ELIMINATION VON MIKROVERUNREINIGUNGEN

PILOTVERSUCHE: EINSATZ VON GRANULIERTER AKTIVKOHLE IM WIRBELBETT AUF DER ARA PENTHAZ

Im Rahmen der Erweiterung der ARA Penthaz VD um eine Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen wurden Pilotversuche mit granulierter Aktivkohle im Wirbelbett (CarboPlus®-Verfahren) durchgeführt. Sie zeigten, dass sich mit diesem Verfahren die Anforderungen der Schweizer Gesetzgebung an die Elimination von Mikroverunreinigungen erfüllen lassen. Zudem konnten in den Versuchen Parameter zur Überwachung des Betriebs ermittelt werden. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse wurde das Verfahren auf der ARA Penthaz grosstechnisch realisiert und im Herbst 2018 in Betrieb genommen.

Marie Horisberger; Raphaël Casazza, Triform SA*
Julie Grelot, VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen»; Adriano Joss, Eawag

RÉSUMÉ

ÉLIMINATION DES MICROPOLLUANTS – ESSAIS PILOTES: TRAITEMENT PAR CHARBON ACTIF EN GRAIN EN LIT FLUIDISÉ À LA STEP DE PENTHAZ

Dans le cadre de la construction d'un traitement des micropolluants à la STEP de Penthaz VD, des essais pilotes avec du charbon actif en grain (CAG) en lit fluidisé (procédé CarboPlus®) ont été réalisés. Les procédés de traitement au CAG présentent des caractéristiques techniques et économiques intéressantes telles que la réactivation possible du charbon usagé et une relative simplicité de fonctionnement et de maintenance. L'injection quotidienne de charbon dans le réacteur assure une certaine réactivité et flexibilité au système. La mise en place d'une mesure UV online a permis une surveillance de l'efficacité de traitement du pilote en temps réel. Les essais ont montré qu'un dosage d'environ 15 g/m^3, soit environ 2 g CAG/g COD, permet de garantir un taux d'épuration des micropolluants de 80% sur l'ensemble de la STEP. Des analyses thermogravimétriques ont été réalisées pour quantifier la part de charbon actif dans les MES en sortie de l'installation. Les résultats indiquent que le charbon actif représente en moyenne 11% des MES rejetées vers l'exutoire et correspond à des concentrations en charbon d'environ

> S. 45

EINFÜHRUNG

Die ARA Penthaz liegt im Kanton Waadt im Einzugsgebiet der Venoge und behandelt das Abwasser der Gemeinden Cossonay, Penthalaz, Penthaz, Daillens und künftig auch Bettens, Bournens und Sullens. Diese haben sich im Abwasserverband Cossonay-Penthalaz-Penthaz-Daillens-Bettens *(Association Intercommunale pour l'Epuration des Eaux usées* – AIEE*)* zusammengeschlossen. An die ARA sind aktuell 9500 Einwohner angeschlossen, wobei die Anlage für 15 000 Einwohnergleichwerte ausgelegt ist. Sie behandelt im Durchschnitt 2500 m^3/d. Die ARA wurde 1973 erbaut und 2015 renoviert (Erneuerung und Erweiterung). Heute umfasst sie folgende Reinigungsstufen: mechanische Vorbehandlungen, Vorklärung, Belebtschlammbiologie mit Nitrifikation und Teil-Denitrifikation, chemische Phosphatfällung sowie Nachklärung gefolgt von einer mechanischen Scheibenfiltration. Die DOC- (gelöster organischer Kohlenstoff) und GUS- (gesamte ungelöste Stoffe)-Konzentrationen im Ablauf der ARA betragen im Durchschnitt 6 mg/l bzw. 4 mg/l.
Aufgrund der letzten Revision des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) und der dazugehörigen Gewässerschutzverordnung (GSchV) aus dem Jahr 2016 sowie der kantonalen Planung

** Kontakt: marie.horisberger@triform.ch*

DAS CARBOPLUS®-VERFAHREN

Beim CarboPlus®-Verfahren wird die Aktivkohle in einem Kontaktreaktor durch die Aufwärtsströmung des zu reinigenden Abwassers in Schwebe gehalten *(Fig. 1)*. Um das Wirbelbett bei Fliessgeschwindigkeiten zwischen 7 und 20 m/h zu fluidisieren, beträgt die mittlere Korngrösse der Aktivkohle ca. 0,5 mm. Diese ist deutlich grösser als die Korngrösse von Pulveraktivkohle (PAK; < 0,05 mm). Daher handelt es sich um granulierte Aktivkohle, obwohl die Korngrösse kleiner ist als diejenige von üblicherweise eingesetzter GAK. Aus diesem Grund wird auch die Bezeichnung Mikro-GAK verwendet. Die frische Aktivkohle wird in regelmässigen Abständen batchweise zugegeben, z. B. einmal pro Tag. Dabei variiert die Menge je nach Bedarf. Die beladene Aktivkohle wird dem Reaktor regelmässig entnommen und kann regeneriert werden, denn sie wird nicht mit dem Schlamm der ARA vermischt. Die mittlere Aufenthaltszeit der GAK im Reaktor beträgt rund 100 Tage. Dank ihrer geeigneten Körnung und spezifischen Dichte wird die GAK durch die Schwerkraft im Kontaktreaktor gehalten. Daher ist selbst bei erhöhten Durchströmungsgeschwindigkeiten (bis zu 20 m/h; siehe auch *Fig. 2*) keine zusätzliche Filtrationsstufe notwendig. Das gereinigte Abwasser läuft über Rinnen ab (s. auch *Titelfoto*).

