

Kurzbericht

zum Forschungsvorhaben

Untersuchungen der Rückhaltemechanismen von Retentionsbodenfiltern und Optimierung ihrer Bau- und Betriebsweise (ReB-Op)

im Rahmen des Förderprogramms

„Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW“ –
Förderbereich 6:

Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur Abwasserbeseitigung

Gefördert vom

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



Aachen, den 30.06.2017

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp
(Institutsleiter)

Projektkonsortium

Partner	Bearbeiter
 <p>Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp Mies-van-der-Rohe-Str. 1 52074 Aachen Tel.: 0241 80 25207 Fax: 0241 80 22285 Email: isa@isa.rwth-aachen.de www.isa.rwth-aachen.de</p>	<p>Dr.-Ing. Katharina Tondera Jan Ruppelt, M.Sc.</p>
 <p>Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn Prof. Dr. A. Meyer Nussallee 13 53115 Bonn Tel.: 0228 73 2965 Fax: 0228 73 2782 Email: g.welp@uni-bonn.de http://www.inres.uni-bonn.de</p>	<p>Dr. Gerhard Welp Dr. Ute Arnold Dr. Melanie Bläsing</p>
 <p>Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn (IHPH) Prof. Dr. med. Martin Exner Sigmund-Freud-Straße 25 53105 Bonn Tel: +49-228-287-15520 http://www.ihph.de/</p>	<p>Prof. Dr. med. Thomas Kistemann (MA geogr.) Dr. rer. nat. Christiane Schreiber Regina Brang-Lamprecht Alexander Flegler, B.Sc. Kristina Militzer, B.Sc.</p>

Inhalt

1	Veranlassung und Zielsetzung.....	3
2	Stand des Wissens.....	4
3	Material und Methoden	8
4	Zusammenfassung der Ergebnisse	16
5	Empfehlungen für die Praxis	20
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	21
7	Literatur.....	23

1 Veranlassung und Zielsetzung

Retentionsbodenfilter werden seit Anfang der 1990er Jahre erfolgreich in der Mischwasserbehandlung eingesetzt. Sie können eine Maßnahme darstellen, um sowohl die Vorgaben der Wasserrahmenrichtlinie als auch hygienische Vorgaben bei Mischwassereinleitungen einzuhalten und sind derzeit die einzigen biologischen Behandlungsanlagen für Mischwasserentlastungen (FELMEDEN, 2013). Allerdings ist der Kenntnisstand über den Rückhalt bestimmter Stoffe, wie z.B. Spurenstoffe, gering und somit ist auch keine Möglichkeit gegeben, diesen Rückhalt zu optimieren.

In der Vergangenheit sind Untersuchungen an Retentionsbodenfiltern überwiegend an großtechnischen Anlagen durchgeführt worden, insbesondere im Rahmen der vom MKULNV geförderten Projekte „Betriebsoptimierung von Retentionsbodenfiltern im Misch- und Trennsystem“, Phase I (PINNEKAMP et al., 2013) und II (PINNEKAMP et al., 2016). Es wurden zudem zahlreiche Laborversuche durchgeführt: unter anderem sind standardisierte Säulenversuche entwickelt worden, um verschiedene Substrattypen zu vergleichen (DITTMER, 2006; UHL et al., 2007; WALDHOFF, 2008; WOZNIAK, 2008).

Hinsichtlich Mikroorganismen konnte WALDHOFF (2008) eine Reduktion von ein bis zwei Log-Stufen bei einigen Indikatororganismen feststellen. Dies ist jedoch bei empfindlichen Gewässern häufig nicht ausreichend, so dass WALDHOFF (2008) eine Hintereinanderschaltung von Bodenfiltern zum weiteren Keimrückhalt empfiehlt.

Bisher gibt es keine Untersuchungen auf Versuchsanlagen, die die Funktionsweise von Retentionsbodenfiltern möglichst genau nachbilden und in denen über einen längeren Zeitraum unter definierten Bedingungen Mischwasser aufgegeben werden kann, um die verschiedenen Betriebszustände eines Bodenfilters zu simulieren und miteinander vergleichen zu können.

Daher wurde im vorliegenden Projekt eine halbtechnische Versuchsanlage errichtet, in der unter definierten Bedingungen Untersuchungen an vier parallel bzw. hintereinander geschalteten Retentionsbodenfiltern durchgeführt werden konnten. Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurden übertragbare Vorschläge für eine fundierte Betriebsoptimierung bestehender großtechnischer Anlagen unterbreitet sowie Optimierungsvorschläge für die Bemessung und Gestaltung von Neukonstruktionen erarbeitet. Hierbei wurde der Rückhalt verschiedener Mischwasserinhaltsstoffe, insbesondere von ausgewählten Spurenstoffen, pathogenen Mikroorganismen, Schwermetallen, Stickstoff- und Phosphatverbindungen in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen und dem Filteraufbau bestimmt.

2 Stand des Wissens

Retentionsbodenfilter (RBF) sind die derzeit einzigen standardisierten biologischen Behandlungsanlagen für Mischwasserentlastungen, welche die stoffliche Belastung von durchaus mehreren tausend Kubikmetern innerhalb weniger Stunden verringern können (FELMEDEN, 2013). Für das Bundesland Nordrhein-Westfalen wurden Richtlinien für Bau und Betrieb von RBF im Retentionsbodenfilterhandbuch (MUNLV, 2003) erstmals formuliert. 2015 erfolgte eine Überarbeitung (MKULNV, 2015). Diese Richtlinien stimmen inhaltlich weitgehend mit denen im Merkblatt DWA-M 178 (DWA, 2005) überein, welches sich derzeit in Überarbeitung zu einem Arbeitsblatt befindet (DWA, 2017). Die ersten Retentionsbodenfilter im Mischsystem gingen Ende der 1990er Jahre in Nordrhein-Westfalen (NRW) in Betrieb (TONDERA und PINNEKAMP, 2016). Mittlerweile gibt es in NRW 159 Retentionsbodenfilter (Stand 31.12.2014) mit einem Rückhaltevolumen von 379.734 m³, von denen der Großteil (rund 74 %) im Mischsystem angeordnet ist (MKULNV, 2015).

Laut DWA-M 178 (DWA, 2005) ist ein Retentionsbodenfilter ein Bauwerk zur weitergehenden Regenwasserbehandlung, bestehend aus einem Regenbecken und einem nachgeschalteten Filterbecken, das dazu geeignet ist, Gewässerbelastungen durch Niederschlagsereignisse zu verringern. Notwendig werden Retentionsbodenfilter vor allem dann, wenn neben Sediment- und Schwermetalleinträgen von Niederschlagsabflüssen auch Nährstoffe wie Phosphor und Stickstoff in die Gewässer eingetragen werden (insbesondere im Mischsystem). Auch in Trinkwasserschutzgebieten bei Talsperren oder karstgeprägter Grundwassergewinnung sind Retentionsbodenfilter in vielen Fällen unverzichtbar. Eine systematische Einordnung von Retentionsbodenfiltern bei Einsatz im Mischsystem ist in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1: Systematische Einordnung von Retentionsbodenfiltern bei Einsatz im Mischsystem (DWA, 2013)

Regenüberlaufbecken (RÜB)			Stauraumkanäle mit Entlastung (SK)				Retentionsbodenfilterbecken (RBF)	Regenrückhalteanlagen (RRA)	
Fangbecken	Durchlaufbecken	Verbundbecken	Stauraumkanäle mit oben liegender Entlastung	Stauraumkanäle mit unten liegender Entlastung	Stauraumkanäle mit zwischenliegender	Stauraumkanäle als Kaskade	Durchlaufbecken	Regenrückhaltebecken	Regenrückhaltekanäle
FB	DB	VB	SKO	SKU	SKZ	SKK	DFiB	RRB	RRK

