchlässigkeit bricht ein. Für platzsparende Anlagen, die zügig in Betrieb genommen werden sollen, sind Böden folglich eher ungeeignet.

Vor dem Hintergrund der hydraulischen Limitierung und der beschränkten Wirkung traditioneller Bodenfilter bezüglich Rückhalt organischer und anorganischer Spurenstoffe und fehlender Flächen im innerstädtischen Bereich für solche Anlagentypen, rücken technische Regenwasserbehandlungsanlagen mit Adsorbermaterialien in den Mittelpunkt eines nachhaltigen Boden- und Gewässerschutzes. Dieser Entwicklung wird mit der neuen VSA-Richtlinie „Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter“ Rechnung getragen, gemäss derer Dach-, Fassaden, Platz- und Strassenwasser mit Adsorberanlagen behandelt werden kann [10].

Die richtige Wahl technischer Adsorbermaterialien eröffnet beim Stoffrückhalt neue Perspektiven, sofern deren Leistungsmerkmale bekannt sind. Zu solchen potentiell geeigneten Materialien zählen z.B. Zeolith, Bentonit, Ionentauscher, Aktivkohle und spezielle Materialmischungen. Eisenhydroxid gilt im Vollzug mittlerweile als Stand-der-Technik für den Rückhalt von Schwermetallen.

Bis heute werden Regenwasserbehandlungsanlagen auf im Regenwasserabfluss omniprésente Spurenstoffe selten untersucht. Die Überwachung des stofflichen Wirkungsgrades fokussiert überwiegend auf GUS, Kupfer und Zink und seltener noch auf die Gruppe der Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK). Deshalb ist die Leistungsfähigkeit bestehender technischer Regenwasserbehandlungsanlagen

zur Entfernung organischer Schadstoffe unter realen Betriebsbedingungen weitgehend unbekannt.

## VORSTUDIE ADSORBER

Welche Adsorbermaterialien für den Rückhalt von organischen Spurenstoffen geeignet erscheinen, wurde im Labor evaluiert. In Batch-Versuchen wurde das Sorptionsverhalten von 12 Pestiziden und zwei Schwermetallen an 31 Adsorbermaterialien und sieben Böden bestimmt. Berücksichtigt wurden z.B. die Substanzen Mecoprop, Terbutryn, Diuron, Isoproturon und Carbendazim sowie Kupfer und Zink. Die Materialien wurden mit einer Ein-Punkt Messung (1 mg/l je Pestizid, Kontaktzeit 24 h) durchgetestet, um nachfolgend für die geeignetsten Materialien die Sorptionsisothermen und Wasserdurchlässigkeit ( $k_f$ -Wert) zu ermitteln.

In den Batchversuchen zeigten 13 Adsorbermaterialien für die Summe aller Zielsubstanzen > 90 % Eliminationsleistung. Nur auf Pestizide bezogen wurden unter den gewählten Versuchsbedingungen bei fünf Adsorbentien > 97 % Elimination und beim Boden durchschnittlich 10% Elimination erreicht (Figur 1). Zu den Materialien mit hohem Rückhaltepotential zählen z.B. ein Mischadsorber (MA2 bzw. AD1) und Adsorberharz (IO1 bzw. AD2). Die Resultate zeigen auch, dass die Eisenhydroxide und mit Sand gemagerte natürliche Böden, in diesem Falle ein realer SABA-Boden mit  $k_f 3 \cdot 10^{-6}$  m/s, für die Elimination der Pestizide ungeeignet sind.

Dagegen entfernen Eisenhydroxide und einige vollsynthetische Adsorber Kupfer und Zink > 90 % und liegen damit vergleichbar hoch wie Böden mit 92 bis 98 %. Die Schwermetallbindung am Boden deckt sich gut mit Erfahrungswerten von natürlichen Böden.

Bei den leistungsfähigsten Materialien wurden durch einen Salzpuls, der die Tausalz-Belastung im Winter simulierte, nur sehr geringe Pestizid- und Schwermetallmengen erneut mobilisiert.

Das vergleichsweise hohe und unspezifische Adsorptionsvermögen einiger künstlicher Materialien für Pestizide und Schwermetalle und eine hohe hydraulische Wasserleitfähigkeit prädestinieren diese besonders für die technische Anwendung. Die Voraussetzungen für lange Standzeiten in der praktischen Anwendung sind damit

gegeben. Solche Materialien lassen sich platzsparend in technischen Anlagen einbauen. Die Entsorgung der Adsorbentmaterialien kann über eine Inertstoffdeponie oder thermische Verwertung erfolgen, oder das Material kann eventuell regeneriert werden.

## BEHANDLUNG OSTERMUNDIGEN

### ANLAGENKONZEPT

Im Rahmen einer Pilotierung wurde ein Adsorbentmaterial in einer unterirdischen, grosstechnischen Regenwasserretentions- und Versickerungsanlage in Ostermundigen (Kanton Bern, Schweiz) getestet und die hydraulischen und stofflichen Leistungsmerkmale ermittelt (vgl. Textbox). Ein Anlagenschema ist in Figur 2 dargestellt. Ziel der Behandlung war, Schwermetalle und organische Spurenstoffe quellennah zurückzuhalten, bevor das Wasser ins Grundwasser versickert wird. Das Anlagenkonzept wurde von der Firma Watersys entworfen.

An die Anlage sind Flächen von einer Wohnüberbauung, mehrere Wege und Strassen, ein Schulhausareal und zwei Sportplätze angeschlossen. Die gesamte Einzugsfläche umfasst rund 9.1 ha. Unter Berücksichtigung der flächenspezifischen Abflussbeiwerte sind gegenwärtig rund 3.3 ha<sub>red</sub> angeschlossen. Aufgrund starker Bautätigkeit wurde zuvor ein Teil der Strassenentwässerung von der Adsorbentanlage abgehängt. Durch Feinpartikeleintrag von Baustellenabwasser bestand die Gefahr einer Kolmation vom Adsorbent. Die Strassenentwässerung wurde vorübergehend über einen Bypass vor dem Schlammsammler direkt in die Schmutzwasserkanalisation geführt.

