

Retentionsbodenfilter zur Entfernung von Mikroschadstoffen aus Mischwasserabschlägen und Kläranlagenablauf^{*)}

Andrea Brunsch, Luk Beyerle, Katharina Knorz, Christoph Brepols, Heinrich Dahmen, Ekkehard Christoffels und Heinrich Schäfer (Bergheim)

Zusammenfassung

Retentionsbodenfilter werden seit vielen Jahren erfolgreich zur Reinigung von Entlastungswassermengen aus Misch- und Trennkanalesationen eingesetzt. Untersuchungen an Retentionsbodenfiltern des Erftverbands haben gezeigt, dass Retentionsbodenfilter neben abfiltrierbaren Stoffen und Nährstoffen auch Schwermetalle, Keime und sogar organische Spurenstoffe in einem hohen Maß zurückhalten können. In halbtechnischen Versuchen konnten langfristig gezeigt werden, dass unter Verwendung von Aktiv- und Pflanzenkohle als Zuschlagstoffe zum Filtersand und unter unterschiedlichen Beschickungsregimes hohe Eliminationsraten für viele Spurenstoffe möglich sind. Seit 2019 ist auf der Kläranlage in Rheinbach (27 000 Einwohnerwerte) eine großtechnische Pilotanlage (RBF^{plus}) mit einer Filterfläche von rund 5 000 Quadratmeter in Betrieb. Das Verfahren kann so prinzipiell eine kostengünstige und naturnahe Alternative zu anderen Verfahren der Mikroschadstoffentfernung darstellen.

Schlagwörter: Abwasserreinigung, kommunal, Spurenstoff, Entfernung, Retentionsbodenfilter, Mischwasser, Kläranlage, Ablauf, Pilotanlage, Erftverband

DOI: 10.3242/kae2020.10.003

Abstract

Retention soil filters for removing micropollutants from combined sewer and sewage treatment plant effluent

Retention soil filters have been successfully used for many years to treat effluent from combined and separated sewer systems. Investigations into the retention soil filters used by the Erftverband have demonstrated that retention soil filters can hold back heavy metals, germs and even micropollutants to a high degree along with substances and nutrients that can be removed by filters. Semi-industrial scale testing provided long-term evidence that high rates of elimination rates are feasible for many micropollutants using activated and vegetable carbon as aggregates to filter sand and using different feed regimes. The sewage treatment plant in Rheinbach (27,000 population equivalents) has been operating an industrial-scale pilot plant (RBF^{plus}) with a filter surface of around 5,000 m² since 2019. In principle, the method can offer a low-cost and near-natural alternative to other methods for removing micropollutants.

Key Words: wastewater treatment, municipal, micropollutant, removal, retention soil filter, combined sewer, sewage treatment plant, effluent, pilot plant, Erftverband

1 Einleitung

Retentionsbodenfilter (RBF) dämpfen Abflussspitzen aus der Siedlungsentwässerung in die Gewässer. Zusätzlich wird Mischwasser bzw. Regenwasser in den Bodenfiltern mechanisch und biologisch gereinigt, bevor es ins Gewässer geleitet wird. Verschmutzungen mit Schwebstoffen, Ammonium, Schwermetallen, Keimen sowie auch mit einigen organischen Spurenstoffe können durch RBF nachweislich und deutlich reduziert werden [1–4]. Weiterhin belegen Untersuchungen des Filtermaterials, dass die Reinigungskapazitäten der RBF auch nach mehr als zehn Jahren Betriebsdauer noch gewährleistet sind. Der Erftverband betreibt großtechnisch 32 RBF zur weitergehenden

Behandlung des Mischwassers aus Regenüberlaufbecken (RÜB) und sieben RBF zur Behandlung von Regenwasser aus Trennsystemen.

Um die Ziele der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) einzuhalten, besteht an vielen Gewässern Handlungsbedarf. Neben der hydraulischen Belastung aus der Siedlungsentwässerung, die vor allem bei kleinen Gewässern eine Rolle spielt, wird der Einsatz von vierten Reinigungsstufen zur weitergehenden Reinigung der Kläranlagenabläufe intensiv diskutiert. Der Rückhalt von Spurenstoffen in Kläranlagen ist durch zusätzliche, zumeist nachgeschaltete Verfahrensstufen, möglich, während Einleitungen aus der Niederschlagsentwässerung in der Regel ohne weitere Behandlung bleiben.

In der Mischkanalisation werden RBF ausschließlich bei Niederschlagsereignissen, die in den vorgelagerten Becken zu Entlastungsereignissen führen, aktiv. Zwischen den Beschickungs-

^{*)} Andrea Brunsch, Heinrich Dahmen, Katharina Knorz und Robert Krump wurde im Jahr 2020 für die Arbeit „Retentionsbodenfilter zur weitergehenden Reinigung von Kläranlagenablauf“ der Ernst-Kuntze-Preis der DWA zugesprochen.

ereignissen bleiben die RBF ungenutzt. Der Erftverband hat untersucht, wie sich die Reinigungskapazität von RBF durch Zuschlagstoffe zum Filtersand weiter steigern lässt und unter welchen Voraussetzungen RBF für die Mitbehandlung von Kläranlagenabläufen bei Trockenwetter genutzt werden können.

2 Halbtechnische Pilotanlage

2.1 Aufbau und Betrieb der Pilotanlage (Material und Methoden)

Um die Wirksamkeit von RBF bei der weitergehenden Reinigung von Kläranlagenablauf zu testen, wurde im Jahr 2014 eine Pilotanlage auf der Kläranlage Rheinbach aufgebaut. Diese besteht aus drei halbtechnischen RBF, die mit einer Filteroberfläche von jeweils 1,54 m² in zylindrische Behälter eingebaut und mit verschiedenen Filtermaterialien ausgestattet wurden (Abbildung 1). Zwei der Filter wurden als konventionelle RBF mit Material (Sand mit CaCO₃ und organischer Substanz) aus zwei bestehenden großtechnischen RBF befüllt. Der dritte RBF enthielt neben dem herkömmlichen Filtermaterial (Sand mit CaCO₃) zusätzliche Beimischungen von Pflanzenkohle in der oberen Schicht und granulierter Aktivkohle (GAK) in der unteren Schicht. Die Filter wurden mit Schilf (*Phragmites australis*) bepflanzt. Das Schilf dient vor allem der Vermeidung von Kolkation, aber auch der Durchlüftung der Filter sowie als Lebensraum für Mikroorganismen, die den Schadstoffabbau begünstigen. Über mehrere Jahre wurden die Filter beschickt, und es wurden regelmäßig Wasserproben am Zufluss, am Abfluss und in drei verschiedenen Schichttiefen innerhalb der Filter entnommen und auf DOC und verschiedene anthropogene Mikroschadstoffe untersucht.

