

Mikroschadstoffelimination mittels granulierter Aktivkohle im Ablauf der Kläranlage Gütersloh-Putzhagen



Abschlussbericht

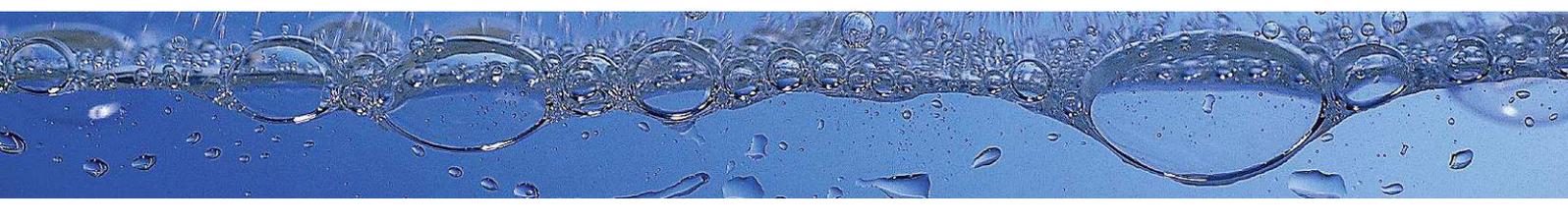
Förderkennziffer M-03/12 Gt

Mai 2016

Stadt Gütersloh

gefördert durch das:

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



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

Wissenschaftliches Direktorium
Prof. Dr. Torsten C. Schmidt (Sprecher), Prof. Dr. Ra
Meckenstock,
Prof. Dr. Stefan Panglisch, Prof. Dr. Andreas Hoffjan, P
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 631
SWIFT BIC COBADEFFXXX
Internet: www.iww-online.de

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. Ra
Meckenstock,
Prof. Dr. Stefan Panglisch, Prof. Dr. Andreas Hoffjan, P
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 631
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.

[IWW\Bericht_Putzhagen_Phase2_IWW-2016-06-02_neu.docx](#)

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

Wissenschaftliches Direktorium
Prof. Dr. Torsten C. Schmidt (Sprecher), Prof. Dr. Ra
Meckenstock,
Prof. Dr. Stefan Panglisch, Prof. Dr. Andreas Hoffjan, P
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 631
SWIFT BIC COBADEFFXXX
Internet: www.iww-online.de

Danksagung/Vorwort

Alle Projektbeteiligten bedanken sich für die Projektförderung in Form einer Zuwendung durch das Land NRW (MKULNV-NRW) sowie für die fachliche und administrative Unterstützung durch die Bezirksregierung Detmold (Zuwendungsbescheid M-03/12-Gt).

Zusammenfassung der Ergebnisse und Empfehlungen

Auf der Kläranlage Putzhagen der Stadt Gütersloh wurden großtechnische Untersuchungen zur Elimination von Spurenstoffen mittels granulierter Aktivkohle (GAK) als separate Reinigungsstufe durchgeführt. Dafür wurden zwei von insgesamt neun vorhandenen Flockungsfiltern zu Großadsorbern mit granulierter Aktivkohle umgebaut. Nachdem sich das Verfahren in einer ersten Projektphase von 12 Monaten als ein effizientes und für den Praxisbetrieb geeignetes Eliminationsverfahren erwiesen hat (Nahrstedt et al. 2013), wurde es um eine zweite Phase mit dem Ziel erweitert, durch verfahrenstechnische Optimierungen eine hohe Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Ein besonderer Fokus lag dabei auf dem Einfluss der turnusmäßig notwendigen Reaktivierung erschöpfter granulierter Aktivkohlen auf die Adsorptionsleistung. Deshalb wurde in Projektphase 2 ein Adsorber mit frischer Aktivkohle gefüllt, der zweite mit dem gleichen Produkt, das aber 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. Parallel zu den Großadsorbern wurde zudem ein Kleinadsorber mit dem Ziel betrieben, den Einfluss einer höheren Filtergeschwindigkeit bzw. geringeren Kontaktzeit mit der Aktivkohle zu untersuchen.

Anders als in Phase 1, in der zwei großtechnische Adsorptionsfilter mit unterschiedlichen frischen GAK-Produkten 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.

Als Fazit der ersten Projektphase wurde festgelegt, dass die Filtergeschwindigkeit der GAK-Adsorber von 5 m/h nicht überschritten werden sollte, um eine Leerbett-Kontaktzeit von rund

30 min nicht zu unterschreiten. Daher wurde diese Filtergeschwindigkeit für Phase 2 übernommen.

Die mit der Bezirksregierung Detmold abgestimmte Auswahl der für ein Monitoring der Adsorber zu analysierenden gelösten organischen Mikroverunreinigungen basierte auf einem umfassenden Screening des Kläranlagenablaufes und beinhaltete:

- 43 Einzelsubstanzen aus dem medizinischen Bereich
- Benzotriazol, Methylbenzotriazol und TMDD aus der Gruppe der Industrie- und Haushaltchemikalien
- das Pflanzenschutzmittel Terbutryn

Neben den organischen Spurenstoffen wurden auch die Analysenparameter des Betriebslabors des Klärwerks Putzhagen (CSB, DOC, P_{ges} , Trübung) in die Untersuchungen des Betriebsverhaltens der Adsorber mit einbezogen.

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 über 80 % statt: Atenolol, Bezafibrat, Bisoprolol, Diclofenac, Metoprolol, Naproxen, Oxazepam, Roxithromycin, die Summe der Benzotriazole und Trimethoprim.

Für alle Mikroverunreinigungen und Standardparameter ergab sich für das Reaktivat die gleiche Adsorptionsleistung wie für die Frischkohle. Insbesondere für den Stoff Diclofenac wurden durchsetzbare Bettvolumina bis zum Erreichen deutlicher Stoffdurchbrüche durch die GAK-Schüttungen ermittelt, die höher liegen als bei den bisherigen Projekten mit GAK-Filtern.

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

Eine zwischenzeitlich erprobte Verdopplung der Leerbettkontaktzeit für den Adsorptionsprozess brachte keine erkennbaren Vorteile in Bezug auf die erzielte Spurenstoffelimination.

Da die Reaktivierung der GAK mit keinerlei Leistungseinbußen hinsichtlich der Spurenstoffentfernung beim anschließenden Einsatz 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 infolge von Verdünnungseffekten im Sammelfiltrat zu einer längeren Standzeit der einzelnen

Adsorber und somit zu einer weiteren Kostenreduzierung. Je nach Anzahl der Filter und den gewählten Grenzkriterien für das Ende der Adsorberlaufzeit bzw. mit anschließender Reaktivierung der GAK liegen die Betriebskosten zwischen 0,031 und 0,043 €/m³ Abwasser (brutto; ohne Fördermittel; ohne Verrechnung der Abwasserabgabe).

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 Phosphor von 0,7 mg/l P_{ges} 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.

Für die großtechnische Umsetzung einer Reinigungsstufe mit GAK auf der Kläranlage Gütersloh Putzhagen wird der Neubau einer Adsorptionsstufe bestehend aus 10 GAK-Filtern in Druckkesselbauweise, die der Flockungsfiltration nachgeschaltet im Abstrom betrieben werden, empfohlen. Die Adsorber sollten mindestens mit einer Leerbett-Kontaktzeit von 30 min betrieben werden.

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. Wendet man diese Liste auch hier an, können fünf organische Mikroverunreinigungen identifiziert werden, die für die Kläranlage Putzhagen relevant sind und sich als Leitparameter sehr gut eignen würden: Carbamazepin, Clarithromycin, Diclofenac, Metoprolol und Benzotriazol.

