

Mikroschadstoffelimination mittels granulierter Aktivkohle im Ablauf der Kläranlage Gütersloh-Putzhagen

Kurzbericht

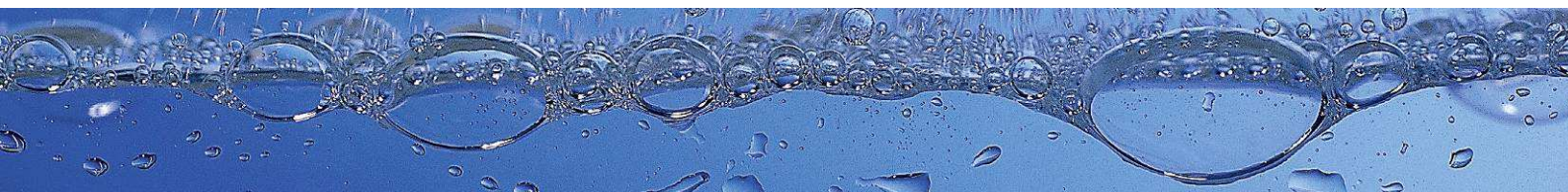
Förderkennziffer M-03/12 Gt

Mai 2016

Stadt Gütersloh

gefördert durch das:

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen



Bearbeitung

IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser

Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH

Moritzstraße 26

45476 Mülheim an der Ruhr

www.iww-online.de

Dr.-Ing. Andreas Nahrstedt

Dipl.-Ing. Anja Rohn

Hydro-Ingenieure Planungsgesellschaft für Siedlungswasserwirtschaft mbH

Stockkampstraße 10

40477 Düsseldorf

www.hydro-ingenieure.de

Herr Geschäftsführer Dipl.-Ing. Klaus Alt

Frau Dr. Xin Wu

ATEMIS GmbH

Dennewartstraße 25-27

52068 Aachen

www.atemis.net

Herr Dipl.-Ing. Frank Schlösser

Herr Dipl.-Ing. Michael Merten

Donau Carbon GmbH & Co. KG

Gwinnerstrasse 27-33

60388 Frankfurt

<http://www.donau-carbon.com/>

Herr Dipl.-Ing. Marco Müller

Herr Dr.-Ing. Ralf Giskow

Bezirksregierung Detmold

Leopoldstr. 15

32756 Detmold

www.bezreg-detmold.nrw.de

Herrn Regierungsbauoberamtsrat Thomas Sürder

Geschäftsführung:
Dr.-Ing. Wolf Merkel, Lothar Schüller

Wissenschaftliches Direktorium
Prof. Dr. Torsten C. Schmidt (Sprecher), Prof. Dr. Rainer Meckenstock,
Prof. Dr. Stefan Panglisch, Prof. Dr. Andreas Hoffjan, Prof. Dr. Christoph Schüth



Amtsgericht Duisburg HRB Nr. 14699
Sparkasse Mülheim an der Ruhr IBAN DE73 3625 0000 0300 0930 19
SWIFT BIC SPMHDE3E
Commerzbank AG Mülheim an der Ruhr IBAN DE30 3624 0045 0762 6310 00
SWIFT BIC COBADEFFXXX
Internet: www.iww-online.de

Projektleitung

Stadt Gütersloh

Kläranlage Putzhagen

Putzhagen 65

33334 Gütersloh

www.guetersloh.de

Herr Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schröder

Herr Reinhard Schweinforth

FB Tiefbau

Berlinerstraße 70

33330 Gütersloh

Herr Ulrich Lichtenberg

Herr Oliver Würth

Bearbeitungszeitraum: März 2012 bis Juni 2016

Zur besseren Lesbarkeit wird nicht zwischen weiblichen und männlichen Berufsbezeichnungen unterschieden; es sind immer beide Geschlechter gleichberechtigt angesprochen.