Beschickungsregime

Die Beschickung der Filter mit Kläranlagenablauf erfolgte intermittierend, in Zyklen von 28 Stunden Beschickung und darauffolgenden 56 Stunden Trockenphase. Diese Trockenphasen sind essentiell, um aerobe Verhältnisse im RBF zu gewährleisten. Bei anaeroben Verhältnissen würden am Filtermaterial gebundene Schwermetalle wieder in Lösung gehen und die Nitri-

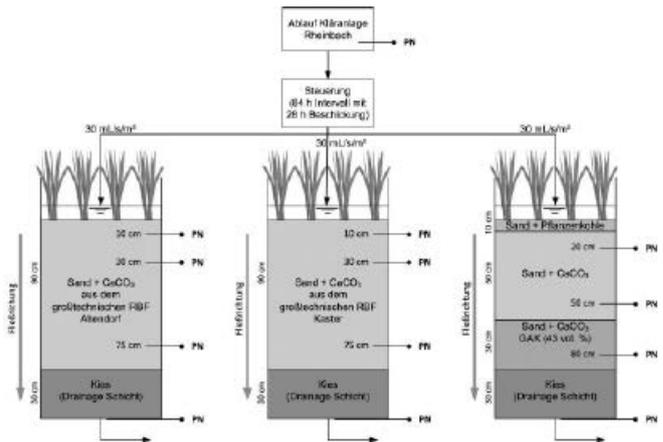


Abb. 1: Schematische Darstellung der Pilotanlage mit Probenahmestellen (PN)

fikation hemmen [5]. Die Beschickungsmenge richtete sich nach dem empfohlenen Drosselabfluss für Bodenfilter von 0,03 l/(s · m²) [5]. Dies entspricht einer Behandlung von 6,5 Bettvolumina je Woche für den gesamten Filterkörper und einer Behandlung von 45 Bettvolumina je Woche für die GAK in Filter 3.

Im Verlauf der Untersuchungen wurden die Beschickungsmengen im Sommer 2017 auf 0,01 l/(s · m²) bzw. 0,06 l/(s · m²) variiert, und im Sommer/Herbst 2018 wurden zusätzlich insgesamt neun Mischwasserabschläge simuliert.

2.2 Ergebnisse der Pilotanlage (RBF zum Rückhalt von Spurenstoffen aus dem Kläranlagenablauf)

Die Proben wurden auf organische Spurenstoffe sowie Nährstoffe, Keime, TOC und DOC analysiert. Aktuell ist das Labor des Erftverbands in der Lage, ca. 150 verschiedene organische Spurenstoffe aus den Bereichen Pharmazeutika, Pestizide, Fungizide, Haushalts- und Industriechemikalien zu analysieren. Der Fokus der Auswertungen lag während der Behandlung des Kläranlagenablaufs bei den organischen Spurenstoffen und nicht auf den Nährstoffen, da diese am Kläranlagenablauf mit NH₄-N < 1 mg/l und P_{ges} < 0,4 mg/l schon sehr niedrig waren.

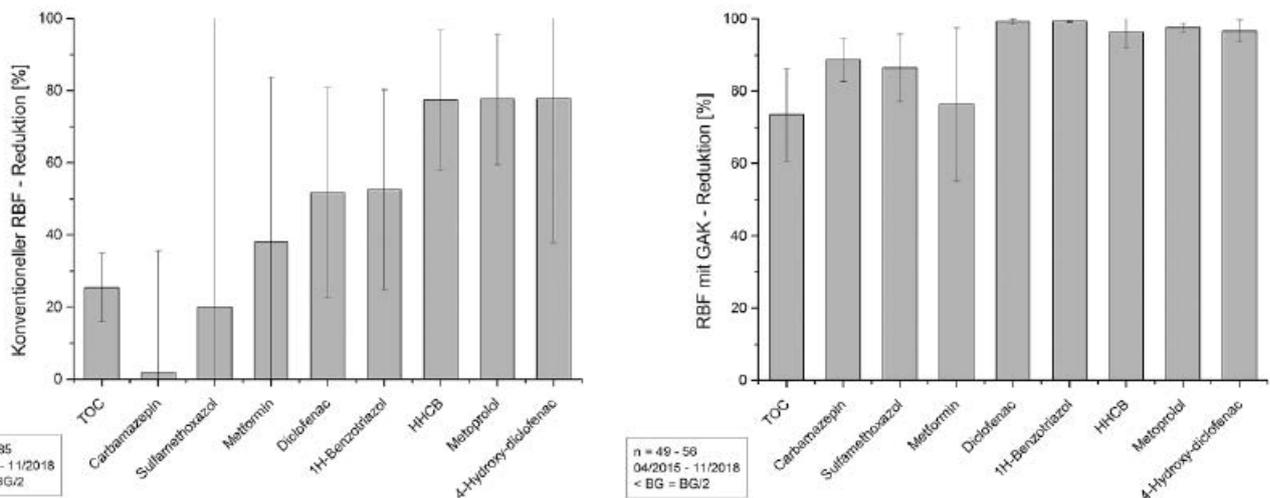


Abb. 2: Reduktion und Standardabweichung von TOC und Spurenstoffen im Filter 1 (konventioneller RBF) (links) und im Filter 3 (RBF mit GAK). BG = Bestimmungsgrenze

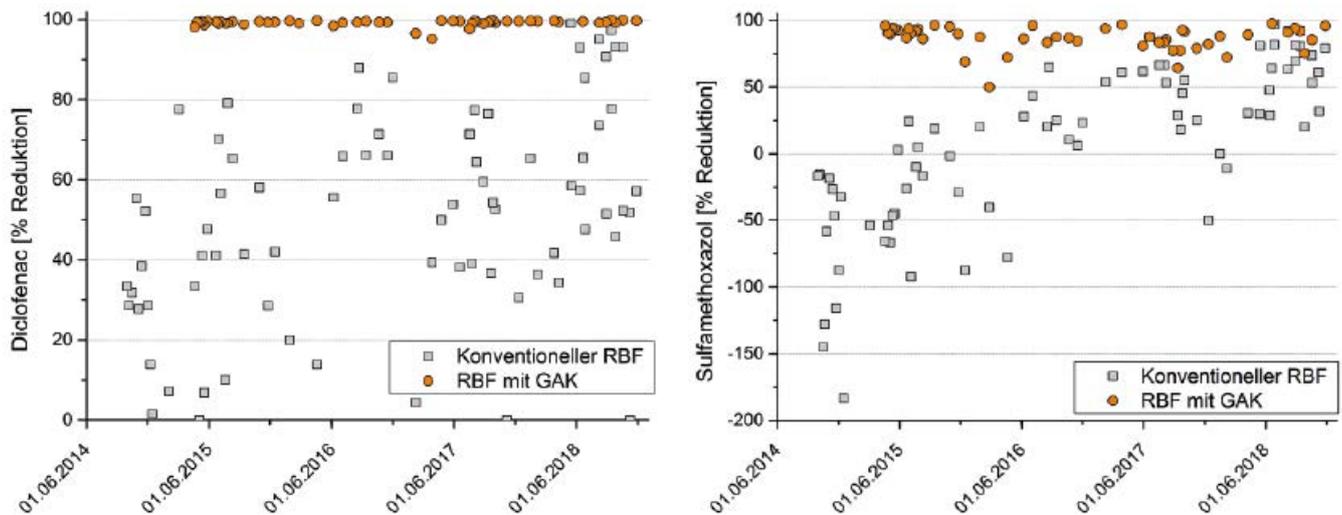


Abb. 3: Reduktion von Diclofenac und Sulfamethoxazol im zeitlichen Verlauf. Konventioneller RBF: $n = 86$, RBF mit GAK: $n = 86$

Die im Folgenden diskutierten Spurenstoffe sind aufgrund ihres regelmäßigen Auftretens [zwischen 52 % und 96 % > Bestimmungsgrenze (BG)] im Kläranlagenablauf von besonderer Relevanz.

