

PULVERAKTIVKOHLE – WELCHE PASST?

WAHL, BESCHAFFUNG UND QUALITÄTSSICHERUNG VON PAK ZUR ELIMINATION VON MIKROVERUNREINIGUNGEN

Fünf bis zehn Gramm Pulveraktivkohle weisen die Oberfläche eines Fussballfeldes auf. Das faszinierende schwarze Pulver kann vielerorts eingesetzt werden, zum Beispiel auf Abwasserreinigungsanlagen, um Mikroverunreinigungen aus dem Abwasser zu eliminieren – und dies immer häufiger. Auf dem Markt sind zahlreiche PAK-Sorten verfügbar, die zwar äusserlich nicht zu unterscheiden sind, aber dennoch unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Dieser Artikel soll Betreiber und Ingenieure bei der Entscheidung unterstützen, welche Pulveraktivkohle für ihr Abwasser optimal ist und wie sie die Qualität neuer Lieferungen überprüfen können.

Aline Meier*, VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen»; Marc Böhler, Eawag

RÉSUMÉ

CHARBON ACTIF EN POUDRE – LEQUEL CONVIENT? CHOIX, ACQUISITION ET ASSURANCE QUALITÉ DU CAP POUR ÉLIMINER LES MICROPOLLUANTS

Actuellement, trois stations d'épuration (STEP) en Suisse utilisent le charbon actif en poudre (CAP) pour éliminer les micropolluants. D'autres stations d'épuration sont en construction ou en cours de planification, ce qui augmentera les besoins en CAP dans les STEP dès les prochaines années. Les exigences en matière de qualité du CAP varient selon l'utilisation. Il n'existe actuellement pas de produit spécialement développé pour l'utilisation dans les STEP. Les indicateurs courants pour le CAP ne conviennent pas pour décrire sa performance dans l'élimination de micropolluants. Il n'est donc pas clairement défini, quelles caractéristiques un CAP doit posséder pour être efficace dans cette utilisation.

La composition des eaux usées exerce une influence considérable sur la performance d'épuration du CAP. Cela signifie que différents produits conviennent plus ou moins bien pour atteindre un objectif de performance identique dans des eaux usées déterminées, et nécessitent ainsi une dose plus ou moins importante. La difficulté pour les exploitants de STEP consiste donc à trouver, dans la large palette de produits, le CAP présentant un rapport performance/prix optimal pour leurs eaux usées. C'est néanmoins important, car cela détermine les coûts d'exploitation, la stabilité opérationnelle et les conséquences pour l'environnement.

HINTERGRUND

Aktivkohle (AK) kann vielfältig eingesetzt werden – auch und vor allem im Alltag: Sei es als Kohletabletten oder als Aktivkohle-Filter zur Luft- oder Wasseraufbereitung. Zunehmend kommt sie auch auf kommunalen Abwasserreinigungsanlagen (ARA) zur Elimination von Mikroverunreinigungen (MV) zum Einsatz. Die gesetzlichen Voraussetzungen für diesen schweizerweiten ARA-Ausbau sind in [1] beschrieben. In der Schweiz ist Pulveraktivkohle (PAK) bisher auf der ARA Bachwis in Herisau, der ARA Thunersee (Fig. 1) und der ARA Schönau in Cham in Gebrauch, auf der ARA Penthaz wird granuliert Aktivkohle (GAK) eingesetzt. Aktuell sind zahlreiche Projekte zur Elimination von MV mit AK bereits im Bau oder noch in Planung. Der PAK-Einsatz auf ARA wird in Zukunft also zunehmen. Der Fokus des vorliegenden Artikels ist auf PAK gerichtet, wobei einige Aussagen auch auf GAK zutreffen (Box 1).

PAK-Hersteller bieten meist eine hohe Anzahl an Produkten und Variationen auf dem Markt an. Noch gibt es keine Produkte, die gezielt für den Einsatz auf ARA entwickelt wurden. Zudem kann die Zusammensetzung des zu behandelnden Abwassers, die sogenannte Abwassermatrix, sehr unterschiedlich sein, was die Effizienz der PAK massgeblich beeinflusst.

* Kontakt: aline.meier@vsa.ch

Auch gibt es grosse Qualitätsunterschiede bei den AK-Produkten. Da AK auf natürlichen Ressourcen respektive Rezyklaten basiert, kann die Art und Zusammensetzung der Ausgangsrohstoffe variieren, was sich stark auf die Eigenschaften der AK auswirkt. Grosse Anbieter versuchen daher, die Qualität der Ausgangsrohstoffe und Art der Aktivierung konstant zu halten, und unternehmen somit grosse Anstrengungen zur Qualitätssicherung. Sie produzieren in der Regel selbst, haben langfristige Abmachungen mit den Zulieferern der Ausgangsrohstoffe und kontrollieren die Liefer- und Prozessketten. Dennoch können diese Rahmenbedingungen ändern, insbesondere bei Anbietern, die nur einen Vertrieb der Produkte vornehmen. Im Sinne einer möglichst günstigen Produktion sowie einer Optimierung der Ressourcennutzung werden oft verschiedene Produktchargen und Qualitäten vermischt, auch können sich die Zulieferer ändern.

Wie viel Aktivkohle eingesetzt werden muss, um die gesetzlich geforderte Reinigungsleistung zu erreichen, hängt stark von der Qualität der AK und deren Eignung für das jeweilige Abwasser ab. Somit haben Qualität und Eignung auch Auswirkungen auf Kosten, Betriebsstabilität und Umwelt. Dies zeigen

Erfahrungen der Betreiber in Baden-Württemberg, wo bereits zahlreiche volltechnische PAK-Anlagen seit mehreren Jahren in Betrieb sind. In einigen Fällen haben sie beobachtet, dass die Qualität der PAK zwischen Lieferchargen desselben Produkts variieren kann, oder dass einzelne Produkttypen eine Zeit lang gar nicht verfügbar sind. Betreiber sollten daher mögliche Alternativprodukte mit ähnlicher Leistung vorgängig identifizieren. Deshalb lohnt sich eine genaue Produktprüfung. Diese erlaubt einen stabilen und wirtschaftlichen Betrieb der Spurenstoffelimination auf den ARA. Vor diesem Hintergrund befassen sich Praxisanwender und Experten eingehend mit dieser Thematik. Betreiber, AK-Hersteller, Forschungsgruppen und Ingenieure sammeln zunehmend Wissen aus laufenden Anlagen und Forschungsprojekten. Diese Bemühungen und Aktivitäten sind noch im Gange und die nachfolgenden Empfehlungen und Kenntnisse nicht abschliessend. Dieser Artikel soll in erster Linie Betreiber und Ingenieure dabei unterstützen, folgende bedeutende Fragen möglichst einfach und gemäss dem heutigen Kenntnisstand zu klären:

- Welche PAK-Produkte sind für meinen Prozess und meine Abwassermatrix geeignet?

GRANULIERTE AKTIVKOHLE (GAK)

Im Umgang mit GAK ist noch wenig Erfahrung vorhanden. Durch zahlreiche Pilotversuche und laufende Anlagen wird dieses Wissen jedoch stetig vergrössert. Die Kapitel «Hintergrund» und «Eigenschaften von Aktivkohle» gelten grösstenteils auch für GAK. Zudem unterscheiden sich die Kriterien für die PAK-Wahl nicht massgeblich von denen für die GAK-Wahl, wobei Laborversuche wegen der mehrmonatigen Betriebszeit einer GAK-Filtration und der groben Körnung schwieriger sind. Bei den bestehenden GAK-Anlagen und in Forschungsprojekten wurden bereits wertvolle Erfahrungen zur GAK-Ausschreibung und zum Betrieb gesammelt. Dazu ist ein separater Übersichtsartikel geplant.

Fragen dazu nimmt die VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen» jederzeit entgegen: www.micropoll.ch/kontakt/

Box 1

- Wie viel muss ich von einem Produkt dosieren, um die gewünschte Reinigungsleistung auf meiner ARA zu erreichen?
- Wie erhalte ich einen Überblick über Anbieter und Produkte?
- Wie schreibe ich das Produkt aus und wie kontrolliere ich die Qualität der Produktlieferungen?