Geschäftsführung:
Dr.-Ing. Wolf Merkel, Lothar Schüller

Wissenschaftliches Direktorium
Prof. Dr. Torsten C. Schmidt (Sprecher), Prof. Dr. Rainer Meckenstock,
Prof. Dr. Stefan Panglisch, Prof. Dr. Andreas Hoffman, Prof. Dr. Christoph Schüth



Amtsgericht Duisburg HRB Nr. 14699
Sparkasse Mülheim an der Ruhr IBAN DE73 3625 0000 0300 0930 19
SWIFT BIC SPMHDE3E
Commerzbank AG Mülheim an der Ruhr IBAN DE30 3624 0045 0762 6310 00
SWIFT BIC COBADEFFXXX
Internet: www.iww-online.de

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 12 Monaten als ein effizientes und für den Praxisbetrieb geeignetes Eliminationsverfahren erwiesen hat, wurde eine zweite Phase angeschlossen mit dem Ziel, durch verfahrenstechnische Optimierung eine hohe Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Zwei von insgesamt neun vorhandenen Flockungsfiltren 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 untersucht werden. Nach einem weiteren 12-monatigen Betrieb ohne eine einzige Betriebsstörung erzielten die Großadsorber ein Filtratvolumen von 12.700 Bettvolumina (BVT). Selbst nach dieser langen Standzeit fand für eine Reihe an Spurenstoffen immer noch eine Elimination von über 80 % 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.

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund und Ziele	1
2	Das Klärwerk Gütersloh-Putzhagen	2
3	Versuchsaufbau und wasserchemisches Monitoring-Programm	3
4	Ergebnisse	5
5	Bewertung der Ergebnisse im Vergleich	7
6	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	10
7	Empfehlungen und Ausblick	12

1 Hintergrund und Ziele

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 12 Monaten als ein effizientes und für den Praxisbetrieb geeignetes Eliminationsverfahren erwiesen hat, wurde eine zweite Phase angeschlossen mit dem Ziel, durch verfahrenstechnische Optimierung eine hohe Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Zwei von insgesamt neun vorhandenen Flockungsfiltren wurden zu Großadsorbern mit granulierter Aktivkohle umgebaut. In Projektphase 1 wurden zwei unterschiedliche Aktivkohleprodukte getestet. 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 untersucht werden. Anders als in Phase 1, in der die Adsorptionsfilter direkt mit dem Ablauf der Nachklärung beschickt wurden, wurde in Phase 2 das Adsorptionsverfahren der Flockungsfiltration nachgeschaltet, um eine nahezu feststofffreie Beschickung der Adsorber zu erzielen. Diese Maßnahme wurde flankiert durch eine hydraulische Optimierung der Nachklärung, d. h. durch den Einbau von Leitblechen am Eintragungssystem für das Wasser in eines der Längsbecken.

Weiterhin sollte im Rahmen des zweiten Projektes 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 Das Klärwerk Gütersloh-Putzhagen

Das Hauptklärwerk 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:

- 2 parallele Feinrechen (6 mm)
- 2 parallele Feinrechen (3 mm)
- 2-straßiger Sand- und Fettfang ($V_{\text{ges}} = 600 \text{ m}^3$)
- 1 Vorklärbecken ($V_{\text{ges}} = 2.500 \text{ m}^3$)
- 1 Ausgleichsbecken (ehem. Vorklärbecken, $V_{\text{ges}} = 2.500 \text{ m}^3$)
- Belebungsbecken: $V_{\text{ges}} = 27.700 \text{ m}^3$
- 4-straßige vorgeschaltete Denitrifikation als 2er-Kaskade
- 16 Nachklärbecken ($V_{\text{ges}} = 11.600 \text{ m}^3$)
- Flockungsfiltration vom Typ „Biofor“ (9 Filterzellen, Filterfläche $A_{\text{ges}} = \text{ca. } 370 \text{ m}^2$)

Das so gereinigte Abwasser wird in den Vorfluter „Dalke“, einen Nebenfluss der Ems eingeleitet.