Da die Ergebnisse der beiden konventionellen RBF (Filter 1 und Filter 2) sich in Bezug auf die Spurenstoffreduktion nicht signifikant unterschieden, werden im Folgenden die Ergebnisse für Filter 1 stellvertretend für die konventionellen RBF und die Ergebnisse für Filter 3 dargestellt und diskutiert. Die Ergebnisse aus über vier Betriebsjahren und 1420 behandelten Bettvolumina des konventionellen Filters (Filter 1) zeigen ein sehr heterogenes Bild der Spurenstoffreduktion (Abbildung 2, links). Die mittleren Rückhalteraten variierten von 2 % (Carbamazepin) bis 78 % (Metoprolol und 4-Hydroxy-Diclofenac). Grund dafür sind die stoffspezifischen Eigenschaften der untersuchten Stoffe. Carbamazepin wurde schon häufig als sehr persistent in der aquatischen Umwelt beschrieben [6, 7] wohingegen für die mäßig oder sehr gut zurückgehaltenen Stoffe eine Kombination von Sorption und biologischem Abbau als wahrscheinlich erachtet wird [8]. Der Rückhalt in dem RBF mit GAK als Zuschlagstoff (Filter 3) war für alle untersuchten Stoffe besser als in dem konventionellen RBF (Abbildung 2, rechts). Der TOC-Rückhalt konnte durch den Zusatz von GAK von 25 % auf 74 % gesteigert werden. Die Mehrheit der Spurenstoffe wurde im Ablauf des RBF mit GAK nicht mehr nachgewiesen. Bei sechs untersuchten Stoffen [Diatrizoat, Gabapentin, Metformin, Diclofenac, Tris(1-chlor-2-propyl)phosphat (TCPP), 2-Methyl-4-chlorphenoxessigsäure (MCPA)] wurden in mehr als 10 % der Untersuchungen Konzentrationen über der Bestimmungsgrenze gemessen. Allerdings konnte bei keinem der Stoffe ein vollständiger Durchbruch der GAK nachgewiesen werden. Insgesamt wurden im Untersuchungszeitraum von 3,5 Jahren 8700 Bettvolumina gereinigtes Abwasser mit GAK behandelt. Bei technischen Filtersystemen kann GAK mit bis zu ca. 20000 Bettvolumina behandelt werden, bevor es zu einem Durchbruch von Diclofenac kommt [9]. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die rein sorptiven Rückhalteprozesse im RBF noch mehrere Jahre aktiv sind.

Eine hohe Variabilität der Reduktionsraten wurde insbesondere bei den Spurenstoffen im konventionellen RBF festgestellt (Abbildung 2 – Standardabweichung der Reduktionsbalken).

Bei manchen Stoffen konnte eine verbesserte Reduktion mit Zunahme der Betriebsjahre festgestellt werden. So wurde bei Sulfamethoxazol im ersten Betriebsjahr eine negative Reduktion festgestellt. Dies liegt vermutlich an einer Rücktransformation von Metaboliten zur Muttersubstanz Sulfamethoxazol im RBF [8]. Dieses Phänomen wurde auch schon von anderen Autoren in Kläranlagen beobachtet [10]. Im Lauf der Betriebsjahre haben sich die Rückhalteraten gesteigert, und im Jahr 2018 wurde eine Reduktion von > 90 % nachgewiesen. Bei anderen Spurenstoffen, wie zum Beispiel Diclofenac, konnte eine Abhängigkeit der Reduktion mit den Betriebsjahren nicht eindeutig nachgewiesen werden (Abbildung 3). Auch ein Zusammenhang zwischen Temperatur und Spurenstoffrückhalt war nicht eindeutig festzustellen. Mit dem RBF mit GAK andererseits konnten die meisten untersuchten Spurenstoffe konstant gut zurückgehalten werden.

Verhalten der Spurenstoffe im vertikalen Profil

Bei einer Betrachtung der Spurenstoffkonzentrationen in den verschiedenen Filtertiefen wird deutlich, dass in den konventionellen RBF der meiste Rückhalt in den oberen 10 cm Filterschicht geschieht (in Abbildung 4 beispielhaft dargestellt für Metoprolol, Diclofenac und 1H-Benzotriazol). Des Weiteren ist die gemessene organische Substanz in den oberen 10 cm mit 3,5 % (Filter 1) und 3,9 % (Filter 2) höher als in den darunter folgenden Schichten. Ab 30 cm Filtertiefe konnte eine organische Substanz von ≤ 1 % nachgewiesen werden. Durch die stetige Ablagerung von organischen Feststoffen weisen die RBF eine humose Deckschicht auf. Diese begünstigt die im RBF stattfindenden Rückhalteprozesse wie Sorption oder biologischen Abbau [8]. Daraus lässt sich schließen, dass eine mächtige humose Auflage, die mit den Betriebsjahren zunimmt, sich positiv auf den Spurenstoffrückhalt in den konventionellen Filtern auswirkt.

Bei dem RBF mit GAK (Filter 3) wirken sich vor allem die Zuschlagstoffe positiv auf den Spurenstoffrückhalt aus. Bei einigen Spurenstoffen, wie Metoprolol, 1H-Benzotriazol und Diclofenac (Abbildung 4), zeigte der Einsatz von Pflanzenkohle positive Effekte, die aber noch nicht die Wirkung der obersten humosen Schicht aus den konventionellen RBF erreichte. Die

Pflanzkohle und der neue Filtersand zeigten keine Wirkung bei persistenten Spurenstoffen wie Carbamazepin. Dieser Stoff konnte nur mithilfe der GAK durch den RBF zurückgehalten werden. Somit ist der Einsatz von Pflanzkohle in den oberen Horizonten durchaus sinnvoll, um bei RBF mit neuem Filtermaterial, ohne organische Auflage, ein zu schnelles Beladen der GAK zu verhindern. Bei „älteren“ RBF wird diese Funktion von der natürlichen organischen Auflage übernommen.

Einfluss von Aufenthaltszeit, Beschickungsmengen

Für jeweils einen Monat wurde die Beschickungsrate auf 0,01 l/(s · m²) gesenkt und auf 0,06 l/(s · m²) angehoben, entsprechend der Grenzwerte aus [5]. Damit kam es zu einer Anhebung bzw. Reduktion der Aufenthaltszeit von 3,15 Stunden auf 9,5 Stunden bzw. 1,5 Stunden. Während die veränderten Aufenthaltszeiten keinen Einfluss auf persistente Stoffe wie Carbamazepin zeigen, führt die verlängerte Retentionszeit für eine Vielzahl der Stoffe zu einem deutlich besseren Rückhalt. Zum Beispiel verbesserte sich für 1H-Benzotriazol und TCPP die Reduktion durch die erhöhten Aufenthaltszeiten um 13 % bzw. 30 %, wohingegen die geringere Aufenthaltszeit zu einer Verminderung um 18 % bzw. 21 % führte. Durch die Erhöhung der Aufenthaltszeit konnten im konventionellen Filter für manche Stoffe Reinigungsleistungen vergleichbar mit dem RBF mit GAK erzielt werden. Metoprolol und Diclofenac wurden zu > 90 % bei einer Beschickungsrate von 0,01 l/(s · m²) reduziert, was einer Steigerung um 34 % bzw. 58 % verglichen mit den bis dahin gemessenen Werten entspricht. Aufgrund der guten Adsorptionsfähigkeiten der GAK hat die Änderung der Aufenthaltszeiten keinen oder nur geringen Einfluss auf das Reduktionsverhalten des Filters 3.

