

**Untersuchungs- und Entwicklungsvorhaben
im Bereich Abwasser zum Themenschwerpunkt
Niederschlagswasserbeseitigung**

Vergabe-Nr. 08/058.2

Kurzbericht

Reduktion von Kohlenwasserstoffen und anderen
organischen Spurenstoffen durch ein dezentrales
Behandlungssystem für Verkehrsflächenabflüsse

Gefördert durch das

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft,
Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen



Wissenschaftlich begleitet durch das

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



März 2017

Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. habil. Marc Wichern (Ruhr-Universität Bochum)

Dr.-Ing. Klaus Hans Pecher (Dr. Pecher AG)

Prof. Dr. rer. nat. habil. Brigitte Helmreich (Technische Universität München)

Projektbearbeitung

Dipl.-Ing. Andreas Vesting (Ruhr-Universität Bochum)

Dr. rer. nat. Eva Heinz (Ruhr-Universität Bochum)

Dipl.-Ing. Andreas Giga (Dr. Pecher AG)

Marcel Wolke, B. Eng. (Dr. Pecher AG)

Dr.-Ing. Maximilian Huber (Technische Universität München)

Dr.-Ing. Yang Li (Technische Universität München)



Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Zielsetzung	1
2	Stand des Wissens.....	2
3	Laborversuche	3
4	Feldversuche.....	5
4.1	Aufbau und Wirkungsweise des FiltaPex-Systems	5
4.2	In-situ Untersuchungen.....	7
4.3	Feldsäulenversuche.....	12
4.4	Herausforderung Probenahme im Feld	13
5.	Dimensionierung und Betrieb	14
6.	Erweiterung der Zulassungsgrundsätze	17
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	19
	Literatur	22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schadstoffrückhalt der konzipierten Materialkombination (Variante B+).....	4
Abbildung 2: Schadstoffrückhalt der konzipierten Materialkombination (Variante B+RW) – Zulauf mit realer Zusammensetzung von Verkehrsflächenabflüssen.	5
Abbildung 3: FiltaPex Standard mit den wesentlichen Funktionselementen.	6
Abbildung 4: Aufbau des Standard Filterelementes (links) und Aufbau des modifizierten Filters (rechts).....	6
Abbildung 5: Beitrag der einzelnen Kornfraktionen zum Schadstoffgehalt der Schachtsedimente.	10
Abbildung 6: Spezifischer Rückhalt an Feststoffen je Filterschicht am Standort Wuppertal.	10
Abbildung 7: Gegenüberstellung des MKW-Gehaltes (links) und des PAK-Gehaltes (rechts) der gespülten und ungespülten Filtermaterialien sowie der Materialien im neuen Zustand, Standort Wuppertal.	11
Abbildung 8: Gegenüberstellung des Kupfer-Gehaltes (links) und des Zink-Gehaltes (rechts) der gespülten und ungespülten Filtermaterialien sowie der Materialien im neuen Zustand, Standort Wuppertal.	12
Abbildung 9: Messdaten des Regenereignisses vom 08.07.2015 am Standort Mönchengladbach (3 l/s Startwert).	14
Abbildung 10: Wechselwirkungen der Dimensionierung dezentraler Behandlungssysteme..	15
Abbildung 11: Einflussfaktoren auf die Dimensionierung und den Betrieb dezentraler Systeme [Vesting, 2017].....	15
Abbildung 12: Partikelgrößenverteilung der untersuchten Materialien im Vergleich mit verschiedenen Feststoffproben im Zulauf (links), Prozentual abgesetztes Volumen in Abhängigkeit der Zeit (rechts).	18

Tabellenverzeichnisverzeichnis

Tabelle 1: Typische Verunreinigungen in Niederschlagsabflüssen befestigter Verkehrsflächen [Helmreich, 2010; Huber, 2016].....	2
Tabelle 2: Stofffrachten der Teilströme und Rückhalt des FiltaPex-Systems unter Einbeziehung der Ergebnisse der Schlammspiegelmessung und der Feldsäulenergebnisse, Standort Mönchengladbach (* Anteil in % bezogen auf die jeweilige Fracht im System).	9
Tabelle 3: Übersicht von Einflussfaktoren des Betriebs auf ein Filtersystem – erweitert nach [DWA, 2013; Welker und Huber, 2014].	16

Abkürzungsverzeichnisverzeichnis

A _{e,b}	Spezifische Anschlussfläche
A _F	Filterfläche
AFS	Abfiltrierbare Stoffe
AFS _{fein}	Abfiltrierbare Stoffe < 63 µm
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
DOC	Dissolved Organic Carbon, gelöster organischer Kohlenstoff
EMC	Event Mean Concentration, frachtgemittelte Ereigniskonzentration
ETBE	Ethy- <i>tert</i> -butylether
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
MKULNV	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
MTBE	Methy- <i>tert</i> -butylether
PAK	Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PIA	Prüfinstitut für Abwassertechnik GmbH (PIA GmbH), Aachen
PSBM	Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel
RKB	Regenklärbecken

1 Veranlassung und Zielsetzung

Projektveranlassung

Durch den Runderlass des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz vom 26.05.2004 [MUNLV, 2004] werden in Abhängigkeit von der Schadstoffbelastung der Einzugsgebietsflächen die Anforderungen an die Niederschlagswasserbehandlung im Trennsystem geregelt. Mit zunehmenden Erkenntnissen über die Eintragspfade umweltrelevanter Schmutzstoffe aus niederschlagsbedingten Oberflächenabflüssen steigen auch die Anforderungen an die Niederschlagswasserbehandlung. Weitere bisher nur wenig beachtete Stoffe oder Stoffgruppen rücken in den Fokus. Der Einsatz bisher genutzter zentraler Behandlungssysteme kommt aufgrund der Art des Behandlungsverfahrens (z. B. Sedimentation) oder bei mangelnder Platzverfügbarkeit in vielen Fällen an Grenzen, sodass immer häufiger alternative Reinigungssysteme (z. B. dezentrale Behandlungssysteme) eingesetzt werden. Diese meist mehrstufigen Behandlungsanlagen setzen sich in der Regel aus den Funktionselementen einer mechanisch-physikalischen Reinigungsstufe (z.B. Sedimentation) mit anschließender chemisch-physikalischer Reinigungsstufe (Filtration, Ionenaustausch, Adsorption, Fällung, etc.) zusammen. Hinsichtlich Wahl der Filtrationsmaterialien und der daraus resultierenden Wirkungsmechanismen ergeben sich wesentliche Unterschiede bei den verschiedenen dezentralen Behandlungsanlagen.

Zielsetzung

Es sind bereits zahlreiche dezentrale Behandlungsanlagen für Verkehrsflächenabflüsse bis zur Marktreife entwickelt worden [Huber et al., 2015a] und befinden sich derzeit im Einsatz, jedoch legen diese Behandlungsanlagen ihren Hauptfokus auf die Abtrennung partikulärer Stoffe sowie einige auf den zusätzlichen Rückhalt gelöster Schwermetalle. Nicht untersucht worden ist bisher der Rückhalt gelöster organischer Stoffe, wie Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) sowie Methyl-*tert*-butylether (MTBE) bzw. Ethyl-*tert*-butylether (ETBE), die ebenso in Verkehrsflächenabflüssen gefunden werden.

Gesamtziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines Verfahrens zur Reduktion von Kohlenwasserstoffen und anderen organischen Spurenstoffen aus Verkehrsflächenabflüssen im großtechnischen Maßstab. In Laborversuchen sollten die grundlagenorientierten Mechanismen der Elimination der organischen Schadstoffe geklärt werden. Materialien bzw. Materialgemische wurden hinsichtlich ihrer Rückhaltekapazität für organische Stoffe untersucht. Basierend auf den Ergebnissen der Untersuchung der Laborversuche zum Rückhalt organischer Spurenstoffe durch verschiedene Sorptionsmaterialien wurde ein Filtermodul in Pilotanlagen eingebaut. Die großtechnische Praxiserprobung der Regenwasserbehandlungsanlage FiltaPex sollte an zwei Standorten und für unterschiedlich belastete Oberflächenabflüsse erfolgen.

2 Stand des Wissens

Die Niederschlagsabflüsse von Verkehrsflächen sind aufgrund von Emissionen von Fahrzeugen, von atmosphärischen Verunreinigungen und anderen Quellen neben Schwermetallen (u. a. Kupfer und Zink) auch mit einer Reihe an organischen Stoffen (PAK, MKW, MTBE, ETBE) verunreinigt (Tabelle 1). Die Schadstoffe liegen dabei zum Teil in gelöster und zum Teil in partikulär gebundener Form vor.

Tabelle 1: Typische Verunreinigungen in Niederschlagsabflüssen befestigter Verkehrsflächen [Helmreich, 2010; Huber, 2016].

Stoff	Stoffquellen
Anorganische Stoffe	
Blei (Pb)	Abgas, Auftausalze, Fahrbahnabrieb
Cadmium (Cd)	Auftausalze, Reifenabrieb, Korrosionsverluste von Kfz
Calcium (Ca)	Auftausalze, Fahrbahnabrieb
Chlorid (Cl)	Auftausalze
Chrom (Cr)	Abrieb von Bremsbelägen, Reifenabrieb
Kupfer (Cu)	Abgase, Abrieb von Bremsbelägen, Auftausalze, Korrosionsverluste von Kfz, Reifenabrieb
Magnesium (Mg)	Auftausalze
Mangan (Mn)	Abgase, Abrieb von Bremsbelägen, bewegliche Bestandteile von Motoren
Natrium (Na)	Auftausalze
Nickel (Ni)	Abrieb von Bremsbelägen, Fahrbahnabrieb, Katalysatoren, Korrosionsverluste von Kfz
Palladium (Pd)	Katalysatoren
Platin (Pt)	Katalysatoren
Rhodium (Rh)	Katalysatoren
Zink (Zn)	Abgase, Abrieb von Bremsbelägen, Auftausalze, Korrosionsverluste von Kfz, Reifenabrieb, Verkehrsschilder und Leitplanken
Organische Stoffe	
Methyl- <i>tert</i> -butylether (MTBE), Ethyl- <i>tert</i> -butylether (ETBE)	Abgase, Tropfverluste von Kraftstoffen
Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)	Abgase, Kraftstoffen und Frostschutzmitteln, Tropfverluste von Motorölen, Verdampfungsverluste
Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel (PSBM)	Verfrachtung von landwirtschaftlichen Flächen sowie Wohn- und Gewerbeflächen
Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	Abgase, Fahrbahnabrieb, Reifenabrieb

Als organische Belastung ist vor allem mit PAK aus unvollständigen Verbrennungen im Motor und aus Asphaltrückständen zu rechnen [Crabtree et al., 2006; Mahler et al., 2010; Ichiki et al., 2008; Zhang et al., 2013]. Aus Tropfverlusten von Kraftfahrzeugen und Tankleckagen stammen MKW. MKW in Verkehrsflächenabflüssen treten besonders bei Flächen mit ruhendem Verkehr auf [Dierkes et al., 2006; Revitt et al., 2014; Welker und Harting, 2007].

Des Weiteren sind MTBE und ETBE, die zur Erhöhung der Klopfestigkeit in Ottomotoren zugegeben werden, als mögliche organische Spurenstoffe in Verkehrsflächenabflüssen wiederzufinden [Brauch und Baus, 2007; Langbein et al., 2006]. Sie können insbesondere durch Tankleckagen oder Unfälle in Straßenabflüsse gelangen.

In NRW schreibt der Trennerlass von Mai 2004 [MUNLV, 2004] die Behandlung von Oberflächenabflüssen in Abhängigkeit von der Flächennutzung (Kategorie I bis III) vor. Bei den für die Behandlung von Niederschlagsabflüssen infrage kommenden Verfahren wird zwischen zentralen und dezentralen Anlagen unterschieden. Als vorrangig angewandte zentrale Behandlungsanlagen werden in dem Runderlass Regenklärbecken ohne Dauerstau, Regenklärbecken mit Dauerstau sowie Bodenfilter aufgeführt.