Die nachgeschaltete Flockungsfiltration (Dosierung des Fällmittels FeCl_3) dient im Wesentlichen der Ausfällung von Restkonzentrationen an Phosphor sowie einem weitergehenden Partikelrückhalt. Während die Kläranlage Putzhagen für einen Volumenstrom von $3.500 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgelegt wurde, ist die Filterstufe auf $3.600 \text{ m}^3/\text{h}$ dimensioniert. Die Jahresabwassermenge des Klärwerks beträgt im Mittel $5,93 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$.

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 $\text{ca. } 31 \text{ mg/l}$). Die Zulaufwerte für Gesamtphosphor variieren zwischen $0,6$ und $1,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{l}$. Im Ablauf werden Werte zwischen $0,2$ und $0,4 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{l}$ erreicht (Mittelwert $\text{ca. } 0,35 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{l}$). Hingegen wird erwartungsgemäß im Filter keine weitere Reduktion des Gesamtstickstoffs erzielt (Wertebereich von Zu- und Ablauf zwischen 4 und $16 \text{ mg N}_{\text{ges}}/\text{l}$). Die Trübungswerte im Zu- und Ablauf der Filtration liegen überwiegend zwischen 1 und 8 NTU , die Ablaufwerte der Adsorber zwischen 1 und 3 NTU .

3 Versuchsaufbau und wasserchemisches Monitoring-Programm

Die Beschickung beider Adsorber erfolgte mit Filtrat der BIOFOR-Filter der Flockungsfiltration ohne Zugabe von Fäll- oder Flockungsmittel. Beide Großadsorber wurden überwiegend mit einer konstanten Filtergeschwindigkeit von 5 m/h betrieben, was einer Leerbettkontaktzeit von 33 Minuten entspricht. Die Rückspülung erfolgte zweimal wöchentlich. Zwischenzeitlich wurde die Filtergeschwindigkeit über einen Zeitraum von einigen Wochen halbiert, was eine Leerrohrkontaktzeit von 66 Minuten zur Folge hatte. Die Rückspülung erfolgte in dieser Phase einmal wöchentlich.

Parallel zu den beiden Großadsorbern (GA) wurde ein Kleinadsorber (KA) mit Frischkohle des gleichen GAK-Typs betrieben, um den Einfluss einer höheren Filtergeschwindigkeit bzw. geringerer Leerbettkontaktzeiten untersuchen zu können. Die Betttiefe des KA war wie bei den GA 2,75 m und entsprach somit dem großtechnischen Maßstab.

Die Auswahl der zum Monitoring der Adsorber zu analysierenden organischen Mikroverunreinigungen basierte auf einem umfassenden Screening des Kläranlagenablaufes und beinhaltet:

- aus dem medizinischen Bereich 43 Einzelsubstanzen der Stoffgruppen Antibiotika, Beta-blocker, Analgetika/Antiphlogistika, Lipidsenker, Antiepileptika, Psychopharmaka und Röntgenkontrastmittel
- aus der Gruppe der Industrie- und Haushaltchemikalien: Benzotriazol, Methylbenzotriazol und TMDD
- das Pflanzenschutzmittel Terbutryn

Dafür wurden in regelmäßigen Abständen 72-h-Mischproben 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.

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

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
Propranolol	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

4 Ergebnisse

- Nach einem 12-monatigen Betrieb ohne eine einzige Betriebsstörung erzielten die Großadsorber ein Filtratvolumen von 12.700 Bettvolumina (BVT).
- Für alle Mikroverunreinigungen ergab das Reaktivat die gleiche Adsorptionsleistung wie die Frischkohle, wie in Bild 1 beispielhaft für sechs Spurenstoffe dargestellt.