Das schnellste Durchbruchverhalten durch die GAK der großtechnischen Adsorber unter diesen Stoffen zeigt Carbamazepin. Definiert man daher Carbamazepin als den für den Prozess unter den oben beschriebenen Auslegungskriterien und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen maßgeblichen Monitoringparameter, ist das Durchbruchverhalten der übrigen vier empfohlenen Leitparameter automatisch mit abgedeckt.

IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für
Wasserforschung gemeinnützige GmbH

Mülheim an der Ruhr, den 28.06.2016



Dr. W. Merkel

i.V.



Dr. A. Nahrstedt

Hydro-Ingenieure GmbH



Dipl.-Ing. K. Alt

ATEMIS GmbH



Dipl.-Ing. F. Schlösser

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund und Ziele	1
1.1	Hintergrund	1
1.2	Auftrag und Ziele	2
2	Verfahrensstufen zur Abwasserbehandlung des Klärwerks Gütersloh-Putzhagen	4
3	Umbaumaßnahme für die Verfahrenskombination Flockungfiltration und Adsorption in einer BIOFOR-Anlageneinheit	6
4	Optimierung der Nachklärung	11
5	Aufbau und Verfahrensparameter der Aktivkohleadsorber	16
5.1	Auswahl einer wirtschaftlichen GAK	16
5.2	Versuchsaufbau und -parameter	18
6	Auswahl der Parameter für das wasserchemische Monitoring.....	21
6.1	Routineparameter des Betriebslabors	21
6.2	Organische Mikroverunreinigungen	21
7	Ergebnisse wasserchemischer Untersuchungen	23
7.1	Filtratqualität der Adsorber	23
7.1.1	Standardparameter	23
7.1.2	Organische Mikroverunreinigungen	27
8	Vergleich der erzielten Spurenstoffelimination mit anderen Forschungsvorhaben mit Festbettadsorbern.....	36
9	Erfahrungen und Erkenntnisse des Betriebspersonals.....	39
10	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	42
10.1	Bemessungsansätze	42
10.2	Betriebskosten.....	44



11	Empfehlungen und Ausblick	46
12	Literatur.....	49
13	Glossar	51
14	Anhang.....	14-1
14.1	Zusammenfassung der Ergebnisse aus Projektphase 1	14-1
14.2	Ergebnisse der Spurenstoffanalysen	14-4
14.3	Berechnung der Betriebskosten	14-8

1 Hintergrund und Ziele

1.1 Hintergrund

Dieses Projekt ist eines von einer ganzen Reihe von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (F+E-Vorhaben) zur weitergehenden Abwasserreinigung, die im Rahmen des „Masterplan Wasser“ (<http://www.masterplan-wasser.nrw.de/>) durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW (MKULNV) gefördert werden, um Eignung, Leistung und Kosten verschiedener Aufbereitungsverfahren zur Elimination und/oder Transformation organischer Mikroverunreinigungen in der Praxis zu ermitteln (Mertsch 2009). Ziel ist u. a. die Entwicklung von Technologien zur Verminderung dieser Stoffe an punktförmigen Emissionsstellen mit maßgeblichen Stofffrachten (Bergmann und Hembrock-Heger 2008), um sowohl die aquatische Umwelt und in Folge auch die Rohwasserressourcen für die Trinkwassergewinnung mit vertretbarem Aufwand zu entlasten (vorsorgender Gewässer- und Verbraucherschutz). Auf Basis dieser Ergebnisse sollen dann die in der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) geforderten Maßnahmen- und Bewirtschaftungspläne für ein grenzüberschreitendes nachhaltiges Management von Flusseinzugsgebieten entwickelt und umgesetzt werden.

Im Jahr 2012 wurde im Rahmen eines ersten vom damaligen MUNLV des Landes NRW auf der Kläranlage Putzhagen der Stadt Gütersloh geförderten Projektes bereits die Spurenstoffadsorption an granulierter Aktivkohle im Festbett halb- und großtechnisch untersucht. Der Versuchsbetrieb der beiden großtechnischen Adsorber, zu denen zwei Filterkammern der bestehenden Flockungsfiltration umgerüstet wurden, war nach 12 Monaten nahezu ununterbrochenem Betrieb derart effektiv und unproblematisch, dass sich die Festbettadsorption mit granulierter Aktivkohle als ein effizientes und für den Praxisbetrieb geeignetes d. h. robustes Reinigungsverfahren erwiesen hat. Die Zusammenfassung der Ergebnisse aus Projektphase 1 befindet sich in Anhang 14.1.

Vor diesem Hintergrund hat sich die Stadt Gütersloh dazu entschieden, eine zweite Projektphase anzuschließen, in der insbesondere die verfahrenstechnische Optimierung mit dem Ziel einer hohen Wirtschaftlichkeit untersucht werden soll. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf dem Einfluss der turnusmäßig notwendigen Reaktivierung erschöpfter granulierter Aktivkohlen auf die Adsorptionsleistung bei der hier untersuchten Applikation.

1.2 Auftrag und Ziele

Im abgelaufenen Teil 1 des Projektes (Nahrstedt et al. 2013) wurde durch den Einsatz von frischer Aktivkohle (Frischkohle) eine sehr gute Reinigungsleistung für die verschiedenen Spurenstoffparameter sowie für den CSB und TOC erzielt. Darüber hinaus zeigte sich, dass das wirtschaftliche Optimum für den Adsorberbetrieb unter den gewählten Randbedingungen noch nicht erreicht wurde und dass es noch Potenziale zur deutlichen Verbesserung der Adsorber-Standzeit sowie zur Reduzierung der Betriebskosten gab. Ansatzpunkt zu dieser Hypothese war z.B. die damalige Anordnung der Verfahrensstufen, bei der eine direkte Beschickung der Adsorber mit dem Ablauf der Nachklärung erfolgte. Infolge eines immer wieder auftretenden Austrags an hohen Konzentrationen abfiltrierbarer Stoffe (AFS) aus der Nachklärung erreichten die Adsorber in kurzen Zeitintervallen große Feststoffbeladungen, weshalb relativ kurze Spülintervalle für die Adsorber gewählt werden mussten. In Extremfällen wurde der Adsorberbetrieb sogar kurzzeitig unterbrochen, um das Aktivkohlebett präventiv vor den AFS zu schützen.

Einen weiteren Ansatzpunkt bot die Beschränkung der Untersuchungen im ersten Projekt auf parallel beschickte Frischkohlen unterschiedlichen Typs, die im Routinebetrieb aber nach und nach einer periodischen Reaktivierung unterzogen werden müssen, was i. d. R. die Adsorptionsleistung verändert (bei der Vielfalt der im Bereich der Trinkwasseraufbereitung eingesetzten Aktivkohlen und Applikationen treten sowohl verbesserte als auch verringerte Adsorptionsleistungen auf). Als Frischkohle zeigte die GAK vom Typ AquaSorb 5000 (Jacobi Carbons GmbH) zwar eine bessere Eliminationsleistung als die GAK vom Typ Hydriffin AR (Donau Carbon GmbH), doch lagen die Kosten für die Füllung einer Filterzelle mit AquaSorb 5000 auch deutlich höher.

Daher sollte die Beschickung der Adsorptionsfilter in diesem Folgeprojekt mit dem nahezu feststofffreien Ablauf der Flockungsfilter erfolgen, um eine Beeinträchtigung des Adsorberbetriebs insbesondere infolge erhöhter Feststoff-Beladungsschichten auf dem Aktivkohlekorn (als zusätzlicher Transportwiderstand für die Spurenstoffe bei der Adsorption) und kurzer Spülintervalle zu vermeiden. Diese Maßnahme wurde flankiert durch eine hydraulische Optimierung der Nachklärung, d. h. durch den Einbau von Leitblechen am Eintragungssystem für das Wasser in die Becken.

