

**Dosierung von Pulveraktivkohle vor einen  
nitrifizierenden Biofilter auf der ARA Freiburg**  
**grosstechnischer Versuch zur Elimination von  
organischen Spurenstoffen**



*Februar 2020*

Redaktion: VSA-Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“

M. Horisberger, Triform SA

*Eine ausführliche Darstellung dieser Versuche ist im [Abschlussbericht](#) [1] verfügbar, der online unter [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch) abgerufen werden kann.*

Danksagung: Die Autoren danken den verschiedenen Akteuren, die an der Umsetzung und Ablauf des Versuchs beteiligt waren, insbesondere: Roman Aeby, Mario Folly sowie das Personal der ARA Freiburg, Alain Berset (Triform), Adriana Gonzalez Ospina, Jean-Michel Grenaingaire und Jérôme Albertini, Erwan Lotode (SUEZ).

Quelle Foto: M. Horisberger, Triform SA

## **Inhalt:**

<b>1. Einführung</b> .....	<b>5</b>
<b>2. ARA Freiburg</b> .....	<b>6</b>
<b>3. Versuchsziele</b> .....	<b>7</b>
<b>4. Ablauf des Versuchs</b> .....	<b>8</b>
<b>5. Ergebnisse</b> .....	<b>10</b>
<b>6. Schlussfolgerung</b> .....	<b>16</b>
<b>7. Literaturverzeichnis</b> .....	<b>18</b>

## Zusammenfassung

Die Revision der Gewässerschutzgesetzgebung sowie die Planung des Kantons Freiburg sehen vor, dass die ARA Freiburg bis 2025 mit einer zusätzlichen Stufe zur Behandlung der organischen Spurenstoffe ausgestattet wird. In diesem Zusammenhang hat die Stadt Freiburg das Ingenieurbüro Triform SA beauftragt, eine Vorstudie durchzuführen. Dabei zeigte sich, dass sowohl die Ozonung als auch die Dosierung von Pulveraktivkohle (PAK) auf die bestehenden Biofilter interessante Optionen sind, letztere vor allem wegen der beengten Platzverhältnisse. Aber dieses Verfahren mit PAK wurde bisher weder gebaut noch pilotiert. Daher war ein grosstechnischer Versuch nötig, der von November 2016 bis Juli 2017 auf der ARA Freiburg durchgeführt wurde.

Ziel war einerseits zu untersuchen, ob die bestehenden Bauwerke als Kontakt- und Abtrennreaktor für die PAK-Dosierung dienen können, und andererseits die Leistungsfähigkeit und betriebliche Parameter zu bestimmen. Einer der acht bestehenden Biofilter wurde mit einer automatischen Dosierung von PAK und Fällmittel ausgestattet.

Die Reinigungsleistung bezüglich der 12 Leitsubstanzen lag bei einer Dosierung von 10 g PAK / m<sup>3</sup> (1.4 gPAK/gDOC) zwischen 75% und 83% allein über den Biofilter beziehungsweise zwischen 82% und 91% bei einer Dosierung von 15 g PAK / m<sup>3</sup> (2.2 gPAK/gDOC). Der gesetzlich vorgeschriebene Reinigungseffekt von 80% bezüglich Rohabwasser wird mit diesen Dosierungen erreicht.

Während der Versuche zeigte sich keine Störung der Nitrifikation durch die PAK. Der Grenzwert für gesamte ungelöste Stoffe (GUS) wurde ebenfalls eingehalten, obwohl die Belastung von GUS+PAK die Dimensionswerte der Biofilter überschritt. Mit höherer Dosierung stiegen die Trübungs- und GUS-Werte im Auslauf tendenziell an. Es wurde keine unerwünschte Anreicherung von Kohle bemerkt.

Im Zuge eines VSA-Projektes in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) wurden thermogravimetrische Analysen zur Bestimmung des Anteils von PAK an den GUS-Ablaufkonzentrationen durchgeführt. Der PAK-Schlupf lag bei 5-12% der dosierten Menge. Diese Werte liegen über denjenigen vergleichbarer Verfahren, weshalb eine abschliessende Filtrationsstufe nötig ist, um den PAK-Schlupf im Sinne eines sachgemässen Gewässerschutzes zu minimieren.

Die Benutzung der Biofilter als Kontaktreaktoren in Kombination mit einer abschliessenden Filtrationsstufe scheint für die Spurenstoffelimination mit PAK für die ARA-Freiburg geeignet.

*Ist es möglich, zur Spurenstoffelimination Pulveraktivkohle auf einen bestehenden nitrifizierenden Biofilter zu dosieren und so Platz zu sparen, ohne den Biofilter zu beeinträchtigen? Diese und weitere Fragen werden im vorliegenden Bericht im Rahmen des grosstechnischen Versuchs auf der ARA Freiburg behandelt.*

## **1. Einführung**

Infolge der Revision des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) und der Gewässerschutzverordnung (GSchV) sowie gemäss der Planung des Kantons Freiburg [2] muss die ARA Freiburg bis 2025 über eine Behandlung von organischen Spurenstoffen verfügen. Die gesetzlich vorgeschriebene Reinigungsleistung zwischen Zu- und Ablauf der ARA beträgt 80%.