Simulation von Mischwasserabschlägen während des Regelbetriebs

Um die duale Nutzung des RBF zu testen, wurden an einem der konventionellen Filter Mischwasserabschläge simuliert. Diese Abschläge fanden jeweils zwischen den Beschickungsphasen mit Kläranlagenablauf mit einer Trockenphase von 18 Stunden statt. Die hohen Ammoniumstickstoff Konzentrationen aus dem Mischwasser (16 mg/L) konnten durch den RBF nahezu vollständig (97 %) zurückgehalten werden (Abbildung 5). Ein Anstieg von Nitratstickstoff im Ablauf des RBF deutet darauf hin, dass im RBF eine Nitrifizierung stattfindet. Auch an dem darauffolgenden Tag, während der Beschickung mit Kläranlagenablauf, konnte eine Zunahme von Nitratstickstoff um 11 % gemessen werden. Das Nitrat stammt ebenso aus Nitrifizierungsvorgängen im RBF. Die Reduktion von Spurenstoffen aus den Mischwasserabschlägen war vergleichbar mit der Reduktion von Spurenstoffen aus dem Kläranlagenablauf. So konnte zum Beispiel Diclofenac zu 71 % aus dem Mischwasser zurückgehalten werden. Der Rückhalt in den darauffolgenden Kläranlagenablaufbeschickungen war 67 % (Abbildung 5). Daraus lässt sich folgern, dass sich die Mischwasserabschläge nicht negativ auf die Spurenstoffreduktion des Regelbetriebs auswirken [8].

Abschließend und als Ergebnis der mehr als vier jährigen Untersuchungen lässt sich festhalten, dass sich RBF dazu eignen, den Kläranlagenablauf weitergehend zu reinigen. Selbst konventionelle RBF eignen sich zur Reduktion von bestimmten

NKB-Ablaufrinnen direkt an der Betonwand.



PETERS-Ablaufrinnen nach dem neuesten Stand der Technik:

- Verringerung des Schlammabtriebs durch kreisrunde Edelstahlrinnen an der Wand (Empfehlung der DWA-A 131)
- einfache Reinigung mit der richtigen Edelstahlqualität
- verbesserter Ablauf durch Gefälle



Die grünen Stücker 3 • DE-65606 Villmar-Aumenu
 Tel. +49 (0) 64 74 - 88 24 0-0 • Fax +49 (0) 64 74 - 88 24 0-20
 info@petersgmbh.de

www.petersgmbh.de

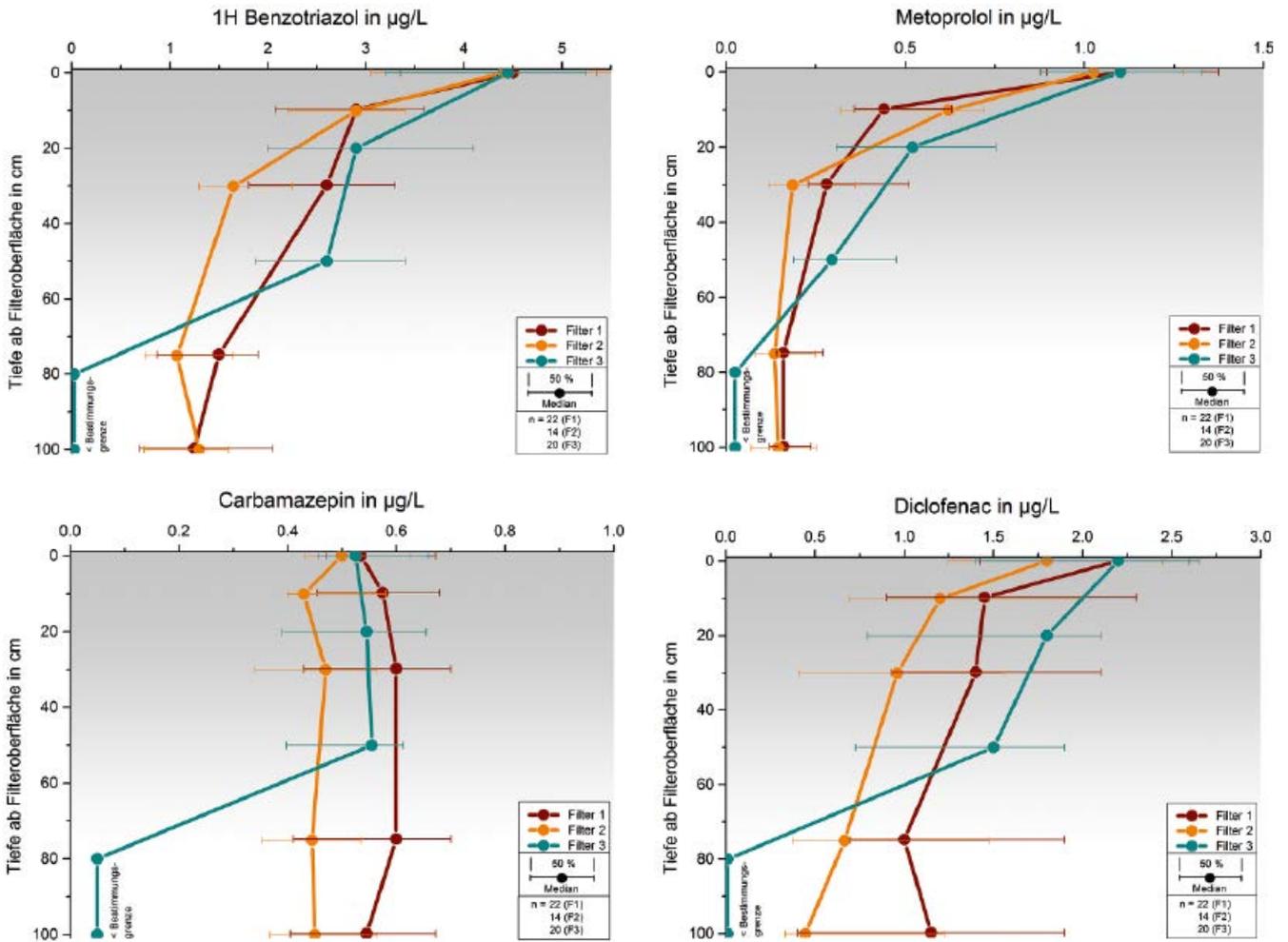


Abb. 4: Spurenstoffkonzentrationen im Tiefenprofil der drei untersuchten halbtechnischen RBF. Ergebnisse aus den Untersuchungsjahren 2016–2018