Als Fazit der ersten Projektphase wurde festgelegt, dass die Filtergeschwindigkeit der GAK-Adsorber von 5 m/h nicht überschritten werden sollte, um eine Leerbett-Kontaktzeit (Empty Bed Contact Time, EBCT) von rund 30 min nicht zu unterschreiten. Ausgehend von einer Filterfläche von 42 m² je Adsorber (einzelne Filterzelle) bei zunächst zwei parallel betriebenen GAK-Adsorbern ergibt sich hierdurch ein maximaler Gesamtvolumenstrom von

$2 \times 42 \text{ m}^2 \times 5 \text{ m/h} = 420 \text{ m}^3/\text{h}$. Da dieser Wert etwas unterhalb des Tagesmittelwertes bei Trockenwetterabfluss liegt, soll im Rahmen dieses zweiten Projektes auch herausgearbeitet werden, wie viele Adsorber mit granulierter Kohle für eine großtechnische Umsetzung der Spurenstoffelimination in den Aufbereitungsalltag mindestens erforderlich bzw. höchstens sinnvoll sind.

Bei der Projektdurchführung standen folgende Fragen im Vordergrund, die im Rahmen des ersten Projektes nicht ausreichend detailliert geklärt werden konnten oder noch nicht Gegenstand der geplanten Untersuchungen waren:

- Wie unterscheidet sich die Adsorptionsleistung von frischer und reaktiverter Aktivkohle?
- Nach wie vielen durchgesetzten Bettvolumina muss mit einem Durchbruch des CSB / TOC und nach wie vielen mit Durchbrüchen der einzelnen untersuchten Spurenstoffe gerechnet werden?
- Wie beeinflusst die Reaktivierung der zuvor auf der KA bis zur Erschöpfung eingesetzten und danach reaktivierten GAK die Kosten und somit die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens?
- Werden durch den Routinebetrieb sekundäre Aspekte ersichtlich, welche die Akzeptanz und/oder die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens beeinflussen?

2 Verfahrensstufen zur Abwasserbehandlung des Klärwerks 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 $5,93 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$.

Der Aufbau der Biofor-Filter (Baujahr 1992), ein in NRW verbreiteter Anlagentyp, der z. B. auch beim Abwasserverband Obere Lutter (AOL) anzutreffen ist (Nahrstedt et al. 2014a und 2014b) ist in dem Schema der Abbildung 1 skizziert. Die Filter werden – wie bei dem Biofor-Prinzip üblich – von unten nach oben durchströmt.

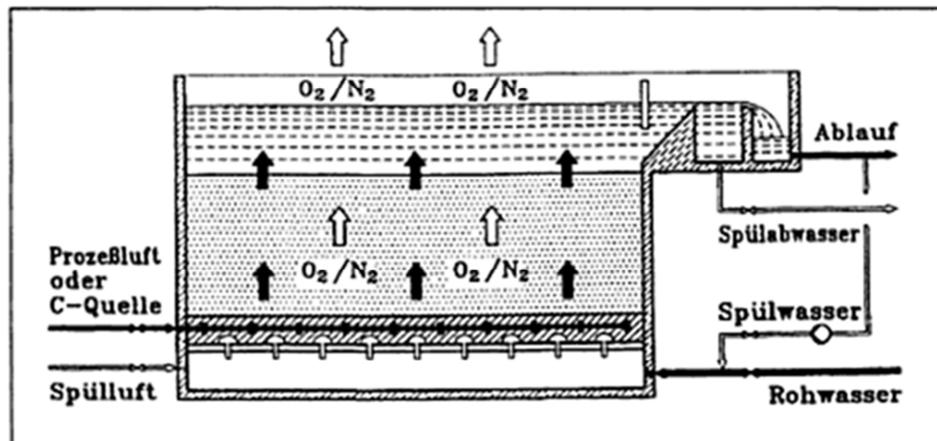


Abbildung 1: Schematischer Schnitt durch eine Biofor-Filterzelle

In den 9 Filterzellen befanden sich vor dem Start der Phase 1 für die GAK-Adsorption jeweils 100 m^3 des Filtermaterials Liaperl® G 4-8 R (Fa. Cleanswater Ökotau GmbH) mit einem Kornband von 4 bis 8 mm (effektive Korngröße von 4,5 mm). Die im Düsenboden verschraubten Luftpolsterdüsen haben eine Schlitzweite von ca. 2,3 mm. Wie aus Abbildung 2 ersichtlich ist, läuft der Ablauf der Nachklärung zunächst zu einer Pumpenvorlage. Aus dieser wird er mit fünf Pumpen, von denen zwei drehzahl geregelt sind, über einen Verteilschacht in die Verteilerrinne für den Filterzulauf zu den 9 Biofor-Filtern geführt. Zwischen der Pumpenvorlage und der Verteilerrinne wird sowohl das Fällmittel FeCl_3 als auch das Flockungshilfsmittel dosiert.

Die Zuführung des Filterzulaufs erfolgt ohne Zwangsverteilung der Volumenströme, sondern stellt sich bei konstantem Filterüberstau gemäß dem jeweiligen Durchströmungswiderstand individuell ein. Die Filtrate werden über einen gemeinsamen Klarwasserschacht dem Vorfluter zugeführt. Die Verfahrensstufe verfügt über eine Siemens-S7-Steuerung. Weiterhin sind an die Biofor-Filter Spülluftgebläse und Spülwasserpumpen zur Reinigung angeschlossen. Das Spülabwasser wird über ein separates Becken wieder dem Zulauf der Kläranlage zugeführt und dort gereinigt. Die Filter werden nach dem Erreichen eines der beiden Spülkriterien „maximale Filterlaufzeit“ oder „maximaler Differenzdruck“ gespült. Letzteres Kriterium wird allerdings innerhalb der zulässigen maximalen Filterlaufzeit eher selten erreicht.

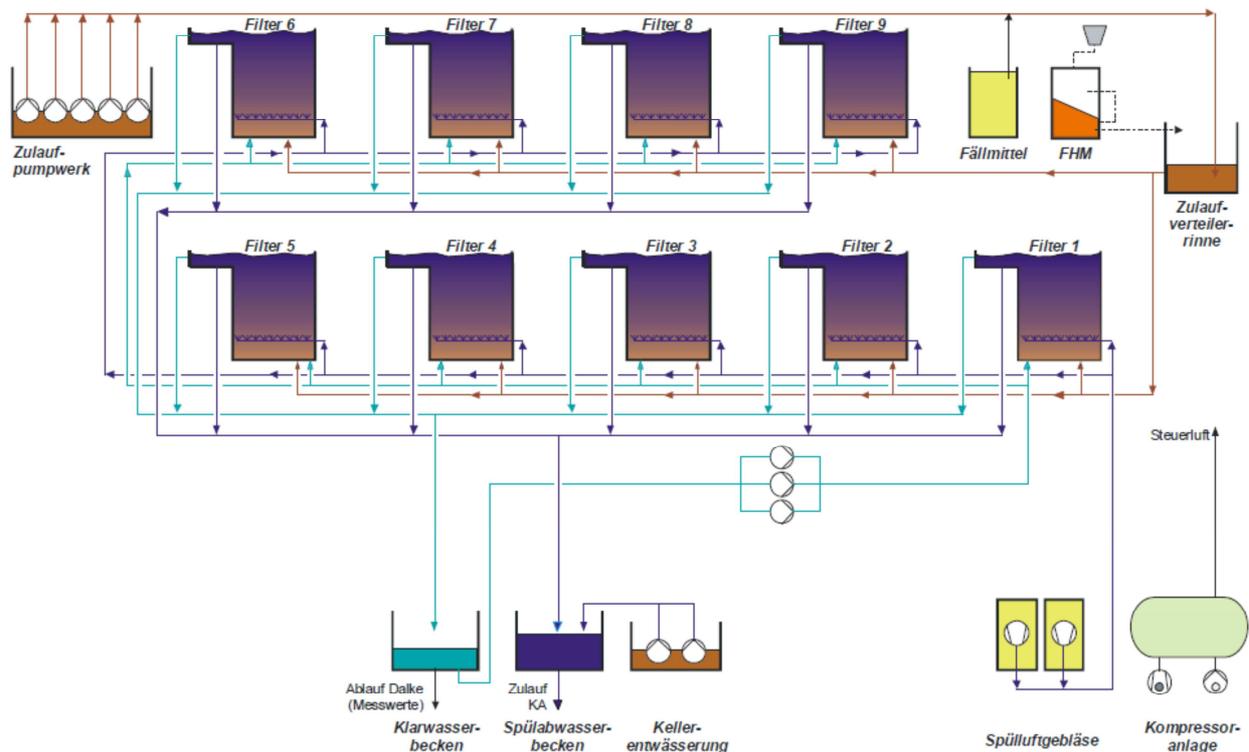


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Filtrationsstufe des Klärwerks Gütersloh Putzhagen (ATEMIS 2011)

