
Abschlussbericht

Neue Maßnahmen zur Reduzierung der Gewässerbelastung durch Spurenstoffe aus urbanem Regenwasserabfluss

von

Daniel Wicke, Andreas Matzinger, Pascale Rouault

Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH (KWB), Cicerostr. 24, 10709 Berlin

Michael Burkhardt, Mirko Rohr, Michael Patrick

Ostschweizer Fachhochschule, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC)

Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil, Schweiz

Rudolf Töws, Franziska Steinweg

Funke Kunststoffe GmbH, Siegenbeckstraße 15, 59071 Hamm

Jan Leusmann, Thorsten Gerwing

Brillux GmbH & Co. KG, Weseler Straße 401, 48163 Münster

Dieses Projekt wurde finanziert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Aktenzeichen 34644)

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

AZ	34644/01	Referat	23	Fördersumme	266.982 €
----	-----------------	---------	-----------	-------------	------------------

Antragstitel Entwicklung eines biozidminimierten Fassadenschutzsystems und einer Regenwasserbehandlung mit Adsorbergemisch zur Reduzierung von Spurenstoffeinträgen aus urbanem Raum in die Gewässer

Stichworte Gewässer, Regenwasser, Reinigung, Schadstoff, Technik, Verfahren

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
31 Monate	20.05.2019	30.11.2021	1

Zwischenberichte keine

Bewilligungs-empfänger	Funke Kunststoffe GmbH	Tel	02388 / 3071163
	Siegenbeckstraße 15	Fax	
	Industriegebiet Uentrop Ost	Projektleitung:	Rudolf Töws
	D-59071 Hamm	Bearbeiter:	

Kooperationspartner Brillux GmbH & Co. KG, D-48163 Münster
Kompetenzzentrum Wasser Berlin, D-10709 Berlin
OST - Ostschweizer Fachhochschule, CH-8640 Rapperswil

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

In urbanen Gebieten kann abfließendes Niederschlagswasser durch organische Spurenstoffe wie Biozide, Weichmacher und Flammschutzmittel belastet sein. Diese Substanzen werden bei Regen von Gebäudeoberflächen wie beispielsweise Fassaden und Dächern sowie von Verkehrsflächen abgewaschen und können in Abhängigkeit von Witterung und Stadtstruktur über die Regenwasserkanalisation unbehandelt in die Gewässer gelangen. Ziel des Projektes ist es, Spurenstoffeinträge in urbane Gewässer aus Regenwasserabfluss mit neuen Maßnahmen zu reduzieren, um eine Verbesserung der Wasserqualität zu erreichen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

In dem Vorhaben werden zwei konkrete technische Maßnahmen demonstriert sowie Strategien entwickelt, mit denen die Spurenstoffeinträge verringert werden können. Die erste technische Maßnahme verbindet sich mit einem neu entwickelten Filmschutz für Fassadenbeschichtungen zur Schadstoffreduzierung „an der Quelle“. Dazu wird auf die Fassade eines Gebäudes das neue Produkt parallel zu einem konventionellen Produkt aufgetragen. Bei der Beschichtung wird auf die im konventionellen Filmschutz eingesetzten, langsam abbaubaren Algizide (Halbwertszeit 50–100 Tage) verzichtet. Stattdessen werden schnell abbaubare Wirksubstanzen eingesetzt, die durch eine spezielle Verkapselung trotzdem einen langen Schutz der Fassade gewährleisten. In einem Monitoring wurde die Umweltentlastung dieser neuen Fassadenbeschichtung bilanziert und mit dem herkömmlichen System verglichen. Die zweite Maßnahme bezieht sich auf die Entwicklung und Anwendung eines neuen Filtermaterials zur Behandlung von belastetem Regenwasser. Mit einer neuen Adsorbertechnologie können neben Feststoffen und Schwermetallen auch gelöste organische Spurenstoffe zurückgehalten werden. Die Technologie soll im städtischen Bereich unter Realbedingungen in einer dezentralen Anlage zur Regenwasserbehandlung eingesetzt werden. Im Projekt wird zudem eine generische Planungssystematik für die urbane Regenwasserbewirtschaftung entwickelt. Bausteine sind Maßnahmensteckbriefe sowie eine einfach anwendbare Frachtmodellierung zur Belastungseinschätzung in einem städtischen Einzugsgebiet mit und ohne geplante Maßnahmen. Zusammengefasst in einem Leitfaden, wird dieser exemplarisch in einem konkreten Gewässereinzugsgebiet in Berlin angewendet werden.

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden zwei neue Produkte zur Vermeidung bzw. Verringerung der Belastung aus Gebäudematerialien sowie ergänzende Konzepte zur Verbesserung der Gewässerqualität entwickelt. Das Reduktionspotential der zwei innovativen Technologien wurde unter Realbedingungen experimentell erfasst. Das neu entwickelte Schutzkonzept gegen Algen- und Pilzbefall für Fassadenbeschichtungen (Farbe und Putz) basiert auf in der Umwelt schnell abbaubaren Bioziden aus der Gruppe der Isothiazolinone. Die Auswaschung wurde an einer realen Gebäudefassade im direkten Vergleich mit einem konventionellen Produkt über mehr als ein Jahr bilanziert und in Laborversuchen ein schneller Stoffabbau erfolgreich ($DT_{50} < 3$ Tage) nachgewiesen. Mit dieser technischen Lösung an der Quelle lassen sich langlebige, gewässerbelastende Algizide vermeiden.

Mit dem Modell COMLEAM (www.comleam.com) wurden die Fassadenemissionen für die eingesetzten Wirkstoffe berechnet und mit der gemessenen Auswaschung verglichen. Die modellgestützte Simulation zeigte eine hohe Vorhersagegenauigkeit, sowohl bezüglich der Abflussmengen als auch der emittierten Stofffrachten. Mit dem Modell lassen sich auch Vorhersagen über den Untersuchungszeitraum hinaus treffen und Fragen zur Langzeitauswaschung bzw. den Umwelteintrag beantworten.

Zur Behandlung von verunreinigten Regenwasserabflüssen wurde außerdem ein Filtersubstrat im Labor entwickelt, welches neben Feststoffen und Schwermetallen auch organische Spurenstoffe wirksam zurückhält. Anschließend wurden zwei Testsysteme installiert (kleinskalig an Fassaden und als Regenfilter im Pilotmaßstab) und über mehr als ein Jahr der Zu- und Ablauf von Regenereignissen beprobt, um den Rückhalt unter Realbedingungen zu demonstrieren. Der Gesamtrückhalt war hoch und erreichte 85 % bis 97 % für Mecoprop, Diuron, Terbutryn, Benzothiazol, Kupfer und Zink. Mit dieser Behandlungsmaßnahme können an Belastungsschwerpunkten Einträge in Grund- und Oberflächengewässer stark reduziert werden.

Zur Unterstützung von Strategien für die Planung und Priorisierung von Maßnahmen wurde ein Frachtmodell weiterentwickelt, mit dem sich Belastungsschwerpunkte identifizieren lassen. Das Konzept wurde exemplarisch für zwei Berliner Gewässereinzugsgebiete angewendet und in verschiedenen Szenarien gezeigt, dass durch den gezielten Einsatz von Maßnahmen eine überproportionale Reduktion der Gewässereinträge erreicht werden kann. Die modellgestützte Methodik wurde in einem Leitfaden zur strategischen Maßnahmenplanung zusammengefasst. Zusätzlich wurden drei Merkblätter erarbeitet, die einen kompakten Überblick zu den relevanten Einflussgrößen und Maßnahmen sowohl am Gebäude als auch hinsichtlich nachgeschalteter Behandlung geben und somit geeignete Maßnahmen identifizieren hilft.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse des Projektes wurden auf der Konferenz AquaUrbanica 2021 als Posterpräsentation und werden 2022 als Vortrag der Fachöffentlichkeit vorgestellt. Die AquaUrbanica ist als deutschsprachige Konferenz (abwechselnd in Deutschland, Österreich und Schweiz) sehr anwendungsbezogen und stellt die Regenwasser- und Mischwasserbewirtschaftung im urbanen Bereich in den Mittelpunkt. Dabei werden sowohl Beiträge aus dem wissenschaftlichen, dem planerischen und dem betrieblichen Umfeld als auch von Aufsichtsbehörden, Ausrüster- und Herstellerfirmen angestrebt, so dass Projektergebnisse sehr nah an die Praxis gebracht werden können. Zusätzlich wird im November 2022 ein Fachartikel mit Darstellung der Projektergebnisse in der praxisnahen Schweizer Zeitschrift „Aqua und Gas“ erscheinen.

Fazit

Zwei innovative technische Maßnahmen zur Reduktion von Stoffbelastungen im Regenwasser - an der Quelle und durch nachgeschaltete Behandlung – wurden erfolgreich entwickelt und demonstriert. Durch diese Maßnahmen lassen sich langlebige Spurenstoffe in den Gewässern vermeiden, einerseits durch die vollständige Substitution entsprechender Biozide im Material (Farbe, Putz), andererseits durch den nicht-selektiven, stofflich breiten Rückhalt von organischen Spurenstoffen und Schwermetallen mit einer richtungsweisenden Adsorbertechnologie. Mit dem entwickelten einfachen Bilanzmodell lassen sich für konkrete (Gewässer)Einzugsgebiete mögliche Belastungen sowie sinnvolle emissionsmindernde Maßnahmen orientierend abschätzen und analysieren. Das methodische Vorgehen und die Anwendung zur Priorisierung von Maßnahmen sind in einem Leitfaden zusammengefasst. Relevante Maßnahmen zur Schadstoffreduktion in Regenwasserabfluss wurden in drei Merkblättern zusammengestellt und können in Planungsprozessen berücksichtigt werden.

Zusammenfassung

Urbaner Regenwasserabfluss enthält eine Vielzahl von Substanzen, die eine Beeinträchtigung der Gewässer als Ökosysteme und Wasserressourcen bewirken können. Neben klassischen Schadstoffen aus dem Verkehr wie Feststoffe, Schwermetalle und Mineralölrückstände ist seit einigen Jahren das Vorkommen von organischen Spurenstoffen im urbanen Regenwasserabfluss in den Fokus gerückt. In Bauprodukten kommen beispielsweise biozide Wirkstoffe wie Diuron und Terbutryn gegen Algen- und Pilzbefall zum Einsatz, die bei Regen in den Fassadenabfluss gelangen, oder Mecoprop und MCPA, die aus wurzelfesten Bitumendichtungsbahnen freigesetzt werden können.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden zwei neue Produkte zur Vermeidung bzw. Verringerung der Belastung aus Gebäudematerialien sowie ergänzende Konzepte zur Verbesserung der Gewässerqualität entwickelt. Das Reduktionspotential der zwei innovativen Technologien wurden unter Realbedingungen experimentell untersucht.

Dazu zählt ein neu entwickeltes Schutzkonzept gegen Algen- und Pilzbefall für Fassadenbeschichtungen (Farbe und Putz), in dem der Filmschutz durch in der Umwelt schnell abbaubare Biozide sichergestellt wird. Die Auswaschung wurde an einer realen Gebäudefassade im direkten Vergleich mit einem konventionellen Produkt über mehr als ein Jahr bilanziert und in Laborversuchen ein schneller Stoffabbau erfolgreich ($DT_{50} < 3$ Tage) nachgewiesen. Mit dieser technischen Lösung an der Quelle lassen sich gewässerbelastende Algizide vermeiden.

Mit dem Modell COMLEAM (www.comleam.com) wurden die Fassadenemissionen für die eingesetzten Wirkstoffe berechnet und mit der gemessenen Auswaschung verglichen. Die modellgestützte Simulation zeigte eine hohe Vorhersagegenauigkeit, sowohl bezüglich der Abflussmengen als auch der emittierten Stofffrachten. Mit dem Modell lassen sich auch Vorhersagen über den Untersuchungszeitraum hinaus treffen und Fragen zur Langzeitauswaschung bzw. den Umwelteintrag beantworten.

Zur Behandlung von verunreinigten Regenwasserabflüssen wurde außerdem ein Filtersubstrat im Labor entwickelt, welches neben Feststoffen und Schwermetallen auch organische Spurenstoffe wirksam zurückhält. Anschließend wurden zwei Testsysteme installiert (kleinskalig an Fassaden und als Regenfilter im Pilotmaßstab) und über mehr als ein Jahr der Zu- und Ablauf von Regenereignissen beprobt, um den Rückhalt unter Realbedingungen zu demonstrieren. Der Gesamtrückhalt war hoch und erreichte 85 % bis 97 % für Mecoprop, Diuron, Kupfer und Zink. Mit dieser Behandlungsmaßnahme können an Belastungsschwerpunkten Einträge in Grund- und Oberflächengewässer stark reduziert werden.

Zur Unterstützung von Strategien für die Planung und Priorisierung von Maßnahmen wurde ein Frachtmodell weiterentwickelt, mit dem sich Belastungsschwerpunkte identifizieren lassen. Das Konzept wurde exemplarisch für zwei Berliner Gewässereinzugsgebiete angewendet und in verschiedenen Szenarien gezeigt, dass durch den gezielten Einsatz von Maßnahmen eine überproportionale Reduktion der Gewässereinträge erreicht werden kann.

Die modellgestützte Methodik wurde in einem Leitfaden zur strategischen Maßnahmenplanung zusammengefasst. Zusätzlich wurden drei Merkblätter erarbeitet, die einen kompakten Überblick zu den relevanten Einflussgrößen und Maßnahmen sowohl am Gebäude als auch hinsichtlich nachgeschalteter Behandlung geben und somit geeignete Maßnahmen identifizieren hilft.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Anwendung einer neuen algizidfreien Fassadenbeschichtung.....	1
2.1	Standort und Versuchsaufbau	2
2.2	Ergebnisse zur Biozidauswaschung.....	3
2.3	Modellierung von Fassadenabfluss und Stoffemission	4
2.3.1	Beschreibung der Modelldaten	5
2.3.2	Ergebnisse der Modellierung.....	6
2.4	Abbauverhalten der Biozide	8
2.5	Fazit algizidfreie Beschichtung.....	9
3	Entwicklung eines Adsorbersubstrats und Untersuchungen zur dezentralen Regenwasserbehandlung.....	10
3.1	Substratentwicklung im Labor	10
3.2	Substratuntersuchungen an Fassaden.....	11
3.3	Pilotanlage zur Regenwasserbehandlung.....	12
3.3.1	Installation und Probenahme	12
3.3.2	Ergebnisse zur hydraulischen Belastung.....	14
3.3.3	Ergebnisse zur stofflichen Belastung und zum Stoffrückhalt	14
3.4	Fazit Substrat	17
4	Abschätzung der Wirksamkeit von Maßnahmen mit Bilanzmodell	18
4.1	Ziel der Modellanwendung.....	18
4.2	Vorgehen.....	18
4.3	Charakterisierung der beiden Gewässereinzugsgebiete	18
4.4	Ergebnisse	19
4.4.1	Gebietskonzentrationen	19
4.4.2	Maßnahmen-Szenarien.....	20
4.4.3	Potential zur Reduktion von Belastungen durch Maßnahmen.....	21
4.5	Fazit Bilanzmodell	22
5	Leitfaden und Maßnahmenmerkblätter	23
5.1	Leitfaden	23
5.2	Merkblätter.....	23
6	Schlussfolgerungen.....	24
7	Quellen	25
8	Anhang.....	26
8.1	Leitfaden und Merkblätter.....	31

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsflächen für die Pilotanwendung des algizidfreien Fassadensystems und der Regenwasserminifilter.	2
Abbildung 2: Konzentration von Terbutryn (Filmschutz A) im Fassadenabfluss je Regenereignis... 3	3
Abbildung 3: Konzentration von OIT (Filmschutz B) im Fassadenabfluss je Regenereignis.	4
Abbildung 4: Kumulierte Emission vs. kumulierten Abfluss für Terbutryn (konventionelles Produkt, Probefläche 2) und OIT (neues Produkt, Probefläche 4) im Fassadenabfluss der Versuchsflächen (Werte pro m ²).	4
Abbildung 5: Regenhöhe und kumulierter Niederschlag von WWU-Wetterstation Münster über den Zeitraum der Feldversuche.	5
Abbildung 6: Emissionsfunktionen (Linien) für die Biozide in der konventionellen Beschichtung (links, Probenfläche 2 mit Filmschutz A) und der neuen (rechts, Probenfläche 4 mit Filmschutz B). Die Punkte entsprechen den kumulierten Emissionen aus den Feldversuchen.	6
Abbildung 7: Vergleich von simuliertem und gemessenem Fassadenablauf von Probefläche 2.	6
Abbildung 8: Vergleich von simulierter und gemessener Terbutryn-Emission je Ereignis (oben) sowie kumulierter Emission gegen Versuchsdauer und Abflussmenge (unten) von Probefläche 2.	7
Abbildung 9: Vergleich von simulierter und gemessener OIT-Emission je Ereignis (oben) und kumulierter OIT-Emission gegen die Versuchsdauer und Abflussmenge (unten) von Probefläche 4.	7
Abbildung 10: Vergleich Abbau von Terbutryn (konventionelles Produkt) und OIT (neues Produkt) bei Mischung des Fassadenablaufs mit Oberflächenwasser (1:4) (links). Einfluss des Anteils von Oberflächenwasser an Abbaugeschwindigkeit von OIT (nur Fassadenabfluss und Mischung 1:1 bzw. 1:4) (rechts).....	9
Abbildung 11: Aufbau Säulenversuch (links) und Rückhalt für verschiedene Testsubstrate (rechts).	10
Abbildung 12: Rückhalt für die Zielmischung (links) und Restgehalt der betrachteten Wirkstoffe im Substrat bzw. Boden nach 3 Wochen (rechts).....	11
Abbildung 13: Minifilter für Probeflächen 1 und 3 der Fassadenuntersuchungen in Münster (siehe Kapitel 2) (links); Konzentrationsverlauf für Terbutryn im Fassadenabfluss mit und ohne Filter (rechts).....	12
Abbildung 14: Pilotinstallation des Regenfilters, an den 150 m ² Fassadenfläche mit Abflusrrinnen aus Zink und Kupfer, zwei Testflächen mit Bitumenbahnen sowie zwei Testflächen mit EPDM-Bahnen angeschlossen sind.	13
Abbildung 15: Gemessene Zuflüsse in den Filter (Tagessummen) und markierte Einzelproben... 14	14
Abbildung 16: Regenhöhen und Filterzuflüsse aller analysierten Regenereignisse.	14
Abbildung 17: Zulaufkonzentrationen für Zink, Kupfer, vier Spurenstoffe und drei Transformationsprodukte (n=19).	15
Abbildung 18: Konzentrationsverlauf von Mecoprop und Diuron (links) sowie Terbutryn und Benzothiazol (rechts). Die gepunktete Linie dient einer besseren Lesbarkeit des Diagramms und repräsentiert keine Messwerte.	15
Abbildung 19: Stoffrückhalt der Gesamtfracht im Monitoringzeitraum von 13 Monaten.	16
Abbildung 20: Frachtreduktion der organischen und anorganischen Stoffe (links) und die Transformationsprodukte (rechts) für 19 Einzelereignisse.	16

