



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

pecher
DR. PECHER AG

Kurzfassung zum Abschlussbericht ReWaFil

Analyse und Optimierung des Rückhalts von
feinpartikulären und gelösten Stoffen in Anlagen zur
technischen **Regenwasserfiltration (ReWaFil)**

Projektförderung durch:

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz
(Förderprogramm "Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW")

Förderbereich 6: Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur Abwasserbeseitigung (ResA-6)

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV)

Postfach 101052, 45610 Recklinghausen

Februar 2020

Projektpartner

Wissenschaftliche Leitung und Bearbeitung:	
Prof. Dr.-Ing. Helmut Grüning Thorsten Schmitz M.Eng.	Fachhochschule Münster Institut für Wasser • Ressourcen • Umwelt Stegerwaldstraße 39 48565 Steinfurt
Wissenschaftliche Bearbeitung:	
Prof. Dr.-Ing. Marc Wichern Dr. Eva Heinz Mareike Evers M.Sc.	Ruhr-Universität Bochum Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik Universitätsstraße 150 44801 Bochum
Wissenschaftliche Bearbeitung:	
Dr.-Ing. Klaus Hans Pecher Daniela Böckmann M.Sc.	Dr. Pecher AG Klinkerweg 5 40699 Erkrath

Danksagung

Die Projektbeteiligten bedanken sich beim MULNV für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten und beim LANUV NRW für die fachliche Begleitung und Unterstützung bei der Projektabwicklung.

1 Einleitung

Mit dem Runderlass „Anforderungen an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren“ von Mai 2004 (sog. Trennerlass) wurde die Möglichkeit der dezentralen Behandlung von Oberflächenabflüssen der Kategorie II eingeräumt. Dies führte zur Entwicklung zahlreicher herstellereinspezifischer Behandlungsanlagen. Die maßgeblichen Wirkprinzipien dieser Anlagen sind Sedimentation und/oder Filtration mit Filtersubstraten. Mit dezentralen Filtersystemen bestehen inzwischen umfangreiche Betriebserfahrungen. Im Jahr 2014 wurde auch ein erster Technischer Regenwasserfilter (TRF) im zentralen Maßstab in Betrieb genommen. Untersuchungen zu zentralen technischen Regenwasserfiltern führten Grüning et al. (2017) sowie Bihs et al. (2015) durch.

Die Untersuchungen von Filteranlagen unter realen Betriebsbedingungen zeigen jedoch, dass die Wirksamkeiten der Filteranlagen häufig hinter den im Labor erzielten Rückhalten zurückbleiben. Dies ist vor allem auf die unterschiedlichen Vor-Ort-Bedingungen zurückzuführen. Im Labor werden beispielsweise häufig Einzelstoffe untersucht, es kommt destilliertes Wasser oder Quarzmehl als künstlicher Ersatz für feinpartikuläre Stoffe zum Einsatz. Im realen Oberflächenabfluss liegen Vielstoffgemische vor. Die AFS weisen ein ebenso breites Dichte- wie Kornspektrum auf und biologische Prozesse lassen den Filter kolmatieren oder führen gar zur Rücklösung von bereits adsorbierten Schadstoffen.

Auch Wichern et al. (2017) stellten im Hinblick auf die Schwermetalle Kupfer und Zink fest, dass die Rückhalteleistungen in einem Filterschachtsystem unter realen Bedingungen die im Labor ermittelten Rückhalte nicht erreichen konnten. Anschließende Laboruntersuchungen zeigten, dass die Filtermaterialien eine erhebliche Restkapazität aufwiesen. Da durch Kolmation des Filters im realen Betrieb die Kapazität der Filtermaterialien nicht vollständig ausgeschöpft werden konnte, sollten TRF aus einer Kombination aus Feststoffabtrennung und Filtration bestehen.

Ziel des Projektes war es, diese komplexen Prozesse in TRF besser zu verstehen und so letztlich eine Grundlage zu schaffen, um künftige zentrale TRF stabiler betreiben zu können, deren Standzeit zu erhöhen und den Stoffrückhalt für besonders wasserwirtschaftlich relevante Inhaltsstoffe im Oberflächenabfluss zu steigern. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen dieses Projektes liefern wichtige Informationen für den geplanten TRF „Böhler Weg“ in Wuppertal. Im Rahmen der zweiten Phase des Projektes wird der TRF Böhler Weg gebaut, untersucht und optimiert. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über das Untersuchungsprogramm.

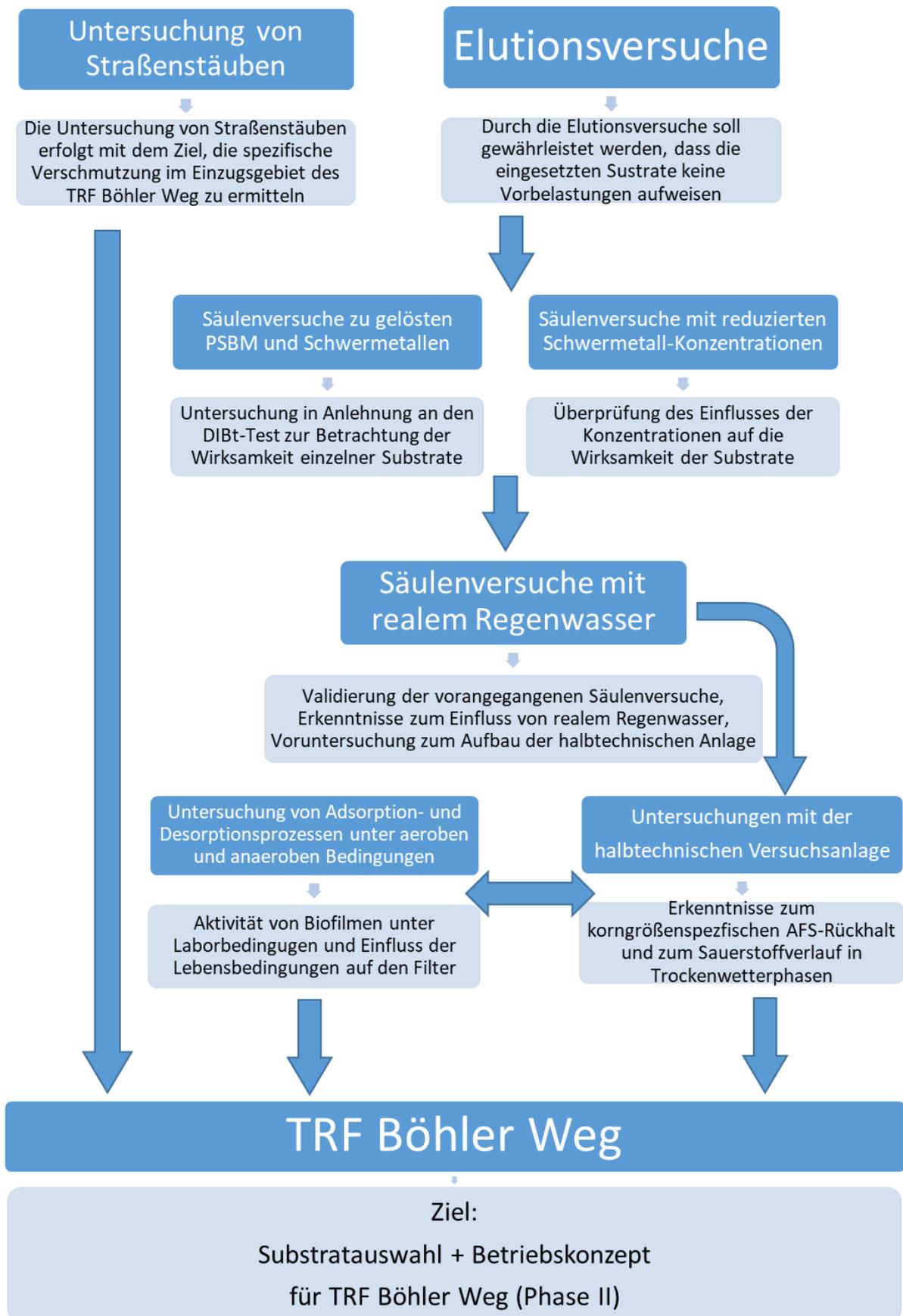


Abbildung 1: Untersuchungsprogramm des Forschungsvorhabens ReWaFil

2 Untersuchungsprogramm

2.1 Untersuchung der Schadstoffbelastung im Einzugsgebiet

Um einen Filter unter wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten optimal betreiben zu können, ist es hilfreich, möglichst detaillierte Kenntnisse vom einzugsgebietspezifischen Schadstoffanfall zu haben. Hierzu war eine Beprobung des Oberflächenabflusses geplant. Aufgrund der Vor-Ort-Situation war dies jedoch nicht valide durchführbar. Daher wurde auf die Beprobung von Straßenstäuben im Einzugsgebiet ausgewichen.