3 Umbaumaßnahme für die Verfahrenskombination Flockungsfiltration und Adsorption in einer BIOFOR-Anlageneinheit

Die nachfolgende **Abbildung 3** (neue Rohrleitungen: Farbe Magenta) zeigt das Fließschema des realisierten Umbaukonzeptes für die Filterzellen mit GAK und deren Einbindung in die Infrastruktur der Flockungsfiltrationsstufe.

Die Details der aus dem Umbau resultierenden Verfahrensstufen und –folgen wurden in einem Blockschaltbild (Abbildung 4) vereinfacht dargestellt.

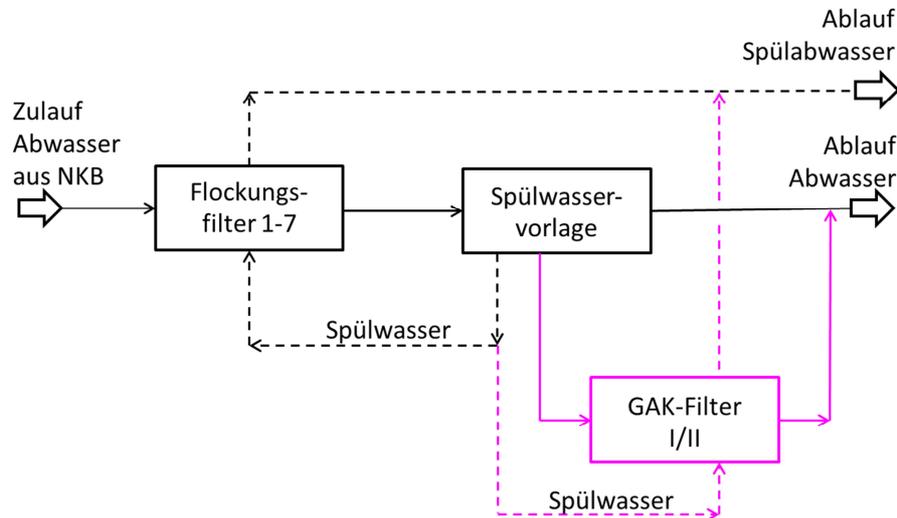


Abbildung 4: Blockschaltbild der umgebauten Anlage

Im Einzelnen wurden folgende Umbauten an der Anlagentechnik vorgenommen:

- Einbau einer neuen Pumpe zur Beschickung der GAK-Filter 1 (GA-1) und GAK-Filter 2 (GA-2).
- Bau einer separaten Rohrleitung zur Beschickung von GA- 1 und GA-2.
- Aufbau einer Versuchs-Filtersäule (Pilotmaßstab).
- Einbau einer Filtratablaufleitung in die Spülabwassersammelrinne von GA- 1 und GA-2.

Wie zuvor beschrieben wurde vorgesehen, die beiden Aktivkohle-Filterzellen GA-1 und GA-2 mit Filtrat aus den BIOFOR-Filtern zu beschicken. Hierzu wurde eine neue Beschickungspumpe installiert, die in der Lage ist, die maximale Beschickungsmenge beider Filter zur Verfügung zu stellen.

Nachfolgend sind in **Tabelle 1** die wesentlichen Kenndaten der Beschickungspumpe zusammengestellt:

Tabelle 1: Kenndaten der neuen Beschickungspumpe

Benennung	Spezifikation
Bauart	Kreiselpumpe
Fördermedium	Filtrat der BIOFOR-Filteranlage
Ausführung	Blockbauweise
Material Laufrad und Gehäuse	Grauguss EN-GJL-250/A48CL35B
Fördermenge max./nom.	450 m ³ /h / 420 m ³ /h
Förderhöhe	12 m
Pumpendrehzahl	1.450 1/min
Laufraddurchmesser	240 mm
Regelung	ungeregelt
Motor-Effizienzklasse	IE 3

Die Pumpe wurde im Anschluss an die vorhandenen Spülwasserpumpen im Pumpenkeller unmittelbar an der Spülwasserkammer aufgestellt. Zur Installation der Entnahmeleitung wurde eine neue Kernlochbohrung in der Beckenwand ausgeführt werden (siehe nachfolgende Abbildung).



Abbildung 5: Aufstellung der neuen Beschickungspumpe

Die neue Beschickungspumpe fördert das Filtrat der BIOFOR-Filtern über eine neue Rohrleitung der Nennweite DN 300 bis zum Sammelbalken des Rohrleitungssystems, welches im Zuge des vorangegangenen Projektabschnittes errichtet wurde. Von dort aus wurde das Rohrleitungssystem wie im vorangegangenen Projektabschnitt zur Beschickung von GA-1 und GA-2 genutzt. Die Fördermengen wurden strangweise erfasst und die gewünschte Fördermenge wurde mit Hilfe der vorhandenen Regelklappen eingestellt. Die Beschickung der Aktivkohlefilterzellen erfolgte ohne die Zugabe von Flockungshilfsmittel oder Fällmittel.

Parallel zu den großtechnischen Filterzellen wurde wie bereits im ersten Projektabschnitt eine Filtersäule aufgebaut, die ebenfalls mit Aktivkohle befüllt wurde (siehe **Abbildung 6**). Auch diese Filtersäule wurde mit dem Filtrat der vorgeschalteten Flockungsfiltration beschickt.



Abbildung 6: Aufstellung der Filtersäule (Kleinadsorber, AK) im Filtergebäude

Im Regelbetrieb der BIOFOR-Filteranlage wurden in der Vergangenheit alle Filtrate über die Filtratsammelrinne in die Spülwasservorlage geleitet. Von dort aus erfolgte zum einen die Entnahme der Filtrate zu Spülzwecken der BIOFOR-Filter. Zum anderen erfolgt von dort aus der Ablauf der Filtrate im Freigefälle über einen Überlaufschacht in den Ablaufkanal der Kläranlage. Um zu verhindern, dass die Filtrate von GA-1 und GA-2 mit den Filtraten der verbleibenden BIOFOR-Filter vermischt werden, wurde in der Spülabwasserrinne von GA-1 und GA-2 eine neue Ablaufleitung installiert. Über diese Ablaufleitung mit der Nennweite DN 300 konnten die Filtrate von GA-1 und GA-2 separat gefasst und direkt ohne den Umweg durch die Spülwasservorlage in den Überlaufschacht abgeleitet werden. Ein Vermischen mit den übrigen Filtraten und damit Rückführen im Rahmen der Filterspülung konnte dadurch vermieden werden.

Für den Fall der Filterspülung von GA-1 und GA-2 konnte die Ablaufleitung mittels Absperrarmatur verschlossen und die Spülabwässer wie gewohnt abgeleitet werden.