Abbildung 21: Verlauf der Frachtreduktion der Einzelereignisse für Diuron, Mecoprop und Terbutryn (die gepunktete Linie dient einer besseren Lesbarkeit des Diagramms und repräsentiert keine Messwerte).....	17
Abbildung 22: Anteil Stadtstrukturen am jährlichen Regenwasserabfluss für a) die Wuhle und b) den Flughafensee. Stadtstrukturen: ALT = Altbau, NEU = Neubau, GEW = Gewerbe, EFH = Einfamilienhäuser, AND = Andere Stadtstrukturen.	19
Abbildung 23: Berechnete mittlere Konzentrationen für die drei Zielparameter im Regenwasserzufluss in die Wuhle (a) und gemessene Konzentrationen in der Panke (b).	19
Abbildung 24: Frachtanteile für Diuron, Zink und Mecoprop nach Stadtstruktur (SST) und Quelle für die Einzugsgebiete der Wuhle (a-c) und des Flughafensees (d-f).....	20
Abbildung 25: Reduktion der Gesamtfracht für die drei Szenarien, jeweils links für die Wuhle und rechts für den Flughafensee. Die Frachtreduktion wird dem „Aufwand“ gegenübergestellt: in a) dem Anteil der sanierten Putzfassadenfläche an allen Putzfassadenflächen sowie in b) und c) dem behandelten Anteil des Gesamtgebietsabflusses.	21
Abbildung 26: Fassadenrinne für Probefläche 1 – 4 der Fassadenuntersuchungen.....	26
Abbildung 27: Konzentration von OIT im Fassadenabfluss der Versuchsflächen 1 und 2 (konventionelle Farbe mit Filmschutz A) je Regenereignis.	26
Abbildung 28: Konzentration von DCOIT im Fassadenabfluss der Versuchsflächen 3 und 4 (neue Farbe mit Filmschutz B ohne langlebige Algizide) je Regenereignis.	26
Abbildung 29: Konzentration von OIT im Fassadenabfluss der Versuchsflächen 3 und 4 (neue Farbe mit Filmschutz B ohne langlebige Algizide) je Regenereignis.	27
Abbildung 30: Abbau von DCOIT im Fassadenablauf von Probefläche 4 (neues Produkt).	27
Abbildung 31: Vergleich von simuliertem und gemessenen Fassadenablauf von Probefläche 4...	28
Abbildung 32: Vergleich von simulierter und gemessener OIT-Emission je Ereignis (oben) und kumulierter OIT-Emission gegen Versuchsdauer und Abflussmenge (unten) von Probefläche 2.....	28
Abbildung 33: Vergleich von simulierter und gemessener DCOIT-Emission je Ereignis (Mitte) und kumulierter DCOIT-Emission gegen Versuchsdauer und Abflussmenge (unten) von Probefläche 4.....	29
Abbildung 34: Konzentrationsverlauf für Zink (links) sowie Kupfer (rechts), jeweils gesamt und gelöst.	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht zu den Probeflächen mit den Einsatzmengen der bioziden Wirkstoffe.....	3
Tabelle 2: Übersicht analysierter Substanzen und deren Herkunftsflächen in der Testinstallation.	13
Tabelle 3: Parameter der logarithmischen Emissionsfunktionen für verschiedene Probeflächen und Substanzen.	27
Tabelle 4: Gemessene und simulierte Gesamtfracht von Terbutryn, OIT und DCOIT aus Probefläche 2 und 4 während der Versuchsdauer.	28
Tabelle 5: Wichtigste Kenngrößen der analysierten Proben vom Zu- und Abfluss des Regenfilters.	29
Tabelle 6: Übersicht der in den beiden Mischproben des Regenfilters enthaltenen Einzelereignisse. Farblich markiert sind die jeweiligen Teilproben (n=13).....	30

1 Einleitung

Die Behandlung von Regenwasserabfluss im urbanen Raum konzentriert sich bisher hauptsächlich auf klassische Schadstoffe aus dem Verkehr, wie Feststoffe, Schwermetalle und Mineralölrückständen, oder Dachmaterialien aus Metall. Seit einigen Jahren ist auch das Vorkommen von organischen Spurenstoffen im urbanen Regenwasserabfluss in den Fokus gerückt (Gasperi et al. 2014; Wicke et al. 2017). In Bauprodukten kommen beispielsweise biozide Wirkstoffe wie Diuron und Terbutryn gegen Algen- und Pilzbefall zum Einsatz, die bei Regen in den Fassadenabfluss gelangen, oder Mecoprop und MCPA, die aus wurzelfesten Bitumendichtungsbahnen freigesetzt werden (Burkhardt et al. 2009b; Burkhardt et al. 2012). Zwar übersteigen die Mengen an Schwermetallen diejenigen organischer Spurenstoffe um Größenordnungen (etwa zwei Zehnerpotenzen), jedoch ist die toxische Wirkung einiger Spurenstoffe sehr viel höher (Burkhardt et al. 2009a; Wicke et al. 2017).

Um zu verhindern, dass diese Stoffe durch Versickerung ins Grundwasser oder über die Regenkanalisation in Oberflächengewässer gelangen, ist belastetes Regenwasser zu behandeln, beispielsweise in technischen oder naturnahen Filteranlagen. Dieser nachgeschaltete Ansatz ist ein wichtiger Baustein zur Reduzierung der Umweltbelastung durch urbanen Regenwasserabfluss.

Darüber hinaus stehen Maßnahmen an der Quelle an erster Stelle, um umweltproblematische Emissionen zu vermeiden oder zu vermindern. Bei den Fassadenbeschichtungen stehen insbesondere die bioziden Wirkstoffe Diuron, Terbutryn und Isoproturon im Fokus, die als Filmschutzmittel in Fassadenfarben oder Putze eingesetzt werden, um einen Bewuchs der Fassadenflächen mit Algen oder Pilzen zu verhindern. Alle drei Substanzen sind in die Liste der prioritären Stoffe der europäischen Wasserrahmenrichtlinie aufgenommen. In der Oberflächengewässerverordnung (OGewV 2016) gelten deshalb als Umweltqualitätsnormen Höchstwerte für die Jahresdurchschnittskonzentration (JD-UQN) sowie zulässige Höchstkonzentrationen (ZHK-UQN) in Oberflächengewässern. Diese Konzentrationen können in urbanem Regenwasserabfluss überschritten werden (Wicke et al. 2021a), sodass während Regenereignissen auch eine Überschreitung insbesondere in kleineren Gewässern mit Einleitungen von Regenwasserabflüssen möglich ist. Gerade die Langlebigkeit dieser Wirkstoffe (Halbwertszeiten von 50-100 Tagen) führen zu möglichen Beeinträchtigungen in aquatischen Ökosystemen. Eine Substitution mit Wirkstoffen, die in der aquatischen Umwelt schnell abbaubar sind, beispielsweise Isothiazolinone, kann hier sowohl dem Schutz und der Werterhaltung der Fassade, als auch dem Anspruch einer geringen Beeinträchtigung der Umwelt gerecht werden.

Im DBU-Projekt „Entwicklung eines biozidminimierten Fassadenschutzsystems und einer Regenwasserbehandlung mit Adsorbergemisch zur Reduzierung von Spurenstoffeinträgen aus urbanem Raum in die Gewässer“ wurden zwei innovative technische Maßnahmen - an der Quelle und durch Behandlung des Regenwassers - unter Realbedingungen erfolgreich demonstriert. Zusätzlich wurde mit Hilfe eines Bilanzmodells die Wirksamkeit dieser Maßnahmen für zwei konkrete Gewässereinzugsgebiete für verschiedene Szenarien quantifiziert und die Methodik in einem Leitfaden zusammengefasst. Diese Maßnahmen tragen dazu bei, die Gewässerbelastung urbaner Gewässer zu reduzieren.

2 Anwendung einer neuen algizidfreien Fassadenbeschichtung

Alle Gebäude und deren Fassaden unterliegen einer Vielzahl von Einflussfaktoren. Je nach Ausrichtung und Gegebenheiten bieten Fassaden Mikroorganismen einen Lebensraum. Algen und Pilze siedeln sich auf der Fassade an und verändern dadurch deren ursprüngliches Aussehen. Durch den Einsatz von Bioziden gelingt es, für einen gewissen Zeitraum den Befall zu verhindern und somit einen Beitrag zur Werterhaltung der Gebäude zu leisten. Allerdings werden die eingesetzten Biozide bei Regenereignissen ausgewaschen und gelangen so in die Umwelt. Klassische Wirkstoffgemische beinhalten

dabei meist einen der algiziden Wirkstoffe Diuron, Terbutryn oder Isoproturon, die in der Umwelt schlecht abbaubar sind (Halbwertszeit 50-100 d) und deshalb Gewässer belasten können.

Mit einem innovativen Produkt soll demonstriert werden, dass die Fassaden auch ohne den Einsatz von schlecht abbaubaren Algiziden (Terbutryn, Diuron, Isoproturon) genauso lange frei von Algen und Pilzen gehalten werden können wie konventionelle Produkte. Zum Filmschutz werden als Wirkstoffe ausschließlich die beiden verkapselten Isothiazolinone OIT und DCOIT eingesetzt, die eine schnelle Abbaubarkeit im Wasser aufweisen (Halbwertszeit <3 Tage). Durch die besondere Art der Verkapselung (sehr dichte Polymerkugeln, ca. 10 – 50 µm Größe) sind die flüssig integrierten Wirkstoffe trotzdem über mehrere Jahre in der Beschichtung vor Abbau geschützt und gelangen sehr langsam via Diffusion an die Fassadenoberfläche.

Dieses neue Produkt wurde im Vergleich zum konventionellen Produkt in einer Pilotanwendung in Münster untersucht und dabei sowohl der Konzentrationsverlauf als auch die Auswaschmengen gegenübergestellt. Die Auswaschdaten sind anschließend in das Modell COMLEAM (CONstruction Material LEAching Modell) übertragen und zur Extrapolation der Auswaschdynamik verwendet worden. Um die gute Abbaubarkeit nachzuweisen, wurden Abbautests mit natürlichem Oberflächenwasser durchgeführt.

2.1 Standort und Versuchsaufbau

Am Standort in Münster wurden an einer realen Gebäudefassade jeweils zwei Flächen mit dem konventionellen sowie dem neuen Produkt beschichtet (Abbildung 1). Jede Probefläche ist 4 m hoch und 1,80 m breit und befand sich auf einem Gebäudedach in 12 m Höhe. Zwischen den einzelnen Probeflächen wurden Leisten eingesetzt, die eine Kontamination der angrenzenden Probefläche verhindert. Die Fassade zeigt nach Südwest und liegt damit in der Hauptwindrichtung. Der Fassadenabfluss wurde über Rinnen (Anhang, Abbildung 26) in Kanister (30 L) aufgefangen und unmittelbar nach den Regenereignissen im Labor analysiert. Im Zeitraum von Februar 2020 bis Februar 2021 wurden während Regenereignissen für jede Probefläche 49 Proben des Fassadenabflusses gesammelt und analysiert.

An Probefläche 1 und 3 wurde der Abfluss der Rinnen durch einen Minifilter mit dem neu entwickelten Substrat des Regenfilters geleitet (siehe Kapitel 3.2), um den Rückhalt ausgewaschener Wirkstoffe zu bewerten.



Abbildung 1: Versuchsfelder für die Pilotanwendung des algizidfreien Fassadensystems und der Regenwasserminifilter.

Die Probeflächen wurden unmittelbar vor Versuchsbeginn durch den Hersteller neu beschichtet (verputzt und zweimal gestrichen), so dass die Auswaschung von Beginn an erfasst werden konnte. Einen Überblick über die eingesetzten Wirkstoffe der vier Probenflächen zeigt Tabelle 1. Der Wirkstoff OIT ist sowohl im Wirkstoffmix des konventionellen Produktes (Filmschutz A) als auch im neuen enthalten, jedoch ist die Einsatzmenge im neuen Filmschutz B mehr als doppelt so hoch.

Tabelle 1: Übersicht zu den Probeflächen mit den Einsatzmengen der bioziden Wirkstoffe.

	Probefläche 1 und 2	Probefläche 3 und 4
Filmschutz	A (konventionell)	B (neu)
Wirkstoffe	Terbutryn 4047 mg/m ² OIT 2277 mg/m ² Zinkpyrithion 2277 mg/m ²	OIT 5131 mg/m ² DCOIT 5131 mg/m ²

2.2 Ergebnisse zur Biozidauswaschung

Die Gesamtreghöhe aller erfassten Ereignisse lag bei 413 L/m² und die kumulierte Fassadenabflussmenge je Testfläche zwischen 50 und 53 L/m². Somit gelangten mehr als 10 % des Regens an der stark exponierten Fassade zum Abfluss. Die Menge ist gegenüber ebenerdigen Fassadeninstallationen mehr als doppelt so hoch. Somit repräsentiert der Aufbau bezogen auf die Exposition und Schlagregenbelastung einen "worst-case" Standort.

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen die Konzentrationen von Terbutryn (Filmschutz A, konventionelles Produkt) bzw. OIT (Filmschutz B, neues Produkt) im Fassadenabfluss. Deutlich zu erkennen ist die Anfangsauswaschung während der ersten 15 Regenereignisse (zwei Monate). Es folgt eine deutlich geringere Auswaschung der Wirkstoffe über den Sommer, die auf die Witterungsbedingungen im Sommer zurückzuführen sind (geringer Niederschlag, erhöhte Verweilzeit an der Oberfläche, Abbau der Organik durch z.B. UV-Strahlung). Ab Oktober nahm die Konzentration im Fassadenabfluss der Probeflächen sowohl für Terbutryn (konventionelles Produkt mit Filmschutz A) als auch für OIT (neues Produkt mit Filmschutz B) wieder leicht zu.

Die Konzentrationsverläufe für OIT im konventionellen Produkt (Filmschutz A) sowie DCOIT im neuen Produkt (Filmschutz B) sind im Anhang in Abbildung 27 und Abbildung 28 zu finden und zeigen die gleichen Trends. Das Konzentrationsniveau von DCOIT im Fassadenabfluss ist dabei trotz gleicher Einsatzmenge wie OIT aufgrund der Stoffeigenschaften deutlich niedriger (Maximum am Anfang: 0,14 mg/L statt 1,8 mg/L für OIT).

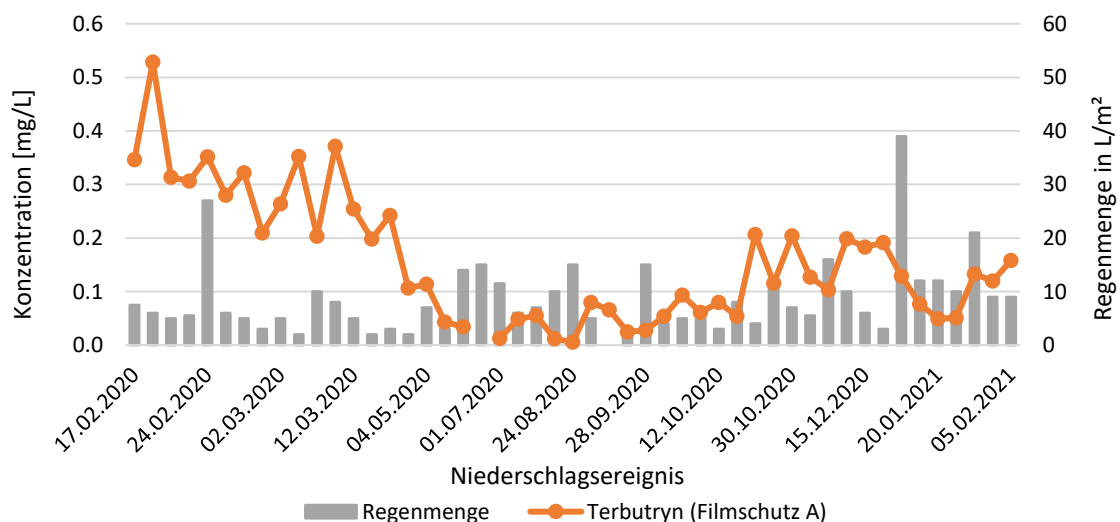


Abbildung 2: Konzentration von Terbutryn (Filmschutz A) im Fassadenabfluss je Regenereignis.

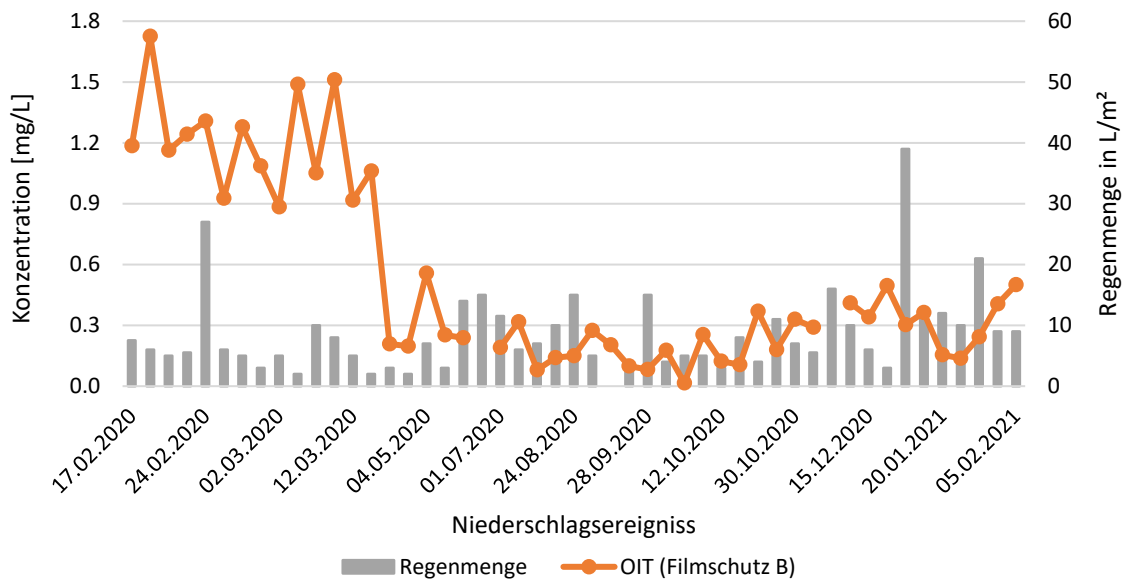


Abbildung 3: Konzentration von OIT (Filmschutz B) im Fassadenabfluss je Regenereignis.