Die Regenabflüsse aus dem Quartier stammen beispielsweise von begrünten Flachdächern, welche mit wurzelfesten Bitumenbahnen (Mecoprop) ausgerüstet wurden. Weitere Stoffquellen sind die filmgeschützten Fassadenbeschichtungen, in denen Terbutryn, Diuron und Carbendazim als Biozide eingesetzt sind. Die Gebäude sind ohne Kupfer- und Zinkbleche ausgestattet. Das hatten Vorabklärungen ergeben. Die Sportplätze werden ohne Pflanzenschutzmittel kultiviert.

### WASSERFLÜSSE UND ADSORBER

Das abfließende Regenwasser gelangt über einen Schlamm­sammler (20 m<sup>3</sup>) in einen unterirdischen Retentionsspeicher (700 m<sup>3</sup>, Nidaplast-Blöcke EP 400, Watersys) (Figur 3) und danach in einen Zwischenschacht. Dort wird der Abfluss auf max. 10 l/s gedrosselt und über eine Ringleitung und 20 Zulaufstutzen, die in regelmässigen Abständen angeordnet sind, auf die Adsorberfilterfläche von 20 m<sup>2</sup> verteilt. Das gesammelte Sickerwasser wird danach über einen Kontrollschacht in eine unterirdische Versickerungsanlage mit Kiespackung (100 m<sup>2</sup>, 600 l/s Sickerleistung) ins Grundwasser versickert. Im Falle eines markanten Überstaus über dem Filterbett (z.B. Kolmation) wird das Wasser vom Zwischenschacht auf eine Wiese neben der Anlage entwässert (Notüberlauf).

Die 20 m lange und 1 m breite Filterstrecke wurde für Versuchszwecke in drei Segmente aufgeteilt. Von der Gesamtfläche sind Meter 1-18 (M1-18) im Juni 2015 mit einem neuartigen Mischadsorber (AD1) 40 cm hoch gefüllt. Das Substrat AD1 weist eine Schüttdichte von 750 g/l und einen Durchlässigkeitsbeiwert von  $k_f 9.0 \times 10^{-4}$  m/s auf und besteht aus mineralischen und organischen Komponenten (z. B. granuliert Aktivkohle, GEH). Ein Wasserteilchen, das den Adsorber passiert, benötigt für die 40 cm Filterstrecke theoretisch im Minimalfall ca. 4 Minuten. Ein Vliesstoff verhindert den Austrag des Adsorbers in den nachgeschalteten Versickerungsteil der Anlage. Meter 19 (M19) und Meter 20 (M20) sind davon hydraulisch getrennte Testplots mit je 1 m<sup>2</sup> Fläche. In M19 war ebenfalls AD1 mit 40 cm Schichthöhe und in M20 ein künstlicher Hochleistungsadsorber (AD2; AF5, Lanxess) mit 10 cm eingebaut. AD2 ist ein karbonisiertes Harz mit monodisperser Grössenverteilung im Bereich von 0.4 bis 0.8 mm Durchmesser. Eine hohe Porosität ermöglicht eine mit Aktivkohle vergleichbare spezifische Oberfläche von 1200 m<sup>2</sup>/g. Die Schüttdichte beträgt 550 bis 650 g/l, und der Durchlässigkeitsbeiwert wurde mit einem  $k_f$  von  $2.1 \times 10^{-3}$  m/s ermittelt. AD2 wurde in speziell angefertigte handliche Kissen eingefüllt und in drei Kissenlagen in den Plot eingebettet. Die Schichthöhe von AD2 wurde so gewählt, dass in beiden Adsorbern die gleiche Menge an für organische Spurenstoffe relevantem Adsorbiermaterial vorhanden war.

Der Gesamtzufluss der Anlage wurde im Schlamm­sammler und die Zulaufmengen von M19 bzw. M20 über je eine magnetisch induktive Durchflussmessung (MID) mit pneumatischer Mengenregelung (PNA) kontinuierlich erfasst. Eine pneumatisch gesteuerte Klappe sorgte für die Völlfüllung des MID und drosselte die

Durchflussmenge auf einen einstellbaren Maximalwert (Stebatec, Brügg). Die MID-gesteuerte Regelung war unmittelbar nach der Durchflussmessung angeordnet. Dadurch reagierte sie schnell auf Veränderungen und konnte den programmierten Regelwert mit kleinster Abweichung einhalten. Die eigentliche Regelarbeit übernahm ein PID-Regler.

Sobald die benachbarte Wetterstation Niederschlag meldet und darauffolgend innerhalb von 15 Minuten ein Zulauf zur Gesamtanlage von  $> 0.5$  l/s detektiert wurde, wurden durch die beiden PNA von M19 und M20 die Zuflüsse jeweils auf 0.2 oder 0.5 l/s pro Versuchsplot geregelt. Zu Versuchsbeginn wurde mit dem höheren, später dem geringeren Zufluss die Beschickung durchgeführt. Durch die pneumatische Abflussregelung wurden also gezielt gleiche Wassermengen auf die Plots geleitet.

## PROBENAHE UND ANALYSEN

Ziel der Beprobung war die Bilanzierung des Stoffrückhalts durch AD1 und AD2. Im Zwischenschacht wurde der Zulauf zur Adsorberfläche und bei M19 und M20 jeweils der behandelte Abfluss volumenproportional beprobt (LiquiPort CSP43 2000, Endress+Hauser). Die ereignisbezogenen Ablaufproben setzten sich aus 100 ml Teilproben zusammen, die jeweils alle  $0.4 \text{ m}^3$  Durchfluss entnommen wurden. Die Probenahme im Zulauf erfolgte zeitgleich mit der Probenahme von M19 und M20. Das Ende jeder Probenahme war mit Absinken der Gesamtzulaufmenge  $< 0.2$  l/s erreicht. Die Probenehmer schalteten aus und die pneumatischen Abflussregler von M19 und M20 schlossen. Das Ablaufwasser von Meter 1-18 wurde nicht beprobt.