Das Einzugsgebiet des geplanten Filterbauwerks „Böhler Weg“ umfasst eine angeschlossene Fläche von insgesamt 11,4 ha. Die abflusswirksame Fläche des Einzugsgebiets setzt sich aus folgenden Flächenkategorien zusammen:

- Kategorie IIa gemäß Trennerlass NRW: $A_{E,b,IIa} = 8,1$ ha
- Kategorie IIb gemäß Trennerlass NRW: $A_{E,b,IIb} = 1,4$ ha
- Kategorie III gemäß Trennerlass NRW: $A_{E,b,III} = 1,9$ ha

Eine Übersicht des Einzugsgebiets des TRF Böhler Weg zeigt Abbildung 2.

Die Sammlung der fahrbahnbürtigen Feststoffe erfolgte händisch, das heißt mit Besen, Handfegern, Pinseln und Staubsauger. Auf der L418 in Wuppertal wurde in Fahrtrichtung Elberfeld zusätzlich eine Sammlung mittels Straßenkehrmaschine vorgenommen. Hierbei wurde auf den Einsatz von Wasser verzichtet.

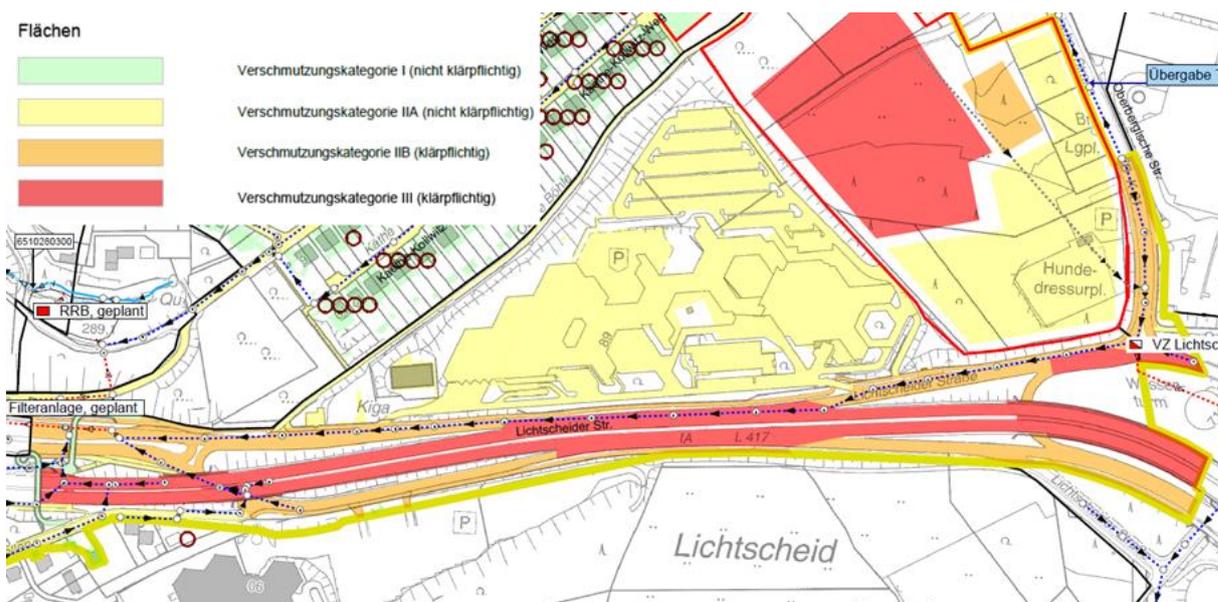


Abbildung 2: Übersichtsplan des Einzugsgebiets für den geplanten Filter "Böhler Weg"

Es wurden Straßenstäube an verschiedenen Orten im Einzugsgebiet des TRF „Böhler Weg“ gesammelt, fraktioniert und auf ihre korngößenspezifischen Schadstofffrachten untersucht. Dabei wurden verschiedene Flächenkategorien (Kategorie IIa, IIb sowie III) beprobt. Auf der Lichtscheider Straße (Kategorie IIb) wurden zu zwei verschiedenen Zeiträumen (November und Juli) Proben genommen, um einen möglichen jahreszeitlichen Einfluss zu ermitteln. Die L418 wurde in beide Fahrtrichtungen beprobt, in einer Fahrtrichtung wurde sowohl händisch als auch mit einer Straßenkehrmaschine Proben gesammelt. Straßenstäube können nicht direkt mit Straßenabflüssen verglichen werden, geben allerdings trotzdem wichtige Hinweise auf die im Einzugsgebiet vorliegenden Schadstoffe.

Im Vergleich zwischen den Fahrbahnrichtungen konnten Unterschiede festgestellt werden, welche durch Gefälle der Fahrbahn, Bremsverhalten sowie Vegetation zu erklären sind. Der gesammelte Staub der L418 Fahrtrichtung Elberfeld (leichtes Abwärtsgefälle) wies eine im Vergleich zur Fahrtrichtung Lichtscheid (leichte Steigung) hin zu kleineren Partikeln verschobene Korngrößenverteilung auf. Wie zu erwarten, wurde die Korngrößenverteilung feiner mit steigender Verkehrsdichte (L418 < Lichtscheider Straße < Parkplatz BARMER Krankenkasse). Der jahreszeitliche Einfluss ist in den unteren Korngrößen gering und variiert erst bei Korngrößen oberhalb etwa 500 µm. Hier finden sich im November größere Anteile als im Juli. Zwischen einer händischer Probenahme und der Probenahme mit einer Straßenkehrmaschine konnten deutliche Unterschiede festgestellt werden. Bei letzterer werden viele feine Partikel nicht erfasst, so dass diese auf der Fahrbahn verbleiben und somit für den Oberflächenabfluss eine entscheidende Rolle spielen.

Anhand der Schadstoffanalyse der Straßenstäube L418 Fahrtrichtung Elberfeld, Lichtscheider Straße sowie des Parkplatzes der Krankenkasse BARMER konnte ein repräsentatives Schadstoffspektrum im Einzugsgebiet des TRF „Böhler Weg“ dargestellt werden. Die Schadstoffkonzentrationen wurden für die verschiedenen Größenfraktionen kleiner 1000 µm analysiert. Die Belastung mit MKW lag bei der L418 sowie bei der BARMER zwischen 240 mg/kg und 1100 mg/kg. Bei der Lichtscheider Straße wurden sogar Konzentrationen bis 2100 mg/kg (in der Fraktion < 40 µm) gefunden werden. Dies ist durch den dort zum Teil vorhandenen ruhenden Verkehr und dem damit verbundenen unvollständigen Verbrennungsprozess zu erklären. Die PAK-Konzentrationen lagen zwischen 0,94 mg/kg und 5,68 mg/kg. Die Schwermetallkonzentrationen lagen für Blei zwischen 19 mg/kg und 150 mg/kg, für Cadmium zwischen <0,40 mg/kg und 0,63 mg/kg, für Kupfer zwischen 37 mg/kg und 680 mg/kg und für Zink zwischen 160 mg/kg und 1200 mg/kg. Die Belastung an Schwermetallen und PAK war beim Parkplatz

erwartungsgemäß am niedrigsten. In allen drei Probenahmestellen konnte festgestellt werden, dass die Konzentrationen aller Schadstoffe bei den kleinen Fraktionen am größten waren und mit steigender Korngröße abnahmen. Die Analyse des PSBM Mecoprop lag in allen Untersuchungen unterhalb des Messbereiches von 0,01 mg/kg. Bei den Schwermetallen wurden, verglichen mit in der Literatur veröffentlichten Schadstoffkonzentrationen, teilweise deutliche Schadstoffbelastungen festgestellt. Die im Einzugsgebiet des TRF „Böhler Weg“ gemessenen Bleikonzentrationen lagen über den beschriebenen Werten zwischen 10 und etwa 100mg/kg. Der im Einzugsgebiet gemessene Maximalwert von 150mg/kg liegt über den typischen Literaturwerten, wobei in einem Fall die maximale Konzentration bei 450mg/kg lag. Die Belastung mit Kupfer liegt in publizierten Arbeiten im Bereich bis etwa 350mg/kg, die im Einzugsgebiet gemessene Konzentration von bis zu 1.200mg/kg liegt deutlich über den Literaturwerten. Im Vergleich mit den Untersuchungen vom BAST (2011) wurde eine deutlich niedrigere Belastung mit Cadmium identifiziert. Bei den PAK lag die vorliegende Schadstoffbelastung im Einzugsgebiet im oberen Bereich. Hier liegen die Literaturwerte zwischen 0,0094 mg/kg und 8,986 mg/kg.

Die Gesamtfrachten wurden ermittelt und auf die Flächen bezogen, auf denen die Stäube gesammelt wurden. Bei allen untersuchten Schadstoffen war die Schadstoffbelastung pro Quadratmeter in den Proben der L418 am höchsten und auf dem Parkplatz der BARMER am niedrigsten. Für MKW lagen diese zwischen 7,23 mg/m² und 439 mg/m², für PAK zwischen 0,0152 mg/m² und 2,47 mg/m², für Blei zwischen 0,539 mg/m² und 9,21 mg/m², für Cadmium zwischen 0,00658 mg/m² und 0,348 mg/m², für Zink zwischen 1,38 mg/m² und 225 mg/m² sowie für Zink zwischen 5,30 mg/m² und 373 mg/m².