Abbildung 4 zeigt die Emission von Terbutryn (Filmschutz A) und OIT (Filmschutz B) über den Beprobungszeitraum als kumulierte Emission pro Quadratmeter. Die Anfangsauswaschung mit anschließendem Abflachen der Kurve verläuft für beide Wirkstoffe gleich, während der nachfolgende Anstieg für Terbutryn geringfügig steiler verläuft als für OIT. Bezogen auf die im Material eingesetzte Menge beträgt der nach einem Jahr freigesetzte Anteil für beide Wirkstoffe <1 %.

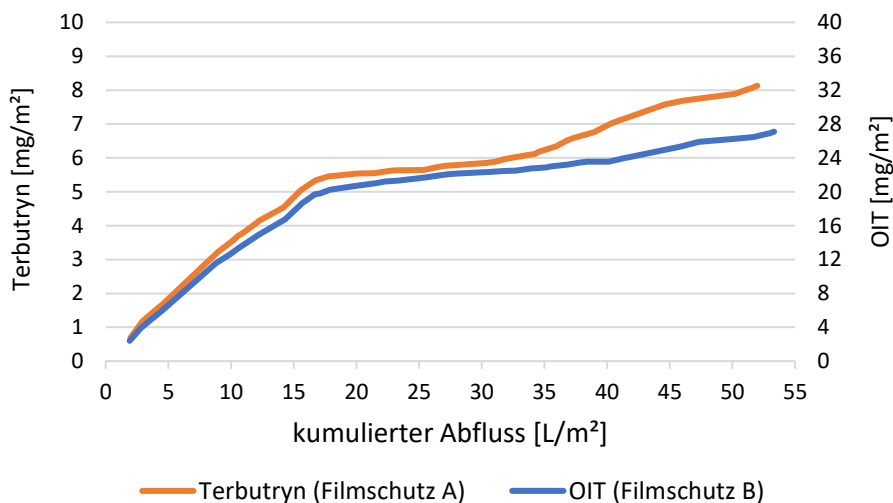


Abbildung 4: Kumulierte Emission vs. kumulierten Abfluss für Terbutryn (konventionelles Produkt, Probefläche 2) und OIT (neues Produkt, Probefläche 4) im Fassadenabfluss der Versuchsflächen (Werte pro m²).

2.3 Modellierung von Fassadenabfluss und Stoffemission

Mit der Software COMLEAM lassen sich unter Berücksichtigung von Auswasch- (Labor oder Feld) und Wetterdaten die Wasser- und Stoffflüsse von Bauteilen oder Gebäuden abschätzen und die Emissionen extrapolieren. Die Software ist frei verfügbar und kann via Browser als Webapplikation oder offline als Einzelplatzversion verwendet werden (www.comleam.com).

Für Fassaden wird der expositions- und windabhängige Schlagregen nach ISO-Norm (ISO-15927-3:2009) berechnet und dabei spezifische Ablaufbeiwerte für das Material festgelegt. Die Emissionen

der Felduntersuchung lassen sich mit einer Emissionsfunktion parametrisieren, welche die kumulierte Emission als Funktion der kumulierten Ablaufwassermenge berechnet.

Um die Vorhersagegüte des Modells zu prüfen, wurde in einem ersten Schritt die Situation aus dem Feldversuch in Münster im Modell nachgestellt. Die modellierten Abflüsse und Emissionen wurden daraufhin direkt mit den Felddaten verglichen. Berücksichtigt wurden die Daten für den Filmschutz A (Probefläche 2) und Filmschutz B (Probefläche 4) für je 7,2 m² Fläche (1,8 m Breite x 4 m Höhe, gleiche Dimensionen wie im Feldversuch). Die Einsatzmengen der Filmschutzmittel in den Probeflächen entsprechen den tatsächlich eingesetzten Mengen (Tabelle 1).

2.3.1 Beschreibung der Modelldaten

Die verwendeten Wetterdaten von Münster stammen von der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster (WWU), welche 3,5 km vom Messstandort entfernt liegt. Die Wetterdaten berücksichtigen die Zeitspanne vom 14.02.2020 bis zum 04.02.2021, sodass der Start der Modellierung mit dem Zeitpunkt der Fertigstellung von den Versuchsflächen übereinstimmt.

Über die Dauer des Feldversuchs von 13 Monaten zeichnete die Wetterstation der WWU etwa 500 mm Niederschlag auf (Abbildung 5). Dieser Wert liegt unter dem langjährigen DWD-Mittel von 782 mm Jahresniederschlag, dafür aber ziemlich nahe an dem vor Ort gemessenen 413 mm Niederschlag.

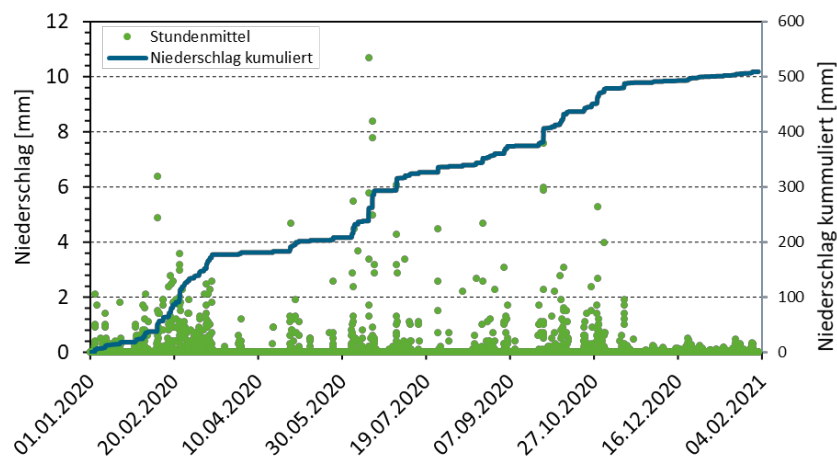


Abbildung 5: Regenhöhe und kumulierter Niederschlag von WWU-Wetterstation Münster über den Zeitraum der Feldversuche.

Zur Herleitung der Emissionsfunktion mittels nichtlinearer Regression wurden die Daten des kumulativen Emissionsverlaufs verwendet. Für Emissionen aus Putz und Farbe zeigt die logarithmische Funktion die beste Vorhersagegüte (Tietje et al. 2018). Aus der nichtlinearen Regression resultieren die benötigten Parameter für die logarithmischen Emissionsfunktionen (Anhang, Tabelle 3).

Der resultierende Verlauf der Emissionsfunktionen im Vergleich zu den Messungen von Terbutryn und OIT im konventionellen Produkt sowie dem neuen Produkt zeigt Abbildung 6. Der Verlauf von OIT in Probefläche 4 (neues Produkt) ähnelt dem Verlauf von Terbutryn im konventionellen Produkt. Die Abflachungen der kumulierten Feldemission (Punkte) zwischen 20 und 40 L/m² deckt sich mit den sommerlichen Monaten von Juni bis Oktober. Daher könnte die Abflachung der Wirkstoffemissionen mit der höheren UV-Einwirkung und damit einhergehend höherem UV-Abbau an der Fassade erklärbar sein. Aus anderen Untersuchungen ist zudem bekannt, dass bei höherer UV-Strahlung mehr Transformationsprodukte gebildet werden (Wicke et al. 2021b).

Der Fassadenabfluss ist im Modell mit einem Abflussbeiwert von 0,7 hinterlegt. Dies bedeutet, dass vom auftreffenden Schlagregen der Fassade 70 % zu Fassadenabfluss führen. Die restlichen 30 % sind berücksichtigte Verluste durch Evaporation, Wasseraufnahme vom Material etc..

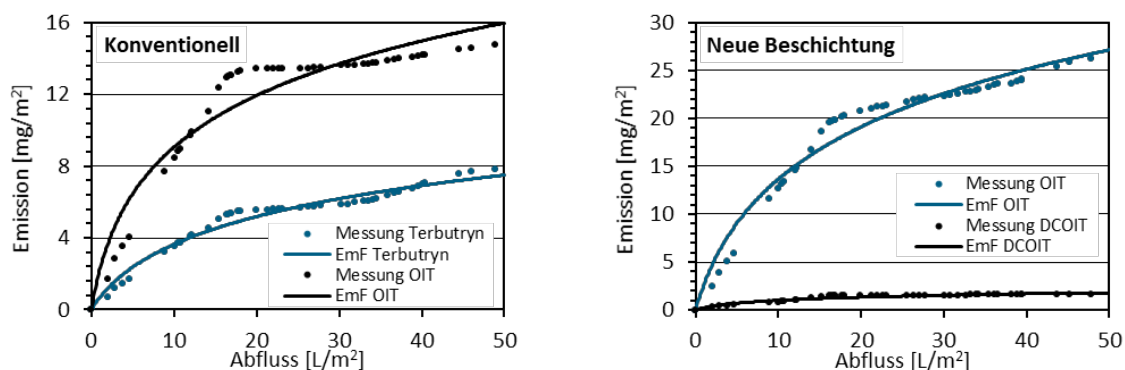


Abbildung 6: Emissionsfunktionen (Linien) für die Biozide in der konventionellen Beschichtung (links, Probenfläche 2 mit Filmschutz A) und der neuen (rechts, Probenfläche 4 mit Filmschutz B). Die Punkte entsprechen den kumulierten Emissionen aus den Feldversuchen.

2.3.2 Ergebnisse der Modellierung

Der simulierte Fassadenabfluss und die Stoffemissionen von Terbutryn und OIT sowie OIT und DCOIT wurden mit den entsprechenden Messungen von Probenfläche 2 und 4 verglichen. Abbildung 8 zeigt beispielhaft für Fläche 2 (Probenfläche 4: Anhang, Abbildung 31) den Vergleich von gemessenem und simuliertem Fassadenabfluss. Der Abflussvergleich zeigt eine gute Übereinstimmung (48,9 L/m² gemessener und 43,6 L/m² modellierter Abfluss), wobei die Abflussvorhersage den gemessenen Abfluss um rund 10 % unterschätzt. Abweichungen für einzelne Ereignisse können darauf zurückgeführt werden, dass die Wetterdaten aus 3,5 km Entfernung stammen und in einer Höhe von 2,5 m aufgezeichnet werden, und somit die lokalen Windverhältnisse von den Messdaten differieren.

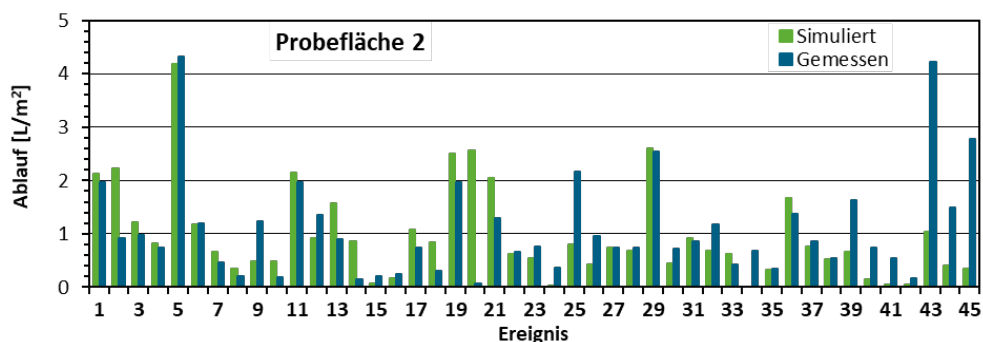


Abbildung 7: Vergleich von simuliertem und gemessenem Fassadenablauf von Probenfläche 2.

Der Vergleich von simulierten und gemessenen Terbutryn-Emissionen in Abbildung 8 (OIT im Anhang, Abbildung 32) zeigt ein ähnliches Bild wie für das Ablaufwasser (Abbildung 7). Die vorhergesagte Emission von 6,6 mg/m² beträgt 85 % der gemessenen Emission von 7,8 mg/m². Unter der Berücksichtigung, dass der Abfluss unterschätzt wird, ist die Übereinstimmung sehr gut. Die OIT-Emission wird hingegen vom Modell leicht überschätzt (Anhang). Das Modell prognostiziert 15,9 mg/m², gemessen wurden 14,7 mg/m² OIT, folglich wird eine 8 % höhere Emission vorausgesagt.

Der Vergleich von OIT aus der neuen Beschichtung ist in Abbildung 9 aufgeführt (DCOIT im Anhang, Abbildung 33). Die simulierte OIT Emission liegt mit 3 % nur geringfügig über der gemessenen Emission (27,2 mg/m² vs. 26,3 mg/m²), und unterstreicht damit die hohe Vorhersagegüte beim kumulierten Emissionsverlauf.

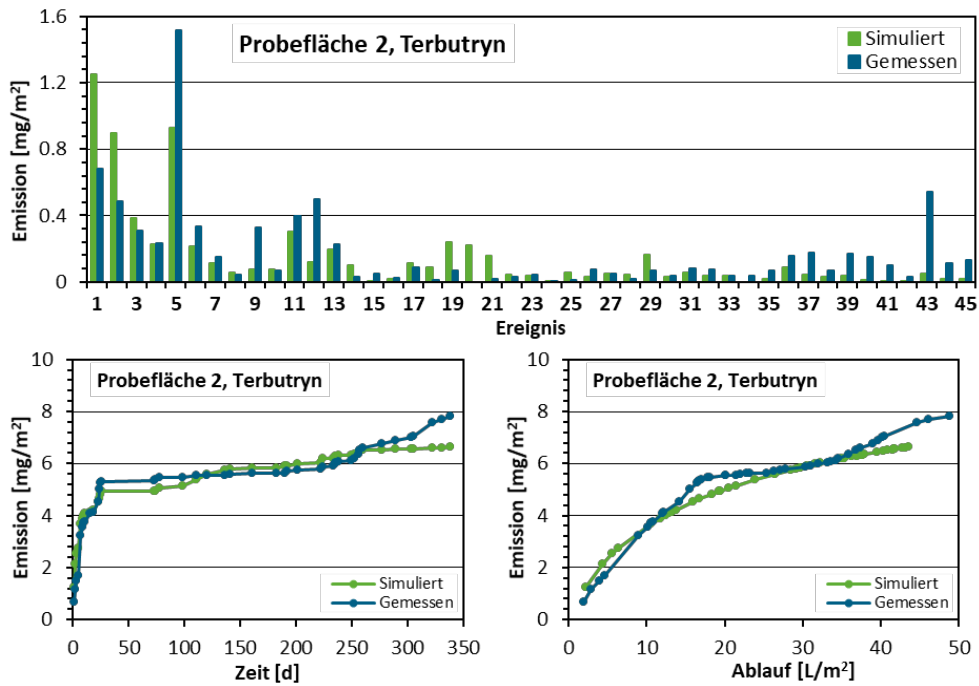


Abbildung 8: Vergleich von simulierter und gemessener Terbutryn-Emission je Ereignis (oben) sowie kumulierter Emission gegen Versuchsdauer und Abflussmenge (unten) von Probefläche 2.

Die Simulation überschätzt zu Beginn und in der Mitte des Versuchs die Emission für alle Wirkstoffe leicht und unterschätzt gegen Ende. Dies lässt sich mit dem Verlauf der Emissionsfunktion (Abbildung 6) erklären. Diese verläuft für alle Substanzen zu Beginn steiler als die Verläufe der Feldmessungen, wodurch die Emission überschätzt wird. Gegen Ende des Versuchs liegt die Emissionsfunktion mit Ausnahme von Terbutryn höher als die gemessenen Werte. Hinzu kommt, dass die Vorhersage der Abflüsse an den Fassaden insbesondere am Ende des Versuchs tendenziell höher ausfällt als die Messwerte.

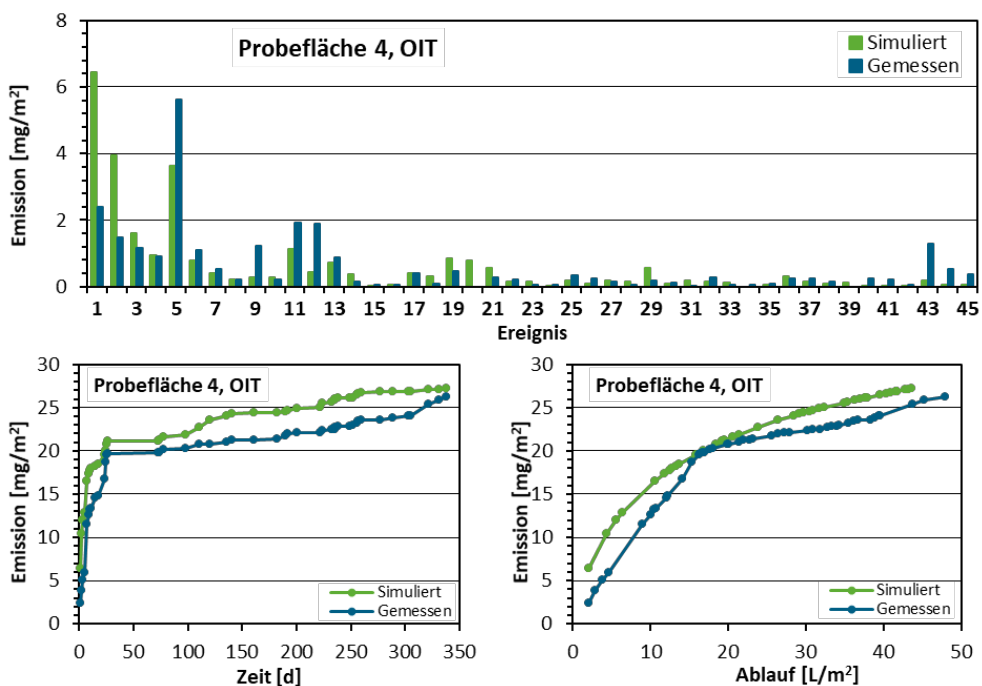


Abbildung 9: Vergleich von simulierter und gemessener OIT-Emission je Ereignis (oben) und kumulierter OIT-Emission gegen die Versuchsdauer und Abflussmenge (unten) von Probefläche 4.

Die Abflachung der gemessenen Emissionsverläufe könnte durch UV-Abbau bedingt sein. Wicke et al. (2021a) detektierten in den wärmeren Monaten mehr Photoabbau-Produkte von Terbutryn als in den kälteren. Würden diese Transformationsprodukte gemessen und der Emission hinzugezählt, ist anzunehmen, dass die Verläufe der Messdaten sich der logarithmischen Funktion weiter annähern.