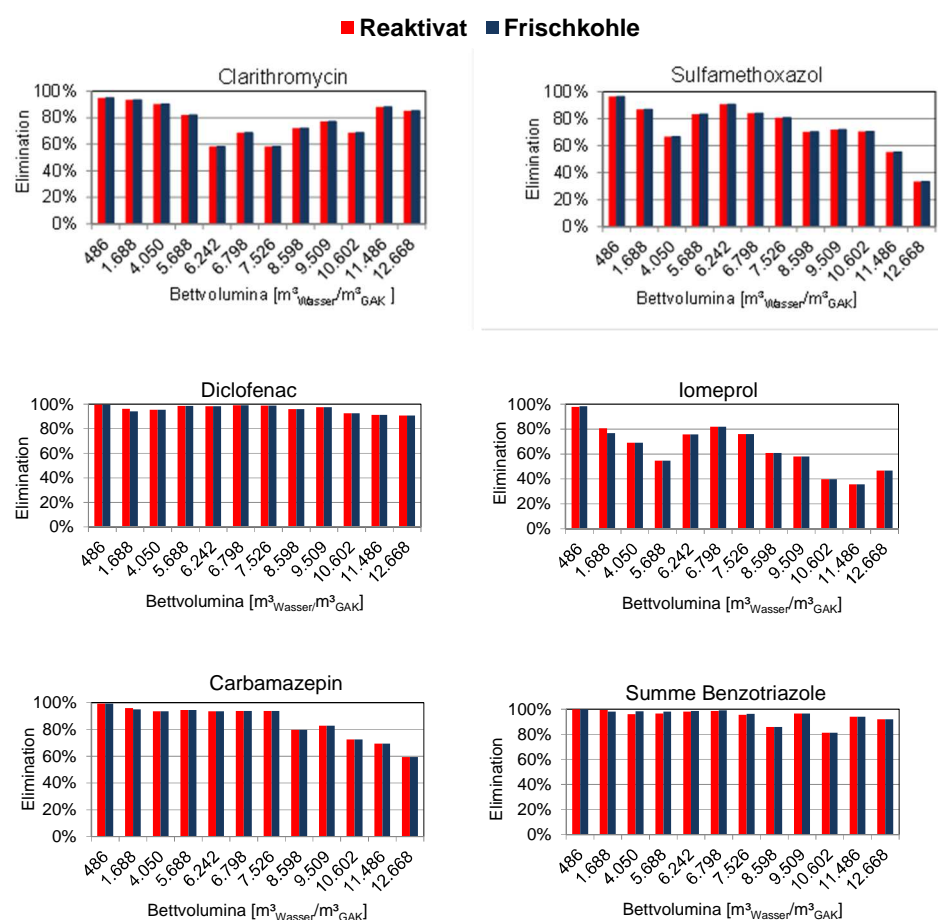


Bild 1: Vergleich der Eliminationsleistung von reaktiverer Aktivkohle mit frischer Aktivkohle für ausgewählte Spurenstoffe

- Selbst nach dieser langen Standzeit fand für eine Reihe an Spurenstoffen immer noch eine Elimination von über 80 % statt, obwohl die CSB-Beladung der Aktivkohle bereits nach relativ kurzer Standzeit der Adsorber nahezu vollständig erreicht war: Atenolol, Bezafibrat, Bisoprolol, Diclofenac, Metoprolol, Naproxen, Oxazepam, Roxithromycin, die Summe der Benzotriazole und Trimethoprim
- Darüber hinaus werden noch zu mindestens 50 % reduziert: Carbamazepin, Clarithromycin, Indometacin, Erythromycin und Terbutryn

- 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. 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 schwankender Zulaufkonzentrationen auf.
- 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.
- Die zwischenzeitlich erprobte Verdopplung der Leerbettkontaktzeit (EBCT), die zwischen 5.000 und 7.500 BVT in den Adsorbern durch eine Halbierung der Filtergeschwindigkeit auf 2,5 m/h erreicht wurde, brachte keine Vorteile in Bezug auf die Spurenstoffelimination.
- Ein CSB-Durchbruch von ca. 80 % wurde in beiden Adsorbern bei ca. 4.000 Bettvolumina erreicht und es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen frischer und reaktivierter Aktivkohle festgestellt werden.
- Auch hinsichtlich des Parameters Phosphat war die Eliminationsleistung der beiden Adsorber annähernd identisch. In Bezug auf den Ablauf der Flockungsfiltration findet 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 NRW, 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.