Gemäß Trennerlass sind für die Behandlung des Niederschlagswassers bevorzugt dezentrale Anlagen anzuwenden. Da bislang keine rechtlich verbindlichen Zielgrößen und Anforderungen an die Einleitung von Niederschlagsabflüssen in Oberflächengewässer bestehen, ist Voraussetzung für den genehmigungsfähigen Einsatz dezentraler Anlagen für das anschließende Einleiten in Oberflächengewässer allerdings, dass hinsichtlich Schadstoffrückhalt und dauerhaftem Betrieb eine Vergleichbarkeit zu den zentralen Behandlungsverfahren – mindestens zu einem Regenklärbecken – vorliegt.

Hinsichtlich der Einleitung in das Grundwasser werden häufig die Prüfwerte der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung [BBodSchV, 1999] angewendet.

3 Laborversuche

In den Laborversuchen wurden verschiedene Materialien auf ihre potentielle Eignung, gelöste organische Spurenstoffe aus Niederschlagsabflüssen zu entfernen, untersucht. In der ersten Phase wurden mittels Schüttelversuchen die Adsorptionskapazitäten und die Adsorptionsgeschwindigkeiten verschiedener Materialien zum Rückhalt von PAK, MKW und MTBE bestimmt. Hierbei erzielten die drei Materialien Braunkohlekoks (Korngröße 1,25–5 mm), Aktivkohle F300 (Korngröße 0,5 - 2,5 mm) sowie Sorp2 (Mischung aus Aluminiumoxid und Porenbeton; Korngröße 0,5 - 2,5 mm) die besten Ergebnisse sowohl hinsichtlich der Kapazität (Standzeitbetrachtung) als hinsichtlich der Kinetik (hohe Filtergeschwindigkeiten) je nach betrachteter Substanz.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Schüttelversuche wurden umfangreiche Säulenversuche durchgeführt, um die Kapazität der drei identifizierten Materialien für organische Stoffe unter realitätsnäheren Bedingungen zu ermitteln mit dem Ziel, eine optimale Materialmischung für den Einsatz im Rahmen des Feldmonitorings zu bestimmen. Zusätzlich wurde der Rückhalt der beiden Leitparameter Zink und Kupfer bestimmt sowie das Verhalten der zurückgehaltenen Schadstoffe unter Simulierung eines Auftausalzeinsatzes ermittelt. Dabei wurden verschiedene Regenspenden (2,5 l/(s·ha), 6,0 l/(s·ha), 15 l/(s·ha), 25 l/(s·ha)) verwendet, um den Rückhalt in Abhängigkeit von der Kontaktzeit zu bestimmen. Als effektivster Filteraufbau erwies sich bei den Laborversuchen eine Kombination aus der verwendeten Materialkombination Sorp2 ergänzt mit je einer Schicht Braunkohlekoks und Aktivkohle F300. Um eine entsprechende Kontaktzeit im System zu erreichen, wurde die Filterhöhe beim modifizierten System von 18 cm um 12 cm Braunkohle und 12 cm Aktivkohle

erhöht. Dieser modifizierte Filteraufbau (Variante B+) zeigte im Rahmen eines Säulenversuchs bei paralleler Aufbringung der Schadstoffe gemittelt über die drei Regenspenden (2,5 l/(s·ha), 6,0 l/(s·ha), 25 l/(s·ha)) einen Rückhalt von 98 % MKW, 99 % PAK, 73 % MTBE, 70 % Zink und 88 % Kupfer (Abbildung 1). Die im Labor ermittelte Standzeit war hier in Bezug auf die Rückhalteleistung limitiert durch den Parameter Zink. Der ausreichende und auftausalzbeständige Rückhalt von Schwermetallen wurde ebenfalls nachgewiesen. Damit lag eine belastbare Materialkombination für die Feldversuche vor.

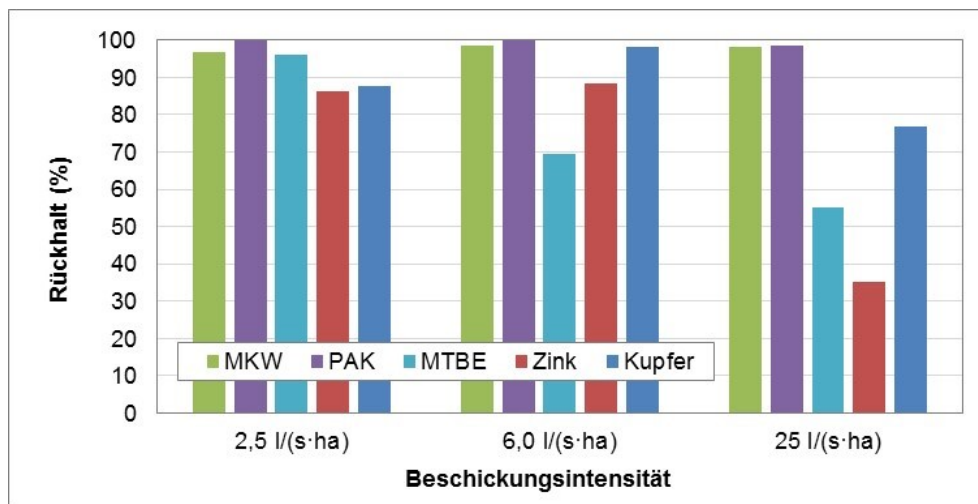


Abbildung 1: Schadstoffrückhalt der konzipierten Materialkombination (Variante B+).

Die mit MKW, PAK, MTBE, Kupfer und Zink vorbeladenen Materialkombinationen wurden Untersuchungen zum Rücklöseverhalten unterzogen, welche durch die Kombination von zwei im Trinkwasser aufgelösten Auftausalzen verursacht war. Die Versuche wurden bei einer Regenspende von 6,0 l/(s·ha) für eine Dauer von 200 min durchgeführt. Für die organischen Schadstoffe MKW und MTBE ergab sich ein remobilisierter Anteil von 2 % bzw. 9 % der zuvor aufgenommenen Stofffracht. Das als Einzelsubstanz keine Rücklösung zeigende MTBE [Li, 2012] wird sehr wahrscheinlich in Verbindung mit den MKW ausgetragen, in dem es sehr gut löslich ist [Vesting et al., 2015]. Die PAK weisen kein Rücklösevermögen unter Auftausalzanwendung auf. Die Schwermetalle sind aufgrund der konkurrierenden Ionen stärker von einer möglichen Remobilisierung betroffen. Für Zink wurden durchschnittliche Rücklösungen von 10 % ermittelt. Aufgrund von unerwartet hohen Kupferkonzentrationen im Trinkwasser, welche möglicherweise auf die neu verlegten Wasserleitungen im Labor zurückzuführen sind, wurde für Kupfer kein Rücklöseverhalten, sondern ein Rückhalt des gelösten Kupfers festgestellt. Dies kann mit einem Anstieg des pH-Wertes auf 7,9 erklärt werden, bei welchem Kupfer vornehmlich partikulär vorliegt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass besonders das als Auftausalz eingesetzte Calciumchlorid zu einer erhöhten Remobilisierung von MKW, MTBE sowie Zink führt.

Für Laboruntersuchungen der Materialkombination unter realitätsnäheren Bedingungen wurden Versuche mit realen Verkehrsflächenabflüssen vom Standort in Mönchengladbach durchgeführt. Die Schadstoffkonzentrationen der Verkehrsflächenabflüsse wurden zum Teil aufgestockt. Die Versuchsreihen wurden durchgeführt, ohne vorher eine Jahresfracht an Schadstoffen auf die Säule aufzubringen. Im Gegensatz zum bisher eingesetzten deionisierten

Wasser hat der Zulauf eine DOC-Konzentration von 7,2 mg/l sowie eine erhöhte Gesamtionenkonzentration, welche durch die elektrische Leitfähigkeit von 124 $\mu\text{S}/\text{cm}$ charakterisiert war. Bei diesen Versuchen war der Einfluss von gelösten Salzen und gelösten organischen Verbindungen auf den Rückhalt der Schadstoffe klar erkennbar. Während bei der niedrigen Regenspende von 2,5 l/(s·ha) noch ein Schwermetallrückhalt von 74 % Kupfer und 61 % Zink ermittelt werden konnte, reduzierten sich diese bei einer hohen Regenspende von 25 l/(s·ha) auf 41 % Kupfer und 13 % Zink.

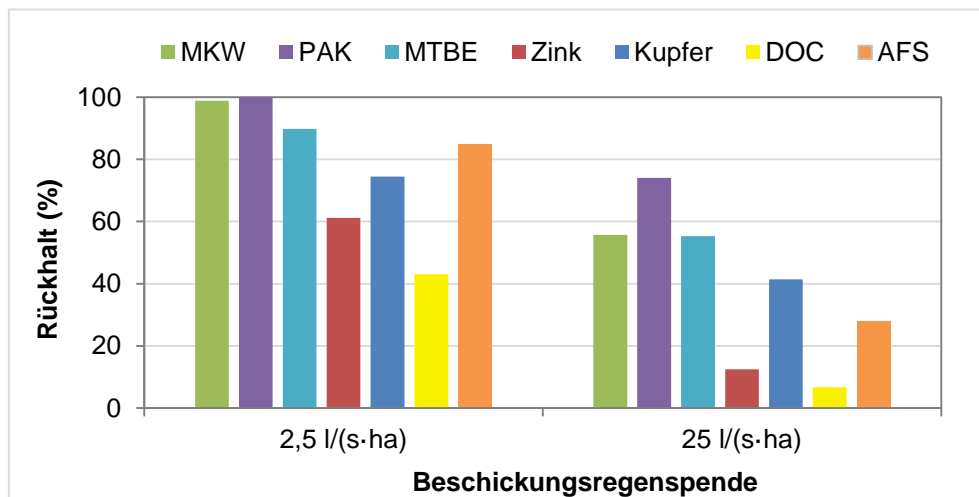


Abbildung 2: Schadstoffrückhalt der konzipierten Materialkombination (Variante B+RW) – Zulauf mit realer Zusammensetzung von Verkehrsflächenabflüssen.

4 Feldversuche

4.1 Aufbau und Wirkungsweise des FiltaPex-Systems

Das System FiltaPex der Pecher Technik GmbH ist ein System zur dezentralen Regenwasserbehandlung von Flächen ab mehreren 100 m² bis zu mehreren Hektar. Je nach Verschmutzung des abfließenden Niederschlages sowie den Anforderungen an die Regenwasserbehandlung können dabei unterschiedliche Reinigungsleistungen gefordert werden. Das System FiltaPex kann dabei je nach Anforderung und Anwendungsfall durch die Größe des Filters und des Aufbaus flexibel konfiguriert werden. Das System FiltaPex ist durch den modularen Aufbau für steigende Reinigungsanforderungen nachrüstbar.

Das System FiltaPex Standard der Pecher Technik GmbH basiert grundsätzlich auf den Wirkmechanismen Sedimentation und Filtration sowie Adsorption in einem Schachtsystem. Im System FiltaPex Standard sind diese Wirkmechanismen in einem Schacht zusammengefasst (Einschachtsystem).

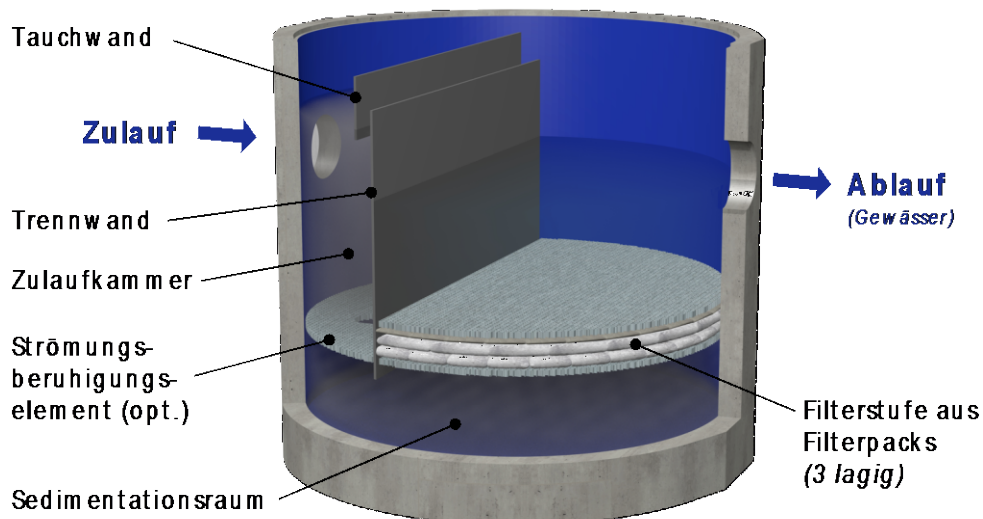


Abbildung 3: FiltaPex Standard mit den wesentlichen Funktionselementen.

