

FORSCHUNGSPROJEKT «AKTIFILT»

ELIMINATION VON MIKROVERUNREINIGUNGEN MITTELS PAK-DOSIERUNG IM ZULAUF DER RAUMFILTRATION

In dem vom Bundesamt für Umwelt geförderten Forschungsprojekt «Aktifilt» wurde die Erweiterung mit einer Pulveraktivkohledosierung im Zulauf einer bestehenden Raumfiltration über den Zeitraum von mehr als einem Jahr untersucht und optimiert. Die Ergebnisse, die auf der vom Amt für Industrielle Betriebe Basel Landschaft (AIB) betriebenen ARA Ergolz 1 erzielt werden konnten, versprechen eine kostengünstige, platzsparende sowie einfach in den bestehenden Betrieb zu integrierende Lösung, um den neuen Anforderungen des Gewässerschutzes Rechnung zu tragen.

Jonas Löwenberg; Armin Zenker; Thérèse Krahnstöver; Thomas Wintgens,
Fachhochschule Nordwestschweiz; Institut für Ecopreneurship
Martin Baggenstos, Wabag Wassertechnik AG; Michael Thomann, Holinger AG
Gerhard Koch, Amt für industrielle Betriebe Basel-Landschaft*

RÉSUMÉ

ÉLIMINATION DES MICROPOLLUANTS PAR DOSAGE DE CAP ET FILTRATION À LIT PROFOND EN AVAL

Le projet de recherche «Aktifilt» a analysé pendant plus d'une année à l'échelle industrielle la combinaison de deux processus à la station d'épuration Ergolz 1 (BL): l'adsorption sur charbon actif en poudre (CAP) et la filtration à lit profond en aval. L'objectif de cette étude était d'optimiser ce procédé en respectant à la fois les paramètres d'exploitation et les nouvelles dispositions légales pour l'élimination des micropolluants (MP).

Il a pu être démontré que le dosage simultané de CAP et du flocculant Fe^{3+} permet d'améliorer encore la qualité des eaux usées en termes de carbone organique dissous (COD), phosphate et matières en suspension (MES). La plupart des MP ont pu être éliminés à environ 80% par dosage de 10–15 mg de CAP/l en amont de la filtration. Ce dosage ne tient pas compte de l'effet positif d'un recyclage du CAP dans le traitement biologique en amont ce qui permettra de réduire le dosage et/ou d'augmenter les rendements d'élimination des MP. Le système de filtration sur sable assure une rétention stable et très efficace du CAP même en cas de conditions d'alimentation variables. Il a été démontré que le CAP retenu dans le lit du filtre contribue de manière décisive à

HINTERGRUND UND MOTIVATION

Durch das Inkrafttreten der neuen Gewässerschutzverordnung (GSchV) im Januar 2016 wird die Entfernung von Mikroverunreinigungen (MV) für viele Betreiber von Abwasserreinigungsanlagen (ARA) in der Schweiz zu einer konkreten Aufgabe [1]. Gut 100 ARA müssen bis 2040 für eine Entfernung von MV ausgebaut werden.

Derzeit werden hauptsächlich die Adsorption von MV an Aktivkohle oder die Oxidation durch Ozon als wirksame und ökonomische Verfahren erachtet. Beide Verfahren wurden über mehrere Jahre wissenschaftlich untersucht und erste grosstechnische Umsetzungen sind für Pulveraktivkohle (PAK) auf der ARA Bachwis und für Ozon auf der ARA Neugut erfolgt [2, 3]. Die Frage, welches Verfahren für eine bestimmte ARA die beste Lösung darstellt, ist allein mit der Wahl zwischen PAK und Ozon nicht beantwortet. Beide Technologien benötigen weitere Verfahrensschritte, welche entscheidende Auswirkungen auf Platzbedarf sowie Investitions- und Betriebskosten haben.

Für die Entfernung von MV durch Adsorption an PAK bieten sich verschiedene verfahrenstechnische Möglichkeiten an. Die

* Kontakt: thomas.wintgens@fhnw.ch

Dosierung der PAK vor eine Raumfiltration (Prozesskombination PAK/RF) zeichnet sich dabei im Vergleich zu anderen Verfahren als sehr kompakte und einfach zu realisierende verfahrenstechnische Lösung aus. Besonders für ARA, auf denen bereits eine Raumfiltration (RF) zum Einsatz kommt, ist deren Nutzung sinnvoll und mit ökonomischen Vorteilen verbunden. Diese Vorteile sowie die resultierenden, geringen Investitionskosten machen die Prozesskombination PAK/RF für den Neubau von Anlagen attraktiv. Erste Erfahrungen mit der Prozesskombination PAK/RF konnten bereits in Un-

tersuchungen der Eawag auf der ARA Kloten/Opfikon gewonnen werden. Dabei konnten die generelle Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens sowie wichtige Grundlagen zur Betriebsweise der Prozesskombination aufgezeigt werden [4]. Die damaligen Untersuchungen bilden somit die Grundlagen für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen, die das Ziel verfolgten, offengebliebene Fragen besonders zum Langzeitbetrieb des Verfahrens über mehr als ein Jahr bei realen Zulaufbedingungen im grosstechnischen Betrieb zu beantworten. Besonderer Fokus wurde dabei auf die Si-

cherstellung einer guten Ablaufqualität, den Rückhalt von PAK über den Filter und die Optimierung der Prozesskombination in Bezug auf Platzbedarf (Grösse Kontakt- und Flockungsbecken) und PAK-Einsatz (notwendige PAK-Dosierung) gelegt.