Der vorliegende Artikel fasst unter anderem Erkenntnisse aus folgenden Quellen zusammen, die auch weitergehende Informationen beinhalten:

- Artikel [2] der DWA-Arbeitsgruppe KA 8.6 sowie Themenband T1/2019 [3] (wird 2019 erscheinen)
- Artikel zur Praxiserfahrung der Betreiber von PAK-Anlagen [4] und praktische Tipps aus den Sondernachbarschafts-Treffen «Spurenstoffe Baden-Württemberg»
- Rührversuche Eawag für diverse Projekte

EIGENSCHAFTEN VON AKTIVKOHLE

Die Anwendung von AK auf ARA ist nur eine unter vielen. Je nach Verwendungszweck unterscheiden sich die Anforderungen an die Qualität. Während für AK im Trinkwasser die Arbeitsblätter DVGW W239 (A) 2011 und W204 2007 wichtige Vorgaben enthalten, gibt es für die Anwendung im Bereich der Spurenstoffelimination aus kommunalem Abwasser



Fig. 1 PAK-Stufe der ARA Thunersee, mit Kontaktbecken, Sedimentation und Filtration

(Quelle: M. Rindlisbacher, ARA Thunersee)

Physikalische Eigenschaften	Bedeutung für den Anwender
Wassergehalt	Bis zu 10% – relevant für die tatsächliche Annahmemenge bei Lieferung und für die Bestimmung der spezifischen Dosis in Masse pro Volumen Abwasser.
Aschegehalt	Wichtig für die spezifische Dosis, gibt Hinweis auf den Anteil an Reaktivat.
Vermeidung von Störstoffen	Zum Beispiel Resten von Verpackungen oder Schrauben, wichtig für die Förderung, Befüllung und Lagerung der PAK.
Korngrößenverteilung	Bedeutung für die Art sowie Effizienz der PAK-Abtrennung mit minimalem PAK-Schlupf; kleine PAK-Teilchen beladen sich schneller, flocken jedoch weniger gut und sind deshalb schwieriger abtrennbar. Für Membranverfahren ist superfeine PAK möglich.
Schüttdichte	Bedeutung für die Lagerung; eine PAK mit hoher Schüttdichte braucht weniger Volumen im Silo.
Reinheit	Wenn nur Frischkohle gewünscht ist, gibt es dazu Vorgaben in der Norm EN 12915.

Tab. 1 Physikalische Eigenschaften von Pulveraktivkohle mit Bedeutung für den ARA-Betrieb

bisher keine Normen. Die in *Tabelle 1* aufgeführten Eigenschaften von AK scheinen zum heutigen Zeitpunkt relevant für die Anwendung im Bereich der Elimination von MV aus kommunalem Abwasser.

KENNZAHLEN

AK besteht zu einem Grossteil aus Kohlenstoff und weist eine grosse Oberfläche im Bereich von 500 bis 1500 m²/g auf [3, 5], an die ein breites Stoffspektrum adsorbieren kann. Dieses umfasst viele verschiedene Substanzen aus der Gas- oder Flüssigphase, darunter auch organische MV. Adsorptionskapazität heisst diese Fähigkeit und beschreibt die Leistung der AK. Zu deren Abschätzung geben

Hersteller Kennzahlen an: zum Beispiel die BET-Oberfläche, die Iodzahl, die Melassezahl, die Methylenblauzahl oder die Nitrobenzolzahl (*Box 2*). Untersuchungen zeigen jedoch, dass es keinen oder nur ungenügenden Zusammenhang zwischen der Eliminationsleistung der MV und den genannten Kennzahlen gibt [6–8].

HERSTELLUNG UND REAKTIVIERUNG

AK wird in einem mehrstufigen Prozess entweder aus fossilen Rohstoffen wie Steinkohle, Braunkohle oder nachwachsenden Rohstoffen wie Holz, verschiedenen Fruchtschalen, Kerne und anderen biogenen Ausgangsrohstoffen hergestellt [2]. 2010 waren 57% der Aktivkohlen auf

dem Markt aus fossilen Rohstoffen. Der Ausgangsrohstoff sowie die Herstellungs- und Aktivierungsart beeinflussen die Eigenschaften der Aktivkohle und deren ökologischen Fussabdruck stark. Die AK kann entweder mit Gas oder chemisch aktiviert werden, wobei die Gasaktivierung für den Einsatz im Trink- und Abwasserbereich bevorzugt wird [2]. Die Verweilzeit, Qualität sowie Menge der eingesetzten Gase (CO₂-Gas und Wasserdampf) und die Temperatur im Aktivierungssofen beeinflussen die Aktivierung und dadurch die Qualität der AK [2]. Es entsteht ein feingliedriges Porensystem mit Makro-, Meso- und Mikroporen. In Abhängigkeit der Anwendung werden bestimmte Porengrößen bevorzugt. Zur Elimination eines breiten Spektrums von organischen MV aus kommunalem Abwasser scheinen vor allem Produkte mit hohem Mesoporen-Anteil vorteilhaft, da sie einen optimalen Zugang zu den Sorptionsplätzen im Inneren des AK-Korns [7] gewährleisten.

AK weist unterschiedliche Korngrößen auf, wobei zwischen PAK (>95% der Partikel mit Durchmesser <0,15 mm gemäss der Norm DIN EN 12903) und GAK (marktüblich: 0,5–2,5 mm oder 0,4–1,7 mm gemäss [2]) unterschieden wird. Zur Herstellung der PAK wird der für GAK zu feine Siebdurchgang oder teilweise das gesamte Produkt vermahlen (*Fig. 2*) [2]. Auch bei der Reaktivierung

BEGRIFFE RUND UM AKTIVKOHLE

BET-Oberfläche

Spezifische innere Oberfläche eines porösen Feststoffes in m²/g [9].

Iodzahl

Einer der gängigsten Parameter zur Charakterisierung der Adsorptionsleistung von Aktivkohlen. Die Iodzahl gibt an, welche Menge an Iod bei einer definierten Iod-Restkonzentration in Lösung pro Gramm PAK adsorbiert werden kann [mg/g]. Da genau ein Iodatomen einen Adsorptionsplatz einnimmt, korreliert diese Zahl mit der inneren Oberfläche (BET), ist jedoch einfacher zu messen [10].

Melassezahl

Diese gilt als Mass für den Grad der Entfärbung einer standardisierten Lösung.

Melassezahlen verschiedener Aktivkohlen variieren stark. Dieser Parameter gilt als Mass für den Gehalt an Makroporen [10].

Methylenblauzahl

Menge des aromatischen Farbstoffs Methylenblau, die von AK adsorbiert wird, gibt Hinweise auf die Anzahl Mesoporen, ist bisher wenig standardisiert.

Nitrobenzolzahl

Kohlebedarf für eine 90%ige Elimination des gut adsorbierbaren Nitrobenzols [7].

Schüttdichte

Quotient aus der Masse einer nicht verdichteten, losen Schüttung und deren gesamten Volumens (Korn- und Zwischenkornvolumen) [9].

Rütteldichte

Quotient aus der Masse einer in bestimmter Weise verdichteten Schüttung und deren Volumen [9].

Porengrößenverteilung

Der mittlere Durchmesser der Mikroporen beträgt zwischen 0,2 und 1 nm, trägt mit etwa 95% an der inneren Oberfläche bei und ist entscheidend für die Adsorption. Deutlich geringer ist der Anteil Mesoporen mit etwa 5% und einem Durchmesser von rund 1 bis 25 nm. Sie sind zentral für den Stofftransport in das Innere des AK-Korns. Die Makroporen haben keine Bedeutung für die innere Oberfläche [11].