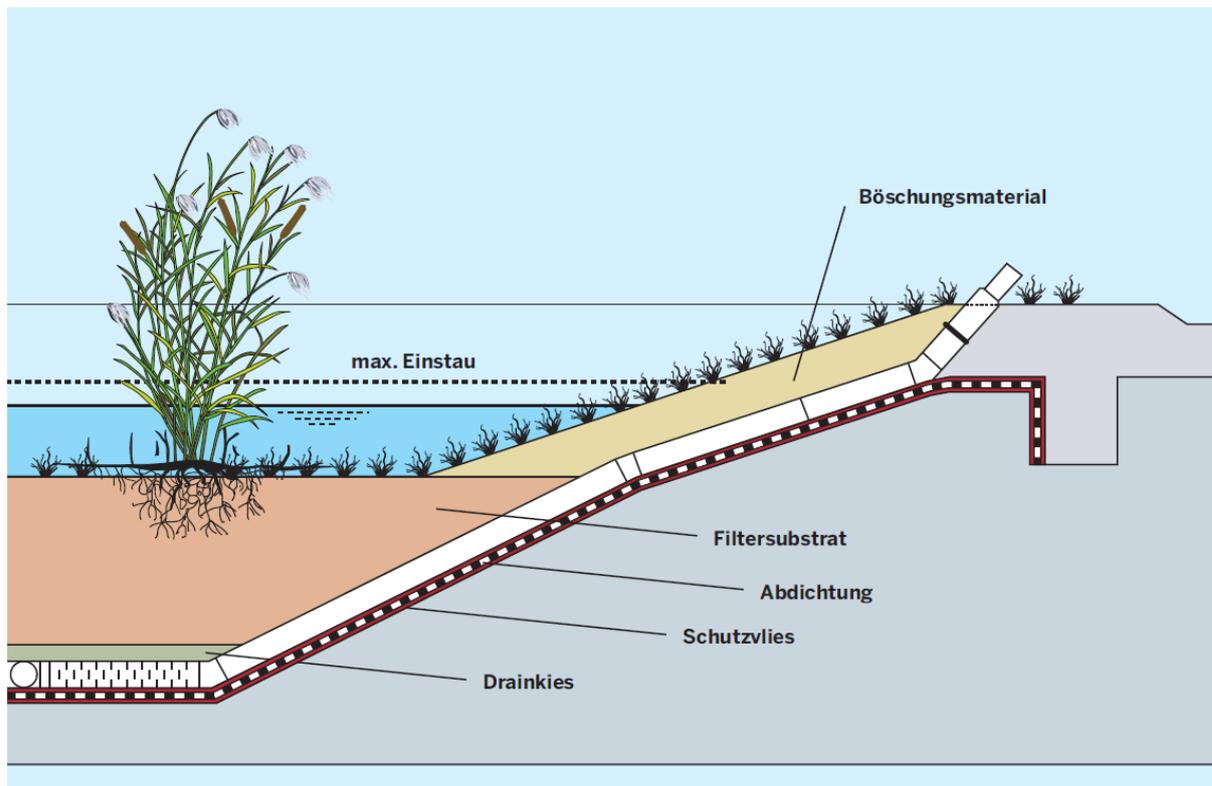


Abbildung 2.1: Filteraufbau eines Retentionsbodenfilter (MKULNV, 2015)

Wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, befindet sich über dem eigentlichen Filter ein Retentionsraum, in dem der Zufluss im Regenwetterfall gespeichert werden kann. Darunter liegt die Filterschicht, deren Oberfläche üblicherweise mit Schilf bepflanzt ist. Im unteren Teil des Filters befindet sich eine Dränageschicht aus Kies, in der Dränrohre verlegt sind, durch die der den Filter langsam vertikal durchfließende Zufluss dem Ablaufbauwerk zugeführt wird (vergleiche Abbildung 2.2). Zum Boden und zu den Seiten hin sind Retentionsbodenfilter gegen die umliegenden Bodenschichten abgedichtet. Ein beispielhafter Aufbau eines Retentionsbodenfilters mit Vorstufe (üblich im Mischsystem) zeigt Abbildung 2.2.

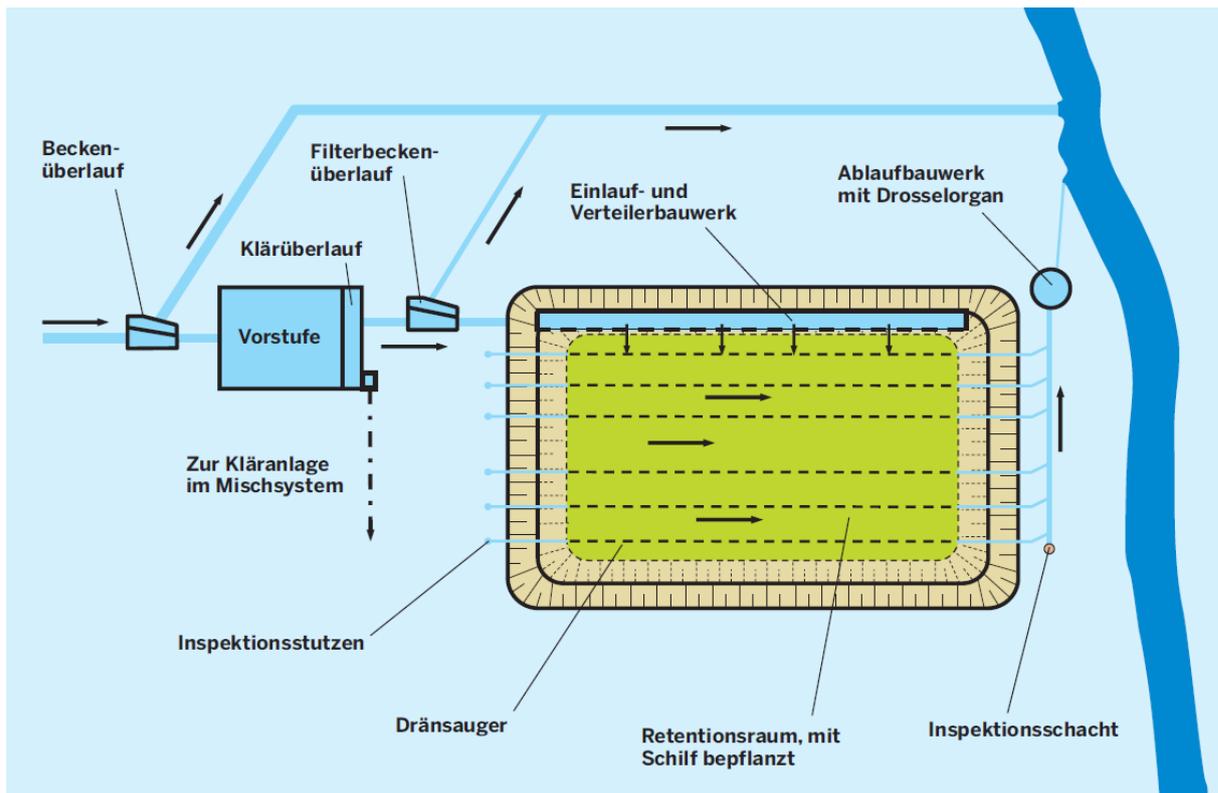


Abbildung 2.2: Bauwerkskomponenten einer Retentionsbodenfilteranlage mit vorgeschaltetem Filterbeckenüberlauf und Regenüberlaufbecken als Vorstufe (MKULNV, 2015)

In Nordrhein-Westfalen werden durch das Retentionsbodenfilter-Handbuch (MKULNV, 2015) und bundesweit durch das DWA-M 178 (DWA, 2005) Empfehlungen und Hinweise zur Planung und Konstruktion von Retentionsbodenfiltern gegeben. Für Retentionsbodenfilter, die zur Einleitung von Niederschlagswasser aus Straßenentwässerungen konzipiert sind, kann zusätzlich das Regelwerk „Richtlinie für die Anlage von Straßen“ (RAS-EW, 2005) herangezogen werden. Die Unterschiede zwischen DWA-M 178 (2005) und RAS-EW (2005) werden in GROTEHUSMANN und KASTING (2009) aufgezeigt.

FUCHS (2003) bezeichnet Retentionsbodenfilter als „Unterlastsysteme mit hohem Puffervermögen“. Dieses Puffervermögen ist zum einen notwendig, um Spitzenlasten bei Mischwasserentlastungen aufzufangen. Zum anderen wird die großzügige Dimensionierung benötigt, da die Nitrifikationsprozesse überwiegend in den Trockenzeiten stattfinden.