MATERIAL UND METHODEN

UMSETZUNG IM TECHNISCHEN MASSSTAB

Die Untersuchungen fanden auf der vom Amt für Industrielle Betriebe (AIB) betriebenen ARA Ergolz 1 in Sissach (BL) mit einer Ausbaugrösse von 40 000 Einwohnerwerten statt. Die ARA umfasst

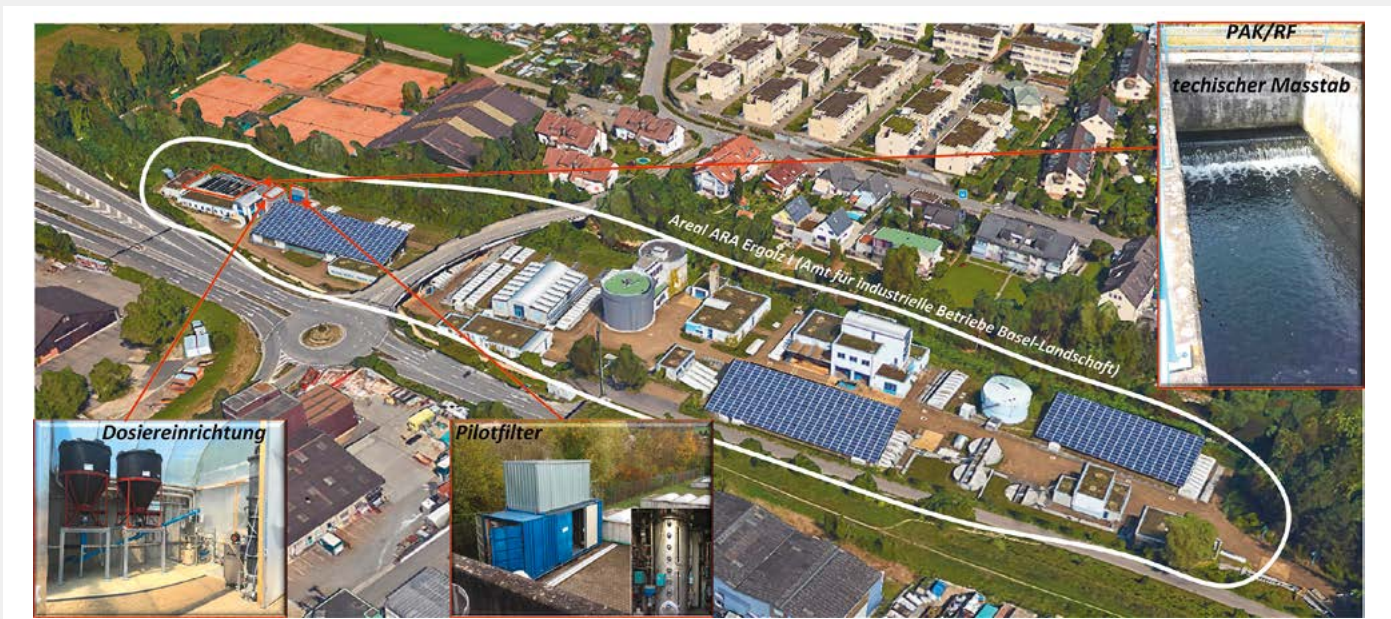


Fig. 1 ARA Ergolz I und Umsetzung PAK/RF im Rahmen des Aktifilt-Projekts
STEP Ergolz I et mise en œuvre des processus CAP/filtration dans le cadre du projet Aktifilt

(Quelle: Google2015 und GeoBasis-DE/BKG 2009)

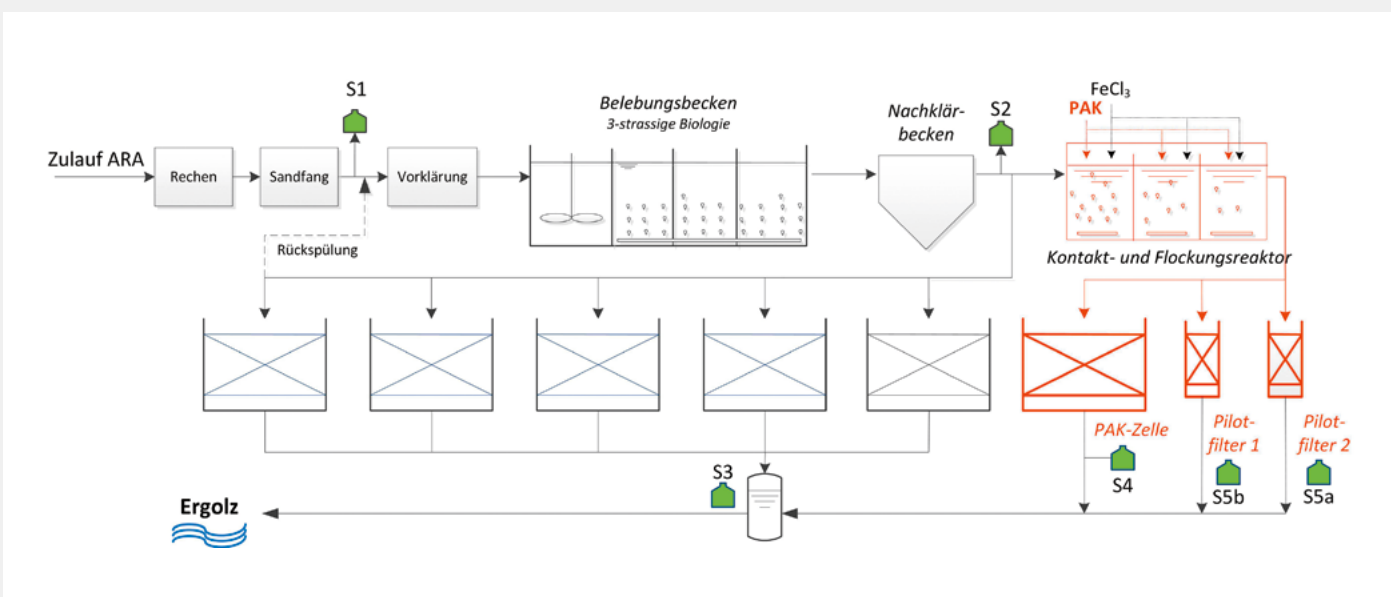


Fig. 2 Versuchsaufstellung zur PAK/Raumfilter-Kombination auf der ARA Ergolz 1 in Sissach (BL)
Essai de la combinaison CAP/filtration sur sable dans la STEP Ergolz 1 de Sissach (BL)



Fig. 3 PAK-Lager- und Dosiereinrichtung (links) und Zone 1 des Flockungsreaktors (rechts) auf der ARA Ergolz 1

(Amt für Industrielle Betriebe Basel-Landschaft)

Dispositifs de stockage et de dosage du CAP (à gauche) et zone 1 du réacteur de floculation (à droite) de la STEP Ergolz 1

(Département pour les installations industrielles, Bâle-Campagne)

eine mechanische Reinigungsstufe, eine dreistrassige, biologische Reinigung, gefolgt von einer Zweischicht-Raumfiltration (Sandfiltration) mit sechs Filterzellen, die zusammen für eine hohe Qualität des Ablaufs verantwortlich sind. *Figur 1* zeigt das Areal der ARA Ergolz 1 und die Prozessstufe, die im Projekt realisiert wurden.