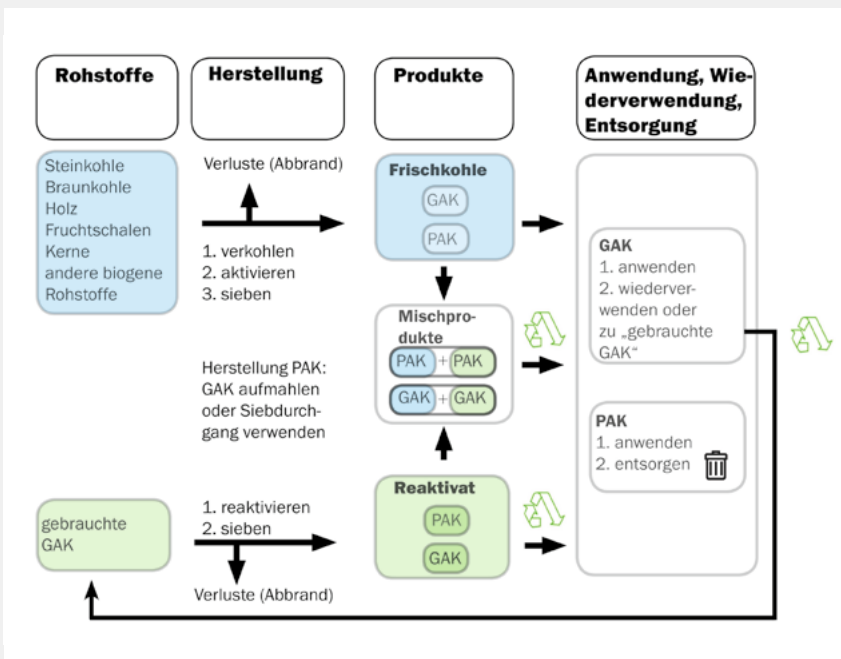


Fig. 2 Vom Rohstoff zur Aktivkohle. Frischkohle ist blau dargestellt, Reaktivat grün. Die grünen Pfeile markieren Vorgänge, die zum Downcycling gehören.

der GAK entsteht ein Feinanteil, der zu PAK aufgemahlen wird [2]. Die AK-Hersteller haben das Ziel, möglichst wenig Rohstoff zu verbrauchen. Dies stellen sie mit dem Downcycling sicher, wobei sie zum Beispiel reaktivierte Aktivkohle mit Frischkohle (Make-up) mischen, um die ursprüngliche Qualität bzw. Leistungsfähigkeit zu erreichen und indem sie AK geringerer Qualität in Anwendungen mit geringeren Anforderungen oder bei höheren Konzentrationsniveaus (z. B. bei Deponiesickerwasser) einsetzen [2]. *Figur 2* gibt einen grundsätzlichen Überblick der Herstellung und des Recyclings von AK. Sie zeigt, dass nicht nur GAK, sondern auch PAK einen Anteil an Reaktivat aufweisen kann.

LEISTUNGSVERGLEICH VON PAK

PAK ist ein schwarzes und sehr feines Pulver. Die verschiedenen Produkte sind optisch nicht voneinander zu unterscheiden, was eine Auswahl erschwert. Eine wichtige Anforderung an die PAK ist eine hohe Reinigungsleistung bezüglich der Elimination von MV aus dem Abwasser. Diese kann jedoch zum heutigen Zeitpunkt nicht mit einem der gängigen, messbaren Parameter von PAK beschrieben werden [6-8].

SCHÜTTELVERSUCHE

In der Praxis haben sich zur Beschreibung der Leistung und Vorauswahl sog-

nannte Überkopf-Schüttelversuche oder Becher-Rührversuche mit verschiedenen PAK-Produkten und verschiedenen Dosiermengen bewährt (*Fig. 3*). Bei den Schüttelversuchen wird eine Probe des ARA-Ablaufs untersucht, also des zukünftigen Zulaufs zur PAK-Stufe. Falls im Zuge eines ARA-Ausbaus auch die biologische Reinigung stark verändert wird, zum Beispiel bei einer Erweiterung mit vollständiger Nitrifikation, sind Tests vor dem Ausbau eingeschränkt aussagekräftig. Die Probe wird mit einer PAK-Suspension

versetzt und über einen definierten Zeitraum gemischt. Während oder nach dem Versuch werden Stichproben entnommen und bezüglich MV, DOC und Absorbanz bei der Wellenlänge 254 nm analysiert. Letztere nennt man auch spektraler Absorptionskoeffizient SAK_{254} und liefert wertvolle Informationen über die potenzielle Leistungsfähigkeit zur MV-Elimination [6, 12, 13]. Der SAK_{254} kann mit Photometern bestimmt werden, die im ultravioletten Bereich messen. Die DOC-Messung kann ebenfalls nach Filtration der Probe auf der ARA vollzogen werden. Aufwendiger und teurer ist die Bestimmung der MV.

Für ein erstes Screening vieler PAK-Produkte ist die Bestimmung der MV-Elimination jedoch nicht notwendig. Die Resultate der Absorbanzabnahme (ΔSAK_{254}) und der DOC-Reduktion bei bestimmten Dosiermengen erlauben bereits den Ausschluss einiger PAK-Produkte. Zudem ist es damit möglich, die benötigten Jahresmengen abzuschätzen. Die zweite Testrunde umfasst nur noch wenige PAK-Produkte, etwa drei bis fünf, die genauer untersucht (zusätzlich MV-Analysen) und gezielt im Rahmen einer Ausschreibung in der abgeschätzten Menge angefragt werden. Zudem hat man Information über mögliche Alternativprodukte bei Lieferengpässen. Auf größeren Kläranlagen können die Versuche durch ausgebildetes Laborpersonal ausgeführt werden. Mittlere und kleine ARA sollten anerkannte La-



Fig. 3 Vergleich verschiedener PAK-Muster mittels Überkopf-Schüttelversuche

bore für derartige Tests anfragen. Die geplante «Anleitung für Schüttelversuche mit Pulveraktivkohle» [14] auf www.micro-poll.ch beinhaltet einen Beschrieb für Betreiber und Labore zur Durchführung der beschriebenen Schüttelversuchen im Labor. Sie ist auch für die Qualitätssicherung einzelner Lieferungen während des Betriebs anwendbar (s. Kap. «Betrieb»). Für diese Tests braucht es PAK-Muster von den verschiedenen Herstellern. Diese dienen später auch nach Lieferung der Grosschargen als Referenzmuster – deshalb sollen mindestens 100 g vom Hersteller angefragt werden. Einen Überblick über potenzielle Anbieter von AK bietet die Broschüre des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe NRW [15].

EINFLUSS DER ABWASSERMATRIX

Bei der Bestimmung der notwendigen Dosiermenge ist zu berücksichtigen, dass an der AK nicht nur MV adsorbieren, sondern auch andere gelöste organische Stoffe aus der Hintergrundorganik. Letztere wird auch als Abwassermatrix bezeichnet und konkurriert mit den MV um vorhandene Adsorptionsplätze auf der AK. Sie ist abhängig vom lokal geprägten Einzugsgebiet, wobei der Anteil und die Zusammensetzung von gewerblichen und industriellen Einleitern wichtig sind, sowie von der mechanisch-biologischen Abwasserreinigung. Die MV selbst sind Teil der gelösten Organik. Es ist von grosser Bedeutung, die Konzentration der organischen Substanzen im Abwas-

ser zu kennen. Dies erlaubt bereits eine erste Abschätzung, wie viel PAK eingesetzt werden muss. Hierzu eignen sich die Messgrössen DOC (gelöster organischer Kohlenstoff) sowie der SAK_{254} . Der gelöste CSB (chemischer Sauerstoffbedarf) gibt auch Anhaltspunkte, da aus diesem der DOC abgeleitet werden kann. So werden momentan auf der ARA Thunersee ungefähr 1,5 mg PAK/mg DOC eingesetzt, was 0,5 mg PAK/mg CSB_{gelöst} entspricht. Das Verhältnis von SAK_{254} zu DOC variiert in Abhängigkeit der Abwassermatrix.

Da der DOC im gereinigten Abwasser viel höher ist als die Konzentration der MV, hat der DOC einen dominanten Einfluss auf die Beladung und den Aktivkohleverbrauch. Hohe Gehalte an DOC im Abwasser verursachen in der Regel einen höheren spezifischen AK-Verbrauch.

EINHEITEN DES PAK-VERBRAUCHS

Die Einheit der PAK-Dosis ist für die Vergleichbarkeit zwischen Anwendungen bei verschiedenen Abwässern zentral. Die spezifische Dosis wird bis anhin häufig in mg PAK/l angegeben. Diese Angabe erlaubt es zwar, den Gesamtbedarf für eine Kläranlage über die Zulaufwassermenge der ARA abzuschätzen. Aber sie ermöglicht nicht, den spezifischen Verbrauch bei verschiedenen Abwässern zu vergleichen [13].