Durch Analyse der Feststofffraktionen mittel Partikelanalysator wurde festgestellt, dass in den einzelnen Fraktionen nicht nur Normalkorn, sondern auch Fehlkorn vorhanden war. Es wurden mit zwei verschiedenen Methoden korrigierte Massenanteile für die Probe L418 ermittelt, wobei sich der Anteil der Fraktion 500-1000 µm in beiden Fällen deutlich verringerte (von 8,5 % auf 5,8 %-6,7 %). Es konnte die Zunahme des Massenanteils der Fraktion 63-100 µm belegt werden (von 7,9 % auf 13 %-14 %). Ein geringerer Massenanteil wurde für die Partikelfraktion 100-125 µm gefunden, welcher von 6,9 % auf 4,6 %-4,9 % sank.

Mit den korrigierten Massen wurden korrigierte Schadstoffkonzentrationen ermittelt. Bei den Feinfraktionen zeigte sich für alle Schadstoffe ein Anstieg der Konzentration, bei den Grobfraktionen fielen die Konzentrationen dagegen ab. Die Konzentration in der Fraktion <40 µm erhöhte sich für PAK von 5,48 mg/kg auf 5,77-6,05 mg/kg und für Zink von 850 mg/kg auf 902-951 mg/kg. Die Konzentrationen in der Fraktion 500-1000 µm

verringerten sich für PAK von 2,0 mg/kg auf 1,7-1,8 mg/kg und für Zink von 240 mg/kg auf 164-197 mg/kg.

Basierend auf den Schadstoffkonzentrationen und Massenanteilen wurden Schadstofffrachten und korrigierte Schadstofffrachten ermittelt. Für alle Schadstoffe konnte eine deutliche Erhöhung des Frachtanteils für die Fraktionen <40 µm sowie 40-63 µm erkannt werden. Der Anteil der Schadstofffracht der Fraktion <63 µm erhöhte sich bei Betrachtung der Partikel bis 1000 µm für MKW von 24 % auf 65-68 %, für PAK von 22 % auf 54-56 %, für Blei von 21 % auf 49-50 %, für Cadmium von 17 % auf 50-51 %, für Kupfer von 16 % auf 43-45 % und für Zink von 22 % auf 55-57 %.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine deutliche Belastung der Verkehrsflächen vorliegt, welche eine Behandlung unabdingbar macht. Erwartungsgemäß waren die Schadstoffkonzentrationen und –frachten in den Partikelgrößenbereichen <63 µm am größten, so dass bei Behandlungsanlagen speziell ein Fokus auf den Rückhalt der schwer oder nicht sedimentierbaren Partikel gelegt werden sollte.

2.2 Elutionsversuche

Um eine potentielle Belastung des Wassers durch den Kontakt mit Filtermaterialien ausschließen zu können, wurden mit ausgesuchten Filtermaterialien (Walnussschale, Bio-Walnussschale, GEH1, GEH2, Feinkoks, Aktivkohle) Auslaugversuche durchgeführt. Diese sind aussagekräftiger als reine Materialuntersuchungen, da Schadstoffe wie zum Beispiel Schwermetalle gegebenenfalls im Material enthalten sind, aber nicht ausgespült werden. Die Proben wurden auf Schwermetalle (Cu, Zn, Pb, Fe, Hg), organische Substanzen (CSB, MKW) sowie Pestizide (Glyphosat, AMPA, Mecoprop - nur bei Walnuss sowie Bio-Walnuss) analysiert. Auf eine PAK-Analytik wurde verzichtet, da diese im Bericht von Wichern et al. (2017) in keiner Probe nachzuweisen waren. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über alle untersuchten Konzentrationen.

Tabelle 1: Ergebnisse der Elutionsversuche

Parameter	Walnusschale	Bio-Walnusschale	GEH1	GEH2	Feinkoks	Aktivkohle
Kupfer [mg/kg _{TR}]	0,47	0,19	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0
Zink [mg/kg _{TR}]	0,77	<0,10	1,0	11	<0,10	<0,10
Blei [mg/kg _{TR}]	0,05	<0,050	0,10	<0,050	<0,050	<0,050
Eisen [mg/kg _{TR}]	<0,10	<1,1	1032	<100	<100	<0,050
Quecksilber [mg/kg _{TR}]	<0,010	<0,0020	<0,010	<2,0	<2,0	<0,00020
CSB [mg/kg _{TR}]	20600	11000	248	1200	6280	469
MKW [mg/kg _{TR}]	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0
Glyphosat [µg/kg _{TR}]	32	<0,50	/	/	/	/
AMPA [µg/kg _{TR}]	110	<0,50	/	/	/	/
Mecoprop [µg/kg _{TR}]	<1,0	<1,0	/	/	/	/
pH-Wert [-]	4,6	4,6	4,7	8,4	12,5	8,2
LF [µS/cm]	721	355	401	1520	/	263

Die überprüften Materialien eignen sich fast alle für den Einbau in einen großtechnischen Filter. Die einzige Ausnahme bildet die konventionell produzierte Walnuss, welche 32 µg/kg_{TR} Glyphosat sowie 110 µg/kg_{TR} vom Abbauprodukt AMPA freisetzt. Die Bio-Variante hingegen zeigt gute Ergebnisse und bietet die Möglichkeit, in unterschiedlichen Körnungsvarianten die Basis für einen geschichteten Filter zu bilden. Ein Spülen des Materials vor dem Einbau kann die erwartete CSB-Freisetzung reduzieren. Der Vergleich der beiden GEH-Produkte zeigt, dass GEH2 besser für den Einsatz geeignet ist, als GEH1. Die Eisen- und Blei-Emission sind mit < 100 mg/kg_{TR} bzw. < 0,05 mg/kg_{TR} deutlich niedriger und die erhöhte Freisetzung von Zink (11 mg/kg_{TR}) sowie CSB (1200 mg/kg_{TR}) sind akzeptabel. Der Feinkoks sowie die Aktivkohle zeigen beide gute Emissionswerte, wobei der Feinkoks eine erhöhte Konzentration an CSB (6280 mg/kg_{TR}) freisetzt.

2.3 Säulenversuche zur Wirksamkeit bei kurzen Aufenthaltszeiten

2.3.1 Säulenversuche zum Rückhalt von Schwermetallen und PSBM

Ziel der Untersuchungen ist die Identifikation geeigneter Filtermaterialien zum Rückhalt von PSBM. Gleichzeitig wurde der Rückhalt der beiden Leitparameter Kupfer und Zink bestimmt. Diese werden sowohl mit entmineralisiertem Wasser sowie mit realem Regenwasser durchgeführt. Die Säulenversuche sind an die DIBt-Vorschrift zu den „Zulassungsgrundsätzen von Niederschlagsbehandlungsanlagen Teil 1: Anlagen zur dezentralen Behandlung des Abwassers von Kfz-Verkehrsflächen zur anschließenden Versickerung in Boden und Grundwasser“ angelehnt. Zudem wurde die Schweizer Prüfungsvorschrift hinzugezogen, da diese die Prüfung des Rückhalts von Pestiziden mit einbezieht (DIBt, 2015; VSA, 2017). Die Versuche wurden zunächst mit entmineralisiertem Wasser durchgeführt. Anschließend erfolgte eine Auswahl von drei Filtermaterialien, die einzeln sowie im geschichteten Filteraufbau mit realem Regenwasser getestet wurden. Die Untersuchung mit realem Regenwasser hat zum Ziel, herauszufinden, wie groß der Einfluss von konkurrierenden Substanzen ist und ob eine Substratmischung in ihrer Leistungsfähigkeit der erwarteten Leistungsfähigkeit der Einzelsubstrate entspricht.

Die Untersuchungen wurden jeweils mit drei Prüfredenspenden:

- $r_1 = 2,5 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{ha})$
- $r_2 = 6 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{ha})$
- $r_3 = 25 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{ha})$

durchgeführt. Die Konzentrationen der einzelnen Versuche lagen bei 0,72 mg/L (Kupfer), 6,25 mg/L (Zink), 15 µg/L (Glyphosat), 15 µg/L (Mecoprop) und 5 µg/L (Diuron).

Für die Untersuchung mit entmineralisiertem Wasser wurden die in Abbildung 3 dargestellten Rückhalteleistungen ermittelt. Die Substrate wurden jeweils mit einer Schütthöhe von 12 cm in den Versuchsstand eingebracht. Lediglich die FiltaPex-Schüttung wurde mit 18 cm Gesamthöhe eingebaut.