Für die Projektdurchführung wurde eine PAK-Dosierung im grosstechnischen Massstab vor einer der sechs Raumfilterzellen durch parallele Dosierung von PAK und Eisensalz (Fe^{3+}) in einen bestehenden Flockungsreaktor realisiert. Weiterhin wurden zwei Pilotfilterzellen zur Untersuchung des Einflusses des Filtermaterials auf den Feststoffrückhalt betrieben. Die im Rahmen des Projektes installierte Erweiterung zur Realisierung des PAK/RF-Prozesses ist in *Figur 2* zusammen mit den Probennahmeorten im Gesamtprozessschema der ARA dargestellt.

PAK-DOSIERUNG UND KONDITIONIERUNG

Die PAK-Dosierung erfolgte in einen Kontakt- und Flockungsreaktor, bestehend aus drei Zonen mit einem Volumen von jeweils 60 m^3 . Die Zonen sind durch Trennwände voneinander getrennt und können individuell belüftet werden, um den Einmisch- und Flockungsprozess zu kontrollieren. Die PAK wurde im Projektverlauf in unterschiedliche Zonen des Reaktors dosiert, wodurch verschiedene Kontakt- und Flockungszeiten realisiert werden konnten. Das Abwasser wurde immer in die erste

Zone gepumpt (*Fig. 3, rechts*). Die PAK wurde in zwei Wechselcontainern gelagert und anschliessend als Suspension zudosiert (*Fig. 3, links*). Die PAK-Dosierung erfolgte zulaufmengenproportional nach einer bestimmten Soll-PAK-Konzentration ($C_{\text{PAK, sol}}$), die in unterschiedlichen Betriebszuständen zwischen 10 und 20 mg/l gewählt wurde. Während Regenwetterereignissen ($Q > Q_{\text{RW}}$), in denen die Zulaufmenge zum PAK-Filter 50 l/s überstieg, wurde die PAK-Dosierung auf den resultierenden Wert bei dieser Zulaufmenge limitiert. Dadurch konnte eine Überdosierung bei Regen vermieden werden.

Alle bestehenden grosstechnischen Filterzellen sind Zweischicht-Filter mit den Filtermaterialien Sand und Blähschiefer. Jede Filterzelle hat eine Fläche von $22,5 \text{ m}^2$ ($H = 7,5 \text{ m}$; $B = 3 \text{ m}$). Die PAK-Filterzelle wurde mit 30% des Zulaufvolumens zur Gesamtanlage, maximal aber 100 l/s , beschickt, d. h. dass Filtergeschwindigkeiten von bis zu 16 m/h bei Regenwetter erreicht wurden. Der Filterbetrieb und die Parameter Filterlaufzeit, Druckverlust und Filtergeschwindigkeit wurden durch die Prozessleittechnik des AIB kontinuierlich überwacht. Rückspülungen der PAK-Filterzelle wurden bei Erreichen eines bestimmten spezifischen Druckverlusts über den Filter ausgelöst, wobei die Filterlaufzeit (Periode zwischen zwei Rückspülungen) im Projektverlauf bei 1–3 Tagen lag. Die Filterbeladung kurz vor Rückspülungen lag im Bereich von

$4\text{--}6 \text{ kg}$ gesamte ungelöste Stoffe (GUS)/ m^3 Filtermaterial.

BETRIEBZUSTÄNDE UND OPTIMIERUNG

Der Prozess wurde im Projektverlauf in mehreren Schritten hinsichtlich PAK-Dosierung sowie Kontakt- und Flockungszeit optimiert. Weiterhin wurden zwei unterschiedliche PAK-Typen verwendet, um deren Eignung für den Prozess zu bewerten. Diese Betriebsparameter wurden in verschiedenen Betriebszuständen jeweils konstant gehalten und sind in *Tabelle 1* zusammengefasst.

Der PAK-Filter wurde ab dem zweiten Betriebszustand mit 30% des gesamten Zulaufvolumenstroms zur ARA beschickt, während die PAK-Dosierung ab dem 3. Betriebszustand bei einem bestimmten Zulaufvolumen zum PAK-Filter begrenzt wurde, sodass sich variierende PAK-Dosiermengen in Abhängigkeit vom Zulaufvolumen ergaben. Zu Beginn der Untersuchungen wurde die PAK *SAE Super* (Cabot, Niederlande) erprobt und dabei die Dosierung sowie die Kontakt- und Flockungszeit optimiert. Neben der Optimierung des Prozesses wurde ab dem 5. Betriebszustand mit der PAK *Pulsorb WP260* (Chemviron) eine alternative PAK eingesetzt. In allen Betriebszuständen wurde die PAK im Flockungsreaktor aufgrund der Ergebnisse aus den Untersuchungen in Kloten/Opfikon [4] mit $0,1 \text{ mg Fe}^{3+}/\text{mg}$ PAK konditioniert. Diese Dosierung hat sich als geeignet erwiesen.

Betriebszustand (Datum)	$C_{PAK, \text{sol}}$ [mg/l] für $Q < Q_{RW}$	Beschickung	$t_{K, \text{min}}$ [min]	Bemerkung
BZ 1 (01.05.–18.05.2014)	20	30l/s	30	
BZ 2 (19.05.–29.07.2014)	15	30% von Zulauf	30	
BZ 3 (20.08.–09.10.2014)	15	30% von Zulauf	30	PAK-Dosierung bis max. 2,7 kg/h
BZ 4 (10.10.–06.11.2014)	15	30% von Zulauf	20	Reduktion von t_K
BZ 5 (12.12.2014–09.02.2015)	15	30% von Zulauf	20	neuer PAK-Typ
BZ 6 (10.02.–25.03.2015)	15	30% von Zulauf		Reduktion der Belüftung
BZ 7 (26.03.–18.05.2015)	15	30% von Zulauf	10	Reduktion von t_K
BZ 8 (19.05.–26.06.2015)	10	30% von Zulauf	20	Reduktion der PAK-Dosierung

Tab. 1 Betriebseinstellungen der grosstechnischen PAK/RF-Stufe
Réglages d'exploitation de l'étape CAP/filtration à l'échelle industrielle

PROBENNAHME UND ANALYTIK

Zu Beginn der Versuchszeit wurde durch das AIB ein Probennahmeraum zur Beprobung der verschiedenen Prozessströme Ablauf Nachklärung, Ablauf GesamtfILTER und Ablauf PAK-Filterzelle eingerichtet. Somit konnten kontinuierlich die Qualitätsparameter Phosphat (PO_4 -P)-Konzentration (*Phosphax sc, Hach Lange*), SAK_{366} (*Uv::lyser II, S::can*) und Trübung (*Uv::lyser II, S::can*) analysiert werden.