Sinnvoll wäre daher, die Dosis immer in der Einheit mg PAK/mg DOC anzugeben. Damit können im direkten Vergleich von verschiedenen Abwässern Aussagen über

die Reinigungsleistung der eingesetzten Kohleprodukte gemacht werden. In [3] finden sich Abschätzungen der möglichen PAK-Dosierung bezogen auf den Hintergrund-DOC in Abhängigkeit der Stoffgruppen, das heisst substanzspezifisch. In zahlreichen Untersuchungen und Pilotierungen zeigte sich, dass in der Regel eine Dosis von 1 bis 2 mg PAK/mg DOC ausreichend ist, um ein grosses Spektrum an MV zu eliminieren [3, 13]. Die effektiv notwendige Dosis ist zudem abhängig vom eingesetzten Verfahren. Wünschenswert wäre die zusätzliche Angabe des spezifischen PAK-Verbrauchs (mg PAK/l) in Bezug zum SAK_{254} des Abwassers (E/m) [13]. Im Zuge der Abwasserbehandlung mit AK verringert sich nicht nur der DOC (Fig. 4A), sondern auch der SAK_{254} , da insbesondere organische Kohlenstoffverbindungen mit Mehrfachbindungen im Molekül, die die Absorbanz verursachen, an der AK sorbieren. Das ΔSAK_{254} eines Abwassers korreliert in der Regel sehr gut mit der Abnahme der MV [16], was Fig. 4B bestätigt.

EVALUATION GEEIGNETER PAK

EINFLUSSFAKTOREN

Bei der Wahl einer optimalen PAK für ein Abwasser spielen mehrere Faktoren eine Rolle (Fig. 5). Die folgenden Abschnitte diskutieren diese, wobei der Einfluss physikalischer Eigenschaften der PAK bereits im Unterkapitel «Eigenschaften von Aktivkohle» erläutert wurde.

Kosten

Die Kosten sind ein sehr wichtiges Kriterium für die PAK-Wahl. Bei der Ausschreibung von PAK ist jedoch das Hauptziel, die PAK mit dem besten Preis-Leistungs-Verhältnis (z.B. Preis in Franken pro eliminierte MV) für das vorliegende Abwasser zu finden, wobei auch die Reinigungsleistung, die Entsorgungskosten, der Wassergehalt und der Aschegehalt berücksichtigt werden müssen (s. «Bewertung der Angebote»).

Reinigungsleistung

Wie bereits erwähnt, eignen sich Schüttelversuche zur Beschreibung der Leistung einer PAK. Aufgrund der spezifischen Abwassermatrix einer ARA können verschiedene für die Spurenstoffelimination gut geeignete PAK dennoch unterschiedliche Leistungen aufweisen. Fig. 6 zeigt, dass die Elimination ausgewählter MV

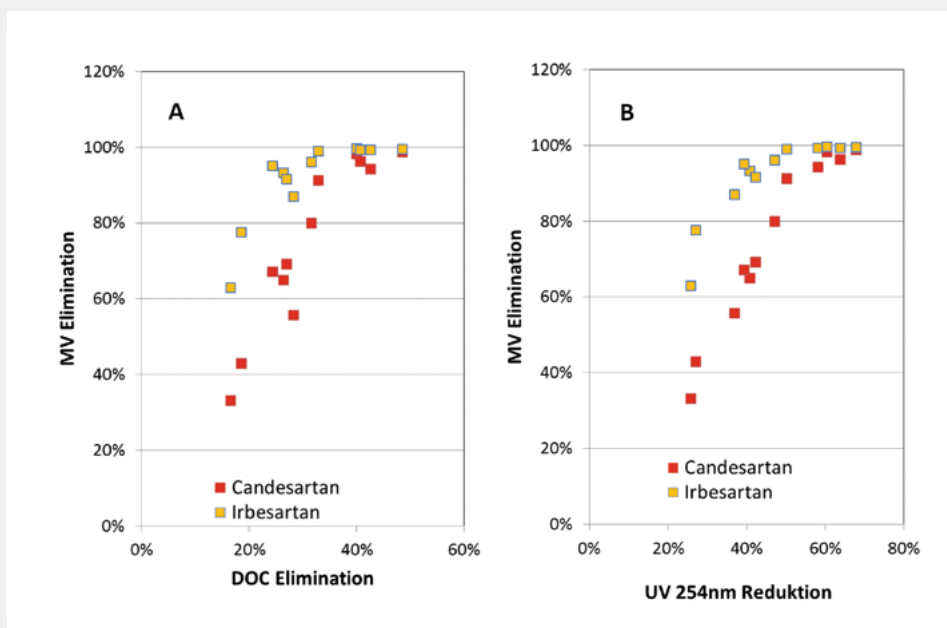


Fig. 4 Elimination der zwei Substanzen Candesaratan und Irbesartan in Abhängigkeit der Reduktion von DOC (A) und SAK_{254} (B) bei Einsatz verschiedener PAK-Produkte und einer Abwassermatrix (Daten aus [13, 17]).

durch sechs etablierte PAK-Typen in Batchtests mit demselben Abwasser zwischen 55 und 90% respektive 85 bis 100% variieren kann. Um differenzierte Aussagen zu den Eliminationsleistungen von einzelnen PAK-Typen machen zu können, sollte die spezifische Dosis nicht zu hoch gewählt werden, weil mit höherer Dosis die Unterschiede immer geringer werden. Im Fall von günstigen Produkten mit einer geringeren Reinigungsleistung und entsprechend höherer Dosiermenge entstehen zusätzliche Kosten für Transport, Dosierung und Entsorgung der PAK.

In einer grosstechnischen MV-Stufe erzielt man tendenziell eine bessere Reinigungsleistung als im Schüttelversuch. Dies liegt unter anderem daran, dass der Schüttelversuch das Verfahren auf der ARA nicht exakt abbilden kann. Im Laborversuch wird eine kleine Menge frischer PAK während mehreren Stunden bis Tagen mit Abwasser in Kontakt gebracht. Hingegen wird in der volltechnischen Anwendung das Abwasser mit einer grossen Menge PAK unterschiedlichen Alters und Beladungszustandes für einen vergleichsweise kurzen Zeitraum (15–30 Minuten) in Kontakt gebracht. Dennoch zeigt ein Vergleich mit der Praxisanwendung, dass Schüttelversuche eine gute Methode zur Beurteilung von PAK sind. Dies ist in *Figur 7* ersichtlich, in der ein Vergleich der MV-Elimination der grosstechnischen PAK-Anlage der ARA Thunersee mit Ergebnissen aus Schüttelversuchen dargestellt ist. Die Übertragbarkeit von Resultaten aus Schüttelversuchen auf eine volltechnische Anwendung zeigt sich auch in [18].

Verfahren, PAK-Abtrennung und Verhalten im Betrieb
Gegenwärtig gibt es eine Vielzahl von Verfahrensanordnungen zum Einsatz von PAK auf ARA [19–21], die Einfluss auf die Wahl einer geeigneten PAK haben können. Das Abtrennverfahren bestimmt, welche PAK-Korngrößen zurückgehalten werden können. Eine Membran erlaubt beispielsweise extrafeine PAK einzusetzen, die schneller mit den MV reagiert. Zudem ist es wichtig, dass die PAK möglichst vollständig mit den Chemikalien wie Fäll- und Flockungshilfsmittel reagiert, um einen guten PAK-Rückhalt in der Sedimentation und Filtration sicherzustellen. Der PAK-Schlupf soll stets minimal sein.