In diesem Zusammenhang hat die Stadt Freiburg das Ingenieurbüro Triform SA beauftragt, eine Vorstudie durchzuführen. Dabei zeigte sich, dass sowohl die Ozonung als auch die Dosierung von Pulveraktivkohle (PAK) auf die bestehenden nitrifizierenden Biofilter interessante Optionen sind. Die zweite Option ermöglicht die Nutzung der bestehenden Einrichtungen, was vor allem wegen der beengten Platzverhältnisse auf der ARA Freiburg von Vorteil ist. Sie würde auch die künftige Anbindung von Einzugsgebieten mit Industrien ermöglichen, deren Abwässer für eine Behandlung in einer Ozonung problematisch sein könnten.

Es wurden mehrere Forschungsprojekte lanciert, um die direkte Dosierung von PAK in die Biologie (Beispiel ARA Wetzikon [3]) oder vor bestehende Sandfilter (Beispiel ARA Schönau [4]) zu untersuchen; die bisherigen Ergebnisse sind vielversprechend. Diese Technologien ermöglichen es, Platz zu sparen und die Investitionskosten zu reduzieren, da die bestehende Infrastruktur genutzt wird. Bis heute wurde der Einfluss von PAK auf nitrifizierende Biofilter nicht untersucht. Deshalb wurde der Versuch auf der ARA Freiburg initiiert, der von November 2016 bis Juli 2017 durchgeführt wurde. So konnte die Machbarkeit dieser PAK-Anwendung bestätigt werden. Der Versuch wird im vorliegenden Bericht beschrieben.

Nach der vollständigen Auswertung des Variantenvergleichs entschied sich der Bauherr für die Behandlung mit Ozon. Das Vorprojekt soll im Laufe des Jahres 2020 erstellt werden.

## 2. ARA Freiburg

Die ARA Freiburg behandelt die kommunalen Abwässer der Gemeinde Freiburg und einiger benachbarter Gemeinden. Des Weiteren behandelt sie das Industrieabwasser eines Milchverarbeitungsbetriebs (Crema SA) und ist auf 182'000 Einwohnerequivalente sowie einen Durchfluss bei Trockenwetter  $Q_{TW}$  von 45'000 m<sup>3</sup>/Tag ausgelegt.

Die biologische Reinigung besteht aus Belebtschlamm-Becken mit Sedimentation für den Kohlenstoffabbau sowie nitrifizierenden Biofiltern (Abb. 1). Bis zu 300% des Abwassers wird bei Trockenwetter zurückgeführt, um einen konstanten Durchfluss bei der biologischen Behandlung aufrechtzuerhalten und eine Teil-Denitrifikation durchzuführen. Für die Routineanalysen auf der ARA werden an mehreren Stellen Proben entnommen (Nummerierung Abb. 1).

Während der Versuchsreihe betragen DOC- und GUS-Konzentration im Ablauf der ARA jeweils rund 9 mg/l. Im Zulauf zu den nitrifizierenden Biofiltern betrug die GUS-Konzentration rund 14 mg/l. Der durchschnittliche tägliche Durchfluss betrug 25'400 m<sup>3</sup>/Tag und  $Q_{TW,VSA} = 18'800$  m<sup>3</sup>/Tag ( $Q_{max} = 85'400$  m<sup>3</sup>/Tag). Die Tab. 1 enthält Informationen zur Kapazität und Funktionsweise der Biofilter.

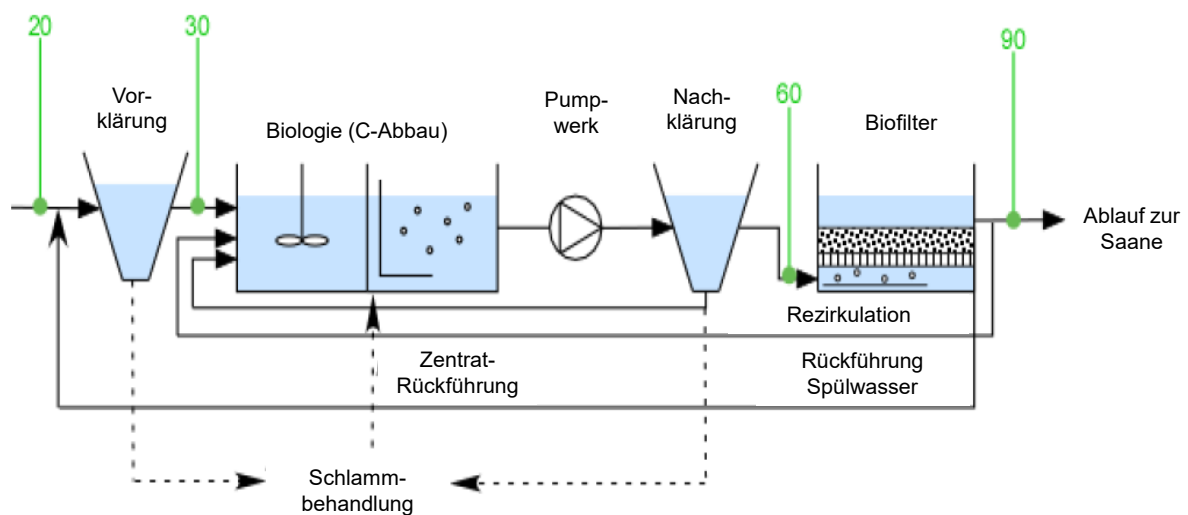


Abb. 1: Behandlungsschritte der ARA Freiburg. Probenahme; 20: Rohabwasser nach Vorbehandlung, 30: Ablauf Vorklärbecken (Zulauf Belebtschlamm), 60: Ablauf Nachklärbecken, Eingangskanal der Biofilter für die Nitrifikation, 90: Abwasserkanal zur Saane im Ablauf der Nitrifikation, nach Abzug des zurückgeführten Wassers