Spurenstoffen. Ist es jedoch das Ziel, auch die persistenten Stoffe aus dem Abwasser zu entfernen, hat sich der Einsatz von GAK als Zuschlagsstoff im RBF als sinnvoll erwiesen. Somit stellt der RBF^{plus} eine naturnahe und wartungsarme Alternati-

ve zu den bisher bekannten vierten Reinigungsstufen dar, mit der zusätzlichen Funktion, dass hier auch Mischwasser im Ab-schlagsfall gereinigt werden kann. Der Vorteil des RBF^{plus} im Gegensatz zu technischen vierten Reinigungsstufen ist, dass hier mehrere Prozesse des Stoffrückhalts ineinandergreifen. Stoffe werden, je nach ihren physikalisch-chemischen Eigenschaften, sorbiert und/oder unterliegen der Transformation durch Mikroorganismen. Weiterhin ist eine Aufnahme durch das Schilf denkbar. Dies wurde hier jedoch nicht untersucht und wäre Thema für weitere Forschungsvorhaben. Nach Inbetriebnahme von RBF mit neuem Filtermaterial einschließlich GAK bzw. Pflanzenkohle wirken hauptsächlich die sorptiven Prozesse. Anschließend, nach einer Etablierung einer mikrobiologischen Gemeinschaft, werden diese unterstützt durch biologische Transformation der Stoffe. Demzufolge ist davon auszugehen, dass der RBF^{plus} eine lange Lebensdauer besitzt, die über den bisher untersuchten Zeitraum weit hinausgeht.

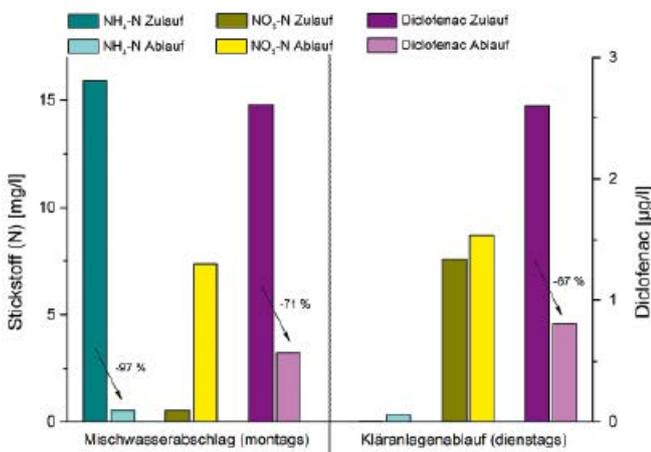


Abb. 5: Duale Nutzung eines konventionellen RBF: Konzentrationen der Stickstoffverbindungen und Diclofenac am Zu- und Ablauf eines RBF mit 18 h Trockenphase zwischen den Beschickungen (n = 4)

3 Großtechnische Umsetzung des Pilotvorhabens RBF^{plus}

3.1 Grundlagen der Planung und Funktionsweise

Der Erftverband betreibt auf dem Gelände der Kläranlage Rheinbach ein RÜB mit nachgeschaltetem Regenrückhalte-

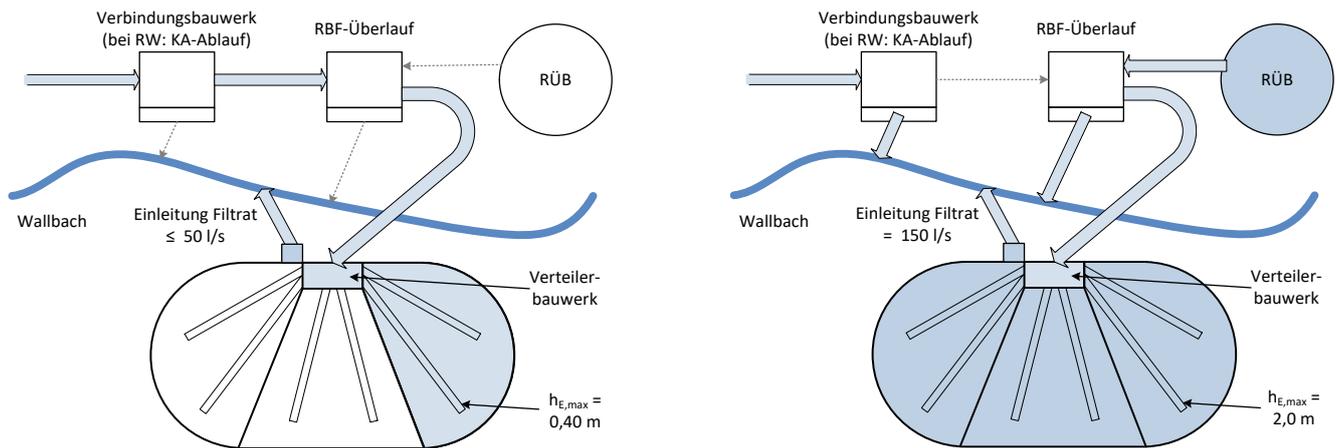


Abb. 6: Schematische Darstellung der Fließwege bei Trockenwetter (links) und Regenwetter mit Beaufschlagung des RBF (rechts), $h_{E,max}$ = maximale Einstauhöhe

becken (RRB) zur Mischwasserbehandlung. Bei Regenwetter kommt es statistisch einmal pro Jahr zu einer Einleitung von bis zu 2300 l/s aus dem RRB in den Wallbach, der nur eine sehr geringe natürliche Wasserführung aufweist. Um die Anforderung der WRRL im immissionsorientierten Nachweis für den Wallbach einzuhalten, ist das einjährige Ereignis auf 150 l/s zu drosseln. Der Erftverband hatte daher zunächst einen herkömmlichen RBF mit einer Filterfläche von rund 3500 m² geplant, um die hydraulische und stoffliche Belastung des Wallbaches aus der Siedlungsentwässerung zu verringern. Insgesamt treten aber in dem Einzugsgebiet durchschnittlich weniger als sechs Regenereignisse pro Jahr auf, die zu einem Überlauf des RÜB/RRB und damit zur Beschickung des RBF führen. In der Folge wäre der RBF nur an ca. zehn Tagen pro Jahr (für durchschnittlich 1,6 Tage) in Betrieb. Ohne eine zusätzliche Bewässerung des Filters mit Wasser aus dem Ablauf der Kläranlage waren bei den langen Intervallen zwischen den Beschickungen wiederkehrende Trockenheitsschäden an der Schilfbepflanzung und unerwünschter Aufwuchs anderer Pflanzen zu befürchten. Durch Anwendung der Erkenntnisse aus den halbtechnischen Versuchen auf die Planung des großtechnischen RBF konnten so mögliche Betriebsprobleme des Filters vermieden und gleichzeitig die Konzentration an Mikro-schadstoffen im Ablauf der Kläranlage verringert werden.

