
Erstellung eines Eignungsnachweises für Filtersubstrate für Retentionsbodenfilter

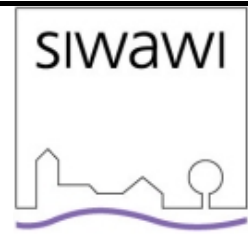
Kurzfassung

Februar 2008



Labor für
Wasserbau und
Wasserwirtschaft

Fachbereich Bauingenieurwesen
Prof. Dr.-Ing. M. Uhl
Corrensstraße 25
48149 Münster



Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
Prof. Dr.-Ing. T. G. Schmitt
Paul-Ehrlich-Strasse 14
67663 Kaiserslautern

Schlussbericht zur Vor- und Hauptstudie

Bewilligungen vom 1.9.2005 (Vorstudie) und 17.05.2006 (Hauptstudie)

Az.: IV-9-042 261

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

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Mathias Uhl (FH Münster, LWW)
Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt (TU Kaiserslautern, SIWAWI)

Projektbearbeitung: Malte Henrichs, M.Sc.
Dipl.-Ing. Christian Maus
Dipl.-Ing. Daniel Meyer
Dipl.-Geol. Thomas Perrefort
PD Dr.-Ing. habil. Antje Welker
Dipl.-Ing. Renata Wozniak

Prof. Dr.-Ing. M. Uhl

Prof. Dr.-Ing. T. G. Schmitt

Dipl.-Geol. T. Perrefort

PD Dr.-Ing. habil A. Welker

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
1 Veranlassung und Zielsetzung.....	1
2 Bisherige Untersuchungsverfahren	3
3 Prüfverfahren für Filtersubstrate	4
3.1 Konzeption	4
3.2 Versuchsaufbau	4
3.3 Beschickungswasser	6
3.4 Versuchsdurchführung	6
3.5 Beprobung und Analytik	7
3.6 Auswertung, Dokumentation und Bewertung	8
3.7 Hauptergebnisse der durchgeführten Untersuchungen in Zuge der Entwicklung des Prüfverfahrens	9
4 Vertikaler Verlauf von Stoffrückhalt und Sauerstoffverteilung.....	11
5 Tracerverfahren zur Untersuchung der Fließvorgänge im Filter	13
6 Kontinuierliche Gütemessung an Abläufen von Retentions-bodenfiltern.....	14
7 Erkundung der Möglichkeit zur Simulation von Wasser- und Stofftransportprozessen in Retentionsbodenfiltern	15
8 Literatur.....	19

1 Veranlassung und Zielsetzung

Retentionsbodenfilter werden als Maßnahmen zur weitergehenden Behandlung für Entlastungsabflüsse aus Mischsystemen sowie Niederschlagsabflüssen aus Trennsystemen sowie von Verkehrsflächen eingesetzt. Als Planungshilfe und technische Regeln stehen das vom MUNLV NRW herausgegebene Handbuch Retentionsbodenfilter MUNLV [2003] sowie das Merkblatt DWA-M 178 DWA-M 178 [2005] zur Verfügung.

Für die Zusammensetzung des Filtersubstrates als wichtigen Anlagenbestandteil werden in den beiden Planungshilfen Anforderungen an das Filtermaterial in Form von Korngrößenverteilung (Sieblinie), Carbonatgehalt und weitere Eigenschaften (z.B. Schadstofffreiheit) genannt. Die Anforderungen wurden auf Basis von Betriebserfahrungen in großtechnischen Anlagen formuliert. Vorausgegangen waren jeweils Untersuchungen im Labormaßstab sowie im halbtechnischen Maßstab.

Im Verlauf der fortschreitenden Anwendung und technisch-wirtschaftlichen Weiterentwicklung von Retentionsbodenfiltern wurde die Frage aufgeworfen, ob Substrate eingesetzt werden können, deren Sieblinie von den Angaben in den Planungshilfen abweichen. Dies betraf insbesondere

- ortsnahe verfügbare Sand-Carbonatgemische
- ohne aufwändige Siebung herstellbare Mischsubstrate aus ortsnahe verfügbaren Sand- und Carbonatvorkommen
- Mischsubstrate mit Spezialrezepturen

Die Fragestellung konzentrierte sich vornehmlich auf Filtersubstrate für Retentionsbodenfilter in Mischsystemen, deren Entlastungsabflüsse zur akuten und langfristigen Gewässerbelastung beitragen. Die Inhaltsstoffe der Entlastungsabflüsse werden durch die verfahrenstechnischen Prozesse Filtration, Sorption und biochemischer Abbau im Filtersubstrat erheblich reduziert. Dabei übernimmt der Filter die Funktion eines Festbettreaktors, in dem die Aufenthaltszeit durch den technisch gedrosselten Ablauf des Filters bestimmt wird. Damit kommt der Qualitätssicherung der Filtersubstrate bei Retentionsbodenfiltern im Mischsystem eine besondere Bedeutung zu.

Aufgrund der Konstruktion und der gedrosselten Betriebsweise von Retentionsbodenfiltern kann von weitgehend eindimensionalen Wasser- und Stofftransportprozessen ausgegangen werden. Für die weitere Verfahrensentwicklung sind Kenntnisse über den Vertikalverlauf der Prozesse und der Sauerstoffverhältnisse im Filter erforderlich. Daraus kann zudem die aus bautechnischer und wirtschaftlicher Sicht interessante Möglichkeit zur Verringerung der Filterhöhe beurteilt werden.

Die Kenntnis des zeitlichen Verlaufes der Stoffkonzentrationen im Ablauf von Retentionsbodenfiltern gestattet Aufschlüsse über die Prozessdynamik, ist für die Kalibrierung von Simulationsmodellen hilfreich und gestattet die Ableitung neuer Betriebskonzepte, die eine optimierte Ausnutzung der Reinigungsleistung der Anlagen ermöglicht. Kontinuierliche Gütemesssonden müssen jedoch mit den spezifischen Betriebsbedingungen von Retentionsbodenfiltern im Einklang stehen, die durch teilweise sehr lange Trockenzeiten geprägt sind.

Das hydraulisch wirksame Porenvolumen und die davon abhängige Aufenthaltszeit/Reaktionszeit in der Filterschicht wurde als wichtiger Indikator für die Rückhalteleistung von biochemischen und mikrobiologischen Stoffen identifiziert (Grobe et al. [2005]). Eine genaue Bestimmung der Fließwege und des hydraulisch wirksamen Porenvolumens ist nur durch den Einsatz von Tracertechnologien möglich; diese sind bislang aber wenig für die Fragestellung der Retentionsbodenfilter berücksichtigt worden (Netter [1995]).

Die realitätsnahe Modellierung der Wasser- und Stofftransportprozesse in Retentionsbodenfiltern kann eine wertvolle Hilfe für Prognose der Reinigungsleistung und der Beurteilung von Betriebsvarianten sein. Die in einem ersten Forschungsvorhaben (Uhl/Henrichs [2005]) entwickelten Kenntnisse müssen weiterentwickelt werden.