Im Betrieb von RBF treten sowohl Dauerbeschickungen über mehrere Tage als auch mehrmonatige Trockenperioden auf (MEYER, 2011). Die zeitliche Verteilung ihres Auftretens und die Dauer der Mischwasserbeschickung sind unregelmäßig, sie variieren je nach Wetterlage und Entwicklungsstand im Einzugsgebiet (PINNEKAMP et al., 2013). Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass ein vorgeschaltetes Regenüberlaufbecken circa 30- bis 60-mal pro Jahr in einen Retentionsbodenfilter entlastet (UHL et al, 2007). In den vergangenen zwei Jahrzehnten konzentrierten sich Forscher auf

den Rückhalt und den Abbau von Inhaltsstoffen wie Ammonium und Bakterien in Retentionsbodenfiltern (MUNLV, 2003; DITTMER, 2006; WALDHOFF; 2008). Für den Rückhalt von Spurenstoffen liegen inzwischen auch erste Forschungsergebnisse vor (MERTENS et al., 2012; PINNEKAMP et al., 2013; PINNEKAMP et al., 2016).

3 Material und Methoden

Um RBF unabhängig vom Niederschlagsgeschehen untersuchen zu können, wurde eine Versuchsanlage erbaut, die die Funktionsweise von Retentionsbodenfiltern möglichst genau nachbildet. Die Versuchsanlage wurde auf dem Gelände des ISA auf der Kläranlage Aachen-Soers errichtet.

Nach dem Handbuch für Planung, Bau und Betrieb von Retentionsbodenfiltern des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen werden im Mischsystem Filterhöhen von 0,75 bis 1,0 m empfohlen (MUNLV, 2003; MKULNV, 2015). Aus diesem Grund wurde in drei der vier erbauten Versuchsanlagen, die jeweils in zylindrische Behälter aus PE-HD installiert wurden, eine Filterschicht mit einer Dicke von 0,75 m eingebaut. Um die Leistungsfähigkeit von Retentionsbodenfiltern mit einer geringeren Filterschichtdicke zu beurteilen, wurde im zweiten Behälter lediglich eine Filterschichtdicke von 0,5 m gewählt. Ziel dieser Maßnahme war es, durch eine Einsparung bei der Filterschichtdicke, den Einsatz von RBF bei hydraulisch kritischen Verhältnissen bewerten zu können.

Es wurden vier Versuchsfileranlagen nach den in Tabelle 3.1 beschriebenen Aufbau- und Betriebsweisen errichtet.



Abbildung 3.1: Blick in das Foliengewächshaus der Versuchsanlage

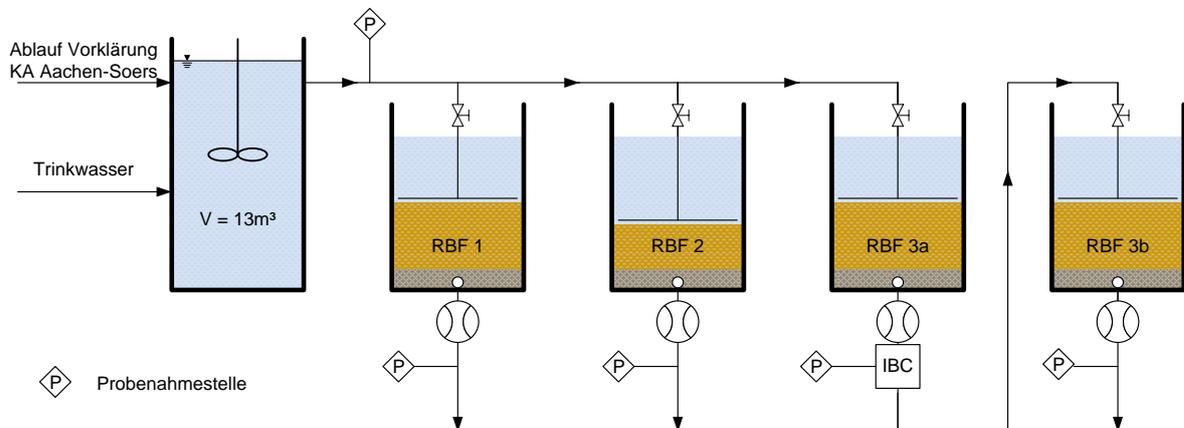
Tabelle 3.1: Aufbau und Betriebsweise der Versuchsfilter

	Aufbau	Betriebsweise
Filter 1	Filterschicht 75 cm Filtersand: Körnung 0/2, 20 % Carbonatbrechstein	Gedrosselter Ablauf (0,01 l/(s*m ²) bzw. 0,03 l/(s*m ²))
Filter 2	Filterschicht 50 cm Filtersand: Körnung 0/2, 20 % Carbonatbrechstein	Gedrosselter Ablauf (0,03 l/(s*m ²)) Referenzfilter zu Filter 1 (verringerte Filterschicht)
Filter 3a	Filterschicht 75 cm Filtersand: Körnung 0/2, 20 % Carbonatbrechstein	Gedrosselter Ablauf (0,03 l/(s*m ²)) Gleicher Aufbau und Beschickung wie RBF 1 zur Absicherung der Ergebnisse
Filter 3b	Filterschicht 75 cm Filtersand: Körnung 0/2, 20 % Carbonatbrechstein	Gedrosselter Ablauf (0,03 l/(s*m ²))

Um eine Beeinflussung der Versuchsergebnisse durch natürliche Niederschlagsereignisse zu verhindern, wurden die vier Versuchsbehälter in einem Foliengewächshaus erbaut (Abbildung 3.1).

Die Anlage ist so konzipiert, dass eine weitgehend flexible Nutzung und Anpassung möglich ist. Insbesondere konnten die Länge der Trockenperioden zwischen zwei Beschickungsereignissen, die hydraulische Belastung und die Filtergeschwindigkeit gesteuert werden. Ein Verfahrensfließbild der Anlage ist

Abbildung 3.2 zu entnehmen. Die schematische Skizze eines einzelnen Versuchsfilters ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Um Randeffekte (Wechselwirkungen zwischen den Abwasserinhaltsstoffen und den Seitenwänden sowie hydraulische Kurzschlussströme) auf ein Minimum zu beschränken, wurden PE-Behälter mit einem Durchmesser von 2,20 m eingesetzt. Die Behälterhöhe wurde so gewählt, dass über dem Filterbett ein 1 m hoher Retentionsraum vorhanden war.