Zusätzlich wurden an diesen drei Prozessstellen mengenproportionale 24-Stunden-Mischproben im Rhythmus von fünf Tagen durch automatische Probennehmer gezogen und im Labor des AIB auf die Konzentrationen von PO_4 -P, gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) und GUS untersucht. Ein Eindruck des neu eingerichteten Probennahmeraums gibt *Figur 4*. Zur Untersuchung der Konzentration von Mikroverunreinigungen wurden

Messungen im Rahmen von Messkampagnen durchgeführt. Dabei war die Länge einer Messkampagne jeweils auf 14 Tage beschränkt. In dieser Zeit wurden Q-proportionale 48-Stunden-Mischproben an den Messstellen Ablauf Sandfang, Ablauf Nachklärbecken, Ablauf GesamtfILTER und Ablauf PAK-Filter genommen. Diese wurden auf die Konzentration der fünf Mikroverunreinigungen Sulfamethoxazol (SMX), Mecoprop (MEC), Diclofenac (DCF), Carbamazepin (CBZ) und Benzotriazol (BZT) hin mit der in [5] beschriebenen HPLC-MS/MS-Methode untersucht. Unterstützend zu den Untersuchungen der Mikroverunreinigungen wurde die DOC-Konzentration bestimmt, um die Adsorption von Mikroverunreinigungen vor dem Hintergrund der Konkurrenzadsorption von DOC bewerten zu können. Der Betrieb der beiden gleichzeitig parallel betriebenen Pilotfilter wurde durch

Online-Erfassung der Trübung im Zulauf und Ablauf der Filter sowie durch GUS-Bestimmung in mengenproportionalen periodisch gezogenen 24-Stunden-Mischproben der Filterabläufe überwacht und bewertet.

Zur Bewertung des PAK-Rückhalts im Raumfilter wurde im Rahmen des Projekts eine Methode zum Nachweis von PAK-Spuren im ARA-Ablauf erarbeitet. Dazu wurden in unregelmässigen Abständen Stich- und Mischproben im Ablauf Nachklärbecken und im Ablauf PAK-Filter genommen. Diese Proben wurden zunächst aufkonzentriert, der Feststoffanteil getrocknet und anschliessend mittels thermogravimetrischer Analyse (TGA) ausgewertet.

ERGEBNISSE

Die PAK-Dosierung erfolgte zusammen mit der Dosierung von Fe^{3+} in einer der drei Zonen des Kontakt- und Flockungsbeckens, das mit Ablauf der Nachklärung beschickt wurde. Der Ablauf der Nachklärung ist von guter Qualität mit geringen Konzentrationen von GUS, DOC und Phosphat (*Tab. 2*).

GUS	[mg/l]	$5,5 \pm 2,8$
DOC	[mg/l]	$5,5 \pm 1,2$
PO_4 -P	[mg/l]	$0,5 \pm 0,2$
Trübung	[FTU]	$7,4 \pm 5,8$
SAK_{366}	[1/m]	$1,6 \pm 0,3$
N_{tot}	[mg/l]	$12,8 \pm 3,2$

Tab. 2 Wasserqualität des Ablaufs Nachklärbeckens während der Versuchszeit (Durchschnitt \pm Standardabweichung)

Qualité de l'effluent du décanteur secondaire durant la période d'essai (moyenne \pm écart type)



Fig. 4 Neu eingerichteter Probennahmeraum
Zone d'échantillonnage nouvellement aménagée

ERREICHTE ABWASSERQUALITÄT

Die Reduktion von Trübung und GUS über den Raumfilter wurde durch den Einsatz von PAK und Fe^{3+} in nahezu allen Betriebszuständen im Vergleich zu den Raumfiltern ohne PAK-Dosierung verbessert (Tab. 3). Die leichte Verbesserung der Feststoffabtrennung ist auf die Dosierung von Eisen zurückzuführen, die zur Einbindung weiterer Feststofffraktionen in die Flockenstruktur führt. Eine Ausnahme bildet der Betriebszustand 5 nach dem PAK-Wechsel, bei dem die Flockung noch nicht auf den neuen PAK-Typen angepasst war (Tab. 3). Auch in diesem Betriebszustand war jedoch die Ablaufqualität des PAK-Filters absolut gesehen weiterhin sehr gut mit einem GUS-Wert unter 2 mg/l.

Die zeitweise höheren Messwerte für GUS und Trübung im Ablauf des PAK-Filters nach Wechsel des PAK-Typs (BZ 5) konnten durch eine Anpassung der Konditionierung im Kontakt- und Flockungsreaktor verbessert werden. Das

unterschiedliche Verhalten des Raumfilters bei Wechsel der PAK zusammen mit der beobachteten Verbesserung nach Optimierung der Konditionierung deutet auf ein unterschiedliches Flockungsverhalten der beiden eingesetzten PAK hin. Ergänzende Untersuchungen zur Partikelgrößenverteilung zeigten im Weiteren diesbezügliche Unterschiede, die für das unterschiedliche Flockungsverhalten mitverantwortlich sind.

Neben der Reduktion von Trübung und GUS im Ablauf des PAK-Filters konnte ebenso eine zusätzliche Verbesserung der Ablaufqualität hinsichtlich DOC, SAK_{366} und $\text{PO}_4\text{-P}$ erzielt werden. Im Durchschnitt über die gesamte Projektlaufzeit und Betriebszustände konnte der DOC um 30% und die $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentration sowie der SAK_{366} um 50% im Verhältnis zum Ablauf des Nachklärbeckens reduziert werden. Über den Referenzfilter ohne PAK-Dosierung wurde eine durchschnittliche Reduktion von 10% des DOC und 25% des SAK_{366} im Verhältnis zum

Ablauf der Nachklärung ermittelt. Die durchschnittliche Reduktion von $\text{PO}_4\text{-P}$ über den Referenzfilter war mit 2% vernachlässigbar.

ENTFERNUNG VON MIKROVERUNREINIGUNGEN

Über die Versuchsdauer wurden die PAK-Dosierung und die Kontaktzeit im Kontakt- und Flockungsreaktor schrittweise optimiert, d.h. reduziert. Dabei wurde während jedem in Tabelle 1 dargestellten Betriebszustand eine Messkampagne zur Untersuchung der Entfernung von Mikroverunreinigungen durchgeführt. Die Betriebsparameter, die sich aufgrund des Betriebszustandes und der wechselnden Zulaufbedingungen in jeder Messkampagne einstellen, sind in Tabelle 4 dargestellt.