4 Optimierung der Nachklärung

Die Nachklärung des Hauptklärwerks Gütersloh-Putzhagen besteht aus 16 rechteckigen Becken mit einem Gesamtvolumen von 11.600 m³. Der Nachklärung ist die Flockungsfiltration nachgeschaltet. Bei der Nachklärung werden gelegentlich folgende Probleme festgestellt:

- kritisch hohe Schlammspiegellagen, insbesondere im Winter bei sehr hohen Schlammindizes (teilw. > 200 ml/g)
- deutlicher Flockenabtrieb und dadurch höhere Trübung des Klarwassers (vergleiche **Abbildung 7**)
- starke Schwimmschlamm Bildung (siehe **Abbildung 8**)
- hydraulische Ungleichverteilung



Abbildung 7: Schlammflocken am Einlauf der Nachklärung bei hydraulischer Niedriglast



Abbildung 8: Schwimmschlamm im Ablaufbereich der Nachklärung bei hydraulischer Niedriglast

Der nicht optimale Betrieb der Nachklärung führt zu einer hohen Belastung der nachgeschalteten Flockungsfilter mit partikulären Stoffen und beeinträchtigt möglicherweise die Eliminationsleistung der Flockungsfilter hinsichtlich CSB und Phosphor. Vor diesem Hintergrund wurde die Firma hydrograv GmbH mit einer strömungstechnischen Simulation (CFD-Simulation) beauftragt, um das Optimierungspotenzial der Strömungsverhältnisse in den Nachklärbecken zu ermitteln. Der Fokus lag dabei auf der Gestaltung des Einlaufbauwerkes.

Der derzeitige Einlauf der Nachklärbecken in der Kläranlage Putzhagen erfolgt über Stengeleinläufe (siehe **Abbildung 9**). Es konnte in der CFD-Simulation deutlich gezeigt werden, dass die Stengeleinläufe, die Stand der Technik der 1960er bis 90er Jahre waren, zu hydraulischen Defiziten im Einlaufbereich führen. Aufgrund der zu hohen Lage und der hohen Einströmgeschwindigkeiten in den Absetzraum ($v = 24 \text{ cm/s}$) wird der Schlamm direkt in den Klarwasserbereich eingetragen (fehlender Flockenfiltereffekt) und führt zu Dichtewasserfällen¹ sowie einem erhöhten Energieeintrag in das Becken.



Abbildung 9: Stengeleinläufe im Zulauf der Nachklärung

Hierdurch entsteht eine verstärkte Turbulenz und es werden zum einen Schlammflocken direkt ins Klarwasser eingetragen und zum anderen wird der Schlamm Spiegel destabilisiert. Die vorhandenen Prallteller tragen nicht zu einer Verbesserung der geschilderten Einströmsituation bei.

Durch die Destabilisierung des Schlammbedts wird verstärkt bereits eingedickter Schlamm wieder eingemischt. Die Becken haben darin intern eine bedeutend höhere Last zu bewältigen als extern zuströmt (und worauf Nachklärbecken normalerweise bemessen werden). Die interne Schlammvolumenbeschickung beim hydraulischen Hochlastfall beträgt in der Simulation $325 \text{ l/(m}^2\cdot\text{h)}$ und ist damit ca. 1,7-mal höher als die tatsächliche externe Schlammvolumenbeschickung von $195 \text{ l/(m}^2\cdot\text{h)}$.

Zur Verbesserung der Einlaufsituation wurde ein Konzept der starren Optimierung der Einlaufkonstruktion erarbeitet (siehe **Abbildung 10**), und probeweise in einem der Nach-

¹ Dichtewasserfälle: Durch den hohen Anteil an Abfiltrierbaren Stoffen (AFS) verhält sich das Wasser wie ein Fluid mit höherer Dichte, so dass es wie ein "Wasserfall" durch Zonen mit Klarwasser d. h. mit geringerer AFS-Konzentration abwärts strömt.

klärbecken umgesetzt. Hierzu wurde der Einlaufbereich um eine Umlenkkonstruktion an den Stengeleinläufen und eine Einlaufkammer mit Leitblechen erweitert (siehe **Abbildung 11**).

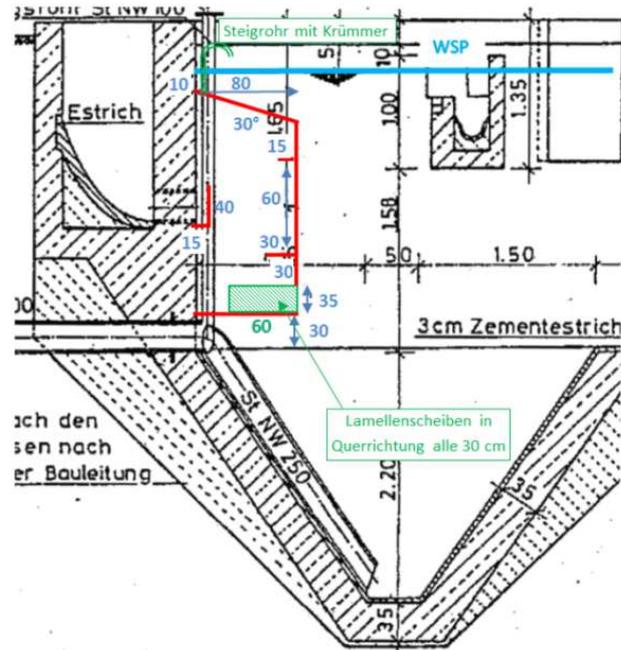


Abbildung 10: Konzept der starren Optimierung des Einlaufbauwerks in der Nachklärung



Abbildung 11: Neue Einlaufkonstruktion in einem Nachklärbecken

Diese starre Optimierung stellt hinsichtlich der Einlaufhöhe und Öffnungsweite einen Kompromiss zwischen hohen und niedrigen Belastungen dar. Daher wurde die Einlaufunterkante zugunsten hoher Belastungen 0,30 m über dem Beckenboden festgelegt. Damit wurde jedoch in Kauf genommen, dass sich bei niedrigen Belastungen und damit einhergehenden Schlammspiegellagen Dichtewasserfälle ausbilden, die das Schlammbett im Einlaufbereich destabilisieren und zu einem verstärkten Austrag von Feinstflocken in das Klarwasser führen können.

Um optimale energetische Verhältnisse zu erzielen, ist bei Trockenwetter eine geringere Öffnungsweite als bei Regenwetter sinnvoll. Da die Regenwetter-Belastungen als kritisch bezüglich Schlammabtrieb zu beurteilen sind, wurde die Öffnungsweite für Regenwetter auf 0,35 m optimiert.

Um Kurzschlussströmungen in der Einlaufkammer zu vermeiden, wurde an den Stengeleinläufen eine Umlenkkonstruktion errichtet, die den einlaufenden Volumenstrom nach oben lenkt. Die Einlauföffnung wurde in Querrichtung im Abstand von ca. 30 cm durch Lamellenscheiben aufgeteilt. Diese Lamellenscheiben verhindern, dass aus dem Einlaufbereich heraus so genannte kohärente großräumige turbulente Strukturen in das Nachklärbecken eindringen und dort die Schlammschichtung destabilisieren.

Nach der Optimierung der Einlaufkonstruktion in einem Nachklärbecken (NK 2.3) wurden Trübungsmessungen in diesem und im Vergleich dazu in einem nicht optimierten Nachklärbecken (NK 2.4) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 12** grafisch dargestellt. Diese erste Messung zeigt leider keine Verbesserung im optimierten Becken gegenüber dem Referenzbecken. Die Ursachen werden zurzeit analysiert. Die weitere Vorgehensweise wird noch mit dem Betreiber abgestimmt.