Dimensionen Biofor®	Anzahl Einheiten: 8
Auslegung	DOC: 2.08 kg/m <sup>3</sup> /Tag, d.h. 270 kg/Tag/Biofor® N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 0.65 kg/m <sup>3</sup> /Tag, d.h. 85 kg/Tag/Biofor® GUS: 0.69 kg/m <sup>3</sup> /Tag, d.h. 90 kg/Tag/Biofor® Rückhalteleistung GUS: 2.7 kg/m <sup>3</sup> /Tag, d.h. 351 kg/Zyklus/Biofor®
Filtrationsmedium	Typ: Biolit™ L 2.7 (granuliert), Granulometrie 2.5-2.9 mm Höhe des Filterbetts: 2.3 m
Aufstiegsgeschwindigkeit	Mindestgeschwindigkeit: 3 m/h Trockenwetter: 4 m/h Regenwetter: 9.8 m/h

*Tab. 1: Kapazität und Funktionsweise der Biofilter vom Typ Biofor® auf der ARA Freiburg*

Die ARA Freiburg verfügt über acht identische aufwärts durchströmte Filterzellen, die in zwei Behandlungsstrassen angeordnet sind. Während des Versuchszeitraums wurde die Anzahl der aktiven Filterzellen je nach Durchfluss beim ARA-Zulauf geregelt, bei Trockenwetter mit maximal sechs Filtern. Der erste Biofilter der Behandlungsstrasse 2 wurde als Testzelle für die PAK-Dosierung ausgewählt. Im weiteren Verlauf des Artikels wird dieser als «Test-Biofilter» bezeichnet.

### 3. Versuchsziele

Folgende Versuchsziele wurden festgelegt:

- Simulation der PAK-Dosierung in den Belebtschlamm und Messung des PAK-Rückhalts im Biofilter vom Typ Biofor®;
- PAK-Dosierung in den Zulauf des «Test-Biofilters» und Messung der Auswirkung der PAK-Einlagerung im Biofilter sowie der Leistung bezüglich Spurenstoffelimination;
- Prüfung einer allfälligen Störung der Nitrifikation;
- Überprüfung der Entwicklung der Druckverluste im «Test-Biofilter» im Verhältnis zur Zugabe von PAK;
- Überprüfung des reibungslosen Ablaufs des «Test-Biofilters» bei Zugabe von PAK (Nitrifikation, Entwicklung der Druckverluste, Spülprozess).

## 4. Ablauf des Versuchs

### PLANUNG

Es wurden die Dosierungen 0, 1.5, 10 und 15 mgPAK/l auf Spurenstoffelimination getestet (Tab. 2). Diese Dosierungen entsprechen im Durchschnitt 0, 0.2, 1.4 und 2.2 gPAK/gDOC. Diese Werte sind in derselben Grössenordnung wie in vergleichbaren Studien [5].

Phase	Ziele	Bedingungen	Dauer
Laborversuche	Auswahl der Aktivkohle		1 Monat
Ausrüstung, Programmierung und Funktionsprüfung	Anpassung des Test-Biofilters an die Bedingungen des Standardbetriebs (Veränderung von Durchfluss und Geschwindigkeit)		2 Monate
Phase 0	Bewertung des Ursprungszustands	Ohne Dosierung	1 Monat
Phase 1	Simulation der Dosierung in die Belebtschlamm-Biologie und Bewertung der Filterleistung des Biofilters	Dosierung 1.5 gPAK/m <sup>3</sup>	1 Monat
Diverse Tests	Auswirkungen von Fällmittel, Steuerung bei spezifischen Dosierungen (gPAK/gDOC auf Grundlage der UV-Absorption)	Dosierung 1.5 gPAK/m <sup>3</sup> Dosierung FeCl <sub>3</sub>	3 Monate
Phase 2	Bewertung des Rückhalts der Kohle sowie der Reinigungsleistung bezüglich org. Spurenstoffen	Dosierung 15 gPAK/m <sup>3</sup>	1 Monat
Phase 3	Bewertung des Rückhalts der Kohle sowie der Reinigungsleistung bezüglich org. Spurenstoffen	Dosierung 10 gPAK/m <sup>3</sup>	1 Monat
Zusätzliche Messungen	Bewertung des Anteils der Kohle am GUS	Variable PAK-Dosierung, mit oder ohne Fällmittel	1 Monat

Tab. 2: Zeitliche Gliederung des Versuchs

### AUSWAHL DER KOHLE

Die Auswahl der Pulveraktivkohle erfolgte anhand von Schüttelversuchen, bei welchen die Adsorptionsleistung der drei verschiedenen Pulveraktivkohlen durch die Messung der UV-Reduktion bei 254 nm sowie mit Spurenstoff-Analysen bewertet wurde. Die PAK NORIT® SAE SUPER wurde dank ihrer Leistung und aufgrund ihrer guten Vergleichbarkeit ausgewählt, da sie regelmässig zur Spurenstoffelimination auf ARA eingesetzt wird.