Die Reduktion der Kontaktzeit im Flockungs- und Kontaktreaktor von im Mittel 101 auf 52 Minuten und der PAK-Dosierung von 20 mg/l auf 11,8 mg/l von MK 2 zu MK 5 bei Verwendung von *SAE Super* zeigte nur geringfügige Auswirkungen auf die Entfernung von Mikroverunreinigungen (Fig. 5).

Ein zweiter PAK-Typ wurde mit *Pulsorb WP 260* in MK 6-8 eingesetzt und zeigte ähnliche Adsorptionsleistungen im Vergleich zur PAK *SAE Super*, was ebenfalls in unterstützenden Laboruntersuchungen aufgezeigt werden konnte. Die erreichten Entfernungen der untersuchten MV über alle durchgeführten MK ist in Figur 6 dargestellt, wobei darauf hingewiesen wird, dass mit dem Wechsel des PAK-Typs in MK 6 weitere Reduktionen der Kontaktzeit und Dosierungsmengen einhergingen, was zu leicht geringerer Adsorption in MK 6-8 führte.

	Ablauf NKB	Ablauf PAK/RF	Ablauf Referenzfilter
BZ 1	8,0 ± 4,2	2,8	3,0 ± 1,1
BZ 2	9,3 ± 2,6	2,3 ± 0,8	3,1 ± 1,0
BZ 3	5,6 ± 2,1	1,5 ± 0,8	2,1 ± 1,0
BZ 4	4,5 ± 2,6	0,8 ± 0,5	1,2 ± 0,9
BZ 5	4,8 ± 2,6	1,8 ± 0,8	1,5 ± 0,8
BZ 6	4,8 ± 1,7	1,7 ± 0,6	2,8 ± 1,1
BZ 7	3,5 ± 2,3	1,4 ± 0,8	1,7 ± 0,8
BZ 8	5,2 ± 2,3	1,3 ± 1,1	2,5 ± 2,3

Tab. 3 GUS-Konzentrationen (mg/l) im Ablauf Raumfilter mit PAK- und ohne PAK-Dosierung (Durchschnitt ± Standardabweichung)

Concentration de MES (mg/l) dans l'effluent du filtre sur sable avec et sans dosage de CAP (moyenne ± écart type)

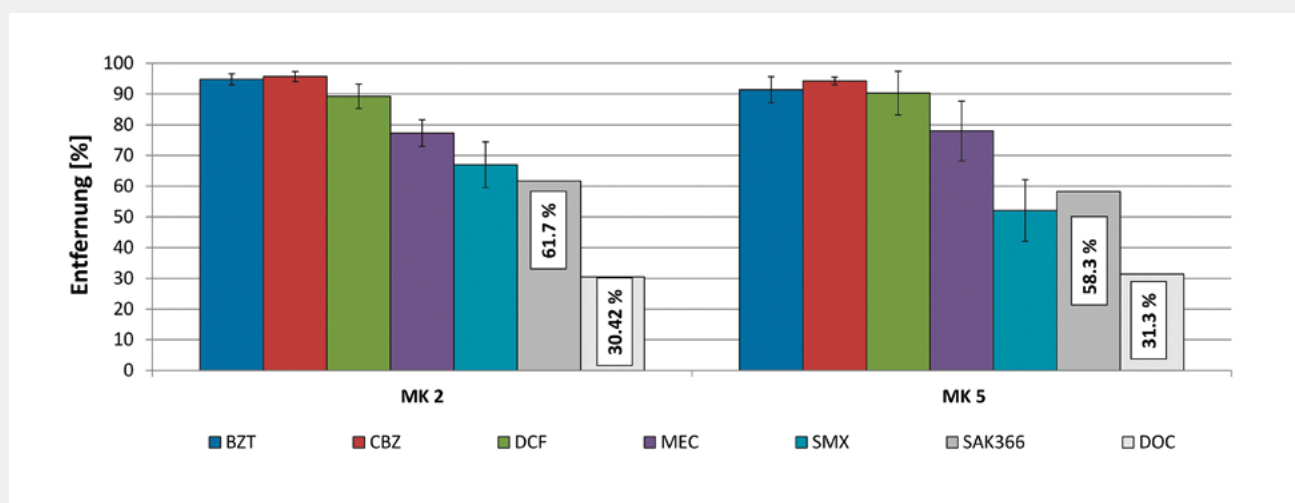


Fig. 5 Entfernung von MV vor (MK 2: 20 mg PAK/l) und nach Optimierung (MK 5: 11,8 mg PAK/l)

Élimination des MP avant optimisation (CM 2: 20 mg CAP/l) et après optimisation (CM 5: 11,8 mg CAP/l)

Eine 80%-Entfernung konnte nicht für alle untersuchten Substanzen allein über die PAK/RF-Stufe erreicht werden. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Entfernung von 80% als Durchschnitt aller Substanzen und über die Gesamt-ARA berechnet wird und dementsprechend Reduktionen, die in der biologischen Reinigungsstufe erreicht

werden, miteinzubeziehen sind. Die erreichte Entfernung der untersuchten MV ist beispielhaft anhand der Ergebnisse aus MK 5 für die PAK/RF-Stufe und über die Gesamt-ARA in *Figur 7* dargestellt. Während für die meisten Substanzen keine weitere Entfernung über die weiteren Verfahrensstufen festgestellt werden konnte, erfuhr gerade SMX, für welches

im PAK/RF-Prozess eine relativ geringe Entfernung erzielt wird, über den Gesamtprozess eine höhere Reduktion. Es ist bekannt, dass eine Rückführung der PAK in die biologische Reinigungsstufe zu einer weiteren Reduktion von MV führt. So konnte in den vorgängigen Versuchen von [4] gezeigt werden, dass die Rückführung der PAK in die biologi-