- Der parallel betriebene Kleinadsorber wurde in der zweiten Projekthälfte (ab ca. 10.000 BV) mit deutlich höheren Filtergeschwindigkeiten als die Großadsorber betrieben, um durch den sich dadurch ergebenden Zeitraffereffekt höhere BV-Werte zu erreichen. Es zeigte sich, dass für einige Substanzen die Elimination im KA auch bei deutlich höheren BV (bis zu 24.800) noch sehr gut war: Atenolol, Bisprolol, Trimethoprim, Indometacin. Für die meisten Spurenstoffe jedoch ist bei Bettvolumina über ca. 12.000 eine abnehmende Elimination zu verzeichnen.

5 Bewertung der Ergebnisse im Vergleich

In einer Publikation von Benstöm et al. (2016) wurden Ergebnisse aus anderen Studien zur Spurenstoffelimination in Festbettadsorbern auf Kläranlagen ausgewertet und die Ergebnisse in Bild 2 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 Bild 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 2.000 BV erreicht, so dass die Eliminationsleistung für diesen Parameter niedriger als in den anderen 10 Studien liegt.

Dagegen liegt die Elimination von Carbamazepin im oberen Bereich im Vergleich zu den für diesen Parameter vorliegenden vier Studien (mit 9.500 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.

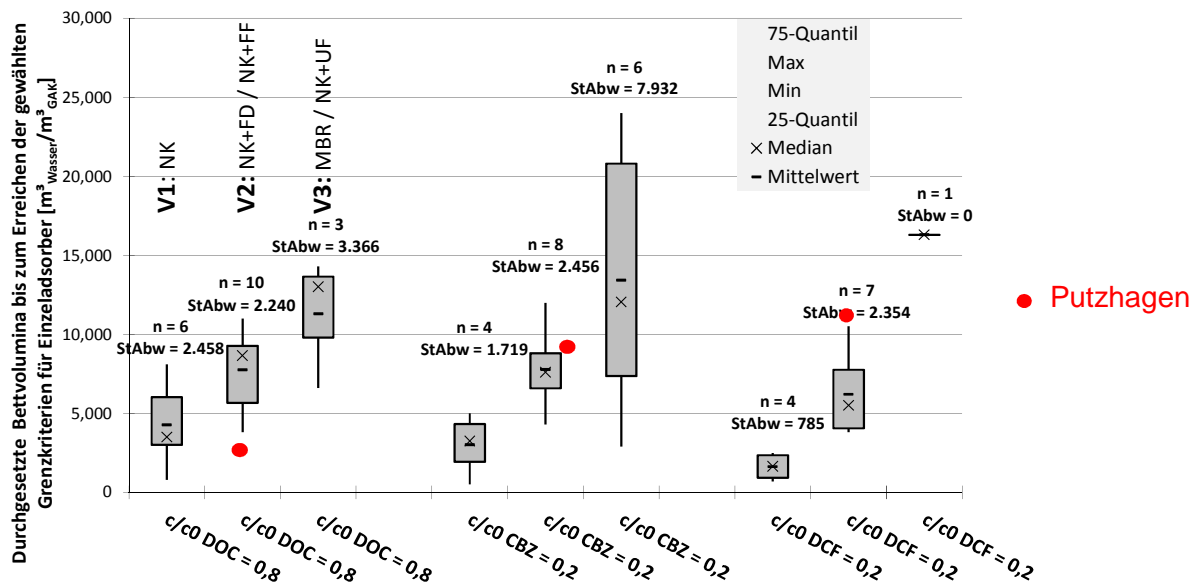


Bild 2: Einfluss der Vorreinigung, des mittleren DOC₀ im Zulauf, der Kontaktzeit EBCT und des GAK-Korndurchmessers auf die erzielbaren Bettvolumina der Einzelsorber für die Grenzkriterien DOC-Entfernung ($c/c_0 = 0,8$) sowie Carbamazepin- und Diclofenac-Entfernung ($c/c_0 = 0,2$) mit Zuordnung der Ergebnisse aus diesem Projekt (Quelle d. Originals: Benstöm et al., 2016)

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 durchgesetzter Bettvolumina (siehe Bild 3 und Bild 4). 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 6.000 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.