**Abbildung 3.2: Verfahrensfliessbild der halbtechnischen Versuchsanlage**

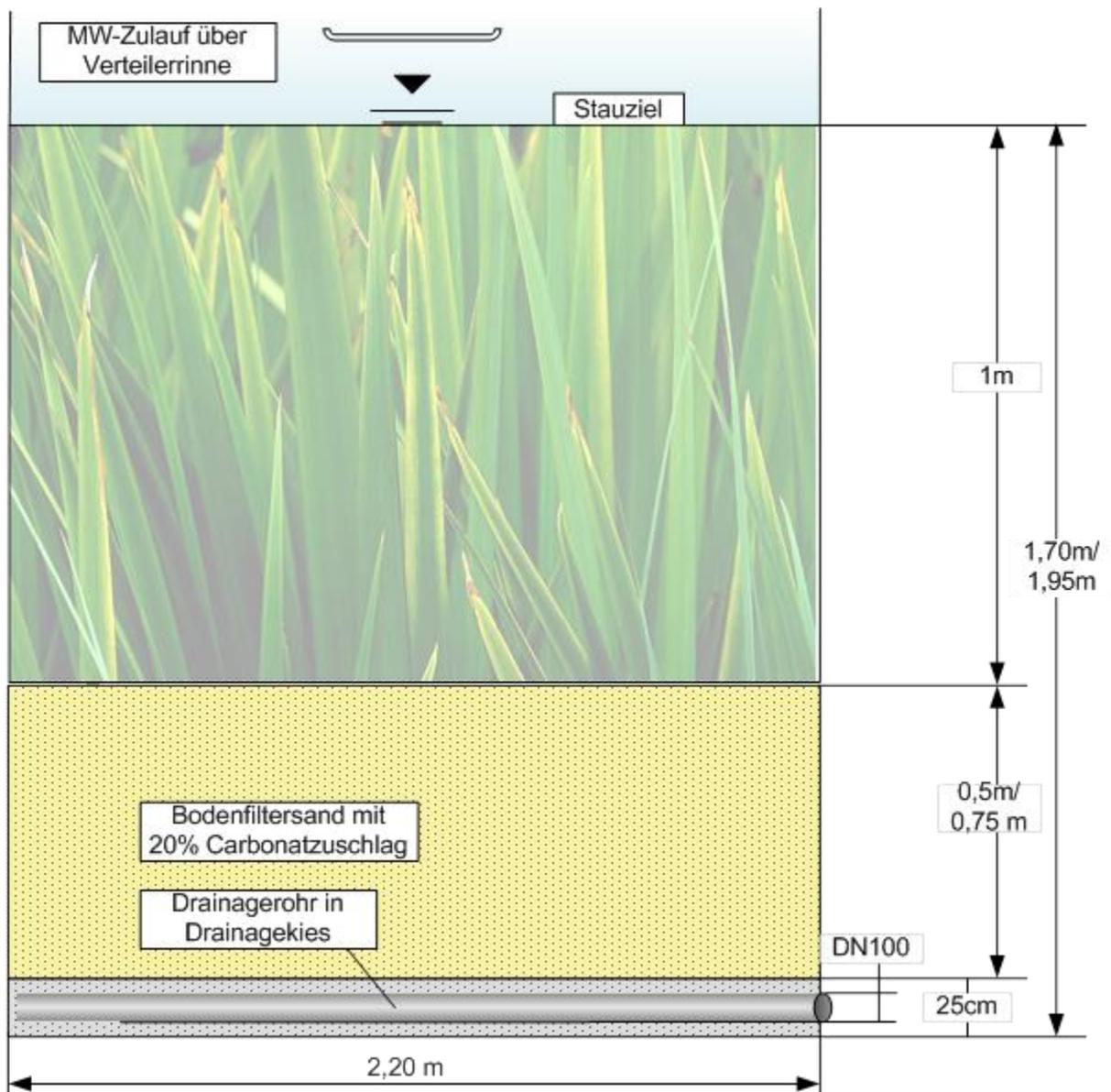


Abbildung 3.3: Schematischer Aufbau eines Versuchsfilters

Die nach dem Bodenfilterhandbuch vorgegebenen Beschickungsmengen im Jahresverlauf sollten nicht überschritten werden und wurden mit 30 m/a über den Versuchszeitraum geplant.

Darüber hinaus wurde die Leistungsfähigkeit einer Reihenschaltung von zwei RBF untersucht. Dazu wurde der Ablauf des RBF 3a zunächst zwischengespeichert und anschließend einer weiteren Behandlung in RBF 3b zugeführt. Hinsichtlich der Keimelimination werden derzeit in vielen Fällen ein bis zwei Logstufen Reduktion erreicht. Für empfindliche Gewässer, insbesondere Badegewässer oder solche, die zur Trinkwassernutzung dienen, ist dies allerdings nicht ausreichend. Da ORB (2012) einen Rückhalt von Bakterien hauptsächlich in den ersten 50 cm Filterschicht ausgemacht hat, sollte getestet

werden, ob die von WALDHOFF (2008) vorgeschlagene Reihenschaltung von zwei Bodenfiltern zu einer verbesserten Reinigungsleistung führt. Es sollte außerdem untersucht werden, auf welche sonstigen Mischwasserinhaltsstoffe sich eine Reihenschaltung besonders positiv auswirkt und für welche Anwendungsfälle schließlich eine solche Lösung empfohlen werden kann.

Die von MERSMANN (2003) gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Unterschiede beim Rückhalt von Pharmaka in gesättigten und ungesättigten Zonen sowie die Ergebnisse von DITTMER (2006) hinsichtlich der Sorption und des Abbaus von Stickstoffverbindungen sollten ebenfalls berücksichtigt werden. Dazu wurde die Sauerstoffsättigung untersucht. Dies wurde durch je vier Redoxsonden in jedem der vier Versuchsbehälter realisiert.

Zusätzlich wurden Online-Kombi-Sonden für die Nitrat- und Ammoniumbestimmung im Mischbehälter sowie im Ablauf von Filter 1 und 2 eingebaut. Diese wurden eingesetzt, um die bereits gut untersuchten Umbauprozesse von Stickstoffverbindungen zu kontrollieren (DITTMER, 2006) und die Funktionsweise des Filters generell zu überprüfen.

Mit dem Bau der Versuchsanlage auf dem Gelände der Kläranlage Aachen-Soers wurde mit Rodungs- und Geländearbeiten Anfang Oktober 2014 begonnen. Die vier Versuchsbehälter aus Polyethylen (PE) (Spezialanfertigung) wurden auf einem Betonsockel aufgestellt und mit Filtersubstrat befüllt.



Abbildung 3.4: Schichtenaufbau der Versuchsfilter

Wie in Abbildung 3.4 dargestellt, wurde in die Versuchsbehälter zunächst eine etwa 30 cm starke Kiesschicht über den Drainageleitungen eingefüllt. Über der Kiesschicht wurde das Filtersubstrat, welches eine Carbonatbeimischung von 20 % aufweist und den derzeitigen Erfordernissen an Retentionsbodenfilteranlagen nach dem Bodenfilterhandbuch (Körnungslinie) entspricht, eingebracht. Nach Befüllung der Versuchsbehälter mit Filtermaterial war das Substrat zunächst dem natürlichen Niederschlag ausgesetzt.

Es wurde künstliches Mischwasser aus dem Ablauf des Vorklärbeckens der Kläranlage (25%) und Trinkwasser (75%), angelehnt an die Untersuchungen von UHL et al. (2007), erzeugt. Für die Anmischung des Versuchs-Mischwassers zur Beschickung der Versuchsanlage diente ein Edelstahlbehälter mit Rührwerk (13 m³).

Wie auch die meisten großtechnischen Anlagen wurden die Versuchsanlagen mit Schilf bepflanzt. Die verwendeten Pflanzen der Art *Phragmites australis* sind unempfindlich gegenüber hoher Feststoffbelastung und langen Einstauzeiten. Das abgestorbene Pflanzenmaterial bildet außerdem mit der Zeit eine Streuschicht, die zur Ausbildung einer strukturreichen Filteroberfläche beiträgt und damit die Kolmation verhindert. Die Blattoberfläche der Pflanzen bietet darüber hinaus eine zusätzliche Fläche zur Sedimentation von feinputikulären Feststoffen.

Die Probenahmen im Zu- und Ablauf der Bodenfilter sowie nach der Nachbehandlung erfolgten automatisch durch eine speicherprogrammierbare Steuerung. Proben wurden als Mischprobe über ein gesamtes Ereignis an jeweils folgenden Stellen entnommen:

- Zulauf Versuchsanlage
- Überstandswasser Filter 1
- Ablauf Filter 1
- Ablauf Filter 2
- Ablauf Filter 3a (=Zulauf zu Filter 3b)
- Ablauf Filter 3b

Damit ergeben sich auf den Versuchsstraßen 1 bis 3 insgesamt sechs Probenahmestellen. Im Laufe der Versuche wurden die geplanten Ereignisse beprobt und analysiert. Da die Anlagen mit einer Filterfläche von 4 m² weitgehend gleichmäßig beschickt wurden, war es nicht notwendig, zwischen zulaufnahen und zulauffernen Bereichen zu unterscheiden.