MK	Zeitraum	Effektive mittlere PAK-Dosierung [mg/l]	Mittlere pepezifische PAK-Dosierung [mg PAK/mg DOC]	$V_{\text{mittel}} \text{ Filter}$ [m/h]	$t_{K,\text{mittel}} / t_{K,\text{min}}$ [min]	Durchschnittlicher Zulauf zur PAK-Filterzelle [m³/d]	Eingesetzte PAK
1	16.10.–12.11.2014	0	–	–	–	–	–
2	06.05.–12.05.2014	20	3,08	4,7 ± 0,0	101/30	2558	SAE Super
3	02.07.– 15.07.2014	15	2,62	9,2 ± 3,3	61/30	4997	SAE Super
4	26.08.–08.09.2014	12,8	2,75	6,3 ± 2,0	83/30	3915	SAE Super
5	21.10.–03.11.2014	11,8	2,48	6,9 ± 2,7	52/20	3711	SAE Super
6	19.01.–08.02.2015	11,0	1,93	8,8 ± 2,3	38/20	4726	Pulsorb
7	13.04.–27.04.2015	14,3	2,92	6,3 ± 1,8	27/10	3409	Pulsorb
8	15.06.–26.06.2015	9,45	1,71	9,0 ± 2,2	38/20	4873	Pulsorb

Tab. 4 Übersicht der durchgeführten Messkampagnen (MK)
 Vue d'ensemble des campagnes de mesure effectuées (CM)

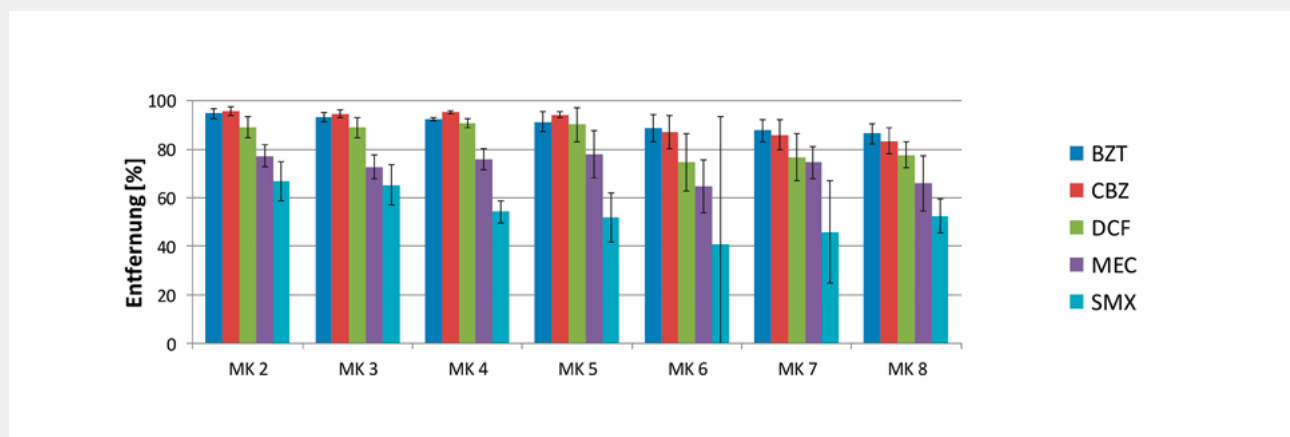


Fig. 6 Entfernung von MV über PAK/RF-Stufe und alle durchgeführten MK
 Élimination des MP par étape CAP/filtration ainsi que toutes les CM effectuées

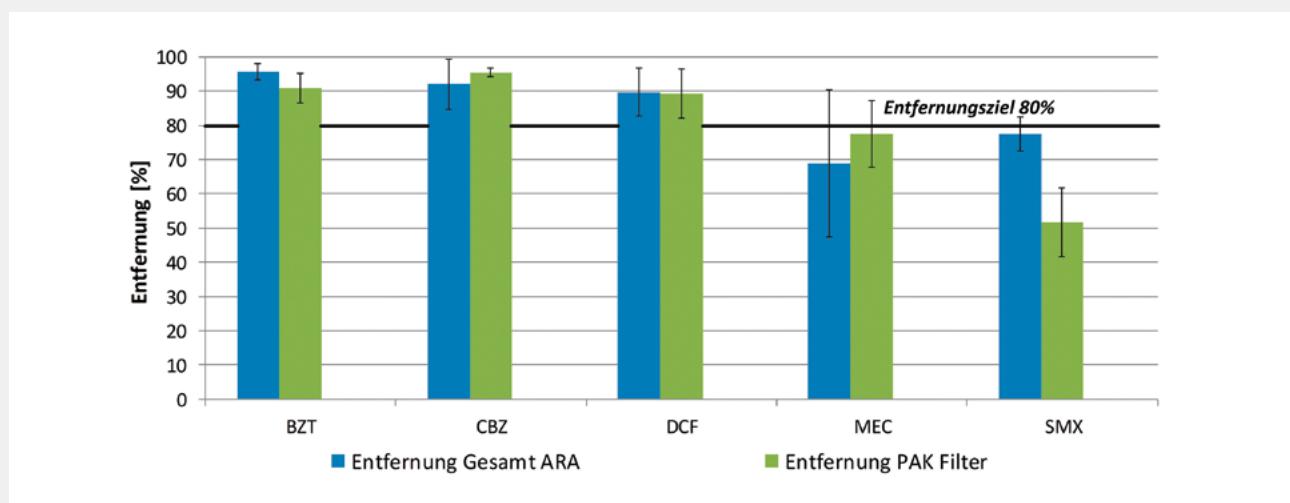


Fig. 7 MK 5: Entfernung der untersuchten MV über PAK/RF und Gesamt-ARA
 CM 5: Élimination des MP analysés par CAP/filtration et par le reste des installations de la STEP

sche Stufe speziell die Adsorption von schlecht adsorbierbaren Substanzen verbessert. Da eine solche Rückführung der PAK in der vorliegenden Studie nicht durchgeführt werden konnte, gehen die Autoren davon aus, dass eine optimierte Dosiermenge von 2 mg PAK/mg DOC bei Realisation der Prozesskombination im grossstechnischen Massstab mit Rückführung der PAK in die biologische Stufe zur sicheren Elimination von 80% aller untersuchten MV führt und die gesetzlichen Anforderungen eingehalten werden können. Mit der Rückführung darf sogar eine weitere Reduktion der notwendigen Dosierung erwartet werden.