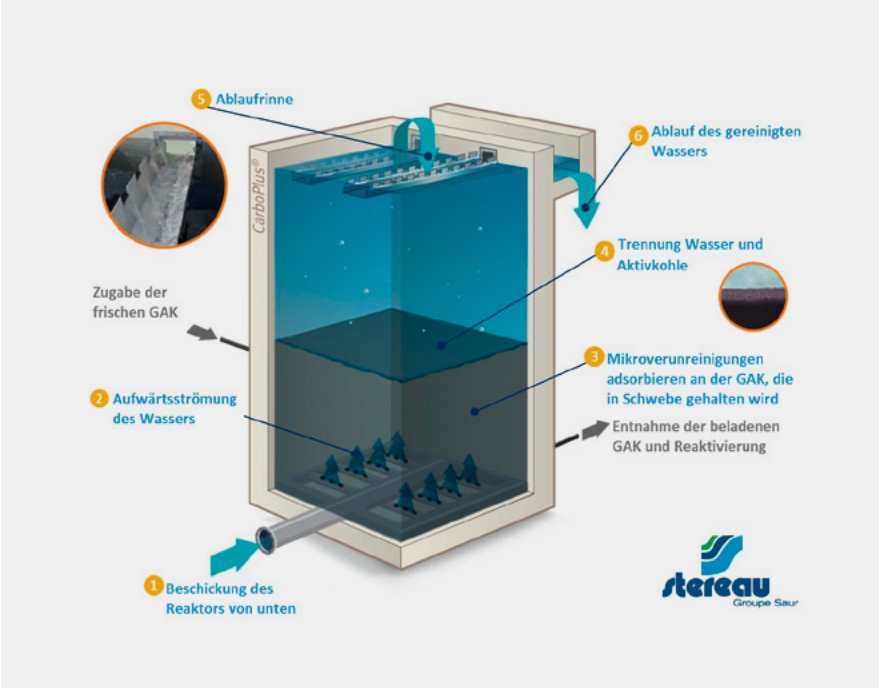

Fig. 1 Funktionsweise des CarboPlus®-Verfahrens

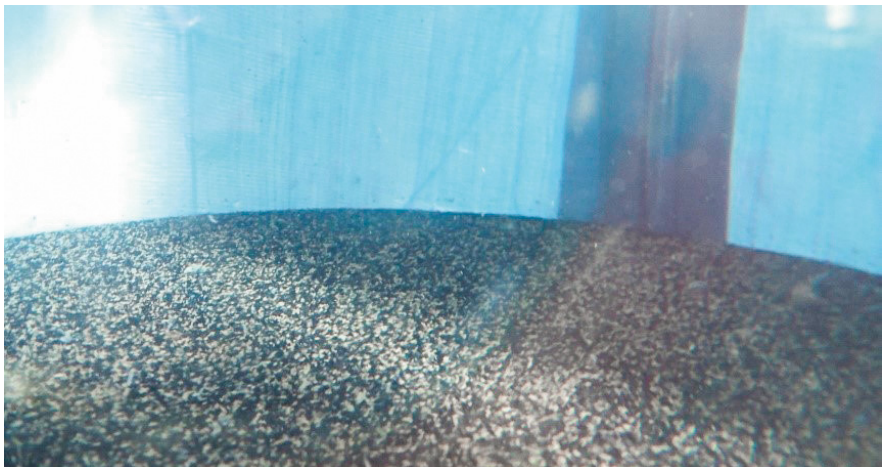

Fig. 2 Grenzfläche Aktivkohle-Wasser bei einer Durchströmungsgeschwindigkeit von 15 m/h (expandiertes Aktivkohlebett)

der Generaldirektion für Umwelt (DGE) des Kantons Waadt [1] musste die ARA Penthaz um eine Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen (EMV) erweitert werden.

Der AIEE beauftragte das Ingenieurbüro Triform AG mit einer Machbarkeitsstudie. Darin wurde unter anderem die Durchführung von Pilotversuchen mit dem Verfahren CarboPlus® vorgeschlagen. Dieses Verfahren war vom französischen Unternehmen SAUR und seiner Tochtergesellschaft Stereau entwickelt und patentiert worden. Es handelt sich um einen aufwärts durchströmten Kontaktreaktor mit granulierter Aktivkohle (GAK) im Wirbelbett (siehe *Fig. 1* im Kasten). Die Pilotversuche liefen zwischen Februar 2016 und August 2017. Dabei wurden zwei verschiedene GAK getestet, zunächst die Chemviron CycleCarb 305 (Dauer: 350 Tage) und anschliessend die Norit GAC 3040 AW (Dauer: 173 Tage).

Unter der Leitung der Triform AG wurde eine multidisziplinäre Arbeitsgruppe mit Vertretern des AIEE, von SAUR/Stereau, der Eawag, der VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen», der EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne), der DGE sowie des Bundesamts für Umwelt (BAFU) ins Leben gerufen, um auf den Erfahrungen und Kompetenzen der Mitglieder hinsichtlich der EMV und der Analyse von Mikroverunreinigungen aufzubauen. Ziel der Pilotversuche war, die Eignung des Verfahrens für die EMV gemäss der Schweizer Gesetzgebung zu prüfen.

VERFAHREN UND PILOTANLAGE

Die Pilotanlage in Penthaz (*Fig. 3*) bestand aus einem 4,12 m hohen, zylinderförmigen Reaktor mit einem Durchmesser von 350 mm, der ca. 1% des ARA-Durchflusses bei Durchströmungsgeschwindigkeiten zwischen 7 und 20 m/h behandeln konnte. Die Betriebsparameter des CarboPlus®-Verfahrens und die Dimensionierung der Pilotanlage sind in *Tabelle 1* zusammengefasst.