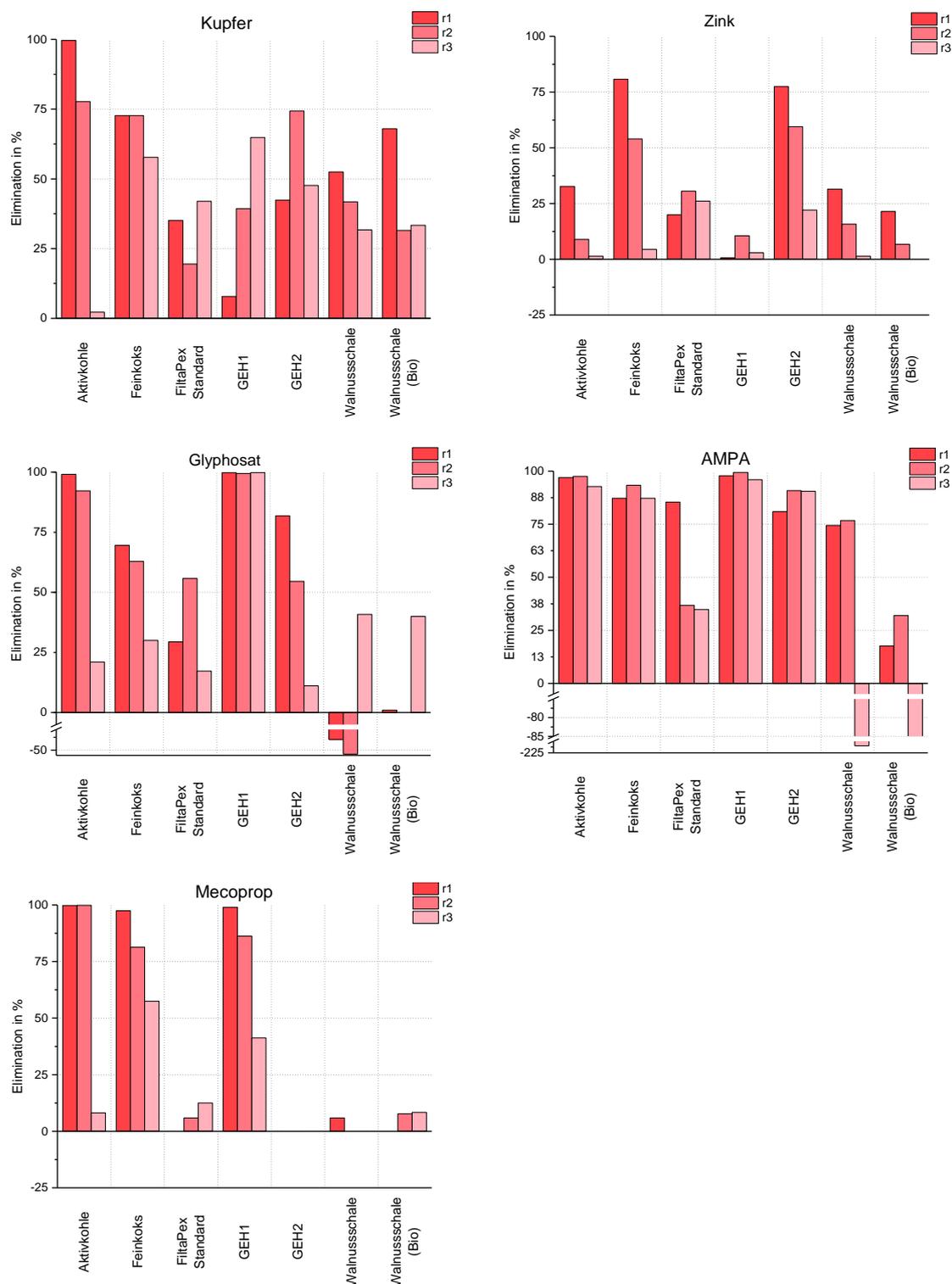


Abbildung 3: Eliminationsraten der untersuchten Filtersubstrate

Weiterhin wurden die Untersuchungen auch mit realem Regenwasser durchgeführt. Hierfür wurden jedoch nur noch die Substrate eingesetzt, welche in Phase II im TRF „Böhler Weg“ zum Einsatz kommen sollen. Entsprechend wurden die Substrate auch in der geplanten Schütthöhe untersucht. Für den Gesamtaufbau wurden 2 cm GEH2, 6 cm

Feinkoks und 8 cm Bio-Walnusschale eingesetzt. Für die Untersuchung der einzelnen Substrate wurde die Schütthöhe jeweils entsprechend des Einzelsubstrats im Gesamtaufbau gewählt (2 cm GEH2, 6 cm Feinkoks, 8 cm Bio-Walnusschale).

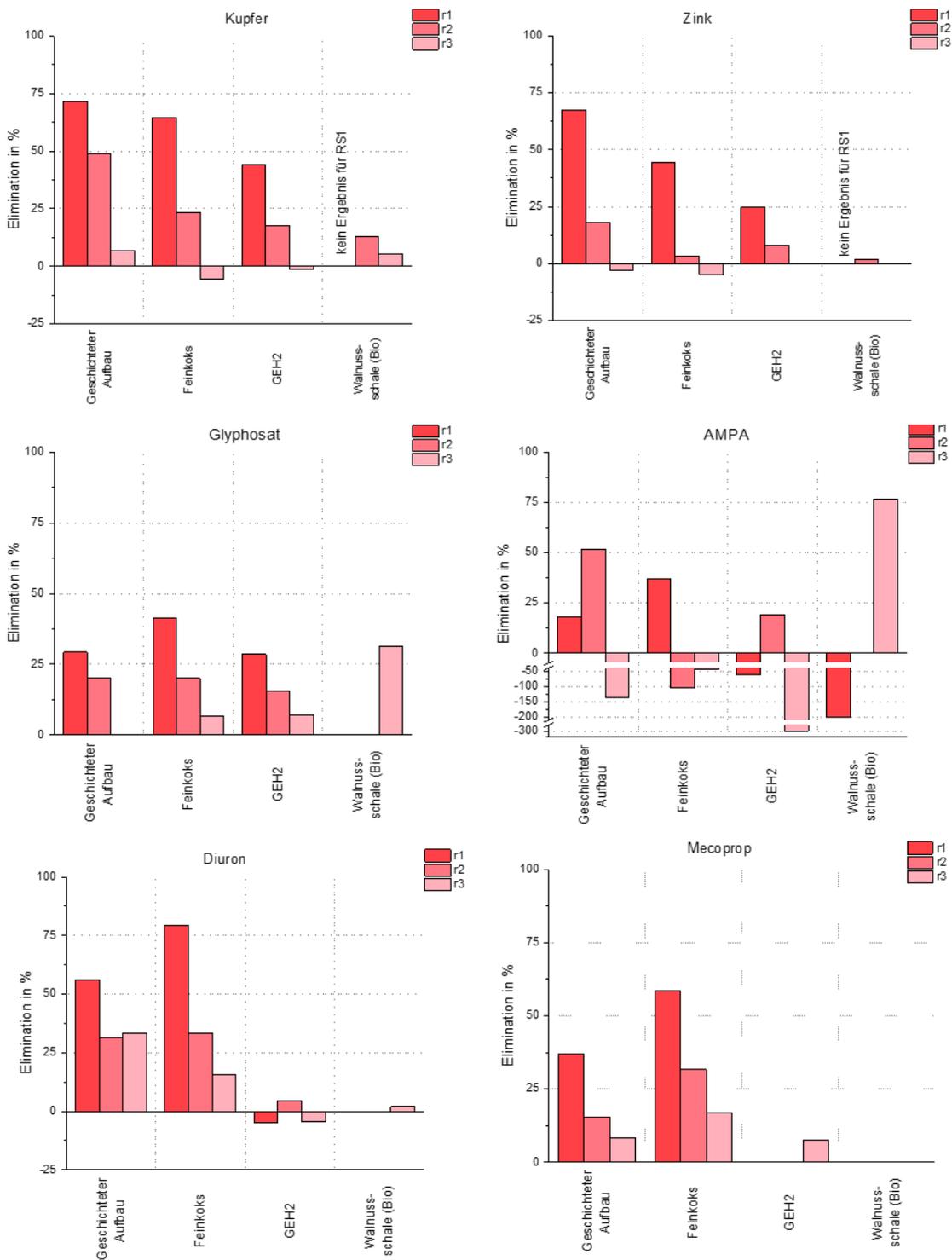


Abbildung 4: Eliminationsraten bei der Untersuchung mit realem Regenwasser

Die Säulenversuche mit entmineralisiertem Wasser zeigten, dass Kupfer mit Aktivkohle am besten zurückgehalten werden konnte (99 % bei 2,5 L/(s·ha)). Feinkoks zeigte Rückhalteleistungen zwischen 57 und 73 %. Mit den GEH-Materialien konnten maximale Eliminationsraten von 74 % erzielt werden und mit den Bio-Walnusschalen 68 %. Zink hingegen ließ sich mit dem Feinkoks (80 % bei 2,5 L/(s·ha)) und dem GEH2 (78 % bei 2,5 L/(s·ha)) am besten zurückhalten. Mit den anderen Filtermaterialien wurden maximale Eliminationsraten von 40 % erreicht. Für den Rückhalt von Glyphosat und Mecoprop stellten sich insbesondere die Aktivkohle sowie das GEH1 als geeignete Filtermaterialien heraus. Mecoprop wurde zudem von dem Feinkoks gut zurückgehalten (max. 97 %). Mit den Walnusschalen sowie den Bio-Walnusschalen konnten keine signifikanten Eliminationsraten hinsichtlich der PSBM erzielt werden. Die Rückhalteversuche zeigten bei der Walnusschale rückgelöste Anteile von 6,7 % bei Kupfer und 55 % bei Zink. Eine Rücklösung von 25 % der aufgetragenen Mecoprop-Fracht konnte beim GEH1 festgestellt werden.