Der Abfluss der Kläranlage Rheinbach wird bereits seit der letzten Erweiterung der Kläranlage Ende der 1990er-Jahre

über eine Flockungsfiltration (ein abwärts durchströmter Sandfilter) als dritte Reinigungsstufe nachbehandelt und beträgt bei Trockenwetter im Mittel 50 l/s und bei Regenwetter in der Spitze bis zu 200 l/s. Bei einer Filtergeschwindigkeit des RBF von 0,03 l/(s · m²) wäre damit für die Filtration des mittleren Trockenwetterabflusses der Kläranlage eine Fläche von 1650 m² erforderlich. Um die dauerhafte Funktion sicherzustellen, wurde der RBF^{plus} mit einer Filterfläche von 5000 m² geplant und in drei gleichgroße Segmente von je 1670 m² Oberfläche unterteilt. Es wird abwechselnd immer nur ein Segment für 24 Stunden befüllt und in den nachfolgenden 48 Stunden wieder entleert. So können die erforderliche Belüftung und das aerobe Milieu im Bodenkörper erhalten werden.

Der Zulauf in die einzelnen Segmente erfolgt über je zwei lang gestreckte Trockenwetterrinnen. Diese bestehen aus flachen, U-förmig profilierten Betonfertigteilen, die auf dem Filterkörper aufliegen. Der Zulauf soll dadurch möglichst gleichmäßig auf die gesamte Filterfläche der Segmente verteilt werden, um punktuelle Belastungen im Einlaufbereich zu reduzieren. Die Rinnen sind begehbar und verfügen darüber hinaus in regelmäßigen Abständen über seitliche Öffnungen. Diese können mit Steckelementen verschlossen oder gedrosselt werden, um im Bedarfsfall den Zulauf gezielt in andere Bereiche des Filters zu leiten. Bei Mischwasserzufluss zum Bodenfilter wird die Beschickung mit Kläranlagenablauf automatisch unterbrochen (Abbildung 6). Der Ablauf der Kläranlage gelangt

Segment 1		Segment 2		Segment 3	
100 cm	klassischer RBF-Aufbau Filtersand mit Zuschlagstoff 20% CaCO ₃	10 cm	Deckschicht (Filtersand mit 20% GAK)	10 cm	Deckschicht (Filtersand mit 20% GAK)
		60 cm	Filtersand mit Zuschlagstoff 20% CaCO ₃	60 cm	Filtersand mit Zuschlagstoff 20% CaCO ₃
		30 cm	Filtersand mit 20% CaCO ₃ + 30% GAK	30 cm	Filtersand mit 20% CaCO ₃ + 40% GAK
25 cm	Drainagekies	25 cm	Drainagekies	25 cm	Drainagekies

Abb. 7: Filteraufbau in den drei Filtersegmenten – Referenzfilter (Segment 1) und zwei Filter mit unterschiedlichen Anteilen an GAK



Abb. 8: Einbringen des Filtermaterials aus Filtersand und GAK mit einem Teleskopförderer (links) und der Filter nach Etablierung des Schilfauswuchses im August 2019 (rechts), im Bild ebenfalls zu erkennen sind die Trockenwetterrinnen.

dann für die Dauer des Ereignisses wieder unmittelbar in den Wallbach.

3.2 Filteraufbau

Der Schichtaufbau der Filterkörper und der Anteil an GAK in einzelnen Filtersegmenten ist unterschiedlich (Abbildung 7). Zusammensetzung und Sieblinie des Filtersands des RBF wurden entsprechend den Anforderungen dem RBF-Handbuch Nordrhein-Westfalen ausgewählt. Diese Zusammensetzung wird üblicherweise durch Mischung verschiedener Ausgangssande im Mischwerk erreicht. So besteht grundsätzlich die Möglichkeit, das Filtersubstrat mit geeigneten Zuschlagstoffen (wie zum Beispiel Carbonatbrechsand) zu verbessern.

Segment 1 ist als Referenz mit herkömmlichem Filtersand errichtet worden. Die obere Filterschicht der Segmente 2 und 3 besteht dagegen aus Filtersand mit 20 % Beimischung von GAK. So ist bereits bei Inbetriebnahme eine gewisse Sorptionskapazität für Spurenstoffe gewährleistet und eine Aufwuchsfläche für Mikroorganismen geboten, die die Ausbildung der biologischen Reinigungsleistung beschleunigt. Auf den Einsatz von Pflanzenkohle sowie im halbtechnischen Versuch wurde hier verzichtet, da verlässliche Qualitäten in den erforderlichen Mengen nicht verfügbar waren. Die 60 cm starke mittlere Filterschicht besteht aus herkömmlichem Filtersand mit Carbonatzuschlag. Die untere Filterschicht mit 30 cm Höhe besteht aus dem Filtersand mit Carbonatzuschlag sowie einer zusätzlichen Beimischung von GAK mit unterschiedlichen Volumenanteilen. Die Sandschichten wurden mit rund 5 % Überhöhung eingebaut, um spätere Setzungen des Filtermaterials zu kompensieren.

Bautechnische Umsetzung und Inbetriebnahme

Vor Ausführung der Baumaßnahme musste geklärt werden, wie eine Mischung großer Mengen von GAK und Filtersand sicher, zuverlässig und effizient durchgeführt werden kann. Daher wurden zunächst in Laborversuchen die bodenmechanischen Eigenschaften der GAK sowie ihre Beständigkeit beim Mischen mit Filtersand untersucht. Dazu wurde, wie bereits in den Vorversuchen, eine GAK vom Typ CSC-Aktivkohle

HCFB1050 in der Körnung 0/2 mit einer dem Filtersand entsprechenden Sieblinie verwendet. Der befürchtete mechanische Abrieb der GAK und die damit einhergehende unzulässige Erhöhung des Feinkornanteils konnten auch bei sorgfältiger Zwangsmischung nicht beobachtet werden. Die tatsächliche Sieblinie der Mischung entsprach der zuvor rechnerisch ermittelten Sieblinie. Das Gemisch blieb aber nur stabil, wenn GAK und Filtersand in erdfeuchten Zustand verarbeitet wurden. Andernfalls neigte das Materialgemisch infolge der unterschiedlichen Dichte der Materialien unmittelbar danach zur Entmischung.

Eine Verarbeitung der GAK in der stationären Mischanlage des Lieferanten für den Filtersand war nicht möglich, da eine Kontamination der gesamten Mischanlage mit GAK befürchtet wurde. Daher wurde die GAK schließlich in einer mobilen Anlage auf der Baustelle mit dem fertigen Filtersand vermischt und dann über einen Teleskopförderer im Wechsel mit den anderen Filterschichten lagenweise in den Filter eingebaut (Abbildung 8).

Der RBF^{plus} wurde nach etwa einjähriger Bauzeit im Frühjahr 2019 fertiggestellt und mit Schilf bepflanzt. Nach einer kurzen Phase mit permanentem Einstau ging der RBF zunächst in den Trockenwetterbetrieb über. Danach wurden die Zulaufmengen mit dem zunehmenden Schilfwachstum allmählich gesteigert. Nach Ende der ersten Vegetationsperiode im Herbst 2019 war das Schilf ausreichend angewachsen, und der Filter ging vollständig in Betrieb. Seitdem findet auch die Beschickung zur Mischwasserbehandlung statt.