EINGESETZTE AKTIVKOHLE

Die EMV wird durch Adsorption an die Aktivkohle erreicht. Diese hängt von den Eigenschaften des Aktivkohleprodukts wie Porosität, Porengrösse, Aktivierungsgrad sowie der verfügbaren Austauschoberfläche und der Kontaktzeit im Reaktor ab. Für das Verfahren mit GAK im

Fig. 3 Pilotanlage auf der ARA Penthaz

Betriebsparameter	Durchströmungsgeschwindigkeit	7–20 m/h
	GAK-Dosierung	12–15 g/m³
	Mittlere Standzeit der Aktivkohle	~100 Tage
	Höhe des expandierten Aktivkohlebetts (15 m/h)	~2,2 m
	Höhe des abgesetzten Aktivkohlebetts (nach 20 Min.)	~1,5 m
Dimensionierung der Pilotanlage	Zylinderförmiger Reaktor: – Durchmesser – Höhe	 350 mm 4,12 m
	Durchfluss	700–2000 l/h

Tab. 1 Betriebsparameter des CarboPlus®-Verfahrens und Dimensionierung der Pilotanlage in Penthaz

Aktivkohle	Chemviron CycleCarb 305	Norit GAC 3040 AW
Schüttdichte [g/cm³]	0,51	0,47
Mittlere Korngrösse [mm]	0,50 (0,42–1,4)	0,43 (0,4–1,23)
Benetzbarkeit [min]	≤15	≤15
Anteil an feinen, aufschwimmenden Partikeln [%]	0,3–0,1	<1
Durchströmungsgeschwindigkeit für 10%- und 50%-Expansion des GAK-Bettes [m/h]	5,2–15,1	2,1–11,4
Reaktivierbarkeit	Ja	Ja

Tab. 2 Physikalische Eigenschaften der Aktivkohle CycleCarb 305 von Chemviron und der Aktivkohle GAC 3040 AW von Norit

Wirbelbett sind die physikalischen Parameter der Aktivkohle wegen der hydraulischen Verhältnisse (Aufwärtsstrom) entscheidend. Die GAK kann reaktiviert werden. Um sich an grosstechnische Betriebsbedingungen anzunähern, wurde in beiden Pilotversuchen reaktivierte Aktivkohle verwendet.

Für Versuch Nr. 1 wurde die Aktivkohle CycleCarb 305 von Chemviron verwendet, die bereits in mehreren Anlagen in Frankreich im Einsatz ist. Für Versuch Nr. 2 wurde eine Aktivkohle von Norit (GAK 300 AW) verwendet, um ihre Eignung für dieses Verfahren, insbesondere ihre hydraulischen Eigenschaften, zu beurteilen. Ziel war es zu belegen, dass mehr als ein GAK-Lieferant zur Verfügung steht. Diese Studie lässt allerdings keinen Vergleich der Reinigungsleistung zu, denn die beiden GAK wurden nicht parallel unter identischen Betriebsbedingungen getestet. Die Eigenschaften beider Aktivkohlen sind in *Tabelle 2* aufgeführt.

BETRIEB

Beide Versuche wurden jeweils in drei Phasen durchgeführt:

- Einfahrphase: GAK-Dosierung in den Reaktor, um eine Reinigungsleistung von 80% und eine mittlere Standzeit der Aktivkohle von 100 Tagen zu erreichen.
- Betriebsphase: GAK-Dosierung und -Entnahme, um im Reaktor eine konstante Menge und eine mittlere Standzeit der Aktivkohle von 100 Tagen aufrechtzuerhalten.
- Untersuchungsphase: Optimierung der Dosierung und Entnahme, diverse Leistungstests und Probenahmen.

Die Betriebseinstellungen während dieser Phasen sind der Legende zu *Figur 4* zu entnehmen.

Zugabe und Entnahme der Kohle

Von Montag bis Freitag wurde täglich eine vorgegebene Menge frischer GAK dosiert. Freitags wurde im Hinblick auf das Wochenende die doppelte GAK-Dosis zugegeben. Vor der GAK-Dosierung war die Abtrennung von Feinpartikeln und nicht befeuchteten Körnern, also aufschwimmenden Partikeln, erforderlich. Am Ende der Einfahrphase und somit nach Erreichen der gewünschten GAK-Menge im Reaktor wurde an zwei Ventilen, die auf unterschiedlicher Höhe am Reaktor angebracht waren, im Schnitt zweimal pro Woche Aktivkohle entnommen.

Spülvorgang

Ein Teil der Schwebstoffe wird im Aktivkohlebett zurückgehalten. Deshalb stieg mit der Zeit der GUS-Gehalt im Reaktor. Zur Reinigung des GAK-Betts kann je nach Situation eine Wasserspülung (Erhöhung der Durchströmungsgeschwindigkeit auf 30 m/h während einiger Minuten) oder eine Luftspülung ausgelöst werden. Die Luftspülung sollte nur in Ausnahmefällen eingesetzt werden, da sie zu erhöhtem Abrieb der GAK führt. Während der Versuche waren nur zwei Luftspülungen erforderlich, wohingegen die routinemässigen Wasserspülungen ungefähr einmal im Monat durchgeführt wurden.