Daraus ergaben sich folgende Aufgabenstellungen für ein F/E-Vorhaben, über das nunmehr abschließend und zusammenfassend berichtet wird:

1. Entwicklung und Verifizierung eines Prüfverfahrens für Filtersubstrate im Mischsystem
2. Untersuchung des vertikalen Verlaufes des Stoffrückhaltes und der Sauerstoffverteilung
3. Erprobung eines Tracerverfahrens zur Untersuchung der Fließvorgänge im Filter
4. Entwicklung einer Einrichtung zur kontinuierlichen Gütemessung an Abläufen von Retentionsbodenfiltern
5. Erkundung der Möglichkeit zur Simulation von Wasser- und Stofftransportprozessen in Retentionsbodenfiltern

Das F/E-Vorhaben wurde gemeinsam von der FH Münster, Labor für Wasserbau und Wasserwirtschaft (Prof. Dr.-Ing. M. Uhl) sowie der TU Kaiserslautern, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft (Prof. Dr.-Ing. T.G. Schmitt) durchgeführt.

Die Entwicklung und Verifizierung des Prüfverfahrens wurde von beiden Hochschulinstituten gemeinsam durchgeführt. Redundante Untersuchungen sollten die Unabhängigkeit des Prüfverfahrens von Standorten und Personen sicherstellen. Die weitergehenden Aufgabenstellungen zum Stoffrückhalt in Retentionsbodenfiltern im Mischsystem wurden von den Projektpartnern getrennt behandelt.

2 Bisherige Untersuchungsverfahren

Bezüglich der Reinigungsleistung von Retentionsbodenfiltern sind bislang wenige Untersuchungen an großtechnischen Anlagen durchgeführt worden (MUNLV [2003], Schmitt et al. [2005]). Umfangreichere Daten liegen zu Messungen im halbtechnischen Maßstab in Lysimetern und im Labormaßstab mittels Säulen vor (Uhl/Jübner [2001], Uhl/Jübner [2004], Grobe et al. [2005], Schmitt et al. [2005], Dittmer et al. [2002], Fuchs [2003], Grobe et al. [2003], Wozniak [2007]). Im Vordergrund dieser Untersuchungen stand dabei die Abhängigkeit der Reinigungsleistung von der hydraulischen und stofflichen Belastung, der Drosseleinstellung sowie dem gewählten Filtersubstrat. Versuchsanlagen im halbtechnischen Maßstab oder im Labormaßstab gestatten die gezielte Variation von Randbedingungen, Betriebsweisen und Belastungen unter weitgehend homogenen und reproduzierbaren Versuchsbedingungen. Somit lässt sich mit vertretbarem Aufwand vor der großtechnischen Realisierung ein breites Spektrum an repräsentativen Filtersubstraten mit wechselnden Betriebsbedingungen untersuchen.

Um die vorliegenden Erfahrungen für das zu entwickelnde Prüfverfahren einzubinden, wurde eine Synopse der an verschiedenen wissenschaftlichen und privatwirtschaftlichen Einrichtungen durchgeführten Säulenversuche durchgeführt. Befragt wurden die folgenden Institute:

- BIOPLAN Landeskulturgesellschaft GmbH Sinsheim (SI)
- Fachhochschule Münster (Labor für Wasserbau und Wasserwirtschaft) (MS)
- Technische Universität Kaiserslautern (FG Siedlungswasserwirtschaft) (KL)
- Technische Universität Karlsruhe (Institut für Siedlungswasserwirtschaft) (KA)
- Universität Kassel (FG Siedlungswasserwirtschaft) (KS)

Aus der Auswertung und Gegenüberstellung bundesweit durchgeführter halbtechnischer Säulenversuche ergeben sich vielfältige Kombinationen möglicher Versuchsbedingungen. Folgende Gesichtspunkte sind für weitere Versuche zu betrachten:

- Versuchsaufbau (Säulendurchmesser, Substratmächtigkeit, technische Umsetzung der Beschickung, Ablaufdrosselung und Probennahme)
- Beschickung (Anzahl / zeitliche Abstände / Höhe der Beschickungen innerhalb der Messreihe, Herkunft / Zusammensetzung / Konzentrationen des Beschickungswassers, Zulaufgeschwindigkeit)
- Probennahme und Analytik (Probenanzahl / Intervalle der Probenahme, versuchsrelevante Abwasserparameter, Methoden der Analytik)

- Abschluss der Messreihe und Beurteilung der Leistungsfähigkeit (Definition / Erkennung des Endes der Einfahrphase, Definition/ Überprüfung der Anforderungen an das Substrat im eingefahrenen Zustand)

3 Prüfverfahren für Filtersubstrate

3.1 Konzeption

Grundsätzlich wird im Prüfverfahren die Reinigungsleistung eines zu prüfenden Substrates (Prüfsubstrat) mit der eines den Regelanforderungen entsprechenden Substrates (Referenzsubstrat) in einer Paralleluntersuchung untersucht und beurteilt. Ergänzend wird ein Mindestfrachtrückrückhalt (Bezug: Ammonium) für das Prüfsubstrat festgesetzt. Beide Substrate müssen in einer Einfahrphase vor der Prüfung mit konditioniertem Mischwasser beschickt und damit durch eine abwasserbürtige Biozönose angeimpft werden. Somit können die typischen biochemischen Umwandlungsprozesse im Filter stattfinden. In der Prüfphase erfolgt die Belastung mit einer festgelegten Abfolge von Normallast- und Hochlastbeschickungen mit einem künstlich hergestellten Beschickungswasser, so das abwasserspezifische Einflüsse auf die Reinigungsleistung minimiert werden können. Die heterogenen realen Mischwassermatrizes können vom standardisierten Beschickungswasser mehr oder minder abweichen.

Für das Prüfverfahren ist eine detaillierte Handlungsanleitung erarbeitet worden und praktisch auf Eindeutigkeit geprüft worden. Weiterhin wurde ein Vorschlag für ein Prüfzertifikat erstellt.

3.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau für das Prüfverfahren fasst die vorliegenden Erfahrungen mit Versuchen in Säulen und Lysimetern zusammen. Neben den technischen Aspekten waren auch die Belange von Praktikabilität und Wirtschaftlichkeit zu beachten. Beim relativen Vergleich von Prüf- und Referenzsubstrat fallen die mit der größeren Fläche von Lysimetern einhergehenden Vorteile wie Minimierung von Randstörungen und größere Repräsentativität wenig ins Gewicht. Der bei Lysimetern erhebliche infrastrukturelle und logistische Aufwand gab den Ausschlag zugunsten von Säulenversuchen für das Prüfverfahren. Säulenversuche bilden die Verhältnisse eines Retentionsbodenfilters modellhaft im Labormaßstab ab. Filtersubstrat, -mächtigkeit und -aufbau der Säule entspricht in den vertikalen Merkmalen dem großtechnischen Aufbau ebenso wie die Drosselung des Ablaufes. Die Säulen ermöglichen somit die eindimensionale Abbildung der realen Filtrationsprozesse.

Im Zuge der praktischen Erprobung des Prüfverfahrens wurden mehrfach Modifikationen und Änderungen der bisherigen Praxis der Säulenversuche erforderlich, um zu vergleichbaren und aussagefähigen Ergebnissen über die Reinigungsleistung der Substrate zu kommen.