Nach Fertigstellung der Versuchsanlage wurde zunächst mit einer Einfahrphase begonnen, um eine Biozönose im Filterinneren zu etablieren. Diese wurde vom 26.02.2015 bis zum 28.04.2015 durchgeführt und umfasste sechs Beschickungen mit künstlichem Mischwasser. Um insbesondere die Entwicklung der Nitrifikationsleistung in den einzelnen Filtern überwachen zu können, wurden während der Einfahrphase bereits Proben genommen und auf Ammonium- und Nitratstickstoff analysiert. Ebenfalls fand bereits ein CSB-Monitoring statt. Die Länge der Einfahrphase war zu Beginn nicht definiert. Während der Einfahrphase konnte jedoch eine kontinuierliche Steigerung des NH₄-N-Abbaus beobachtet werden. Da nach der sechsten Beschickung die NH₄-N-Konzentrationen in den Abläufen aller vier Filter sehr gering und teilweise unterhalb der Nachweisgrenze von 0,1 mg/l lagen, wurde der Einfahrbetrieb nach dieser Beschickung beendet.

Am 29.04.2015 fand die erste Beschickung der Versuchsphase statt. Insgesamt wurden vom 29.04.2015 bis zum 24.05.2016, was einem Zeitraum von 391 Tagen entspricht, 37 Versuche durchgeführt. Dabei wurden die Zeitabstände zwischen den Versuchen variiert, um den Einfluss der Dauer der Trockenzeiten auf die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Systeme untersuchen zu können. Als Trockenzeit galten dabei die Spannen ab dem ersten Tag nach einer Beschickung bis einschließlich dem Tag vor der nächsten Beschickung. Die minimale Trockenzeit lag bei vier Tagen. Die längste untersuchte Trockenzeit innerhalb dieses Zeitraums lag bei 40 Tagen. Das Versuchsregime ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

	Mi, 29.04.15	Mo, 04.05.15	So, 10.05.15	So, 17.05.15	Di, 26.05.15	Di, 02.06.15	Sa, 13.06.15	Mi, 24.06.15	Mi, 15.07.15	Di, 25.08.15	Di, 01.09.15	Di, 08.09.15	Di, 15.09.15	So, 20.09.15	Bodenproben Fr, 25.09.15	Mi, 30.09.15	Do, 08.10.15	Fr, 16.10.15	Fr, 23.10.15
Versuchstag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
4 Tage Trockenzeit																			
5 Tage Trockenzeit																			
6 Tage Trockenzeit																			
7 Tage Trockenzeit																			
8 Tage Trockenzeit																			
9 Tage Trockenzeit																			
10 Tage Trockenzeit																			
20 Tage Trockenzeit																			
40 Tage Trockenzeit																			

	Fr, 30.10.15	Do, 05.11.15	Do, 19.11.15	Do, 26.11.15	Mi, 09.12.15	Di, 15.12.15	Di, 05.01.16	Mi, 13.01.16	Fr, 22.01.16	Bodenproben Do, 04.02.16	Do, 11.02.16	Di, 16.02.16	Di, 23.02.16	Di, 01.03.16	Di, 15.03.16	Do, 31.03.16	Do, 14.04.16	Fr, 29.04.16	Mi, 11.05.16	Fr, 27.05.16	Fr, 03.06.16
Versuchstag	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
4 Tage Trockenzeit																					
5 Tage Trockenzeit																					
6 Tage Trockenzeit																					
7 Tage Trockenzeit																					
8 Tage Trockenzeit																					
9 Tage Trockenzeit																					
10 Tage Trockenzeit																					
12 Tage Trockenzeit																					
13 Tage Trockenzeit																					
15 Tage Trockenzeit																					
20 Tage Trockenzeit																					
40 Tage Trockenzeit																					

Abbildung 3.5: Versuchsplan im Projekt ReB-Op

Jeder der insgesamt 37 Versuche wurde nach dem gleichen Ablauf durchgeführt. Zunächst wurde der Mischbehälter mit künstlichem Mischwasser befüllt. Vor der Beschickung der Versuchsanlage wurden die Entleerungsventile der einzelnen Filter geschlossen. Diese wurden nach der beendeten Filtration nach jedem Versuch wieder geöffnet, um eine dränseitige Belüftung und die damit einhergehende Wiederherstellung der aeroben Verhältnisse im Filterbett sicherzustellen.

Die Versuchsanlage ist mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) ausgestattet. Diese gewährleistet eine gleichmäßige Beschickung der Filter 1, 2 und 3a aus dem Mischbehälter. Sobald eine Einstauhöhe von 80 cm über der Filterschichtoberkante erreicht wurde, wurde die Beschickung automatisch durch die SPS gestoppt. Sobald dieser Zustand in allen drei Filtern erreicht war, wurden die Abläufe über pneumatisch gesteuerte Ventile zeitgleich geöffnet. Die Filtergeschwindigkeit wurde anschließend manuell über ein Regelventil durch den Abgleich der Fließgeschwindigkeit an einem magnetisch-induktiven Durchflussmessgerät (MID) eingestellt.

Nach fünf Minuten wurden die ersten Ablaufproben automatisiert entnommen. Die nächste Probenahme fand 30 Minuten nach Öffnung des Ablaufventils statt. Danach wurden im Abstand von 30 Minuten weitere Proben bis insgesamt 10 Stunden nach dem Öffnen des Drosselablaufs entnommen. Jede Mischprobe bestand demnach aus 21 Teilproben.

Der Ablauf des RBF 3a wurde in einem IBC-Behälter zwischengespeichert. Höhenstands-gesteuert wurde der zwischengespeicherte Ablauf des RBF 3a diskontinuierlich in den Zulauf des RBF 3b gepumpt. Da eine gemeinsame Probenentnahme am Folgetag stattfinden sollte, war die Konfiguration des RBF 3b so ausgelegt, dass der Drosselabfluss hier bereits geöffnet wurde, wenn sich ein Wasserspiegel von 10 cm Höhe über der Filterschichtoberkante eingestellt hatte. Die Probenahme erfolgte anschließend analog zu den Filtern 1 bis 3a. Außerdem wurden Proben im Überstandswasser von RBF 1 entnommen, um den Einfluss von möglichen Absetz- bzw. Umsatzprozessen, die bereits im Überstand stattfinden, zu quantifizieren.

In der Großtechnik ist dem Retentionsbodenfilter im Mischsystem immer eine Vorstufe, wie z.B. ein Regenüberlaufbecken vorgeschaltet, welche vorrangig die Aufgabe hat, Feststoffe vom Filterbecken fern zu halten. Vorstufe und Filterbecken bilden dort eine verfahrenstechnische Einheit. Um diese Verhältnisse auf die halbtechnische Versuchsanlage zu übertragen, wurde der Ablauf der Vorklärbecken der Kläranlage Aachen-Soers verwendet, um das Versuchs-Mischwasser herzustellen. Die in den Vorklärbecken stattfindende Sedimentation kann mit der Reinigungsleistung in Regenüberlaufbecken verglichen werden. Da die Konzentrationen der meisten Abwasserinhaltsstoffe im Trockenwetterzulauf zur Kläranlage jedoch deutlich höher sind als im Mischwasser, wurde der Ablauf der Vorklärung mit Trinkwasser verdünnt. In Vorversuchen wurde die Zusammensetzung des zur Verfügung stehenden Abwassers aus dem Ablauf der Vorklärung bestimmt und ein optimales Mischungsverhältnis mit Niederschlags- und Trinkwasser untersucht. Die CSB-Zielkonzentration, die zu 60 mg O₂/l festgelegt wurde, ließ sich bei einer Vermischung von Abwasser aus dem Ablauf der Vorklärung und Trinkwasser im Verhältnis 1:4 erreichen. Damit wurde auch die im Projektantrag vorgesehene Zielkonzentration von 6 mg/l für Ammoniumstickstoff erreicht. CSB und Ammoniumstickstoff waren jedoch die einzigen Parameter, für die im Vorfeld der Versuche konkrete Zielkonzentrationen ausgegeben wurden. Der AFS-Gehalt lag bei den Versuchen im Mittel bei 32,7 mg/l und fiel damit niedriger aus als in vergleichbaren Literaturangaben zu realem Mischwasser (siehe Tabelle 3.2). Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Literaturrecherche auch solche Mischwasserkonzentrationen umfasste, die nicht durch Sedimentation vorbehandelt waren.

