Mikroschadstoffelimination mittels granulierter Aktivkohle im Ablauf der Kläranlage Gütersloh-Putzhagen

Andreas Nahrstedt, Anja Rohn (Mülheim an der Ruhr), Klaus Alt, Xin Wu (Düsseldorf), Frank Schlösser (Aachen) und Karl-Heinz Schröder (Gütersloh)

Zusammenfassung

Auf der Kläranlage Putzhagen der Stadt Gütersloh wurden großtechnische Untersuchungen zur Elimination von Spurenstoffen mittels granulierter Aktivkohle (GAK) als vierte Reinigungsstufe durchgeführt. Nachdem sich das Verfahren in einer ersten Projektphase von zwölf Monaten als ein effizientes und für den Praxisbetrieb geeignetes Eliminationsverfahren erwiesen hatte, wurde eine zweite Phase angeschlossen mit dem Ziel, durch verfahrenstechnische Optimierung eine hohe Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Zwei von insgesamt neun vorhandenen Flockungsfiltern wurden zu Großadsorbern mit granulierter Aktivkohle umgebaut. In Projektphase 2 wurde ein Adsorber mit frischer Aktivkohle gefüllt, der zweite mit dem gleichen Produkt, das zuvor bereits in Projektphase 1 im Einsatz war und nach Erschöpfung reaktiviert wurde. Im Parallelbetrieb konnte so die Auswirkung der Reaktivierung auf die Reinigungsleistung untersuchet werden. Nach einem weiteren 12-monatigen Betrieb ohne eine einzige Betriebsstörung erzielten die Großadsorber ein Filtratvolumen von 12 700 Bettvolumina. Selbst nach dieser langen Standzeit fand für eine Reihe an Spurenstoffen immer noch eine Elimination von zum Teil deutlich über 80 Prozent statt. Für alle Mikroverunreinigungen ergab das Reaktivat die gleiche Adsorptionsleistung wie die Frischkohle. Insbesondere für den Stoff Diclofenac wurden Bettvolumina ermittelt, die höher liegen als bei bisherigen Erfahrungen mit einer GAK-Anlage. Da die Reaktivierung der GAK mit keinerlei Leistungseinbußen verbunden war, kann durch die Verwendung von Reaktivat ein deutlicher Kostenvorteil im Vergleich zur Verwendung frischer GAK erzielt werden. Ein optimal gewählter zeitversetzter Betrieb von mehreren GAK-Filtern führt zu einer längeren Standzeit der Adsorber und somit zu einer weiteren Kostenreduzierung. Je nach Anzahl der Filter und den gewählten Grenzkriterien für die Reaktivierung der GAK liegen die Betriebskosten zwischen 0,031 und 0,043 €/m³ Abwasser.

Auch die der Adsorptionsstufe vorangestellte Flockungsfiltration hat zur Leistungssteigerung der GAK beigetragen, da die Spülzyklen für die GAK-Filter erheblich ausgedehnt werden konnten. Außerdem kann mit dieser Verfahrenskombination der geforderte Grenzwert für Phosphat von 0,7 mg/l im Kläranlagenablauf sicher eingehalten werden. Das Potenzial hinsichtlich einer sehr weitgehenden Phosphorelimination dürfte für Kläranlagenbetreiber auch vor dem Hintergrund der möglichen Verschärfung zukünftiger Phosphat-Anforderungen besonders interessant sein.

Schlagwörter: Abwasserreinigung, kommunal, Spurenstoff, Arzneimittel, Elimination, granulierte Aktivkohle, Ablauf, Wirtschaftlichkeit

DOI: 10.3242/kae2017.09.003

Abstract

Removal of Micropollutants by Means of Granulated Activated Carbon in the Discharge of the Gütersloh-Putzhagen Wastewater Treatment Plant

In the Putzhagen wastewater treatment plant of the town of Gütersloh, large-scale investigations have been carried out for the removal of micro-pollutants using granulated activated carbon (GAC) as fourth treatment stage. After the process had proven itself as being an efficient and suitable removal process for practical operation in a first project phase of twelve months, a second phase was mounted with the aim of achieving a high economic efficiency through process technical optimisation. Two from in total nine existing flocculation filters were converted into large adsorbers filled with granulated activated carbon. In Project Phase 2 one adsorber was filled with fresh activated carbon, the second with the same product as had already previously been employed in Project Phase 1 and which was reactivated after depletion. Thus, in parallel operation, the effect of the reactivation on the treatment performance could be investigated. Following a further 12 month operation without a single system malfunction the large adsorber achieved a filtration volume of 12 700 bed volume. Even after this long downtime a removal of over 80 percent still took place for a series of micropollutants. For all micropollutants the reactivity resulted in the same adsorption performance as for the fresh carbon. In particular, for the substance diclofenac bed volumes were determined which lay higher than with previous experiences using a GAC plant. As the reactivation of the GAC was involved with absolutely no losses of performance, through the use of reactivity a significant cost benefit in comparison with the employment of fresh GAC can be achieved. An optimally selected operation of several GAC filters led to a longer downtime of the adsorber and thus to a further cost reduction. Depending on the number of filters and the selected boundary criteria for the reactivation of the GAC the operating costs lie between 0.031 and 0.043 €/m³ wastewater. The flocculation filtration placed before the adsorption stage has also contributed to the increase in performance of the GAC, as the flushing cycle for the GAC filters can be extended considerably. In addition, using this process combination the required limiting values for 0.7 mg/l in the wastewater treatment plant outflow can be maintained securely. The potential with regard to the very extensive phosphorus removal should be of particular interest for operators of wastewater treatment plants also with the background of possible tightening of future phosphate requirements.

Key words: wastewater treatment, municipal, micro-pollutant, pharmaceutical products, removal, granulated activated carbon, discharge, economic efficiency

1 Hintergrund und Ziele

Die Studie auf der Kläranlage Putzhagen der Stadt Gütersloh reiht sich ein in eine wachsende Zahl von F&E-Vorhaben zur weitergehenden Abwasserreinigung, die im Rahmen des „Masterplan Wasser“ durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV) gefördert werden. Ziel ist, die Eignung, Leistung und Kosten verschiedener Aufbereitungsverfahren zur Elimination organischer Mikroverunreinigungen (Arzneistoffe, Pflanzenbehandlungsmittel, Substanzen aus Haushalt und Industrie) in der Praxis zu ermitteln. Mit der Entwicklung von Technologien zur Verminderung dieser Stoffe an punktförmigen Emissionsstellen mit maßgeblichen Stofffrachten sollen sowohl die aquatische Umwelt und in Folge auch die Rohwasserressourcen für die Trinkwassergewinnung – in diesem Fall die obere Ems – mit vertretbarem Aufwand entlastet werden.

Im Jahr 2012 wurde im Rahmen einer ersten vom damaligen MUNLV des Landes Nordrhein-Westfalen geförderten Projektphase auf der Kläranlage Putzhagen bereits die Spurenstoffadsorption an granulierter Aktivkohle im Festbett halb- und großtechnisch untersucht. Der Versuchsbetrieb von zwei großtechnischen Adsorbern, zu denen zwei Filterkammern der bestehenden Biofor-Flockungsfiltration umgerüstet wurden, war nach sechs Monaten nahezu ununterbrochenem Betrieb sehr erfolgreich, da sich die Festbettadsorption mit granulierter Aktivkohle als ein effizientes und für den Praxisbetrieb geeignetes, das heißt robustes Reinigungsverfahren erwiesen hatte.

Vor diesem Hintergrund hatte sich die Stadt Gütersloh dazu entschieden, eine zweite Projektphase anzuschließen, in der insbesondere die verfahrenstechnische Optimierung mit dem Ziel einer hohen Wirtschaftlichkeit untersucht werden sollte. Ein besonderer Fokus lag hierbei auf dem Vergleich der Adsorptionsleistung von reaktivierter gegenüber frischer Aktivkohle. Weiterhin sollte im Rahmen des zweiten Projekts auch herausgearbeitet werden, wie viele Adsorber mit granulierter Kohle für eine großtechnische Umsetzung der Spurenstoffelimination in den Aufbereitungsalltag mindestens erforderlich und wirtschaftlich sinnvoll sind.