Weiterhin wurden im Zu- und Ablauf die Trübung (FNU; Turbimax CUS52D, Endress+Hauser) sowie nur im Zulauf die elektrische Leitfähigkeit ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Indumax CLS50D, Endress+Hauser) kontinuierlich in 1 Minuten Intervallen aufgezeichnet. Die Trübungssensoren wurden durch Druckluft alle 2 Stunden und zusätzlich in regelmässigen Abständen sämtliche Sonden manuell gereinigt. Eine Kamera zeichnete Bilder von beiden Testplots in Abständen von 1 Stunde auf.

Um den logistischen Aufwand zur Überwachung der Anlage gering zu halten, wurde eine Datenfernabfrage eingesetzt (ARAbella, Stebatec, Brügg), die es den Projektteilnehmern erlaubte, den Anlagenstatus jederzeit abzufragen. Damit konnte fortlaufend Online die Trübungs- und Temperaturmessung, Leitfähigkeitsmessung,

Zuflussmessung, die Steuerung und Durchflussmessung der PNA, die Kamerabilder und die Daten der Wetterstation abgerufen werden. Zusätzlich wurden die Probenehmer gesteuert.

Im Labor wurden die Spurenstoffe Mecoprop, Terbutryn, Carbendazim, Diuron und DEET nach Festphasenextraktion (SPE) mit LC-MS/MS (Bestimmungsgrenzen 20 ng/L) sowie die Schwermetalle Kupfer und Zink mit ICP-OES analysiert. Die Auswahl der Stoffe erfolgte anhand von vier Kriterien (1) Pestizid wird bei Regenwetter freigesetzt, (2) Anwendung im Einzugsgebiet gegeben, (3) Substanzen repräsentieren verschiedene Anwendungen und Stoffeigenschaften und (4) in Vorkampagne analytisch nachweisbar.

## FELDTTEST

### HYDRAULISCHE LEISTUNGSFÄHIGKEIT

In Figur 4 sind der Niederschlag und der Zufluss zur Regenwasserbehandlungsanlage zwischen Juli 2015 bis August 2016 dargestellt.

Die Niederschlagsmenge beläuft sich kumuliert auf relativ geringen 750 mm. Die berechneten ereignisbezogenen Abflussbeiwerte für das Einzugsgebiet streuen zwischen 0.6 bis 1. Aufgrund der Schneeschmelze wurde in der Winterperiode auch ein Zufluss zur Anlage ohne Niederschlag gemessen. Dieses verzögert abfließende Wasser wurde nicht beprobt, da die PNAs geschlossen waren und das Wasser auf M1-18 gelangte.

Während der gesamten Messdauer von 14 Monaten trat kein Entlastungsereignis auf, sodass sämtliches Niederschlagswasser in der Anlage behandelt wurde. Der hydraulische Wirkungsgrad betrug folglich 100 %.

Die zwei je 1 m<sup>2</sup> Plots konnten bis zu 35 % der Zuflussmengen behandeln, jeweils geregelt für beide PNAs. Beide Adsorbermaterialien, AD1 und AD2, waren unter den eingestellten Betriebsbedingungen hydraulisch nicht überlastet. Zwar trat regelmässig ein kurzfristiger Wassereinstau auf, darauf folgten aber stets Perioden, in denen die Adsorber trockenfielen. Über die ganze Versuchsdauer wurde bei beiden Adsorbermaterialien keine Verschlechterung der hydraulischen Leitfähigkeit festgestellt.

## STOFFLICHE LEISTUNGSFÄHIGKEIT

In Figur 5 sind die Zuflusskonzentrationen für die fünf gemessenen Pestizide in den ereignisbezogenen Sammelproben dargestellt. Auffällig sind die grossen Schwankungen, die auf die Art der Quellen, das verzweigte Trennsystem und den Witterungsverlauf zurückzuführen sind. So mobilisiert und transportiert nicht jedes Regenereignis die Stoffe von Dächern oder Fassaden gleichermassen in die Anlage.

Die Konzentrationen von Mecoprop und DEET lagen in rund 80 % der Proben > 0.1 µg/l. Mecoprop trat in vier Ereignissen > 1.5 µg/l mit einer Maximalkonzentration von 4 µg/l auf, der höchsten Konzentration unter allen analysierten Einzelstoffen. Mecoprop steuerte wegen des starken Vorkommens an der Gesamtfracht der fünf Pestizide rund 50 % bei, wobei in den Sommermonaten die jeweils höchsten ereignisbezogenen Frachten erreicht wurden. Die Annahme ist, dass höhere Temperaturen und langer Wasserkontakt auf den Gründächern die Stofffreisetzung aus dem Bitumen begünstigt haben. Terbutryn und Diuron übertrafen noch in rund 50 % aller Proben den Anforderungswert, während dieser bei Carbendazim in keiner einzigen Sammelprobe überschritten wurde. Die hohen Konzentrationen von DEET sind überraschend. Das Auftreten wirft insgesamt die Frage auf, woher DEET freigesetzt wird, denn die Anwendung als Mückenschutzmittel (Repellent) im Einzugsgebiet des Regenwassernetzes scheint für das Auftreten in allen Proben nicht plausibel.

Die mittleren Konzentrationen von Kupfer und Zink belaufen sich auf 40 µg/l bzw. 120 µg/l (gesamt). Damit übersteigt Kupfer die Anforderung der GSchV für Oberflächengewässer (5 µg/l gesamt) um das 8-fache und Zink um das 6-fache (20 µg/l gesamt). Die Konzentrationsschwankungen von Zink sind stärker als jene von Kupfer ausgeprägt, ein Hinweis auf unterschiedlichen Quellen und Freisetzungsmechanismen.