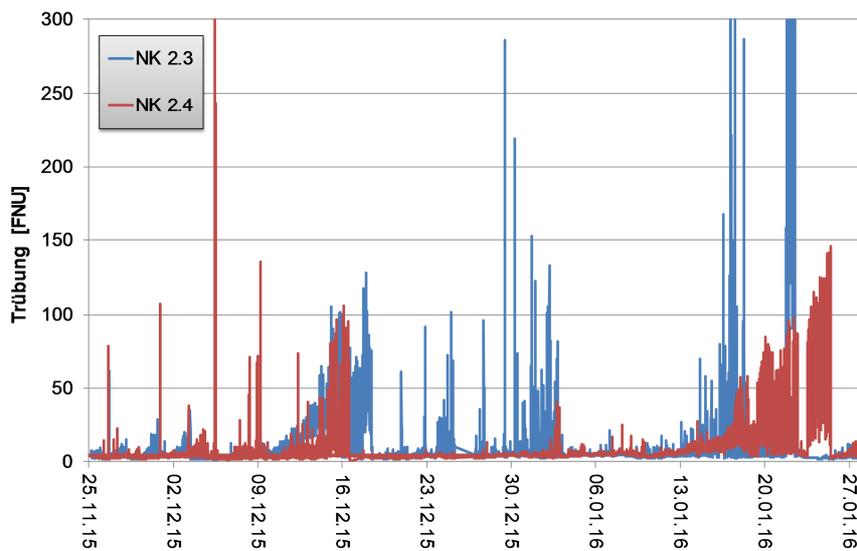


Abbildung 12: Trübung im Ablauf der Nachklärbecken NK 2.3 (im Einlaufbereich optimiert), und NK 2.4 (Referenzbecken)

5 Aufbau und Verfahrensparameter der Aktivkohleadsorber

5.1 Auswahl einer wirtschaftlichen GAK

Für vergleichende Untersuchungen der Leistungsfähigkeit und der Wirtschaftlichkeit einer reaktivierten und einer frischen Aktivkohle wurden die beiden Versuchsfilter (siehe **Abbildung 13**) zwar mit dem gleichen Aktivkohleprodukt befüllt, doch war das Eine bereits zuvor auf dieser Kläranlage bis zu ihrer Erschöpfung im Einsatz und wurde anschließend durch den Hersteller reaktiviert. Die Zweite war eine neuwertige Frischkohle.

Testreaktivierungen an Proben der erschöpften Aktivkohlen aus Projektphase 1 und Isothermen mit diesen Reaktivaten konnten zeigen, dass bei dieser Applikation die GAK vom Typ Hydriffin AR (Donau Carbon GmbH) im Vergleich zum Typ AquaSorb 5000 (Jacobi Carbons GmbH) das größere Potenzial besaß, einen wirtschaftlicheren Betrieb von Festbettadsorbern zu eröffnen. Für den GAK-Typ AquaSorb 5000 konnten zudem bereits in einem Projekt beim Abwasserverband Obere Lutter die Unterschiede zwischen Frischkohle und Reaktivat im großtechnischen Betrieb untersucht werden. Daher wurde hier dieses Produkt Hydriffin AR und dessen Reaktivat (inklusive ergänztem Frischkohleanteil) in Verlustanteils infolge Reaktivierung (Make-up) für den großtechnischen Versuch in

Projektphase 2 verwendet. Folgende technische Daten geben den Betaufbau beider Adsorber wieder:

obere Schicht

- GAK-Typ: Hydriffin AR (Donau Carbon GmbH), aus den Rohstoffen Braun- und Steinkohle, 8 x 30 Mesh (Korndurchmesser 0,63 - 2,36 mm)
- Schüttdichte nach Spülung: 350 kg/m³
- Schütthöhe: 2,25 m

untere Schicht

- GAK-Typ: Epibon (Donau Carbon GmbH), aus dem Rohstoff Lignite
4 x 8 Mesh (Korndurchmesser 2,36 - 4,75 mm)
- Schüttdichte: 300 kg/m³
- Schütthöhe: 0,50 m

GAK-Schüttvolumen Filterzelle: $42 \text{ m}^2 \times 2,75 \text{ m} = 115,5 \text{ m}^3$

GAK-Masse einer Filterzelle: $42 \text{ m}^2 \times (2,25 \text{ m} \times 0,35 \text{ t/m}^3 + 0,5 \text{ m} \times 0,3 \text{ t/m}^3)$
= 39,4 t

Der Zweischichtaufbau wurde gewählt, um einen Korndurchtritt durch die Filterdüsen mit einer Schlitzweite von 2,3 mm zu unterbinden, was im ersten Projektteil erfolgreich getestet wurde. Als Alternative hätten alle Filterzellen bei der Umrüstung auf den Adsorptionsbetrieb mit neuen Düsen bestückt werden müssen. Die Verwendung von Filterkies als Stüttschicht ist hingegen nicht möglich, da dieser beim Ausbau der GAK zumindest in geringen Teilmengen mit erfasst und dann eine Reaktivierung unmöglich machen würde.



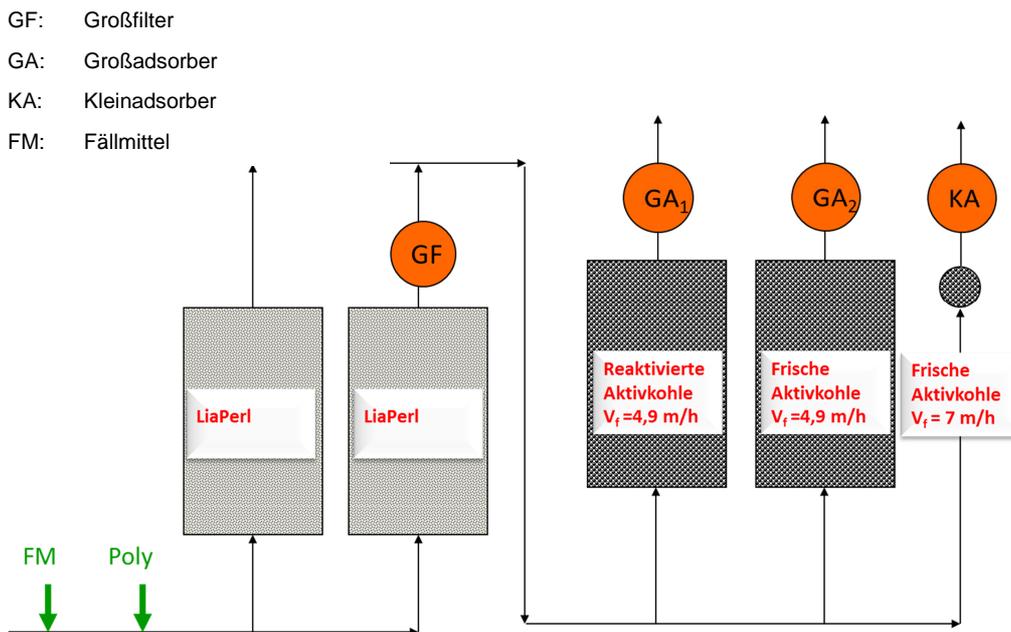
Abbildung 13: Blick auf GA-1 (oben) und GA-2 (unten) nach Befüllung mit Aktivkohle

5.2 Versuchsaufbau und -parameter

Die Beschickung beider Adsorber erfolgte nicht wie in Projektphase 1 mit Ablauf der Nachklärung, sondern mit Filtrat der BIOFOR-Filter der Flockungsfiltration. Dafür wurde eine neue Pumpe installiert, die Filtrat der BIOFOR-Filter unter den Düsenboden beider Adsorber für die maximale Aufbereitungsmenge fördert. Die Fördermengen werden strangweise erfasst und mit Hilfe der vorhandenen Regelklappen eingestellt. Die Beschickung der Adsorber erfolgt ohne Zugabe von Fäll- oder Flockungsmittel.