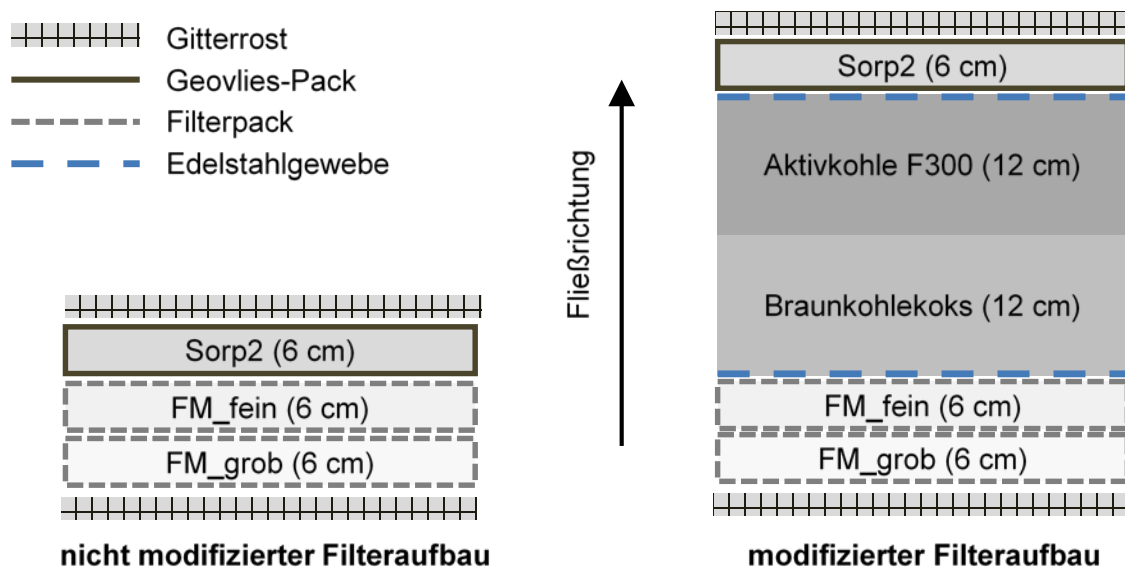


Abbildung 4: Aufbau des Standard Filterelementes (links) und Aufbau des modifizierten Filters (rechts).

Die Filterelemente werden schichtweise zwischen zwei Gitterrosten angeordnet. Der Filter wird aufwärts durchströmt. Die ersten beiden Filterschichten (jeweils 6 cm) bestehen aus textilen „Filterpacks“ oder einer losen Schüttung mit nach oben hin abgestufter Korngröße. Das kalkhaltige Schüttgut (Porenbeton) darin hat die Aufgabe, Feststoffe zurückzuhalten, die nicht in der mechanischen Vorbehandlung sedimentiert sind. Die oberste Lage (6 cm) besteht aus Geovlies-Packs mit einer maximalen Öffnungsweite von 100 µm, die mit einem adsorbierenden Substrat (Sorp2) gefüllt sind. Diese Filterlage dient neben dem Rückhalt von Feinstpartikeln auch der Bindung gelöster Schwermetalle. Im modifizierten Filteraufbau wurden zwischen die Filtermaterialien und den Geovlies-Packs jeweils 12 cm der Filtermaterialien (Braunkohlekoks und Aktivkohle F300) als lose Schüttung zwischen einem feinmaschigen Edelstahlgewebe (0,8 mm Öffnungsweite) eingebaut (Abbildung 4). Der Filter am Standort Wuppertal neigte durch den häufig anspringenden Überlauf zu einer Kolmation des Filters zu einem frühen Zeitpunkt. Daher wurden dort die Schichten FM_grob, FM_fein

und Sorp2 auf jeweils 4 cm reduziert und auf die Oberfläche eine 4 cm Schicht FM_fein_oben aufgebracht.

4.2 In-situ Untersuchungen

Für weitergehende Felduntersuchungen wurden zwei Standorte in Wuppertal und Mönchengladbach ausgewählt, bei denen die bestehenden semi-dezentralen Behandlungsanlagen des Typs FiltaPex der Pecher Technik GmbH mit dem modifizierten Filter nachgerüstet wurden. Damit sollten vor allem die Reinigungsleistung und das Betriebsverhalten des Systems unter realen Bedingungen untersucht und bewertet werden. Die Beprobung jedes Standorts dauerte jeweils ca. sechs Monate und erfolgte nacheinander in den Jahren 2014 und 2015. Dabei wurden die Parameter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, AFS, MKW, PAK, MTBE, ETBE, Kupfer und Zink sowohl im Zulauf als auch im Ablauf der Anlage durchflussproportional bestimmt. Um die eingesetzten Filtermaterialien auch während der Betriebsphase sowie nach dem Einsatz im Filterschacht-System tiefergehend untersuchen zu können, wurden bei der Ausrüstung der Filterschächte spezielle Glassäulen eingebaut, die analog zum Aufbau des Filters gefüllt wurden und mit in die Anlage integriert wurden. Diese Glassäulen wurden nach der Belastung mit realen Verkehrsflächenabflüssen nach 4,5 Monaten (Wuppertal) bzw. 6,5 Monaten (Mönchengladbach) ausgebaut und ermöglichten vergleichende Untersuchungen der noch vorhandenen Restkapazität des Filtermaterials unter Laborbedingungen.

Die an den ausgewählten Standorten analysierten Verkehrsflächenabflüsse bilden bezüglich der organischen Schadstoffkonzentrationen MKW (Event Mean Concentration (EMC) 1,4 mg/l in Wuppertal, 4,2 mg/l in Mönchengladbach) und PAK (EMC 1,7 µg/l in Wuppertal, 0,7 µg/l in Mönchengladbach) einen normalen Schwankungsbereich ab. Lediglich die organischen Stoffe MTBE und ETBE konnten in fast keiner Feldprobe oberhalb der Bestimmungsgrenze von 0,1 µg/L gefunden werden, obwohl an beiden Standorten fast ausschließlich Straßenflächen (Landesstraßen mit einem Fahrzeugaufkommen von 20.600 bzw. 9.500 Kfz/d) angeschlossen waren. Dies kann evtl. durch den milden Winter und die niedrigen Siedepunkte (55 °C für MTBE und 73 °C für ETBE) sowie hohen Dampfdrücke (270 hPa bei 20 °C für MTBE und 173 hPa bei 25 °C für ETBE) der Verbindungen erklärt werden. Die Konzentrationen der Schwermetalle Kupfer (EMC 73 µg/l in Wuppertal, 63 µg/l in Mönchengladbach) und Zink (EMC 158 µg/l in Wuppertal, 363 µg/l in Mönchengladbach) lagen im unteren erwarteten Bereich.

In diesem Projekt wurden durch Vorgabe eines Schwellenwertes nur (stärkere) Regenerereignisse oberhalb eines Mindestdurchflusses (Wuppertal 2,0 l/s entsprechen 2,0 l/(s·ha); Mönchengladbach 1,0 - 3,0 l/s entsprechen 6,3 – 18,8 l/(s·ha)) beprobt und analysiert. Die Analyseergebnisse wiesen zum Teil hohe Stoffkonzentrationen im Ablauf der Behandlungsanlage auf, obwohl Filter- und Sedimentationsstufe funktionierten. Ursache war, dass die variable Regenspende häufig zu einer kurzzeitigen Überschreitung des ermittelten behandlungspflichtigen Abflusses (15 l/(s·ha) bzw. 5 l/(s·ha)) während eines Regenerereignisses führte und damit in einem kurzen Anspringen der Notentlastung resultierte.

Dies trat mit längerer Betriebszeit und damit mit zunehmender Kolmation des Filters immer häufiger auf. Eine Probenahme bei Behandlungssystemen sollte aus diesem Grund im Feld immer zwischen Filterablauf und Ablauf des Notüberlaufes unterscheiden, was eine konstruktive Differenzierung bedingt. Wesentliche Aufgabe wird es in Zukunft bleiben, die Filterstandzeiten gerade dann, wenn die Elimination verschiedener Spurenstoffe gefordert ist, zu erhöhen.

Die Standzeit im Feld war an beiden Standorten durch die Abnahme der Filterdurchlässigkeit limitiert. Die im Feld binnen Wochen (Wuppertal) bzw. Monaten (Mönchengladbach) von $8,0 \cdot 10^{-3}$ m/s auf $2,8 \cdot 10^{-4}$ m/s um über eine Zehnerpotenz abgenommene hydraulische Durchlässigkeit reduzierte den behandelten Volumenstrom und somit auch den prozentualen Rückhalt erheblich. Ortsspezifische Randbedingungen und wechselnde jährliche sowie saisonbedingte Belastungen beeinflussten den Betrieb der Regenwasserbehandlungsanlage maßgeblich und führten in Folge zu anderen Ergebnissen als im Labor. Aufgrund der Heterogenität der Ereignisse (Variabilität der Zulaufkonzentrationen, der Regendauern und Regenspenden) in Verbindung mit dem Austauschvolumen konnte in der dezentralen Anlage keine Rückhalte für verschiedene Regenklassen ermittelt werden und ein direkter Vergleich der Laborergebnisse für verschiedene Regenspenden (2,5 l/(s·ha), 6,0 l/(s·ha), 15 l/(s·ha)) mit den Felduntersuchungen ist nicht möglich.

Das modifizierte FiltaPex-System in Mönchengladbach wurde hinsichtlich der ein- und ausgetragenen Schadstoffe sowie des Schadstoffrückhalts bilanziert. Hierbei wurden das Filterschachtsystem als Ganzes sowie die Behandlungsstufen der Sedimentation und Filtration einzeln betrachtet (Tabelle 2). In der sechsmonatigen Untersuchungsphase wurden 569 m³ Verkehrsflächenabflüsse mit einer Feststofffracht von 107 kg von dem System behandelt und analysiert. Die im Ablauf des Filters gefundene Feststofffracht von 24 kg entspricht einem AFS-Rückhalt des Gesamtsystems von etwa 77 %. Etwa 72 kg wurden dabei von der Sedimentationsstufe, 12 kg durch das Filtersystem zurückgehalten. Neben den Feststoffen wurden das untersuchte FiltaPex-System hinsichtlich der Schwermetalle Kupfer und Zink sowie der organischen Stoffe MKW und PAK bilanziert. Im Gegensatz zu den AFS zeigte sich, dass eine Schließung der Bilanz für die übrigen Stoffe nicht vollständig gelingt. Für die Schwermetalle kam es zu einer Gesamtbilanz größer 100 %. Die Gesamtbilanzen von MKW und PAK lagen mit 76 % für MKW und 52 % für PAK unterhalb der 100 %. Die Ursache liegt u. a. in der indirekten Bestimmung der Stofffrachten sowie Messungenauigkeiten und Messunsicherheiten. Bei den organischen Verbindungen MKW und PAK lagen die gemessenen Konzentrationen sehr häufig im Bereich der Bestimmungsgrenze. Im Zulauf des Gesamtsystems wurden im Untersuchungszeitraum Regenereignisse mit einer Fracht von 35,7 g Kupfer sowie 207 g Zink analysiert. Etwa 47 % des Kupfers und 21 % des Zinks wurden in der Sedimentationsstufe, 8 % des Kupfers sowie 5 % des Zinks in der Filterstufe zurückgehalten. Damit erzielte das Gesamtsystem einen Rückhalt von 55 % für Kupfer sowie 26 % für Zink. In den beprobten Regenereignissen wurden 2.370 g MKW und 0,4 g PAK in das Filtersystem eingebracht. 10 % der MKW wurden in der Sedimentationsstufe und 5 % in der Filterstufe zurückgehalten, so dass ein Gesamtrückhalt von 15 % erzielt wurde. Die Bilanzierung des PAK-Rückhalts erwies sich als schwierig. Die Verringerung der Frachten von Systemzulauf (0,4 g) über den Zulauf zur Filterstufe (0,34 g) hin zum Systemablauf (0,2 g)

lassen auf einen Rückhalt von 52 % schließen. Auf den Filtermaterialien sowie auf den sedimentierten Feststoffen konnten keine PAK quantifiziert werden. Unter Einbeziehung der Bestimmungsgrenzen der Einzelstoffe > 0,1 mg/kg kann eine matrixabhängige Gesamtbestimmungsgrenze > 1 mg/kg angenommen werden. Daraus resultiert ein maximaler Rückhalt der Sedimentationsstufe von 0,1 g PAK, ohne dass der Rückhalt analytisch feststellbar wäre. Für die Filterstufe kann unter Berücksichtigung der Bestimmungsgrenze ein Rückhalt von mindestens 0,1 g PAK ausgegangen werden.