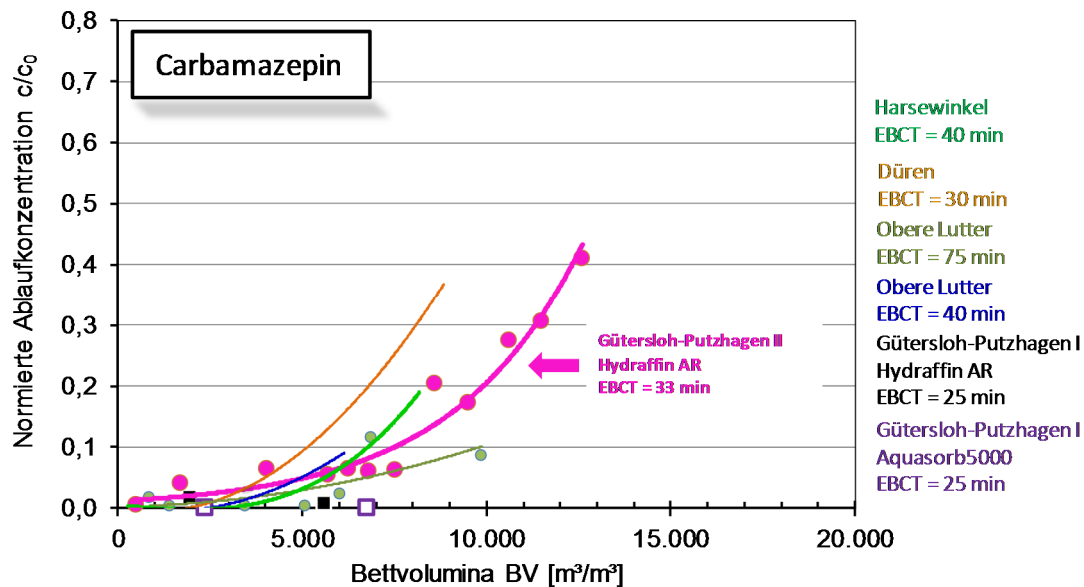


Bild 3: Auf den Zulauf normierte Filtratkonzentration c/c_0 für Carbamazepin in Abhängigkeit der BVT von Festbettadsorptionsverfahren anderer Anlagen im Vergleich zu denjenigen auf dem Klärwerk Putzhagen