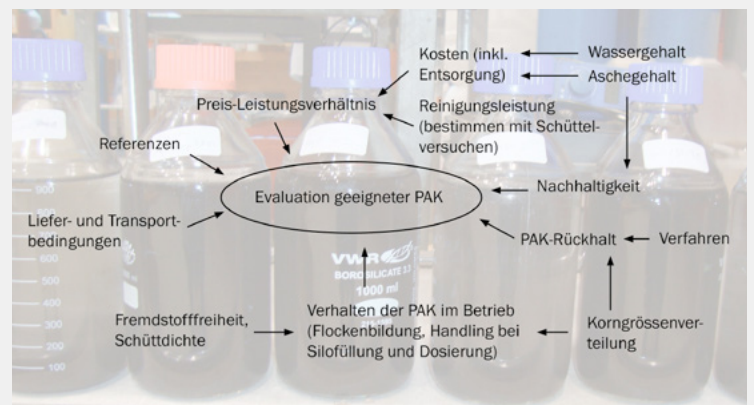


Fig. 5 Mögliche Einflussfaktoren bei der Evaluation geeigneter PAK

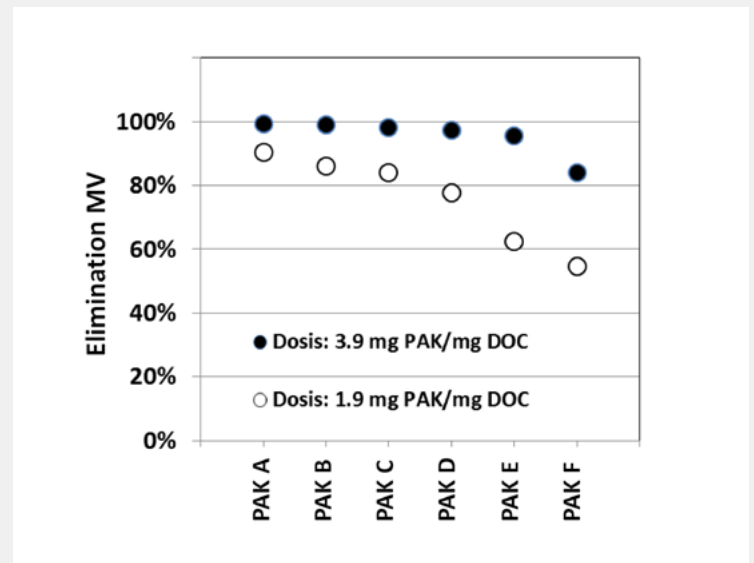


Fig. 6 Vergleich der Eliminationsleistung verschiedener PAK-Produkte (PAK A bis PAK F). Dargestellt ist pro Kohleprodukt die mittlere Elimination der eher weniger gut adsorbierbaren MV Diclofenac, Candesartan und Irbesartan. In den Batchversuchen wurden zwei PAK-Dosen im Abwasser einer ARA getestet. (Daten aus [13, 17])

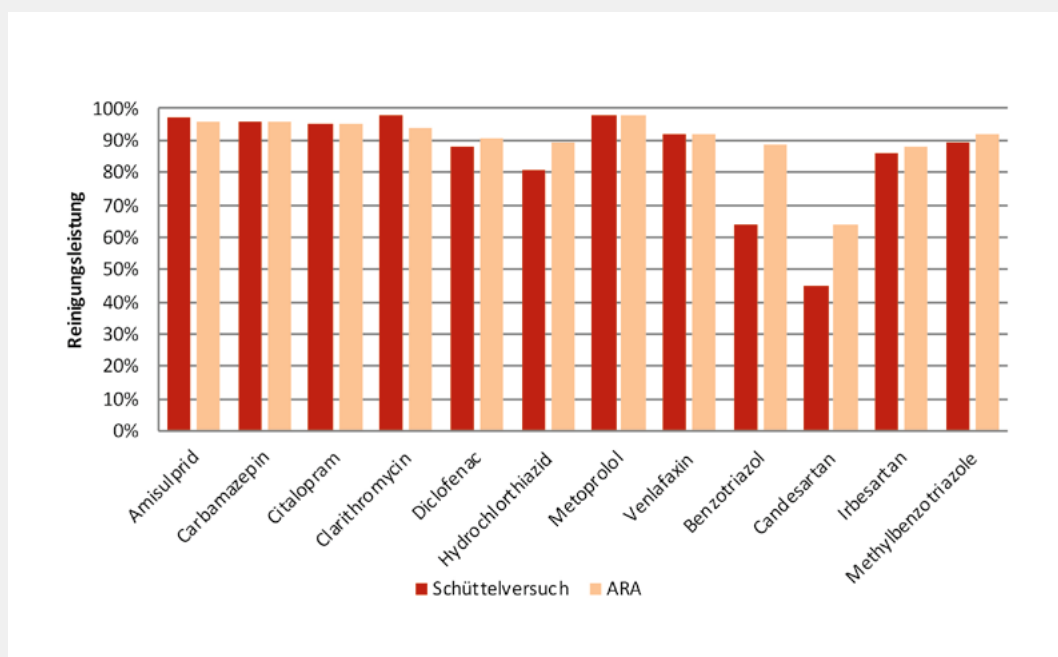


Fig. 7 Vergleich der MV-Elimination der grosstechnischen PAK-Anlage der ARA Thunersee mit Labor-Schüttelversuchen. Dargestellt ist das Mittel aus sieben 48-Stunden-Sammelproben (Dosierung von ca. 8–10 mg PAK/l, 2 PAK-Produkte parallel in zwei Strassen eingesetzt, Probenahmeort ARA-Zulauf und Ablauf der gemeinsamen Filtration). Im Schüttelversuch wurden dieselben beiden PAK-Produkte verwendet (Dosierung ca. 10 mg PAK/l, Probenahme nach 24 Stunden). (Quelle: B. Bangerter, ARA Thunersee)

Der Einfluss der PAK auf Betriebsparameter der Anlage wie Flokkung und Trübung zeigen sich nur in einer Pilotierung oder während des grosstechnischen Betriebs. Dasselbe gilt für das Verhalten der PAK bei der Silo-Befüllung und in der Dosieranlage, das den Aufwand des Betriebspersonals stark beeinflusst.

Nachhaltigkeit

Gegenwärtig wird ein grosser Anteil der AK vorwiegend im asiatischen Raum, Australien und in den USA produziert [2, 3]. Der Herstellungsprozess ist energieintensiv und verursacht Emissionen, die weit über die Hälfte des gesamten CO₂-Footprints von Aktivkohle-Anwendungen auf ARA ausmachen [22]. Im Vergleich zu einer Ozonung, ein alternatives Verfahren zur MV-Elimination, ist das Treibhauspotenzial von PAK in den meisten Fällen höher [22], speziell beim vergleichsweise CO₂-neutralen Strommix der Schweiz. Wenn eine nachhaltige PAK gewünscht ist, gibt es zwei Möglichkeiten: einen erneuerbaren Rohstoff (Box 3) oder ein Produkt mit einem hohen Anteil an Reaktivat zu verwenden.

Der in *Figur 8* gezeigte Überblick des CO₂-Fussabdrucks in Abhängigkeit des Rohstoffs und mit Unterscheidung zwischen Frischkohle und Reaktivat bekräftigt diese Aussage [2]. So bedeutet die Erzeugung von Frischkohle im Vergleich zu Reaktivaten etwa einen fünffachen CO₂-Fussabdruck. Somit ist der Anteil Reaktivat am Produkt ein wichtiger Parameter für die Ermittlung des Umwelteinflusses. Leider wird diese Angabe von den Herstellern nicht immer transparent kommuniziert.

Wer eine nachhaltige Frischkohle wünscht, muss für einen erneuerbaren Rohstoff meist höhere Preise in Kauf nehmen.

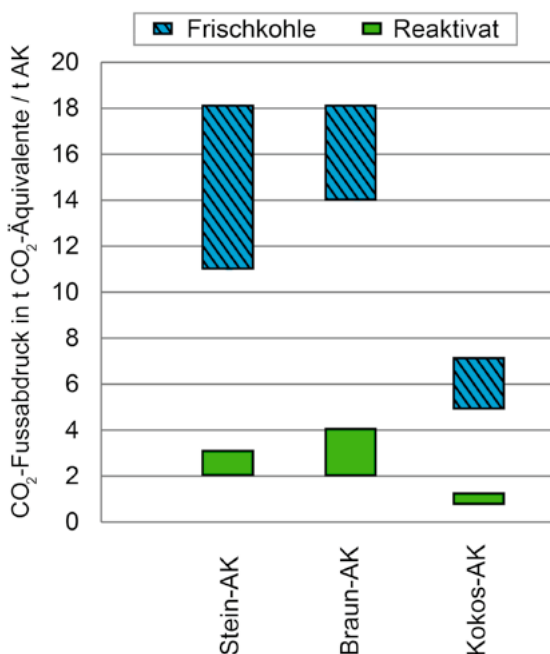


Fig. 8 Spannweiten für den CO₂-Fussabdruck von frischer Aktivkohle und Reaktivat für verschiedene Ausgangs-Rohstoffe, anonymisierte Umfrage bei AK-Herstellern, Daten aus [2], inklusive Stromverbrauch und Dampfbedarf während des Herstellungsprozesses, Luftemissionen durch Rohstoffverluste bei fossilen Rohstoffen und Transporte, ohne Entsorgung, Bewertungsfaktoren aus der Ökobilanz-Datenbank Ecoinvent [23].