2 Kurzbeschreibung der Kläranlage Gütersloh-Putzhagen

Die Kläranlage Putzhagen der Stadt Gütersloh liegt am westlichen Stadtrand, hat eine Ausbaugröße von 150 600 EW und eine Anschlussgröße von 145 000 EW. Die Kläranlage besteht aus folgenden Reinigungsstufen:

- zwei parallele Feinrechen (6 mm)
- zwei parallele Feinrechen (3 mm)
- zweistraßiger Sand- und Fettfang (V_{ges} = 600 m³)
- ein Vorklärbecken (V_{ges} = 2500 m³)

NORDIC WATER
Ihr kompetenter Partner in der Wasser- u. Abwasseraufbereitung
DYNASAND® Das Original
30.000 Filter weltweit
Ihr Spezialist für Sandfilter, Lamellenklärer, Scheibenfilter, Schlammräumer, mechanische Vorreinigung, Rechen, Sandbehandlung und Beckenausrüstung.
• Effizienter Einsatz von DynaSand-Filtern im Bereich der Spurenstoffelimination (nach Ozon, PAK oder mit GAK)
• Langjährige Erfahrung mit GAK in großtechnischen Anlagen wie z.B. auf der KA Emmingen-Liptingen und Rietberg
• Lieferant der Sandfilter und Aktivkohle-Filter in Weißenburg
• ideal kombinierbar mit P-Elimination, P ges < 0,1 mg/l möglich

Nordic Water GmbH · Hansemannstraße 41 · 41468 Neuss
Tel: 02131 3106-0 · contact@nordic-water.de · www.nordic-water.de

- ein Ausgleichsbecken (ehemals Vorklärbecken, V_{ges} = 2500 m³)
- vierstraßige vorgeschaltete Denitrifikation als Zweierkaskade
- Belebungsbecken: V_{ges} = 27 700 m³
- 16 Nachklärbecken (V_{ges} = 11 600 m³)
- Flockungsfiltration vom Typ Biofor mit Filtermaterial Lia-Perl (neun Filterzellen mit je knapp 42 m² Filterfläche, A_{ges} = ca. 370 m²).

Das so gereinigte Abwasser wird in den Vorfluter Dalke, einen Nebenfluss der Ems, eingeleitet. Die Flockungsfiltration (Dosierung des Fällmittels $FeCl_3$) dient im Wesentlichen der Ausfällung von Restkonzentrationen an Phosphor sowie einem weitergehenden Partikelrückhalt. Die Filter werden – wie bei dem Biofor-Prinzip üblich – von unten nach oben durchströmt. Während die Kläranlage Putzhagen für einen Volumenstrom von 3500 m³/h ausgelegt wurde, ist die Filterstufe auf 3600 m³/h dimensioniert. Die Jahresabwassermenge des Klärwerks beträgt im Mittel 5,93 Millionen m³/a.

Spurenstoff	arithm. Mittelw. [µg/L]	Median [µg/L]	Maximum [µg/L]	Minimum [µg/L]	Nachweisgrenze [µg/L]
Makrolide und Sulfonamide					
Chloramphenicol	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,050
Clarithromycin	0,179	0,125	0,500	0,060	0,010
Dehydrato-Erythromycin	0,068	<0,06	0,120	<0,06	0,060
Erythromycin	0,099	0,100	0,160	<0,06	0,060
N4-Sulfamethoxazol	0,058	0,060	0,070	<0,05	0,050
Roxithromycin	0,085	0,070	0,270	<0,02	0,020
Sulfadiazin	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Sulfadimidin	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Sulfamethoxazol	0,317	0,305	0,510	0,150	0,010
Trimethoprim	0,088	0,070	0,230	0,040	0,010
Betablocker					
Atenolol	0,085	0,075	0,140	0,050	0,010
Betaxolol	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Bisoprolol	0,223	0,210	0,340	<0,05	0,050
Metoprolol	0,445	0,180	1,400	<0,01	0,010
Pindolol	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Propanolol	0,033	0,030	0,100	<0,01	0,010
Sotalol	0,232	0,240	0,310	0,170	0,010
Analgetika / Antiphlogistika					
Acetylsalicylsäure	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,020
Dichlofenac	2,304	2,230	3,210	1,410	0,010
Fenoprofen	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Ibuprofen	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Indometacin	0,048	0,040	0,100	0,020	0,010
Ketoprofen	0,013	<0,01	0,030	<0,01	0,010
Naproxen	0,089	0,085	0,140	0,030	0,010
Phenacetin	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Phenazon	0,036	0,025	0,120	<0,01	0,010
Lipidsenker					
Bezafibrat	0,171	0,130	0,440	<0,01	0,010
Clofibrinsäure	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,020
Etofibrat	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,020
Fenofibrat	0,044	<0,04	0,090	<0,04	0,040
Gemfibrozil	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,020
Antiepileptika					
Carbamazepin	0,999	1,050	1,270	0,750	0,010
Durchblutungsfördernde Mittel					
Pentoxifyllin	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Psychopharmaka					
Oxazepam	0,171	0,170	0,220	0,140	0,050
Diazepam	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Röntgenkontrastmittel					
Amidotrizoesäure	1,493	1,260	3,300	0,600	0,010
Iohexol	1,319	1,450	2,370	<0,01	0,010
Iomeprol	17,079	15,500	35,780	8,200	0,010
Iopamidol	3,872	2,450	13,170	0,350	0,010
Iopromid	0,028	<0,01	0,100	<0,01	0,010
Iothalamicsäure	0,022	<0,01	0,090	<0,01	0,010
Ioxithalaminsäure	3,228	2,310	12,000	0,300	0,010
Ioxaglinsäure	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Chloramphenicol	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
TMDD	2,463	2,750	4,700	0,210	0,020
Benzotriazole					
1H-Benzotriazol	16,622	10,540	39,300	4,700	0,050
4-Methyl-1H-Benzotriazole	2,276	1,952	3,600	1,370	0,050
5-Methyl-1H-Benzotriazole	0,150	0,122	0,384	<0,002	0,002
Herbizide					
Terbutryn	0,029	0,030	0,050	<0,02	0,020

Tabelle 1: Spurenstoffkonzentrationen im Zulauf der Adsorber (N = 12) und ihre Nachweisgrenzen

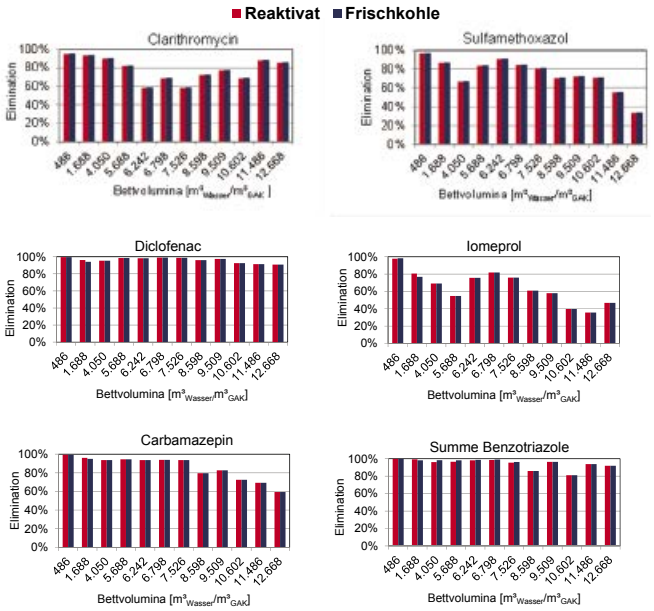


Abb. 1: Vergleich der Eliminationsleistung bereits in Projektphase 1 eingesetzter und danach reaktivierter Aktivkohle mit frischer Aktivkohle für ausgewählte Spurenstoffe

Die Zulaufwerte für den filtrierten CSB der Flockungsfiltration des Klärwerks schwanken zwischen 30 und 50 mg/l; die CSB-Ablaufwerte liegen zwischen 20 und 40 mg/l (CSB-Mittelwert bei ca. 31 mg/l). Die Zulaufwerte für Gesamtphosphor variieren zwischen 0,6 und 1,5 mg P_{ges}/l. Im Ablauf werden Werte zwischen 0,2 und 0,4 mg P_{ges}/l erreicht (Mittelwert ca. 0,35 mg P_{ges}/l). Hingegen wird erwartungsgemäß im Filter keine weitere Reduktion des Gesamtstickstoffs erzielt (Wertebereich von Zu- und Ablauf zwischen 4 und 16 mg N_{ges}/l). Die Trübungswerte im Zu- und Ablauf der Filtration liegen überwiegend zwischen 1 und 8 NTU, die Ablaufwerte der Adsorber zwischen 1und 3 NTU.