Tabelle 2: Stofffrachten der Teilströme und Rückhalt des FiltaPex-Systems unter Einbeziehung der Ergebnisse der Schlammspiegelmessung und der Feldsäulenergebnisse, Standort Mönchengladbach (* Anteil in % bezogen auf die jeweilige Fracht im System).

	AFS		Cu		Zn		MKW		PAK	
	kg	%*	g	%*	g	%*	g	%*	g	%*
Zulauf System	107	100	35,7	100	207	100	2.370	100	0,4	100
	Stofffrachten der Teilströme									
Notüberlauf	10,5	10	3,3	9	26,7	13	107	5	0,1	16
Zulauf Filterstufe	20,1	19	15,5	44	164	80	2.992	126	0,34	81
Ablauf System	24,4	23	23,1	65	184	89	1.454	61	0,2	48
	Rückhalt									
Sedimentationsstufe ¹⁾	71,9	67	16,6	47	44,2	21	233	10	0	0
Filterstufe ²⁾	12,4	12	2,7	8	11,3	5	108	5	0	0
Gesamtrückhalt	84,8	77	19,3	55	55,5	26	341	15	0	0
Gesamtbilanz³⁾	100		120		115		76		52	

¹⁾ Auswertung der Sedimentationsstufe anhand der Schlammspiegelmessung

²⁾ Auswertung der Filtrationsstufe anhand der Feldsäulen

³⁾ Bilanz des Gesamtsystems: Zulauf System = Ablauf System + Gesamtrückhalt

Der breitere, großtechnische Einsatz des Systems in dieser Form kann also aufgrund der geringen Rückhaltewerte sowie des größeren Betriebsaufwands noch nicht empfohlen werden.

Dem Parameter AFS_{fein} (< 63 µm) kommt sowohl bei der Kolmation des Filters als auch bei der Schadstofffracht große Bedeutung zu. Analysen der Schachtsedimentproben sowie der einzelnen Filterbestandteile konnten den Verbleib der Schadstoffe aufzeigen. Von zwei Schachtsedimentproben wurden Partikelgrößenverteilungen gemessen und der Schadstoffgehalt an MKW, Zink und Kupfer in Abhängigkeit der Korngrößenfraktionen bestimmt. Dabei zeigte sich, dass der Anteil des AFS_{fein} bis zu einer Korngröße von 63 µm bei den untersuchten Schachtsedimentproben etwa die Hälfte der partikelgebundenen Schadstoffe MKW, Kupfer und Zink beiträgt. Im Partikelgrößenbereich bis 200 µm werden rund 80 % der Schadstoffe gebunden (Abbildung 5).

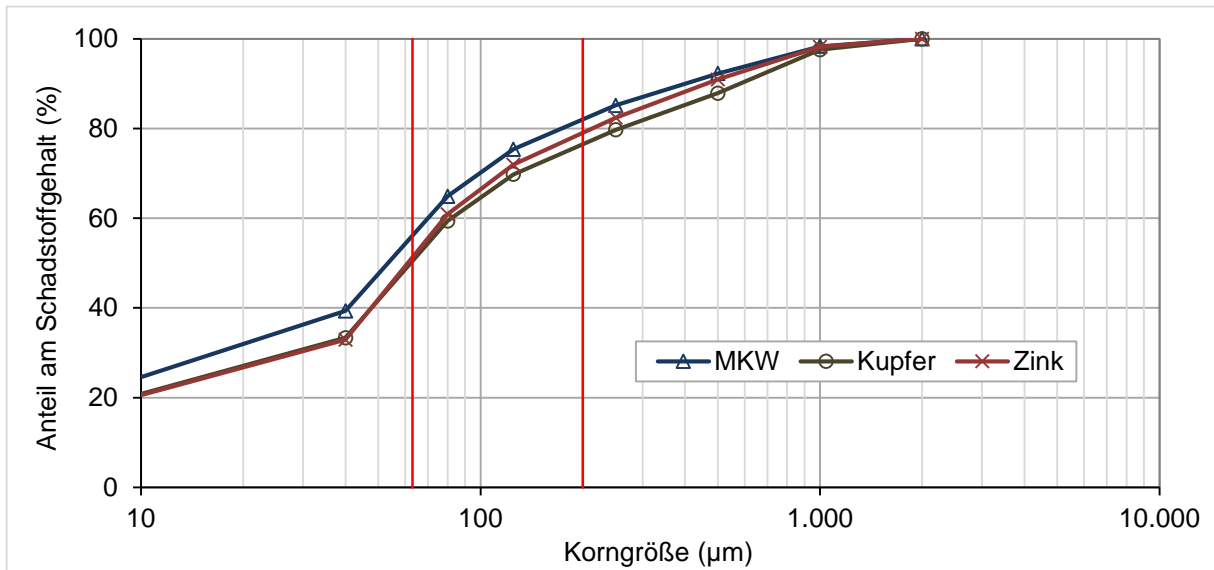


Abbildung 5: Beitrag der einzelnen Kornfraktionen zum Schadstoffgehalt der Schachtsedimente.

Abbildung 6 zeigt die Mengenverteilung der Feststoffe über die verschiedenen Filterschichten. Der spezifische Feststoffrückhalt angegeben in mgAFS/cm³ ermittelt sich aus der jeweils pro Schicht zurückgehaltenen Feststoffmenge bezogen auf das Schichtvolumen. Hierbei ist für den aufwärtsdurchströmten Filter deutlich zu erkennen, dass die meisten Feststoffe bereits in der untersten und damit als erste durchströmte Filterlage zurückgehalten werden. Mit zunehmender Fließstrecke nimmt der Anteil der zurückgehaltenen Feststoffe ab und die Größe der zurückgehaltenen Partikel verringert sich.

Die in Wuppertal auf dem eigentlichen Filter zusätzlich aufgelegte Schicht an Porenbeton (FM_fein_oben) dient als Schutz der obersten feinen Filterschicht (Sorp2) bei Abschlagsereignissen. Die beim Anspringen des Notüberlaufs sich auf dem Filter ablagernden Feststoffe würden ohne diesen Schutz zu einer schnellen Kolmation der Sorp2-Schicht führen.

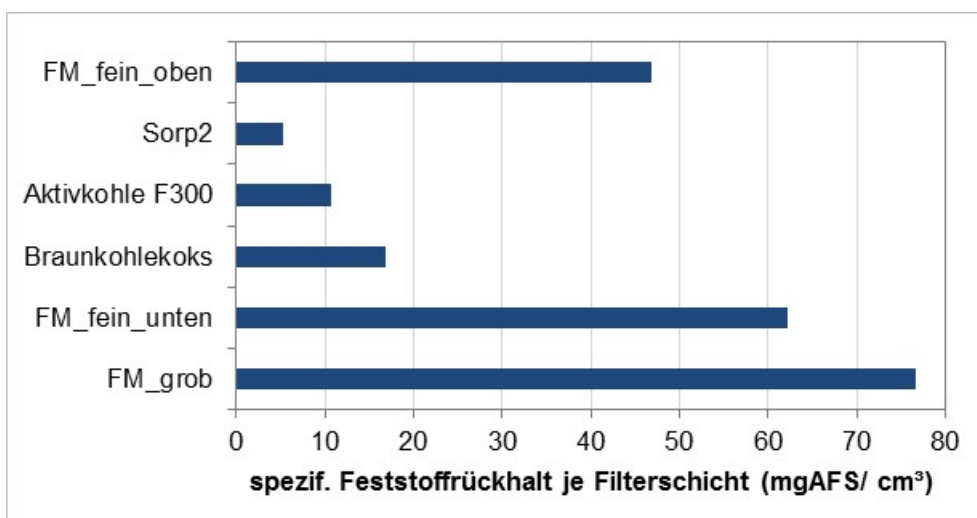


Abbildung 6: Spezifischer Rückhalt an Feststoffen je Filterschicht am Standort Wuppertal.

Weitergehende Untersuchungen am Filter zeigen den Verbleib der Schadstoffe im Filter. Abbildung 7, links, links zeigt den MKW-Gehalt der jeweiligen Materialien. Die aus Porenbeton bestehenden Schichten FM_grob und FM_fein sowie das Material Sorp2 weisen herstellungsbedingt bereits einen MKW-Gehalt zwischen 145 mg/kgTR und 385 mg/kgTR auf. Die MKW-Beladung liegt im Bereich von 24 mg/kgTR (Aktivkohle) bis 150 mg/kgTR (FM_grob). Die Beladung des Filters nimmt in Fließrichtung bis zur Aktivkohle ab. Als Grund dafür wird der während der Filterpassage sukzessiv stattfindende Schadstoffrückhalt gesehen. Die Menge an zurückgehaltenen MKW pro Schicht korreliert dabei gut mit der Masse an abgesetzten Feststoffen. Die Beladungsdifferenz zwischen den gespülten und ungespülten Filtermaterialien weist auf einen fast vollständigen Schadstoffrückhalt über Fest- und Feinstoffe hin. In Abbildung 7, rechts sind die PAK-Gehalte der jeweiligen Filterschichten dargestellt. Hier weist die Beladungsdifferenz auf einen fast vollständig partikulären Transport hin, wobei die Menge der zurückgehaltenen PAK mit der Masse an abfiltrierbaren Stoffen korreliert.

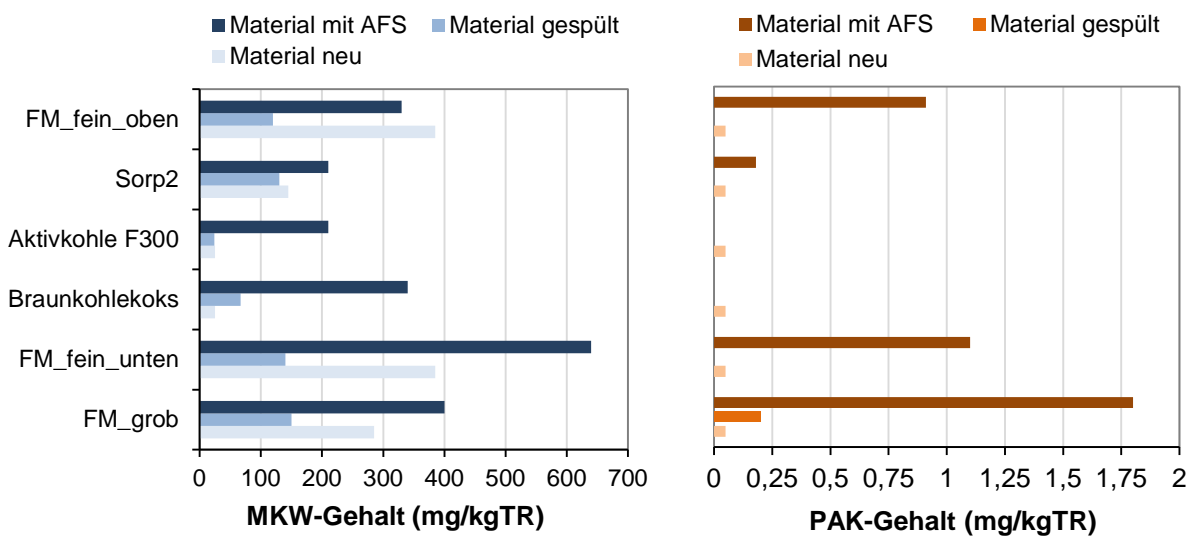


Abbildung 7: Gegenüberstellung des MKW-Gehaltes (links) und des PAK-Gehaltes (rechts) der gespülten und ungespülten Filtermaterialien sowie der Materialien im neuen Zustand, Standort Wuppertal.