Mit einer durchschnittlichen Abweichung der Emission von ca. 10 % (Tabelle 4 im Anhang) liefert COMLEAM jedoch bereits eine gute Vorhersage der Gesamtfracht, wodurch das Modell zu Extrapolation der Daten geeignet ist.

2.4 Abbauverhalten der Biozide

Im Trennsystem wird Regenwasser teils direkt in Oberflächengewässer eingeleitet. In Regenwasserabfluss eines solchen Einzugsgebiets und in dem angeschlossenen Gewässer sind die Anteile vom Fassadenabfluss abhängig von der Regenhöhe, Abflussmenge und dem Mischungsverhältnis im Regenkanal bzw. Gewässer. Je geringer der Anteil an Fassadenwasser im Regenwasserabfluss und im Oberflächenwasser, desto schneller sollte der biologische Abbau erfolgen, bei höherem Anteil entsprechend langsamer. Das Abbauverhalten unter solchen "worst-case"-Bedingungen sollte untersucht werden.

Um den deutlich schnelleren Abbau von OIT im Vergleich zu dem langlebigen Algizid Terbutryn nachzuweisen, wurden die Abbauprobungen mit realem Oberflächenwasser in Referenz mit unverdünntem Fassadenabflusswasser durchgeführt.

Dafür wurde der Fassadenabfluss der konventionellen Beschichtung (Probefläche 2) sowie vom neuen Produkt (Probefläche 4) mit zwei verschiedenen Anteilen an Oberflächenwasser der Münsterschen Aa gemischt und die Veränderung der Wirkstoffkonzentrationen über die Zeit bei 20°C bestimmt:

- 1:1 Verdünnung: 50 % Fassadenabfluss mit 50 % Oberflächenwasser
- 1:4 Verdünnung: 20 % Fassadenabfluss mit 80 % Oberflächenwasser

Im Abstand von 1, 2, 5 und 16 Tagen wurden Proben genommen und auf die Wirkstoffe analysiert.

Abbildung 10 zeigt das Abbauverhalten von Terbutryn und OIT bei einem Mischungsverhältnis von 1:4 (80% Oberflächenwasser). Die Terbutryn-Konzentration liegt auch nach 16 Tagen noch fast auf dem Anfangsniveau (90 %), während OIT bereits nach 5 Tagen nicht mehr nachweisbar war. Schon nach zwei Tagen betrug die OIT-Konzentration nur noch 60 % der Ausgangskonzentration, sodass die Halbwertszeit (Abnahme der Konzentration auf 50 % der Ausgangskonzentration, $c/c_0=0,5$) zwischen 2 und 3 Tagen liegt (Abbildung 10 rechts).

Mit einem geringeren Anteil an Oberflächenwasser nimmt auch der Anteil biologisch aktiver Mikroorganismen ab. Deshalb ist OIT bei einem Mischungsverhältnis von 1:1 erst nach 16 Tagen nicht mehr nachweisbar und im reinen Fassadenabfluss lassen sich auch nach 16 Tagen noch rund 60 % der Ausgangskonzentration finden.

Für DCOIT zeigt sich im reinen Fassadenablauf ein schnelleres Abbauverhalten als für OIT. Bereits nach einem Tag liegt die Konzentration bei < 45 % der Ausgangskonzentration (Anhang, Abbildung 30). Durch das um einen Faktor 10 niedrigere Konzentrationsniveau von DCOIT im Vergleich zu OIT sind die Konzentrationen bereits bei einer Verdünnung von 1:1 mit Oberflächenwasser so niedrig, dass DCOIT nach einem Tag nicht mehr nachweisbar war. Der schnelle Abbau bedeutet, dass keine Halbwertszeit im Oberflächenwasser ermittelt werden konnte.

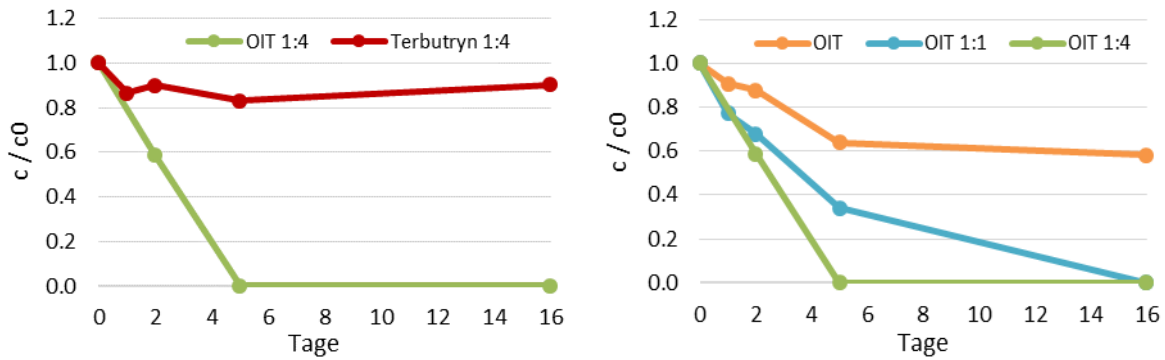


Abbildung 10: Vergleich Abbau von Terbutryn (konventionelles Produkt) und OIT (neues Produkt) bei Mischung des Fassadenabflaufs mit Oberflächenwasser (1:4) (links). Einfluss des Anteils von Oberflächenwasser an Abbaugeschwindigkeit von OIT (nur Fassadenabfluss und Mischung 1:1 bzw. 1:4) (rechts).

2.5 Fazit algizidfreie Beschichtung

Die neue algizidfreie Fassadenbeschichtung, in der ausschließlich die in Oberflächengewässern in wenigen Tagen abbaubaren Isothiazolinone als Filmschutz eingesetzt sind, wurde erfolgreich unter Realbedingungen demonstriert. Das konventionelle und neue Produkt zeigen ein ähnliches Auswaschverhalten über die Zeit, jedoch wird OIT bei der neuen Formulierung bezogen auf die Einsatzmenge deutlich geringer ausgewaschen als bei der konventionellen. Die geringe Freisetzung der eingesetzten Wirkstoffe nach einem Jahr (<1 %) unter extremen Schlagregenbedingungen verdeutlicht die hohe Schutzfunktion in der Fassade für das neue Produkt.

Die modellgestützte Simulation der Auswaschung mit den lokalen Wetterdaten zeigte eine sehr gute Vorhersagegenauigkeit, sowohl bezüglich der Abflussmengen als auch der emittierten Stofffrachten. Damit lassen sich auch Vorhersagen über den eigentlichen Untersuchungszeitraum hinaus durchführen und Fragen zur Langzeitauswaschung bzw. dem Umwelteintrag beantworten.

Die schnelle Abbaubarkeit der Isothiazolinone OIT und DCOIT in Oberflächengewässern mit Halbwertszeiten von 1 - 3 Tagen und die geringe Abbaubarkeit für Terbutryn wurde in Abbauversuchen eindrücklich nachgewiesen.

3 Entwicklung eines Adsorbersubstrats und Untersuchungen zur dezentralen Regenwasserbehandlung

Ziel war, ein neues Filtersubstrat zu entwickeln, das neben Schwermetallen auch Spurenstoffe zurückhalten kann, sowie die Demonstration der Leistungsfähigkeit dieses Substrats unter Realbedingungen. Im Labor wurden dafür verschiedene Substratmischungen schrittweise getestet und die Mischung mit dem besten Rückhalt für Anwendungen in kleinen Säulen an den Fassaden in Münster (Kapitel 2) und in einem Pilotfilter in Berlin ausgewählt.

3.1 Substratentwicklung im Labor

Durch eine Literaturrecherche und unter Einbezug von experimentellen Untersuchungen wurden potentiell geeignete Mischungen durch Säulentests in Anlehnung an die VSA-Leistungsprüfung (VSA 2019) ermittelt. Für die Säulentests galten folgende Randparameter:

- Säulenmaterial: Acryl
- Säulenmaße: 85 mm Innendurchmesser, 250 mm Höhe
- Schläuche: Teflon
- Aufbau oben: Glaswolle 14 mm, ± 2 mm
- Aufbau Mitte: Adsorbermaterial 200 mm, ± 5 mm
- Aufbau unten: Geotextil Verteilplatte
- Substratvolumen: 1,135 L
- Beschickung: 0,18 L/min
- Beschickungsdauer: 200 min
- Volumen: 36 L

Im ersten Schritt wurden zwei Substratmischungen im Vergleich zu Oberboden in fünf Säulentests auf den Rückhalt von Terbutryn, Diuron und Mecoprop (MCCP) untersucht. Dabei wurden alle drei Mischungen mit Terbutryn beschickt und die beste Substratmischung zusätzlich mit Diuron und MCCP. Die Konzentrationen der Biozide in der Inputlösung lagen bei jeweils 1,5 mg/L. In der besseren der zwei Substratmischungen wird im Mittel von drei Filtergeschwindigkeiten Terbutryn zu 83 %, MCCP zu 78 % und Diuron zu 84 % zurückgehalten. Zum Vergleich: für den Oberboden liegt der mittlere Rückhalt von Terbutryn bei 38 % (Abbildung 11 rechts).

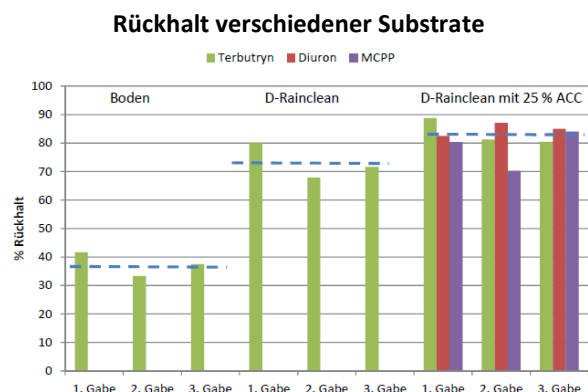


Abbildung 11: Aufbau Säulentest (links) und Rückhalt für verschiedene Testsubstrate (rechts).

Im zweiten Schritt wurde die beste Mischung in ihrem Mischungsverhältnis weiter optimiert und in zusätzlichen 10 Säulentests auf den Rückhalt von MCCP, Diuron und DCOIT analysiert. Zum Vergleich wurde wiederum der Oberboden gewählt. Jede der Säulen wurde mit einer Biozidmischung aus MCCP, Diuron und DCOIT mit 1,125 mg/L Diuron und MCCP sowie 0,13 mg/L DCOIT beschickt. Die

Beladung erfolgte bei 0,15 L/min über 60 Minuten (9 L). Mit der besten Substratmischung wurden Wirkungsgrade von 99 % für DCOIT und Diuron sowie 90 % für MCPP erreicht (Abbildung 12 links). Auf Grundlage des hohen Stoffrückhalts wurde diese Mischung für die Anwendung im Mini- und Pilotfilter gewählt.

Zusätzlich wurde die Wiederfindung der Biozide in der Substratmischung und in dem Oberboden durch fünf Versuche bilanziert, indem die Restgehalte der Biozide nach 3, 6 und 9 Wochen extrahiert wurden. Bei den Wiederfindungen zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen dem Substrat und Oberboden. Bereits nach 3 Wochen waren die Biozide im Substrat nur noch minimal extrahierbar (< 0,4 %). Im Boden sind die Stoffe dagegen noch deutlich nachweisbar, insbesondere Diuron nach 3 Wochen noch mit 16 % Wiederfindung (Abbildung 12 rechts).

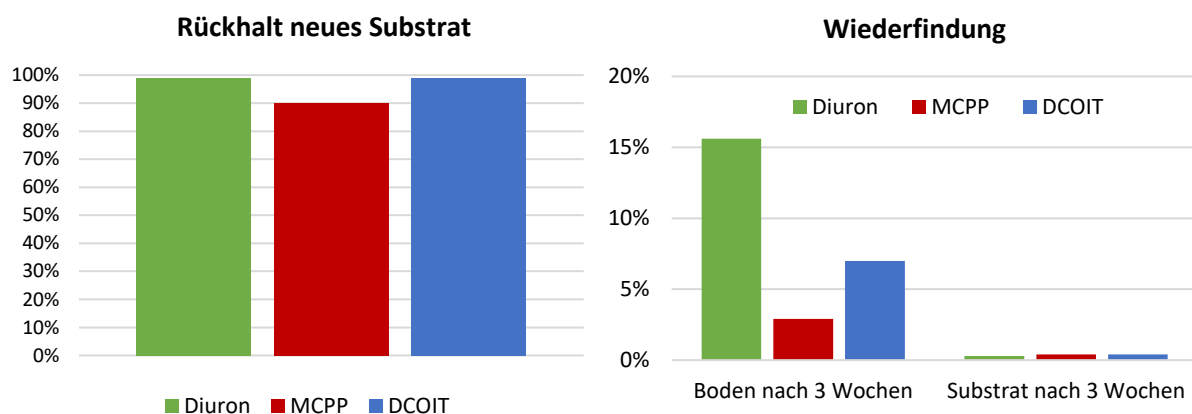


Abbildung 12: Rückhalt für die Zielmischung (links) und Restgehalt der betrachteten Wirkstoffe im Substrat bzw. Boden nach 3 Wochen (rechts).

Im dritten Schritt wurde das Abbauverhalten der Schadstoffe bei unterschiedlicher Beimpfung der Substrate untersucht. Die Beimpfung sollte mikrobielle Abbauvorgänge unterstützen. Zusammenfassend zeigte sich jedoch, dass einzelne Mikrobenstämme nicht zu einer eindeutig nachweisbaren Abbaubesserung führen.

In der besten Substratmischung wird über die organische Komponente „Cocopeat“ (Kokostorf) eine Mischung unterschiedlichster Mikroorganismen bereitgestellt, wodurch nach den vorliegenden Ergebnissen eine hohe Abbauleistung garantiert wird. Im Vergleich zu den untersuchten Substraten fällt auf, dass die Abbauleistung im Referenzboden deutlich geringer ist.

3.2 Substratuntersuchungen an Fassaden

Das optimierte Substrat wurde zunächst in zwei Minifiltern (Durchmesser 8,2 cm, Substrathöhe 20 cm, Abbildung 13 links) in Münster eingesetzt (Kapitel 2). Der Ablauf der Fassadenrinnen von Probenfläche 1 (konventionelles Produkt) und 3 (neues Produkt) wurde jeweils durch einen Minifilter geleitet und der Ablauf aufgefangen und analysiert.

Die Ergebnisse der Probenflächen mit Filter zeigen (blaue Linie in Abbildung 13 und Abbildung 27 bis Abbildung 29 im Anhang), dass Terbutryn, OIT und DCOIT von dem neu entwickelten Substrat sehr wirksam über den gesamten Untersuchungszeitraum von 13 Monaten zurückgehalten werden. Über den Versuchszeitraum ergibt sich ein Frachtrückhalt von 94 % für Terbutryn (Fracht im Ablaufwasser ohne Filter: 58 g; mit Filter: 3,4 g) und von >98 % für OIT.

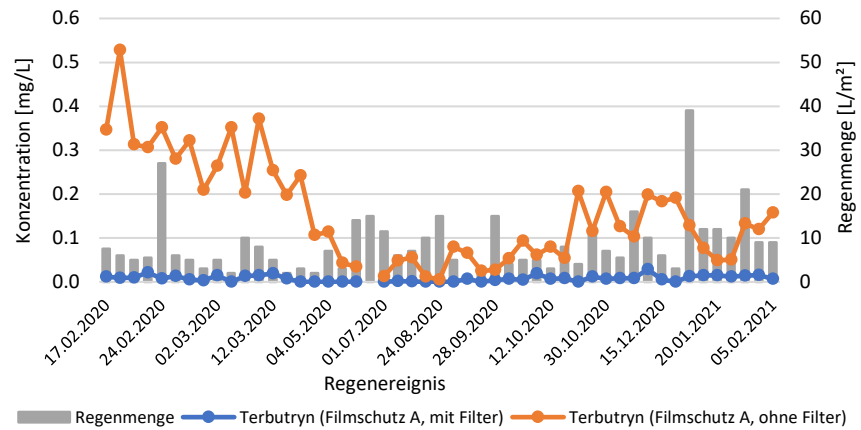


Abbildung 13: Minifilter für Probeflächen 1 und 3 der Fassadenuntersuchungen in Münster (siehe Kapitel 2) (links); Konzentrationsverlauf für Terbutryn im Fassadenabfluss mit und ohne Filter (rechts).

3.3 Pilotanlage zur Regenwasserbehandlung

Der Pilotfilter wurde in Berlin im Mai 2020 installiert und über den Zeitraum von Juni 2020 bis Ende Juni 2021 getestet. In eine Pilotanlage wurde der Abfluss von einer Fassade und von 4 Testdachflächen zur Behandlung geleitet und der Rückhalt bilanziert.

3.3.1 Installation und Probenahme

Aufgebaut und angeschlossen an den Filter wurden mehrere Flächen, deren stoffliche Freisetzung für den Eintrag von Spurenstoffen in städtischem Regenabfluss repräsentativ ist. Diese neu erstellten Flächen setzen sich aus zwei verschiedenen Metallflächen, zwei verschiedenen Dachflächen (Kiesdach mit unterschiedlichen Dichtungsbahnen) und einer beschichteten Fassade zusammen. Die Gesamtfläche betrug ca. 165 m², davon 14,9 m² horizontale und 150 m² vertikale Flächen.

Zwei Dachaufbauten (jeweils 2,5 m²) waren mit einer wurzelfesten Bitumenbahn, die MCPP enthielt, und zwei weitere Testdächer gleicher Größe mit einer EPDM-Abdichtungsbahn, die als Quelle von Benzothiazol und Zink gilt, ausgelegt. MCPP ist ein weit verbreitetes Durchwurzelungsschutzmittel in Bitumenbahnen und seit Jahrzehnten bekannt als Quelle von Gewässerbelastungen. In wurzelfesten Bitumenbahnen wird dieser Stoff, mittlerweile auch MCPA, weit verbreitet eingesetzt. Benzothiazol und Zink kommen als Vulkanisationsbeschleuniger und Vernetzer in EPDM Bahnen vor. Je nach Vernetzungsgrad schwanken die beiden Einsatzkonzentrationen. Der Abfluss dieser Testdachflächen wurde über Kunststoffrohre zur Behandlungsanlage geleitet.

Die Fassade (150 m²) wurde direkt vor den Untersuchungen mit einer biozidhaltigen Farbe neu gestrichen, die die Wirkstoffe Diuron, Terbutryn und OIT enthielt.