MESSUNGEN UND ANALYSEN

MIKROVERUNREINIGUNGEN

Die Reinigungsleistung der Pilotanlage wurde überprüft, indem die Konzentration verschiedener Mikroverunreinigungen gemessen und die Reinigungsleistung gemäss UVEK-Verordnung [2] berechnet wurde. Dafür wurden im Zulauf, der dem damaligen ARA-Ablauf entsprach, und im Ablauf der Pilotanlage alle sechs Tage 48-Stunden-Proben genommen, wobei der Wochen-

tag der Probenahme variierte. Ausserdem wurde einmal im Monat der ARA-Zulauf beprobt, um die EMV über die gesamte ARA zu berechnen.
Die Analysen der Mikroverunreinigungen wurden vom Labor *(Pôle de Compétence pour l'Analyse des Micropolluants* - PCAM*)* der Generaldirektion für Umwelt des Kantons Waadt durchgeführt.

ONLINE-MESSUNGEN

Im Zu- und Ablauf der Pilotanlage wurden zur Überwachung der GUS-Konzentrationen Trübungsmesssonden installiert. Erhöhte GUS-Konzentrationen im Zulauf können das GAK-Bett überladen und zu GAK-Verlusten im Ablauf führen. Im Ablauf deuten sie auf übermässige Kohleverluste hin.
Die Abnahme der UV-Absorbanz bei 254 nm zeigt eine positive Korrelation mit der EMV-Leistung [3]. Daher wurde während des Pilotversuchs eine Online-UV-Sonde (Endress+Hauser, Viomax CAS51D) installiert (siehe auch [4]). Anhand dieser Online-Messung konnte – ergänzend zu den Messungen der Mikroverunreinigungen – die Reinigungsleistung in Echtzeit mitverfolgt werden. Dadurch konnte der Einfluss kurzzeitiger Ereignisse wie der Kohledosierung oder der Veränderung des Durchflusses bei Regenwetter mit einer hohen zeitlichen Auflösung beobachtet werden.

AKTIVKOHLE-SCHLUPF

Das Verfahren mit GAK im Wirbelbett sieht keine abschliessende Filtration vor, denn die Abtrennung der Aktivkohle erfolgt im Kontaktreaktor ausschliesslich durch Gravitation. Zur Charakterisierung des Verfahrens und wegen einer Vereinbarung mit dem BAFU wurde der Aktivkohleanteil an den GUS im Ablauf untersucht. Im Rahmen eines Projekts der VSA-Plattform wurden in der letzten Phase des Versuches Nr. 2 Proben genommen und darin mittels Thermogravimetrie [5] der Aktivkohleanteil an den GUS bestimmt. Der Ablauf der Anlage wurde über 24 Stunden unter verschiedenen Betriebsbedingungen bei einer GAK-Dosierung von 13 g/m³ beprobt.

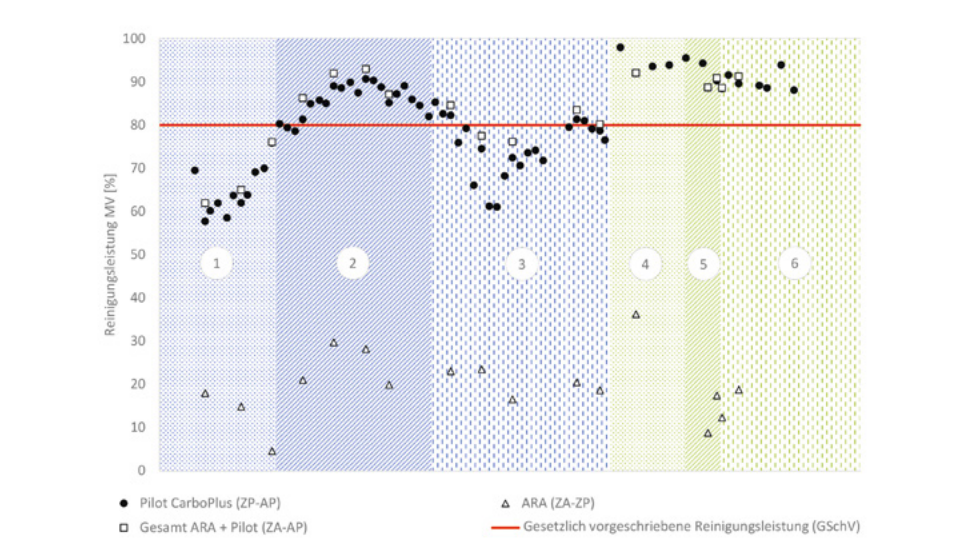

Fig. 4 Reinigungsleistung der Pilotanlage, die nach [2] für die verschiedenen Phasen der beiden Pilotversuche berechnet wurde. ZA = Zulauf ARA; ZP = Zulauf Pilotanlage (damaliger Ablauf ARA); AP = Ablauf Pilotanlage.

1) Versuch Nr. 1, Einfahrphase: einmalige Zugabe von 15 kg GAK (Chemviron), Einfahrphase mit einer kontinuierlichen Dosierung von 15 g/m³ (ohne GAK-Entnahme) bis zum Erreichen von 60 kg im Reaktor, konstante Durchströmungsgeschwindigkeit von 15 m/h, Dauer 91 Tage.

2) Versuch Nr. 1, Betriebsphase: Beginn der GAK-Entnahme, Dosierung 15 g/m³, konstante Durchströmungsgeschwindigkeit von 15 m/h, Dauer 121 Tage.