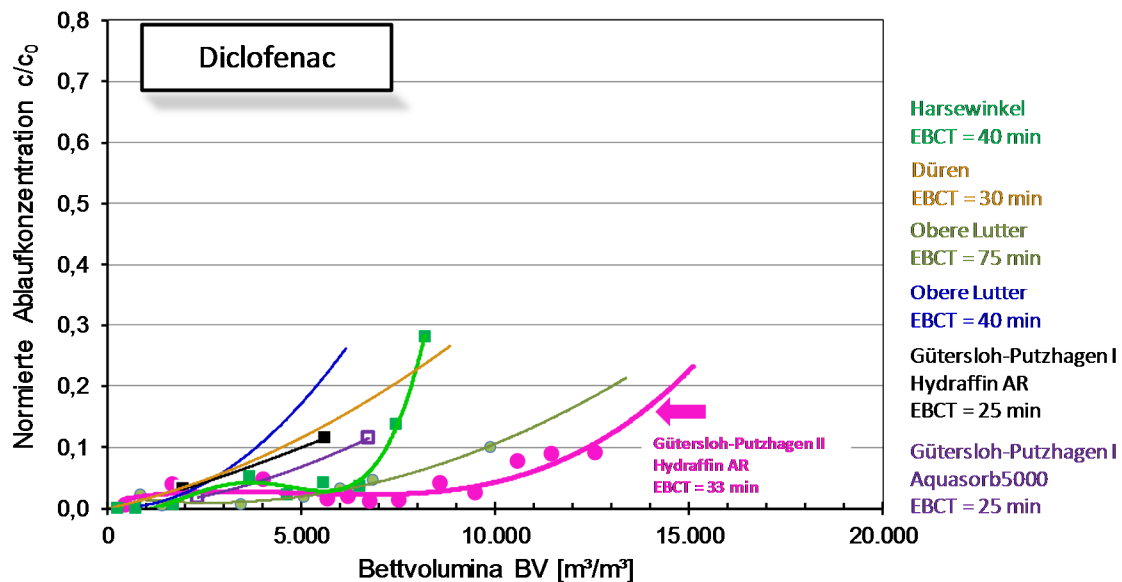


Bild 4: Auf den Zulauf normierte Filtratkonzentration c/c_0 für Diclofenac in Abhängigkeit der BVT von Festbettadsorptionsverfahren anderer Anlagen im Vergleich zu denjenigen auf dem Klärwerk Putzhagen

6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Die Aktivkohleadsorption im Festbett hat sich als praxistauglich für den Alltagsbetrieb der Kläranlage Putzhagen erwiesen. Es wird empfohlen, eine zukünftige Verfahrensstufe zur Spurenstoffentfernung für die Behandlung des mittleren Trockenwetterabflusses von 15.000 m³/Tag auszulegen und mehrere Adsorber zwar parallel zu betreiben, doch jeweils zeitversetzt zueinander in Betrieb zu nehmen.

Folgende drei Verfahrensvarianten sind daher grundsätzlich möglich:

Fall 1: 3 Filter des Anlagenbestandes, Filterfläche = 3 x 42 m²,
 Höhe des GAK-Bettes = 2,75 m,
 Volumen der gesamten GAK-Schüttungen = 346,5 m³,
 gleichzeitige Inbetriebnahme und Beschickung

Fall 2: 3 Filter des Anlagenbestandes, Filterfläche = 3 x 42 m²,
 Höhe des GAK-Bettes = 2,75 m,
 Volumen der gesamten GAK-Schüttungen = 346,5 m³
 jeweils zeitlich versetzte Inbetriebnahme und Beschickung

Fall 3: 10 Filter, Filterfläche = 10 x 12,6 m², Höhe des GAK-Bettes = 3,0 m,
 Volumen der gesamten GAK-Schüttungen = 378 m³,
 zeitlich versetzte Inbetriebnahme und Beschickung

Durch einen optimal gewählten zeitversetzten Betrieb der Adsorber hält das Sammelfiltrat das Grenzkriterium ein, während der Adsorber mit den jeweils höchsten BV auch ein deutlich höher belastetes Einzelfiltrat aufweisen kann. 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 BV bis zum Erreichen des Grenzkriteriums für die drei genannten Verfahrensvarianten und die beiden Spurenstoffe Carbamazepin und Diclofenac sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

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

Spurenstoff	BV bis zum Erreichen des Grenzkriteriums		
	$c/c_0 = 20\%$		
	Fall 1	Fall 2	Fall 3
Carbamazepin	9.500	12.600	14.200
Diclofenac	14.600	18.100	20.000

Die spezifischen Betriebskosten liegen je nach Betriebsart und Bezugs-Spurenstoff zwischen 0,031 und 0,054 €/m³ Abwasser. Ob drei oder 10 parallel und zeitversetzt betriebene Filter mit etwa dem gleichen Gesamtvolumen an GAK gewählt werden, wirkt sich kaum noch auf die Betriebskosten aus. Die höhere Filteranzahl kann aber Vorteile während der Außerbetriebnahme einzelner Filter für die Spülung oder für die GAK-Reaktivierung bieten. Auch die Spülwasserbevorratung und die Rückführung des Spülabwassers vereinfachen sich. Der Aufwand bzw. der Multiplikator bei Teilen der EMSR und ihren Stellorganen ist jedoch entsprechend höher.