Tabelle 3.2: Konzentrationsbereiche von AFS in Mischwasserentlastungen

Quelle	AFS [mg/l]
WELKER (2005)	50 – 250
UHL und KASTING (2002)	45 – 122
BROMBACH und FUCHS (2003)	35,3 – 661

4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In Tabelle 4.1 sind die Zulaufkonzentrationen sowie die Wirkungsgrade aller untersuchten Parameter aufgelistet. Darüber hinaus werden die ermittelten Werte mit Mittelwerten verschiedener Literaturquellen verglichen.

Für die Standardparameter CSB, Ammoniumstickstoff sowie Phosphor wurden Wirkungsgrade erzielt, die mit der in der Literatur genannten Spannweite an Wirkungsgraden im Einklang sind. Sowohl für NH₄-N als auch für Phosphor liegen die erzielten Wirkungsgrade sogar im oberen Bereich dieser Spannweite.

Die Untersuchungen des Schwermetallrückhalts hingegen führen nicht zu einem einheitlichen Ergebnis im Vergleich zu den Literaturwerten. Während für die Parameter Zink und Blei die erreichten Wirkungsgrade zwar innerhalb der in der Literatur genannten Spannweite liegen, können für die Parameter Kupfer und Nickel sowie Eisen deutliche Abweichungen zu den Literaturwerten festgestellt werden. Auffällig ist hier vor allem das Schwermetall Nickel. In der Literatur wird ein mittlerer Wirkungsgrad von 77 % (FRECHEN, 2013) angegeben, in der Versuchsanlage konnten jedoch ausschließlich negative Wirkungsgrade erreicht werden. Dies dürfte auf die deutlich geringeren Zulaufkonzentrationen zurückzuführen sein. Im Gegensatz hierzu stehen die Ergebnisse für Eisen, dessen erzielte Wirkungsgrade im Bereich von 85 % bis 87 % im oberen Bereich der in der Literatur genannten Spannweite von maximal 90 % liegen (PINNEKAMP et al., 2016).

Wiederum bestätigt wurden die Literaturangaben bezüglich des Rückhalts von Mikroorganismen. Die in der Literatur gefundenen Spannweiten an Wirkungsgraden wurden in den Versuchen nur geringfügig unter- bzw. überschritten.

Schwierig gestaltet sich die Bewertung der Ergebnisse bezüglich der Spurenstoffe. Die Wirkungsgrade der verschiedenen untersuchten Stoffe unterscheiden sich deutlich und reichen von ausschließlich negativen Wirkungsgraden für Carbamazepin bis zu Wirkungsgraden, die im oberen Bereich bis oberhalb der Spannweite der in der Literatur gemachten Angaben liegen (Metoprolol, BPA). Dabei ist jedoch zu beachten, dass es für den Rückhalt von Spurenstoffen bislang noch keine umfangreiche Vergleichsbasis gibt und sich hier nur an wenigen durchgeführten Untersuchungen orientiert werden kann (TONDERA et al., 2014; SCHEURER et al., 2015).

Die wesentlichen Einflüsse der verschiedenen Betriebsparameter der in diesem Projekt untersuchten Retentionsbodenfilteranlagen auf den Stoffrückhalt verschiedener Mischwasserinhaltsstoffe sowie der Verbleib der Stoffe sind in Tabelle 4.2 und Tabelle 4.3 dargestellt.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse für die Reinigungsleistungen unterschiedlicher Mischwasserinhaltsstoffe

Parameter	Zulaufkonzentration (Median)	Rückhalt (Median)				
		RBF 1	RBF 2	RBF 3a	RBF 3a+3b	Literaturwert
CSB	72,5 mg O ₂ /l	84 %	80 %	80 %	82 %	49 % - 96 %
NH ₄ -N	5,3 mg/l	95 %	86 %	95 %	98 %	60 % - 96 %
PO ₄ -P	1,17 mg/l	60 %	59 %	65 %	87 %	15 % - 99 %
Kupfer	0,010 mg/l	-24 %	-11 %	-25 %	21 %	-11 % - 91 %
Zink	0,186 mg/l	59 %	61 %	64 %	81 %	40 % - 99 %
Nickel	0,006 mg/l	-316 %	-325 %	-49 %	-158 %	77 %
Blei	0,0025 mg/l	39 %	45 %	2 %	7 %	64 %
Eisen	0,59 mg/l	85 %	85 %	86 %	87 %	-26 % - 76 %
<i>E. coli</i>	3.616.000 MPN/100 ml	1,2 log	0,9 log	1,2 log	2,2 log	1,1 – 2,7 log
Enterokokken	180.000 MPN/100ml	1,1 log	0,9 log	1,1 log	2,3 log	0,9 – 1,2 log
Coliphagen	93.000 PBE/100ml	1,1 log	0,9 log	1,0 log	1,8 log	0,6 – 3,1 log
Diclofenac	361 ng/l	23 %	23 %	22 %	62 %	65 % - 99 %
Carbamazepin	132 ng/l	-22 %	-15 %	-21 %	-26 %	-20 % - 39 %
Metoprolol	328 ng/l	76 %	73 %	76 %	89 %	54 % - 84 %
Sulfamethoxazol	69 ng/l	-9 %	1 %	-7 %	-68 %	-13 % - 33 %
BPA	170 ng/l	55 %	56 %	66 %	69 %	64 % - 73 %
Benzotriazol	1.495 ng/l	26 %	25 %	30 %	40 %	32 % - 48 %

Tabelle 4.2: Einflussfaktoren verschiedener Betriebsparameter auf den Rückhalt von Standardparametern und Schwermetallen

		Standardparameter				Schwermetalle				
		CSB	NH4-N	Phosphor	AFS und AFS ₆₃	Kupfer	Zink	Nickel	Blei	Eisen
	Rückhalt	≥ 80 %	≥ 85 %	~ 60 %	≥ 85 %	≤ 0 %	~ 60 %	≤ 0 %	~ 50 %	~ 85 %
Zusammenhang zwischen verschiedenen Betriebsparametern und Stoffrückhalt	Filterhöhe	gering	ja; empfohlene Filterschichtdicke: ≥ 75 cm	gering	nein	nein	nein	nein	nein	nein
	Filterbetrieb (Reihenschaltung)	gering	gering	gering	nein	gering	gering	nein	nein	nein
	Die dem Ereignis vorhergehende Trockenzeit	nein	nein	ja, ab 12 d reduzierter Rückhalt	nein	nein	ja, ab 21 d reduzierter Rückhalt	ja, erhöhte Ablaufkonzentration bei längeren Trockenzeiten	nein	nein
	Filtergeschwindigkeit	nein	gering	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
	Weitere Einflussfaktoren	-	Zulaufkonzentration	-	Filteralter, Zulaufkonzentration, Verfügbarkeit Ca, Al und Fe	Filteralter, Zulaufkonzentration	Zulaufkonzentration	Zulaufkonzentration	-	Filteralter
	Verbleib der eingetragenen Stoffe	Biologischer Abbau	ja	ja	nein	teilweise	nein	nein	nein	nein
	Sorptionskapazität/ Rücklösungen	-	-	Rücklösungen nach erschöpfter Sorptionskapazität	-	Anreicherung im Filtermaterial	Anreicherung im Filtermaterial	-	Anreicherung im Filtermaterial, teilweise Rücklösungen	Anreicherung im Filtermaterial

Tabelle 4.3: Einflussfaktoren verschiedener Betriebsparameter auf den Rückhalt von Spurenstoffen und hygienisch relevanter Mikroorganismen