Die Versuchsanlage besteht aus senkrecht stehenden Kunststoffrohren mit standardisiertem Filteraufbau und mit einem gedrosselten Ablauf. Die Versuchssäulen bestehen aus Kunststoff (PP, PVC, PE, Acrylglas, Plexiglas), die ggfs. lichtundurchlässig abzudecken sind. Bei einer mehrteiligen Konstruktion ist eine inerte Abdichtung durchzuführen. Der Säulenkörper muss eine Gesamthöhe von mindestens 210 cm und einen Durchmesser von 20 cm (innen 19 cm) aufweisen. Die Säulen sollten über ein Peilrohr zur Wasserstandsmessung verfügen, das ist im Niveau der Drainage anzubringen ist. Am unteren Ende der Säule (Säulenboden) ist eine Ablauffassung einzubauen, so dass eine Abflussdrosselung und eine vollständige Filterentleerung möglich sind. Als Drosselorgan wird eine Laborschlauchquetschpumpe vorgeschlagen, die eine konstante Drosselabflussspende $q_d = 0,02 \text{ l/sm}^2$ während des Versuchsbetriebes einhalten kann. Die Pumpeneinstellung ist vor und jedem Versuch durch volumetrische oder gravimetrische Vergleichsmessung zu prüfen.

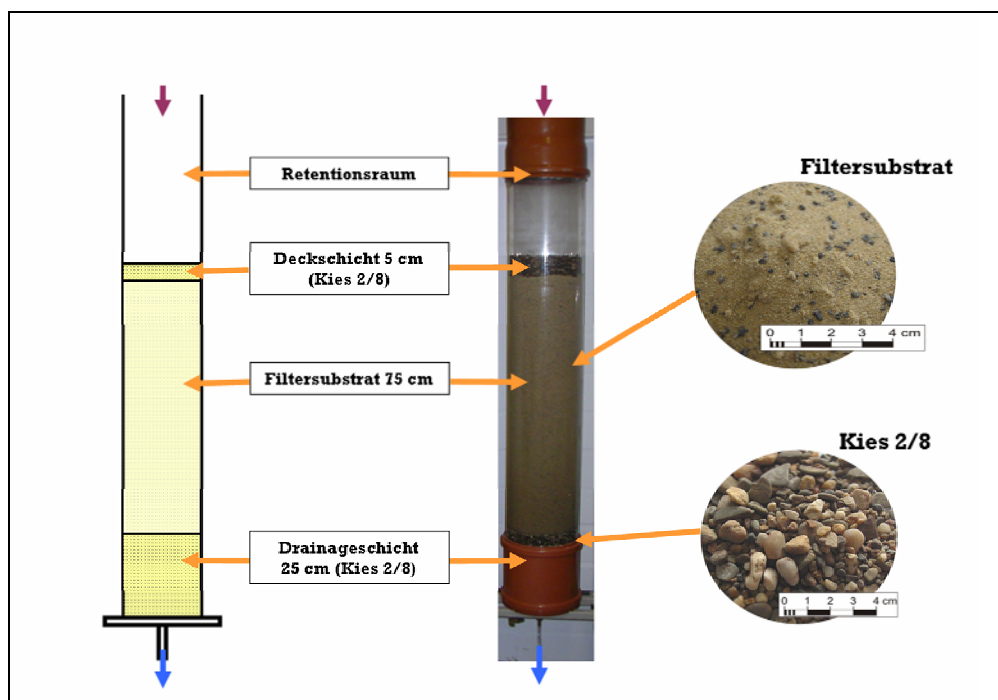


Bild 1: Schematische Darstellung von Säulenkörper und Filteraufbau

Der Aufbau des Filters in den Versuchssäulen soll gemäß den Angaben in MUNLV [2003] und DWA-M 178 [2005] für Retentionsbodenfilter für das Mischsystem durchgeführt werden. Zunächst wird eine 25 cm mächtige Drainageschicht (Kies 2-4 mm), darüber das zu prüfende Filtersubstrat mit der zulässigen Mindestmächtigkeit (75 cm) und abschließend eine 5 cm

mächtige Deckschicht (Kies 2-4 mm) in die Säulen eingebaut. Die Gesamthöhe des Filters beträgt somit 105 cm. Über dem Filter sollen >100 cm freies Säulenvolumen verfügbar sein, das als Vorlagevolumen für Beschickungen genutzt wird.

Für das Prüf- und Referenzsubstrat sind die Materialkenngrößen Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte, Schadstofffreiheit, Carbonatgehalt, Porenvolumen und Durchlässigkeitsbeiwert zu bestimmen.

3.3 Beschickungswasser

In der **Einfahrphase** dient das Beschickungswasser der Konditionierung des Filters und dem Aufbau einer Filterbiozönose. Hierfür wird verdünntes, örtlich verfügbares Abwasser eingesetzt, das auf konstante mischwassertypische Konzentrationen im Bereich der Entlastungen aus Mischwassersystemen (S_{CSB} : 60 mg/l und NH_4-N : 6 mg/l) konditioniert wird.

Für die **Prüfphase** wird künstliches Mischwasser mit den gleichen Konzentrationen wie in der Einfahrphase durch Lösung von Nährsalzen in vollentsalztem Wasser hergestellt. Die Verwendung von künstlichem Mischwasser ist erforderlich, da sich im Verlauf der Verfahrensentwicklung herausstellte, dass Unterschiede und Schwankungen der örtlichen Abwassermatrix die Reproduzierbarkeit der Wirkungsgrade oder der Substratbeurteilungen beeinträchtigen kann.

3.4 Versuchsdurchführung

In der **Einfahrphase** werden die mit einer Drosselabflussspende von $q_d = 0,01 \text{ l/(s}\times\text{m}^2)$ betriebenen Säulen nach einem festen Beschickungsplan mit je 0,5 m Wassersäule und je 2-3 Tagen Regenerationsphase belastet. Die Einfahrphase wird nach ca. 15 Beschickungen beendet, wenn ein konstanter S_{CSB} - und Ammonium-Rückhalt sowie eine stabile Nitrifikation in der Trockenphase vorliegen. Die Probennahmen erfolgen zur Qualitätssicherung für alle Zuläufe als Stichprobe sowie an jeder Säule für die Abläufe der ersten und letzten Beschickung als Gesamtmischprobe.

Die **Prüfphase** dient der eigentlichen Eignungsprüfung des Substrats. Dazu werden die nun mit $q_d = 0,02 \text{ l/(s}\times\text{m}^2)$ gedrosselten Säulen durch zwei Hochlastbeschickungen (Beschickungshöhe 2,5 m Wassersäule) und zwei Normallastbeschickungen (Beschickungshöhe 0,5 m Wassersäule) nebst Trockenphasen nach einem festen Beschickungsplan durchgeführt (siehe Bild 2). Die Hochlastbeschickungen stellen eine

extreme hydraulische und stoffliche Belastung der Filtersubstrate dar. Die Filter werden mit 2,5 m Beschickungshöhe beaufschlagt, die in mehreren Chargen aufgebracht werden. Der Filter muss in der Beschickungsphase immer überstaut sein, um den Eintritt von Luftsauerstoff zu vermeiden. Zwischen dem Ende der Einfahrphase und dem ersten Hochlastversuch sowie der übrigen Versuche der Prüfphase sind jeweils 5 Tage Trockenphase einzuhalten. Die Beprobungen erfolgen für das Infiltrat und das Filtrat jeweils als Ganglinie aus Teilmischproben. Die Beprobung des Infiltrats ist vor jeder Teilbeschickung und zeitnah vor jeder Filtratbeprobung durchzuführen.