## EINRICHTUNGEN

Einer der acht Biofilter auf der ARA Freiburg wurde mit einer automatischen Dosierung der Kohle und des Fällmittels (Eisenchlorid  $\text{FeCl}_3$ ) ausgerüstet. Während des Versuchs wurde eine mobile PAK-Dosierung verwendet. Dabei handelt es sich um einen Container mit einem rund  $1 \text{ m}^3$  grossen PAK-Behälter (Kapazität 450 kg), einer Waage und einer Einrichtung zur Benetzung und zur Dosierung der PAK (Abb. 2). Ferner wurde eine Dosierstation für Eisenchlorid installiert. Die Zuführung von Kohle und  $\text{FeCl}_3$  erfolgt direkt in den Zulauf der Zelle «Test-Biofilter».



Abb. 2: Einrichtung für die PAK-Dosierung

## ANALYSEN

Die Erfassung der Wirksamkeit des Systems erfolgte mithilfe von Laboranalysen der Standardparameter und von 42 organischen Spurenstoffen, darunter die 12 gemäss UVEK-Verordnung zu messenden Stoffe [6]. Die Proben wurden zunächst vor dem Vorklärbecken (20), dann beim Zulauf (Nr.°61) und beim Ablauf (Nr.°91) des «Test-Biofilters» entnommen. Die Analyse der organischen Spurenstoffe wurde mittels 48-Stunden-Sammelproben in den Labors des Pôle de Compétence pour l'Analyse des Micropolluants, PACM des Kantons Waadt (DGE) durchgeführt.

Darüber hinaus wurden bestimmte Parameter, darunter die UV-Absorption bei 254 nm beim Zu- und Ablauf des «Test-Biofilters» sowie die Trübung beim Ablauf, kontinuierlich «online»

gemessen. Mit der  $UV_{254}$ -Messung sollte die Korrelation zwischen der Spurenstoffelimination und dem Rückgang des organischen Materials festgestellt sowie eine Leistungskontrolle in Echtzeit durchgeführt werden [7]. Die Messung der Trübung wurde eingesetzt, um GUS- und Kohleverluste festzustellen.

Ein nitrifizierender Biofilter ist nicht für Feststoff-Rückhalt ausgelegt. Dieser ist daher im Allgemeinen weniger gut als bei einem Sandfilter, der zu diesem Zweck entwickelt wurde. Aus diesem Grund erschien es angemessen, den PAK-Anteil am GUS im Ablauf des Biofilters mithilfe der thermogravimetrischen Analyse im Rahmen eines Projekts der VSA-Plattform zu untersuchen [8]. Diese Analysen wurden von der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) durchgeführt. Die Abwasserproben wurden während 24 Stunden unter verschiedenen Betriebsbedingungen entnommen.

## 5. Ergebnisse

### ELIMINATION VON ORGANISCHEN SPURENSTOFFEN

Im Ursprungszustand wurden im Belebtschlamm und dem «Test-Biofilter» ein durchschnittlicher Rückgang von 17% bzw. 4% gemessen. Bei einer Dosierung von 10 mg/l (1.4 gPAK/gDOC, Tab. 3) wurden im «Test-Biofilter» zwischen 75% und 83% gemessen; bei einer Dosierung von 15 mg/l (2.2 gPAK/gDOC, Tab. 3) zwischen 82% und 91%. Mit diesen Dosierungen kann die von der GSchV geforderte Reinigungsleistung von 80% zwischen dem Zu- und Ablauf der ARA erreicht werden (Abb. 3).

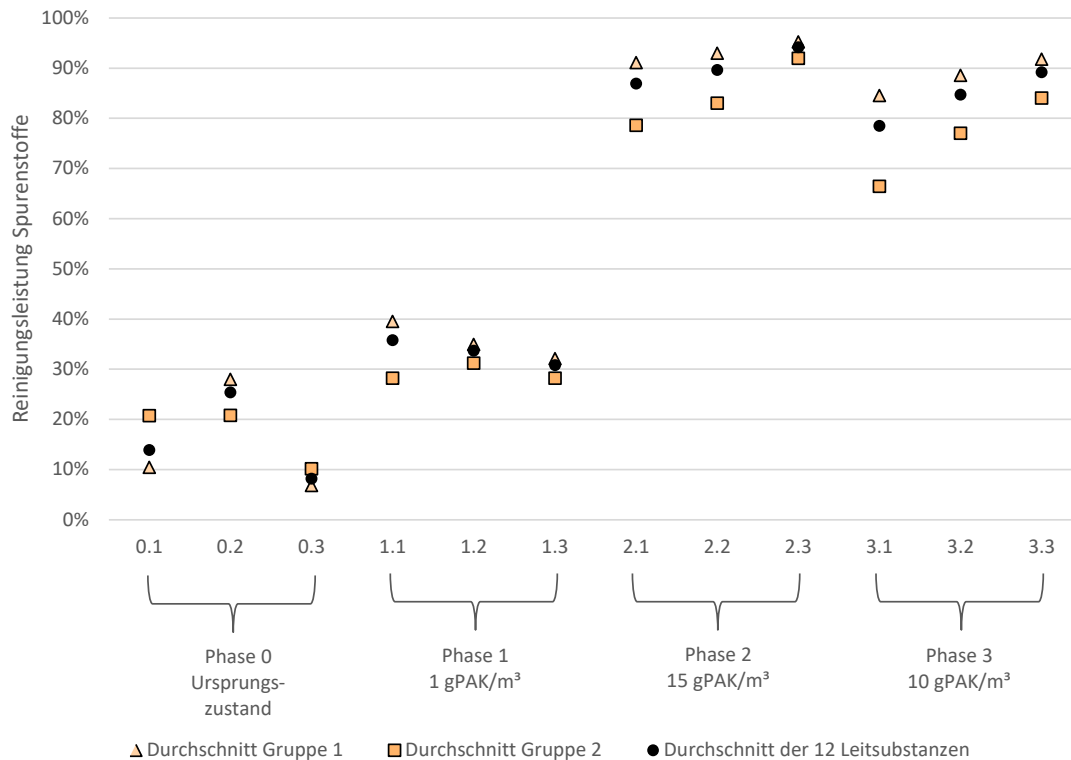


Abb. 3: Gesamte Reinigungsleistung, ARA + Biofor®Test (20-91) - Phasen 0 bis 3 (3 Messungen pro Phase)