Figur 6 zeigt die Elimination der fünf organischen Spurenstoffe und den zwei Schwermetallen in den beiden Adsorbermaterialien. Die mittlere Eliminationsleistung beruht auf der Bilanzierung von je 25 Abflussereignissen, die jeweils vollständig beprobt werden konnten. Dabei erreichten beide Adsorber im Mittel 80 % Rückhalt von Carbendazim und Diuron, beides vergleichsweise gut adsorbierende Pestizide (unpolar), und 50 % für die schlecht adsorbierenden Stoffe Mecoprop (eine polare Verbindung) und DEET (ein kleines Molekül). Mecoprop und DEET weisen

bekanntermassen auch einen geringen Rückhalt in Kläranlagen auf. Terbutryn lag mit 60 % Rückhalt zwischen beiden Gruppen.

Die Schwermetalle Zink und Kupfer wurden im AD1 im Mittel zu 60 % bzw. 85 % eliminiert. Die Anforderungen für Gewässer wurden bei Kupfer voll eingehalten und bei Zink um das 2-fache überschritten. Für AD2 wurde keine Elimination bestimmt, weil das Material nur für den Rückhalt von organischen Schadstoffen vorgesehen war.

Über die gesamte Versuchsdauer trat keine messbare Abnahme beim Stoffrückhalt auf, aber über die Einzelereignisse streute der relative Rückhalt um rund 10 bis 20 %. Auf die Stofffracht bezogen ist jedoch wichtiger, dass bei frachtrelevanten Ereignissen eine hohe Elimination erzielt wird. Diese Ereignisse traten bei warmer Witterung auf und waren nicht identisch mit abflussreichen Ereignissen, bei denen mit zunehmender Abflussdauer die Stoffbelastung zurückging.

Überraschenderweise schneidet das mit granulierter Aktivkohle modifizierte Produkt AD1 beim Spurenstoff-Rückhalt sogar mit 5 bis 15 % leicht besser ab als das Hochleistungsmaterial AD2 in Kissen. Vermutlich kommt zum Tragen, dass bei AD2 nur eine 10 cm dicke Sickerstrecke realisiert wurde und somit die Kontaktzeit auf der Sickerstrecke sehr kurz war und zudem Kurzschlussströmungen entlang der Kissen nicht auszuschliessen waren. Im Laborversuch zeigte nämlich AD2 einen deutlich höheren Stoffrückhalt unter gleichen Einbaubedingungen.

Insgesamt sind AD1 mit GAK aufgestockt und AD2 per se, jedoch bei hohen Kosten, sehr leistungsfähig beim Pestizidrückhalt. Im Labor wurden Beladungskapazitäten von 300 bis 400 mg Pestizide pro Gramm Adsorber (TS) ermittelt. Angesichts der kurzen Kontaktzeiten zwischen Stoff und adsorptiver Oberfläche auf einer Sickerstrecke von 10 bzw. 40 cm sind die Eliminationen für beide Materialien bemerkenswert. Dies spricht für eine rasche Kinetik und im Falle des Mischadsorbers AD1 für eine vielversprechende Materialmischung. Es ist anzumerken, dass die Schichthöhen der Adsorbermaterialien für die Versuche mit Absicht gering gewählt wurden, um die Empfindlichkeit der Adsorberleistung in der zur Verfügung stehenden Versuchszeit sichtbar zu machen. Bei der Bemessung von Neuanlagen ist zu beachten, dass mit grösseren Schichtdicken höhere Eliminationsraten der Schadstoffe und längere Standzeiten zu erzielen sind.

Bei den gut adsorbierenden Pestiziden Diuron und Terburyn lagen die Konzentrationen im Ablaufwasser stets deutlich unterhalb der numerischen Anforderung von 0.1 µg/l pro Pestizid. Angesichts des breiten Vorkommens von Spurenstoffen dürften weitere Stoffe im Regenwasser vorkommen, die zu den unpolaren Stoffen zählen und somit ebenfalls stark zurückgehalten werden dürften. Diese Annahme ist durch die Studien zu Spurenstoffen im Regenwasserabfluss begründet [6, 7]. Bei DEET und MCPP dagegen traten auch Ablaufkonzentrationen oberhalb der numerischen Anforderung auf. Da die Frachteinträge und die stoffliche Ökotoxizität gering sind, ist mit der Elimination um 50 % trotzdem viel erreicht. Es zeigt aber auch, dass solche schlecht adsorbierenden Stoffe nur mit erheblichem technischem Aufwand zu eliminieren sind und deshalb zur Reduktion unerwünschter Emissionen Massnahmen an der Quelle im Vordergrund stehen sollten.

Die Leitfähigkeits-Messung im Zulauf zur Ringleitung zeigte über die gesamte Versuchsdauer ein ähnliches Muster. Bei jedem Regenereignis sank die Leitfähigkeit aufgrund der Verdünnung auf ca. 300 µS/cm und stieg bei Trockenwetter auf 450 µS/cm langsam wieder an (Figur 7).

Im Zulauf der Adsorberfläche (nach Schlammsammler und Retention) stieg die Trübung, im Gegensatz zur elektrischen Leitfähigkeit, bei jedem Regenereignis an (Figur 7). Dieser rasche Anstieg, auch als „first flush“ bezeichnet, lag jeweils am Anfang eines Abflussereignisses und ist charakteristisch für die Abwaschung von Partikeln von urbanen Oberflächen. Die Trübung blieb in der Regel < 5 FNU, stieg aber bei first-flush Ereignissen im Frühjahr kurzfristig auf 20 bis 50 FNU. Die Ablauftrübung war > 70 % niedriger als im Zulauf, was darauf schliessen lässt, dass die Adsorbermaterialien einen erheblichen Teil der GUS effizient zurückzuhalten vermochten. Ein Unterschied zwischen der Trübung im Ablauf von AD1 und AD2 war nicht erkennbar.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Niederschlagswasser von Gebäuden, Strassen, Wegen und Plätzen umfasst einen ganzen Cocktail von anorganischen und organischen Schadstoffen. Unter den organischen Stoffen finden sich zahlreiche Substanzen, die aus Baumaterialien stammen, beim Liegenschaftsunterhalt verwendet oder vom Verkehr emittiert werden. Viele erhältliche Produkte werden zur Bekämpfung von Bakterien, Pilzen, Algen,

Insekten und Unkräutern eingesetzt und wirken deshalb a priori ökotoxisch. Die zahlreichen kleinen Regenwassereinleitungen über den Siedlungsraum verteilt führen zu einer diffusen Belastung vor allem kleiner Fließgewässer, die schwer kontrollierbar ist. Eine Fokussierung der Massnahmen auf Belastungsschwerpunkte ist daher wichtig.