Die spezifischen Betriebskosten liegen in der gleichen Größenordnung wie auf den anderen Kläranlagen mit einer GAK-Adsorptionsstufe zur Spurenstoffelimination und im Vergleich zu den Verfahren mit PAK und Ozonung durchaus im 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.

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

Kostenart	Einheit	Diclofenac		Carbamazepin	
		3 Filter, versetzt	10 Filter, versetzt	3 Filter, versetzt	10 Filter, versetzt
spezifische Betriebskosten	[ct/m ³]	3,16	3,06	4,25	4,03
jährliche Betriebskosten	[€/a]	161.679	156.171	217.368	206.030

7 Empfehlungen und Ausblick

Die Festbettadsorption mit granulierter Aktivkohle auf der Kläranlage Putzhagen stellt sich gemäß der in den zwei durchgeführten F+E-Vorhaben als ein effizientes und für den Praxisbetrieb geeignetes Aufbereitungsverfahren dar. 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 dieser vorgenommene Optimierungsmaßnahmen haben nur wenig Abhilfe erbracht) und zudem Fällmittel zur Verringerung des Gesamtposphats 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 10 GAK-Filtern in Druckkesselbauweise, die der Flockungsfiltration nachgeschaltet im Abstrom betrieben werden, empfohlen. Eine solche Verfahrensstufe wäre auf dem bestehenden Betriebsgelände als separate Halle realisierbar.

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 EBCT hingegen zu keiner weiteren Verbesserung oder einem Laufzeitgewinn für die GAK beitragen.

Für die Festlegung eines Reaktivierungsintervalls 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. Entscheidungskriterien dabei waren: Verbreitung dieser Stoffe in der Schweiz, ihre Messbarkeit, ihr ungenügender Abbau in der biologischen Reinigungsstufe sowie ob sie repräsentativ für die Gesamtfracht an organischen Spurenstoffen aus kommunalen Kläranlagen sind. 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 tabellarisch zusammengefasst und diejenigen entsprechend gekennzeichnet, die für die Kläranlage Gütersloh-Putzhagen relevant sind. Damit ergeben sich fünf Substanzen, die sich einzeln aber auch in ihrer Konzentrationssumme als Leitparameter für die Leistungsfähigkeit einer GAK-Stufe auf dem Klärwerk Putzhagen sehr gut eignen: Carbamazepin, Clarithromycin, Diclofenac, Metoprolol und Benzotriazol. Das

schnellste Durchbruchverhalten während der großtechnischen Versuche zeigte innerhalb dieses Stoffspektrums Carbamazepin, so dass die im voranstehenden Kapitel getroffenen Aussagen zu Auslegungskriterien und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen die übrigen vier der in Tabelle 4 genannten Substanzen ebenfalls einbeziehen.

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

Spurenstoff	Stoffgruppe	Relevanz für die Kläranlage Gütersloh-Putzhagen
Amisulprid	Arzneimittel – Psychopharmakum	
Carbamazepin	Arzneimittel – Antiepileptikum	x
Citalopram	Arzneimittel – Antidepressivum	
Clarithromycin	Arzneimittel – Antibiotikum	x
Diclofenac	Arzneimittel – Analgetikum	x
Hydrochlorothiazid	Arzneimittel – Diuretikum	
Metoprolol	Arzneimittel – Betablocker	x
Venlafaxin	Arzneimittel – Antidepressivum	
Benzotriazol	Korrosionsschutzmittel	x
Candesartan	Arzneimittel – Antihypertonikum	
Irbesartan	Arzneimittel – Antihypertonikum	
Mecoprop	Biozid / Pflanzenschutzmittel	