Einfahrphase	KW	1							2							3							4						
	Tag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
	Normallastversuch																												
	Zulaufprobe																												
	Infiltratprobe																												
	Filtratprobe																												
	KW	5							6							7							8						
	Tag	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
	Normallastversuch																												
	Zulaufprobe																												
	Infiltratprobe																												
	Filtratprobe																												

Prüfphase	KW	9							10							11							12						
	Tag	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
	Normallastversuch																												
	Hochlastversuch																												
	Zulaufprobe																												
	Infiltratprobe																												
	Filtratprobe																												

Bild 2: Versuchsschema zur Planung von Einfahrphase und Prüfphase mit jeweiliger Beprobung

3.5 Beprobung und Analytik

In der **Einfahrphase** wird jeder Zulauf als Stichprobe beprobt, sowie an jeder Säule die Abläufe der 1. und letzten (15.) Beschickung als Gesamtmischprobe über die gesamte Ablaufdauer.

In der **Prüfphase** wird bei den Normallastversuchen jeder Zulauf als Stichprobe beprobt, sowie an jeder Säule die Infiltrate im Überstau und das Filtrat in den Abläufen als Gesamtmischprobe über die gesamte Ablaufdauer beprobt. Während der Hochlastversuche wird das Filtrat im Ablauf mit Hilfe von 7 Teilmischproben als Ganglinie beprobt. Die

Teilmischproben werden als zeitproportionale Proben entnommen, die aufgrund des konstanten Volumenstroms des Ablaufs mit durchflussproportionalen Proben gleichzusetzen sind. Die Proben werden durch Kühlung oder Gefrieren konserviert.

Die Analytik konzentriert sich im Rahmen des Prüfverfahrens auf die bei Mischwasserentlastungen relevanten Problemstoffe $\text{NH}_4\text{-N}$ und CSB sowie prozessrelevante Begleitgrößen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Analytikparameter im Rahmen des Prüfverfahrens

	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	S_CSB	C_CSB	pH-Wert	Elektrische Leitfähigkeit	Temperatur	O_2 -Gehalt
Beschickungswasser	x				x	x	x	x	x
Infiltrat	x	x	x	x					
Filtrat	x	x	x	x		x	x	x	x

3.6 Auswertung, Dokumentation und Bewertung

Als Messergebnisse liegen Konzentrationen der wichtigsten Stoffparameter im Zulauf, Infiltrat und Filtrat sowie Volumina des Zulaufes und des Filtrates vor. Die Auswertung der Daten ergibt Konzentrationsverläufe, Frachten und Wirkungsgrade. Grundsätzlich ist zwischen dem Retentionsraum oberhalb des Filters und dem Filtersubstrat zu unterscheiden, da auch im Retentionsraum Abbauprozesse stattfinden können. Bisherige Untersuchungen bilanzierten die gesamte Säule aus Retentionsraum und Filter gemeinsam. Prüfgegenstand sind jedoch die Substrate. Daher wird die Auswertung für das Substrat vorgenommen und zusätzlich für die gesamte Säule, um an das vorliegende Datenmaterial anzuschließen

Die Messergebnisse werden in einem Substratsteckbrief dokumentiert, der als Anlage beigefügt ist. Probenherkunft und -kennung, Ergebnisse der physikalisch-chemischen Substratuntersuchung sowie die Ergebnisse der Säulenversuche werden dargestellt und in einer Abschlussbewertung zusammengefasst. Für die Einfahrphase werden die Konzentrationen und Wirkungsgrade für $\text{NH}_4\text{-N}$ und S_CSB abhängig von der Beschickungshöhe dargestellt. Für die Prüfphase werden die Ergebnisse der beiden Hochlastversuche für $\text{NH}_4\text{-N}$ und S_CSB in folgender Weise aufgeführt:

- Konzentration und Wirkungsgrad abhängig von der Beschickungshöhe
- Summe der Filtratfracht abhängig von Zulauftracht und Infiltratfracht
- Wirkungsgrade des Retentionsraumes abhängig von der Zulauftracht
- Wirkungsgrade des Substrates abhängig von der Infiltratfracht.

Prüfkennwerte sind der Frachtrückhalt und der frachtbezogene Wirkungsgrad bei beiden Hochlastversuchen der Prüfphase. Die Berechnung der Prüfkennwerte erfolgt anhand der Infiltrat- und Filtratfrachten.

Zur Definition des Prüfgegenstandes sind zwei Optionen möglich:

1. Gleichwertigkeit des zu prüfenden Substrates mit dem Referenzsubstrat gemäß DWA

Die Gleichwertigkeit kann als gegeben angenommen werden, wenn der Frachtrückhalt für Ammonium des zu prüfenden Substrates nicht mehr als 10 % unter dem des Prüfsubstrates liegt und die frachtbezogenen Wirkungsgrade um höchstens 10-Prozentpunkte differieren.

2. Einhaltung einer Mindestanforderung an den Frachtrückhalt für Ammonium

Die Eignung des zu prüfenden Substrates ist gegeben, wenn der Frachtrückhalt bezogen auf eine definierte Infiltrationsfracht für Ammonium den Wert 9 g/m² um höchstens 10% unterschreitet.

Die zweite Option zur Definition des Prüfgegenstandes erfordert lediglich die Untersuchung des zu prüfenden Substrates. Unter Abwägung der einfacheren Versuchsdurchführung und der geringeren Kosten wird für die zweite Option plädiert. Der Grenzwert für den Frachtrückhalt leitet sich aus den derzeit vorliegenden Hochlastversuchen ab und sollte durch weitere Untersuchungen an unterschiedlichen DWA-konformen Substraten statistisch abgesichert werden.

Unabhängig von den genannten Prüfkennwerten und –gegenständen sollen die Abweichungen im Bereich der Sieblinie im Feinkornbereich (<0,063 mm) gegenüber den Planungshilfen gering sein, damit keine nachteiligen Auswirkungen für Durchlässigkeit und Kolmationsgefahr des Filters zu befürchten sind. Andere in den technischen Regelwerken und Planungshilfen genannten Anforderungen an das Filtersubstrat (z.B. Schadstoffgehalt) müssen eingehalten werden.

3.7 Hauptergebnisse der durchgeführten Untersuchungen in Zuge der Entwicklung des Prüfverfahrens

Im Zuge der Entwicklung des Prüfverfahrens wurden einige Hauptergebnisse festgestellt, die im Hinblick auf das Prüfverfahren und die Verhältnisse an Retentionsbodenfiltern generell von Interesse sind:

- Die an beiden Standorten parallel betriebenen Untersuchungen wiesen eine im Wesentlichen gute, teilweise sehr gute Übereinstimmung auf. Bei NH₄-N unterschied sich der mittlere Frachtrückhalt um 7% beim Substrat DWAI und um 5% beim Substrat DWII. Der mittlere Frachtrückhalt für CSB differierte beim Substrat DWAI um 3,2 % und

um 1,2% beim Substrat DWAll. Systematische Abweichungen traten zwischen beiden Standorten nur in untergeordneter Größenordnung auf, so dass von einem konsistenten Prüfvorgang auszugehen ist.