PUFFERWIRKUNG DES MIT PAK BELADENEN FILTERS

Die im Untersuchungszeitraum beobachtete geringe Abhängigkeit der Adsorptionsleistung der PAK/RF-Stufe von den gewählten Zeiten im Flockungs- und Kontaktreaktor ist auf die Einlagerung von PAK im Filterbett zurückzuführen. Die positiven Auswirkungen der PAK-Einlagerung im Filterbett wurden bereits in Pilotuntersuchungen in Berlin gezeigt, wobei Wege zur verfahrenstechnischen Ausnutzung dieses Effektes untersucht wurden [6, 7]. Die PAK lagert sich über die Filtrationsdauer des Raumfilters im Filterbett an, wodurch eine zusätzliche, mittlere Verweilzeit in Höhe der halben Filtrationsdauer zur Verfügung steht, welche die Verweilzeit der PAK im Kontakt- und Flockungsreaktor bei Weitem übertrifft. Dieser Effekt konnte eindrücklich in MK 6 beobachtet werden, in der es zu einem nicht beabsichtigten PAK-Ausfall über zwei Tage kam. Während des Ausfalls wurde zwar eine Abnahme der Elimination von MV über die PAK/RF-Stufe beobachtet, doch verblieb die Elimination deutlich über derjenigen des Referenzfilters. Beispielhaft zeigt *Figur 8*, dass Benzotriazol (BZT) während des beschriebenen Vorfalls immer noch zu 50% eliminiert wurde.

Auch nach Wiederinbetriebnahme der PAK-Dosierung konnte ein «Wiedereinfahren» des Filters mit einer Leistungssteigerung über ein bis zwei Tage beobachtet werden, was ebenfalls den Einfluss der PAK-Einlagerung auf die Adsorptionsleistung des PAK/RF-Prozesses aufzeigt. Mit der PAK-Einlagerung wird eine sehr gute Ausnutzung der PAK erreicht, die somit vor allem von

der Filterlaufzeit abhängt, die während der Untersuchungen bei ein bis drei Tagen lag.

PAK-SCHLUPF

Die verwendete thermogravimetrische Analyse (TGA) besteht im Wesentlichen aus der Erhitzung des aus der Wasserprobe aufkonzentrierten Feststoffs in einem Ofen bis auf 900 °C. Parallel dazu wird mit einer Feinwaage der Massenverlust der einzelnen Feststofffraktionen bei ihrer jeweiligen spezifischen Oxidationstemperatur erfasst. Die TGA erwies sich als geeignete Methode, um PAK (oxidiert bei ca. 580 °C) von biologischer Hintergrundmatrix (oxidiert bei ca. 290 °C) zu unterscheiden. Ausgehend von den spezifischen Massenverlusten während der TGA wurde der PAK-Anteil des Feststoffs und anschliessend, durch Kopplung an den GUS-Gehalt der Probe, die PAK-Konzentration im Wasser bestimmt. Aus den gemessenen PAK-Konzentrationen im Ablauf kann schliesslich der PAK-Rückhalt berechnet werden, der wie angestrebt bei etwa 95% lag, mit Ausnahme des BZ5 mit dem schlechteren Flockungsverhalten nach der Umstellung des PAK-Typs und dementsprechend erhöhten GUS- und Trübungswerten im Ablauf. Unter diesen Bedingungen sank der PAK-Rückhalt auf etwa 90%.

PILOTFILTERZELLEN

Die beiden Pilotfilter (Durchmesser 0,7 m) wurden unter gleichen Bedingungen betrieben wie der grosstechnische Filter und einer der beiden Pilotfilter hatte ebenfalls den identischen Filteraufbau, um als Referenz zum zweiten Pilotfilter zu dienen, in dem alternative Filtermaterialien hinsichtlich ihrer Leistung bezüglich GUS-Rückhalt getestet wurden. Dabei hat sich gezeigt, dass mit alternativen Filtermaterialien eine leichte Verbesserung der Ablaufqualität erreicht werden konnte.

SCHLUSSFOLGERUNG

Die Prozesskombination PAK/RF erwies sich als ein sehr geeignetes Verfahren zur Entfernung von Mikroverunreinigungen. Im Projektzeitraum von mehr als einem Jahr zeigte sich der

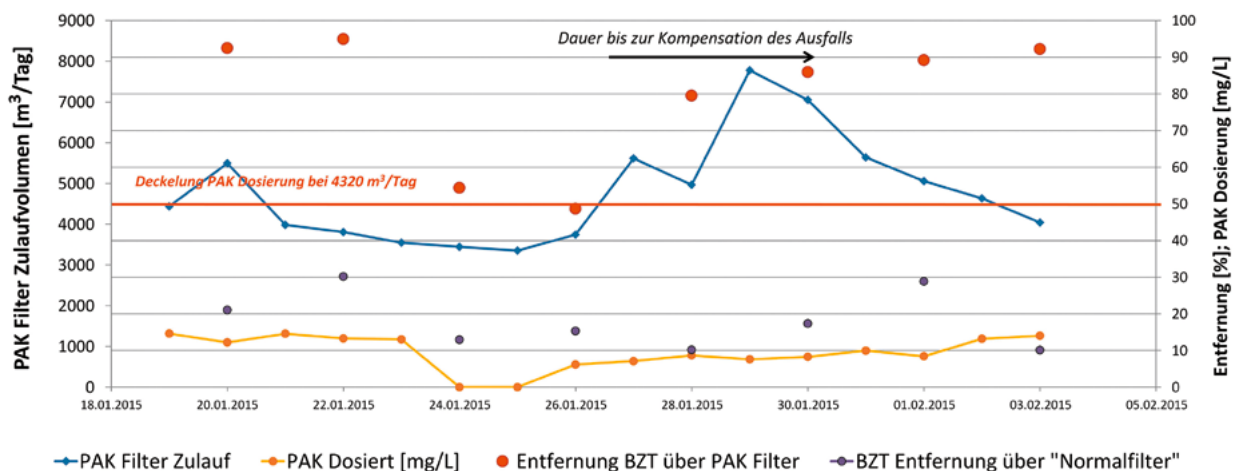


Fig. 8 Entfernung von BZT in MK 6 während Unterbruch der PAK-Dosierung
Élimination du benzotriazole dans la CM 6 durant interruption du dosage de CAP

Betrieb des Filters mit PAK-Dosierung als sehr stabil und robust.

Konventionelle Abwasserparameter wie Phosphat, DOC, GUS, Trübung und SAK_{366} werden durch die PAK/RF weiter reduziert. Mit der Eisendosierung ist es ebenfalls möglich, die Phosphorelimination mittels Fällung über die ARA zu optimieren, indem die Simultanfällung in der Biologie reduziert werden kann.