		Spurenstoffe					Indikatororganismen			
		Benzotriazol	Bisphenol A	Carbamazepin	Diclofenac	Metoprolol	Sulfamethoxazol	Escherichia coli	Intestinale Enterokokken	Somatische Coliphagen
	Rückhalt	≥ 80 %	≥ 85 %	≤ 0 %	≥ 20 %	≥ 70 %	≤ 0 %	~ 1 log-Stufe	~ 1 log-Stufe	~ 1 log-Stufe
Zusammenhang zwischen verschiedenen Betriebsparametern und Stoffrückhalt	Filterhöhe	nein	gering	nein	nein	nein	nein	ja	gering	gering
	Filterbetrieb (Reihenschaltung)	nein	gering	nein	ja	gering	nein	Reihenschaltung erzielt höhere Wirkungsgrade	Reihenschaltung erzielt höhere Wirkungsgrade	Reihenschaltung erzielt höhere Wirkungsgrade
	Die dem Ereignis vorhergehende Trockenzeit	nein	ja, besserer Rückhalt bis zu 10 d Trockenzeit	nein	nein	Zunahme des Rückhalts nach 20 d Trockenzeit	nein	nein	nein	nein
	Filtergeschwindigkeit	nein	nein	nein	nein	nein	nein	gering	nein	ja
	Weitere Einflussfaktoren	-	Zulaufkonzentration	Zulaufkonzentration	Filteralter, Zulaufkonzentration	-	Zulaufkonzentration, pH-Wert	Zulaufkonzentration	-	-
Verbleib der eingetragenen Stoffe	Biologischer Abbau	unter aeroben Bedingungen möglich	biologische Abbaubarkeit bis zu 10 Tage Trockenzeit	nur unter anaeroben Verhältnissen	unter aeroben Bedingungen möglich	unter aeroben Bedingungen möglich	unter aeroben Bedingungen möglich	teilweise Prädation*	teilweise Prädation*	teilweise Prädation*
	Sorptionskapazität/ Rücklösungen	-	-	Remobilisierung durch Desorption in wasserungesättigten Zonen	-	-	-	-	-	-

*Prädation = Nutzung als Nahrungs-Ressource

5 Empfehlungen für die Praxis

Die im Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse können in Zukunft zur Optimierung des Betriebs bestehender großtechnischer Anlagen bzw. zur Planung von neuen Anlagen genutzt werden. Sie lauten im Einzelnen:

- Vermeidung von Trockenzeiten von mehr als 10 Tagen durch eine
 - Bewässerung mit dem Ablauf nahe gelegener Kläranlagen oder
 - Bewässerung mit Wasser aus einem Bewässerungsbehälter, der mit dem Ablauf des RBFs während eines Regenereignisses befüllt wird. Der Bewässerungsvorrat sollte hierbei auf $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ Filterfläche dimensioniert werden.
- Durch eine Bewässerung in Trockenzeiten wird die Anlage von Bauten boden-
grabender Tiere unterdrückt und der Biofilm auch in beschickungsfernen Berei-
chen der Filteroberfläche aufrechterhalten.
- Eine Filterschichtdicke von 75 cm sollte im Normalfall nicht unterschritten werden. Sofern ungünstige hydraulische Bedingungen (geringer Höhenunterschied zwischen Klärüberlauf der Vorstufe und Filteroberfläche) vorliegen, kann eine geringere Filterschichtdicke in Erwägung gezogen werden. Eine geringere Filter-
schichtdicke wirkt sich im Wesentlichen nur auf den Ammoniumrückhalt aus.
- Eine Reihenschaltung von zwei Retentionsbodenfiltern wird insbesondere für eine
weitergehende Reduzierung von pathogenen Mikroorganismen empfohlen. Die
Bemessungsgrundsätze für die zweite Stufe bedürfen weiterer Untersuchungen. Von
einer gleichen Bemessung wie für die erste Stufe sollte abgesehen werden, da
sowohl die hydraulische als auch die stoffliche Belastung der zweiten Stufe deutlich
geringer ist.
- Redoxsonden stellen eine kostengünstige und einfache Möglichkeit dar, die
Leistungsfähigkeit von RBF auch ohne Beprobungen des Zu- und Ablaufs qualitativ
bewerten zu können. Hierbei sollten Redoxsonden in verschiedenen Tiefen und an
mindestens zwei Stellen im Filter (zulaufnah und zulauffern) installiert werden.
- Eine Leistungsbewertung sollte neben den ermittelten Wirkungsgraden immer auch
die absoluten Zu- und Ablaufkonzentrationen berücksichtigen, da insbe-
sondere niedrige Zulaufkonzentrationen in RBF zu schlechten Wirkungsgraden führen
können.
- Durch Beprobungen des Filtermaterials sollte ein regelmäßiges Monitoring der
Akkumulation von Stoffen (insbesondere Phosphor und Schwermetalle) erfolgen, um
das Erreichen der Belastungsgrenze frühzeitig zu erkennen.
- Eine klassische Leistungsbewertung über Wasseranalysen sollte erst nach drei
Betriebsjahren erfolgen, da vorher keine stabile Reinigungsleistung zu erwarten ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Retentionsbodenfilter haben sich seit Anfang der 1990er Jahre als wirkungsvolle Maßnahme zur weitgehenden Reduzierung von Gewässerbelastungen durch Misch-wasserentlastungen bewährt. Unterschiedliche Mischwasserinhaltsstoffe die Nährstoffe, Schwermetalle, hygienisch relevante Mikroorganismen und chemische Spurenstoffe können durch die weitergehende Behandlung in Retentionsbodenfiltern zurückgehalten und teilweise abgebaut werden. Dabei wirken vorrangig die Prozesse der Filtration, der Adsorption und des biologischen Abbaus. Eine Vielzahl an Faktoren kann den Rückhalt von Abwasserinhaltsstoffen in RBF beeinflussen. Dabei spielen die Eigenschaften des Filtermaterials, die Filtervegetation, die Betriebszustände (insbesondere Fließgeschwindigkeit und Drosselabflussspende), die Wasserbewegungen im Filterkörper und das daraus resultierende Risiko der Kolmation einerseits sowie die physikalischen und chemischen Größen wie Temperatur, pH-Wert, Sauerstoffgehalt und das Redoxpotential im Boden andererseits wichtige Rollen. Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen werden von Mikroorganismen abgebaut. Phosphorverbindungen sowie Schwermetalle werden vorrangig durch Sorptionsprozesse im Filtermaterial gebunden. Indikatororganismen werden durch die Prozesse der Filtration, Adsorption und vor allem durch den biologischen Abbau eliminiert. Der Rückhalt der Spurenstoffe scheint stark von der unterschiedlichen Akkumulation der Stoffe im Filtermaterial abzuhängen, was auf die Adsorption im Biofilm bzw. die chemische Sorption mit Carbonat etc. schließen lässt.

Neben den Standardparametern CSB, NH₄-N, PO₄-P sind in diesem Forschungsvorhaben umweltrelevante Schwermetalle, die Indikatororganismen *Escherichia coli*, intestinale Enterokokken und somatische Coliphagen sowie ausgewählte Spurenstoffe analysiert worden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die unterschiedlichen Konfigurationen der RBF die Rückhalteleistung beeinflussen können. Die Länge der Trockenphasen nimmt für einige Parameter Einfluss auf das Rückhaltevermögen. Das Filteralter spielt hauptsächlich beim Phosphor und den Schwermetallen eine Rolle: so können nach einiger Zeit Rücklösungen dieser Stoffe stattfinden. Einen großen Einfluss auf den Wirkungsgrad zeigt bei allen untersuchten Stoffen auch die Zulaufkonzentration. Ist diese sehr gering, können meist nur geringe Wirkungsgrade erreicht werden. Da die Ablaufkonzentration aufgrund der geringen Zulaufkonzentration in diesem Fall jedoch ebenfalls sehr gering ist, führt eine alleinige Darstellung des Wirkungsgrads hier zu einer Fehlinterpretation über die tatsächliche Belastung im Ablauf. Demnach sind insbesondere bei geringen Zulaufkonzentrationen die absolut erzielten Ablaufkonzentrationen von größerer Bedeutung und sollten bei einer Bewertung der Leistungsfähigkeit vornehmlich bewertet werden. Bei den Spurenstoffen weist vieles darauf hin, dass ein Großteil der untersuchten Stoffe nach einer Adsorption an das

Filtermaterial während der Trockenphasen biologisch abgebaut wird. Die letztendliche Elimination hängt hierbei allerdings stark von der biologischen Abbaubarkeit der Einzelsubstanz ab.