Der Fall Ostermundigen erwies sich als hervorragendes Beispiel eines Regenwasserkonzepts, das eine zentrale Regenwasserbehandlung für ein grösseres neues Wohnquartier vorsah. Anstelle der bisher praktizierten Versickerung über eine belebte Bodenschicht in Versickerungsmulden oder Retentionsbodenfiltern konnte nachgewiesen werden, dass (1) durch den Bau einer unterirdischen Retention der Landbedarf wesentlich geringer gestaltet werden konnte und (2) die Reinigung des Regenabwassers über breit wirksames, künstliches Adsorbermaterial eine effektive, kompakte, wirtschaftliche und der Bodenbehandlung weit überlegene Lösung darstellt. Ein innovatives Adsorbermaterial und Anlagenkonzept ist nicht kostentreibend. Das Adsorbermaterial hat auf die Gesamtkosten sehr wenig Einfluss. Im Fall des kommerziell erhältlichen Adsorbermaterials AD1, welches Spurenstoffe und Schwermetalle wirkungsvoll entfernt, ist mit den gleichen Kosten zu rechnen wie bei einem herkömmlichen granulierten Eisenhydroxidfilter (GEH) oder anderen Mischsubstraten. AD2 kostet rund 10-mal mehr als AD1 und ist nur für Pestizide geeignet.

Die erstellte Behandlungsanlage in Ostermundigen zur Reinigung von Niederschlagsabwasser hat die Eignung hinsichtlich Betriebssicherheit und Wirksamkeit im grosstechnischen Betrieb bestätigt. Die Entfernung der Trübung sowie die gute Reduktion der Pestizide und Schwermetalle durch derartige Adsorberanlagen können massgeblich zu einer Entlastung der Umwelt beitragen. Die Auflagen der Behörden, dass eine der Versickerung über belebten Oberboden äquivalente Leistung der Adsorberanlage zu erbringen ist, konnten im Laufe der Versuche erfüllt werden. Die versuchstechnischen Einrichtungen wurden in der Folge zurückgebaut und die Anlage im Januar 2017 dem Normalbetrieb übergeben.

Die vorgestellte Technologie ist weiter optimierungs- und entwicklungsfähig. Der Langzeitbetrieb sowie Erfahrungen mit andern neuen Anlagen dieser Art werden den Fokus auf Retentionsvolumen, Drosselung und Adsorberfläche richten. Diese stehen in engem Zusammenspiel und können beliebig bemessen werden. Die hydraulische

und die wirtschaftliche Optimierung dieser Grössen müssen sich an den Anforderungen an die Adsorberleistung (Adsorptionskapazität, -kinetik) orientieren. Eine dynamische Simulation der Anlagenteile für unterschiedliche Regenereignisse wird nähere Informationen zu dieser Problematik liefern. Die Standzeit von Adsorberanlagen wird voraussichtlich in den meisten Fällen durch die hydraulische Leistungsfähigkeit (Kolmation) und nicht über die Adsorberleistung limitiert. Der Langzeitbetrieb solcher Anlagen wird erst Aufschluss geben, welche Standzeiten bezüglich hydraulischer Leitungsfähigkeit erreicht werden können. Im vorliegenden Fall Ostermündigen hat sich gezeigt, dass die hydraulische Leitfähigkeit trotz hoher Zuflussmengen und einer stetigen Zufuhr relativ geringer GUS-Mengen (Trübung) über die Untersuchungsdauer nicht abnahm, weil hohe Abriebfestigkeit und geringe Kolmation des Substrats vorlagen. Hingegen zeigte die zeitweise Einschwemmung grosser Mengen an Feststoffen von Baustellen, dass höhere Konzentrationen an GUS zu einer schnellen Kolmation führen.

Schliesslich ist aus Sicht der stofflichen Belastung von Regenwasserabflüssen im Siedlungsraum zu klären, welche zusätzlichen Massnahmen anstelle einer Behandlung geeignet sind. Grundsätzlich sind Massnahmen an der Quelle einzubeziehen, um die Stofffreisetzung dem Vorsorgeprinzip folgend zu reduzieren. Dies betrifft im vorliegenden Fall die Substanzen Mecoprop und DEET, welche schlecht adsorbierbar sind und weit verbreitet in Gewässern vorkommen. Daher sollte bei diesen Stoffen der Fokus auf Massnahmen an der Quelle gelegt werden. Die Erfahrung zeigt allerdings, dass eine proaktive Reduktion oft schwer umsetzbar ist. Immerhin konnte am Beispiel von Mecoprop gezeigt werden, dass eine durch den Bund unterstützte Information geänderte oder andere Fabrikate von Isolierbahnen zu verwenden, sehr wirksam sein kann [11].

#### **TEXTBOX**

Das Projekt wurde gefördert durch das Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Ökonomie und Innovation, Umwelttechnologieförderung UTF-Nr. 447.03.13 und UTF-Nr. 459.15.13.

Fig. 1: Adsorptionsverhalten von 12 Pestiziden an 32 Materialien, bestimmt in Batchversuchen. Grün markierte Materialien weisen einen Adsorption von >90 %, blaue < 90% auf. BO6 (braun) ist ein typischer SABA-Boden. MA: Mischadsorber, EH: Eisenhydroxide, IO: Ionentauscher/Adsorberharze, AC: Aktivkohlen, SO: Sonstige, BO: Böden.