Das von der Fassade abfließende Wasser gelangte über Zink- und Kupferflächen (2,8 bzw. 2,1 m² Rinnen) in die Pilotanlage (Abbildung 14, rechts). Bekannte Quellen von Zink waren folglich die Metallrinne und die EPDM-Dachbahn, möglicherweise setzte aber auch die Fassadenbeschichtung etwas Zink frei.

Der durchströmte Pilotfilter war in einem Schacht installiert (Höhe 1,75 m) und das optimierte Substrat in einer Säule (Innendurchmesser 0,375 m, Substrathöhe 0,2 m, ca. 22 Liter Substrat) (Abbildung 14). Unter dem Filterschacht versickerte das gereinigte Regenwasser über eine Rigole (1000 L). Zu- und Abflussmengen wurden mit Kippzählern (Edelstahl) erfasst, jeweils 0,5 % der Abflussmenge volumensproportional in Mischproben (10 L, Glasflaschen) gesammelt, und diese auf die relevanten Stoffe chemisch analysiert (Tabelle 2).

Auf dem Dach des Gebäudes wurde ein Regenschreiber installiert, der die Regenmenge in 5-min Intervallen erfasste und an einen Server sendete.



Abbildung 14: Pilotinstallation des Regenfilters, an den 150 m² Fassadenfläche mit Abflussrinnen aus Zink und Kupfer, zwei Testflächen mit Bitumenbahnen sowie zwei Testflächen mit EPDM-Bahnen angeschlossen sind.

Einen Überblick über die im Zu- und Ablauf des Filters analysierten Substanzen gibt Tabelle 2. Für die Schwermetalle Zink und Kupfer wurden sowohl die gelöste als auch die Gesamtkonzentration mittels ICP-MS gemessen. Die organischen Stoffe wurden mittels LC-MS/MS analysiert. Zusätzlich zu den Wirkstoffen Diuron und Terbutryn wurden deren Transformationsprodukte Diuron-desmethyl (DCPMU) sowie Hydroxy-Terbutryn und Desethyl-Terbutryn (M1) analysiert.

Tabelle 2: Übersicht analysierter Substanzen und deren Herkunftsflächen in der Testinstallation.

Substanz	Herkunft
Diuron	Biozid im Filmschutzmittel der Fassadenfarbe
Diuron-desmethyl (<i>DesM-Diuron</i>)	Transformationsprodukt von Diuron
Terbutryn	Biozid im Filmschutzmittel der Fassadenfarbe
Terbutryn-2-hydroxy (<i>OH-Terbutryn</i>)	Transformationsprodukt von Terbutryn
Terbutryn-desethyl (<i>DesE-Terbutryn</i>)	Transformationsprodukt von Terbutryn
Mecoprop (MCP)	Durchwurzelungsschutzmittel in der Bitumenbahn
Benzothiazol	Vulkanisationsbeschleuniger in der Kautschukbahn (EPDM)
Zink (gesamt und gelöst)	Abschwemmung von Zinkblech, Vernetzungsstoff in EPDM, Bestandteil in Zinkpyrithion und zur Stabilisierung der Verbindung
Kupfer (gesamt und gelöst)	Abschwemmung von Kupferblech

Insgesamt wurden im Zeitraum von Juni 2020 bis Juni 2021 je 19 Proben vom Zu- und Abfluss des Filters genommen, um die Konzentrationen und den Stoffrückhalt zu bestimmen, die insgesamt ca. 75 % der Gesamtregenmenge abdecken. Davon wurden 17 Ereignisse einzeln analysiert mit Regenhöhen zwischen 5 und 45 mm. Um den Wirkungsgrad auch für die kleineren Ereignisse aufzeigen zu können, wurden zusätzlich zwei Sammelproben analysiert, in denen 13 Einzelproben mit Regenhöhen von 1,0 – 6,5 mm vereinigt waren. Mit der Probenahme-strategie war nicht nur ein großes Spektrum unterschiedlicher Abflussmengen abgedeckt, sondern auch unterschiedliche jahreszeitliche Bedingungen, um Aussagen zum Schadstoffrückhalt des Filters bei unterschiedlichen hydraulischen Bedingungen zu treffen. Die wichtigsten Kenngrößen der analysierten Proben (Datum, Regenhöhe, Filterzuflussvolumen) sind im Anhang in Tabelle 5 zusammengefasst.

3.3.2 Ergebnisse zur hydraulischen Belastung

Im Untersuchungszeitraum von 13 Monaten ist eine Regenmenge von 561 mm gefallen. Das Filtersubstrat wurde in diesem Zeitraum mit knapp 11 m³ Regenwasser beschickt. Zwei Drittel davon stammte von den analysierten Einzelereignissen und weitere rund 20 % wurden mit den beiden Sammelproben erfasst. Nur rund 10 % des Zuflusses zum Filter war nicht analysiert worden. Eine Übersicht der Zuflüsse in den Filter sowie der analysierten Einzelproben zeigt Abbildung 15.

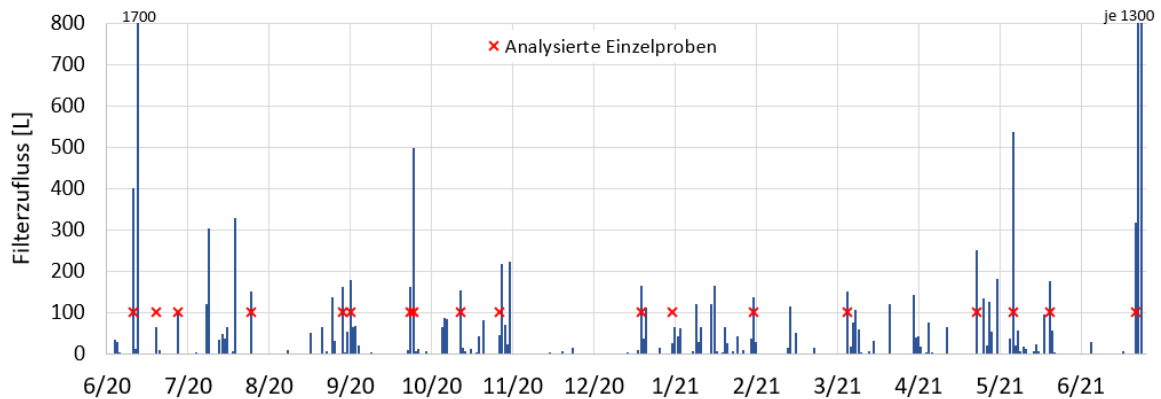


Abbildung 15: Gemessene Zuflüsse in den Filter (Tagessummen) und markierte Einzelproben.

Aus dem Vergleich von Regenhöhen je beprobten Ereignis und entsprechenden Filterzuflüssen für alle analysierten Ereignisse wird deutlich, dass der Filter unter sehr unterschiedlichen hydraulischen Belastungsbedingungen getestet wurde (Abbildung 16). Rund 2/3 aller Ereignisse umfassten Regenhöhen < 5 mm und die weiteren 1/3 erstrecken sich bis 45 mm.

Der direkt gemessene hydraulische Wirkungsgrad erreichte >95 %. Die restlichen 5 % verblieben im Filtersubstrat, verdunsteten oder sind bei kurzzeitigen Filterüberläufen extremer Regenintensitätspeaks bei Starkregen am Filter vorbeigeflossen.

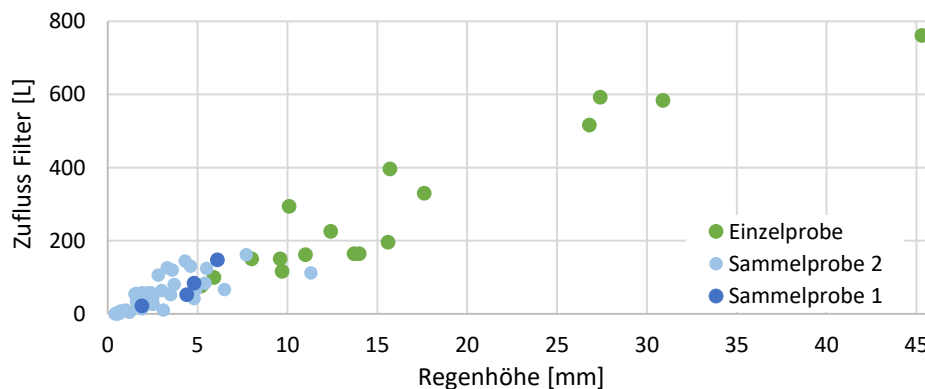


Abbildung 16: Regenhöhen und Filterzuflüsse aller analysierten Regenereignisse.

3.3.3 Ergebnisse zur stofflichen Belastung und zum Stoffrückhalt

Abbildung 17 zeigt die Zulaufkonzentrationen in den Filter. Die höchsten mittleren Konzentrationen wurden für Zink (2200 µg/L), gefolgt von Kupfer mit einer rund 10-mal geringeren mittleren Konzentration (220 µg/L) ermittelt. Die gelösten Anteile lagen jeweils bei rund 50 % der Gesamtkonzentrationen. Auch nach 12 Monaten waren die Konzentrationen der beiden Schwermetalle im Zulauf des Filters noch hoch – für Zink bei 1000-2000 µg/L und für Kupfer bei etwa 100-200 µg/L (siehe Abbildung 34 im Anhang).

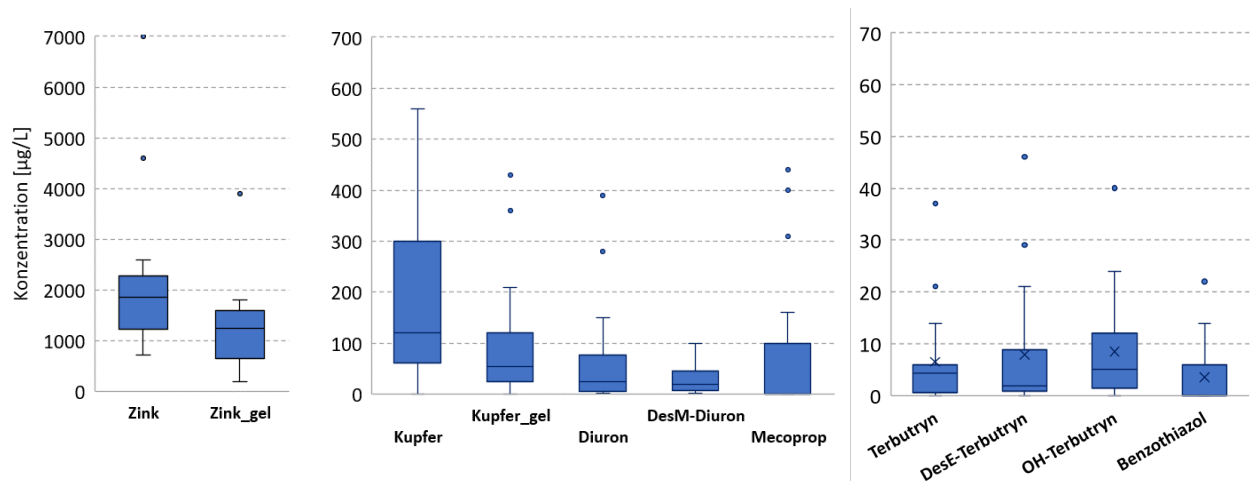


Abbildung 17: Zulaufkonzentrationen für Zink, Kupfer, vier Spurenstoffe und drei Transformationsprodukte (n=19).

Bei den organischen Spurenstoffen lagen die mittleren Konzentrationen von Diuron und Mecoprop bei je rund 70 µg/L, gefolgt von Terbutryn und Benzothiazol mit 7 und 4 µg/L. Bei den Spurenstoffen zeigte sich eine abnehmende Konzentration über die Zeit (Abbildung 18), beispielsweise für Diuron im Zulauf 250 µg/L im ersten Monat und 25 µg/L nach 12 Monaten. Diese zeitliche Abnahme korreliert mit der abnehmenden Auswaschung der Fassadenfarbe, weil die Transportdistanz des Biozids im Material über die Zeit zunimmt (Diffusion des Wirkstoffs von immer tieferen Farbschichten bis zur Oberfläche). Die Konzentrationen der analysierten Transformationsprodukte Desmethyl-Diuron (DesM-Diuron), Desethyl-Terbutryn (DesE-Terbutryn) und Hydroxy-Terbutryn (OH-Terbutryn) liegen in einem ähnlichen Konzentrationsbereich, wie die der Wirkstoffe selbst. Dies zeigt, dass Transformationsprodukte auch wenige Wochen und Monate nach der Beschichtung der Fassade in erhöhten Konzentrationen im Fassadenabfluss auftreten. Für Mecoprop und Benzothiazol aus den Dichtungsbahnen bestätigte sich die stark abnehmende Auswaschung. Nach anfänglichen Konzentrationen von > 400 µg/L Mecoprop sanken diese nach fünf Monaten auf < 1 µg/L Mecoprop. Diese rasche Abnahme weist darauf hin, dass vor allem zu Beginn Mecoprop von der Dachbahnoberfläche abgewaschen wurde und nicht aus dem Material diffundierte.

Die mittlere Reduktion der Gesamtfracht liegt bei > 90 % jeweils für die Schwermetalle und die Spurenstoffe. Bezogen auf die Einzelstoffe reicht die Spannweite von 85 % Rückhalt für Mecoprop bis 97 % für Diuron, Desmethyl-Diuron und Benzothiazol (Abbildung 19).

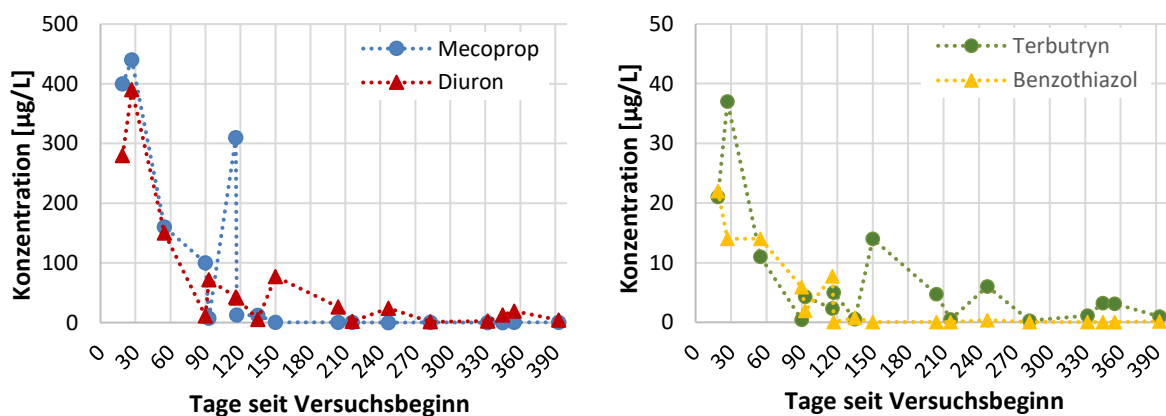


Abbildung 18: Konzentrationsverlauf von Mecoprop und Diuron (links) sowie Terbutryn und Benzothiazol (rechts). Die gepunktete Linie dient einer besseren Lesbarkeit des Diagramms und repräsentiert keine Messwerte.

Für die untersuchten Transformationsprodukte von Diuron und Terbutryn ist die Frachtreduktion genauso hoch wie für die Wirkstoffe (Abbildung 19 und Abbildung 20, rechts). Dies weist darauf hin, dass auch Transformationsprodukte im gleichen Maße wie die organischen Ausgangsstoffe vom neuen Filtersubstrat zurückgehalten werden, und eine differenzierte Analyse bei einem zukünftigen Monitoring nicht notwendig erscheint.

Für den gelösten Anteil der Metalle liegt der Rückhalt für Kupfer etwas niedriger als für den Gesamtgehalt (85 % vs. 90 %) und ist für Zink gleich hoch (je ca. 93 %). Der Rückhalt der Schwermetalle beruht sowohl auf dem Rückhalt durch Filtration, bzw. Anlagerung an der großen Oberfläche des Substrats, als auch der Bindung der gelöste Metallfraktionen am Substrat.

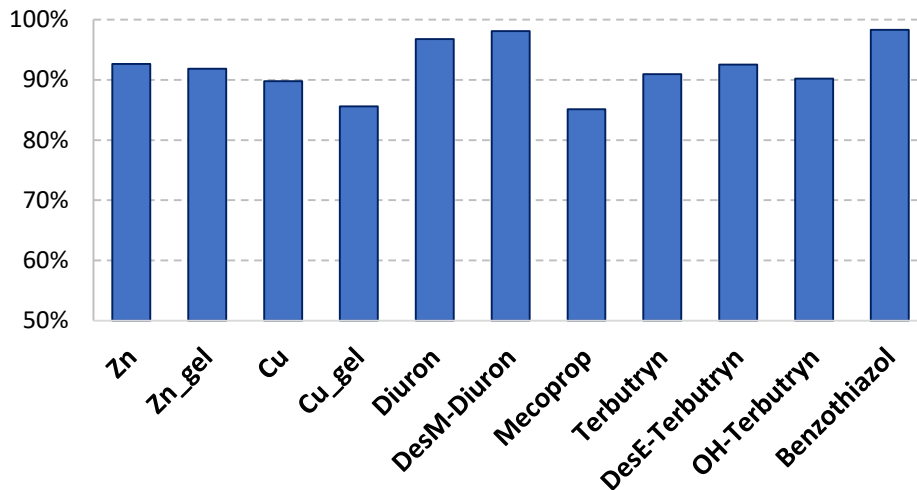


Abbildung 19: Stoffrückhalt der Gesamtfracht im Monitoringzeitraum von 13 Monaten.

Bezogen auf die Einzelereignisse variiert der Rückhalt für Mecoprop am stärksten, beeinflusst durch stark schwankenden Zulaufkonzentrationen. Diese werden typischerweise durch die Wasserkontaktzeiten bedingt, weil der eingesetzte MCPP-Ester hydrolysiert wird. Langanhaltende Feuchte auf dem Bitumendach setzt mehr Mecoprop frei als kurze Feuchteperioden. Für die anderen Stoffe ist die Streuung des Stoffrückhalt geringer, womit sich klar zeigen lässt, dass der hohe Wirkungsgrad weitgehend unabhängig von den Regenereignissen erzielt wird (Abbildung 20).