3 Aufbau und Verfahrensparameter der Aktivkohleadsorber

In der ersten Projektphase (2012) wurden zwei Filterkammern der bestehenden Flockungsfiltrationsstufe zu Aktivkohleadsorbern umgerüstet und mit zwei unterschiedlichen Aktivkohleprodukten befüllt. Diese wurden parallel betrieben und deren Eliminationsleistung in Bezug auf Spurenstoffe untersucht. Die Beschickung der Adsorber erfolgte mit dem Ablauf der Nachklärung ohne weitere Zusätze an Fäll- oder Flockungsmittel. Testreaktivierungen mit Proben der erschöpften Aktivkohlen aus Projektphase 1 und Isothermen mit diesen Reaktivaten konnten zeigen, dass die Kornaktivkohle (GAK) vom Typ Hydraffin AR 8×30 (Korngröße 0,63–2,36 mm) ein großes Potenzial besaß, einen wirtschaftlichen Betrieb von Festbettadsorbern zu eröffnen. Deshalb wurde dieses Produkt der Firma Donau Carbon GmbH aus Projektphase 1 reaktiviert, der dabei aufgetretene Verlust von

10 % des Volumens durch frisches Produkt ersetzt (sogenanntes Make-up) und für den großtechnischen Versuch in Projektphase 2 verwendet. Parallel zu diesem wurde eine zweite Filterzelle mit frischer Hydraffin AR befüllt, um die Unterschiede hinsichtlich ihrer Spurenstoffeliminationsleistung im unmittelbaren Vergleich herausarbeiten zu können. Aufgrund der Schlitzweite von 2,3 mm der in den Filterzellen vorgefundenen Luftpolsterdüsen wurden die 2,1 m hohen Schichten beider Aktivkohlen jeweils auf einer 0,5 m hohen Stützschicht aus grober GAK (Donau Carbon Epibon A 4×10, Korngröße 2,0–4,75 mm) gelagert. Hierzu wurde bewusst ebenfalls GAK verwendet, damit nach einem späteren Ausbau nur Aktivkohle und kein Fremdmaterial (Ausschlusskriterium) in den Reaktivierungsprozess gelangt.

Die Beschickung beider Adsorber erfolgte nicht wie in Projektphase 1 direkt mit Ablauf der Nachklärung, sondern mit Filtrat der Flockungsfiltration, um einerseits eine Beeinträchtigung des Adsorberbetriebs, insbesondere infolge eines erhöhten Austrags an abfiltrierbaren Stoffen aus der Nachklärung mit einer entsprechend hohen Spülfrequenz, zu vermeiden und andererseits für den gesamten Abfluss eine Reduzierung des gesamten Phosphors zu erzielen.

Beide Großadsorber wurden mit einer konstanten Filtergeschwindigkeit von 5 m/h betrieben, was einer Leerbettkontaktzeit von 33 Minuten entspricht. Die Rückspülung erfolgte zweimal wöchentlich.

4 Wasserchemisches Monitoring-Programm

Die Auswahl der für ein Monitoring der Adsorber zu analysierenden gelösten organischen Mikroverunreinigungen basiert auf einem umfassenden Screening des Kläranlagenablaufs und beinhaltet:

- aus dem medizinischen Bereich 43 Einzelsubstanzen der Stoffgruppen Antibiotika, Betablocker, Analgetika/Antiphlogistika, Lipidsenker, Antiepileptika, Psychopharmaka und Röntgenkontrastmittel
- aus der Gruppe der Industrie- und Haushaltchemikalien: Benzotriazol, Methylbenzotriazol und TMDD (2,4,7,9-Tetramethyl-5-decin-4,7-diol)
- das Herbizid Terbutryn.

Dafür wurden in regelmäßigen Abständen 72-h-Mischproben (zur Kompensation von Tagesganglinien) entnommen und entsprechend analysiert. Die Zulaufkonzentrationen der untersuchten Spurenstoffe wurden in Tabelle 1 mit Mittelwert, Median, Maximum, Minimum und Nachweisgrenze angegeben.

Neben ausgewählten Spurenstoffen wurden auch die täglich ermittelten Analysenparameter des Betriebslabors des Klärwerks Putzhagen ($CSB_{filt.}$, DOC, P_{ges}, Trübung) in die Untersuchungen des Betriebsverhaltens der Adsorber mit einbezogen. Ziel war zu bewerten, ob sich die DOC- und CSB-Beladung der Aktivkohle auf die Eliminationsleistung in Bezug auf Mikroverunreinigungen und somit auf die Laufzeiten bis zu einer Regeneration der Aktivkohle auswirkt.

5 Ergebnisse

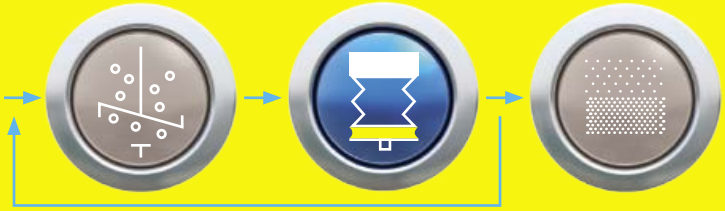
In Abbildung 1 wurde beispielhaft für sechs Spurenstoffe die Elimination in beiden Adsorbern jeweils nebeneinander in Ab-

Höhenvariable Einlaufbauwerke für Absetzbecken

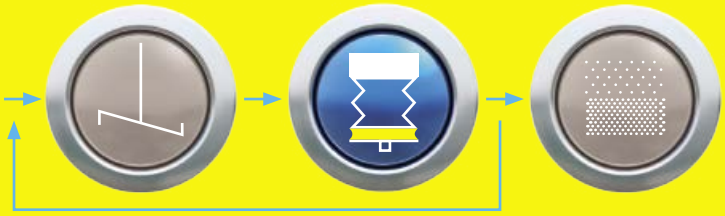
DIE LOGISCHE ERGÄNZUNG !

Feststoffarme Spurenstoffelimination durch hydrograv adapt

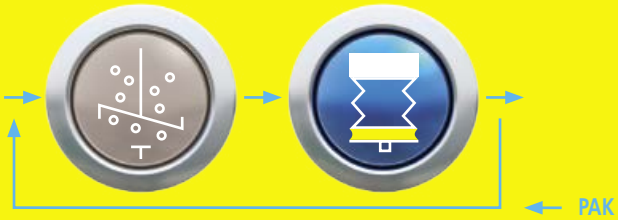
Dreifacher Vorteil: maximale hydraulische Kapazität, minimale Schlammverlagerung und minimale AFS.



GAK im nachgeschalteten Filter. Feststoffarme Spurenstoffelimination durch hydrograv adapt im Nachklärbecken.



Nachgeschaltete PAK-Adsorptionsstufe.
Minimale AFS im Ablauf des Sedimentationsbeckens: Minimierte Rückspülungen, stabiler Filterbetrieb.



PAK in der Rezirkulation zum Belebungsbecken.
hydrograv adapt sichert für den Ablauf der Nachklärung den maximalen Aktivkohle-Rückhalt.

hydrograv

hydraulik · gravitatives trennen

Infos unter: 0351 / 811 355-15
www.hydrograv.com

hängigkeit von den durchgesetzten Bettvolumina (BV oder auch Bed Volumes Treated, BVT) dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass mit der reaktivierten Aktivkohle über den gesamten Versuchszeitraum und den dabei durchgesetzten Bettvolumina hinweg für alle nach Tabelle 1 untersuchten Stoffe die gleichen Ergebnisse erzielt wurden wie mit der frischen Kohle. Dies ist ein unerwartet gutes Ergebnis, da die Iodzahl der Frischkohle (910 mg Iod/g, gemessen mittels DIN/ASTM-Verfahren) über der des Reaktivats (741 mg Iod/g) lag. Dies eröffnet die Möglichkeit einer Reduzierung der Betriebskosten für eine solche Verfahrensstufe von ca. 20 %, entsprechend dem Preisunterschied zwischen frischer und reaktivierter GAK inklusive Make-up.