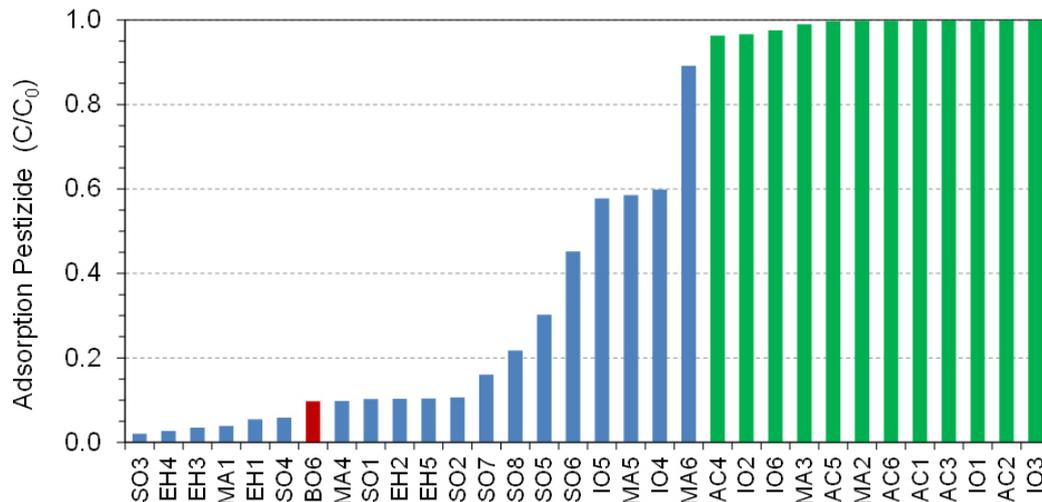


Fig. 2: Schema zum Anlagenkonzept Ostermundigen. Dargestellt sind im Querschnitt der Schlammssammler, die Retention, der Zwischenschacht, die Adsorberfläche mit Testplots und der Sickerschacht.

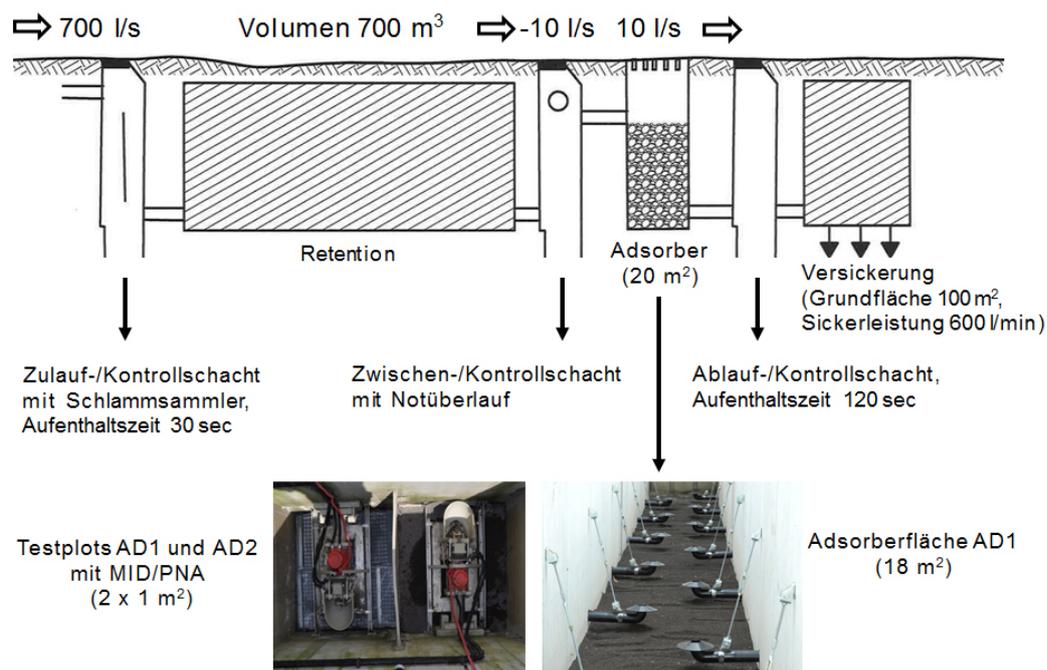


Fig. 3: Einbau des unterirdischen Retentionsspeichers (Nidaplast, Watersys) mit 700 m<sup>3</sup> Speichervolumen.



Fig. 4: Niederschlag und Zufluss zur Regenwasserbehandlungsanlage, dargestellt über 14 Monate Messdauer.