Bei den Versuchen mit Regenwasser konnte mit dem geschichteten Aufbau aus 8 cm Bio-Walnusschale, 2 cm GEH2 und 6 cm Feinkoks der größte Kupfer- und Zinkrückhalt nachgewiesen werden. Kupfer wurde bei der Regenspende mit 2,5 L/(s·ha) zu 72 % zurückgehalten. Für Zink waren es bei der geringsten Regenspende 67 %. Der beste Rückhalt von Glyphosat wurde beim Feinkoks nachgewiesen (41 %). Die Bio-Walnusschale erzielte bei den Regenspenden mit 2,5 L/(s·ha) und 6 L/(s·ha) keinen Rückhalt. Bei der Regenspende mit 25 L/(s·ha) konnte eine Glyphosat-Elimination von 31 % verzeichnet werden. Diuron und Mecoprop konnten mit dem Feinkoks am besten eliminiert werden (max. 70 % für Diuron und 60 % für Mecoprop). Kein Rückhalt für die PSBM konnte hingegen mit dem GEH2 sowie mit den Bio-Walnusschalen erzielt werden.

Es zeigte sich, dass die Rückhalteleistungen gegenüber denen mit entmineralisiertem Wasser bei allen Materialien geringer waren. Die geringeren Rückhalte sind zum einen durch die kleineren Filterschichthöhen zu erklären, die zu geringeren Kontaktzeiten führen und zu einer schnelleren Sättigung der Filtermaterialien. Zum anderen wird angenommen, dass durch die organische Belastung des Regenwassers die Schadstoffe im geringeren Maße als bei den Versuchen mit entmineralisiertem Wasser zurückgehalten werden konnten.

Die Versuche unter Einfluss von Tausalz (10 g/L) wiesen beim geschichteten Aufbau keine erheblichen Rücklösungen bei den Schwermetallen und den PSBM auf. Das Feinkoks sowie das GEH2 nahmen unter Salzeinfluss die Schwermetalle teilweise weiter auf. So konnte beispielsweise 64 % der Zulauffracht von Zink zurückgehalten werden. Beim GEH2 ließen

sich eine Rücklösungen im Bereich von 30 % für Diuron und Mecoprop feststellen. Die Schwermetalle wurden hingegen nicht zurückgelöst. Bei der Bio-Walnuss kam es zu Rücklösungen von Schwermetallen sowie PSBM. Die teilweise beobachteten Rücklösungen von Schwermetallen und PSBM bei den Einzelmaterialien wurden beim geschichteten Aufbau nicht festgestellt, was darauf hindeutet, dass die obenliegenden Materialien GEH2 und Feinkoks diese rückgelösten Stoffe anschließend wieder aufnehmen, sodass keine Schadstoffe im Ablauf quantifizierbar waren.

2.3.2 Säulenversuch mit reduzierten Konzentrationen

Abweichend von dem DIBt-Versuch werden die Konzentrationen in dieser Untersuchung geringer gewählt. Die Konzentration des Adsorptivs hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Adsorptionsleistung. Konzentrationen dieser Größenordnung (insbesondere bei Zink) treten jedoch lediglich in reinen Metalldachabflüssen auf. Die Aufbringung geringerer Konzentrationen soll zu einer besseren Übertragbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich der Kinetik auf die praktische Anwendung führen. Ziel der Untersuchung ist es, herauszufinden, wie groß der Einfluss der Konzentration auf das Behandlungsergebnis ist.

Durchgeführt wurde die Untersuchung mit den Substraten GEH 2, Feinkoks, Aktivkohle und Bio-Walnusschale. Die Prüfung der Substrate erfolgte mit drei Prüfrengspenden von 2,5 L/(s·ha) und 6 L/(s·ha) sowie 15 L/(s·ha) mit demineralisiertem Wasser, welches mit Kupfer und Zink versetzt wurde ($c_{Cu} = 0,5 \text{ mg/l}$, $c_{Zn} = 2,0 \text{ mg/l}$).

Den höchsten Zinkrückhalt konnte GEH2 erreichen. Dieser lag bei der kleinsten Regenspende bei 79 % und reduzierte sich mit zunehmender Regenintensität auf 40 %. Insgesamt konnte über alle drei Regenspenden die Zinkfracht um 58 % reduziert werden. Feinkoks eliminierte 38 %, Aktivkohle 19 % und die Bio-Walnusschale 17 % der aufgebrachten Zinkfracht. Abbildung 5 zeigt den prozentualen Rückhalt für die drei Prüfrengspenden.

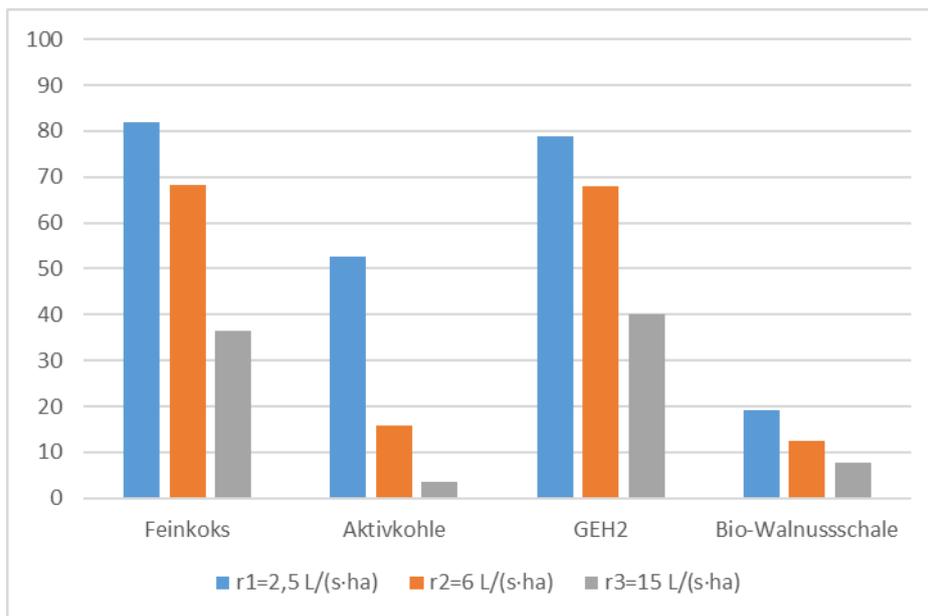


Abbildung 5: Zinkrückhalt im Säulenversuch für drei Regenspenden

Den besten Kupferrückhalt erreichte die Aktivkohle mit 95 % bei der ersten Regenspende und noch 60 % für die dritte Regenspende. Die Gesamtfracht-Reduzierung für Kupfer betrug 74 %. GEH2 konnte noch 60 %, Feinkoks 54 % und die Bio-Walnusschale lediglich 12 % der zugeführten Kupferfracht eliminieren. Die Auswertung für die drei Prüfregenspenden ist in Abbildung 6 dargestellt.

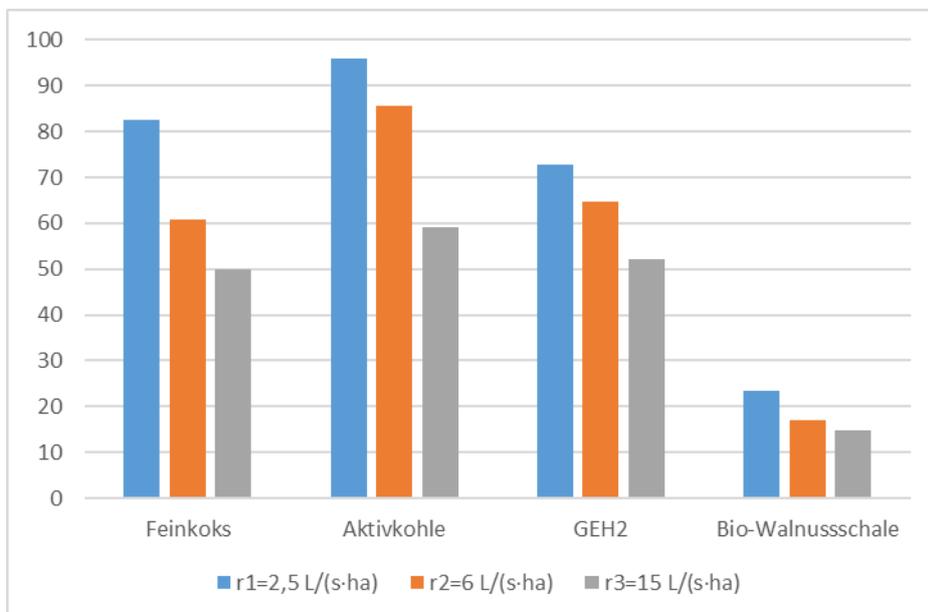


Abbildung 6: Kupferrückhalt im Säulenversuch für drei Regenspenden

Bei der Untersuchung konnte für alle Substrate, wie zu erwarten, eine abnehmende Tendenz des Rückhalts mit zunehmender Regenspende beobachtet werden.