3) Versuch Nr. 1, Untersuchungsphase (Leistungstest): verschiedene Einstellungen getestet (Dosierung auf 13 g/m³ reduziert, variable Durchströmungsgeschwindigkeit zwischen 7 und 20 m/h je nach ARA-Durchfluss usw.), Dauer 138 Tage.

4) Versuch Nr. 2, Einfahrphase: einmalige Zugabe von 30 kg GAK (Norit), Dosierung zwischen 10 und 20 g/m³ bis zur Stabilisierung des UV-Absorbanz-Signals bei 254 nm, variable Durchströmungsgeschwindigkeit je nach ARA-Durchfluss, Dauer 58 Tage.

5) Versuch Nr. 2, Betriebsphase: Beginn der GAK-Entnahme, Dosierung konstant erst bei 15 g/m³, dann 13 g/m³, variable Durchströmungsgeschwindigkeit je nach ARA-Durchfluss, Dauer 28 Tage.

6) Versuch Nr. 2, Untersuchungsphase (verschiedene Tests und Probenahmen): Dosierung von 13 g/m³, Tests mit höherer Dosierung (20 bzw. 25 g/m³) während Regenereignissen, variable oder feste Durchströmungsgeschwindigkeit, Dauer 87 Tage.

RESULTATE

EMV-LEISTUNG

Während der Versuche lag die EMV-Leistung in der Biologie im Durchschnitt bei 20%, wobei sie zwischen 6 und 36% variierte. Während der Betriebsphase des Versuchs Nr. 1 sowie während des gesamten Versuchs Nr. 2 erreichte bzw. übertraf die Pilotanlage systematisch eine Reinigungsleistung von 80% *(Fig. 4)*. Mit diesem Verfahren lassen sich folglich auch bei geringer biologischer Reinigungsleistung die gesetzlichen Anforderungen zur EMV einhalten. Aufgrund der Versuchsdauer von 1,5 Jahren konnten verschiedene saisonale und meteorologische Veränderungen wie Temperaturänderungen und Regenwetter erfasst werden. Beide Aktivkohlen, die für die Versuche verwendet wurden, zeigten eine gute Reinigungsleistung.
Die Gründe für die ungenügende EMV in den Einfahrphasen sowie bei der Untersuchungsphase des Versuchs Nr. 1 konnten identifiziert werden, worauf geeignete Lösungen zur Erreichung einer optimalen Reinigungsleistung umgesetzt wurden. Eine Kombination von mindestens zwei der folgenden Elemente verursachte ungenügende Reinigungsleistungen:

- Störungen in der biologischen Reinigung der ARA;
- effektive GAK-Dosierung geringer als die angestrebte Dosierung;
- geringe Aktivkohlemengen im Reaktor (z. B. Startphase);
- GUS-Anreicherung im GAK-Bett;
- zu hohe Durchströmungsgeschwindigkeiten (> 16 m/h).

DOSIERUNG

Am Anfang betrug die Aktivkohle-Dosierung ca. 15 g/m³. Aufgrund der positiven Ergebnisse der Betriebsphase wurde die Dosierung anschliessend reduziert und bei ca. 13 g/m³ fixiert (ca. 2 g GAK/g DOC). Unter Normalbedingungen und ab einer effektiven Dosierung von ca. 13,5 g/m³ lag die Reinigungsleistung der Pilotan-

lage über 75%. Zudem wurde bei einer Dosierung von 15 g/m³ oder mehr *(Fig. 5)* keine Reinigungsleistung unter 80% verzeichnet. Auf der grosstechnischen Anlage wird die optimale Dosierung unter Normalbedingungen erwartungsgemäss zwischen 13 und 15 g/m³ betragen, um eine Reinigungsleistung von 80% über die gesamte ARA hinweg (inkl. biologische Reinigung) zu gewährleisten. Im Vergleich dazu benötigt die PAK-Dosierung vor einen Sandfilter bzw. gemäss dem Ulmerverfahren eine Dosierung von ca. 2 g PAK/g DOC [6]. Auf der ARA Bülach (Pilotversuch mit GAK-Filter) beträgt die Aktivkohle-Dosierung zwischen 1,5 und 2,3 g GAK/g DOC [7].

Zu Beginn des Versuchs Nr. 1 wurde der Feuchtigkeitsgehalt der Aktivkohle bei der GAK-Dosierung nicht berücksichtigt. Dieser betrug gelegentlich bis zu 20%, sodass die effektive Dosierung häufig geringer war als die angestrebte Dosierung. Dies wurde zu Beginn der Betriebsphase des Versuchs Nr. 1 korrigiert und hatte einen deutlichen Effekt auf die Reinigungsleistung *(Fig. 4)*.