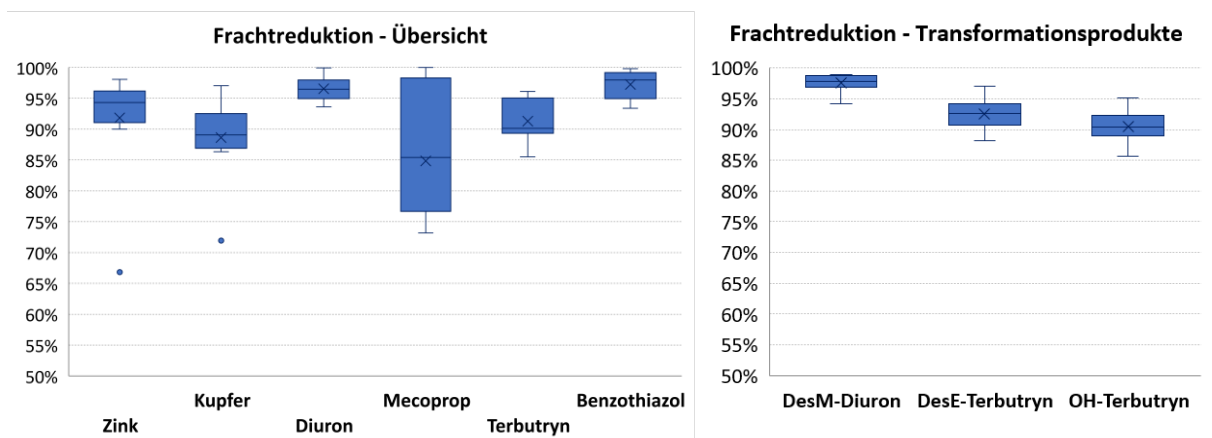


Abbildung 20: Frachtreduktion der organischen und anorganischen Stoffe (links) und die Transformationsprodukte (rechts) für 19 Einzelereignisse.

Der Verlauf der Frachtreduktion über die Zeit zeigt für Mecoprop, dass insbesondere nach Oktober 2020 (> 150 Tage nach Versuchsbeginn), als die Zulaufkonzentrationen dauerhaft < 1 µg/L lagen (siehe oben), der Rückhalt niedriger ist (Abbildung 21). In der Gesamtfrachtbetrachtung spielt der leicht geringere Wirkungsgrad aber nur eine untergeordnete Rolle, da hohe Mecoprop-Frachten sehr effektiv zurückgehalten werden.

Sowohl für Diuron, Terbutryn und deren Transformationsprodukte, als auch für Benzothiazol liegt der Rückhalt über die gesamte Untersuchungszeit auch bei niedrigeren Zulaufkonzentrationen auf konstant hohem Niveau. Eine hohe Stoffelimination ist folglich sowohl bei hohen als auch bei geringen Zulaufmengen bzw. -konzentrationen zu erwarten.

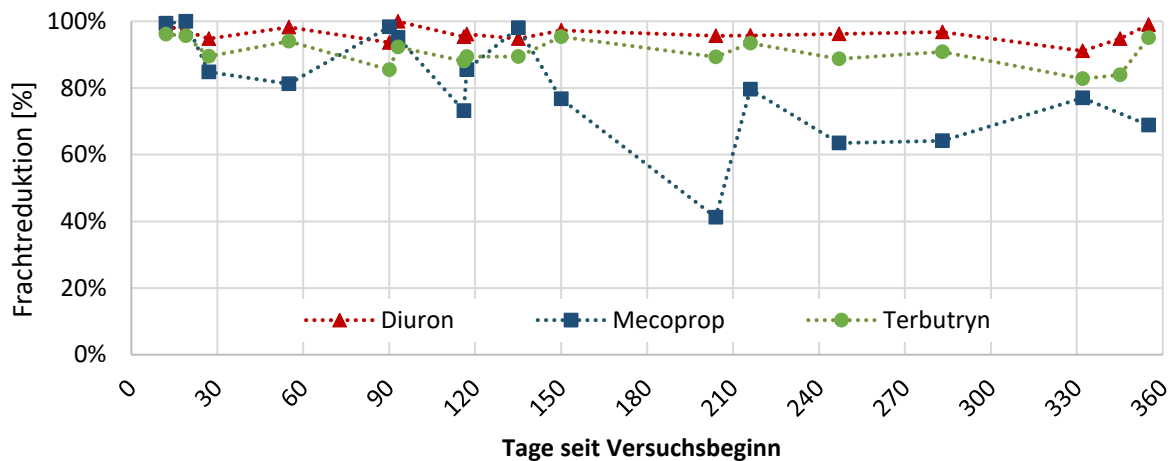


Abbildung 21: Verlauf der Frachtreduktion der Einzelereignisse für Diuron, Mecoprop und Terbutryn (die gepunktete Linie dient einer besseren Lesbarkeit des Diagramms und repräsentiert keine Messwerte).

3.4 Fazit Substrat

Das neu entwickelte Substrat ist sehr gut geeignet, die klassischen Schwermetalle (Zink, Kupfer) und die gewässerproblematischen organischen Spurenstoffe zurückzuhalten. Der Gesamtfrachtrückhalt aller untersuchten Schwermetalle und Spurenstoffe war mit rund 90 % im Labor, an der Testfassade sowie in der Pilotinstallation sehr hoch. Bemerkenswert ist auch, dass die untersuchten Transformationsprodukte der beiden Biozide Diuron und Terbutryn mit >90 % gleich effektiv entfernt werden. Eine Anwendung ist für einen breiten Konzentrationsbereich möglich – von gering bis zu mehreren hundert Mikrogramm pro Liter.

Der hohe Rückhalt über die Zeit weist darauf hin, dass dieser unabhängig von den unterschiedlichen Bedingungen der Regenereignisse ist (z.B. hinsichtlich Regenintensität und damit Filterzufluss, Konzentrationshöhe oder Temperatur). Auch für den polaren Wirkstoff Mecoprop (= geringe Sorptionsfähigkeit), für den als einzigem Parameter ein schwankender Rückhalt beobachtet wurde, lag der Gesamtrückhalt bei sehr guten rund 85 %.

Die weitestgehend unspezifische Stoffelimination basiert auf der ausgeklügelten Substratrezeptur und lässt nun eine breite Anwendung des Substrats für viele Anwendungsbereiche zu – zur Behandlung von Straßen-, Platz-, und Wegabflüssen, Dach- und Fassadenabflüssen.

4 Abschätzung der Wirksamkeit von Maßnahmen mit Bilanzmodell

4.1 Ziel der Modellanwendung

Die experimentellen Untersuchungen unterstreichen die hohe Wirksamkeit von Maßnahmen an der Quelle (Kapitel 2) und von einer nachgeschalteten Regenwasserbehandlung (Kapitel 3). Bei Neubauvorhaben lassen sich beide hervorragend integrieren.

Es stellt sich aber auch die Frage, ob die Maßnahmen im baulichen Bestand, zum Beispiel im Rahmen von Sanierungsarbeiten oder im Zusammenhang mit rechtlichen Auflagen, ein Potenzial zur Entlastung aufweisen.

Diese Frage wurde anhand einer Frachtabschätzung auf der Skala von Gewässereinzugsgebieten untersucht. Dabei wurden zwei Gewässer 2. Ordnung in Berlin betrachtet (Fließgewässer Wuhle und der Flughafensee), die im Kanaltrennsystem liegen und zu einem hohen Anteil durch urbanen Regenwasserabfluss gespeist werden. Als stoffliche Zielparameter wurden Diuron, Mecoprop und Zink ausgewählt.

4.2 Vorgehen

Mittels des Wasserhaushaltsmodells ABIMO des Landes Berlin (Glugla et al. 1999) wurden die Jahresabflussmengen für Regenwasser in den beiden Einzugsgebiete von Wuhle und Flughafensee nach Stadtstruktur (Altbau, Neubau, Gewerbe, Einfamilienhäuser) und Quelle (Putzfassade, Dächer, Höfe, Straßen) berechnet. Diese wurden mit Konzentrationen für die drei Zielparameter Diuron, Mecoprop und Zink verknüpft, um Jahresfrachten zu berechnen. Der zugrundeliegende Berechnungsansatz ist in Wicke et al. (2015) beschrieben. Der Ansatz wurde aber so verändert, dass aus effektiv gemessenen Konzentrationen im Regenkanal von Bestandsquartieren (Daten aus (Wicke et al. 2021a)) auf Quellen wie Dach- oder Fassadenflächen zurückgerechnet wurde. Diese hergeleiteten Emissionswerte wurden mit Messungen an den gebäudeseitigen Quellen des vorliegenden Projekts und aus einem Projekt zu Gebäuden als Quellen von Schadstoffen im Regenwasserabfluss (Wicke et al. 2021b) plausibilisiert. Das angepasste Frachtmodell ist über Zenodo verfügbar (Kenda et al. 2022).

Neben dem Status Quo wurden drei Szenarien mit den zwei neuen Maßnahmen (algizidfreie Fassadenbeschichtung, Kapitel 2, und Filtersubstrat für Regenwasserbehandlung, Kapitel 3) verglichen. Die Szenarien wurden so festgelegt, dass sie an Stadtstrukturen bzw. Quellen ansetzen, die eine besonders hohe Belastung erwarten lassen. In den Szenarien wird dabei beispielhaft von einer Implementierung der Maßnahmen für 20 % der relevanten Flächen bzw. Abflüsse ausgegangen.

4.3 Charakterisierung der beiden Gewässereinzugsgebiete

Das Einzugsgebiet der Wuhle wird durch Neubau- und Einfamilienhausgebiete dominiert, es gibt aber auch kleinere Gewerbebezonen. Im Gegensatz dazu weist der Flughafensee große Gewerbeflächen auf mit ähnlich großen Altbau- und Neubaugebieten. Für beide Gewässereinzugsgebiete wurde die Regenabflussmenge für alle abflussrelevanten Flächen mit ABIMO berechnet. Den relativen Anteil dieser jährlichen Regenwassermenge je Stadtstruktur-Typ zeigt Abbildung 22. Die höchsten Anteile des Regenabflusses stammen im Einzugsgebiet der Wuhle aus den Neubaugebieten (ca. 40 % des Regenabflusses), gefolgt von Einfamilienhausgebieten (ca. 30 %). Im Einzugsgebiet des Flughafensees stammt der höchste Anteil des Regenabflusses von Gewerbeflächen (ca. 40 % des Regenabflusses), gefolgt von ähnlich hohen Abflüssen von Altbau- und Neubaugebieten (jeweils ca. 20 %).

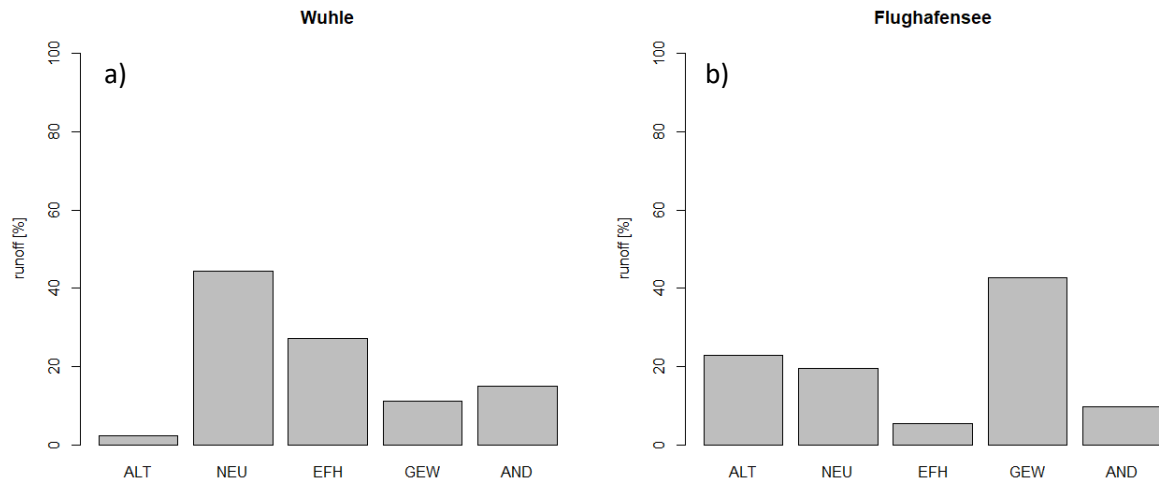


Abbildung 22: Anteil Stadtstrukturen am jährlichen Regenwasserabfluss für a) die Wuhle und b) den Flughafensee. Stadtstrukturen: ALT = Altbau, NEU = Neubau, GEW = Gewerbe, EFH = Einfamilienhäuser, AND = Andere Stadtstrukturen.

4.4 Ergebnisse

4.4.1 Gebietskonzentrationen

Die Rückrechnung der Quellkonzentrationen aus Ergebnissen im Regenkanal ergab für Mecoprop im Dachabfluss und Diuron im Fassadenabfluss deutlich geringere Konzentrationen als in den Messungen an der Quelle. Die Abweichungen variierten je nach Stadtstrukturtyp stark und betragen im Mittel ca. Faktor 10 bei Mecoprop und Faktor 2 bei Diuron. Die geringeren Konzentrationen sind zu erwarten, da in einem Bestandsgebiet nicht alle Flächen frisch saniert bzw. gestrichen sind und unterschiedliche Wirkstoffe zum Einsatz kommen. Außerdem wurde bei beiden Stoffen davon ausgegangen, dass sie ausschließlich aus Baustoffen/Farben stammen. Für Zink ergibt sich dagegen ein eher umgekehrtes Bild. Dies liegt an den großen Metalldächern im Gewerbegebiet und verkehrsbürtigen Frachten, insbesondere im Altbau und im Gewerbegebiet, die zu höheren Konzentrationen im Regenkanal führen als die zu Vergleichszwecken herangezogenen Konzentrationen in den quellnahen Abflüssen der Pilotinstallation des Regenfilters mit Zinkrinnen und Testdächern (Kapitel 3.3).

Abbildung 23a zeigt beispielhaft für die Wuhle die berechneten Konzentrationen im Jahresmittel im Regenwasserzufluss zum Gewässer. Diese unterscheiden sich zwischen den drei Stoffen um mehr als vier Größenordnungen. Dasselbe Stoffspektrum wurde in vergleichbaren Konzentrationsbereichen auch in einem benachbarten Fließgewässer (Panke) bei Regenwetter im Rahmen einer Messkampagne ermittelt (Abbildung 23b) (Wicke et al. 2021a). Dies zeigt, dass trotz der Unsicherheiten der Quellkonzentrationen der gewählte Modellierungsansatz zu plausiblen Abschätzungen führt.

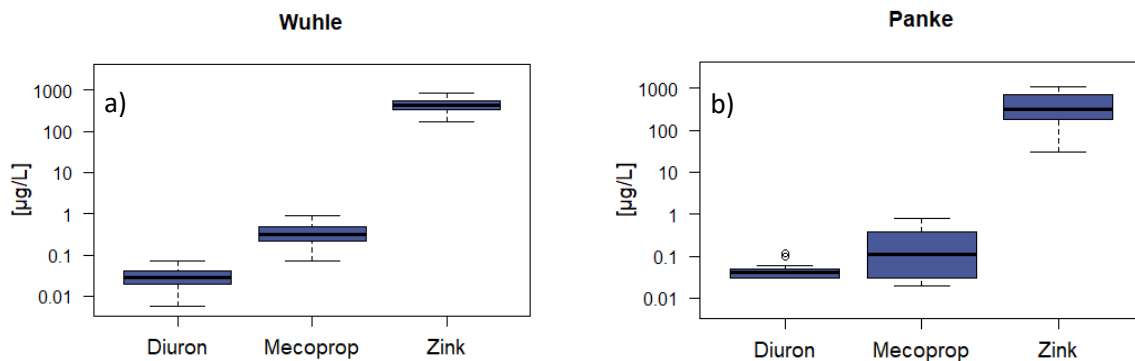


Abbildung 23: Berechnete mittlere Konzentrationen für die drei Zielparmeter im Regenwasserzufluss in die Wuhle (a) und gemessene Konzentrationen in der Panke (b).

4.4.2 Maßnahmen-Szenarien

Das Frachtmodell erlaubt eine Aufschlüsselung der Gesamtfracht nach Stadtstruktur und Quelle (Abbildung 24). Diese Aufschlüsselung kann genutzt werden, um Maßnahmen möglichst dort anzusetzen, wo sie einen möglichst großen Entlastungseffekt erzielen. Nachfolgend werden aus den Ergebnissen drei Szenarien abgeleitet:

- Szenario 1 „Farbe ohne Diuron (keine Algizide)“: Für Diuron ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen den Stadtstrukturen durch den unterschiedlichen Anteil an Putzfassaden sowie Einsatz von Diuron (Abbildung 24a und d). Einfamilienhäuser für die Wuhle und Altbauggebiete für den Flughafensee sind dabei quellenrelevant. Für Szenario 1 wurde angenommen, dass 20 % aller Putzfassadenflächen in der jeweils dominierenden Stadtstruktur nach und nach bei Erneuerung diuronfrei gestaltet werden.
- Szenario 2 „Gewerbedachabfluss behandeln“: Für Zink zeigt sich für beide Gewässer, dass besonders hohe Frachten aus den Gewerbegebieten auftreten (Abbildung 24b und e). In der Wuhle sind zudem Straßen wichtige Herkunftsflächen. Durch das konzentrierte Auftreten im Gewerbegebiet wurde allerdings im Szenario 2 der Fokus auf Dachflächen gelegt und wiederum angenommen, dass 20 % des Dachabflusses behandelt wird.
- Szenario 3 „Gebäudeabfluss behandeln“: Bei Mecoprop ergibt sich für Dachflächen in Neu- (Wuhle) und Altbauten (Flughafensee) eine dominante Quelle (Abbildung 24c und f). Dadurch bieten sich die Dächer für Maßnahmen an der Quelle an. In der Praxis kommt es allerdings oft vor, dass der Dachabfluss mit anderen Regenabflüssen wie den Hofflächen vermischt wird. Entsprechend wurde für die beiden dominanten Stadtstrukturen Alt- bzw. Neubau in Szenario 3 angenommen, dass 20 % des Quartiersabflusses, aber ohne Straßen, behandelt wird.