2.3.3 Fazit der Säulenversuche

Die Säulenversuche lassen in Summe den Rückschluss zu, dass trotz der kurzen Aufenthaltszeiten in der Filterschüttung, für jeden untersuchten einzeln betrachteten Schadstoff, mit mindestens einem der getesteten Substrate noch ein ausreichender Rückhalt gewährleistet werden kann. Gleichzeitig gibt es kein Substrat was einen ausreichenden Rückhalt für alle untersuchten Schadstoffe gewährleistet. Die Untersuchungen zeigen, dass die Substrate eine Affinität für einzelne Schadstoffgruppen aufweisen. Eine pauschale Filterausrüstung ohne Betrachtung der vorliegenden Schadstoffe führt somit zwangsläufig immer zu einer ungünstigen Kapazitätsausnutzung und so zu einem ökologisch ungünstigen Betrieb.

Dies führt auch zu der Erkenntnis, dass ein Einschichtfilter für heterogene Einzugsgebiete nicht in Frage kommt. Für die Untersuchungen mit einer Regenspende mit 25 L/(s·ha) zeigt sich ein deutlicher Einbruch der Wirksamkeit. Dieser lässt sich mit der geringen Verweilzeit erklären. Zudem beeinflusst die Vorbeladung der Filtermaterialien und das damit verbundene Erschöpfen der Kapazität die Wirksamkeit. Dieser Einbruch ist aber zunächst nur von untergeordneter Relevanz, da derartige Regenspenden nur einen geringen Anteil am gesamten Niederschlag haben. Ebenso sind bei besonders intensiven Niederschlägen die Konzentrationen, aufgrund der Verdünnung, vergleichsweise gering.

Die Auswirkungen der verschiedenen Untersuchungsbedingungen decken sich nicht vollständig mit den Erwartungen, da grundsätzlich ist von einer abnehmenden Eliminationsrate mit steigender Durchflussgeschwindigkeit auszugehen. Diese Tendenz zeigt sich auch bei der Betrachtung der Ergebnisse. Für einzelne Substrate und einzelne Stoffe konnte dies jedoch nicht immer bestätigt werden. Ein möglicher Grund könnten die noch ungeklärten Konkurrenzen verschiedener Ionen bei der Adsorption sein.

Ein Vergleich der Säulenversuche mit demineralisiertem Wasser untereinander zeigt, dass höhere Konzentrationen auch zu einer besseren prozentualen Eliminationsleistung führen (r_1). Für die Regenspenden r_2 und r_3 ist dieser Rückschluss nicht möglich, da hier bereits der Einfluss der zunehmenden Beladung des Adsorbens zum Tragen kommt und dadurch auch die Kapazität der Substrate einen Einfluss auf den Rückhalt hat.

Die Tatsache, dass die Ergebnisse von Untersuchungen echter Anlagen häufig hinter denen aus dem Labor zurückbleiben, scheint nicht in erster Linie auf das eingesetzte Wasser zurückzuführen zu sein. Grund für die teils sehr schlechten Ergebnisse bei Realanlagen können auch auf die Schwierigkeiten bei der Beprobung von dauereingestauten Systemen sein. Nichts desto trotz wird der Rückhalt gelöster Stoffe bei realem Regenwasser immer

hinter den Ergebnissen mit entmaterialisiertem Wasser zurückbleiben. Dies zeigte sich auch durch die Säulenversuche mit realem Regenwasser. Neben den Konkurrenzen mit anderen Ionen aus dem Regenwasser spielt hierbei die AFS-Fracht eine entscheidende Rolle. Schließlich muss davon ausgegangen werden, dass die Adsorptionskinetik mit zunehmender AFS-Beladung abnimmt, da die Oberflächen der Substrate nicht mehr oder schlechter mit dem Wasser in Kontakt kommen.

2.4 Untersuchungen zum Rückhalt feinpartikulärer Stoffe in der halbtechnischen Versuchsanlage

Die Filtersäule der halbtechnischen Versuchsanlage besteht aus einem 1,5 m hohem Plexiglaszylinder mit einem lichten Durchmesser von 488 mm. Das Substrat ist so in die Säule eingebracht, dass nur eine Hälfte der Querschnittsfläche als Filterfläche genutzt wird. Hieraus ergibt sich eine durchflossene Fläche von 0,0935 m². Die Filterschüttung besteht aus 4 cm Bio-Walnußschale, 6 cm Feinkoks und 2 cm GEH2. Oberhalb der Filterschüttung ist eine 4 cm hohe Japanmatte eingebracht, um den Austrag von Filtermaterial zu verhindern.

Die Filteranlage wird mit gesammelten Dachabflüssen beschickt, welche zuvor mit fraktioniertem Straßenkehricht auf eine AFS-Konzentration von 75 mg/L angereichert wurden. Der Straßenkehricht entspricht mit seiner Sieblinie dem häufig verwendeten Prüfmedium Milisil W4. Die mittlere Korngröße der zugesetzten AFS-Fracht beträgt 63 µm.

Untersucht wurde der korngrößenpezifische AFS-Rückhalt. Dies wurde für Regenspender von etwa 2 L/(s·ha) bis 15 L/(s·ha) durchgeführt. Der Rückhalt durch Sedimentation wurde hierbei getrennt von dem Rückhalt der Gesamtanlage betrachtet, um ein besseres Verständnis von der Wirkweise der Anlage zu erhalten.

In Abbildung 7 ist der Rückhalt durch Sedimentation für die Fraktion AFS63 sowie AFS-Gesamt dargestellt. Der dargestellte Rückhalt ist ohne Berücksichtigung von Verdünnungseffekten. AFS im Wasserkörper unterhalb der Filterschüttung kann in Trockenwetterzeiten vollständig sedimentieren, sodass sich hier eine Klarwasserzone bildet welche in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe zu einer Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades führt.

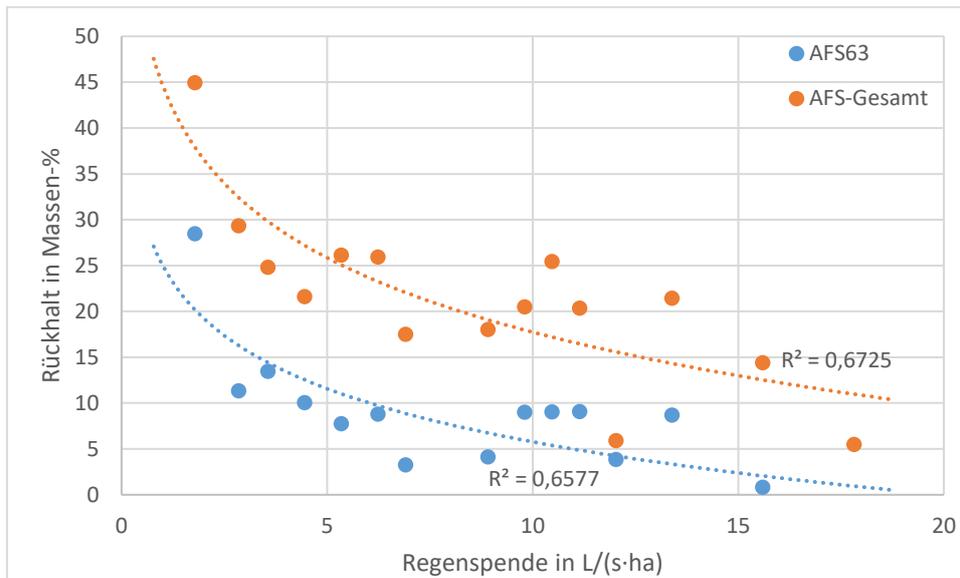


Abbildung 7: Sedimentärer Rückhalt von AFS und AFS63 in Prozent in Abhängigkeit von der Regenintensität (ohne Verdünnungseffekte)

Die Wirksamkeit der Sedimentation ist für die AFS63-Fraktion kaum gegeben. Bereits bei Regenspenden von 5 L/(s·ha) beträgt der Rückhalt nur noch 10 %. Zu einer deutlichen Leistungssteigerung kann das Filterelement beitragen. In Abbildung 8 sind die Rückhalte für die Gesamtanlage, inklusive Filter für die AFS63-Fraktion und AFS-Gesamt dargestellt.

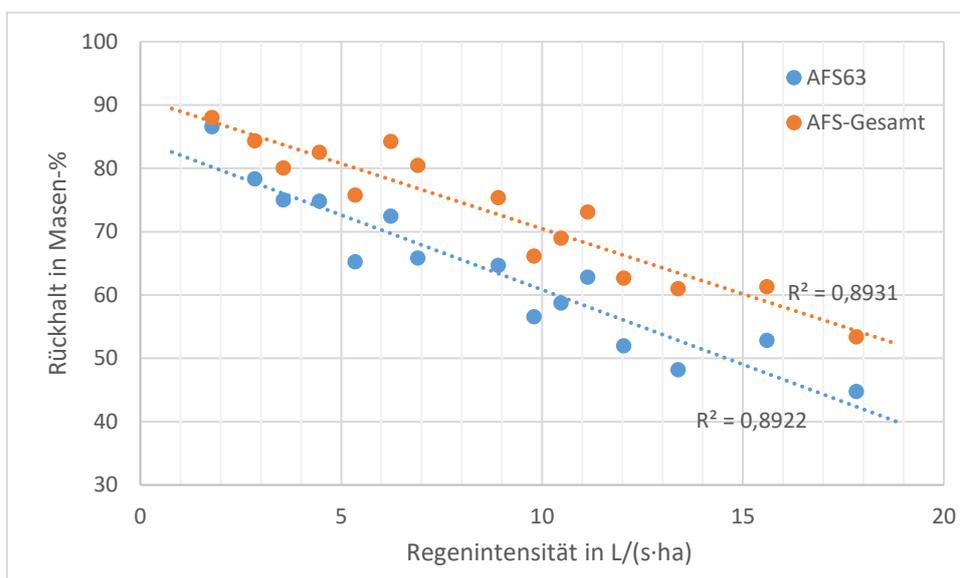


Abbildung 8: AFS-Rückhalte in der halbtechnischen Versuchsanlage in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität ohne Verdünnungseffekte

Auch für die maximal behandlungspflichtige Niederschlagsintensität von 15 L/(s·ha) wurden etwa 53 % AFS63 zurückgehalten und für AFS-Gesamt 61 %. Diese Rückhalte können als Mindestrückhalte für das getestete Filtersystem verstanden werden. Für

mittlere Regenspenden von 3-5 L/(s·ha) wird AFS63 zu 75 bis 80 % zurückgehalten. Für AFS-Gesamt liegt die Reinigungsleistung bei 80 bis 85 %.