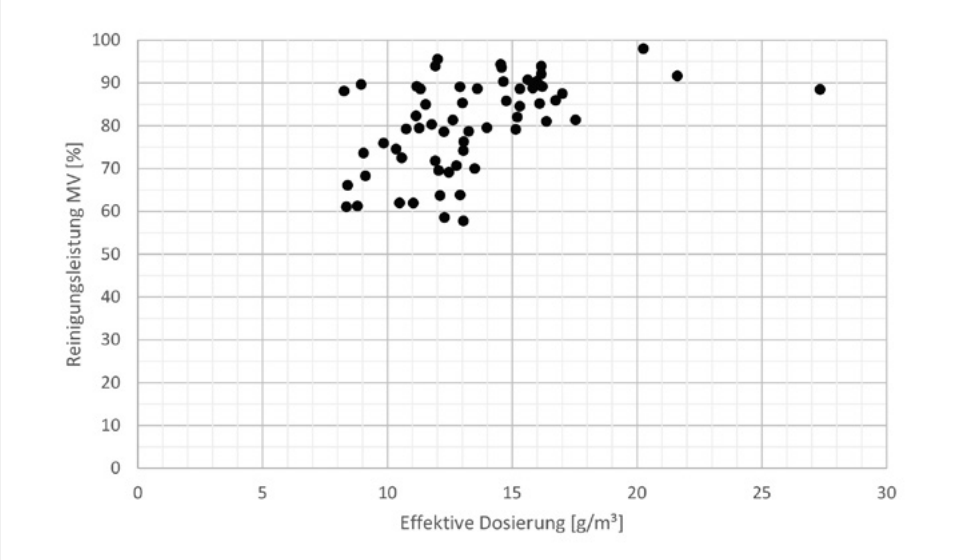

Fig. 5 Reinigungsleistung der Pilotanlage (Berechnung gemäss [2]) als Funktion der Aktivkohledosis.

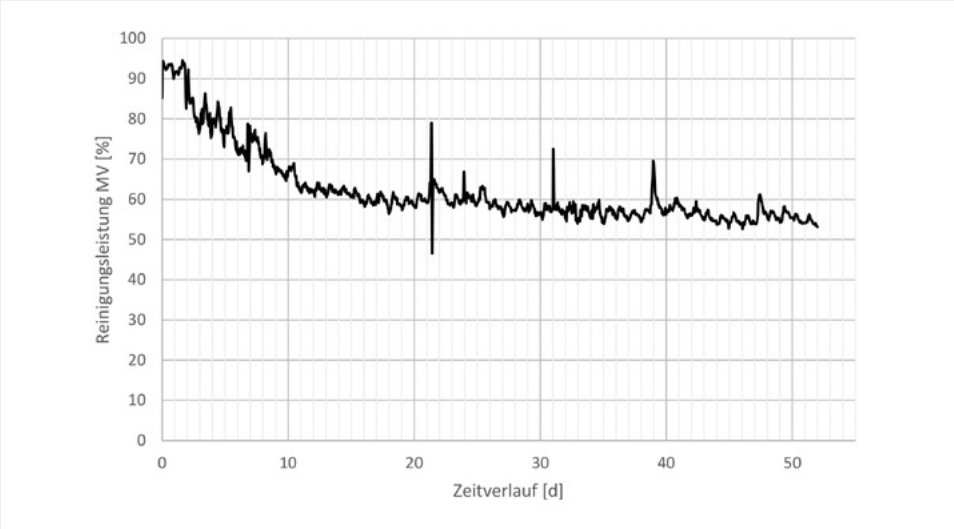

Fig. 6 Abnahme und anschliessende Stabilisierung der Reinigungsleistung (ausgerechnet über die Korrelation mit der Reduktion der UV-Absorbanz bei 254 nm) nach Abstellen der Dosierung am Ende des Versuchs Nr. 2. Letzte Dosierung von 13 g/m³ am Tag 0.

UNTERBRECHUNG DER DOSIERUNG

Dank der kontinuierlichen Erfassung der Reinigungsleistung anhand der Online-UV-Absorbanz-Messung bei 254 nm konnte eine Abnahme der Reinigungsleistung nach dem Abstellen der GAK-Dosierung beobachtet werden *(Fig. 6)*. Das Aktivkohlebett im Reaktor gewährleistet eine verbleibende Reinigungsleistung von ca. 55% über mehrere Wochen ohne Dosierung.

PARAMETER ZUR ANLAGENÜBERWACHUNG

UV-Absorbanz bei 254 nm

Das Verhältnis zwischen der Abnahme der UV-Absorbanz bei 254 nm und der Reinigungsleistung ist in einem weiten Bereich der erzielten Reinigungsleistungen linear *(Fig. 7)*. Auf der ARA Penthaz entspricht eine EMV von 80% einer Abnahme der UV-Absorbanz bei 254 nm von 27% ± 2,5%.

Anhand der Online-UV-Absorbanz-Messung konnte unmittelbar nach der GAK-Zugabe eine vorübergehende Steigerung der Elimination beobachtet werden *(Fig. 8)*. Die doppelte Tagesdosis für das Wochenende, die freitags zusätzlich dosiert wurde, führte zu noch deutlicheren Spitzen, gefolgt von raschen Rückgängen. Im Wochenverlauf der UV-Absorbanzabnahme sind somit regelmässige Variationen der Reinigungsleistung zu erkennen.

Höhe des expandierten Aktivkohlebetts

Bei den Versuchen wurde beobachtet, dass die GUS-Anreicherung im Aktivkohlebett von Bedeutung für die Hydraulik des Systems ist, weil sie die Expansion des Betts beeinflusst [8]. Eine Störung der biologischen Reinigung führte zu einer übermässigen und aussergewöhnlichen Schlammanreicherung in der Pilotanlage und dadurch zu Feststoffabtrieb und Verlust der Aktivkohle. Der Ablauf der Pilotanlage wurde in den ARA-Zulauf zurückgeführt. Im grosstechnischen Betrieb ermöglicht eine Niveaumesssonde eine automatisierte Überwachung der Betthöhe sowie eine Alarmauslösung, wenn das Aktivkohlebett eine kritische Höhe überschreitet.

Die GUS-Anreicherung im GAK-Bett wirkte sich ebenfalls nachteilig auf die Reinigungsleistung des Verfahrens aus, denn wegen der GUS im Reaktor wurden falsche GAK-Mengen entnommen. Deshalb wurden Kontrollmassnahmen eingerichtet, insbesondere die punktuelle Überwachung der Höhe des expandierten

ABSCHLUSSBERICHT

Eine ausführliche Darstellung der Pilotversuche und der dabei erhaltenen Ergebnisse ist im Abschlussbericht (auf Französisch; [9]) verfügbar: *www.micropoll.ch*.