In den Phasen 2 und 3 wurde eine Verbesserung der Reinigungsleistung bezüglich organische Spurenstoffe innerhalb einer Phase festgestellt (Abb. 3). Diese Beobachtung kann mehrere Erklärungen haben:

- Einfluss der Rückführung eines Teils der PAK durch das zurückgeführte Wasser aus dem Ablauf des «Test-Biofilters» zur biologischen Behandlung
- Einfluss der Rückführung eines Teils der PAK durch das zurückgeführte Schlammwasser ins Vorklärbecken
- Stabilisierung des Verfahrens im «Test-Biofilter»

Der Einfluss dieser verschiedenen Parameter wurde während der Versuchsreihe nicht ausführlich behandelt. Es ist möglich, dass die Dosierungen in g/m<sup>3</sup> im grosstechnischen Betrieb unter verschiedenen Bedingungen unterschiedlich sind. Ebenso beziehen sich die erwähnten Dosierwerte auf den Zulauf des untersuchten Biofilters und können aufgrund der Versuchsanordnung (Pilot im Teilstrom und Betrieb mit hoher interner Rezirkulation) nicht direkt auf andere Anlagen übertragen werden.

Allerdings ähneln die eingesetzten Dosierungen in gPAK/gDOC (Tab. 3) denjenigen von anderen Behandlungsverfahren mit Aktivkohle und bestätigen die Wettbewerbsfähigkeit des Verfahrens zur Erreichung der von der GSchV geforderten Reinigungsleistung von 80%.

Versuchs-Nr.	Dosierung [gPAK/m <sup>3</sup> ]	DOC Zulauf Test-Biofor (61) [mg/L]	Dosierung [gPAK/gDOC]	Mittlere MV-Eliminationsleistung [%]
0.1	0	8.0	0.0	5%
0.2	0	6.3	0.0	4%
0.3	0	8.3	0.0	3%
1.1	1.5	9.6	0.2	25%
1.2	1.5	8.4	0.2	24%
1.3	1.5	8.3	0.2	26%
2.1	15	7.4	2.0	82%
2.2	15	6.2	2.4	85%
2.3	15	7.4	2.0	91%
3.1	10	7.5	1.3	75%
3.2	10	7.6	1.3	82%
3.3	10	6.3	1.6	83%

Tab. 3: PAK-Dosierung und entsprechende Reinigungsleistung (Durchschnitt der zu messenden 12 Spurenstoffe gemäss UVEK-Verordnung)

## NITRIFIKATION

Die Beobachtungen im Rahmen der Versuchsreihe haben ein Problem bei der Rückführung des Filtrats aus der Schlammbehandlung ans Licht gebracht, das zu einer Überschreitung der Dimensionierungs-Frachten des Biofilters geführt hat. Um den Einfluss der Dosierung der Aktivkohle auf die Nitrifikation in den Biofiltern neutral zu bewerten, werden lediglich die Tage berücksichtigt, an denen die Auslegung nicht überschritten wurde.

Es zeigte sich, dass die Anforderungen hinsichtlich der Nitrifikation systematisch eingehalten wurden, solange die Ammonium-Fracht im Zulauf die Auslegung nicht überschreitete. Dies war auch während der Dosierung von Aktivkohle der Fall (Abb. 4 und Abb. 5). Nur bei Probe 2.3 ist bei einer relativ geringen Ammonium-Fracht im Zulauf eine unzureichende Nitrifikation festzustellen. Dieses Ergebnis konnte nicht erklärt werden, stellt aber eine Ausnahme dar.

Die Temperatur betrug in den Phasen 0 bis 2 zwischen 13 und 16°C, in der Phase 3 zwischen 20 und 23°C.

Bei üblichen Ammonium-Frachten wird die Nitrifikation durch das Vorhandensein von Aktivkohle im «Test-Biofilter» nicht gestört.