2.5 Biologische Prozesse im Filter

2.5.1 Sauerstoffzehrung in der Filterschüttung

Zur Überprüfung der Sauerstoffverhältnisse in Trockenwetterphasen wurde eine Sauerstoffsonde direkt in die Filterschüttung eingebaut. Mit dieser wurde die Sauerstoffkonzentration kontinuierlich aufgezeichnet. Die Messung zeigte eine deutliche Sauerstoffzehrung, welche unmittelbar im Anschluss an ein Regenereignis erfolgt. Bis zur vollständigen Zehrung des Sauerstoffs vergehen etwa fünf Stunden. Abbildung 9 zeigt die Sauerstoffkonzentration an einem Tag mit zwei Regenereignissen.

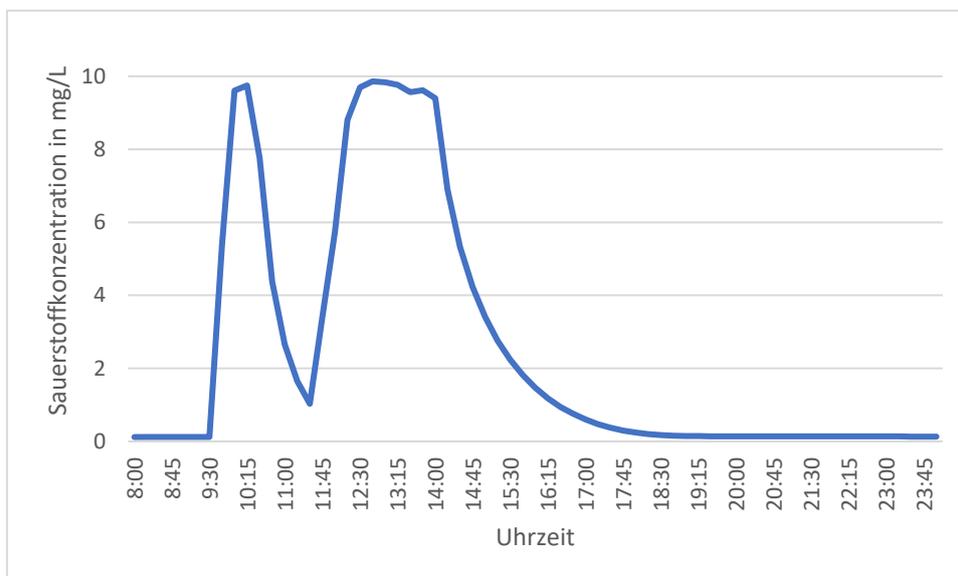


Abbildung 9: Verlauf der Sauerstoffkonzentration in der Filterschüttung an einem Tag mit zwei Regenereignissen

Die Messung der Sauerstoffkonzentration im eingestauten Wasser vor der Filterschüttung hat gezeigt, dass diese von der Zehrung nicht betroffen ist. Hier lagen stets aerobe Verhältnisse vor. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass nur unmittelbar innerhalb der Filterschüttung anaerobe Verhältnisse entstehen. Bei permanenten Fremdwasserzufluss muss davon ausgegangen werden, dass auch innerhalb der Filterschüttung Sauerstoff vorhanden ist.

2.5.2 Wirkung biologischer Prozesse im Filter auf Adsorption und Desorption von Schwermetallen und PSBM

Zur Untersuchung, ob es im Trockenwetterfall bei eingestauten Filtern zu biologischen Prozessen kommt und welchen Einfluss der Zustand auf die an den Filtermaterialien adsorbierten Schwermetalle hat, wurden Batch-Versuche durchgeführt. Dazu wurden drei unterschiedliche Filtermaterialien aus dem TRF Fleute in Wuppertal entnommen und gemischt mit Regenwasser sowohl aeroben als auch anaeroben Bedingungen ausgesetzt. Die Untersuchungen erfolgten für Blei, Kupfer und Zink in der Flüssig- sowie der Feststoffphase.

Die Ergebnisse der Batch-Versuche zeigten, dass unter aeroben Bedingungen die Kupferfracht an den drei unterschiedlichen Filtermaterialien abnahm. Gleichzeitig konnte in der flüssigen Phase ein Anstieg von Kupfer festgestellt werden. Daher ist davon auszugehen, dass es unter aeroben Milieubedingungen bei Kupfer zu einer Rücklösung von der Feststoffphase kann. Hingegen wurde unter anaeroben Bedingungen gelöstes Kupfer weiter an der Feststoffphase adsorbiert. Für Blei zeigte sich unter anaeroben Bedingungen einer Desorption von der Feststoffphase. Die Untersuchungen zur Sauerstoffzehrung an der halbertechnischen Versuchsanlage weisen darauf hin, dass der Sauerstoff in der Filterschüttung der Versuchsanlage innerhalb weniger Stunden gezehrt wurde und anaerobe Milieubedingungen vorherrschten. Für die Übertragung der Batch-Ergebnisse auf einen TRF bedeuten die Ergebnisse, dass eine Rücklösung von Blei von den Filtermaterialien möglich ist, was zu einer negativen Bilanz von einzelnen Regenereignissen führen kann. Gleichzeitig muss aber darauf hingewiesen werden, dass das Vorgehen bei der Untersuchung nicht den Betriebsbedingungen eines Filters entspricht und die Übertragbarkeit daher eingeschränkt ist. Schon die notwendige Entnahme des Substrates aus dem Filter führt zu einer Beeinträchtigung der Ergebnisse.

3 Bemessungsgrundlagen technischer Regenwasserfilteranlagen

Die Bemessungskriterien technischer Regenwasserfilter unterliegen einer großen Spannbreite. Die Entwicklungen sind herstellerepezifisch. Dabei setzt jeder Hersteller eigene Maßstäbe hinsichtlich der angestrebten Standzeit oder dem Behandlungsziel.

Feststoffe im Regenwasserabfluss sind der limitierende Faktor für die Leistungsfähigkeit eines Filters, da sie mit der Zeit zur Kolmation des Filters führen. Die Erschöpfung des

Filtermaterials für den Rückhalt gelöster Stoffe im Regenwasser oder der „Verbrauch“ von Filtermaterial, z.B. durch „Auflösung“ sind hingegen i.d.R. nicht maßgebend.

Die Beobachtungen zeigen, dass es bei Filteranlagen mit von unten nach oben beschickten Filtern und vorgeschalteter Sedimentation neben der Kolmation auch Regenerationseffekte gibt, die entgegengesetzt verlaufen. Bislang waren solche Effekte nicht bekannt. Regenerationseffekte von technischen Filteranlagen können ggf. von maßgebender Bedeutung für die Dimensionierung sowie den Anlagenbetrieb sein. Bei den untersuchten Anlagen hatten sie z.T. maßgebenden Einfluss auf die Filterstandzeit. Wenn eine gesicherte Regeneration im Betrieb möglich wäre, könnten dadurch Vorteile für den Anlagenbetrieb und die dadurch verursachten Kosten entstehen. Bislang sind die Erkenntnisse für belastbare Aussagen unzureichend. Ohne entsprechende Aussagen ist es jedoch nicht möglich, die Veränderung des Durchlässigkeitsbeiwertes von Filteranlagen zu prognostizieren. Dieses wäre aber zwingende Voraussetzung für einen belastbaren Bemessungsansatz.

Eine detaillierte Untersuchung der festgestellten Regenerationseffekte und möglicher Ursachen sowie Einflussfaktoren dazu war im Rahmen dieses Vorhabens nicht möglich. Es können zu diesem Zeitpunkt nur Annahmen getroffen werden, die in Zukunft im Betrieb weiter beobachtet und durch gezielte Untersuchungen überprüft werden.

Grundsätzlich sind für die weitere Untersuchung von Regenerationseffekten in Filteranlagen zunächst mehr Messdaten erforderlich, die fortlaufend im Betrieb einiger Anlagen erhoben werden. Unter Berücksichtigung dieser Daten sollten spezifische Untersuchungen durchgeführt werden, um die Annahmen (biologische, chemische oder mechanische Regeneration) bestätigen oder widerlegen zu können.