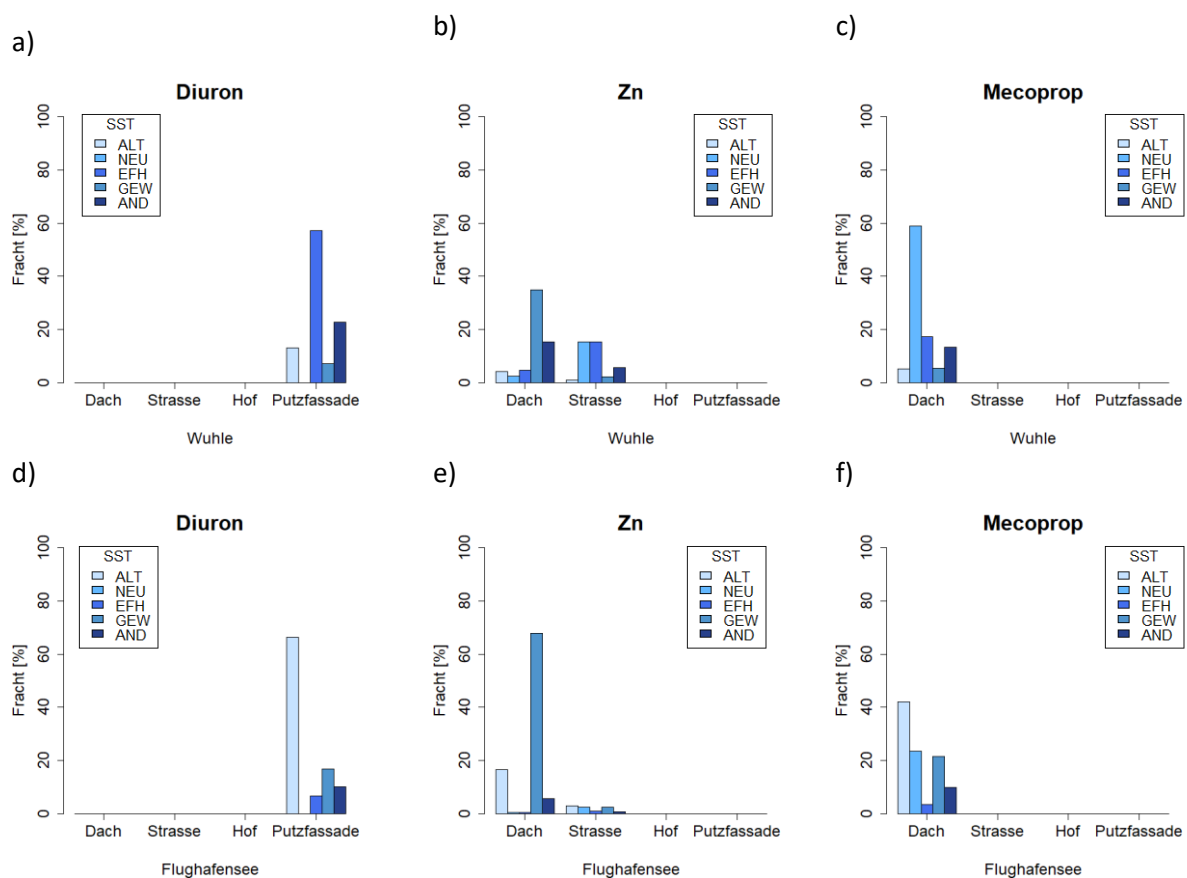


Abbildung 24: Frachtanteile für Diuron, Zink und Mecoprop nach Stadtstruktur (SST) und Quelle für die Einzugsgebiete der Wuhle (a-c) und des Flughafensees (d-f).

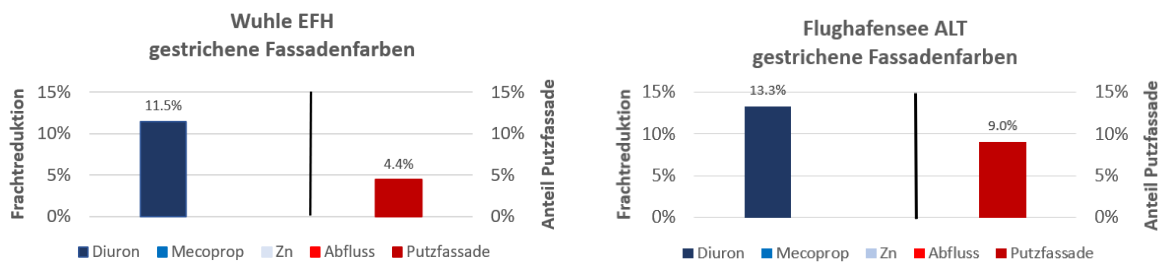
4.4.3 Potential zur Reduktion von Belastungen durch Maßnahmen

Szenario 1: Farbe ohne Diuron (keine Algizide): Die Maßnahme erreicht eine Frachtreduktion für beide Gebiete, die mit einem Faktor 1,5 bzw. 2,6 deutlich über dem Flächenanteil neu gestrichene Putzfassaden liegt (Abbildung 25a). Das heißt beispielsweise für die Wuhle, dass mit einem Neuanstrich von 4,4 % der Putzfassadenfläche des gesamten Einzugsgebietes (=20 % der Putzfassadenfläche des Stadtstrukturtyps EFH) mit der diuronfreien Farbe eine überproportionale Frachtreduktion für das gesamte Einzugsgebiet um 11,5 % erreicht werden kann.

Szenario 2: Gewerbedachabfluss behandeln: Eine fokussierte Reinigung von Dachwasser von Gewerbedächern ermöglicht eine noch höhere Überproportionalität bei Zink, zusätzlich noch eine leichte Reduktion von Mecoprop (Abbildung 25b). Dabei spielen auch die Charakteristika der Einzugsgebiete eine wichtige Rolle. Da beim Flughafensee sowohl die höchsten Anteile des Abflusses als auch der Zinkfracht aus dem Gewerbegebiet stammen (Abbildung 22b), wird zwar eine hohe Frachtreduktion erreicht, die Überproportionalität fällt aber mit 2,8 gegenüber 7,0 bei der Wuhle geringer aus.

Szenario 3: Gebäudeabfluss behandeln: Die Überproportionalität ist vor allem für MCPP deutlich ausgeprägt. Zudem werden im Altbauggebiet des Flughafensees gleich alle drei Zielsubstanzen erheblich reduziert (Abbildung 25c).

a) Szenario 1: Farbe ohne Diuron (keine Algizide)



b) Szenario 2: Gewerbedachabfluss behandeln



c) Szenario 3: Gebäudeabfluss behandeln

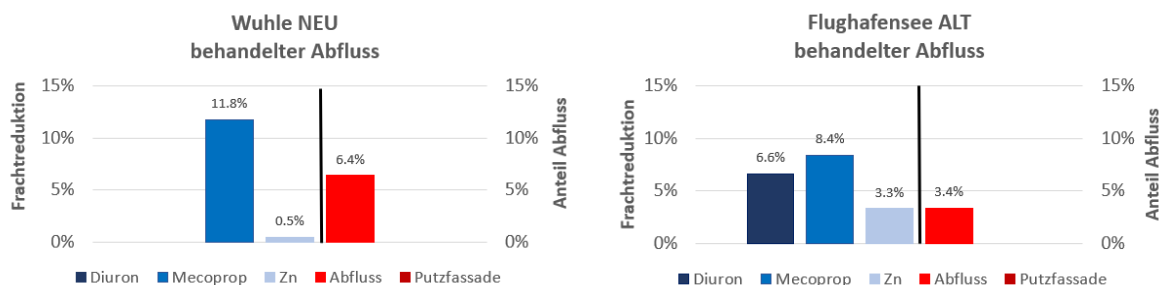


Abbildung 25: Reduktion der Gesamtfracht für die drei Szenarien, jeweils links für die Wuhle und rechts für den Flughafensee. Die Frachtreduktion wird dem „Aufwand“ gegenübergestellt: in a) dem Anteil der sanierten Putzfassadenfläche an allen Putzfassadenflächen sowie in b) und c) dem behandelten Anteil des Gesamtgebietsabflusses.

In allen drei Szenarien zeigt sich, dass durch eine Fokussierung auf besonders belastete Gebiete die Maßnahmen auch in Bestandsgebieten sehr effizient eingesetzt werden können. Der genutzte Überproportionalitätsfaktor dient als Gradmesser für die Effizienz. Der prozentuale Anteil der Quellen an der Gesamtfracht zeigt an, wo sich am meisten Fracht reduzieren lässt. Allerdings kann es vorkommen, dass Quellen, an denen die Fracht effizient reduziert werden kann, nur eine untergeordnete Rolle bezogen auf die Gesamtfracht spielen. Bei der Maßnahmenplanung muss daher für jede Gebietscharakteristika geklärt werden, ob effizient punktuell oder gesamthaft die Fracht reduziert werden soll. Punktueller Maßnahmen lassen sich einfacher umsetzen (klare Zuständigkeit, Kostenzuordnung etc.).

4.5 Fazit Bilanzmodell

Die Modellierung für zwei Gewässereinzugsgebiete mit Bestandsbebauung zeigt die hohen Belastungen, denen urbane Gewässer mit kleinen Mischungsverhältnissen (Regenwasserzulauf / Gewässerabfluss) ausgesetzt sind. Die hohen Stofffrachten können aufgrund des diffusen Eintrags und der Vielzahl an Quellen nur mit einem Mix an Maßnahmen reduziert werden. Die hier untersuchten Maßnahmen Szenarien reichen dazu nicht aus.

Es zeigt sich aber, dass bei Kenntnis der relevanten Quellentypen (ohne Kenntnis der genauen Quellen, z.B. welche Fassade Diuron enthält) eine gezielte Reduktion in den Gebieten ermöglicht werden kann, die besonders hohe Frachten beitragen. Damit wurde gezeigt, dass die entwickelten neuen Maßnahmen einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der Schadstoffeinträge in stark belasteten urbanen Gewässern leisten. Würde das Regenwasser versickert, so wäre die Frachtreduktion auch bezogen auf die Vermeidung einer möglichen Grundwasserbelastung sehr relevant.

Das einfache Frachtmodell ist direkt auf andere Gewässereinzugsgebiete Berlins und methodisch auf viele Gewässer mit urbanen Einzugsgebieten übertragbar. Der einfache Ansatz erlaubt eine rasche Analyse der Belastungssituation sowie sinnvoller emissionsmindernder Maßnahmen.

5 Leitfaden und Maßnahmenmerkblätter

5.1 Leitfaden

Das in Kapitel 4 vorgestellte Bilanzmodell kann für eine strategische Maßnahmenplanung zur Reduktion von Schadstoffen im urbanen Regenabfluss eingesetzt werden. Dieser methodische Ansatz wurde in einem Leitfaden mit dem Titel „Sauberes Regenwasser in Städten – ein Leitfaden zur Maßnahmenplanung“ zusammengefasst (siehe Anhang). Er enthält auch Hintergrundinformationen zu relevanten Schadstoffen und deren Quellen sowie Eintragspfaden, um die Relevanz dieser Belastungen den verschiedenen Zielgruppen bereitzustellen. Der Leitfaden richtet sich an Stadtverwaltungen, Planer und Ingenieurbüros, um Städte auf dem Weg zu einer effizienteren und nachhaltigen Gestaltung des urbanen Raums zu unterstützen.

5.2 Merkblätter

Zusätzlich wurden drei kompakte Merkblätter entwickelt, die die wesentlichen Einflussfaktoren und Maßnahmen für eine nachhaltige Fassadengestaltung sowie den Umgang mit Belastungen im Regenwasserabfluss darstellen, damit diese beispielsweise in Planungsprozessen von Bauvorhaben einfließen können:

- **Fassaden langlebig gestalten – Einfluss von Standort und Architektur**

Enthält Hinweise zu Standort, Staub, Witterungsschutz und Wasserführung als wesentliche Einflussgrößen und Maßnahmen, die sich mit dem Standort und der Architektur verbinden

- **Fassaden gestalten – Einfluss von Materialien und Ausführung**

Enthält Hinweise zu Materialien, Filmschutz, Ausführung und Instandhaltung als wesentliche Einflussgrößen und Maßnahmen, die sich mit den Materialien und der Ausführung verbinden

- **Belastungen im Regenwasser – Maßnahmen planen und umsetzen**

Enthält Hinweise zu Belastung, Bilanzierung, naturnaher und technischer Behandlung als wesentliche Einflussgrößen und Maßnahmen für eine zielgerechte Planung

Die drei Merkblätter (Anhang) können beispielsweise von Architekten und Planern in aktuellen Planungsprozessen berücksichtigt werden, um Belastungen von Regenabflüssen zu vermeiden oder zu verringern.



6 Schlussfolgerungen

Zwei innovative technische Maßnahmen zur Reduktion von Stoffbelastungen im Regenwasser - an der Quelle und durch nachgeschaltete Behandlung – wurden erfolgreich entwickelt und demonstriert. Durch diese Maßnahmen lassen sich langlebige Spurenstoffe in den Gewässern vermeiden, einerseits durch die vollständige Substitution entsprechender Biozide im Material (Farbe, Putz), andererseits durch den nicht-selektiven, stofflich breiten Rückhalt von organischen Spurenstoffen und Schwermetallen mit einer richtungsweisenden Adsorbertechnologie.

Zur Abschätzung der Wirksamkeit von Maßnahmen für ein ganzes Gewässereinzugsgebiet wurde ein Bilanzmodell entwickelt und für zwei konkrete Gewässereinzugsgebiete mit Bestandsbebauung in Berlin exemplarisch angewendet. Mit diesem einfachen Frachtmodell lassen sich mögliche Belastungen sowie sinnvolle emissionsmindernde Maßnahmen, basierend auf unterschiedlichen Belastungen verschiedener Stadtstrukturen (z.B. Gewerbegebiete, Altbaugelände), orientierend abschätzen und analysieren.

Relevante Maßnahmen sind in drei Merkblättern zusammengestellt und können in Planungsprozessen berücksichtigt werden. Das methodische Vorgehen und die Anwendung zur Priorisierung von Maßnahmen sind in einem Leitfaden zusammengefasst.

Um die Ergebnisse in der Praxis bekannt zu machen und anzuwenden, sind Fort- und Weiterbildungen und eine adressatengerechte Kommunikation für die relevanten Akteure notwendig (z.B. Webinare, Präsenzseminare, Artikel in Fachzeitschriften).

7 Quellen

- Burkhardt, M., Junghans, M., Zuleeg, S., Schoknecht, U., Lamani, X., Bester, K., Vonbank, R., Simmler, H. & Boller, M. (2009a) Biocides in building facades - Ecotoxicological effects, leaching and environmental risk assessment for surface waters. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 21 (1): 36-47
- Burkhardt, M., Zuleeg, D., Eugster, D., Boller, M., Hean, S., Haag, R., Schmid, P. & Kohler, M. (2009b) Mecoprop in Bitumenbahnen: Auswaschung von Mecoprop aus Bitumenbahnen und Vorkommen im Regenkanal.
- Burkhardt, M., Zuleeg, S., Vonbank, R., Bester, K., Carmeliet, J., Boller, M. & Wangler, T. (2012) Leaching of biocides from Façades under natural weather conditions. *Environmental Science and Technology* 46 (10): 5497-5503
- Gasperi, J., Sebastian, C., Ruban, V., Delamain, M., Percot, S., Wiest, L., Mirande, C., Caupos, E., Demare, D., Kessoo, M.D.K., Saad, M., Schwartz, J.J., Dubois, P., Fratta, C., Wolff, H., Moilleron, R., Chebbo, G., Cren, C., Millet, M., Barraud, S. & Gromaire, M.C. (2014) Micropollutants in urban stormwater: Occurrence, concentrations, and atmospheric contributions for a wide range of contaminants in three French catchments. *Environmental Science and Pollution Research* 21 (8): 5267-5281
- Glugla, G., Goedecke, M., Wessolek, G. & Fürtig, G. (1999) Langjährige Abflußbildung und Wasserhaushalt im urbanen Gebiet Berlin. *Wasserwirtschaft* 89: 34-42
- Kenda, K., Matzinger, A., Tatis-Muvdi, R. & Wicke, D. (2022) Spur.scripts: Frachtmodell Regenabfluss Berlin (v1.0.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6646259>.
- OGewV (2016) Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung - OGewV). p. 1373-1443. Bundesgesetzblatt Nr. 28.
- Tietje, O., Burkhardt, M., Rohr, M., Borho, N. & Schoknecht, U. (2018) Emissions- und Übertragungsfunktionen für die Modellierung der Auslaugung von Bauprodukten. UBA Texte 28/2018, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- VSA (2019) VSA-Leistungsprüfung für Behandlungsanlagen. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute
- Wicke, D., Matzinger, A. & Rouault, P. (2015) Relevanz organischer Spurenstoffe im Regenwasserabfluss Berlins - Abschlussbericht. KWB
- Wicke, D., Matzinger, A., Sonnenberg, H., Caradot, N., Schubert, R.-L., Rouault, P., Heinzmann, B., Dünnbier, U. & von Seggern, D. (2017) Spurenstoffe im Regenwasserabfluss Berlins. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 5: 394-404
- Wicke, D., Matzinger, A., Sonnenberg, H., Caradot, N., Schubert, R.L., Dick, R., Heinzmann, B., Dünnbier, U., von Seggern, D. & Rouault, P. (2021a) Micropollutants in urban stormwater runoff of different land uses. *Water (Switzerland)* 13 (9): 1312
- Wicke, D., Tatis-Muvdi, R., Rouault, P., Zerball-van Baar, P., Dünnbier, U., Rohr, M. & Burkhardt, M. (2021b) Bauen und Sanieren als Schadstoffquelle in der urbanen Umwelt - Abschlussbericht BaSaR. Texte 155/2021, Umweltbundesamt

8 Anhang



Abbildung 26: Fassadenrinne für Probefläche 1 – 4 der Fassadenuntersuchungen.

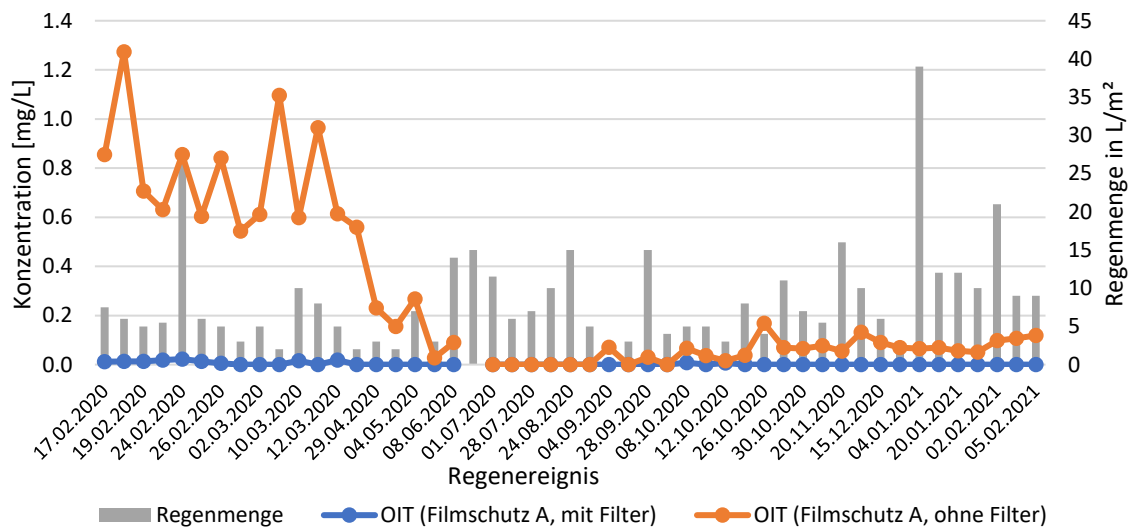


Abbildung 27: Konzentration von OIT im Fassadenabfluss der Versuchsflächen 1 und 2 (konventionelle Farbe mit Filmschutz A) je Regenereignis.