Begleitendes Untersuchungsprogramm

Für die systematische Beprobung der RBF Segmente wurden, zusätzlich zu einer automatisierten Beprobung des RBF Ablaufs, mehrere tiefengestaffelte Probenahmestellen angelegt (Abbildung 1). Die seit dem Frühjahr 2019 beobachteten Eliminationsraten im Filterbett entsprechen bisher den Erwartungen aus dem vorhergehenden Pilotversuch. Die Beschickung der Filterabschnitte erfolgt gleichmäßig. Aufgrund des Witterungsverlaufs im vergangenen Jahr (Mai 2019 bis Juli 2020) wurde der Filter jedoch bisher nur in geringem Umfang mit Mischwasser aus dem vorgelagerten RÜB/RRB beaufschlagt.

Ausbaugröße [EW]	Kosten	
	RBF ^{plus} mit GAK [ct/m ³]	4. Reinigungsstufe mit Ozon oder GAK [ct/m ³]
27 000	7–14	14–19
9 000	12–20	23–27
3 000	25–35	36–39

Tabelle 1: Spezifische Jahreskosten der Spurenstoffelimination, bezogen auf die behandelte Jahresabwassermenge

Betriebserfahrungen und Beobachtungen der Reinigungsleistung werden im Rahmen eines begleitenden Forschungsvorhabens weiterhin fortlaufend dokumentiert und ausgewertet. Eine abschließende Bewertung der langfristigen Erfahrungen mit der Großtechnik steht daher noch aus.

4 Überlegungen zur Übertragbarkeit und zu Kosten des RBF^{plus}

Technische Anlagen zur Mikroschadstoffelimination auf Kläranlagen sind hinsichtlich ihrer Eignung bereits in zahlreichen Machbarkeitsstudien, Pilotprojekten und großtechnischen Vorhaben betrachtet worden. Es bestehen daher mittlerweile hinreichende Kenntnisse zur Eignung der Verfahren, aber auch zu den damit verbundenen betrieblichen Aufwendungen und Kosten. Ein alternatives Verfahren wie der vorgestellte RBF^{plus} kann sich nur dann bewähren, wenn es neben einer vergleichbaren Reinigungsleistung zusätzliche Vorteile im Hinblick auf die Betriebsführung und die Kosten bietet. Es ist zu beachten, dass in der hier dargestellten Form der RBF^{plus} eine Teilstrombehandlung des Kläranlagenablaufs bietet. Die Auswirkungen auf die Gesamtbilanz der emittierten Fracht an Mikroschadstoffen gegenüber einer Vollstrombehandlung können aber in vielen Fällen als gering angesehen werden [11], sind aber im Einzelfall zu bewerten.

In einer Machbarkeitsstudie zur Spurenstoffelimination in der Kläranlage Rheinbach hat der Erftverband untersucht, wie die Kosten eines RBF^{plus} mit GAK gegenüber anderen technischen Verfahren der Spurenstoffelimination zu bewerten sind [11]. Dabei zeigt sich, dass die Jahreskosten für eine Anlage mit Teilstrombehandlung und einer Anschlussgröße von 27 000 EW günstiger sind als für eine nachgeschaltete Ozonung oder eine Festbettfiltration mit GAK. Dabei sind die Herstellkosten zwar zunächst höher, die Betriebskosten in Form von Personal und Energieaufwand sowie Betriebsmittelverbräuchen liegen etwa 40 % unter denen technischer Anlagen.

Ein ausgeprägter Skaleneffekt der Herstell- und Betriebskosten für die Spurenstoffelimination führt zu höheren spezifischen Kosten bei kleiner werdender Anlagenkapazität [11, 12]. Insbesondere für Kläranlagen mit einer Anschlussgröße von weniger als 20 000 EW zeigen die etablierten Verfahren mit Einsatz von granulierter bzw. Pulveraktivkohle oder Ozonbehandlung aufgrund der aufwendigen Technik sowie des Aufwands für Bedienung, Wartung und Instandhaltung überproportional steigende Kosten an. Dennoch kann aus gewässerökologischer Sicht eine Spurenstoffelimination auch auf kleinen Kläranlagen wünschenswert sein, wenn diese an empfindlichen und schutzwürdigen Gewässern liegen. Modellhafte Kostenermittlungen für Anlagen mit Ausbaugrößen 9 000

und 3000 EW zeigen, dass für diese Anlagengrößen die Jahreskosten eines RBF^{plus} in einer Größenordnung von 50 % der Kosten für vergleichbare technische Anlagen liegen können (Tabelle 1). Dies gilt insbesondere, wenn eine kombinierte Nutzung für die Behandlung des Trockenwetterabflusses der Kläranlage und der Mischwasserentlastungen stattfindet. Die große Spannweite der spezifischen Kosten für den RBF^{plus} ergibt sich durch die Nutzung von Synergien, wenn bei Errichtung eines erforderlichen RBF für die Mischwasserbehandlung zur Behandlung des Kläranlagenablaufs lediglich die zusätzlichen Kosten für die Erweiterung eines herkömmlichen RBF zum RBF^{plus} realisiert werden müssen.

Die bisherigen Erfahrungen mit der halbtechnischen sowie der großtechnischen Pilotanlage basieren auf der Beschickung des RBF^{plus} mit dem Ablauf des Sandfilters der Kläranlage Rheinbach. Der Einfluss einer erhöhten Feststoffbelastung aus dem Ablauf von Nachklärbecken kann daher derzeit noch nicht umfassend beurteilt werden. Die zulässige Feststoffbelastung von RBF beträgt maximal 7 kg/(m² · a) [5]. Überschlägliche Rechnungen zeigen aber, dass dieser Grenzwert für die Feststoffbelastung von RBF nur bei ungewöhnlich hohem Feststoffabtrieb aus der Nachklärung oder einer sehr hohen Belastung aus Mischwasserentlastungen überschritten wird. Es erscheint daher nicht erforderlich, kleinere Kläranlagen zuerst mit einer nachgeschalteten Filtration auszustatten, um einen RBF^{plus} zu betreiben.

Das Potenzial für die Anwendung des RBF^{plus}-Konzepts für kleinere und mittlere Kläranlagen in eher ländlich strukturierten Gebieten ist gegeben, wenn bereits RBF oder zentrale RÜB/RRB in unmittelbarer Nähe der Kläranlage liegen und ausreichende Freiflächen zum Bau eines RBF vorhanden sind. So verfügen zum Beispiel 19 von 20 zukünftig verbleibende Kläranlagen im Gebiet des Erftverbands [13] mit einer Ausbaugröße zwischen 3 000 und 132 000 EW über ein zentrales RÜB entweder auf dem Kläranlagengelände oder in unmittelbarer Nähe. Bei neun Anlagen ist sogar bereits ein RBF vorhanden, und an vier Standorten davon ist der RBF bereits heute so groß, dass der gesamte Trockenwetterablauf der Kläranlage auf der Filterfläche nachbehandelt werden könnte. Für die Situation in Nordrhein-Westfalen konnte beispielhaft durch eine Auswertung von Koordinaten der im Informationssystem ELWAS-WEB [14] erfassten Einleitstellen ermittelt werden, dass von den kommunalen Belebungsanlagen mit einer Ausbaugröße von 20 000 EW oder kleiner rund ein Viertel ein RÜB in unmittelbarer Nachbarschaft besitzt, bei dem der Abstand zwischen den Einleitstellen weniger als 100 m beträgt. Hier wäre ein Potenzial zur Anwendung zumindest in Bezug Anlagengröße und räumliche Nähe gegeben.