Da beide Aktivkohlen ein nahezu identisches Eliminationsverhalten zeigen, werden nachfolgend die Daten für die frische Aktivkohle für beide Adsorber stellvertretend verwendet. Obwohl bereits nach relativ kurzer Standzeit der Adsorber eine nahezu vollständige CSB-Beladung der Aktivkohle erreicht ist (Abbildung 6), findet nach fast 13 000 BVT für die Spurenstoffe Atenolol, Bezafibrat, Bisoprolol, Diclofenac, Metoprolol, Naproxen, Oxazepam, Roxithromycin, die Summe der Benzotriazole und Trimethoprim noch eine Elimination von über 80 % statt (Abbildung 2). Vereinzelte Ausreißer bis auf die Nulllinie sind Folge von Sprüngen bei den Zulaufkonzentrationen bis an die Nachweisgrenze heran. Darüber hinaus werden die in Abbildung 3 dargestellten Stoffe rechnerisch noch zu mindestens 50 % reduziert, tatsächlich liegen aber bis auf Carbamazepin alle gezeigten Stoffe (Clarithromycin, Indometacin, Erythromycin und Terbutryn) mit ihren Konzentrationen in den Filtraten unterhalb ihrer Nachweisgrenzen. Der Verlauf des Eliminationsgrades von Carbamazepin ist dabei stark von der Zulaufkonzentration geprägt, die nach knapp 5700 BVT kontinuierlich abnimmt, sodass infolge die Elimination in beiden Adsorbern kontinuierlich bis auf 60 % sinkt. Eine weitgehende Erschöpfung der GAK war mit einer Restelimination von weniger als 50 % nach ca. 13 000 BVT für die Röntgenkontrastmittel Iohexol, Iopamidol, Iomeprol sowie für Sulfamethoxazol, TMDD und Terbutryn erreicht (Abbildung 4). Iopromid war hingegen auch bei den hohen durchgesetzten Bettvolumina in den Filtraten nicht nachweisbar. Leichte kurzzeitige Chromatographieeffekte mit einer Stoffverdrängung vom Aktivkohlekorn ins Filtrat traten bei Iopamidol und bei TMDD auch länger anhaltend in Abhängigkeit von schwankenden Zulaufkonzentrationen auf.

Insbesondere die Stoffe in Abbildung 3, aber teilweise auch in Abbildung 4 waren häufig bereits im Zulauf in nur geringen Konzentrationen vorhanden und im Ablauf der Adsorber nicht mehr nachweisbar. In diesem Fall geht die Konzentration im Ablauf mit der Hälfte der Nachweisgrenze in die Berechnung der Elimination ein. In Abbildung 5 wurden zur Verdeutlichung die Ablaufkonzentration der Adsorber für die betroffenen Stoffe dargestellt und die Nachweisgrenzen in Tabelle 1 angegeben. Möglicherweise wären für diese Stoffe bei einer niedrigeren Nachweisgrenze höhere Eliminationen nachweisbar.

Einige schlecht an Aktivkohle adsorbierbare Substanzen waren schon nach einer relativ geringen Anzahl durchgesetzter Bettvolumina nur noch unzureichend entfernt worden: Amidotrizoesäure, Iothalamicsäure. Beide Adsorber fangen für diese dann nur noch Konzentrationsspitzen im Zulauf ab und vergleichmäßigen die Ablaufkonzentration.

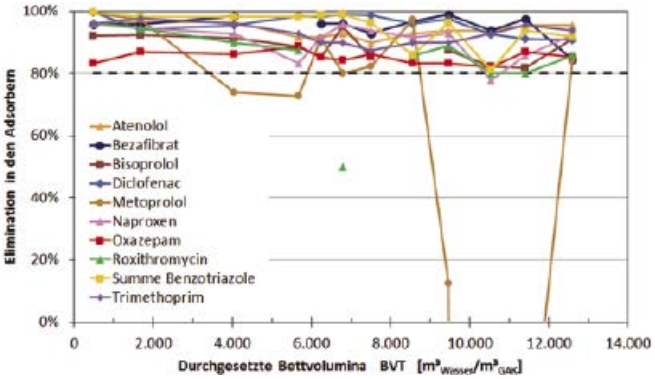


Abb. 2: Eliminationsverhalten für Spurenstoffe, die bis zum Ende des Versuchszeitraums (nach ca. 13 000 BVT) noch mindestens zu 80 % eliminiert werden

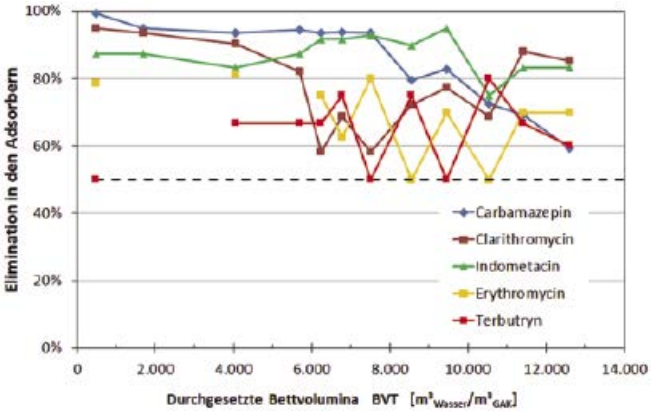


Abb. 3: Eliminationsverhalten für Spurenstoffe, die bis zum Ende des Versuchszeitraums (nach ca. 13 000 BVT) rechnerisch noch mindestens zu 50 % eliminiert werden, doch tatsächlich (bis auf Carbamazepin) in den Filtraten nicht mehr nachweisbar waren

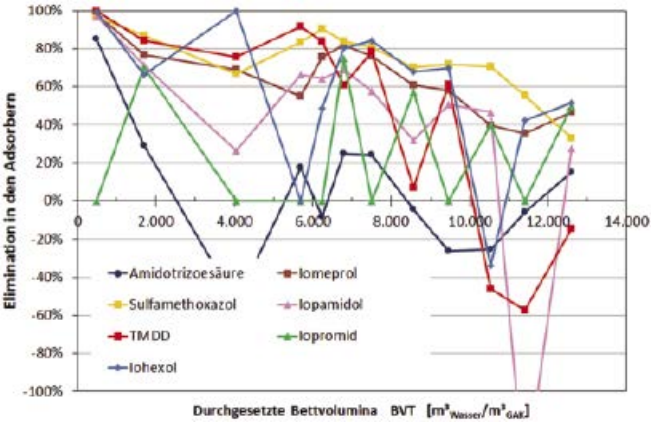


Abb. 4: Eliminationsverhalten für Spurenstoffe, deren Elimination am Ende des Versuchszeitraums (nach ca. 13 000 BVT) weniger als 50 % beträgt und die zum Teil wieder ins Filtrat freigesetzt werden

Die zwischenzeitlich erprobte Verdopplung der Leerbettkontaktzeit (EBCT), die zwischen 5000 und 7500 BVT in den Adsorbern durch eine Halbierung der Filtergeschwindigkeit auf 2,5 m/h erreicht wurde, brachte keine Vorteile in Bezug auf die Spurenstoffelimination.

In Abbildung 6 ist die auf den Zulauf normierte CSB-Ablaufkonzentrationen der Adsorber c/c_0 dargestellt. Es wird deutlich, dass ein CSB-Durchbruch von ca. 80 % in beiden Adsorbern bei

DURCHFLUSS MESSUNG

für Kanalisation

und Kläranlage

Herstellung: FLOW-TRONIC NV

Vertrieb und Service: GWU-Umwelttechnik GmbH

DURCHFLUSSMESSUNG

RADAR: RAVEN–EYE®
Referenz für Freispiegelabfluss

Hybrid Mess–System

Die modulare Messeinrichtung für komplexe Fließverhältnisse z.B. Rückstau oder Fließumkehr

Sensorik:
RAVEN–EYE plus

Doppler–Ultraschall–Sonde

oder
magnetisch–induktive Sonde

oder
Ultraschall–Laufzeit

und
Füllstandssonde
(4–20 mA)

ATEX Trennverstärker (optional)

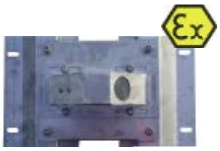
Signalwandlung und Datentechnik

Prozessleitsystem
Messumformer
Datenlogger
Anzeige
DFÜ (auch ohne Cloud) ...