Ebenfalls wurde der Schwermetallgehalt der einzelnen Filterschichten untersucht (Abbildung 8). In neuen Filtermaterialien, vor allem den Porenbetonhaltigen, konnten relativ hohe Kupferkonzentrationen von bis zu 22 mg/kgTR (FM_grob) sowie 10 mg/kgTR bis 64 mg/kgTR Zink gefunden werden. Auslaugungstests zeigten, dass die prozessbedingt vorhandenen Schwermetalle Kupfer und Zink nicht freigesetzt wurden. Ein Vergleich der ungespülten mit den gespülten Materialien zeigte, dass in den unteren Schichten etwa 40 % bis 60 % des Schwermetall-Rückhalts durch Feststoffrückhalt erzielt wurde. Die Kupfer-Beladung der gespülten Materialien lag im Bereich von 13 mg/kgTR (Sorp2) bis 29 mg/kgTR (Braunkohlekoks). Damit wurde der größte Rückhalt des gelösten Kupfers wie erwartet in der Braunkohlekoks-Schicht erzielt. Der Zink-Gehalt der gespülten Materialien lag im Bereich von 58 mg/kgTR (FM_grob) bis 120 mg/kgTR (FM_fein_unten). Unter Berücksichtigung der Vorbeladung der Materialien ist festzustellen, dass der höchste Rückhalt an gelöstem Zink in der Braunkohlekoks- sowie der Aktivkohleschicht (75 mg/kgTR bzw. 66 mg/kgTR) erfolgte.

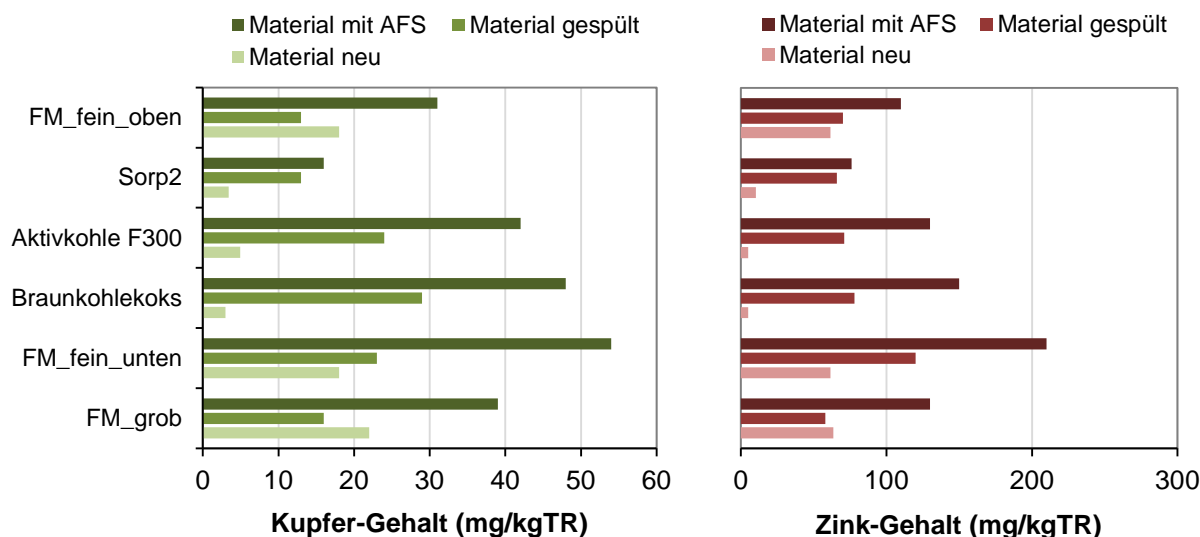


Abbildung 8: Gegenüberstellung des Kupfer-Gehaltes (links) und des Zink-Gehaltes (rechts) der gespülten und ungespülten Filtermaterialien sowie der Materialien im neuen Zustand, Standort Wuppertal.

4.3 Feldsäulenversuche

In die Filterschächte eingebaute Glassäulen wurden nach der Belastung mit realen Verkehrsflächenabflüssen nach 4,5 Monaten (Wuppertal) bzw. 6,5 Monaten (Mönchengladbach) ausgebaut und vergleichenden Untersuchungen der noch vorhandenen Restkapazität des Filtermaterials unter Laborbedingungen unterzogen. Nach der vorangegangenen Belastung zeigte sich bei paralleler Aufbringung der Schadstoffe gemittelt über die drei Regenspenden (2,5 l/(s·ha), 6,0 l/(s·ha), 15 l/(s·ha)) im Labor ein Rückhalt von 95 % MKW, 98 % PAK, 81 % MTBE, 82 % Zink und 78 % Kupfer (Wuppertal). Auch die Ergebnisse der Feldsäule des Standorts Mönchengladbach wiesen einen guten Rückhalt von 94 % MKW, 90 % PAK, 81 % MTBE, 85 % Zink und 86 % Kupfer auf. Eine Remobilisierung der Stoffe aufgrund der Einwirkung von Auftausalz fand nur in sehr geringem Maße statt.

Obwohl die Filter noch eine hohe Restkapazität hatten, zwang die Kolmation der Filter im realen Betrieb zu einem Austausch des Materials. Damit ist für den praxisnahen Anlagenbetrieb zu prüfen, wie die im Labor weiterhin verfügbare hohe Restkapazität des Filtermaterials nach 6,5 Monaten auch im realen Betrieb genutzt werden kann. Der Kolmation des Filters ist im realen Betrieb vorzubeugen. Das kann u. a. durch den Einsatz größerer Filtermaterials, durch geringere Filterhöhe oder durch bessere vorherige Abtrennung von Feinstoffen gelingen. Die grundlegende Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis der Randbedingungen am Standort sowie die Identifizierung potentieller Anwendungsgrenzen (z. B. übermäßige Vegetation und starke Pollenbelastung). Im Rahmen der Dimensionierung kann die dezentrale Anlage in ihrer Größe und Aufbau an die zu erwartende Belastung angepasst werden.

Die in-situ ermittelten mittleren Rückhaltewerte zeigen deutliche Unterschiede zu den Labor-Messungen. Grund dafür können sowohl dynamische Einflussfaktoren im Feld (z. B. Zulaufkonzentrationen, Kontaktzeiten, kein Bypass) als auch unterschiedliche Matrices (z. B.

Feststoffe, Salz-Gehalt, DOC, pH-Wert) sein. Die Feldergebnisse sind unter Einwirkung einer komplexen Stoffmatrix, gelöst und partikulär gebunden, entstanden. In den Laborversuchen wurde unter idealisierten Bedingungen ohne Feststofffracht gearbeitet. Außer den Schadstoffen wurden der Regenspende auch keine weiteren chemischen Substanzen zugesetzt, welche die Kinetik der Adsorption beeinflussen können. Ferner wurden bei den Laborversuchen nur das Verhalten der gelösten Stoffe untersucht. Durchgeführte Laborversuche mit realem Regenwasser zeigten gerade bei höheren Regenspenden (25 l/(s·ha)) eine deutliche Verringerung des Rückhalts auf 28 % AFS, 7 % DOC, 56 % MKW, 74 % PAK, 55 % MTBE, 13 % Zn und 41 % Cu (Abbildung 2). Diese im Labor ermittelten Daten liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie der Rückhalt des Gesamtsystems in Mönchengladbach.

Laborversuche mit deionisiertem Wasser haben dennoch ihre Berechtigung und Notwendigkeit, um Materialien bei gleichen definierten Voraussetzungen hinsichtlich ihres Stoffrückhaltes miteinander beurteilen und vergleichen zu können. Eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse z. B. von einer im Labor ermittelten Kapazität auf den Rückhalt eines Behandlungssystems in der Praxis ist jedoch nur beschränkt möglich. Versuche unter realen Bedingungen im Feld sind hier erforderlich.

4.4 Herausforderung Probenahme im Feld

Die Beprobung von Regenereignissen in Feldversuchen ist für die Beurteilung der Rückhalteleistung der untersuchten dezentralen Systeme essentiell. Eine bloße Bestimmung der zurückgehaltenen Stoffe im Sedimentationsraum sowie im Filter ermöglicht noch keine Aussage zum Rückhalt des Systems. Eine Bilanzierung des Systems ist ebenfalls nicht möglich, da die Belastung des Anlagenzulaufes unbekannt ist. Aus diesem Grund wurden der Zulauf und der Ablauf der Gesamtanlage sowie der Zulauf zum Filter mittels automatischer Probenehmer beprobt.

Die Probenahme von geringen und schwankenden Abflüssen stellt grundsätzlich eine Herausforderung dar [Barjenbruch et al., 2016]. Insbesondere wenn die variablen Regenspenden zu einer Überschreitung des ermittelten behandlungspflichtigen Abflusses (15 l/(s·ha) bzw. 5 l/(s·ha)) und zu einem kurzen Anspringen der Notentlastung führte. Dies trat mit zunehmender Kolmation des Filters häufiger auf. Eine Probenahme bei Behandlungssystemen mit vermischtem Ablauf (Filter und Überlauf) gestaltet sich auch daher im Feld schwierig.

Bei der Beprobung der Filtersysteme wurden Schwellenwerte des Mindestdurchflusses (Wuppertal 2,0 l/s entsprechen 2,0 l/(s·ha); Mönchengladbach 1,0 - 3,0 l/s entsprechen 6,3 – 18,8 l/(s·ha)) zur Identifikation von (stärkeren) Regenereignissen gesetzt. Die angewendete Probenahmetechnik birgt zwei Probleme, die zu ungenauen Messergebnissen führen können. Zu Beginn des Regenereignisses findet zumeist eine Stoßbelastung mit hohen Schadstoffkonzentrationen statt. Bei anfänglich geringen Regenintensitäten wird der genannte Schwellenwert von 1 – 3 l/s nicht überschritten, so dass die Stoßbelastung als Fracht nicht

vollständig erfasst wird. Bei hohen Regenintensitäten kommt es bedingt durch eine kurze Kontaktzeit im Filter zu einer schlechteren Eliminationsleistung.

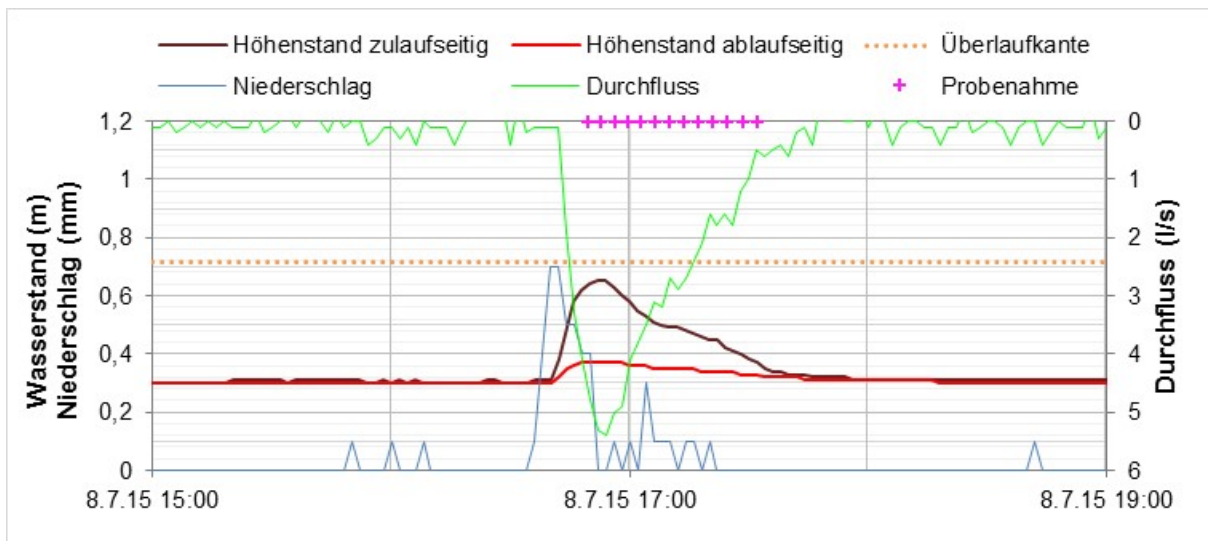


Abbildung 9: Messdaten des Regenereignisses vom 08.07.2015 am Standort Mönchengladbach (3 l/s Startwert).