Parallel zu den beiden Großadsorbern (GA) wurde wie in Projektphase 1 ein Kleinadsorber (KA) mit Frischkohle des gleichen GAK-Typs betrieben (Filtersäule mit einem Innendurchmesser von $d_i = 190 \text{ mm}$ und einer Filterfläche von $A_i = 0,0283 \text{ m}^2$), um den Einfluss einer höheren Filtergeschwindigkeit bzw. geringerer Leerbettkontaktzeiten untersuchen zu können. Die Betttiefe des KA beträgt wie bei den GA 2,75 m und entspricht somit dem großtechnischen Maßstab.

Das Verfahrensschema für alle Versuche inklusive der Kleinfiltersäule und der genutzten Probenahmestellen ist in Abbildung 14 dargestellt. Sowohl die beiden Großadsorber als auch die Kleinfiltersäule wurden am 5. Januar 2015 in Betrieb genommen.



2

Abbildung 14: Verfahrensschema für die Versuche im groß- und halbtechnischen Maßstab inklusive der Probenahmestellen (●) und mit den im Mittel realisierten Filtergeschwindigkeiten

Als wesentliches Auslegungskriterium für den Betrieb eines Festbettadsorbers ist die Aufenthaltszeit des Wassers im Schüttvolumen des Adsorberbetts zu nennen, welche die Kontaktzeit zwischen Wasser und GAK vorgibt und entsprechend die Kinetik für den Stoffübergang limitiert. Die Leerbett-Kontaktzeit (Empty Bed Contact Time, EBCT) ergibt sich somit als Quotient von Betthöhe und Filtergeschwindigkeit. Wirtschaftlich sinnvolle Leerbett-Kontaktzeiten liegen zwischen 10 und 30 Minuten bei Filtergeschwindigkeiten zwischen 5 und 15 m/h (Benstöm et al., 2016). Bei einer Betthöhe von 2,75 m und einer Filtergeschwindigkeit von 5 m/h beträgt die Leerrohrkontaktzeit 33 Minuten. Da beide großtechnischen Adsorber aus der Filtratkammer der Flockungsfiltration beschickt wurden, diese aber gleichzeitig zur Spülwasserbevorratung für alle Filterzellen (Flockungsfilter und Adsorber) dient, ergab sich in den Sommermonaten eine Konkurrenzsituation zwischen dem Bedarf an Spülwasservolumen und dem Volumenstrom für die Adsorberzuläufe. Dies führte zu der Entscheidung, im Zeitraum 04.05.15 bis 07.09.2015 die Filtergeschwindigkeit der Großadsorber und somit deren Zulaufvolumenstrom zu halbieren. Mit einer Filtergeschwindigkeit von 2,5 m/h betrug die Leerrohrkontaktzeit in dieser Phase 66 Minuten.

Um den Einfluss verschiedener Filtergeschwindigkeiten auf den Adsorptionsprozess trotz schwankender Zusammensetzung des Zulaufs exakt vergleichen zu können, war ein

Parallelbetrieb von zwei Adsorbern mit identischem Betaufbau und identischer Aktivkohle unerlässlich. Daher wurde parallel zum GA mit der frischen GAK ein kleintechnischer Adsorber (KA) im Pilotmaßstab mit gleicher GAK-Schüttung betrieben. Die Betriebseinstellungen während des Versuchsbetriebes wurden für die GA in **Tabelle 2** und für den KA in **Tabelle 3** zusammengefasst.

Tabelle 2: Betriebsdaten der Großadsorber

Zeitraum	Filtergeschwindigkeit [m/h]	Mittlerer Durchsatz [m ³ /d]	Verweilzeit [min]	Spülintervall [1/Woche]
05.01. -03.05.2015	5,0	4.800	33	2
04.05. - 07.09.2015	2,5	2.400	66	1
seit 08.09.2015	5,0	4.800	33	2

Tabelle 3: Betriebsdaten des Kleinadsorbers

Zeitraum	Filtergeschwindigkeit [m/h]	Mittlerer Durchsatz [m ³ /d]	Verweilzeit [min]	Spülintervall [1/Woche]
05.01. - 02.02.2015	3,5	2	47	2
03.02. - 31.07.2015	6	4	27	2
01.08. - 30.09.2015	10	7	16	2
01.10. - 30.11.2015	12	8	14	2
01.12. - 31.12.2015	10	7	16	2

Die Dauer eines Filtrationszyklus bis zur Spülung richtet sich nach der Geschwindigkeit des auftretenden Druckverlustanstiegs. Durch den freien Überlauf der oben offenen Großfilter und Adsorber lässt sich der Druckverlust aus dem Gesamtdruck im Filterzulauf abzüglich des hydrostatischen Drucks aus geodätischer Höhendifferenz zwischen Messstelle Zulauf und Überlaufkante ermitteln. Ein sinnvoller Maximaldruck im Zulauf, der den Filtrationsprozess stoppt und die Spülung auslöst, wurde nach den ersten Filterläufen bestimmt. Hierbei sind die Kriterien Pumpenergie, Verbackungsgefahr in den Filterschüttungen und Störung der Sorptionsfronten im Aktivkohlebett gegeneinander abzuwiegen. Die einzelnen Spülparameter

(Schrittfolge, Volumenströme, Zeitintervalle) wurden im ersten Projekt detailliert optimiert und in dieser Konfiguration in dieses Folgeprojekt übernommen.

6 Auswahl der Parameter für das wasserchemische Monitoring

6.1 Routineparameter des Betriebslabors

Neben ausgewählten Spurenstoffen wurden wie in Projektphase 1 auch die täglich ermittelten Analysenparameter des Betriebslabors des Klärwerks Putzhagen in die Untersuchungen des Betriebsverhaltens der Adsorber mit einbezogen. Ziel ist es zu bewerten, welche DOC- und CSB-Frachten in Abhängigkeit des Abflusses auf eine zukünftige Adsorberstufe gelangen, wie die Filtrationsgeschwindigkeit darauf abgestimmt werden kann und welche Laufzeiten bis zu einer Regeneration der Aktivkohle hieraus resultieren.

Folgende Parameter wurden in 24-h-Mischproben i. d. R. werktäglich untersucht:

- CSB (filtriert)
- DOC
- P_{ges}
- Trübung

6.2 Organische Mikroverunreinigungen

Die Auswahl der zum Monitoring der Adsorber zu analysierenden organischen Mikroverunreinigungen in Projektphase 1 basierte auf einem umfassenden Screening des Kläranlagenablaufes und wurde in dieser Projektphase 2 fortgeführt. Alle analysierten Parameter sind in **Tabelle 4** aufgeführt. Dafür wurden in regelmäßigen Abständen 72-h-Mischproben an den in **Abbildung 14** gekennzeichneten Stellen entnommen und im organischen Labor des IWW analysiert (gelöste Phase, da die Proben ohnehin nahezu feststofffrei waren).