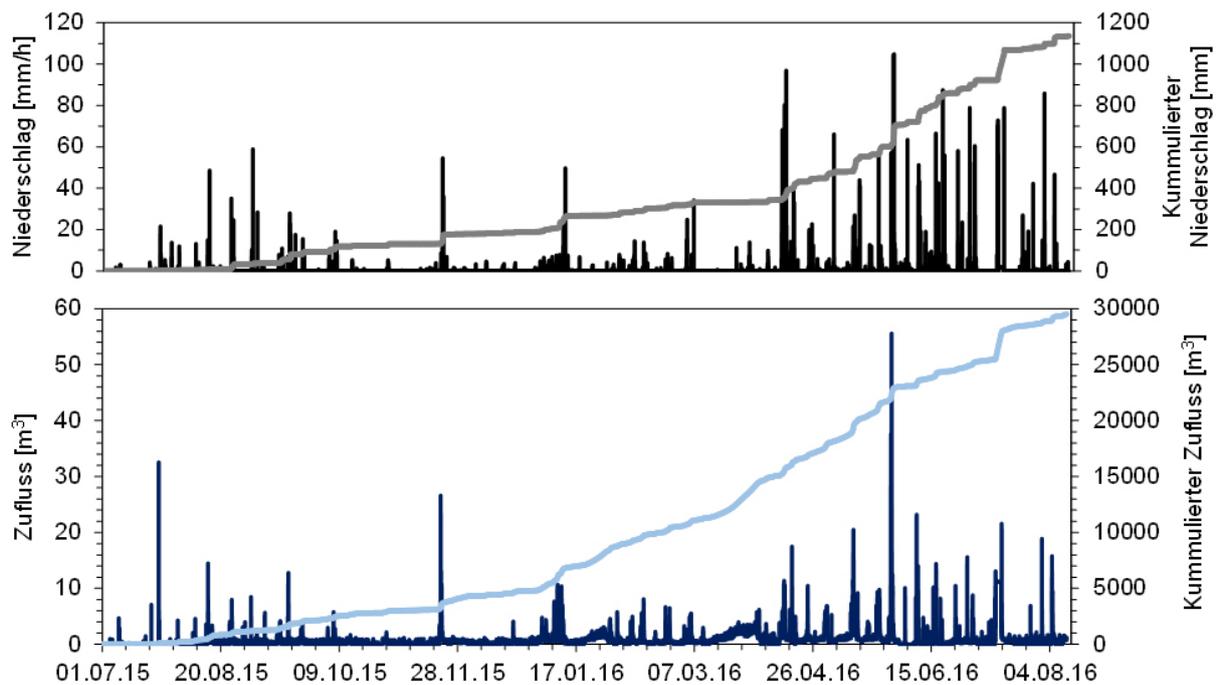


Fig. 5: Zuflusskonzentrationen von Carbendazim, Terbutryn, DEET, Diuron und Mecoprop für 25 analysierte Abflussereignisse. Die Konzentrationen sind logarithmisch aufgetragen.

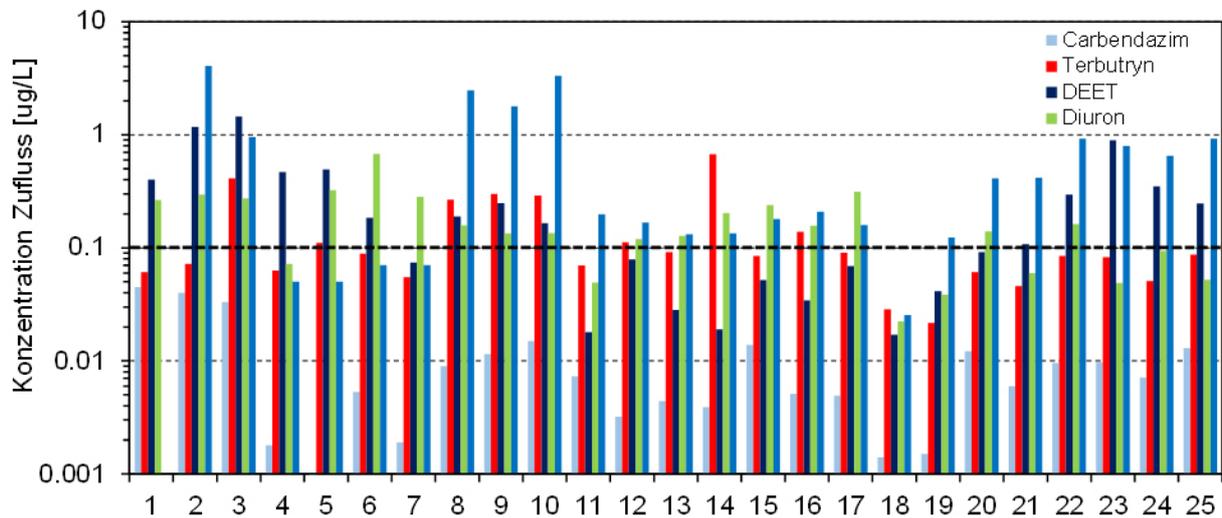


Fig. 6: Stofflicher Wirkungsgrad (Rückhalt) für fünf Pestizide beim Mischadsorber AD1 und Adsorberharz AD2 sowie für Kupfer und Zink bei AD1 über 25 Abflussereignisse.