Abbildung 9 zeigt beispielhaft die Messdaten für ein Regenereignis am Standort Mönchengladbach. Erkennbar sind die sehr geringen Niederschlagsmengen vor dem eigentlichen Ereignis, die aufgrund der Benetzungs- und Verdunstungsverluste nur zu geringen Bewegungen in der Durchflusskurve führten. Mit Einsetzen des stärkeren Niederschlages sowie dem etwas verzögerten Anstieg des Durchflusses wurden die Probennehmer um ca. 16.45 Uhr bei einem Startwert von 3 l/s aktiviert. Deutlich wird an dieser Stelle auch die Auslöseverzögerung. Anschließend wurden die Proben durchflussproportional gezogen und die Probenahme nach Unterschreitung des Grenzwertes von 0,5 l/s beendet.

Eine weitere Schwierigkeit stellt Beprobung dauereingestauter Systeme dar, da stets zu Ereignisbeginn das im System verbliebende Niederschlagswasser des vorangegangenen Regenereignisses zulaufseitig mit beprobt wird. Das Wasservolumen in der Sedimentationskammer – noch bestehend aus altem Zulauf des vorangegangenen Regenereignisses – weist daher nach zwischenzeitlich erfolgter Sedimentation eine deutlich geringere Verschmutzung auf. Ein Austausch des Wasservolumens erfolgt jedoch erst während des Regenereignisses, wobei je nach Zulaufvolumen nur ein Teil des Wasservolumens ausgetauscht wurde. Die Konzentrationen in den Zulaufproben sind daher zumindest zu Beginn der Regenereignisse tendenziell als etwas zu gering einzuschätzen, sofern keine Remobilisierung im dauereingestauten System erfolgte.

5. Dimensionierung und Betrieb

Im Rahmen der Betriebsbegleitung wurde durch den modifizierten Filteraufbau (Gesamthöhe rund 42 cm) eine schnellere Kolmation im Vergleich zu dem ursprünglichen System FiltaPex Standard (Gesamthöhe 18 cm) festgestellt.

Damit ist der Rückhalt von organischen Spurenstoffen mit hohem betrieblichen und kostentechnischen Aufwand verbunden. Somit kann es sich bei der Umsetzung von Anlagen zum Rückhalt organischer Spurenstoffe mit dem hier beschriebenen Filteraufbau derzeit nur um Einzelfalllösungen handeln - bei einer entsprechend geforderten Reinigungsleistung und wenn kein alternatives Behandlungssystem möglich ist. Eine breitere großtechnische Umsetzung ist derzeit aber noch nicht zu empfehlen. Das System könnte aber insbesondere für Abflüsse von Flächen der Kategorie III des Trennerlasses oder bei hohen Anforderungen an sensiblen Gewässern zur Anwendung kommen, wenn ein erhöhter Wirkungsgrad bestimmter Schadstoffe gefordert ist. Bisherige dezentrale Systeme wie das FiltaPex Standard zeigen einen guten Feststoffrückhalt, so dass hierdurch eine gute Elimination an organischen Schadstoffen bereits erreicht werden kann. Der großflächige Einsatz modifizierter Systeme ist nicht sinnvoll, da die Kolmation verstärkt wird und dadurch die Standzeit verringert wird.

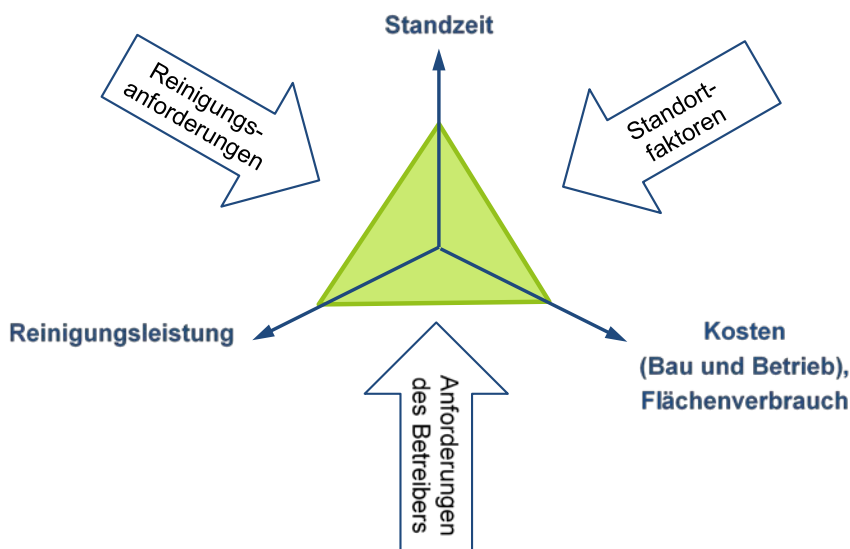


Abbildung 10: Wechselwirkungen der Dimensionierung dezentraler Behandlungssysteme.

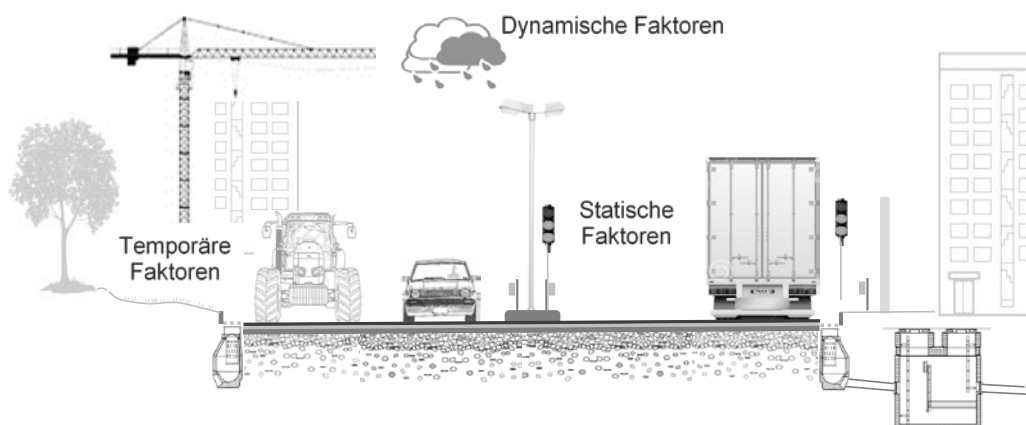


Abbildung 11: Einflussfaktoren auf die Dimensionierung und den Betrieb dezentraler Systeme [Vesting, 2017].

Es gibt zahlreiche Wechselwirkungen bei der Dimensionierung dezentraler Behandlungssysteme (Abbildung 10). Eine Übertragbarkeit der im Rahmen des

Forschungsprojektes erzielten Ergebnisse hinsichtlich der festgestellten Reinigungsleistung und der (zusätzlichen) Kosten auf andere dezentrale bzw. semizentrale Behandlungssysteme ist aufgrund der vielen einzugsgebietsspezifischen, statischen, dynamischen und temporären Einflussfaktoren mit Unsicherheiten behaftet (Abbildung 11, Tabelle 3). Die einzelnen Faktoren sollten vor der Planung dezentraler Anlagen erfasst, deren Auswirkungen abgeschätzt und dies im Rahmen einer Dimensionierung z. B. in Form einer entsprechenden Matrix berücksichtigt werden. So kann ein betrieblich sinnvolles Verhältnis zwischen Filter- und Anschlussfläche ermittelt werden. Darauf aufbauend lässt sich der notwendige betriebliche Aufwand für Wartung und Filteraustausch abschätzen und es lassen sich so die Anwendungsgrenzen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bestimmen.

Tabelle 3: Übersicht von Einflussfaktoren des Betriebs auf ein Filtersystem – erweitert nach [DWA, 2013; Welker und Huber, 2014].

Einflussfaktor		Auswirkung Kolmation bzw. Standzeit	
<i>Aufbau und Betrieb des Filtersystems</i>	Vorsedimentation	+	
	Anlage im Wechselstau	+	
	Anlage im Dauerstau	-	
<i>Größe und Art der Anschluss- fläche</i>	spezifische Anschlussfläche je Filterfläche ($A_{e,b}/A_F$)	Planmäßig $A_{e,b}/A_F < 0,4 \text{ m}^2/\text{cm}^2$	o
		Zusätzliche unberücksichtigte abflusswirksame Flächen	-
	Verkehrsbelastung und Art der Anschlussfläche	Anzahl d. Kfz / Kategorie	o / -
		Kreuzungs- oder Ampelbereich	-
		Anteil an LKW und Bussen	-
		Autobahn	o
		Parkplatz	+
	Gefälle der Straße		-
	Gefälle des Kanals		-
	Fehlende Schmutzfangeimer in den Straßeneinläufen		-
	Bordsteine, Lärmschutzwände, seitliche Bebauung		-
	Anzahl der Fahrspuren, Standstreifen		+
	Fremdwasser	Eindringendes Grundwasser	-
		Fehleinleitungen aus Schmutzwasserkanälen	-
<i>Jahreszeitliche und Temporäre Einflüsse</i>	Vegetation	Pollen	-
		Blüten, Pflanzensamen	-
		Herbstlaub	-
	Gefälle der Oberfläche (Bodenerosion)		-
	Straßenreinigung		+
	Winterdienst		-
	Baustellen im Einzugsgebiet		-
	Landwirtschaftlicher Verkehr		-
	Hohe Regenintensitäten bei Starkregenereignissen		-

- + positiver Einfluss
- o neutraler Einfluss
- negativer Einfluss

6. Erweiterung der Zulassungsgrundsätze

In den durchgeführten Labor- und Felduntersuchungen sind umfangreiche Erfahrungen gewonnen worden, die in die Erarbeitung von erweiterten Prüfungen einfließen können. Diese Vorschläge sollen Anregungen geben, die Versuchsmethodik realistischer zu gestalten und dennoch den Grundsatz der Vergleichbarkeit der Anlagen, der Praxistauglichkeit sowie der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Möglichkeiten, neue Stoffe wie z. B. organische Schadstoffe in die Prüfverfahren zu integrieren, wurden im Projekt aufgezeigt. Aufgrund der komplexen Aufbringung organischer, häufig nicht wasserlöslicher Stoffe mittels externer Dosierung ist eine Aufnahme der organischen Schadstoffe als Einzelstoff (MTBE) oder Stoffmischung (PAK) in das Prüfverfahren jedoch praktisch schwer umsetzbar.

Vor dem Hintergrund des partikulären Transportes bestimmter Schadstoffe wie Schwermetalle sowie organischer Spurenstoffe kommt der Prüfung des Feststoffrückhaltes eine besondere Rolle zu. Hierbei ist vor allem der Rückhalt der Feinstoffe AFS_{fein} hervorzuheben. Dem trägt auch der Erlass des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen Rechnung [MKULNV, 2012] Rechnung, wonach dezentrale Niederschlagswasserbehandlungsanlagen eingesetzt werden können, wenn der Rückhaltegrad von $AFS_{\text{fein}} > 50 \%$ ist und die betrieblichen Untersuchungsergebnisse eine Vergleichbarkeit mit RKB positiv bescheinigen [Speicher, 2015]. Ebenfalls im zukünftigen DWA-Arbeitsblatt A 102 „Anforderungen an niederschlagsbedingte Siedlungsabflüsse“ soll eine Vorgabe für die AFS-Feinfraktion kleiner $63 \mu\text{m}$ festgelegt werden [Welker, 2014; DWA 2016].