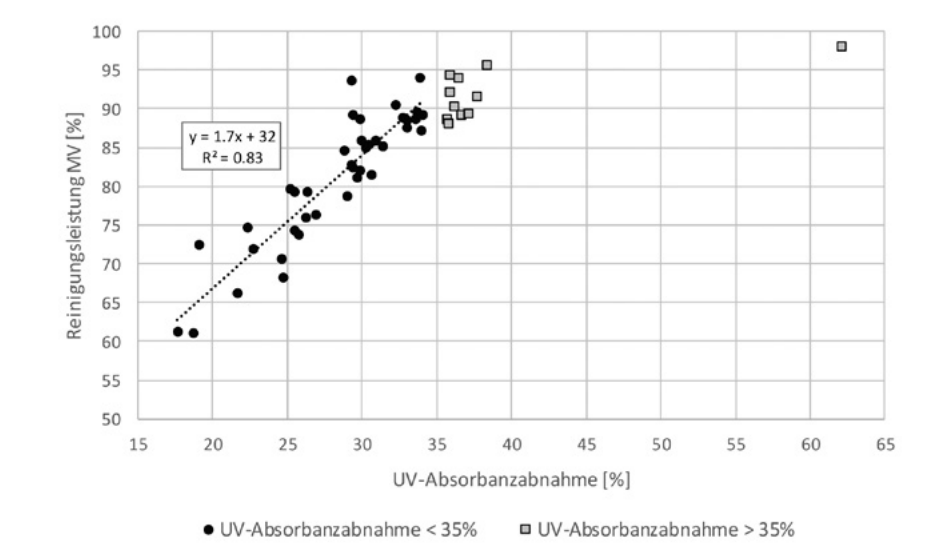

Fig. 7 Verhältnis zwischen der Reinigungsleistung und der Abnahme der UV-Absorbanz bei 254 nm.

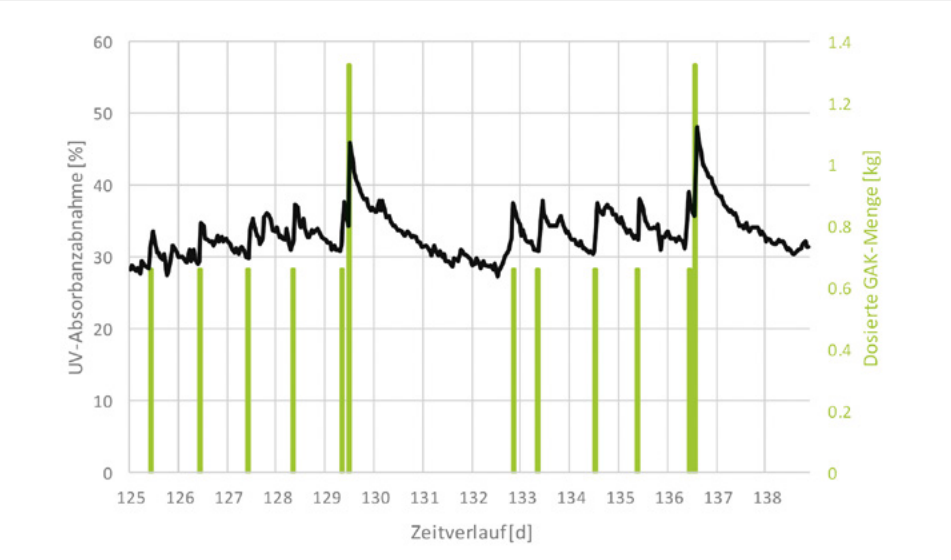

Fig. 8 Variation der UV-Absorbanzabnahme (Spitzen) in Abhängigkeit von der GAK-Dosierung (15 g/m³). Freitagnachmittags wurde im Hinblick auf das Wochenende zusätzlich zur Tagesdosis eine doppelte GAK-Dosis zugegeben (Tag 129 und 136).

DANKSAGUNG

Die Autoren möchten den Mitgliedern der Arbeitsgruppe für die Pilotversuche herzlich danken: *R. Devantay*, *R. Nicolet*, *P. Gerhard* und *J.-P. Golay* vom AIEE, *P. Vioget*, *C.-A. Jaquerod*, *C. Villard-le-Bocey*, *C. Plagellat* und *G. Hack* von der DGE, *S. Lehmann* und *D. Dominguez* vom BAFU, *C. Holliger* (EPFL), *P. Osterwalder* (Kuster + Hager, ehemals EPFL), *H. Zöllig* (Wabag, ehemals VSA), *P. Wunderlin* und *A. Meier* vom VSA, *Y. Coquet* (ehemals SAUR/Stereau), *F. Gueguen*, *A. Lüthi*, *F. Colas* und *F. Nauleau* von SAUR/Stereau, *G. Clerc* (ehemals Triform), *P. Lehmann* und *M. Brennecke* von Triform und *O. Pompini* vom Amt für Umwelt AfU (FR).

bzw. des abgesetzten Aktivkohlebetts. Eine erhöhte GUS-Konzentration vergrössert die Höhe des expandierten GAK-Betts, nicht aber die Höhe des abgesetzten GAK-Betts. Die Berechnung des Verhältnisses zwischen den beiden Betthöhen (Expansionsverhältnis) erlaubt somit, die Entwicklung der GUS-Konzentration im Aktivkohlebett zu verfolgen.