PROJEKT «EMPYRION»

Eine in der Schweiz produzierte PAK aus biogenen Abfällen wäre eine nachhaltige Option: Dadurch würden erneuerbare Ressourcen eingesetzt und die Transportwege auf ein Minimum beschränkt. Zudem wären die sozialen Bedingungen bei der Herstellung leichter zu überprüfen. Im Projekt «Empyrion» – durchgeführt von Agroscope, Ithaka-Institut und Eawag – haben Forscher aus biogenen, holzigen Abfällen in der Schweiz im Labormassstab PAK produziert, die bezüglich Reinigungsleistung mit den Produkten auf dem Markt mithalten können. Mehr Informationen dazu liefert der Artikel von *Hagemann, N. et al.*, S. 32 [24]. Folgeprojekte werden zeigen, wie sich dieses Konzept auf grosstechnische Umsetzungen übertragen lässt.

Box 3

Bei einer umfassenden Beurteilung der Umweltauswirkungen können in Einzelfällen auch lokale Gegebenheiten rund um die Herstellung der Aktivkohle eine wichtige Rolle spielen.

Zur Nachhaltigkeit gehören zudem soziale Aspekte wie angemessene Arbeitsbedingungen und Verzicht auf Kinderarbeit. In den meisten Fällen ist es schwierig, diese für ein Produkt nachzuprüfen.

Liefer- und Transportbedingungen

Für einen problemlosen Betrieb mit einem PAK-Produkt ist es wichtig, dass die Lieferfrist ab Bestellvorgang nicht zu lange ist und dass die vereinbarte Liefermenge tatsächlich geliefert werden kann. Zudem sollen beim Umladen und beim Transport Kontaminationen vermieden werden.

Referenzen

Zahlreiche PAK-Produkte haben sich bereits auf anderen ARA bewährt. Genauere Informationen dazu sind über die Schweizer Erfahrungsaustausch-Gruppe «Aktivkohle» oder die Sondernachbarschaft «Spurenstoffe Baden-Württemberg» erhältlich. Die VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen» kann dazu Kontakte vermitteln.

BEWERTUNG DER ANGEBOTE

Im Offertenvergleich können die genannten Faktoren in die Bewertungskriterien einfließen. Diese sollten aber bereits in den Ausschreibungsunterlagen transparent kommuniziert werden. Das wichtigste Kriterium bei öffentlichen Ausschreibungen sind die Kosten. Je nach kantonalen Vorgaben müssen sie mit mindestens 30–50% gewichtet werden, wobei eher 50% üblich sind. Dabei ist wichtig, dass die Entsorgungskosten im Kostenvergleich integriert sind. Auch die Wahl der Preisformel hat einen grossen Einfluss. Es lohnt sich, während der Erstellung der Submissionsunterlagen verschiedene Ausgangssituationen damit durchzuspielen, um eine sinnvolle Wahl zu treffen. In einigen Kantonen ist die Preisformel mehr oder weniger vorgegeben. Andere Anforderungen an das PAK-Produkt kann der Bauherr beispielsweise wie in den folgenden Abschnitten beschrieben in den Zuschlagskriterien resp. in den technischen Spezifikationen integrieren.

In [4] werden die Ergebnisse einer Befragung des Kompetenzzentrums Spurenstoffe Baden-Württemberg (KomS) und des

VSA bei PAK-Betreibern gezeigt, wobei verschiedene Ansätze enthalten sind, wie zusätzlich zum Preis auch die Reinigungsleistung in die Beurteilung einfließen kann. Im Falle einer öffentlichen Ausschreibung wäre es denkbar, die PAK selektiv auszuschreiben. Zum Beispiel könnte das Selektionskriterium eine Mindestanforderung an das ΔSAK_{254} sein.

Zusätzlich ist es sinnvoll, den Preis auf den garantierten Wassergehalt zu beziehen, um den schwankenden Wassergehalt angemessen zu berücksichtigen. Denn Erfahrungen beispielsweise auf der ARA Thunersee zeigen, dass der effektive Wassergehalt des PAK-Musters für die späteren Lieferungen nicht unbedingt repräsentativ ist.

Als technische Spezifikationen enthielt beispielsweise die Offertanfrage der PAK für die ARA Thunersee die Forderung, dass der Lieferant entweder Fremdstofffreiheit garantieren soll oder beim Einblasen der PAK ein Sieb (z. B. 5 mm Maschenweite) zwischen Lastwagen und Befüll-Leitung schalten muss.

Bei den Zuschlagskriterien können auch Angaben zur Lieferung und zu den Referenzen einfließen. Zur Bewertung der Umwelteinflüsse besteht zudem die Möglichkeit, die Angaben zum Rohstoff und Anteil Reaktivat und somit zum CO_2 -Fussabdruck zu verwenden, solange sie auf einer vergleichbaren Basis (z. B. Fig. 8) beruhen. Jede ARA wird für sich entscheiden, wie stark sie das Kriterium Nachhaltigkeit gewichten will. Der VSA und die Eawag begrüßen eine adäquate Berücksichtigung dessen in Anbetracht des Ziels, mit dem Einsatz von PAK auf ARA die Gewässer und somit die Umwelt zu schützen.

Bei der Ausschreibung von PAK ist es schwierig, soziale Kriterien zu integrieren. Der Grund ist, dass zwischen den sozialen Bedingungen bei der Herstellung und dem Produkt selbst kein hinreichender Bezug besteht, wie dies in den meisten Fällen des öffentlichen Beschaffungswesens der Fall ist [25]. Gemäss [26] kann jedoch beispielsweise die Einhaltung der Kernkonventionen der Internationalen Arbeitsorganisation (IAO) als Teilnehmbedingung formuliert werden.

Die Betreiber haben bisher in Abhängigkeit des PAK-Verbrauchs entweder pro Lieferung ausgeschrieben oder einen Liefervertrag über ein Jahr abgeschlossen [4]. Je nach Auftragsvolumen

ist die Vergabe einzelner Lieferungen nicht zulässig und sie müssen einen Jahres- oder Mehrjahresvertrag abschliessen. Um den Aufwand für die Ausschreibung möglichst gering zu halten, könnten sie in einem Jahresvertrag die Option auf Verlängerung vereinbaren.

BETRIEB – KONTROLLE DER GELIEFERTEN PAK

Sobald die Wahl für ein Produkt getroffen ist, liegt der Fokus der Betreiber auf der Qualitätssicherung einzelner Lieferungen.

BEOBACHTUNGEN VON ARA-BETREIBERN ZUR PAK-QUALITÄT

In Baden-Württemberg setzen zahlreiche ARA bereits seit mehreren Jahren PAK ein. Ihre Erfahrungen zeigen, dass eine Qualitätssicherung der einzelnen PAK-Lieferungen sinnvoll ist. Denn sie haben tatsächlich in einigen Fällen Anzeichen von schwankender PAK-Qualität festgestellt. Beispiele dafür sind erhöhter Wassergehalt, optische Unterschiede in der Farbe und variierende Reinigungsleistung. Es sind auch schon Lieferengpässe aufgetreten oder Liefermengen sind tiefer ausgefallen als vereinbart. In Einzelfällen ist es zu Schäden bei Dosieranlagen durch Störstoffe in der angelieferten PAK gekommen.

Auch die Befülldauer kann abhängig vom PAK-Produkt stark variieren. Teilweise sind Wartezeiten zwischen Einfüllen und Setzen der PAK im Silo nötig, damit die gewünschte Menge PAK in das Silo gebracht werden kann. Eine hohe Schüttdichte der PAK ist vorteilhaft, weil dies eine bessere Nutzung des vorliegenden Lagervolumens ermöglicht.