Da das bisher im Prüfverfahren verwendete Millisil W4 sich gerade hinsichtlich der Feianteile von den Eigenschaften realer Straßenpartikel (Partikelform und -dichte, Absetzverhalten) deutlich unterscheidet, ist die Suche nach geeigneten Ersatzstoffen von wesentlicher Bedeutung. Im Rahmen des Projektes konnten beispielsweise mit Pulveraktivkohle im Vergleich zu Millisil W4 realitätsnahe und reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden, so dass sich diese möglicherweise als standardisiertes Ersatzmaterial für AFS_{fein} anbietet (Abbildung 12).

Für die Ermittlung von geeigneten Materialien für eine Prüfung auf den Rückhalt an feinen Feststoffen sind die nachfolgenden Kriterien besonders hervorzuheben:

- Mit feinen Feststoffen – auch AFS_{fein} – vergleichbare/übereinstimmende Eigenschaften (Korngrößenverteilung, Sedimentationsverhalten)
- Inerter Stoff – Beibehaltung der Eigenschaften auch unter Einwirkung von Wasser
- Verfügbarkeit auf dem Markt mit reproduzierbaren, gleichbleibenden Eigenschaften bzw. Merkmalen (z. B. Sieblinien)

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse sollen einen möglichen Ansatzpunkt für die Suche nach weiteren alternativen Prüfstoffen für die feinen Feststoffe – auch AFS_{fein} – bieten. In einer Versuchsreihe wurde das Sedimentationsverhalten von Straßenfeinsedimenten und von Millisil W4 verglichen. Die untersuchten Straßensedimente wurden aus drei Regenereignissen (Zulaufproben) am Standort Mönchengladbach gewonnen und auf kleiner $63 \mu\text{m}$ abgesiebt.

Ebenfalls mit in die Betrachtungen einbezogen wurden das auf kleiner 63 μm abgeseibte Millisil W4, die Pulveraktivkohle AK (Merck KGaA, Deutschland), die Pulveraktivkohle F300 (Chemviron Carbon GmbH, Deutschland) und ein Kreidemehl (eigene Herstellung). In der Abbildung 12, links sind die Partikelgrößen-verteilungen der untersuchten Stoffe dargestellt. Ebenfalls abgebildet ist die Korngrößenverteilung drei verschiedener Zulaufproben des Standortes Mönchengladbach sowie der daraus durch Siebung ($< 63 \mu\text{m}$) gewonnenen Sedimentprobe AFS_{fein}. Zum Vergleich ist die Partikelgrößenverteilung des Millisil W4 angegeben. Anhand der Kurvenverläufe in der Abbildung wird deutlich, dass die Zulaufproben im Bereich kleiner 100 μm einen ähnlichen Verlauf und damit etwa gleiche Anteile an feinen Feststoffen aufwiesen, aber der Bereich größer 100 μm variabler war. Die Zulaufproben wurden zumindest hinsichtlich ihrer Partikelgrößenverteilung durch das Millisil W4 gut widerspiegelt.

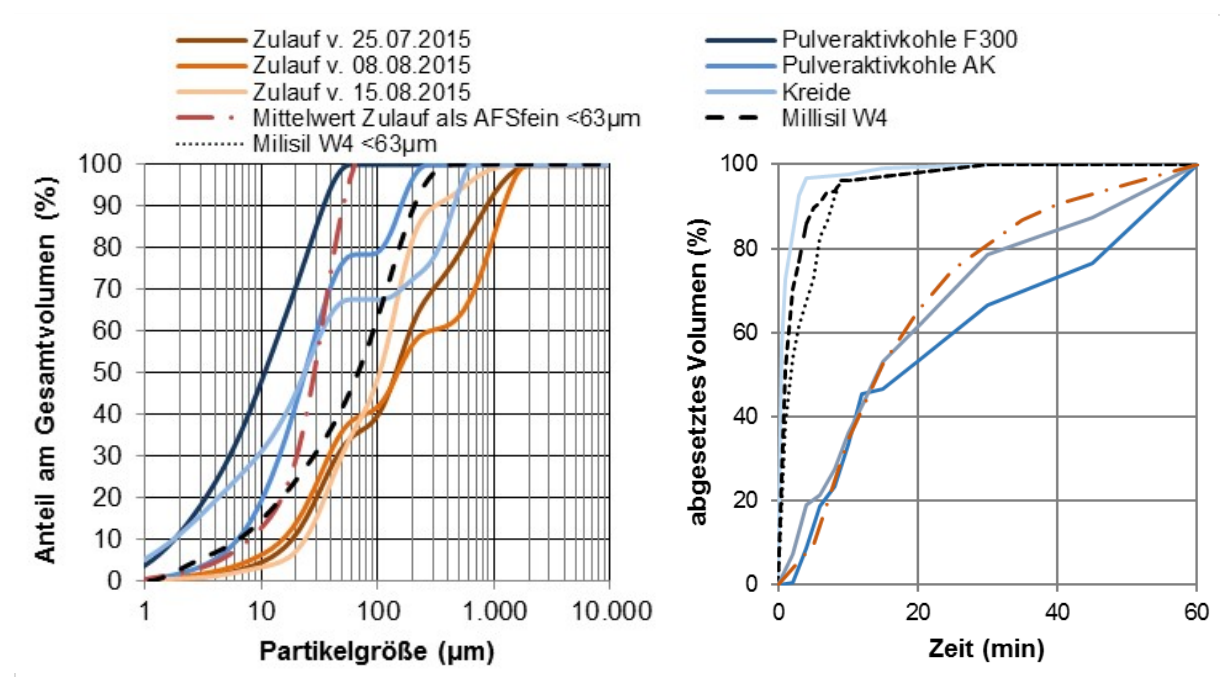


Abbildung 12: Partikelgrößenverteilung der untersuchten Materialien im Vergleich mit verschiedenen Feststoffproben im Zulauf (links), Prozentual abgesetztes Volumen in Abhängigkeit der Zeit (rechts).

Mithilfe des Versuchsaufbaus zur Bestimmung des ISV (Schlammvolumenindex) nach DIN EN 14702-1 [DIN, 2006] konnten Aussagen zur Absetzbarkeit und zur Absetzgeschwindigkeit der einzelnen Materialien sowie der Straßensedimente gewonnen werden. Abbildung 12, rechts zeigt die prozentualen Sedimentationskurven der verschiedenen Materialien jeweils bezogen auf das abgesetzte Volumen nach 60 Minuten Absetzdauer. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Kreide, das Millisil W4 sowie das Millisil W4_{<63 μm} sehr schnell abgesetzt haben. Hingegen sedimentierten AFS_{fein} sowie die Pulveraktivkohlen AK und F300 relativ gleichmäßig über die gesamte Prüfdauer von 60 Minuten. Die Steilheit der 3 Kurven lässt erkennen, dass der Absetzprozess hier noch nicht vollständig abgeschlossen war. Jedoch reichte die Absetzdauer von 60 Minuten aus, um das Sedimentationsverhalten der Materialien zu vergleichen und zu bewerten.

Ein geringer Unterschied war zwischen dem gesiebten Millisil W4_{<63 μm} und dem unbehandelten Millisil W4 zu erkennen. Durch die größere Korngrößenverteilung des Millisil W4 sanken

größere Teilchen schneller ab. So haben sich 85 % nach vier Minuten abgesetzt, hingegen setzte sich beim Millisil W4_{<63µm} der gleiche Anteil erst nach sieben Minuten ab. Bei beiden Materialien haben sich 96 % nach zehn Minuten abgesetzt.

Ein gleichmäßigeres Sedimentationsverhalten zeigten hingegen die AFS_{fein}, die am Standort Mönchengladbach aus drei Zulaufproben gewonnen wurde. Die Sedimentation setzte erst nach der Bildung von kleineren Agglomeraten ein und stieg gleichmäßig ab dem Zeitpunkt von $t=5$ min. Nach 15 Minuten waren etwa 50 % und nach 25 Minuten ca. 75 % der Feststoffe sedimentiert. Einen sehr ähnlichen Verlauf zeigten die Kurven der Pulveraktivkohle AK. Leichte Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Pulveraktivkohle F300 waren auf eine Adhäsion der gebildeten Flocken an der Wand zurückzuführen.

Die Ergebnisse zeigten, dass zum einen das Sedimentationsverhalten des Quarzmehls Millisil W4 von dem Absetzverhalten der natürlichen Feststoffe, insbesondere AFS_{fein}, abweicht und dies zu einem überschätzten Feststoffrückhalt durch eine Sedimentationsstufe führt. Ein Verändern des Millisil W4, beispielsweise durch das Entfernen der Bestandteile größer 63 µm, führt zu keiner wesentlichen Anpassung der Sedimentationseigenschaften und ist in diesem Zusammenhang nicht zu empfehlen.

Zum anderen wurde gezeigt, dass technische Materialien wie Pulveraktivkohlen verfügbar sind, die die Merkmale und Eigenschaften von AFS_{fein} besser nachbilden und sich hierdurch gut als alternative Prüfmaterialien eignen. So wäre beispielweise die indirekte Umrechnung des AFS_{fein}-Rückhaltes mittels Faktoren wie nach *Welker* [2014] nicht erforderlich. Eine Quantifizierung des Rückhaltes wäre durch die Verwendung neuer Prüfmaterialien direkt möglich. Weitergehende Untersuchungen sind jedoch erforderlich, die übrigen Materialeigenschaften zu untersuchen und Vergleichsmessungen an Anlagen durchzuführen. Im Projektgesamtbericht werden Vorschläge hinsichtlich der Durchführung der Prüfung sowie der Analyse, Auswertung und Bewertung der Prüfergebnisse gegeben.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

In Laborversuchen wurden verschiedene Materialien in Schüttel- und Säulenversuchen auf ihre potentielle Eignung, gelöste organische Stoffe und Schwermetalle aus Niederschlagsabflüssen zu entfernen, untersucht. Die Säulenversuche wurden in Teilregenspenden analog zur Prüfvorschrift DIBt durchgeführt. Als effektivster Filteraufbau hinsichtlich Kapazität (Standzeitbetrachtung) sowie Kinetik (ausreichend hohe Filtergeschwindigkeiten) erwies sich eine Kombination aus Sorp2 (Mischung aus Aluminiumoxid und Porenbeton) ergänzt mit je einer Schicht Braunkohlekoks (Korngröße 1,25 – 5 mm) und Aktivkohle F300 (Korngröße 0,5 – 2,5 mm). Um eine entsprechende Kontaktzeit im System zu erreichen, wurde das FiltaPex-System mit einer jeweils 12 cm dicken Schicht Braunkohlekoks sowie Aktivkohle F300 erweitert. Mit diesem System konnten im Labor Rückhalte von 98 % MKW, 99 % PAK, 73 % MTBE, 70 % Zink sowie 88 % Kupfer erzielt werden. Deutlich schlechtere Rückhalte wurden erzielt, wenn anstelle des idealisierten Zulaufs

(demineralisiertes Wasser, mit Schadstoffen in den entsprechenden Konzentrationen versetzt) reale Verkehrsflächenabläufe verwendet wurden. In diesen Versuchen reduzierte sich der Rückhalt bei hohen Regenspenden (25 l/(s·ha)) auf 56 % MKW, 74 % PAK, 55 % MTBE, 13 % Zink und 41 % Kupfer. Diese Ergebnisse zeigen den starken Einfluss von gelösten Salzen sowie gelösten organischen Verbindungen auf den Rückhalt gelöster Stoffe. Es lässt sich feststellen, dass standardisierte Laborverfahren mit demineralisiertem Wasser keine direkt auf die Praxis übertragbaren Ergebnisse liefern. Dennoch sind sie geeignet und notwendig, um Materialien bei gleichen definierten Voraussetzungen hinsichtlich Schadstoffrückhalt miteinander vergleichen zu können.