- Ortsspezifische Abwassermatrizes beeinflussten anfangs in der Prüfphase die Abbauprozesse im Überstau unterschiedlich, so dass die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht gewährleistet werden kann. Durch die Verwendung eines standardisierten Beschickungswasser konnte dieser Effekt eliminiert werden.
- Im Überstau der Filter traten bei der Verwendung des synthetischen Beschickungswassers teilweise erhebliche Abbauprozesse auf. Offensichtlich wurde das Wasser von der Filterbiozönose angeimpft. Der Abbau führte zur erheblichen Minderung des Sauerstoffgehaltes im Überstau. Der Vergleich von S_{CSB} und CSB verdeutlichte einen Anstieg des partikulären Anteils des CSB , der im Wesentlichen durch Biomasseentwicklung im Überstau zu erklären ist.
- Eine kleinere Portionierung der Beschickungen dämpfte den Abbau im Überstau. Die kleinere Portionierung erfordert höheren Personaleinsatz oder eine weitere Automatisierung des Prüfverfahrens.
- Die Verminderung der Aufenthaltszeit durch eine Erhöhung des Drosselabflusses (bis $0,05 \text{ l/(s}\times\text{m}^2)$) beeinflusst ebenfalls den Abbau im Überstau maßgeblich. Mit zunehmendem Drosselabfluss nahm der Abbau ab.
- Ein höherer Drosselabfluss von $q_d=0,02 \text{ l/(s}\times\text{m}^2)$ führte in allen Versuchen zu einer Minderung des Abbaus im Überstau und vermutlich auch zu einer besseren Sauerstoffversorgung im Filter. Damit gestattet er eine bessere Reproduzierbarkeit des Versuchsablaufes. Im technischen Regelwerk wird diese Drosselabflussspende auch empfohlen, wenn das Substrat die Anforderung der Kornzusammensetzung einhält. Da im Zuge der Substratprüfungen zumindest eine Gleichwertigkeit des zu prüfenden Substrates nachzuweisen ist, kann auch bei erfolgreich geprüften Substraten mit der höheren Drosselabflussspende im großtechnischen Betrieb gearbeitet werden. Die Wahl der Drosselabflussspende $q_d=0,02 \text{ l/(s}\times\text{m}^2)$ für das Prüfverfahren hat somit verfahrensimmanente Vorteile und im großtechnischen Einsatz begründbare Vorzüge.
- Die Versuchssäule ist in die beiden Reaktionsräume Überstau und Filtersubstrat zu differenzieren. Die Belastung des Filtersubstrates muss durch die Beprobung des Infiltrates explizit erfasst werden. Berechnungen von Wirkungsgraden mit der Beschickungsfracht als Eingangsgröße können zu einer teilweise deutlichen Überschätzung des Frachtrückhaltes des Substrates führen. Für eine Eignungsprüfung ist demnach eine Beprobung des Infiltrates unbedingt erforderlich, um realitätsgerechte Infiltratfrachten für die Berechnung des Frachtrückhaltes zu erhalten.

- Deutlich wird an beiden Standorten, dass der zweite Hochlastversuch nicht unabhängig vom ersten Versuch ist, da die Filterbiozönose vorgeprägt ist. Minderung könnten längere Regenerationsphasen herbeiführen, die jedoch explizit noch zu ermitteln wären.
- Der Vergleich der unterschiedlichen Substrate verdeutlichte, dass auch Substrate mit Sieblinien, die von den technischen Regeln abweichen, vergleichbare oder höhere Reinigungsleistungen erzielen können. Damit wird die Erfordernis eines standardisierten Eignungsnachweises unterstrichen.
- Die praktische Durchführung der entwickelten Vorgehensweise zur Eignungsprüfung von Substraten durch Säulenversuche ist zum Teil automatisierbar. Die Vorbereitung und Durchführung der Beschickungen und die Arbeiten zu den Probenahmezeitpunkten sind dennoch personalaufwändig. Eine sehr genaue Versuchsplanung mit arbeitszeitgerechter Organisation der Zeitpunkte für Beschickung und Tausch der Probenahmebehälter ist für die erfolgreiche Durchführung im Praxisbetrieb von erheblicher Bedeutung.

4 Vertikaler Verlauf von Stoffrückhalt und Sauerstoffverteilung

Die Rückhalteleistung von Ammonium in vertikaler Verteilung des Säulenkörpers war Gegenstand einer Untersuchung an der TU Kaiserslautern. Ziel der Untersuchung war, vertiefte Kenntnisse über das Prozessgeschehen zu erhalten und Hinweise zur möglichen Verringerung der Filtermächtigkeit zu gewinnen.

In einige Versuchssäulen der Entwicklungsarbeiten zum Prüfverfahren wurden in unterschiedlichen Tiefen kleine Versuchsbehälter (sog. Nutschen) mit dem jeweiligen Substrat der Säule eingebaut. Paralleluntersuchungen mit Säulen ohne Nutschen konnten keine nachteiligen Einflüsse dieser Einbauten feststellen. Nach Abschluss einer Versuchsserie in den Versuchssäulen wurde diese zerlegt und die Nutschen separat weiten Beschickungen unterzogen. Die Hauptergebnisse der Untersuchungen an Nutschen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Alle getesteten Substrate halten wesentlich besser Ammonium zurück als dies zu erwarten war. Es ließen sich keine vollständigen Durchbrüche erzeugen. Bereits vor der Einfahrphase waren sehr hohen Ammoniumrückhalte feststellbar.
- Die Ammoniumsorption ist bei allen Substraten über alle Tiefen weitgehend gleich. Dies ist ein überraschendes Ergebnis, da bisher davon ausgegangen wurde, dass Ammonium verstärkt in den oberen Schichten sorbiert wird, da sich hier die stark sorbierende Biomasse besonders anreichert. Die biogene Sorption wurde offensichtlich bisher überschätzt.

- Der Austrag von Nitrat ist in den oberflächennahen Schichten erhöht durch die vermutliche Anreicherung von organischem Stickstoff mit anschließender Mineralisierung über Ammonium zum Nitrat.
- Alle Substrate zeigen, dass eine höhere Filtermächtigkeit auch zu einem höheren Ammoniumrückhalt führt. Beim Lavasand ist die Sorptionsleistung jedoch extrem hoch, so dass abhängig vom jeweiligen Behandlungsziel auch mit geringeren Mächtigkeiten gearbeitet werden könnte.

Sauerstoffmangel in Bodenfiltern kann zu Störungen biologischer Abbauprozesse und der Sorptionsprozesse führen und die innere Kolmation des Filters begünstigen. Daher wurden an der TU Kaiserslautern Sauerstoffmessungen *in situ* durchgeführt, um die örtlich und zeitlich veränderliche Sauerstoffkonzentration im Tiefenverlauf des Filters während und nach der Beschickung zu erfassen. Spezielle Mikrosauerstoffsensoren in verschiedenen Tiefen des Bodensubstrats gestatteten diese Messaufgabe ohne den Bodenkörper in seiner Struktur erheblich zu stören. Die Untersuchungen wurden in Laborsäulen mit sehr verschiedenen Filtersubstraten (Rheinsand, Lavasand) parallel zu den Untersuchungen zur Entwicklung des Prüfverfahrens durchgeführt. Daher standen die Analyseergebnisse für $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, S_CSB , pH-Wert, Temperatur und Redoxpotenzial ebenfalls zu Verfügung. Die Untersuchungen ergaben folgende Hauptergebnisse:

- Die alleinige Messung von Sauerstoff im Säulenablauf ist für die Sauerstoffverhältnisse im gesamten Filterkörper nicht repräsentativ.
- Die Messungen der Redoxspannung und des pH-Wertes im Säulenablauf lassen keine Aussagen zu Redoxbedingungen im Filterinneren zu.
- Anhand des O_2 -Konzentrationsgradienten zwischen Überstauwasser und Säulenablauf wird gezeigt, dass das infiltrierende Abwasser auf seinem Weg durch den Filterkörper mit Sauerstoff angereichert wird. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse einer Volumenbilanz unterstützt. Hiernach ist in einem gesättigten, überstauten Filterkörper ein signifikanter Anteil der Bodenporen mit Bodenluft gefüllt.
- Die Ergebnisse bei Beschickungshöhen von $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ zeigen, dass überwiegend aerobe Bedingungen in gesamten Filterkörper beider Substrate während des gesamten Ereignisses vorlagen.
- Bei größeren Beschickungshöhen von $1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ bleibt in den ersten Stunden nach Versuchsanfang der ganze Filterkörper aerob. Danach wird die oberste Schicht anaerob (bis zu 24 cm bzw. 20 cm) während die untere Schichten aerob bleibt. Die Sauerstoffkonzentration im Ablauf wird erst dann auf 0 mg/l sinken, wenn es im gesamten Filterkörper keinen Luftsauerstoff mehr gibt. Damit ist abzuleiten, dass die Sauerstoffkonzentration in verschiedenen Filterschichten sich je nach der Höhe der

hydraulischen und stofflichen Belastung ändert und dass sich hinsichtlich der Milieubedingungen im Filterkörper verschiedene Zonen bilden. Abhängig von der Beschickungshöhe und der stofflichen Belastung können sich in einem Filterkörper gleichzeitig in unterschiedlichen Tiefen aerobe, anoxische oder anaerobe Bedingungen einstellen.