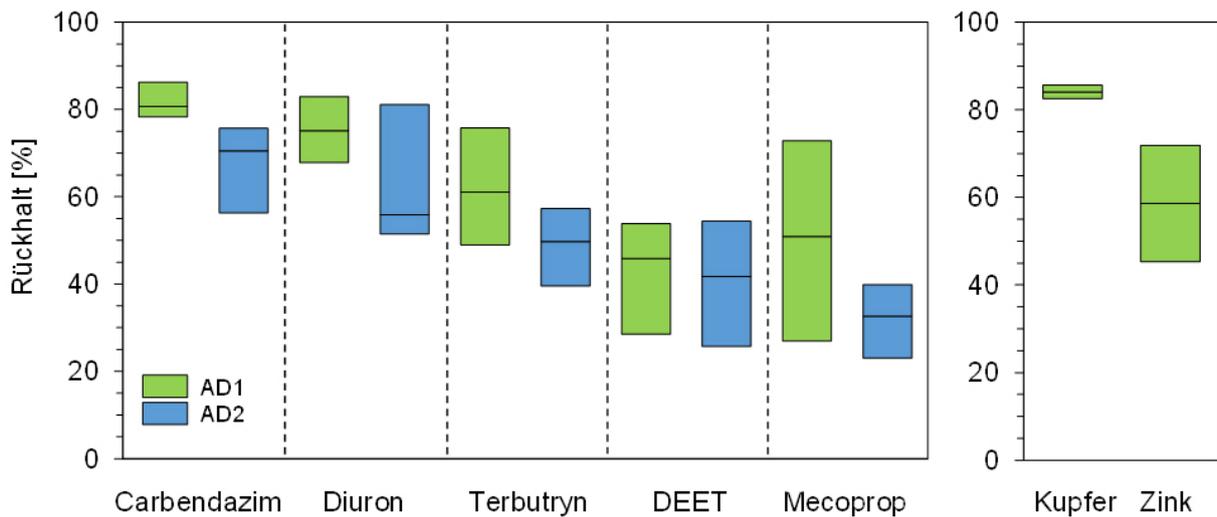
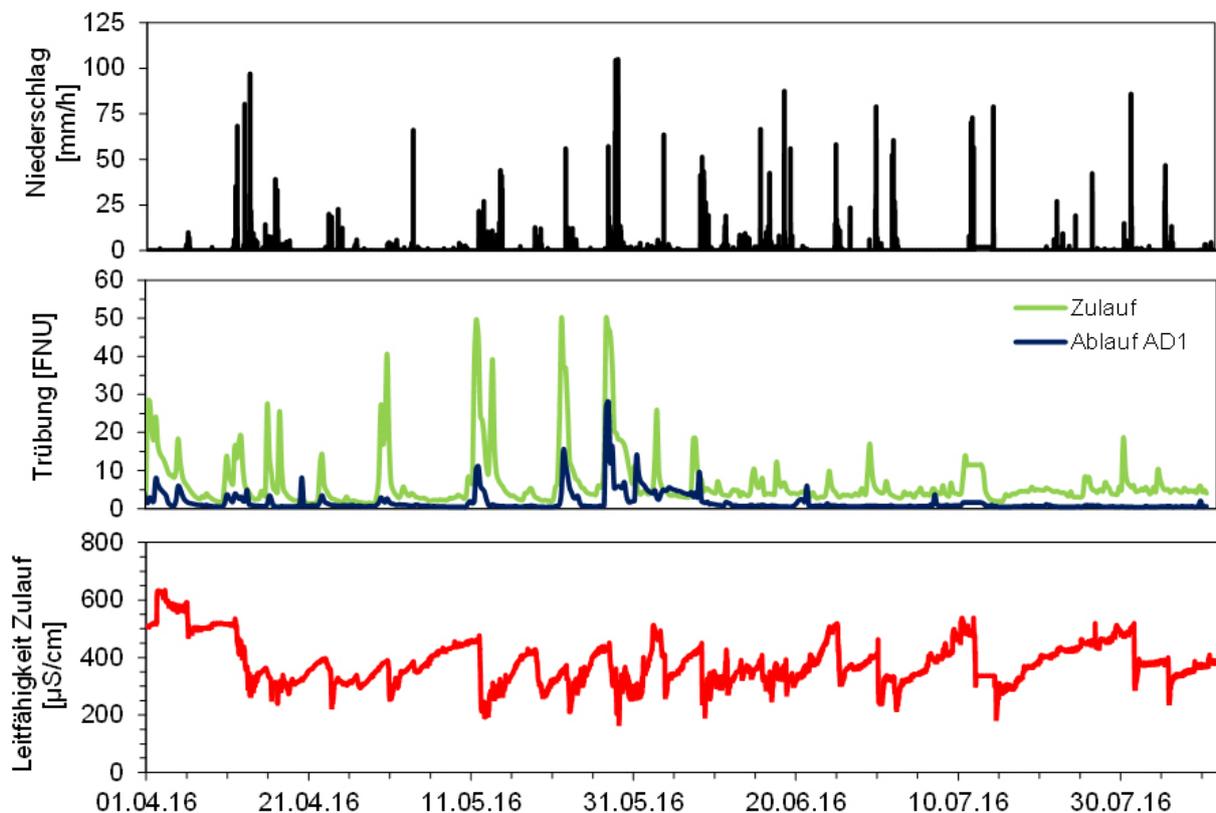


Fig. 7: Niederschlag, Leitfähigkeit und Trübung im Zu und Ablauf während der Messdauer.



## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Schluop, M., Thomann, M., Häner, A., Gälli, R. (2006): *Organische Mikroverunreinigungen und Nährstoffe - Eine Standortbestimmung für die Siedlungswasserwirtschaft. Umwelt-Wissen Nr. 0614., Bundesamt für Umwelt, Bern, 238 S.*
- [2] Gewässerschutzverordnung (GSchV), vom 28. Oktober 1998 (Stand am 1. Januar 2016)
- [3] Braun, Ch., Gälli, R., Leu, Ch., Munz, N., Schindler, Wildhaber, Y., Strahm, I. Wittmer, I. (2015): *Mikroverunreinigungen in Fließgewässern aus diffusen Einträgen – Situationsanalyse. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1514: 78 S.*

- [4] Wittmer, I., Moschet, C., Simovic, J., Singer, H., Stamm, C., Hollender, J., Junghans, M. (2014): *Über 100 Pestizide in Fließgewässern*. *Aqua und Gas*, 3:32-43.
- [5] Wittmer, I., Scheidegger, R., Bader, H.-P., Singer, H., Stamm, C. (2011): *Loss rates of urban biocides can exceed those of agricultural pesticides*. *Science of the Total Environment*, 409:920–932.
- [6] Wicke, D., Matzinger, A., Rouault, P. (2015): *Relevanz organischer Spurenstoffe im Regenwasserabfluss Berlins*. *Kompetenz-Zentrum Wasser Berlin gGmbH*, S. 99.
- [7] Clara, M., Ertl, T., Giselbrecht, G., Gruber, G., Hofer, T., Humer, F., Kretschmer, F., Kolla, L., Scheffknecht, C., Weiß, S., Windhofer, G. (2014): *Spurenstoffemissionen aus Siedlungsgebieten und von Verkehrsflächen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft*. Wien, Österreich.
- [8] Burkhardt, M., Zuleeg, S., Vonbank, R., Schmid, P., Hean, S., Lamani, X., Bester, K., Boller, M. (2011): *Leaching of additives from construction materials to urban storm water runoff*. *Water Science & Technology*, 63(9):1974-1981.
- [9] Boller, M., Häflinger (1996): *Verbleib von Schwermetallen bei unterschiedlicher Meteorwasserentsorgung*. *Gas, Wasser, Abwasser GWA*, pp. 3-15.
- [10] Baumgartner, D., Flury, R., Oppliger, S., Winz, E. (2017): *Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter, Entwurf Emmetten*. VSA-Tagung, 1.-3. Februar 2017.
- [11] BAFU (2009): *Information über Mecoprop in Bitumen-Dachbahnen*. BAFU, Bern.