Eine regelmäßige labortechnische Untersuchung des Filtermaterials auf die Bildung und Veränderung eines Biofilms in technischen Filteranlagen kann durch eine Gegenüberstellung mit dem k_f -Wert Aufschluss über eine mögliche biologische Regeneration liefern.

Für die weitere Untersuchung einer möglichen mechanischen Regeneration können weitere Anlagen beobachtet und ein Vergleich von Anlagen unter Rückstau mit rückstaufreien Anlagen hergestellt werden. Für die nächste Projektphase gibt es außerdem Überlegungen zu einem planmäßigen Trockenfallenlassen eines Filters mit dem Ziel der Regeneration.

Erst wenn entsprechende Zusammenhänge geklärt sind, kann ein Prognosemodell für die Filterdurchlässigkeit von Anlagen zur Niederschlagswasserbehandlung aufgestellt werden, welches wiederum die Grundlage für ein belastbares Bemessungsverfahren bildet.

Die existierende Planung der Großfilteranlage Böhler Weg, die in der zweiten Projektphase untersucht werden soll, kann durch die Erkenntnisse aus der aktuellen Projektphase als geeignet bestätigt werden. Für eine optimale Sedimentation werden unterhalb der Filterflächen Lamellenschrägklärer installiert, wodurch die Filterstandzeit optimiert werden soll. Die Filterfläche von 20,1 m² für eine direkt angeschlossene befestigte Fläche von ca. 7,68 ha ($A_{\text{Filter, spez.}} = 2,62 \text{ m}^2/\text{ha}$) wurde zunächst unabhängig von der Wirkung des Lamellenklärers ausgelegt. Dabei wurde auch berücksichtigt, dass für eine zusätzliche befestigte Fläche von rd. 3,8 ha bei Regenspenden $> 15 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{ha})$ eine Überleitung in das Einzugsgebiet des Filters erfolgt. Durch die gezielte Drosselung des Filterzuflusses auf den kritischen Regenabfluss wird durch die Überleitung allerdings nur eine geringe zusätzliche Filterbelastung (bei ungleichmäßiger Überregnung des Gesamteinzugsgebietes) erwartet.

4 Ausblick

Die intensive Untersuchung der Verschmutzung von Oberflächenabflüssen hat gezeigt, dass hier erheblicher Handlungsbedarf zum Schutz der aquatischen Ökosysteme besteht. Nicht selten liegen Verschmutzungen vor, die durch reine Sedimentationsanlagen nicht zurückgehalten werden können. Mit Filtersystemen kann der Wirkungsgrad deutlich verbessert werden. Dies gelingt nicht nur für AFS63, sondern auch für Stoffe die in gelöster Form vorliegen. Das Erreichen der Zielvorgaben der EG-Wasserrahmenrichtlinie, aber auch der Einfluss immer besserer Analysemethoden erfordern effizientere Regenwasserbehandlungsanlagen. Technische Regenwasserfilter bilden dabei eine maßgebliche Ergänzung.

Zu Konkurrenzen von verschiedenen Ionen bei der Beladung von Filtersubstraten lagen auch nach den vorgestellten Untersuchungen keine Ergebnisse vor, die valide Aussagen zulassen. Es konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass es biologische Prozesse in relevantem Umfang in Filtern gibt. Unter welchen Umständen diese einen positiven oder negativen Effekt auf die Wirksamkeit oder Standzeit der Anlagen hat, ist noch nicht abschließend geklärt. Letztlich wird für die biologischen Prozesse auch das eingesetzte Substrat relevant sein, genauso wie die im Einzugsgebiet anfallenden Frachten sowie die unterschiedlichen Milieubedingungen.

In Phase II des Projektes soll das Filterbauwerk „Böhler Weg“ errichtet werden. In dem Filterbauwerk sollen die Oberflächenabflüsse aus einem Gebiet mit 11,4 ha abflusswirksamer Fläche behandelt werden. Hiervon sind 1,9 ha der Kategorie III zuzuordnen. In die Realisierung sollen Erkenntnisse aus dem vorliegenden Projektbericht mit einfließen. Gleichzeitig können in der zweiten Phase wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, welche die Ergebnisse aus dem vorliegenden Projektbericht konkretisieren.

Besonders wichtig sind hierbei die Daten aus einer kontinuierlichen Messung des Zu- und Ablaufs des Filters. In der zweiten Phase sollen durch großvolumige Probenahmen und kontinuierliche Trübungsmessung bestehende Ergebnisse gestützt werden.

Die kontinuierliche Messung mit Sonden hilft maßgeblich bei der Bilanzierung der Wirksamkeit. So können die beobachteten Regenerationseffekte (sich verbessernde Durchlässigkeit mit zunehmender Standzeit) aktuell auf biologische Prozesse (z.B. Verstoffwechslung), Setzungsprozesse in der Filterschüttung oder auf einen anteiligen Austrag bei Regenereignissen zurück zu führen sein. Ohne kontinuierliche Messdaten sind diese Annahmen aber nicht eindeutig belegt. Durch stichprobengestützte Bilanzierungen ist eine Abgrenzung nicht möglich. Die Dynamik eines Regenereignisses lässt eine Vergleichbarkeit des zeitlich veränderlichen Zu- und Ablaufs nicht zu.

Aus Phase II wird erwartet, den Ein- und Austrag von Stoffen während eines Regenereignisses und während eines Betriebszeitraumes nachvollziehen zu können. Die Untersuchungsergebnisse zur Rücklösung unter aeroben und anaeroben Bedingungen zeigen, dass biologische Prozesse in der Filterschüttung stattfinden. Durch den In-Situ-Einsatz von speziellen Filtersäulen wird der Einfluss der Entnahme auf die Untersuchung deutlich reduziert, sodass hier mit einer Konkretisierung der Ergebnisse gerechnet werden kann.

Die Ausrüstung des geplanten Filters war basierend auf den Ergebnissen der Phase I mit den Substraten GEH2, Feinkoks und Bio-Walnußschalen vorgesehen. Die labortechnischen Untersuchungen an den Einzelsubstraten haben gezeigt, dass insgesamt das vollständige Spektrum der untersuchten Schadstoffe zurückgehalten werden kann. Allerdings ergaben sich für PSBM aus den Versuchen mit der geschichteten Kombination der Filtersubstrate geringere Rückhalteraten als bei den Einzelsubstraten. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass es bei Mehrschichtfiltern zu Wechselwirkungen zwischen den Filtersubstraten kommen kann. In dem vorliegenden Fall kam es möglicherweise in der Stüttschicht aus Bio-Walnußschalen zur Rücklösung von Stoffen, die die Adsorption der PSBM an das darüber angeordnete Feinkoks verhinderten (Konkurrenzsituation). Vor Einsatz der Bio-

Walnussschalen als Stüttschicht in großtechnischen TRF sollten weitere Untersuchungen erfolgen oder über ein alternatives Material nachgedacht werden.

Aussagen zur Standzeit und Schütthöhe können zu diesem Zeitpunkt jedoch nicht getroffen werden, da unklar ist in welchem Maße welcher Schadstoff limitierend für die Standzeit ist. Mit den Ergebnissen zum Rückhalt aus den Säulenversuchen (durch Berücksichtigung der spezifischen Affinitäten) wird es aber möglich sein, die Filterschüttung hinsichtlich des limitierenden Faktors kurzfristig zu optimieren.

Ein besonderer Vorteil der technischen Filteranlagen ist deren Flexibilität. Das Filtermaterial kann im Verlauf des Betriebs ausgetauscht und ggf. optimiert werden. Weitergehende Kenntnisse zur Konstruktion und Bemessung von großtechnischen Filtern werden im Rahmen der Phase II des Projektes gewonnen.

Literaturverzeichnis

BASt, Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen (2011): Stoffeintrag in Straßenrandböden Messzeitraum 2008/2009, Heft V 209

Bihs H.-J., Sommer U. und Kiesewetter L. (2015) Entwicklung eines Filterklärbeckens (FKB) zur zentralen Behandlung von belastetem Niederschlagswasser. Bericht zum Forschungsvorhaben der Wirtschaftsbetriebe Hagen, Hagen, Dezember 2015

DIBt (2015) Zulassungsgrundsätze Niederschlagswasserbehandlungsanlagen, Deutsches Institut für Bautechnik.

Grüning, H.; Schmitz, T.; Schmidt, C.; Pecher, K. H.; Giga, A.; Raith, K. I.; Massing, C.; Gigl, T.; Kalz, M. (2017) Regenwasserbehandlung in einer Großfilteranlage im Einzugsgebiet „In der Fleute“. Projektbericht zum Pilotvorhaben, Auftraggeber: Stadt Wuppertal, gefördert durch das MKUNLV Nordrhein-Westfalen, 2017

VSA (2017) Leistungsprüfung für technische Adsorbentmaterialien und dezentrale technische Anlagen zur Behandlung von Niederschlagswasser. Entwurf in Vernehmlassung.

Wichern, M., Pecher, K.H., Helmreiche, B., Vesting, A., Heinz, E., Giga, A., Wolke, M., Huber, M., Li, Y. (2017) Reduktion von Kohlenwasserstoff und anderen organischen Spurenstoffen durch ein dezentrales Behandlungssystem für Verkehrsflächenabflüsse, gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW. Abschlussbericht Projektphase II.