Weitergehende Felduntersuchungen wurden an zwei Standorten in Wuppertal und Mönchengladbach durchgeführt. Dafür wurden zwei bestehende semi-dezentrale Behandlungsanlagen des Typs FiltaPex der Firma Pecher Technik GmbH mit dem modifizierten Filter nachgerüstet. Nach einem Betrieb von 6,5 Monaten (Mönchengladbach) konnten für den untersuchten Zeitraum gemittelte Rückhalte von 77 % AFS, 39 % MKW, 53 % PAK, 35 % Kupfer und 11 % Zink gemessen werden. Diese Ergebnisse sind für organische Stoffe im Praxisbetrieb als gut zu bezeichnen, für die Schwermetalle als zu niedrig.

Untersuchungen zeigten, dass MKW und PAK fast vollständig, die Schwermetalle Kupfer und Zink zu großen Teilen (40 bis 60 %) partikulär gebunden zurückgehalten wurden. Dabei fällt die Hälfte der partikulären Schadstofffracht auf Partikel kleiner 63 µm. Die Masse der zurückgehaltenen Schadstoffe im Filter korreliert mit der Masse an abfiltrierbaren Stoffen, die in der jeweiligen Schicht zurückgehalten wurde. Gelöstes Kupfer wird vornehmlich in der Braunkohlekoks-Schicht (29 mg/kgTR), gelöstes Zink in der Braunkohlekoks-Schicht (75 mg/kgTR) und der Aktivkohle-Schicht (66 mg/kgTR) zurückgehalten, die Erweiterung des herkömmlichen Filteraufbaus im FiltaPex-Systemen um die weiteren Schichten ist demnach aus Sicht des stofflichen Rückhalts sinnvoll.

Die Filtermaterialien aus den in-situ-Versuchen zeigten unter Laborbedingungen eine sehr hohe Restkapazität, welche allerdings aufgrund der deutlich früheren Kolmation, verglichen mit den Standard-FiltaPex-Systemen, nicht weiter genutzt werden konnte. Der zusätzliche Filteraufbau ist daher aufgrund des hohen betrieblichen und kostentechnischen Aufwands nur als eine Einzelfalllösung bei einer entsprechend geforderten Reinigungsleistung zu sehen. Das System könnte z. B. für Abflüsse von Flächen der Kategorie III des Trennerlasses oder bei hohen Anforderungen hinsichtlich MKW und PAK an sensible Gewässer zur Anwendung kommen.

Die Beprobung von realen Regenereignissen in Feldversuchen ist für eine Beurteilung der Rückhalteleistung der untersuchten dezentralen Systeme essentiell. Das Setzen eines Schwellenwertes führt zur Identifikation von (stärkeren) Regenereignissen. Allerdings findet zu Beginn eines Regenereignisses häufig eine Stoßbelastung der Anlage durch Schadstoffe statt. Bei geringen Regenintensitäten wird der first-flush dementsprechend nicht (vollständig) erfasst. Bei hohen Regenintensitäten ist die Aufenthaltszeit im Filter zu gering, so dass es zu schlechten Reinigungsleistungen kommen kann.

Im Rahmen dieses Projektes wurde gezeigt, dass MKW und PAK fast ausschließlich, die Schwermetalle Kupfer und Zink zu großen Teilen (40 bis 60 %) partikulär transportiert werden.

Dies führt dazu, dass speziell der Rückhalt der feinpartikulären Feststoffe im Focus der Zulassung dezentraler Niederschlagswasserbehandlungssysteme stehen sollte. Der bisherige Prüfstoff Millisil W4 unterscheidet sich signifikant von den Eigenschaften realer Straßenpartikel. Daher sollte dringend nach alternativen Prüfstoffen gesucht werden.

Ausblick

Aus der Vielzahl an gewonnenen Erkenntnissen lässt sich weiterer Untersuchungsbedarf zu folgenden Punkten ableiten:

In der aktuellen Phase der Entwicklung und Genehmigung zahlreicher Kompaktsysteme zur Regenwasserbehandlung an dezentralen Standorten ist eine langfristige Wirksamkeit der Anlagensicherzustellen. Somit ist insbesondere eine Untersuchung des Betriebsverhaltens von Bedeutung. Sinnvollerweise sind Zeiträume von mindestens einem Jahr zu analysieren, um auch saisonale Einflüsse wie Pollen und Streusalz mit zu erfassen. Es sollte zukünftig mit Inbetriebnahme der Systeme stets auch eine messtechnische Betriebsbegleitung zur Erfassung des hydraulischen Wirkungsgrades erfolgen, um den tatsächlichen einzugsgebietsabhängigen Wartungsaufwand zumindest bis zum ersten Filterwechsel besser abschätzen zu können.

Für diese notwendige langfristige Untersuchung dezentraler Anlagen ist eine Optimierung der Probenahme erforderlich. Die Ergebnisse der Felduntersuchungen müssen den im Rahmen der Zulassung gewonnenen Ergebnissen gegenübergestellt werden, um die Aussagekraft von Laborversuchen zu überprüfen. Hinsichtlich der Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus Labor- und Feldversuchen insbesondere, wenn stationäre, dynamische und temporäre Einflüsse zu berücksichtigen sind, besteht weiterhin großer Forschungsbedarf.

Ein wichtiger Aspekt ist die Veränderung des Filterkörpers bedingt durch die Einlagerung von Feststoffen. Es stellt sich die Frage, welche Auswirkungen die Bildung der „AFS-Schicht“ im Filter, die zu einem Großteil aus feinen Partikeln besteht, auf das Adsorptionsmaterial hat. Möglicherweise sind die freien Adsorptionsplätze verdeckt und somit nicht mehr verfügbar. Gegebenenfalls wirkt die Feststoffschicht am Adsorptionsmaterial auch als zusätzlicher Adorber oder Filter. Die physikalischen, chemischen und gegebenenfalls biologischen Abläufe sollten näher untersucht werden, um die im Labor ermittelten Rückhalteleistungen auf reale Systeme sachgerecht übertragen zu können.

Des Weiteren sollte für die Zulassungsprüfung entsprechender Regenwasserbehandlungsanlagen eine Gesamtprüfmatrix entwickelt werden, die das Spektrum der eingetragenen Stoffe und deren physikalischen Eigenschaften besser abbildet, als das zurzeit verwendete Millisil W4. Besonders wünschenswert ist hier die Erweiterung des Prüfmaterials um leichte feinpartikuläre Stoffe (AFS63), da diese im neuen Arbeitsblatt DWA-A 102 bemessungsrelevant werden.

Literatur

- Barjenbruch, M., Heinzmann, B., Kober, P., Post, M., Remy, Ch., Rouault, P., Sommer, H., Sonnenberg, H., Weiß, B. (2016): Dezentrale Reinigung von Straßenabflüssen. Projekt im Berliner Umweltentlastungsprogramm UEPII/2, Projekt-Nr.: 11315 UEPII/2, Abschlussbericht.
- BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1998, BGBl. Nr. 36, 1554.
- Brauch, H.J., Baus, C. (2007): Substitution von MTBE durch ETBE als Zusatz von Ottokraftstoffen. Gwf Wasser, Abwasser 148 (7–8), 517–529.
- Crabtree, B., Moy, F., Withehead, M., Roe, A. (2006): Monitoring pollutants in highway runoff. Water Environ. J. 20 (4), 287–294.
- Dierkes, C., Raasch, U., Spengler, B. (2006) Versickerungsleistung und Stoffrückhalt von wasserdurchlässigen Flächenbelägen bei hohen Anschlussverhältnissen. KA Abwasser Abfall 53 (12), 1232–1237.
- DIN EN 14702-1 (2006): Charakterisierung von Schlämmen – Absetzeigenschaften - , Teil 1: Bestimmung der Absetzbarkeit (Bestimmung des Schlammvolumens und des Schlammvolumenindex), DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin.
- DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall) (2013): Entwicklung von Prüfverfahren für Anlagen zur dezentralen Niederschlagswasserbehandlung im Trennverfahren – Verifikation. Abschlussbericht, angefertigt von der TU Kaiserslautern, FG Siedlungswasserwirtschaft und der Fachhochschule Münster; Fachbereich Bauingenieurwesen. Im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Az: 28940/02), Osnabrück, Juni 2013.
- DWA-A 102 - Entwurf (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall) (2016): Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 2016. ISBN: 978-3-88721-383-1.
- Helmreich, B. (2010): Stoffliche Betrachtungen der dezentralen Niederschlagswasserbehandlung. Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität München, Band 199, ISSN 0942-914X, Habilitation.
- Huber, M., Helmreich, B., Welker, A. (2015a): Broschüre zu dezentralen Regenwasserbehandlungsanlagen für Verkehrsflächen- und Metaldachabflüsse: Schacht-/ Kompaktsysteme, Rinnensysteme, Straßeneinläufe und Flächenbeläge. Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft, TU München, Band 213, ISSN 0942-914X.
- Huber, M. (2016): Development and Evaluation of an Assessment Method for Decentralized Stormwater Treatment Systems for Runoff from Traffic Areas. Dissertation, Technische Universität München.

-
- Ichiki, A., Ido, F., Minamin, T. (2008): Runoff characteristics of highway pollutants based on a long-term survey through a year. *Water Sci. Technol.* 57 (11), 1769–1776.
- Langbein, S., Steiner, M., Boller, M. (2006): Schlussbericht des Forschungsprojektes – Schadstoffe im Strassenabwasser einer stark befahrenen Strasse und deren Retention mit neuartigen Filterpaketen aus Geotextil und Adsorbiermaterial.
- Li, Y. (2012): Evaluation of adsorbents for road runoff treatment. Dissertation, Technische Universität München.
- Mahler, B.J.; van Metre, P.C.; Wilson, J.T.; Musgrove, M.; Burbank, T.L.; Ennis, T.; Bashara, T.J. (2010): Coal-Tar-Based Parking Lot Sealcoat: An Unrecognized Source of PAH to Settled House Dust. *Environ. Sci. Technol.* 44 (3), 894–900.
- MUNLV (2004): Anforderung an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren; RdErl. d. Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen – IV-9 031 001 2104 – vom 26.5.2004
- MKULNV (2012): Erlass zur Niederschlagswasserbeseitigung vom 20.04.2012. Ministerium Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf. Aus: http://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/abwasser/Erlass_NW_dez_sys_20-4-2012_%282%29.pdf
- Revitt, D.M., Lundy, L., Ellis, J. B. (2014): An Impact Assessment Approach for Car Park Runoff. 13th International Conference on Urban, 7–12 September 2014, Sarawak, Malaysia.
- Speicher, A. (2015): Ergänzungen und Anmerkungen zum Bericht „Einführung in die dezentrale Niederschlagswasserbehandlung für Verkehrsflächen und Metaldachabflüsse“ der TU München, 29.09.2015. http://www.sww.bgu.tum.de/fileadmin/w00bom/www/Forschung/dS_NRW_TUM_Nachtrag.pdf
- Vesting, A., Heinz, E., Helmreich, B., Wichern, M. (2015): Removal of hydrocarbons from synthetic road runoff through adsorptive filters. *Water Sci. Technol.* 72 (5), 801–809.
- Vesting, A. (2017): Entwicklung eines dezentralen Behandlungssystems zum Rückhalt von organischen Spurenstoffen aus Verkehrsflächenabflüssen. Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft, Ruhr-Universität Bochum, ISSN 0178-0980 (noch unveröffentlicht).
- Welker, A., Huber, M. (2014): Dezentrale Behandlungsanlagen für Verkehrsflächenabflüsse – Stand der Technik. 42. Abwassertechnisches Seminar: Zukunftsfähige Bewirtschaftungskonzepte für Niederschlagswasser, Garching, 10. Juli 2014. Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität München, Band 211, ISSN 0942-914X, S. 89–106.
- Welker, A., Harting, K. (2007): Mineralölkohlenwasserstoffe in Verkehrsflächenabflüssen. *Wasser und Abfall*, 3, 20–25.

Zhang, J., Hua, P., Krebs, P. (2013): Potential source contributions and risk assessment of particulate-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in size-fractionated road-deposited sediments. *Water Practice Technol.* 8 (2), 225–233.