5 Tracerverfahren zur Untersuchung der Fließvorgänge im Filter

An der FH Münster wurde ein Tracerverfahren nebst Auswertemethodik zur Ermittlung von Parametern des Wassertransportes in Retentionsbodenfiltern weiterentwickelt. Ziel der Untersuchung war die Bestimmung von Bodenparametern (Porenvolumen, Durchlässigkeitsbeiwert), hydraulischen Parametern (Fließgeschwindigkeiten), Transportparametern (Dispersions-Koeffizient und longitudinale Dispersion) und der Aufenthaltszeit des Wassers im Filter. Die Ergebnisse können als Filterkenndaten verwendet werden und dienen zudem als Eingangsdaten für die numerische Simulation des Wassertransportprozess im Filter, der Basis für die Stofftransport und -umwandlungsprozesse ist. Die Traceruntersuchungen sind an Laborsäulen und großen Containerlysimetern durchgeführt worden. Als Tracer wurde Uranin eingesetzt. Die Tracerdetektion erfolgt on-line als kontinuierliche Ganglinie mit einem mobilen Fluorometer MKT-2 (Fa. Sommer GmbH). Hauptegebnisse der Verfahrenentwicklung sind:

- Das effektivste Verfahren zur Tracerbeaufschlagung war die Einzelbeschickung mit Vorsättigung und einer nachfolgenden Beschickung mit Leitungswasser zum Ausspülen des Tracers.
- Als Markierungsmethoden können Stoß- und Sprungmarkierung eingesetzt werden. Der Vorteil der Stoßmarkierung ist das direkte Ableiten der charakteristischen Abstandsgeschwindigkeiten aus der Tracerdurchgangskurve. Die Stoßmarkierung setzt jedoch voraus, dass der Tracer sehr konzentriert aufgebracht wird, wobei auf die gleichmäßige Verteilung des Tracers auf die Filteroberfläche zu achten ist.
- Die online-Messung des Tracerdurchgangs im Ablauf hat sich sehr bewährt, da sie sehr genau und aufwandsarm ist. Das Filtrat ist weitgehend partikelfrei mit relativ konstanten Werten von pH-Wert und Temperatur, so dass die Fluoreszenz praktisch nicht durch Störgrößen beeinträchtigt wird. Die kontinuierliche Messung kann sehr genau die Maximal- und die dominierende Geschwindigkeit erfassen.
- Die Versuche an Containerlysimetern haben die Möglichkeiten gezeigt, Anisotropien und Makroporenfluss im Filter zu identifizieren. Eine Adaption der Tracerversuche für

größentechnische Anlagen ist empfehlenswert, um Aussagen zur Qualität des Substrateinbaus zu treffen.

- Für die Datenauswertung wurde ein EXCEL-Tool erstellt, das die erforderlichen Kenndaten aus den Messdaten des Fluorometers errechnet. Eine vollautomatische Auswertung der Versuche ist insbesondere bei Tracerganglinien mit stärkeren Schwankungen oder Irregularitäten nicht empfehlenswert, da die Detailinterpretation und Festlegung von Kenngrößen vertieften fachlichen Sachverstand erfordert.

6 Kontinuierliche Gütemessung an Abläufen von Retentionsbodenfiltern

An der FH Münster wurde eine Messstation für die kontinuierliche Messung von Güteparametern im Ablauf von Retentionsbodenfiltern und Lysimetern entwickelt und geprüft. Das Ziel bestand darin, die messtechnische Tauglichkeit der Methodik festzustellen und die zur Verfügung stehenden Sonden auf ihre Einsatzfähigkeit zu beurteilen. Eine repräsentative Untersuchung der am Markt befindlichen Sonden war nicht Projektgegenstand. Die untersuchten Sonden wurden von der Fa. WTW für das Vorhaben kostenlos zur Verfügung gestellt. Eingesetzt wurden die Sonden SensoLyt® SEA-HP (pH-Wert), SensoLyt® PtA (Redoxpotential), TetraCon 700 IQ (Leitfähigkeit), TriOxatik 700 IQ (Sauerstoffkonzentration), VARiON 700 IQ (Ammonium ($\text{NH}_4\text{-N}$), Nitrat ($\text{NO}_3\text{-N}$)).

Messstrecke besteht aus beliebig hintereinander koppelbaren Sondenhalterungen, die als Gegenstrom gerichtete 45°-Abzweige DN 50 in PVC ausgeführt sind. Die Sonden sind durch Schraubverbindungen einfach montierbar. Die Sondenhalterungen sind durch Rohrstücke DN 32 mit Schraubverbindungen hintereinander angeordnet. Die gedückerte Anordnung der Messstrecke gewährleistet die vollständige Wasserbedeckung der Sonden in jeder Betriebsphase. Die Sonden wurden in Einzeltests und gemeinsam in der Anordnung als Messstrecke auf Präzision und Ansprechverhalten ausgiebig getestet.

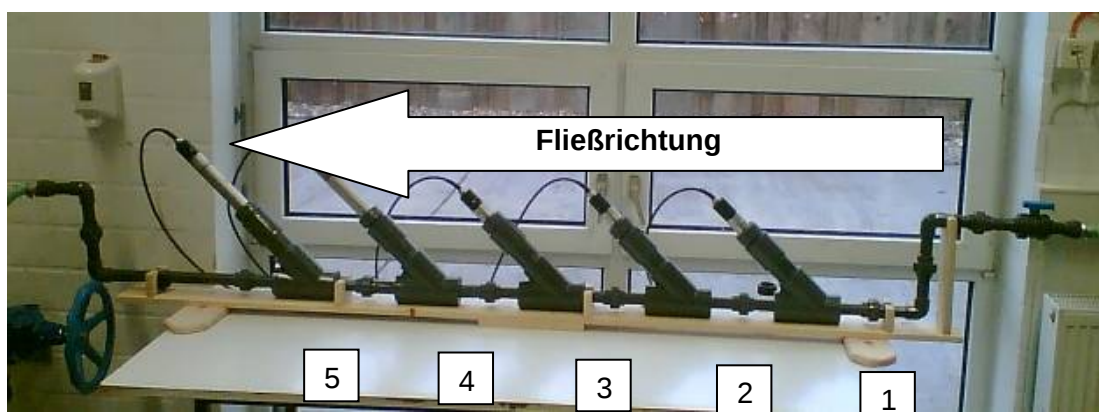


Bild 2: Messstrecke für Gütesonden

Folgende Hauptergebnisse sind zu nennen:

- Die entwickelte Messstrecke ist für die betrieblichen Belange von Retentionsbodenfiltern und Lysimetern sehr gut geeignet. Der sachgerechte Sondenbetrieb ist auch bei relativ geringen Durchströmungsgeschwindigkeiten ab $0,23^1$ m/s möglich. Durch die Dükerung der Messstrecke ist die dauerhafte Benetzung der Sonden gewährleistet.
- Die Präzision und das Ansprechverhalten der Sonden für elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert und Sauerstoff ist für online-Messungen gut geeignet. Die Messabweichungen betrugen 0 bis +1 % v.M. bei der elektrischen Leitfähigkeit, -1,5 bis +1,5 % v.M. beim pH-Wert und -4 bis +3 % v.M. bei Sauerstoff. Die Sonden für elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert weisen T90-Werte von unter 1 Minute auf. Bei der Sauerstoffsonde wurden mit einem T90-Wert von 5 Minuten die Herstellerangabe von 3 Minuten überschritten. Diese Werte sind angesichts der langsamen Prozesse in Retentionsbodenfiltern ohne weiteres akzeptabel.
- Für die Sonde TetraCon 700 IQ (Leitfähigkeit) sollte ein möglichst großer Messtopf vorgesehen werden, da bei der Messung ein Kugelfeld entsteht, welches nach Möglichkeit nicht beeinflusst werden sollte. Das Kugelfeld wird für die Anwendung in der Messstrecke durch Veränderung der Zellkonstante justiert.
- Der VARiON-Sensor zur Messung von Nitrat- und Ammonium-Stickstoff konnte bei den Untersuchungen nicht überzeugen. Präzision und Ansprechverhalten konnten in einer ersten Versuchsserie akzeptable Werte erreichen. In einer späteren, zweiten Versuchsserie waren hingegen grobe Mängel bei der Kalibrierung, der Präzision und den Ansprechverhalten festzustellen. Eine eindeutige Ursache war trotz intensiver Bemühungen auch im Zusammenwirken mit dem Hersteller nicht herauszufinden. Eine Alterung der Elektroden als verbliebene Erklärung überzeugt angesichts der nur halbjährlichen Betriebszeit nicht. Der reguläre Einsatz der Sonde in Retentionsbodenfiltern kann ohne weitere Klärung und Beseitigung der festgestellten Mängel derzeit nicht empfohlen werden.

7 Erkundung der Möglichkeit zur Simulation von Wasser- und Stofftransportprozessen in Retentionsbodenfiltern

Für die Simulationen wurde das Modul Constructed Wetlands 2D des Finite-Elemente Modells Hydrus-2D eingesetzt. Mit diesem kombinierten Modell können Wasser- und Stofftransport in variabel gesättigten Medien sowie die biochemischen Umwandlungs- und Abbauprozesse für organische Verbindungen, Stickstoffverbindungen und anorganischem

¹ Mindestanströmung für Sauerstoffsonde (TriOxmatic 700 IQ)

Phosphor örtlich und zeitlich hoch aufgelöst simuliert werden. Prinzipiell ist es mit dem Modell möglich Langzeitsimulationen von RBF durchzuführen (vgl. Uhl/Henrichs [2005]). Das Finite-Elemente-Modell (FEM) der Säulen hat einen 4-schichtigen Aufbau. Zur Simulation der Überstauschicht wurde eine fiktive Bodenschicht mit einem Gesamtporenvolumen von 100 % und einem Restwassergehalt von 0 % angenommen.

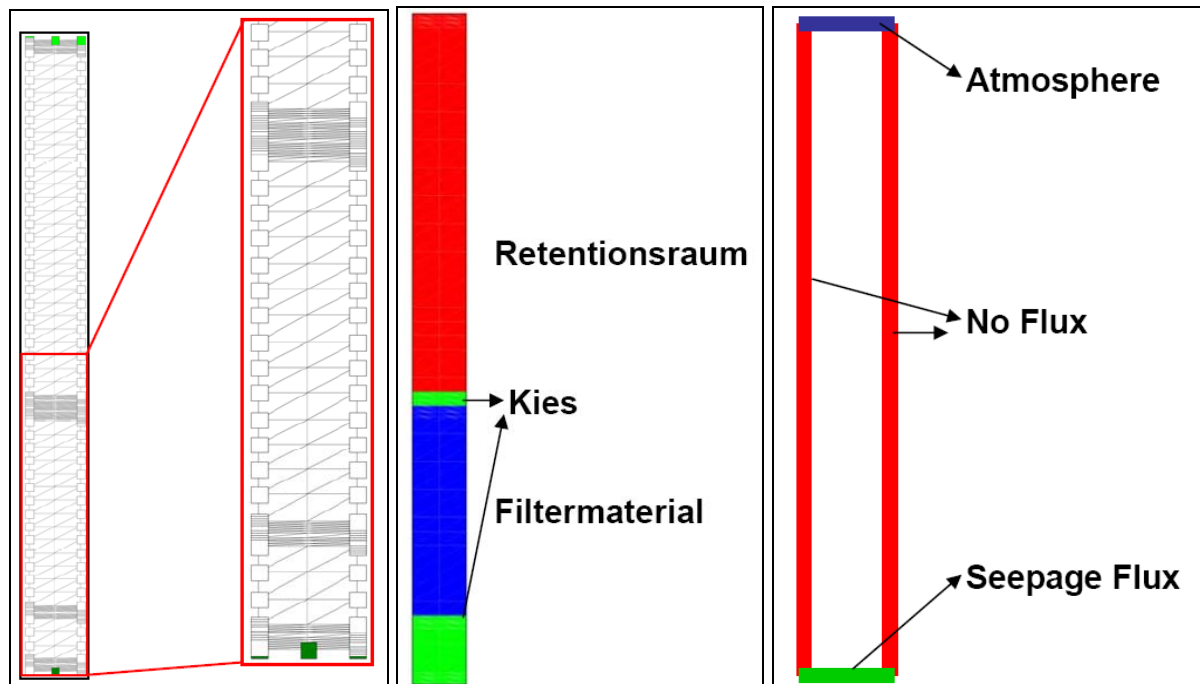


Bild 3: Darstellung des FE-Netzes, der Materialverteilung und der Randbedingungen

Sowohl für das eingesetzte Substrat DWA-II als auch den eingesetzten Kies (Deck- und Dränageschicht) wurden die hydrogeologischen Substrateigenschaften bestimmt und als Modelleingangsdaten vorgegeben. Für die Simulation des Wassertransports spielt das effektive Porenvolumen eine entscheidende Rolle. Modelltechnisch wurde davon ausgegangen, dass das gesamte vorhandene Porenvolumen durchströmt wird. Dies stellt eine so genannte 1-Regionen Simulation ohne immobile Zonen dar. Die Reaktionskinetik beinhaltet autotrophe (Nitrifikanten) und heterotrophe („Allrounder“) Mikroorganismen, die in der Substratschicht von der FOK bis 30 cm unter FOK linear abnehmend angesetzt wurden. Im Rahmen der Durchführung der Säulenversuche wurden in die Simulationssäule S-9 Sonden zur Bodenfeuchtemessung in 15 cm und in 50 cm unter der Filteroberkante eingebaut. Die Bodenfeuchtemessungen verfolgten das Ziel, die Filterpassage des Filtrats genauer beschreiben zu können. Des Weiteren sollten im Hinblick auf die Modellierung Informationen zum ungesättigten Fluss, zur Sättigungsphase und zur Vollsättigung ermittelt werden.