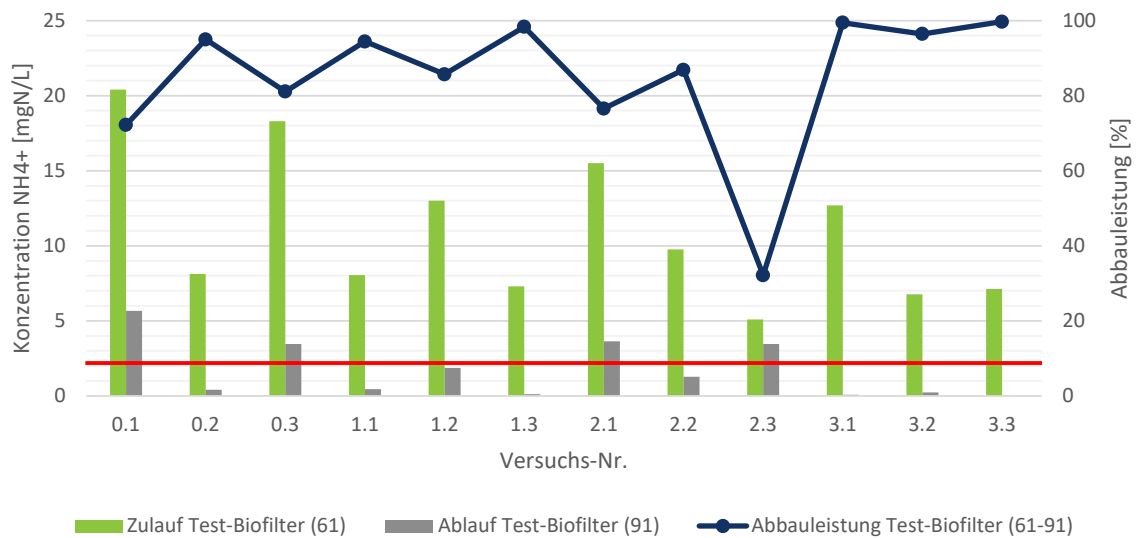


Abb. 4: Konzentration und Abbauleistung von  $N-NH_4^+$  im «Test-Biofilter» für jede MV-Analyse, rote Linie = Einleit-Grenzwert

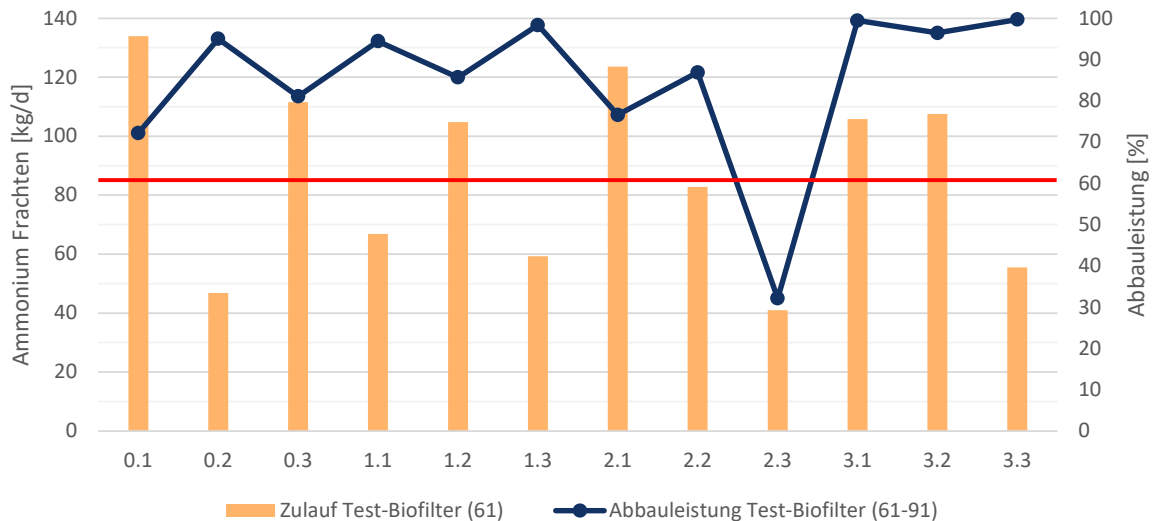


Abb. 5:  $NH_4-N$ -Fracht im Zulauf des „Test-Biofilters“ für jede MV-Analyse, rote Linie = Auslegung Biofilter

## GELÖSTER ORGANISCHER KOHLENSTOFF

Der Rückgang von DOC im «Test-Biofilter» betrug zwischen 23% und 35%, je nach PAK-Dosierung von 10 oder 15 mg/l (Abb. 6). Ohne PAK betrug der Rückgang von DOC im «Test-Biofilter» rund 6-10%.

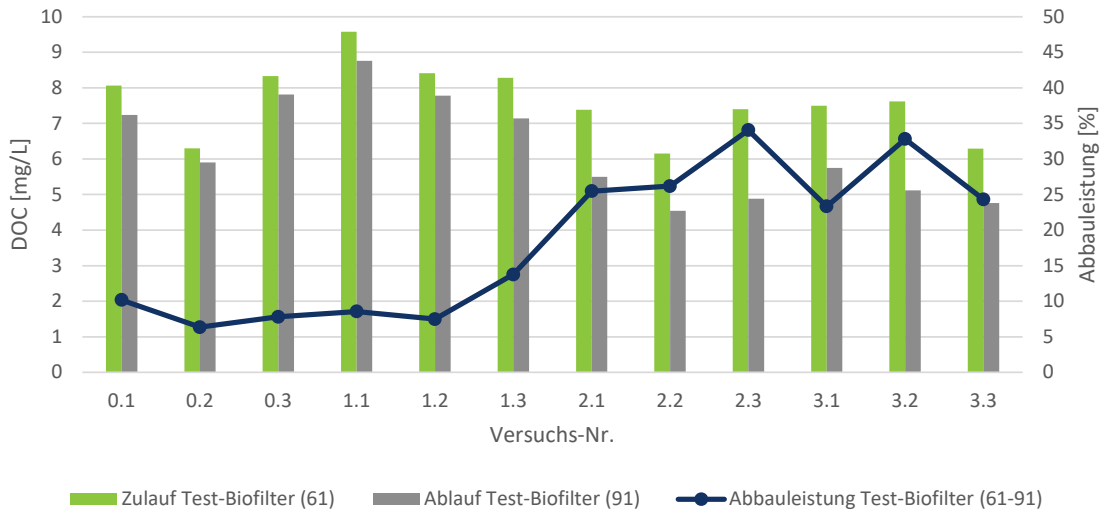


Abb. 6: Konzentration und Abbauleistung von DOC im «Test-Biofilter» (Zulauf 61 und Ablauf 91 des «Test-Biofilters») für jede MV-Analyse