MÖGLICHKEITEN ZUR QUALITÄTSSICHERUNG

Aus der Befragung zu den Betriebserfahrungen mit PAK [4] ergaben sich folgende Empfehlungen:

Zur Überprüfung der PAK-Qualität sollte auf jeden Fall der Wassergehalt geprüft werden. Dabei muss die Bestimmung gemäss der Norm DIN EN 12902 bei 150 °C erfolgen und nicht bei 105 °C wie bei der TS-Bestimmung von belebtem Schlamm. Zusätzlich ist die Messung des Aschegehalts beziehungsweise Glührückstandes hilfreich, da sie einen Hinweis darauf gibt, ob es sich

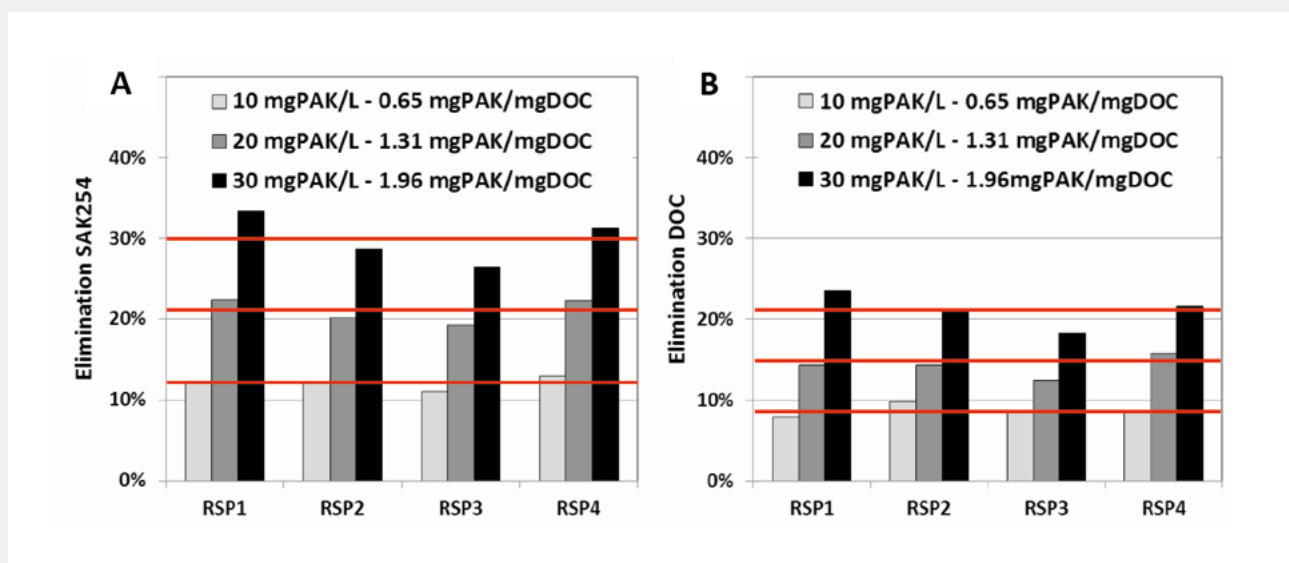


Fig. 9 Vergleich der Eliminationsleistung verschiedener Rückstellproben (RSP) von Lieferchargen eines PAK-Produktes der ARA Herisau. Die roten Striche zeigen das Mittel der Tests. Sowohl ΔSAK_{254} (A) als auch die DOC-Abnahme (B) sind erfreulicherweise bei allen Lieferungen in der gleichen Größenordnung. Die Abwassermatrix ist für alle Versuche vergleichbar. (Daten aus [13])

bei dem Produkt um eine Frischkohle (5–10%) oder ein Reaktiv ($< 15\%$) handelt. Für die Bestimmung gilt die Norm DIN EN 12902 [4, 9].

Als wichtigste Massnahme wird empfohlen, die Reinigungsleistung der tatsächlich gelieferten PAK im Vergleich zur Muster-PAK vom ursprünglichen Schüttelversuch anhand eines erneuten Versuchs zu überprüfen. Dieser Vergleich braucht Zeit und kann nicht vor Ablauf der PAK durchgeführt werden. Somit ist eine Rückgabe von Ware mit schlechter Qualität meist zu umständlich.

Einige Betreiber in Baden-Württemberg haben darum vertraglich Kompensationsmassnahmen vereinbart für den Fall, dass die garantierten Werte nicht eingehalten werden. Auf diese Weise können aus den Resultaten der Schüttelversuche Konsequenzen gezogen werden. Fairerweise werden auch speziell gute Leistungen der PAK honoriert [4].

Die Betreiber der ARA Herisau nahmen für jede Lieferung Rückstellproben und verglichen diese zusammen mit der Eawag im Rahmen eines Schüttelversuches. Im Beispiel in *Figur 9* ist die Qualität der einzelnen Lieferchargen sehr ähnlich und es gibt keine Ausreisser bezüglich der DOC-Reduktion bzw. des ΔSAK_{254} .

Für die Schüttelversuche braucht es eine repräsentative Mischprobe der neu angelieferten PAK. Gemäss [4] hat sich ein Abzweig ab Befüll-Leitung bewährt. Möglich wäre auch, das PAK-Muster mit einem Probestecher aus dem Silofahrzeug oder beim Hahn am Silofahrzeug zu entnehmen.

FAZIT

Mit PAK können MV zuverlässig entfernt werden. Für das Preis-Leistungs-Verhältnis eines Produkts ist entscheidend, wie viel PAK zur Erreichung des Reinigungseffekts für ein Abwasser nötig ist. Zudem können je nach ARA weitere Anforderungen wie Elimination von DOC oder Einzelsubstanzen eine Rolle spielen. Daher lohnt

sich ein Schüttelversuch mit dem jeweiligen Abwasser, um den geeigneten PAK-Typ zu ermitteln. Dieser gibt Aufschluss über die Eliminationsleistung und somit auch über die notwendige Dosiermenge, die tatsächlichen Betriebskosten und die Umweltauswirkungen. Schwierig wird die Auswahl, wenn die Abwasserzusammensetzung aufgrund von dominanten Einleitern stark schwankt.

Weitere mögliche Einflussgrössen für die Wahl der PAK sind der Preis, PAK-Rückhalt, Nachhaltigkeit, Referenzen, Lieferbedingungen und PAK-Handling. Bei Ausschreibungen sind diese Kriterien transparent und klar zu kommunizieren. Beobachtungen von ARA-Betreibern in Baden-Württemberg zeigen, dass die Qualität eines PAK-Produkts zwischen verschiedenen Lieferungen schwanken kann. Sie haben – unter anderem mit Unterstützung des KomS – Methoden zur einfachen und kostengünstigen Qualitätssicherung vor Ort entwickelt. In jedem Fall empfiehlt es sich, Rückstellproben der neuen Lieferungen zu ziehen, um die vertraglich vereinbarten Qualitätsparameter wie Wassergehalt oder Aschegehalt zu überprüfen und allenfalls die Eliminationsleistung zu messen. Dank funktionierender Netzwerke können Schweizer Betreiber auf diese Erfahrungen aufbauen.

AUSBLICK

Auch wenn bereits einsatzfähige Methoden für den betrieblichen Alltag im Umgang mit PAK zur Verfügung stehen, bleiben zahlreiche Fragen offen. Braucht es beispielsweise eine einheitlichere Beschreibung der Anforderungen an PAK, eventuell sogar eine Art Zertifizierung analog der Pflanzenkohle [27]? Welche Kriterien sind den ARA-Betreibern bei der Auswahl des PAK-Produkts wichtig? Wie viel ist den Entscheidungsträgern eine PAK aus erneuerbaren Rohstoffen wert? Oder zählt schlussendlich doch nur der Preis?