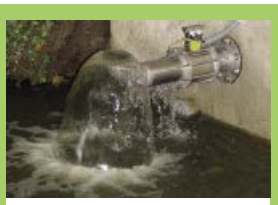
Teil– und Vollfüllung

mag.–induktive Sonde

Doppler–Ultraschall Sonde



Ultraschall Laufzeit



MID mit Einbauarmatur

Druckrohr

mag.–induktive Multipunktsonde

“klassisches” MID

Ultraschall Laufzeit

Oberfläche

mobiler Tracer Salzverdünnung

Entwicklung und Produktion
www.flow-tronic.com

FLOW-TRONIC

GWU-Umwelttechnik GmbH

Bonner Ring 9
50374 Erftstadt
Germany

Fon +49 . (0)22 35 . 9 55 22-0
Fax +49 . (0)22 35 . 9 55 22-99

info@gwu-group.de
www.gwu-group.de

09/17

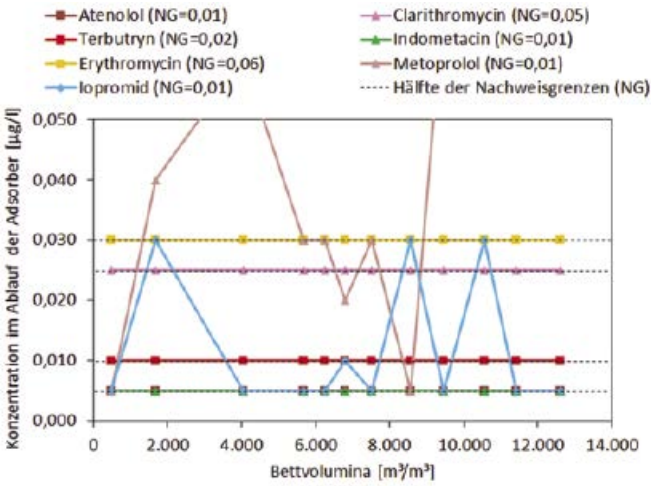


Abb. 5: Beschickung der Adsorber mit Spurenstoffen, deren Konzentration im Ablauf der Adsorber häufig oder ausschließlich unterhalb ihrer Nachweisgrenze lag

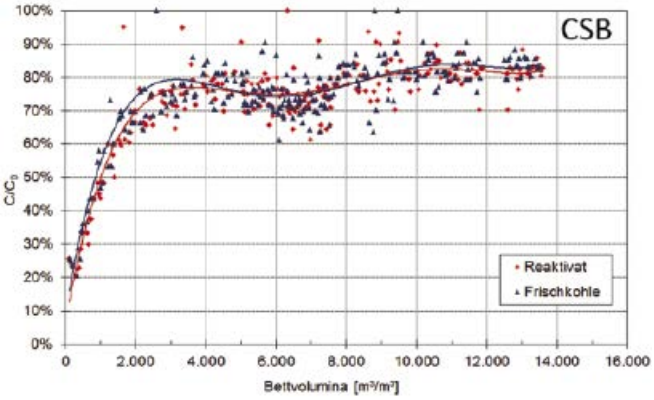


Abb. 6: Auf den Zulauf normierte CSB-Ablaufkonzentration der Adsorber in Abhängigkeit von den durchgesetzten Bettvolumina

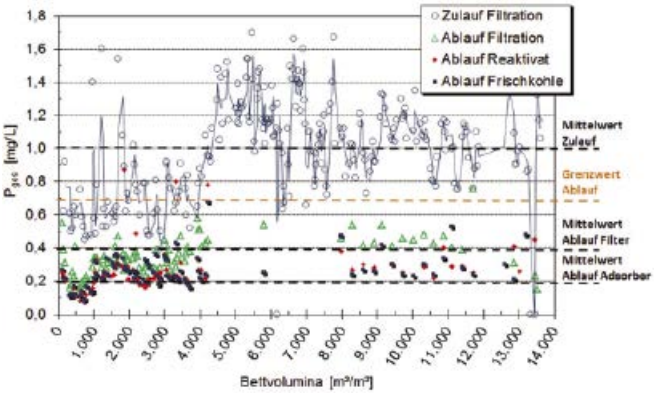


Abb. 7: Verlauf der P_{ges}-Konzentration im Zulauf und Ablauf der Flockungsfiltration sowie in den Abläufen der Adsorber mit Reaktivat und Frischkohle

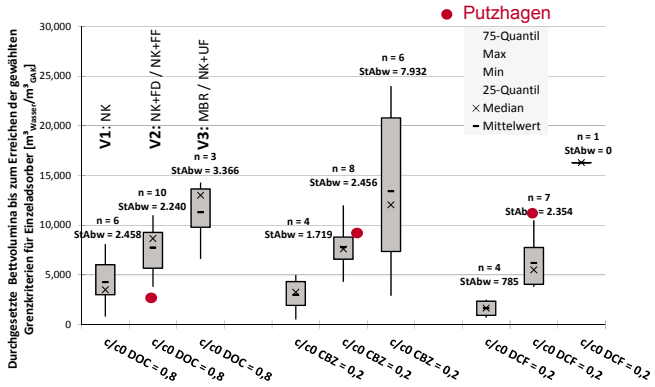


Abb. 8: Einfluss der Vorreinigung, des mittleren DOC_0 im Zulauf, der Kontaktzeit EBCT und des GAK-Korndurchmessers auf die erzielbaren Bettvolumina der Einzeladsorber für die Grenzkriterien DOC-Entfernung (c/c_0 = 0,8) sowie Carbamazepin- und Diclofenac-Entfernung (c/c_0 = 0,2) mit Zuordnung der Ergebnisse aus diesem Projekt (nach [1])

ca. 4000 Bettvolumina erreicht wird. Auch für die CSB-Elimination konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen frischer und reaktivierter Aktivkohle festgestellt werden.

Hinsichtlich des Parameters Phosphat (gemessen als Gesamt-Phosphor, P_{ges}, Abbildung 7) war die Eliminationsleistung der beiden Adsorber ebenfalls annähernd identisch. Die Flockungsfiltration senkt den Gesamt-Phosphor von im Mittel ca. 1,0 mg/ P_{ges} auf ein Niveau von etwa 0,4 mg/l. Hierbei treten aber im Filtrat einzelne Spitzen auf, die vereinzelt oberhalb des Grenzwerts für den Kläranlagenablauf von 0,7 mg/l liegen. In den Adsorbern findet in Bezug auf den Ablauf der Flockungsfiltration noch eine Halbierung der mittleren P_{ges}-Konzentration statt. Die Adsorber tragen somit dazu bei, den geforderten Grenzwert des Kläranlagenablaufes von 0,7 mg/l sicher einzuhalten. Während der gesamten Versuchszeit war die P_{ges}-Elimination infolge der Verfahrenskombination Filtration/Adsorption relativ gleichbleibend und lag im Mittel bei 80 %. Damit konnte im Vergleich zu Projektphase I eine Verbesserung erreicht werden, in der ohne die vorgeschaltete Filtration ein Anstieg der P_{ges}-Ablaufkonzentration in den Adsorbern gegen Ende der Adsorberstandzeit bis auf das Zulauf-Niveau (Ablauf Nachklärung) zu verzeichnen war.

Der Reinigungserfolg hinsichtlich des Parameters Phosphor in Putzhagen hat durchaus Vorbildcharakter für eine Vielzahl weiterer Anlagen in Nordrhein-Westfalen, da bisher nicht von einer relevanten Elimination des partikulären oder gelösten Phosphors ausgegangen wurde. Insbesondere die Möglichkeit, verfahrenstechnisch eine Adsorptionsstufe mit granulierter Aktivkohle hinter einer bestehenden Flockungsfiltration anzuordnen, zeigt das Potenzial hinsichtlich einer sehr weitgehenden Phosphorelimination und dürfte damit für Kläranlagenbetreiber vor dem Hintergrund der möglichen Verschärfung zukünftiger P-Anforderungen besonders interessant sein.