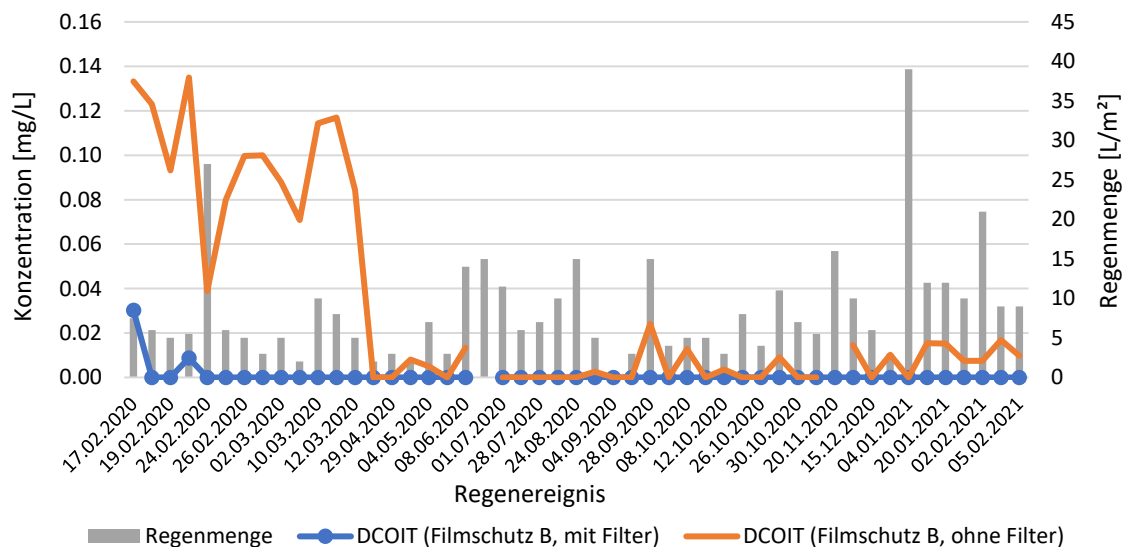


Abbildung 28: Konzentration von DCOIT im Fassadenabfluss der Versuchsflächen 3 und 4 (neue Farbe mit Filmschutz B ohne langlebige Algizide) je Regenereignis.

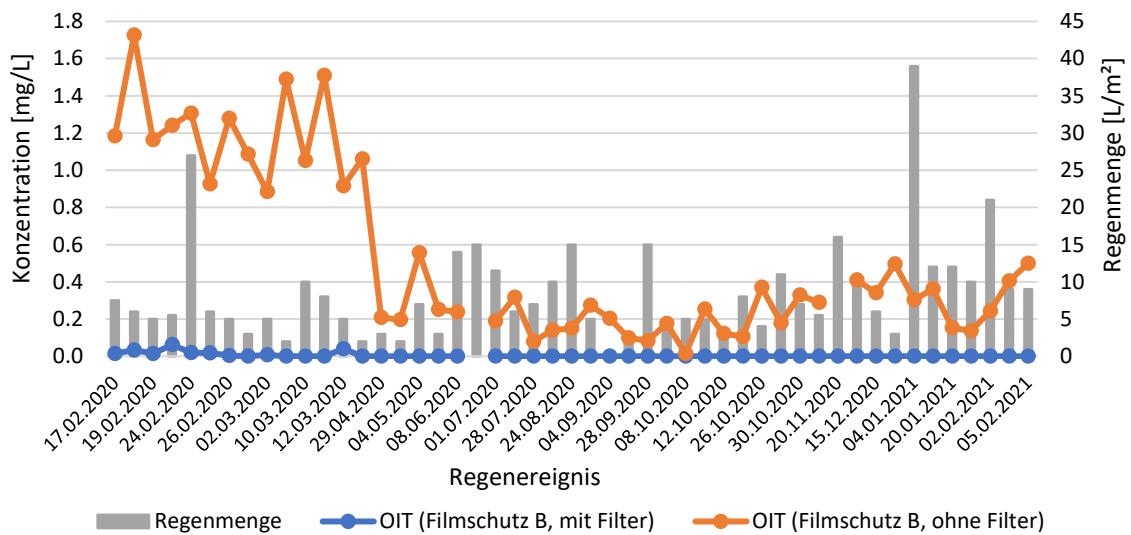


Abbildung 29: Konzentration von OIT im Fassadenabfluss der Versuchsflächen 3 und 4 (neue Farbe mit Filmschutz B ohne langlebige Algizide) je Regenereignis.

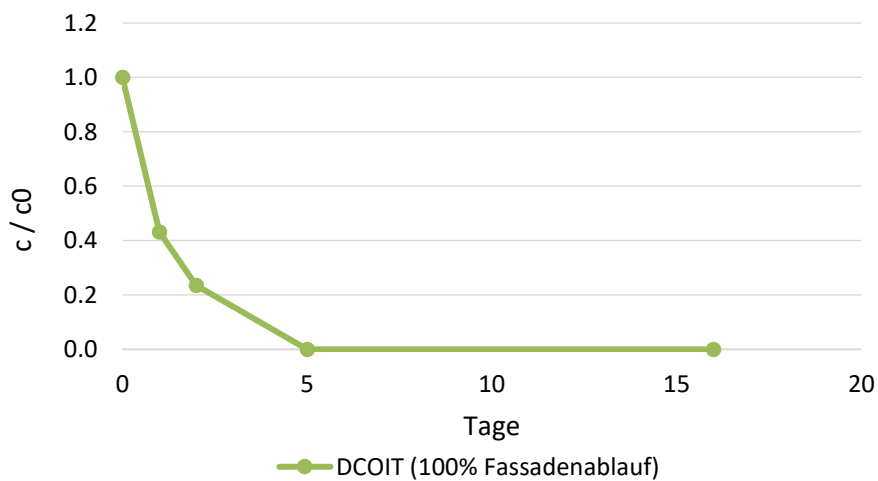


Abbildung 30: Abbau von DCOIT im Fassadenablauf von Probefläche 4 (neues Produkt).

Tabelle 3: Parameter der logarithmischen Emissionsfunktionen für verschiedene Probeflächen und Substanzen.

	A_{char} [-]	b_{log} [m^2/L]
Probefläche 2 Terbutryn	2.84	0.26
Probefläche 2 OIT	4.65	0.6
Probefläche 4 OIT	9.68	0.31
Probefläche 4 DCOIT	0.54	0.54

Tabelle 4: Gemessene und simulierte Gesamtfracht von Terbutryn, OIT und DCOIT aus Probefläche 2 und 4 während der Versuchsdauer.

	Emission Probefläche 2 [mg/m ²]		Emission Probefläche 4 [mg/m ²]	
	Terbutryn	OIT	OIT	DCOIT
Simuliert	6.6	15.9	27.2	1.8
Gemessen	7.8	14.7	26.3	1.6
Abweichung	-15%	+8%	+3%	+13%

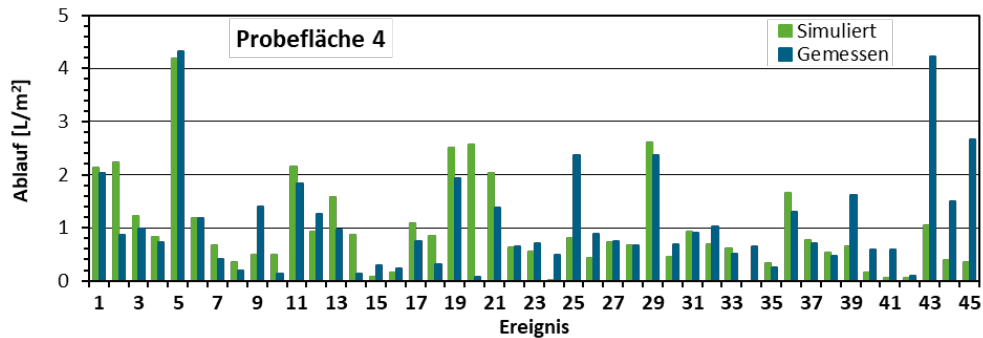


Abbildung 31: Vergleich von simuliertem und gemessenem Fassadenablauf von Probefläche 4.

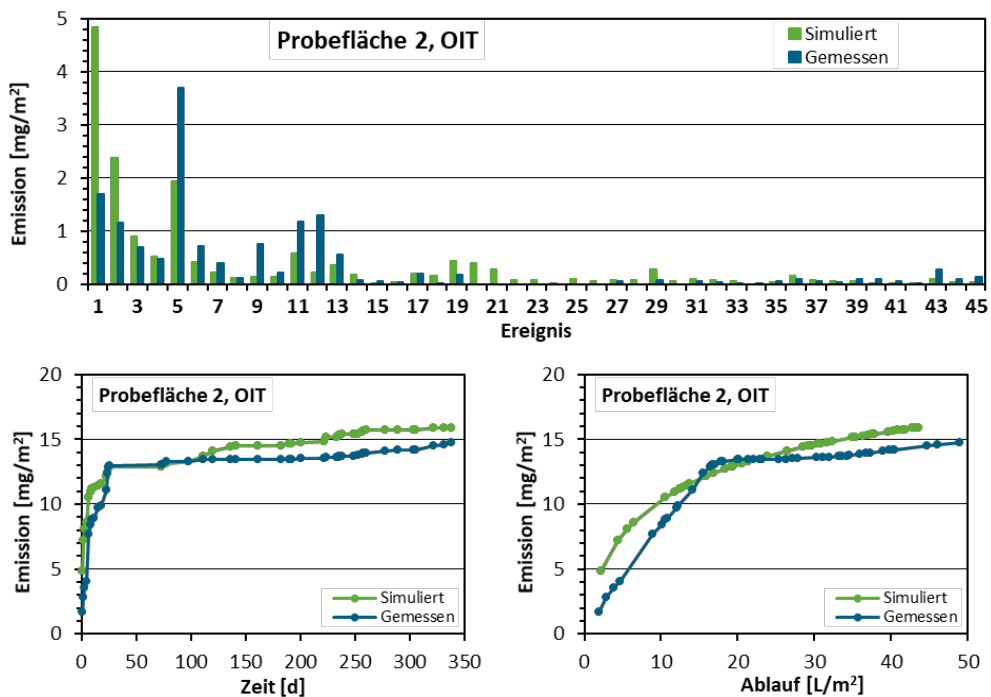


Abbildung 32: Vergleich von simulierter und gemessener OIT-Emission je Ereignis (oben) und kumulierter OIT-Emission gegen Versuchsdauer und Abflussmenge (unten) von Probefläche 2.

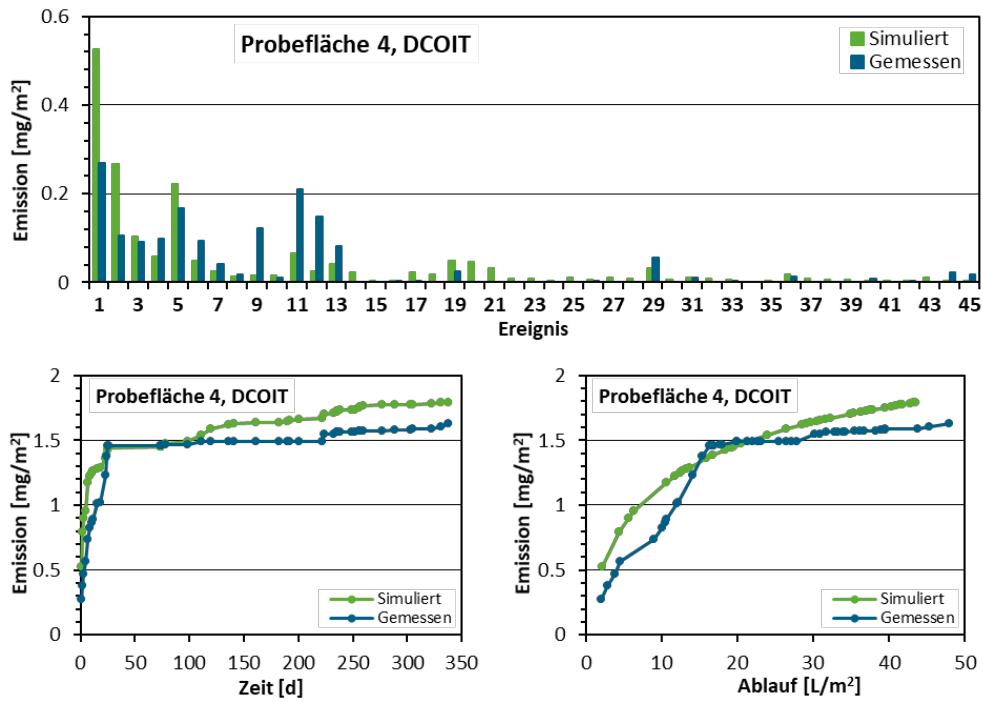


Abbildung 33: Vergleich von simulierter und gemessener DCOIT-Emission je Ereignis (Mitte) und kumulierter DCOIT-Emission gegen Versuchsdauer und Abflussmenge (unten) von Probefläche 4.

Tabelle 5: Wichtigste Kenngrößen der analysierten Proben vom Zu- und Abfluss des Regenfilters.

Probenbezeichnung	Regenhöhe [mm]	Filterzufluss [L]
20.06.20	5,2	76
28.06.20	5,9	100
26.07.20	9,6	150
30.08.20	14,0	164
02.09.20	12,4	226
25.09.20	11,0	162
26.09.20	26,8	516
14.10.20	13,7	164
29.10.20	30,9	584
22.12.20	18,2	340
03.01.21	15,6	196
03.02.21	9,7	116
11.03.21	8,0	150
29.04.21	15,7	396
12.05.21	27,4	592
22.05.21	10,1	294
29.06.21	45,3	761
Mischprobe 1	17,2	306
Mischprobe 2	114,0	2098

Tabelle 6: Übersicht der in den beiden Mischproben des Regenfilters enthaltenen Einzelereignisse. Farblich markiert sind die jeweiligen Teilproben (n=13).

Datum Regenereignis	Regenhöhe [mm]	Filterzufluss [L]
Mischprobe 1		
18.08.2020	4.4	52
26.08.2020	6.1	148
03.09.2020	4.8	84
05.09.2020	1.9	22
Mischprobe 2		
12.01.2021	5.5	124
13.01.2021	1.6	34
14.01.2021	1.6	56
18.01.2021	4.6	130
19.01.2021	7.7	162
23.01.2021	4.9	66
24.01.2021	2.4	28
26.01.2021	0.7	6
28.01.2021	2.5	44
30.01.2021	3.1	10
02.02.2021	5.4	84
19.02.2021	3.5	52
26.02.2021	1.9	14
12.03.2021	3.7	80
14.03.2021	2.8	106
15.03.2021	3	64
17.03.2021	0.5	2
19.03.2021	0.7	8
21.03.2021	1.8	32
27.03.2021	3.6	120
05.04.2021	4.3	144
06.04.2021	2.1	40
07.04.2021	2.4	58
10.04.2021	1.2	4
10.04.2021	4.8	42
11.04.2021	1.9	38
18.04.2021	6.5	66
04.05.2021	3.3	126
05.05.2021	1.5	54
07.05.2021	11.3	112
15.05.2021	1.9	58
16.05.2021	2.5	26
18.05.2021	1	10
21.05.2021	0.9	8
28.05.2021	2.2	58
12.06.2021	2.5	28

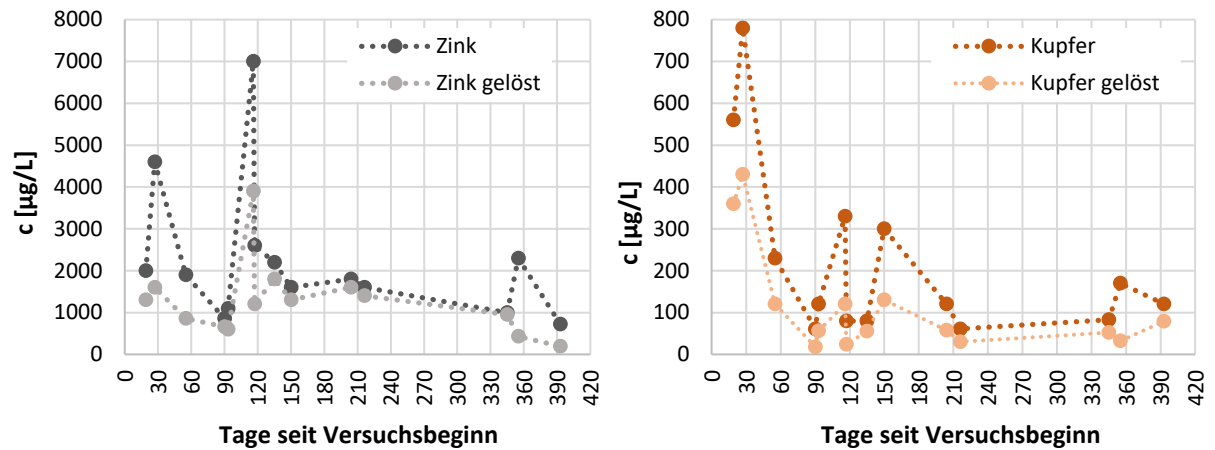


Abbildung 34: Konzentrationsverlauf für Zink (links) sowie Kupfer (rechts), jeweils gesamt und gelöst.

8.1 Leitfaden und Merkblätter

Auf den nächsten Seiten sind der Leitfaden "Sauberer Regenwasserabfluss in Städten – ein Leitfaden zur Maßnahmenplanung" und die drei Merkblätter zur Gestaltung von Fassaden sowie Planung und Umsetzung von Maßnahmen zur Behandlung von Belastungen im Regenwasserabfluss zu finden. Leitfaden und Merkblätter sind auch als separate Dateien verfügbar.