## FESTSTOFFE

Der Grenzwert von 15 mg/l für die GUS-Konzentration wurde eingehalten, obwohl die Belastung von GUS+PAK die Dimensionenwerte überschritt (Abb. 7). Es wurde jedoch eine leichte Erhöhung der Trübung und der GUS-Konzentrationen im Ablauf während des Dosierungszeitraums festgestellt. Diese Erhöhung war aber kleiner als die beobachteten Variationen ausserhalb der Dosierungszeiträume.

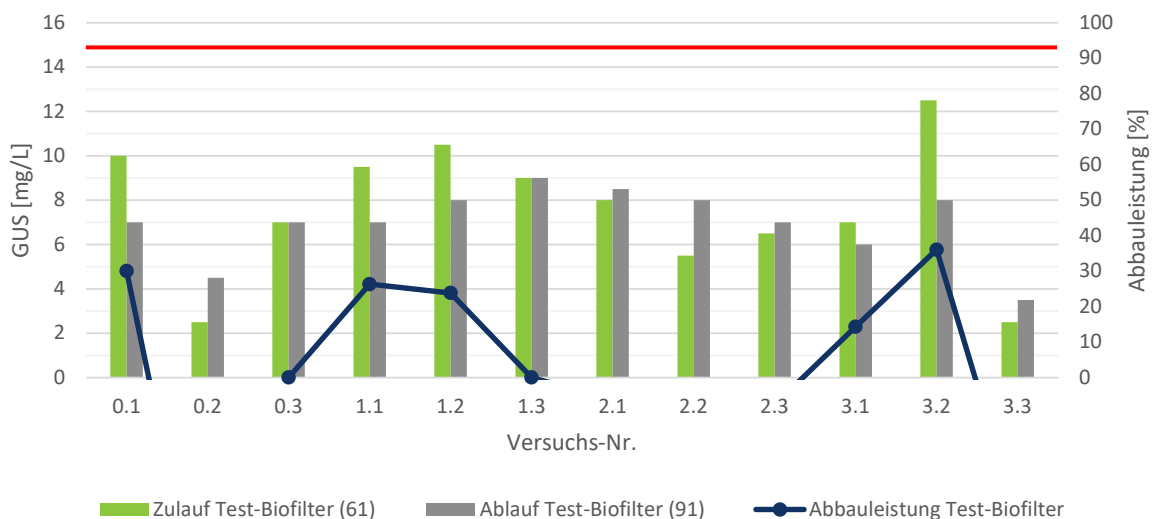


Abb. 7: Konzentration und Abbauleistung von GUS im «Test-Biofilter» (61 und 91) für jede MV-Analyse, rote Linie = Einleit-Grenzwert

Während der Versuchsreihe mussten die Spülintervalle des «Test-Biofilters» nicht angepasst werden und es wurde keine unerwünschte Kohleanreicherung festgestellt. Der Unterbodendruck ist stabil geblieben und entspricht der Grössenordnung im Normalbetrieb.

## FÄLL- UND FLOCKUNGSMITTEL

Bei höheren PAK-Dosierungen wurden Versuche mit der Dosierung von  $\text{FeCl}_3$  durchgeführt. Der erwartete Effekt (d.h. ein besserer Rückhalt der Kohle im Biofilter) konnte nicht beobachtet werden. Das Wasser hat sich aufgrund des Eisenchlorids sogar leicht verfärbt. Es ist anzumerken, dass die Dosierung eines Flockungsmittels nicht vorgesehen war, da die Biofilter vom Typ Biofor® sehr stark auf diese Art von Zusatz reagieren und häufig verstopfen.

## PAK-SCHLUPF

Die Trübungssonden und GUS-Konzentrationen sowie Fotos von Filterplättchen des Ablaufs zeigen, dass ein Teil des GUS im Ablauf aus Aktivkohle besteht. Diese Messungen erlauben jedoch keine Quantifizierung des PAK-Anteils an den Feststoffen.

Um den PAK-Anteil in den GUS im Ablauf der ARA zu quantifizieren, wurden thermogravimetrische Analysen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4 erfasst. Die 8. Probe wurde in einer für den Standardbetrieb nicht repräsentativen Ausnahmesituation erhoben: die durchschnittliche Filtrationsgeschwindigkeit betrug 16,3 m/h, während sie bei Regenwetter maximal 10 m/h betragen sollte. Diese Probe wurde daher bei der Analyse der Ergebnisse nicht berücksichtigt.

Im Durchschnitt betrug der Aktivkohleanteil in den GUS im Ablauf des «Test-Biofilters» 17% ( $\pm 2\%$ ). Der PAK-Schlupf betrug 9% ( $\pm 3\%$ ) in Bezug auf die dosierte Kohle. Die Höhe der Dosierung (10 mg/l und 15 mg/l) sowie die Filtrationsgeschwindigkeit schienen das PAK/GUS-Verhältnis nicht signifikant zu beeinflussen. Daher kann bei einer gewöhnlichen Filtrationsgeschwindigkeit von 3 bis 10 m/h ein lineares Verhältnis zwischen der Aktivkohle- und GUS-Konzentration angenommen werden.