6 Bewertung der Ergebnisse im Vergleich

In [1] wurden Ergebnisse aus anderen Studien zur Spurenstoffelimination in Festbettadsorbern auf Kläranlagen ausgewertet und die Ergebnisse in Abbildung 8 zusammengefasst. Es wird der Einfluss der Vorreinigung und des mittleren DOC im Zulauf, der Kontaktzeit EBCT und des GAK-Korndurchmessers auf die erzielbaren Bettvolumina der Einzeladsorber für das Erreichen der Grenzkriterien DOC (c/c_0 = 0,8) sowie Carbamazepin und Diclofenac (c/c_0 = 0,2) dargestellt. Bei den Vorreinigungsprozessen handelt es sich um:

- V1: Nachklärung

- V2: Nachklärung + Festbettdenitrifikation oder Nachklärung + Flockungsfilter
- V3: Membranbioreaktor oder Nachklärung + Ultrafiltration

Die Ergebnisse in Putzhagen können somit mit den Ergebnissen der Vorbehandlungsvariante V2 verglichen werden (siehe rote Punkte in Abbildung 8). Die DOC-Elimination stellt in Putzhagen keinen Zielparameter für die Aktivkohleadsorption und somit kein Entscheidungskriterium für einen GAK-Austausch dar. Das DOC-Grenzkriterium $c/c_0 = 0{,}8$ wurde bei etwa 2000 BV erreicht, sodass die Eliminationsleistung für diesen Parameter niedriger als in den anderen zehn Studien liegt.

Dagegen liegt die Elimination von Carbamazepin im oberen Bereich im Vergleich zu den für diesen Parameter vorliegenden vier Studien (mit 9500 BVT bei Erreichen des Grenzkriteriums). In Bezug auf Diclofenac schneidet die Elimination in Putzhagen am besten ab, da hier das Grenzkriterium nach knapp 13 000 BVT noch nicht erreicht war. Die EBCT lag mit 33 Minuten in Putzhagen unter dem Durchschnitt der anderen Studien, der mittlere DOC des Adsorberzulaufs mit 11 mg/l und die mittlere Korngröße der GAK mit 1,5 mm im vergleichbaren Bereich.

Für die zwei ausgewählten Spurenstoffe Carbamazepin und Diclofenac, denen in vielen Projekten zur weitergehenden Abwasserreinigung eine Leitparameterfunktion zugesprochen wird, wurden Messdaten normierter Ablaufkonzentrationen (c/c_0) von Adsorbern aus den anderen Studien jeweils in ein Diagramm eingetragen, und zwar in Abhängigkeit von den durchgesetzten Bettvolumina (Abbildungen 9 und 10). Die Kurven der normierten Ablaufkonzentrationen für die Adsorber des Klärwerks Putzhagen liegen bei beiden Spurenstoffen jeweils im unteren Bereich des Gesamtfeldes aller Anlagen. In diesem Vergleichskontext zeigt Putzhagen, gemessen an beiden Leitparametern Carbamazepin und Diclofenac, bei gleicher normierter Ablaufkonzentration überwiegend höhere Bettvolumina als die gegenübergestellten vier weiteren Studien. Die Ergebnisse der Projektphase 1 sind ebenfalls enthalten, können aber nur eingeschränkt bewertet werden, da die Untersuchungsphase nach 6000 Bettvolumina beendet wurde. Die teilweise deutlich höheren Leerbettkontaktzeiten (EBCT) in den Studien „Harsewinkel“ und „Oberer Lutter“ brachten keinen Vorteil in Bezug auf Diclofenac. Lediglich die 75 min im Projekt „Obere Lutter“ könnten die etwas höheren Bettvolumina im Hinblick auf Carbamazepin bei deutlich höheren CSB- und DOC-Konzentrationen erklären.

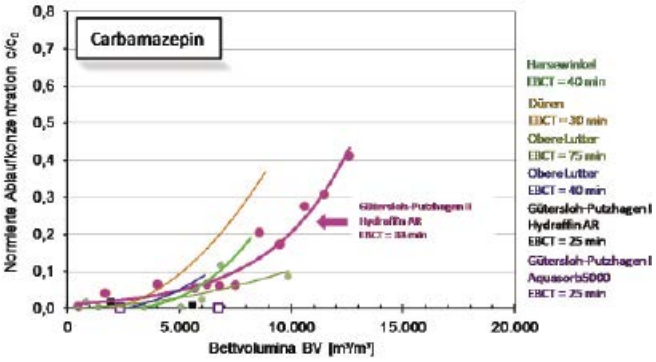


Abb. 9: Auf den Zulauf normierte Filtratkonzentration c/c_0 für Carbamazepin in Abhängigkeit von den BVT von Festbettadsorptionsverfahren anderer Anlagen im Vergleich zu denjenigen auf dem Klärwerk Putzhagen

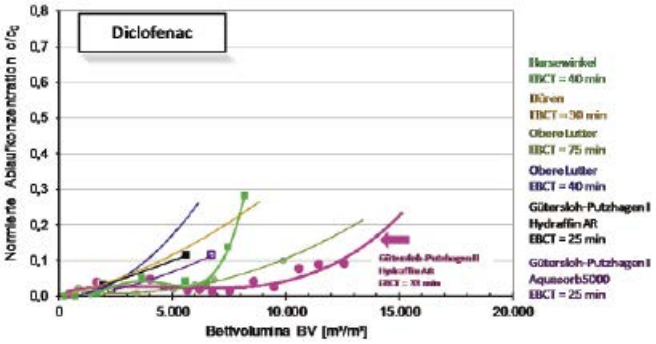


Abb. 10: Auf den Zulauf normierte Filtratkonzentration c/c_0 für Diclofenac in Abhängigkeit von den BVT von Festbettadsorptionsverfahren anderer Anlagen im Vergleich zu denjenigen auf dem Klärwerk Putzhagen

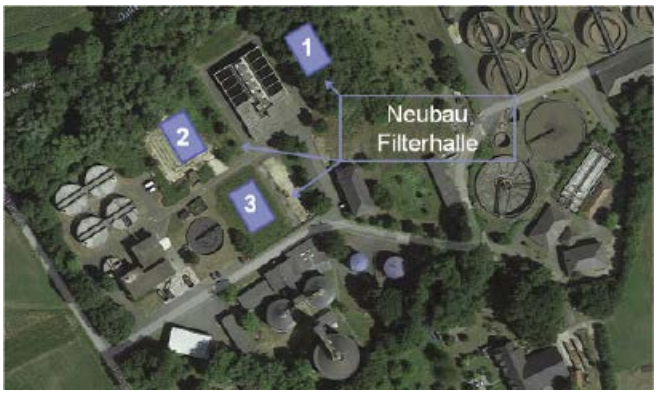


Abb. 11: Mögliche Standorte für den Neubau der GAK-Filterhalle

7 Wirtschaftlichkeit

Aufgrund der sehr positiven Ergebnisse im Hinblick auf die bei hohen BVT noch vorliegende Eliminationsleistung gegenüber Spurenstoffen und des betreuungsarmen und absolut störungsfreien Betriebsverhaltens im gesamten Untersuchungszeitraumes ist die Aktivkohleadsorption im Festbett praxistauglich für den Alltagsbetrieb der Kläranlage Putzhagen. Es wird empfohlen, die zukünftige Verfahrensstufe für die Behandlung des mittleren Trockenwetterabflusses auszulegen und mehrere Adsorber parallel zu betreiben und zeitversetzt in Betrieb zu nehmen. Erste Berechnungen ergeben eine erforderliche Filterfläche, die durch Umnutzung von drei Filterzellen der vorhandenen Flockungsfiltration oder Neubau von zehn Adsorbern à D = 4,15 m realisiert werden kann. Die möglichen Standorte für eine neue GAK-Halle mit zehn Adsorbern auf dem Gelände der Kläranlage Putzhagen werden in Abbildung 11 dargestellt.