Die Konzentrationen der Mischwasserinhaltsstoffe sind großen Schwankungen unterworfen. Es wäre daher wünschenswert, an dem eingefahrenen halbtechnischen RBF Versuche mit unterschiedlichen Konzentrationen des Mischwassers durchzuführen, um die Grenzen der Leistungsfähigkeit noch besser bewerten zu können.

Darüber hinaus haben die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Versuche und verschiedene Literaturlauswertungen ergeben, dass die Beurteilung der langfristigen Leistungsfähigkeit von Retentionsbodenfilteranlagen erst nach einigen Betriebsjahren möglich ist. Aus diesem Grund ist eine Weiterführung von Versuchen in der halb-technischen Versuchsanlage, die im vorliegenden Projekt realisiert wurde, empfehlenswert. So wäre es außerdem möglich, einen Vergleich zwischen der Leistungsfähigkeit neuer Filter mit der von mehrjährig betriebenen Filtern durchführen zu können.

Außerdem besteht bei der Untersuchung modifizierter Schichtungen des Filterkörpers weiterer Forschungsbedarf. Ziel wäre hier, eine Steigerung der Leistungsfähigkeit von Retentionsbodenfiltern im Allgemeinen zu ermitteln.

Da sich der Biofilm im Filterkörper als einer der wichtigsten Faktoren für den Rückhalt verschiedener Mischwasserinhaltsstoffe erwiesen hat, sollten auch in diesem Bereich die Untersuchungen fortgesetzt werden. Erste Studien unter Anwendung der Methode des sogenannten „Community Level Physiological Profiling“ zeigen Ergebnisse, mit denen ein Monitoring des Biofilms auch an großtechnischen Anlagen möglich ist.

7 Literatur

- BROMBACH, H.; FUCHS, S. (2003): Datenpool gemessener Verschmutzungs-konzentrationen in Misch- und Trennkana­lisationen. In: KA - Abwasser, Abfall, 50, 4: 441–450.
- DITTMER, U. (2006): Prozesse des Rückhaltes und Umsatzes von Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen in Retentionsbodenfiltern zur Mischwasserbehandlung. Dissertation am Fachbereich Architektur/Raum- und Umweltplanung/Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern, Schriftenreihe des Fachgebiets Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, Band 23, Kaiserslautern.
- DWA (2005): Merkblatt DWA-M 178. Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Retentionsbodenfiltern zur weitergehenden Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. [Hrsg.], Hennef.
- DWA (2013): Arbeitsblatt DWA-A 166. Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung – Konstruktive Gestaltung und Ausrüstung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. [Hrsg.], Hennef.
- DWA (2017): Arbeitsblatt DWA-A 178. Retentionsbodenfilteranlagen – Entwurf. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. [Hrsg.], Hennef.
- FELMEDEN, J. (2013): Phosphorrückhalt in der Mischwasserbehandlung durch Retentionsbodenfilter-Anlagen. Dissertation am Fachbereich Bauingenieur- und Umweltwesen der Universität Kassel, Wasser Abwasser Umwelt, Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kassel, Band. 33, Kassel.
- FUCHS, S. (2003): Retentionsbodenfilter - Betriebserfahrungen/Konsequenzen. ATV-DVWK Regenwassertage, Landau.
- GROTEHUSMANN, D.; KASTING, U. (2009): Vergleich der Reinigungsleistung von Retentionsbodenfiltern und Versickeranlagen an Bundesfernstraßen. In: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Nr. 1024
- LUBW (2002): Bodenfilter zur Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem. Abschlussbericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.
- MERSMANN, P. (2003): Transport- und Sorptionsverhalten der Arzneimittelwirkstoffe Carbamazepin, Clofibrinsäure, Diclofenac, Ibuprofen und Propyphenazon in der wassergesättigten und ungesättigten Zone. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin, Online verfügbar unter: https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/1005/1/Dokument_15.pdf, Zuletzt geprüft am 27.06.2017

- MERTENS, F. M.; CHRISTOFFELS, E.; SCHREIBER, C.; KISTEMANN, T. (2012): Rückhalt von Arzneimitteln und Mikroorganismen am Beispiel des Retentionsbodenfilters Altendorf. Korrespondenz Abwasser, Abfall, Jg. 59, Nr. 12, S. 1137-1143.
- MEYER, D. (2011): Modellierung und Simulation von Retentionsbodenfiltern zur weitergehenden Mischwasserbehandlung. Dissertation am Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern, Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, Band 31, Kaiserslautern.
- MUNLV (2003): Retentionsbodenfilter - Handbuch für Planung, Bau und Betrieb. Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen Ministerium für Umwelt und Naturschutz [Hrsg.], Düsseldorf.
- MKULNV (2015): Retentionsbodenfilter - Handbuch für Planung, Bau und Betrieb. Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen Ministerium für Umwelt und Naturschutz [Hrsg.], Düsseldorf.
- ORB, R. (2012): Rückhalt hygienerelevanter Bakterien in mischwasserbeschickten Retentionsbodenfiltern - Konstruktive Hinweise. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften (BGU) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Schriftenreihe SWW, Band 142, Karlsruhe.
- RAS-EW. (2005): Richtlinien für die Anlage von Straßen. Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau. FGSV-Verlag, Köln, ISBN 3-937-35-6-69-X.
- PINNEKAMP, J.; TONDERA, K.; KOENEN, S.; DAHMEN, H.; BAXPEHLER, H.; KIESEWSKI, R. (2013): Betriebsoptimierung von Retentionsbodenfiltern im Mischsystem. Abschlussbericht im Auftrag des MKULNV [Hrsg.], Aachen.
- PINNEKAMP, J.; TONDERA, K.; RUPPELT, J.; KOENEN, S.; STAPPERT, U.; BAXPEHLER, H.; KIESEWSKI, R. (2016): Betriebsoptimierung von Retentionsbodenfiltern im Mischsystem Phase II. Abschlussbericht im Auftrag des MKULNV [Hrsg.], Aachen.
- SCHEURER, M.; SACHER, F.; RICHTER, D. (2015): Auf der Spur der Spurenstoffe: Eliminationsleistung verschiedener Abwassertechnologien und ihre Relevanz fürs Oberflächenwasser. Abschlussveranstaltung des BMBF-Verbundprojekts SchussenAktivplus. Langenargen.
- TONDERA, K.; KOENEN, S.; DAHMEN, H.; PINNEKAMP, J. (2014): Untersuchung der Reduktion von Spurenstoffen, Bakterien, Bakteriophagen und abfiltrierbaren Stoffen im Retentionsbodenfilter. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, Jg. 61, Nr. 7, S. 594-600.
- TONDERA, K.; PINNEKAMP, J. (2016): Leistungsfähigkeit und Betriebsdaten von Retentionsbodenfiltern im Mischsystem in Nordrhein- Westfalen. 49. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, Schriftenreihe GWA Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, Band 239, S. 29/1-29/14.

- UHL, M.; KASTING, U. (2002): Verschmutzung des Niederschlagsabflusses in Misch- und Trennsystemen und von Straßen. In: Wasser und Abfall, 4, 3: 14–22.
- UHL, M.; SCHMITT, T. G.; HENRICH, M.; MAUS, C.; MEYER, D.; PERREFORT, T.; WELKER, A.; WOZNIAK, R. (2007): Erstellung eines Eignungsnachweises für Filtersubstrate für Retentionsbodenfilter. Schlussbericht zur Vor- und Hauptstudie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.
- WALDHOFF, A. (2008): Hygienisierung von Mischwasser in Retentionsbodenfiltern. Schriftenreihe Wasser, Abwasser, Umwelt des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kassel, Band 30, Kassel
- WELKER, A. (2005): Schadstoffströme im urbanen Wasserkreislauf - Aufkommen und Verteilung, insbesondere in den Abwasserentsorgungssystemen. Dissertation, Schriftenreihe der TU Kaiserslautern, FG Siedlungswasserwirtschaft, Bd. 20.
- WOZNIAK, R. (2008): Ermittlung von Belastungsgrenzen an Bodensubstraten zur weitergehenden Mischwasserbehandlung in Retentionsbodenfiltern. Dissertation am Fachbereich Architektur/Raum- und Umweltplanung/Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern, Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, Band 24, Kaiserslautern.