Mit einer monatlichen, routinemässigen Wasserspülung kann die GUS-Anreicherung im Aktivkohlebett begrenzt werden. Anhand des Expansionsverhältnisses kann die Stabilität des Betts überprüft und eine Luftspülung ausgelöst werden, wenn die Wasserspülung nicht ausreicht. Die GAK von Norit (Versuch Nr. 2) hat eine geringere Dichte als die GAK von Chemviron (Versuch Nr. 1). Dies führte zu einer deutlich stärkeren Expansion bei identischen Durchströmungsgeschwindigkeiten (bis zu 170% Expansion für Norit und 150% für Chemviron bei 15 m/h). Nach Anpassung der entsprechenden Betriebsparameter konnte die Anlage mit beiden Kohlen vergleichbar betrieben werden.

Aktivkohle-Schlupf im Ablauf

Die Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse zeigen, dass die Aktivkohle durchschnittlich 11% der GUS im Ablauf der Pilotanlage ausmacht (Werte zwischen 1 und 18%). Die Aktivkohlekonzentration beträgt daher zwischen 0,1 mg/l (Grenzwert der Messmethode) und 0,48 mg/l, d.h. 1 bis 5% der zudosierten GAK. Diese Ergebnisse belegen, dass die Abtrennung der Aktivkohle im Reaktor durch Gravitation erfolgreich stattfindet (siehe auch *Fig. 2*).

In Anbetracht der geringen GUS-Konzentration im Ablauf der ARA Penthaz sowie des relativ geringen Aktivkohleanteils an den GUS kann der Aktivkohle-Schlupf nach heutigem Kenntnisstand als geringfügig betrachtet werden.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im grosstechnischen Betrieb sind die meisten Aufgaben automatisiert, insbesondere die Zugabe und Entnahme der GAK. Die Lagerung der frischen Aktivkohle in einem geschlossenen System reduziert die Schwankungen im Feuchtigkeitsgehalt und verbessert die Zuverlässigkeit der Dosierung. Mithilfe von Sonden und der Einrichtung eines Alarms können die Kontrolle der GAK-Betthöhe und die Handhabung der Spülungen ebenfalls halbautomatisch erfolgen. Sowohl die Reaktionsfähigkeit des Systems auf die regelmässige Dosierung als auch dessen Trägheit wegen der vorhandenen GAK-Menge im Reaktor erlauben eine gewisse Flexibilität im Betrieb.

Die Pilotversuche zeigten, dass das CarboPlus®-Verfahren zur EMV gemäss den gesetzlichen Vorschriften in der Schweiz geeignet ist und auf einer ARA wie Penthaz angewendet werden kann. Im Rahmen der Versuche konnte die Messung relevanter Betriebsparameter zur Überwachung der Anlage optimiert werden. Die Versorgungssicherheit wird aufgrund der guten Leistung der beiden

Aktivkohlen (Chemviron und Norit) gestärkt. Basierend auf all den Ergebnissen empfahl Triform dieses EMV-Verfahren für die ARA Penthaz. Die Generaldirektion für Umwelt des Kantons Waadt und das BAFU genehmigten das Bauprojekt. Die grosstechnische Anlage wurde im Herbst 2018 in Betrieb genommen.

BIBLIOGRAPHIE

[1] *Generaldirektion für Umwelt (DGE) (2016): Traitement des micropolluants dans les stations d'épuration vaudoises. Planification cantonale provisoire 2016*

[2] *Verordnung des UVEK zur Überprüfung des Reinigungseffekts von Massnahmen zur Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasserreinigungsanlagen vom 3. November 2016 (Stand am 1. Dezember 2016)*

[3] *VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen» (2017). Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung von weitergehenden Verfahren zur Spurenstoffelimination. www.micropoll.ch*

[4] *VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen» (2018): Erfahrungen mit UV/VIS-Sonden zur Überwachung der Spurenstoffelimination auf Kläranlagen. www.micropoll.ch*

[5] *Krahnstöver, T.; Wintgens, T. (2017): Aktivkohle-Nachweis im Abwasser. Quantitativer und selektiver Nachweis niedriger PAK-Konzentrationen mittels Thermogravimetrie. Aqua & Gas 1/2017: 32–37*

[6] *Wunderlin, P.; Meier, A.; Grelot, J. (2017): Elimination von Mikroverunreinigungen auf ARA – Aktueller Stand der Verfahren und künftige Entwicklungen. Aqua & Gas, 11/2017: 60-70*

[7] *Joss, A. et al. (2017): Elimination von Spurenstoffen durch granulierte Aktivkohle(GAK)-Filtration: Grosstechnische Untersuchungen auf der ARA Bülach-Furt. Zwischenbericht, Kurzfassung. Dübendorf, Januar 2017*

[8] *Osterwalder, P. (2016): Pilot plant for micropollutant removal at the Wastewater Treatment Plant of Penthaz with the CarboPlus® procedure using micro-granular activated carbon. Master thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)*

[9] *Horisberger, M.; Casazza, R. et al. (2018): Traitements des micropolluants STEP de Penthaz – Essais pilotes Charbon actif en grain en lit fluidisé – procédé CarboPlus®. www.micropoll.ch*

> SUITE DU RÉSUMÉ

0,1 à 0,48 mg/l. En raison des résultats prometteurs, le procédé a été réalisé à grande échelle à la STEP de Penthaz et mis en service à l'automne 2018. L'article complet en français se trouve dans *Aqua & Gas 10/2018*.