Die Ergebnisse der Bodenfeuchtemessung liefern neue Erkenntnisse im Bereich des Wasser- und Stofftransports. So konnte nachgewiesen werden, dass der am Strömungsprozess partizipierende Hohlraumanteil sich mit der aufgetragenen Beschickungshöhe ändert.

Bei Überstauhöhen von 1,25 m (HL) partizipierten im Durchschnitt 5 % mehr Poren am Durchströmungsgeschehen als bei den NL Versuchen die eine Überstauhöhe von 20 bis 25 cm bewirkten. Dies wird durch den größeren Porendruck im Filter verursacht. Dieser bewirkt zum Einen ein Zusammenpressen von in Poren gefangener Bodenluft und zum Anderen wird mehr Bodenluft im filtrierendem Medium gelöst und abtransportiert.

Für die Kalibrierung des Modells wurden die Beschickungsereignisse der Säulen S-9 und S-12 verwendet. Die Abbauprozesse im Überstauwasser des Retentionsraums bewirkten eine zum Teil erhebliche Minderung der Infiltratfracht. Daher konnten für Erstellung, Kalibrierung und Verifikation des Säulenmodells nur die Versuche benutzt werden, die eine Trennung der zwei Reaktionsräume Überstau und Filtersubstrat ermöglichen. Daher wurden für die Modellierung der Versuchssäulen die Hochlastversuche aus der Überprüfung der Handlungsanleitung (Kapitel 7) herangezogen, so dass nur Ereignisse simuliert wurden, bei denen das Infiltrat als Ganglinie beprobt wurde. Zusätzlich zu den Beschickungsereignissen der Säulen S-9 und S-12 (Kalibrierung) wurden die Daten der Säulen S-5 und S-10 für die Verifikation eingesetzt. Die Kalibrierung des Wasser- und Stofftransportmodells erfolgte auf der Basis von Tracerversuchen. Die Parameter wurden durch einen visuellen Vergleich der Ablaufkonzentrationsganglinien iterativ angepasst.

Das reaktionskinetische Modell wurde anhand der Ablaufkonzentrationsganglinien der Parameter $\text{NH}_4\text{-N}$ und S_CSB kalibriert. Der Vergleich der gemessenen und simulierten Ablaufkonzentrationsganglinien der Parameter $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NO}_2\text{-N}$ diente der Plausibilitätsprüfung der stattfindenden Prozesse (Infiltration und Nitrifikation).

Die im Rahmen der Kalibrierung ermittelten Parameterdatensätze für das reaktionskinetische Modell und für die Adsorptionsparameter von $\text{NH}_4\text{-N}$ und S_CSB konnten durch die Simulation von Beschickungsereignissen an den Säulen S-5 und S-10 verifiziert werden. Im Besonderen ist die Übertragung eines substratspezifischen Parameterdatensatzes bei variierender Drosselabflussspende gelungen.

Die Simulations-Varianten haben verdeutlicht, dass mit einer geringen Anzahl von Laborversuchen in Verbindung mit detaillierter Erfassung von chemischen und physikalischen Größen ein gut funktionierendes Säulenmodell erstellt werden kann. Das kalibrierte Säulenmodell ermöglicht die Simulation unterschiedlichster Randbedingungen und kann seriöse Ergebnisse dieser Szenarien berechnen. Gerade die im Betrieb von RBF wichtigen Fragestellungen bezüglich der hydraulischen (Beschickungshöhen) und stofflichen (Konzentrationen) Belastungsgrenzen eines Filters können anhand dieser Simulationen

besser beurteilt werden. Die Überführung der Simulationstechnik von der Säulen auf die Großtechnik mit entsprechenden Begleituntersuchungen (in situ Messungen von Sauerstoff und Bodenfeuchte) am RBF ist dringend zu empfehlen.

8 Literatur

- Dittmer, U., Welker, A. und Schmitt, T.G. (2002): *Bodenfilter "Saarbrücken - Ensheim" zur weitergehenden Mischwasserbehandlung*. In: Kaiserslautern, F.S.U. [Hrsg.]: *Tagungsband "Regenwasserbehandlung - Anwendungspraxis und Perspektiven"*. S. 111 - 134.
- DWA-M 178 (2005): *Empfehlungen für Planung, Konstruktion und Betrieb von Retentionsbodenfilteranlagen zur weitergehenden Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem*. DWA-Merkblatt 178, Hennef: GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V., ISBN 3-937758-37-2.
- Fuchs, S. (2003): *Retentionsbodenfilter - Betriebserfahrungen /Konsequenzen*. ATV-DVWK Regenwassertage 2003. Landau.
- Grobe, S., Henrichs, M., Janiczek, M., Uhl, M. und Merkel, W. (2005): *Weitergehende Mischwasserbehandlung mit Bodenfiltern, Untersuchungen zum Filteraufbau und Filterbetrieb zur Verbesserung der Reinigungsleistung insbesondere hinsichtlich hygienisch relevanter Mikroorganismen*. Abschlußbericht zum Untersuchungsauftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV), AZ: IV-9-041 107 0030.
- Grobe, S., Uhl, M., Merkel, W. und Overath, H. (2003): *Elimination hygienisch relevanter Mikroorganismen durch Bodenfilter zur Mischwasserbehandlung*. In: Aachen, I.f.S.d.R. [Hrsg.]: 36. Essener Tagung für Wasser-Abfallwirtschaft, Schriftenreihe GWA.
- MUNLV (2003): *Retentionsbodenfilter, Handbuch für Planung, Bau und Betrieb*. In: Nordrhein-Westfalen, M.f.U.u.N.L.u.V.M.d.L. [Hrsg.], ISBN 3-9808617-1-6.
- Netter, R.E. (1995): *Strömung in horizontal durchflossenen, bewachsenen Bodenfiltern und deren Einfluß auf die Abwasserreinigung*. In: Wilderer, P.A. [Hrsg.]: *Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft*, Technische Universität München. Bd. 123. München: Hieronymus Buchreproduktion.
- Schmitt, T.G., Dittmer, U. und Welker, A. (2005): *Entwicklung von zukünftigen Strategien zur weitergehenden Mischwasserbehandlung mit Hilfe von Bodenfilteranlagen*. Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Abschlussbericht des BMBF-Vorhabens Nr. 02WA0084.
- Uhl, M. und Henrichs, M. (2005): *Simulationsmodelle für Retentionsbodenfiltern zur Mischwasserbehandlung*. Münster, Fachhochschule Münster, Labor für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Abschlussbericht des BMBF-Vorhabens Nr. 1707503, 134 S.
- Uhl, M. und Jübner, M. (2001): *Durchführung ergänzender Säulenversuche zur Pilotfilteranlage Alsdorf*. Münster, FH Münster, Labor für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Auftraggeber: Landes Umwelt Amt (LUA) NRW, Schlussbericht (unveröffentlicht).
- Uhl, M. und Jübner, M. (2004): *Retentionsbodenfilter zur Mischwasserbehandlung, Untersuchung von Sandsubstraten und Betriebsweisen*. In: *Korrespondenz Abwasser*, 51 (3), S. 261-270.
- Wozniak, R. (2007): *Ermittlung von Belastungsgrenzen an Bodensubstraten zur weitergehenden Mischwasserbehandlung in Retentionsbodenfiltern*. Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Dissertation.