Proben-Nr.	Geschwindigkeit [m/h]	PAK Dosierung [g/m <sup>3</sup> ]	GUS [mg/l]	PAK-Anteil am GUS [%]	PAK-Konzentration [mg/l]	PAK-Schlupf [%]
T.1	7.4	10	5.5	19 ± 2	1.1 ± 0.1	10.6
T.2	6.1	10	3.5	16 ± 1	0.6 ± 0.1	5.5
T.3	6.2	10	7.5	16 ± 1	1.2 ± 0.1	12.3
T.4	7.3	10	6.5	18 ± 2	1.2 ± 0.2	11.6
T.5	6.1	15	8	15 ± 1	1.2 ± 0.1	8.1
T.6	6.5	15	6.5	14 ± 3	0.9 ± 0.2	5.9
T.7	7.0	15	9	19 ± 1	1.7 ± 0.1	11.1

*Tab. 4: Ergebnisse der thermogravimetrische Analysen*

Gemäss dem Abschlussbericht des VSA-Projekts [9] sind die PAK-Verluste mit dem nitrifizierenden Biofilter im Vergleich zu anderen Behandlungsverfahren für org. Spurenstoffe mit Aktivkohle höher. Folglich ist bei diesem Verfahren eine zusätzliche Filtrationsstufe erforderlich, um im Sinne eines sachgemässen Gewässerschutzes den PAK-Schlupf zu minimieren [10].

## 6. Schlussfolgerung

Mit PAK-Dosierungen von 10 bis 15 mg/l (1.4 und 2.2 gPAK/gGUS) kann die von der GSchV geforderte Reinigungsleistung von 80% bezüglich Rohabwasser erreicht werden. Die Auswirkungen der Rückführung der PAK und der internen Rezirkulation des behandelten Abwassers sowie des Gleichgewichts-Zustands im Biofor® konnten aufgrund der Versuchsdauer jedoch nicht umfassend dokumentiert werden.

Während der Versuchsreihe wurde im Zusammenhang mit der Kohledosierung keine Störung der Nitrifikation beobachtet. Der Grenzwert für die GUS-Ablaufkonzentration wurde ebenfalls eingehalten, obwohl die Belastung GUS+PAK die Dimensionswerte überschritt.

Die thermogravimetrischen Analysen weisen auf einen PAK-Anteil von rund 17% am GUS sowie PAK-Verluste von 5-12% (durchschnittlich 9%) hin. Diese PAK-Verluste sind höher als bei vergleichbaren Behandlungsverfahren mit Aktivkohle, die im Rahmen des VSA-Projekts untersucht wurden [9]. Eine abschliessende Filtrationsstufe scheint daher erforderlich.



Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einsatz von nitrifizierenden Biofiltern vom Typ Biofor® als Kontaktreaktoren zur Behandlung von organischen Spurenstoffen mit Pulveraktivkohle in Kombination mit einer abschliessenden Filtrationsstufe auf der ARA Freiburg geeignet scheint.

## 7. Literaturverzeichnis

- [1] Horisberger et al., «Essais pleine échelle - Dosage de charbon actif en poudre sur une cellule Biofor(R) - nitrification. STEP de Fribourg. Rapport final.,» Ville de Fribourg. Download [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch)., 2018.
- [2] Canton de Fribourg SEn, «Elimination des micropolluants dans les stations d'épuration fribourgeoises. Planification Cantonale.,» mai 2017.
- [3] Frank, K. et al., «PAK im Belebtschlammbecken - Elimination von Mikroverunreinigungen in der ARA mit Pulveraktivkohle im Belebtschlammbecken,» UMTEC, HSR, download [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch), 2015.
- [4] Rössler, A.; Metzger, S., «Untersuchungen zur Spurenstoffelimination mittels simultaner Pulveraktivkohledosierung auf der ARA Schönau - Abschlussbericht.,» Gewässerschutzverband der Region Zugersee-Küssnachersee-Ägerisee, download [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch), Cham, 2015.
- [5] DWA Arbeitsgruppe KA 8.6, «Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffelimination - Verfahrensvarianten, Reinigungsleistung und betriebliche Aspekte,» *DWA Themenband T1/2019*, 2019.
- [6] UVEK, «Verordnung des UVEK zur Überprüfung des Reinigungseffekts von Massnahmen zur Elimination von organischen Spurenstoffen bei ARA,» UVEK, Bern, 2016.
- [7] VSA-Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen", «Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung von weitergehenden Verfahren zur Spurenstoffelimination,» [www.micropoll.ch/dokumente/faktenblaetter](http://www.micropoll.ch/dokumente/faktenblaetter), Dübendorf, 2017.
- [8] Kranstöver, T.; Plattner, J.; Wintgens, T., «Quantitative detection of powdered activated carbon in wastewater treatment plant effluent by thermogravimetric analysis (TGA).,» *Water Research*, Bd. 101, pp. 510-518, 2016.

- [9] Kranstöver, T. et al., «Aktivkohle-Schlupf aus Reinigungsstufen zur Elimination von Mikroverunreinigungen,» VSA-Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen" [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch), 2019.
- [10] VSA-Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen", «Aktueller Stand Beurteilung Aktivkohle-Rückhalt,» [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch), Dübendorf, 2019.