Die Betriebskosten wurden mittels der Faktoren Personalkosten (Betreuung, Wartung, Logistik GAK-Tausch), Energiekosten (Filtrationsbetrieb, Spülluft, Spülwasser, EMSR) sowie Kosten für Transport und Reaktivierung der GAK (inklusive Make-up GAK) für drei Verfahrensvarianten berechnet:

- Fall 1: drei Filter, Filterfläche = 3 × 42 m², Höhe des GAK-Bettes = 2,75 m, gleichzeitige Inbetriebnahme und Beschickung

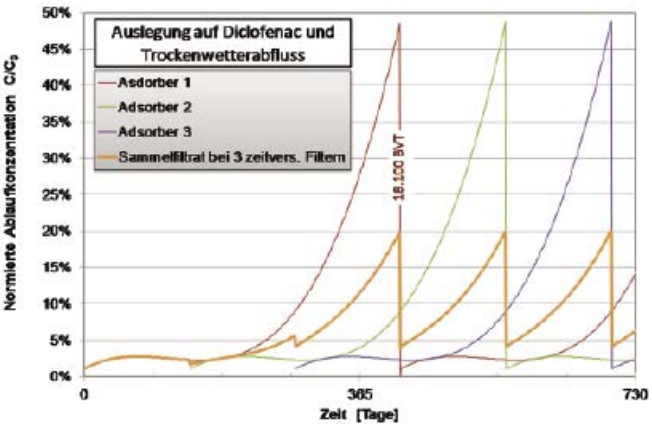


Abb. 12: Auf den Zulauf normierte Filtratkonzentration c/c_0 für Diclofenac in einzelnen von drei zeitversetzt betriebenen Adsorbern und in ihrem Sammelfiltrat (homogene Beschickung mit Trockenwetterabfluss von 15 000 m³/Tag)

Spurenstoff	BVT bis zum Erreichen des Grenzkriteriums c/c_0 = 20 %		
	Fall 1	Fall 2	Fall 3
Carbamazepin	9500	12 600	14 200
Diclofenac	14 600	18 100	20 000

Tabelle 2: BVT bis zum Erreichen des Grenzkriteriums $c/c_0 \leq 0{,}2$ für zwei Spurenstoffe im Sammelfiltrat und die verschiedenen Auslegungs-/Betriebsvarianten

- Fall 2: drei Filter, Filterfläche = 3 × 42 m², Höhe des GAK-Bettes = 2,75 m, zeitlich versetzte Inbetriebnahme und Beschickung (Abbildung 11)
- Fall 3: zehn Filter, Filterfläche = 10 × 12,6 m², Höhe des GAK-Bettes = 3,0 m, zeitlich versetzte Inbetriebnahme und Beschickung.

Für die Bemessung des GAK-Betts der Filter wurde eine mittlere Leerbettkontaktzeit von 33 min zugrunde gelegt. Der mittlere Trockenwetterabfluss der Kläranlage Putzhagen liegt bei etwa 15 000 m³/Tag.

Anhand der Kurven der normierten Ablaufkonzentrationen in Abbildung 10, die für jeden einzelnen Adsorber in Abhängigkeit von seinen BVT angesetzt werden, kann per Mischungsrechnung die Ablaufkonzentration eines Sammelfiltrats ermittelt werden. Als Grenzkriterium für das Sammelfiltrat wurde eine Carbamazepin- sowie eine Diclofenac-Entfernung von $c/c_0 \leq 0{,}2$ vorgegeben. Durch einen optimal gewählten zeitversetzten Betrieb der Adsorber hält das Sammelfiltrat das Grenzkriterium ein, während der Adsorber mit den jeweils höchsten BVT auch ein deutlich höher belastetes Einzelfiltrat aufweisen kann. In Abbildung 12 wurde der Verlauf der c/c_0-Werte für Diclofenac in den Einzelfiltraten und im Sammelfiltrat für eine Variante mit drei Adsorbern dargestellt. Das eröffnet die Möglichkeit, die einzelnen Aktivkohleschüttungen höher zu beladen, längere Standzeiten bis zu einem Reaktivierungsbedarf zu erzielen und somit die spezifischen bzw. jährlichen Betriebskosten zu senken. Die Rechenergebnisse für die erreichbaren BVT bis zum Erreichen des Grenzkriteriums für die drei genannten Verfahrensvarianten und die beiden Spurenstoffe sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Aus den berechneten BVT ergeben sich die in Abbildung 13 dargestellten spezifischen Betriebskosten, die je nach Betriebsart und Bezugsstoff zwischen 0,031 und 0,054 € /m³ Abwasser liegen. Eine zeitversetzte Inbetriebnahme der Adsorber führt zu deutlichen Betriebskosteneinsparungen, weil sich dadurch die Standzeiten der Aktivkohle im Vergleich zu einer gleichzeitigen Inbetriebnahme erheblich verlängern. Ob drei oder zehn Filter mit dem gleichen Gesamtvolumen an GAK gewählt werden, wirkt sich kaum noch auf die die Betriebskosten aus. Die höhere Anzahl kann aber Vorteile während der Außerbetriebnahme einzelner Filter für die Spülung oder für die GAK-Reaktivierung bieten.

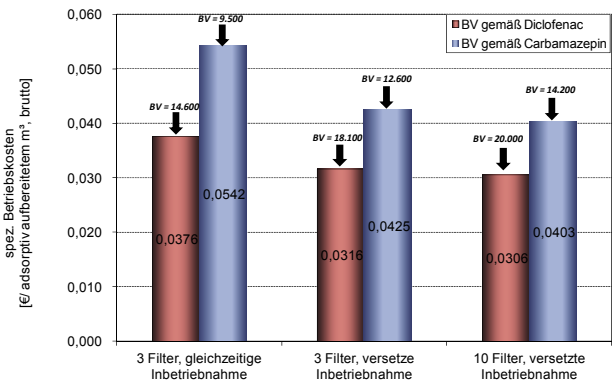
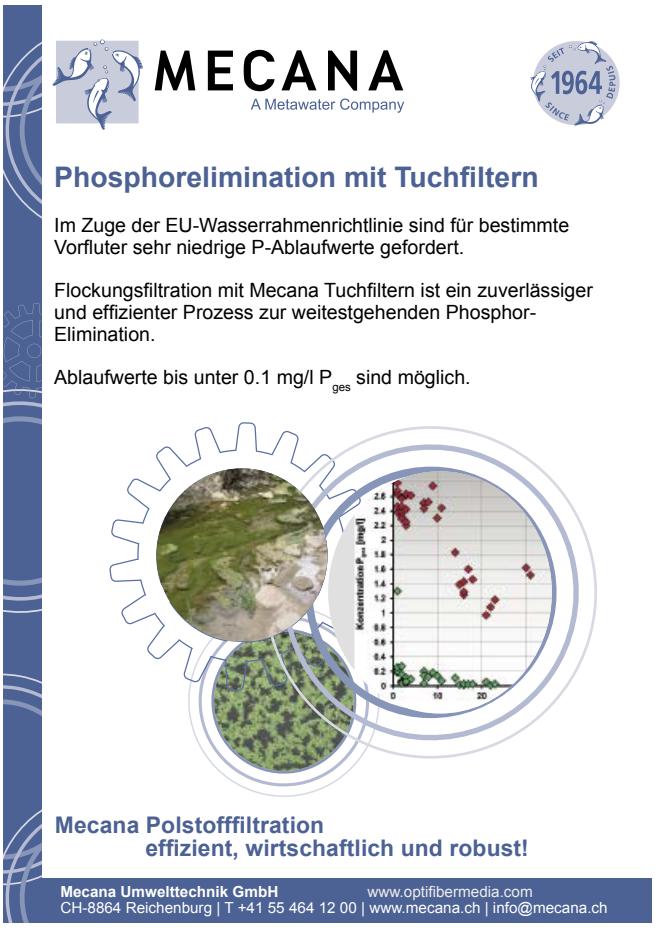


Abb. 13: Spezifische Betriebskosten bei Auslegung nach Grenzkriterium (c/c_0 = 20 %) für Diclofenac oder Carbamazepin für die drei unterschiedlichen Auslegungs-/Betriebsvarianten

Eine solche Verfahrensstufe wäre auf dem bestehenden Betriebsgelände der Kläranlage Putzhagen als separate Halle re-



Kostenart	Einheit	Diclofenac		Carbamazepin	
		drei Filter, versetzt	zehn Filter, versetzt	drei Filter, versetzt	zehn Filter, versetzt
spezifische Betriebskosten	Ct/m³	3,16	3,06	4,25	4,03
jährliche Betriebskosten	€/a	161 679	156 171	217 368	206 030