Diese und weitere Fragestellungen werden Bestandteil der Diskussionen zwischen ARA-Betreibern, Herstellern, Ingenieuren und der Forschung sein. Mit dem ersten Treffen der Erfahrungsaustausch-Gruppe «Aktivkohle» vom Juni 2018 ist der Grundstein für einen Betreiber-Ingenieur-Austausch in der Schweiz gelegt. Es sind jährliche Treffen geplant, wobei auch Raum für Fachvorträge von Herstellern besteht. Interessierte können sich bei der Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen» melden. Das Betreiber-Netzwerk soll für einen regen Wissensaustausch sorgen.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Dominguez, D.; Schärer, M.; Zimmermann-Steffens, S.; Bleny, H (2016): «Reduktion der Spurenstoffe in Gewässern», *Aqua & Gas* 1/16: 16–23
- [2] DWA-Arbeitsgruppe KA 8.6 (2016): «Aktivkohleinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung – Arbeitsbericht», *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, pp. 1062–1067
- [3] DWA-Arbeitsgruppe KA 8.6 (2019): «Aktivkohleinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffelimination – Verfahrensvarianten, Reinigungsleistung und betriebliche Aspekte», *DWA Themenband T1/19*
- [4] Rössler, A.; Meier, A. (2019): «Praxiserfahrungen zum Einkauf und zur Qualitätssicherung von Pulveraktivkohle bei der kommunalen Abwasserbehandlung», *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, im Druck
- [5] Benstöm, F. et al. (2016): «Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen – Ein Review halb- und grosstechnischer Untersuchungen – Teil 1: Veranlassung, Zielsetzung und Grundlagen», *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, Nr. 3
- [6] Zietzschmann, F. et al. (2014): «Estimating organic micro-pollutant removal potential of activated carbons using UV absorption and carbon characteristics», *Water Research* 56, pp. 48–55
- [7] Benstöm, F. (2017): «Granulierte Aktivkohle zur Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser – Dissertation», *Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen*
- [8] Hoffmann, G. et al. (2017): «Optimierter Einsatz von Pulveraktivkohle und Ultrafiltration als 4. Reinigungsstufe (UF/PAK 4.0)», in *Aachener Tagung Wassertechnologie* 24.–25.10.2017, Aachen
- [9] DVGW-Regelwerk Arbeitsblatt W239 (A) (2011): «Entfernung organischer Stoffe bei der Trinkwasseraufbereitung durch Adsorption an Aktivkohle», Bonn
- [10] Zwickelpflug, B. et al. (2010): «Einsatz von Pul-

DANKSAGUNG

Die Unterstützung durch das KomS und die Sondernachbarschaft-Treffen der Betreiber in Baden-Württemberg förderten den Wissensaustausch enorm und ermöglichten auch den ersten Schweizer Betreibern, sich über die aktuellen Kenntnisse zu informieren.

Die Autoren danken zudem folgenden Personen herzlich, die bei der Erstellung dieses Artikels mitgewirkt haben: Leitungsteam VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen», Bruno Bangerter (Betriebsleiter ARA Thunersee), Annette Rössler (KomS), Steffen Metzger (Weber-Ingenieure GmbH) und Bernd Kobler (GVRZ).

- veraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Schlussbericht», Eawag / www.micropoll.ch, Dübendorf
- [11] IUPAC International Union of Pure and Applied Chemistry, «<https://iupac.org>» [Online]
- [12] Altmann, J.; Massa, L.; Sperlich, A.; Gnirss, R. (2016): «UV254 absorbance as real-time monitoring and control parameter for micropollutant removal in advanced water treatment with powdered activated carbon», *Water Research*, pp. 240–245
- [13] Boehler, M. et al.: «Auswahl, Leistungsfähigkeit und Qualität verschiedener Pulveraktivkohlen (PAK) zur Elimination von Spurenstoffen aus kommunalem Abwasser», in Bearbeitung
- [14] VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen», Eawag: «Anleitung für Schüttelversuche mit Pulveraktivkohle – Elimination von Mikroverunreinigungen auf Kläranlagen», www.micropoll.ch/dokumente/faktenblätter, Dübendorf, in Bearbeitung
- [15] NRW, Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe: «Einsatz von Aktivkohle zur Wasser-/Abwasserbehandlung – Übersicht der Aktivkohlehersteller und Lieferanten sowie Anlagenbauer von Dosier-technik», <https://www.masterplan-wasser.nrw.de/downloads/broschuere-aktivkohle/>, Stand Mai 2018
- [16] Wunderlin, P. et al. (2017): «Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung von weitergehenden Verfahren zur Spurenstoffelimination», www.micropoll.ch, Dübendorf
- [17] Böhler, M.; Mc Ardell, C.S. (2018): «Pilotversuche zur erweiterten Abwasserbehandlung mit granulierter Aktivkohle (GAK) und kombiniert mit Teilozonung (O₃/GAK) auf der ARA Glarnerland. Erster Zwischenbericht.», Eawag, Dübendorf
- [18] Zietzschmann, F. et al. (2019): «Fast empirical lab method for performance projections of large-scale powdered activated carbon re-circulation plants», *Chemosphere*, Bd. 215, pp. 563–573
- [19] Wunderlin, P.; Meier, A.; Grelot, J. (2017): «Elimination von Mikroverunreinigungen auf ARA – Aktueller Stand der Verfahren und künftige Entwicklungen», *Aqua & Gas* 11/17: 60–70
- [20] Boehler, M. et al. (2012): «Removal of micropollutants in municipal wastewater treatment plants by powder-activated carbon», *Water Science and Technology*, Bd. 66, Nr. 10, pp. 2115–2121
- [21] Metzger, S. (2010): Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser. Dissertation TU Berlin, München: Oldenbourg Industrieverlag
- [22] Mutz, D.; Remy, C.; Miehe, U.; Sperlich, A. (2017): «Einfluss von Ozonung oder Aktivkohleadsorption zur weitergehenden Entfernung organischer Spurenstoffe auf den Energieaufwand und CO₂-Fussabdruck einer Kläranlage», *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, Bd. 4, pp. 310–318
- [23] Swiss Center for Life Cycle Inventories (2014): «Ecoinvent data v3.1, ecoinvent reports No. 1–26», www.ecoinvent.org, Dübendorf
- [24] Hagemann, N. et al. (2019): «Aktivkohle – Made in Switzerland!», *Aqua & Gas* 1/19: 32–38
- [25] <https://oeffentlichebeschaffung.kompass-nachhaltigkeit.ch/p>. Rahmenbedingungen/ausschreibung/zuschlagskriterien.
- [26] IGÖB – Interessengemeinschaft Ökologische Beschaffung (2014): «Öffentliche Beschaffung – Leitfaden für den Einbezug ökologischer, sozialer und ökonomischer Kriterien», IGÖB, Gerlafingen
- [27] European Biochar Foundation EBC Arbaz, Switzerland (2012): «European Biochar Certificate – Richtlinien für die nachhaltige Produktion von Pflanzenkohle», DOI: 10.13140/RG.2.1.4658.7043, Nr. <http://www.european-biochar.org/en/download>. Version 7.5

> SUITE DU RÉSUMÉ

C'est la raison pour laquelle l'évaluation du produit adéquat au moyen d'essais par vibration ou agitation peut être avantageuse pour la STEP. Ces tests de laboratoire donnent des indications sur la performance d'élimination et donc sur les doses nécessaires et les coûts d'exploitation réels. Des instructions pour la réalisation de ces tests sont disponibles sur www.micropoll.ch [14]. D'autres facteurs d'influence possibles concernant le choix du CAP sont le prix, la rétention du CAP, la durabilité, les références, les conditions de livraison et le maniement du CAP.

Le mode opératoire pour les tests par vibration ou agitation est également utile pour contrôler la qualité des différentes livraisons, car celle-ci peut varier, d'après les expériences d'exploitants du Bade-Wurtemberg. Dans tous les cas, il est recommandé de prélever des échantillons de réserve dans les nouvelles livraisons afin de contrôler les paramètres de qualité contractuels, tels que la teneur en eau ou en cendres, et de mesurer le cas échéant le taux d'épuration.

Ausstellung für Aktionstage

Spielend leicht die Umwelt schützen

Mit der Ausstellung «Wasser – alles klar!» den nächsten Aktions- oder Umwelttag bereichern:
www.pusch.ch/ausstellungen

PUSCH

PUSCH – PRAKTISCHER UMWELTSCHUTZ