5 Fazit

Retentionsbodenfilter leisten bereits heute in Misch- und Trennsystemen einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der hydraulischen Beanspruchung sowie Nähr- und Schadstoffbelastung von Oberflächengewässern. Obwohl in der Regel lediglich Sand mit einem Zuschlag von Calciumcarbonat als Filtermaterial eingebaut wurde, besitzen die RBF eine beachtliche Reinigungsleistung für viele der diskutierten Spurenstoffe.

Das Konzept des RBF^{plus} nutzt die schon vorhandenen Behandlungskapazitäten im RBF auch für die Reinigung des Kläranlagenablaufes bei Trockenwetter. Wird das Filtermaterial zu-

sätzlich mit GAK versetzt, kann die Rückhaltung für Spurenstoffe im RBF auf das Niveau der bekannten Verfahren mit Aktivkohle oder Ozon gesteigert werden. Durch die geringe Flächenbelastung und die im RBF nachgewiesenen Abbauprozesse erscheint eine Standzeit des Filtermaterials im RBF von deutlich über zehn Jahren möglich. Wie sich die Reinigungsleistung langfristig entwickelt und welche Standzeit tatsächlich erreicht werden kann, wird derzeit großtechnisch auf der Kläranlage Rheinbach des Erftverbands weiter untersucht.

Besonders für kleinere Kläranlagen und vor allem dann, wenn der Bau eines RBF zur Mischwasserbehandlung im Umfeld der Kläranlage ohnehin notwendig ist, kann eine Spurenstoffelimination mit einem RBF^{plus} wesentlich günstiger zu realisieren sein als mit den etablierten Verfahren. Das Konzept befindet sich noch in der Erprobungsphase, die langfristigen positiven Erfahrungen mit den 39 konventionellen Retentionsbodenfiltern des Erftverbands und die seit 2014 laufenden Versuche im halbertechnischen Maßstab lassen jedoch Optimismus bezüglich der Zukunft des Verfahrens zu.

Dank

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekts „RBF Rheinbach“ sowie des EU-Interreg-Projekts TAPES „Transnational Action Plan on Emerging Substances“ und des EU-Horizon-2020-Projekts „AquaNES-Demonstrating Synergies in Combined Natural and Engineered Processes for Water Treatment Systems“ (Grant Agreement Nr. 689450) durchgeführt. Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung des Projekts. Dank geht auch an die Kolleginnen und Kollegen des Erftverbands, die direkt oder indirekt an den Projekten und der Umsetzung der Versuchsanlagen beteiligt waren.

Literatur

- [1] E. Christoffels, F. M. Mertens, T. Kistemann, C. Schreiber: Retention of pharmaceutical residues and microorganisms at the Altendorf retention soil filter, *Water Science and Technology* 2014, 70 (9), 1503–1509, doi: 10.2166/wst.2014.404
- [2] M. Scheurer, S. Heß, F. Lüddecke, F. Sacher, H. Güde, H. Löffler, C. Gallert: Removal of micropollutants, facultative pathogenic and antibiotic resistant bacteria in a full-scale retention soil filter receiving combined sewer overflow, *Environmental Science: Processes & Impacts* 2015, 17 (1), 186–196, doi: 10.1039/C4EM00494A
- [3] K. Tondera, S. Koenen, J. Pinnekamp: Survey monitoring results on the reduction of micropollutants, bacteria, bacteriophages and TSS in retention soil filters, *Water Science and Technology* 2013, 68 (5), 1004–1012, doi: 10.2166/wst.2013.340
- [4] Forschungsprojekt ReSMo: Überprüfung innovativer Maßnahmen zur Reduzierung von Spurenstoffen und Mikroorganismen in Fließgewässern, 2018
- [5] D. Grotehusman, M. Uhl, S. Fuchs, B. Lambert: *Retentionsbodenfilter – Handbuch für Planung, Bau und Betrieb*, 2. Aufl., Umweltministerium Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2015
- [6] M. Clara, B. Strenn, N. Kreuzinger: Carbamazepine as a possible anthropogenic marker in the aquatic environment: Investigations on the behaviour of Carbamazepine in wastewater treatment and during groundwater infiltration, *Water Research* 2004, 38 (4) 947–954, doi: 10.1016/j.watres.2003.10.058
- [7] Y. Luo et al.: A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment, *Science of the Total Environment*. 2014, 473–474, 619–641, doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.12.065
- [8] A. F. Brunsch, T. L. ter Laak, E. Christoffels, H. H. M. Rijnaarts, A. A. M. Langenhoff: Retention soil filter as post-treatment step to remove micropollutants from sewage treatment plant effluent, *Science of the Total Environment* 2018, 637–638, 1098–1107, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.063
- [9] F. Benstoem, A. Nahrstedt, M. Boehler, G. Knopp, D. Montag, H. Siegrist, J. Pinnekamp: Performance of granular activated carbon to remove micropollutants from municipal wastewater – A meta-analysis of pilot- and large-scale studies, *Chemosphere* 2017, 185, 105–118, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.06.118
- [10] M. Radke, C. Lauwigi, G. Heinkele, T. E. Mürdter, M. Letzel: Fate of the antibiotic sulfamethoxazole and its two major human metabolites in a water sediment test, *Environmental Science and Technology* 2009, 43 (9), 3135–3141, 2009, doi: 10.1021/es900300u
- [11] H. Schäfer et al.: Abschlussbericht „Mikroschadstoffe in der Erft – Bilanzierung/Modellierung Konzepte zur Reduzierung“, 2018, https://www.erftverband.de/wp-content/uploads/2019/05/erftverband_abschlussbericht-mikroschadstoffe-in-der-erft-oktober2018-klein.pdf (zugegriffen am 9. Juni 2020)
- [12] ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW: *Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination*, 2. Aufl., Köln, 2016
- [13] W. Lindner, L. Bollig, C. Brepols: *Masterplan Abwasser 2025*, Erftverband, Bergheim, 2014, <https://www.erftverband.de/wp-content/uploads/2014/06/faltblatt-masterplan-abwasser-2025.pdf>
- [14] ELWAS Web, <https://www.elwasweb.nrw.de/elwas-web/index.jsf> (zugegriffen am 9. Juni 2020)

Autoren

Andrea Brunsch (vormals Erftverband), andrea.brunsch@web.de

Luk Beyerle, luk.beyerle@erftverband.de

Katharina Knorz, katharina.knorz@erftverband.de

Christoph Brepols, christoph.brepols@erftverband.de

Heinrich Dahmen (IBC-Ingenieure vormals Erftverband), heinrich.dahmen@ibc-ingenieure.com

Dr. Ekkehard Christoffels (IBC-Ingenieure vormals Erftverband), ekkehard.christoffels@ibc-ingenieure.com

Prof. Heinrich Schäfer, heinrich.schaefer@erftverband.de

Erftverband

Am Erftverband 6, 50126 Bergheim/Erft

KA

www.dwa.de



Gut vernetzt? Folgen Sie der DWA auf LinkedIn!