Die Einlagerung der PAK im Filterbett ist eine wichtige Eigenschaft der Prozesskombination und trägt zum robusten Betrieb und einer guten Ausnutzung der PAK bei, gerade auch unter variablen Prozessbedingungen (z. B. während Übergang zu Regenbedingungen mit reduzierter PAK-Dosierung). Dadurch wird der Kontakt- und Flockungsreaktor primär zur Konditionierung der PAK, d. h. der «PAK-Flockenbildung», benötigt und ein geringes Volumen mit geringen Investitionskosten ist einer der Vorteile des Prozesses im Gegensatz zu anderen Prozesslösungen zur Elimination von MV. Die Betriebskosten sind dank des geringen PAK-Bedarfs, der geringen zusätzlichen Energiekosten (lange Filterlaufzeiten und geringer Energiebedarf für die Flockung), des einfachen Betriebes und der möglichen Optimierung der Phosphorelimination mittels Fällung überraschend tief.

Die minimale hydraulische Verweilzeit im Kontakt- und Flockungsbecken sollte zwischen 10 bis 15 Minuten gewählt werden, wobei die Flockungsbedingungen auf den PAK-Typ anzupassen sind. Die minimale Verweilzeit ist im Moment noch Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Auch unter Berücksichtigung der neuen Liste der Leitsubstanzen zur Beurteilung der Elimination von Mikroverunreinigungen ist davon auszugehen, dass spezifische PAK-Dosierungen in der Größenordnung von 2 mg PAK/mg DOC ausreichen, um das Ziel der mittleren Elimination von 80% zu erreichen.

Die Rückführung des Spülwassers bzw. der Aktivkohle in die Biologie ist unbedingt zu empfehlen, um eine weitere Beladung bzw. Ausnutzung der PAK und eine weitere Pufferwirkung zu erreichen (Zweistufigkeit). Das vorgestellte Verfahren mit Zweistufigkeit wurde bereits in Kloten/Opfikon in der volltechnischen Pilotierung vorgenommen und zeigte stoffspezifisch eine Erhöhung der Gesamtelimination um 10 bis 50%, bzw. erlaubt, die oben genannte spezifische

PAK-Dosierung weiter zu reduzieren. Die Begrenzung der PAK-Dosierung erwies sich als geeignetes Mittel zum Betrieb bei Regenwetterereignissen, in denen niedrigere Konzentrationen von Mikroverunreinigungen und gelösten organischen Verbindungen auftreten. Diese Dosierstrategie ermöglicht einen effizienten PAK-Einsatz bei weiterhin durchschnittlich guten Entfernungsleistungen.

Im Pilotfilterbetrieb konnte gezeigt werden, dass mit alternativen Filtermaterialien eine zusätzliche, leichte Leistungsverbesserung hinsichtlich Filterleistung möglich ist, was die Eignung der Prozesskombination weiter erhöht.

Die TGA erwies sich als prinzipiell geeignete Methode, um PAK-Spuren in Abwasserproben quantitativ nachzuweisen. Die Messungen im Filterablauf bestätigen einen PAK-Rückhalt von über 95% in der Raumfiltration.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] UVEK (2015): Medienmitteilung, Gewässerqualität: Revision der Gewässerschutzverordnung, gefunden am 7.11.2015; URL: www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-59323.html
- [2] Gemeinde Herisau (2015): Medienmitteilung – Eröffnung PAK-Stufe ARA Bachwis in Herisau, gefunden: 7.11.2015, URL: www.herisau.ch/dl.php/de/56027cfa67e4/MM-ARA_PAK_MK_23-9-15.pdf
- [3] ARA Neugut, Erste Anlage zur Elimination von Mikroverunreinigungen in der Schweiz, gefunden am 7.11.2015, www.neugut.ch/_upload/file/i_20151030-161525-637.pdf
- [4] Böhler, M. et al. (2011): Abschlussbericht: Aktivkohledosierung in den Zulauf zur Sandfiltration Kläranlage Kloten/Opfikon (Ergänzende Untersuchungen zum Projekt Strategie MicroPoll), gefunden: 1.11.2011; (URL: www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/abwasser/Aktivkohle/abschlussbericht_aktivkohle.pdf)
- [5] Löwenberg, J. et al. (2014): «Comparison of Two PAC/UF Processes for the Removal of Micropollutants from Wastewater Treatment Plant Effluent: Process Performance and Removal Efficiency.» *Water Research* 56 (June 1, 2014): 26–36. doi:10.1016/j.watres.2014.02.038
- [6] Altmann, J. et al. (2015): «How to Dose Powdered Activated Carbon in Deep Bed Filtration for Efficient Micropollutant Removal.» *Water Research* 78 (July 1, 2015): 9–17. doi:10.1016/j.watres.2015.03.031
- [7] Altmann, J. et al. (2015): «Integrating Organic Micropollutant Removal into Tertiary Filtration: Combining PAC Adsorption with Advanced Phosphorus Removal.» *Water Research* 84 (November 1, 2015): 58–65. doi:10.1016/j.watres.2015.07.023

DANKSAGUNG

Die Autoren und die am Projekt beteiligten Partner und Personen möchten ihren Dank gegenüber dem Bundesamt für Umwelt BAFU für die finanzielle Förderung des Projektes unter der Vertragsnummer UTF 450.06.13/IDM 2004.2423.391 ausdrücken.

Auch danken die Autoren den weiteren Projektpartnern, die nicht in der Autorenliste aufgeführt sind: Dies sind die Dolder AG für die Beratung und Bereitstellung der im Projekt verwendeten Pulveraktivkohle von Cabot sowie die Eawag für die Mitwirkung im Projekt.

Spezieller Dank gebührt den Mitarbeitern des Amtes für Industrielle Betriebe auf der ARA Ergolz 1 und im Speziellen Gregor Niederberger, David Kaulbach, Markus Vock und Dominique Ritty für ihren unverzichtbaren Einsatz für den Projekterfolg.

> SUITE DU RÉSUMÉ

l'efficacité d'adsorption de tout le système. L'exploitation performante du CAP ainsi que les longs temps de séjour dans le lit de ce filtre ont permis de réduire de presque 10 minutes le temps de contact dans le réacteur de contact et de floculation tout en maintenant un bon taux d'élimination des MP.

La qualité de floculation du CAP dans le réacteur de contact et de floculation, qui était terminée de presque 10 minutes, a été déterminante pour assurer une bonne rétention du CAP et des matières solides à travers le filtre. Dans la combinaison des processus, deux types de CAP analysés ont montré des caractéristiques similaires en capacité d'adsorption avec une légère différence observée durant la floculation.

Cette combinaison des processus est une solution avantageuse pour moderniser les installations de filtration existantes avec un système de dosage de charbon actif en poudre sans grands investissements ni gros travaux. Elle offre de plus une bonne fiabilité de fonctionnement. La combinaison des processus est également intéressante en cas de nouvelles installations.