Tabelle 3: Jährliche und spezifische Betriebskosten bei zeitversetzter Inbetriebnahme von drei oder zehn Adsorbern und Auslegung nach Grenzkriterium (c/c_0 = 20 %) Diclofenac oder Carbamazepin

alisierbar (Abbildung 11). Bei drei zeitversetzt betriebenen Adsorbern (gemäß Fall 2) ergeben sich jährliche Betriebskosten von 161 679 € (mit den BVT gemäß Berechnungen für Diclofenac) bzw. 217 368 € (BVT gemäß Carbamazepin). Auf die behandelte Abwassermenge bezogen, liegen die spezifischen Betriebskosten bei 3,16 bzw. 4,25 €-Cent/m³ und damit durchaus in der gleichen Größenordnung wie auf den anderen Kläranlagen mit einer GAK-Adsorptionsstufe zur Spurenstoffelimination [2–4]. Im Vergleich zu den Verfahren mit PAK und Ozonung liegen die Jahreskosten ebenfalls in einem sehr konkurrenzfähigen Bereich. In Tabelle 3 wurden die jährlichen und spezifischen Betriebskosten für die zeitversetzte Inbetriebnahme von drei und zehn Adsorbern sowohl für die Auslegung nach Diclofenac als auch nach Carbamazepin zusammengefasst.

8 Empfehlungen und Ausblick

Die Umrüstung weiterer Filterkammern der bestehenden Flockungsfiltrationsstufe zu Adsorbern erscheint nicht sinnvoll. Insbesondere der Vergleich mit den Erfahrungen aus Projektphase 1 hat gezeigt, dass zumindest temporär ein erhöhter Abtrieb an AFS aus der Nachklärung auftritt (an der Nachklärung vorgenommene Optimierungsmaßnahmen haben nur wenig Abhilfe erbracht) und zudem Fällmittel zur Verringerung des Gesamtphosphats dosiert werden muss. Beides unterstreicht den Bedarf an einer auch hydraulisch leistungsstarken Flockungsfiltration.

Für die Kläranlage Gütersloh Putzhagen wird daher der Neubau einer Adsorptionsstufe, bestehend aus zehn GAK-Filtern in Druckkesselbauweise, die der Flockungsfiltration nachgeschaltet im Abstrom betrieben werden, empfohlen. Die Adsorber sollten mindestens mit einer Leerbett-Kontaktzeit (ECBT) von 30 min betrieben werden, da Erfahrungen auch aus anderen Studien gezeigt haben, dass deutlich kürzere Zeiten zu schlechteren Ergebnissen in Bezug auf die Spurenstoffelimination führen können, längere hingegen zu keiner weiteren Verbesserung beitragen.

Für die Festlegung eines Reaktivierungsintervalles der Aktivkohle sollten Leitparameter sinnvoll ausgewählt werden, für die das Grenzkriterium c/c_0 = 0,2 weitestgehend einzuhalten ist. In der Schweiz wurden von einer Expertenrunde zwölf Mikroverunreinigungen vorgeschlagen, anhand derer die Reinigungsleistung von Abwasserbehandlungsverfahren überprüft werden sollte [5]. Entscheidungskriterien dabei waren: Verbreitung in der Schweiz, Messbarkeit, ungenügender Abbau in der biologischen Reinigungsstufe, repräsentativ für die Gesamtfracht an organischen Spurenstoffen aus kommunalen Kläranlagen. Dieser Stoffauswahl lag eine Liste mit rund 400 potenziell abwasserrelevanten Substanzen zugrunde. Die ausgewählten Leitsubstanzen stehen stellvertretend für zahlreiche Chemikalien mit ähnlichen chemischen Eigenschaften und Eintragspfaden. In Tabelle 4 wurden diese Substanzen zusammengefasst und diejenigen entsprechend gekennzeichnet, die für die Kläranlage Gütersloh-Putzhagen relevant sind. Somit ergeben sich fünf Substanzen, die sich als Leitparameter für die Leistungsfähigkeit einer GAK-Stufe in Putzhagen sehr gut eignen würden: Carbamazepin, Clarithromycin, Diclofenac, Metoprolol und Benzotriazol. Das schnellste Durchbruchsverhalten zeigt Carbamazepin, sodass bei den oben beschriebenen Auslegungskriterien die anderen vier Substanzen mit abgedeckt sind.

Substanzen	Stoffgruppe	Relevanz für die Kläranlage Gütersloh-Putzhagen
Amisulprid	Arzneimittel – Psychopharmakum	×
Carbamazepin	Arzneimittel – Antiepileptikum	×
Citalopram	Arzneimittel – Antidepressivum	
Clarithromycin	Arzneimittel – Antibiotikum	×
Diclofenac	Arzneimittel – Analgetikum	×
Hydrochlorothiazid	Arzneimittel – Diuretikum	
Metoprolol	Arzneimittel – Betablocker	×
Venlafaxin	Arzneimittel – Antidepressivum	
Benzotriazol	Korrosions-schutzmittel	×
Candesartan	Arzneimittel – Antihypertonikum	
Irbesartan	Arzneimittel – Antihypertonikum	
Mecoprop	Biozid/Pflanzen-schutzmittel	

Tabelle 4: Vorschlag für ausgewählte Leitsubstanzen zur Überprüfung des Reinigungseffekts einer 4. Reinigungsstufe auf Kläranlagen in der Schweiz und deren Relevanz für die Kläranlage Gütersloh-Putzhagen

Literatur

[1] Benstöm, F., Nahrstedt, A., Böhler, M., Knopp, G., Montag, D., Siegrist, H., Pinnekamp, J.: Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen – Ein Überblick über halb- und großtechnische Unter-

suchungen – Teil 2: Methoden, Ergebnisse und Ausblick, *Korrespondenz Abwasser Abfall* 2016, *63* (4), 276–289

[2] Alt, K., Bruhn, G. (2016): Fünf Jahre erfolgreicher Betrieb der GAK-Anlage in Obere Lutter, *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, in Vorbereitung

[3] Bornemann, C., Alt, K., Böhm, F., Hachenberg, M., Kolisch, G., Nahrstedt, A., Taudien, Y.: *Technische Erprobung des Aktivkohleeinsatzes zur Elimination von Spurenstoffen in Verbindung mit vorhandenen Filteranlagen „Filter AK+“*, Az. 54.7.10.06-5271/12, Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2015

[4] Kolisch, G., Taudien, Y., Bornemann, C., Hachenberg, M., Alt, K., Böhm, F., Nahrstedt, A.: Technische Erprobung des Aktivkohleeinsatzes zur Elimination von Spurenstoffen in Verbindung mit vorhandenen Filteranlagen – Filter AK+, Teil 1: Ergebnisse, *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2016, *64* (4), 303–309
Taudien, Y., Kolisch, G., Böhm, F., Alt, K.: Technische Erprobung des Aktivkohleeinsatzes zur Elimination von Spurenstoffen in Verbindung mit vorhandenen Filteranlagen – Filter AK+, Teil 2: Kostenvergleich, *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2016, *64* (5), 405–411

[5] Götz, C., Otto, J., Singer, H.: Überprüfung des Reinigungseffekts. Auswahl geeigneter organischer Spurenstoffe, *Aqua & Gas* 2015, *95* (2), 34

Autoren

Dr.-Ing. Andreas Nahrstedt, Dipl.-Ing. Anja Rohn
IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH
Moritzstraße 26, 45476 Mülheim an der Ruhr

E-Mail: a.nahrstedt@iww-online.de

Dipl.-Ing. Klaus Alt, Dr.-Ing. Xin Wu
Hydro-Ingenieure Planungsgesellschaft für Siedlungswasserwirtschaft mbH
Stockkampstraße 10, 40477 Düsseldorf

E-Mail: klaus.alt@hydro-ingenieure.de

Dipl.-Ing. Frank Schlösser
ATEMIS GmbH
Dennewartstraße 25–27, 52068 Aachen

E-Mail: schloesser@atemis.net

Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schröder
Stadt Gütersloh – FB Tiefbau
Berliner Straße 70, 33330 Gütersloh

E-Mail: karl-heinz.schroeder@ka-putzhagen.de