Die einzelnen für die Probenahmestellen ermittelten Messdaten sind chronologisch in der Tabelle des Anhang 0 aufgelistet:

Tabelle 4: Parameterspektrum für das Monitoring org. Spurenstoff der Adsorber

Parameter(gruppe)	Einzelsubstanzen in der Gruppe
med. Gruppe Antibiotika	Makrolide und Sulfonamide Chloramphenicol Clarithromycin Dehydrato-erythromycin Erythromycin Roxithromycin Sulfadiazin Sulfadimidin Sulfamethoxazol Trimethoprim N4-Acetylsulfamethoxazol
med. Gruppe Betablocker	Atenolol Betaxolol Bisoprolol Metoprolol Pindolol Propanolol Sotalol
med. Gruppe sonstige Humanpharmaka	Analgetika / Antiphlogistika Acetylsalicylsäure Diclofenac Fenoprofen Ibuprofen Indometacin Ketoprofen Naproxen Phenacetin Phenazon Lipidsenker Bezafibrat Clofibrinsäure Etofibrat Fenofibrat Gemfibrozil Antiepileptika Carbamazepin Durchblutungsfördernde Mittel Pentoxifyllin Psychopharmaka Diazepam Oxazepam
med. Gruppe Röntgenkontrastmittel	Amidotrizoesäure Iohexol Iomeprol Iopamidol Iopromid Ioxaglinsäure Ioxithalaminsäure Iothalamicsäure
Industrie-/Haushaltschemikalien	Benzotriazol Methylbenzotriazol TMDD (2,4,7,9-Tetramethyl-5-decin-4,7-diol) - Tensid
Pflanzenschutzmittel	Terbutryn

7 Ergebnisse wasserchemischer Untersuchungen

7.1 Filtratqualität der Adsorber

7.1.1 Standardparameter

CSB_{filtriert}

Die CSB-Konzentration im Zulauf der Flockungsfiltration (Zulauf Filtration), in deren Sammelablauf (Zulauf Adsorption) sowie in den Abläufen der beiden Großadsorber (GA-1 [Reakt.] sowie GA-2 [frisch]) und des Kleinadsorbers (KA [frisch]) wurde in **Abbildung 15** dargestellt. Wie die Kurvenverläufe belegen, findet durch die Flockungsfiltration keine signifikante Elimination des gelösten CSB statt, so dass dessen Konzentration im Zulauf der Adsorber überwiegend im Bereich zwischen 30 und 35 mg/l liegt. Der zeitliche Verlauf der mittleren CSB-Konzentration im Ablauf der beiden GA ist fast identisch und steigt in den ersten drei Monaten stetig von ca. 8 auf etwa 25 mg/l. Danach fällt die Konzentration in den Sommermonaten wieder leicht bis auf ca. 20 mg/l und folgt somit fast äquidistant dem ebenfalls etwas niedrigeren Zulaufniveau in dieser Zeit. Neben der geringeren Zulaufkonzentration nimmt hier auch die zwischen Anfang Mai und Anfang September halbierte Filtergeschwindigkeit Einfluss (die Halbierung war der insgesamt geringen Abflussmenge und einer dabei noch ausreichenden Bereitstellung von Spülwasser für alle Filter geschuldet). Ab September steigt mit der Rückkehr zur höheren Filtergeschwindigkeit die Ablaufkonzentration langsam aber kontinuierlich bis Mitte Oktober auf 25 bis 30 mg/l an. Zwischen frischer (GA-2) und reaktivierter (GA-1) Aktivkohle ist kein signifikanter Unterschied im CSB-Verlauf zu erkennen.

Die CSB-Konzentration im Ablauf des KA ist in den ersten drei Monaten mit der beider GA identisch, weist im weiteren Verlauf aber stärkere Schwankungen auf und bewegt sich dann ebenfalls analog zur Zulaufkonzentration, jedoch auf einem etwas höheren Konzentrationsniveau als der Ablauf der GA. In der Darstellung der auf den Zulauf normierten Ablaufkonzentrationen der Adsorber c/c_0 (siehe **Abbildung 15**) wird deutlich, dass ein CSB-Durchbruch von ca. 80 % sowohl in beiden GA als auch im KA bereits nach ca. 4.000 aufbereiteten Bettvolumina (BV) erreicht wird. Ab ca. 10.000 BV lag der CSB-Durchbruch der GA bei etwa 85 % und der des KA bereits bei 90 bis 95 % und vereinzelt darüber.

Die in **Abbildung 16** besonders gut zu erkennende leichte Verbesserung der CSB-Elimination (Verringerung von c/c_0) in der fast schon erreichten Plateauphase für die GA in den Monaten Mai bis September (entspricht 5.000 bis 7.600 BV) kann mit hoher

Wahrscheinlichkeit auf die in dieser Zeit halbierte Filtergeschwindigkeit zurückgeführt werden (vgl. **Tabelle 2**).

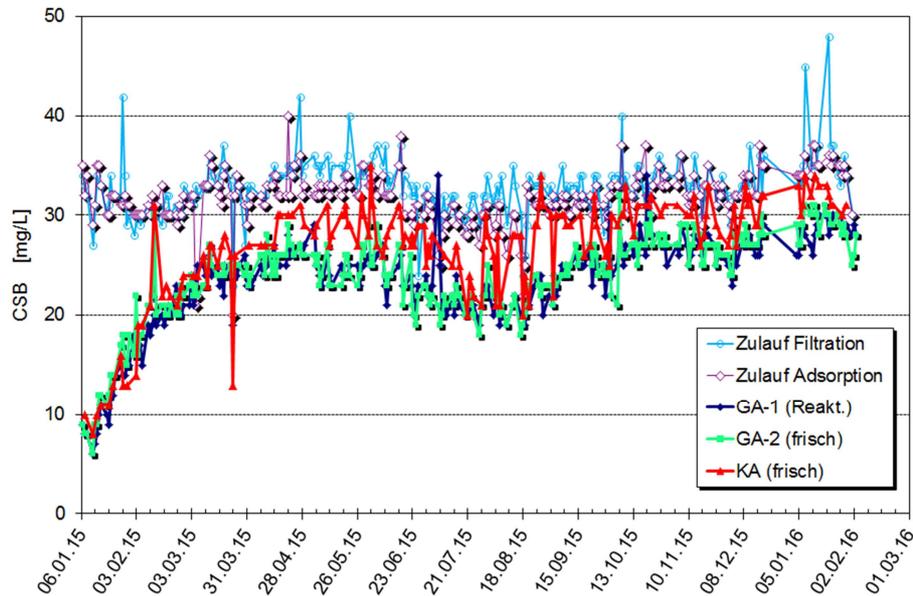


Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der CSB-Konzentrationen ($CSB_{\text{filtriert}}$)

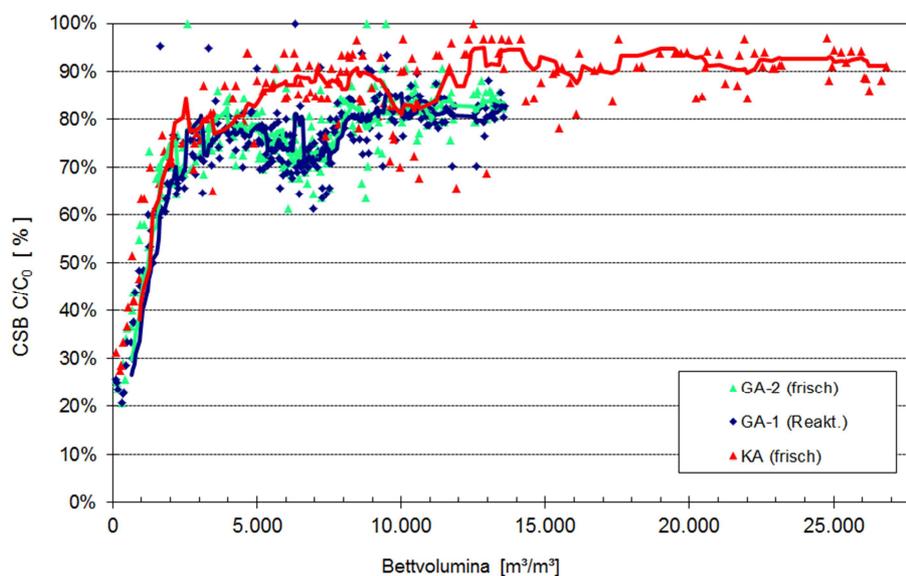


Abbildung 16: Abhängigkeit der auf den Zulauf normierten Filtratkonzentrationen c/c_0 der Adsorber für den Parameter $CSB_{\text{filtriert}}$ vom jeweils durchgesetzten Bettvolumen (BV)

DOC

Die DOC-Konzentration im Zulauf der Adsorber schwankt stärker als die des filtrierten CSB mit Werten zwischen 6 und 16 mg/l (siehe **Abbildung 17**). Betrachtet man die Schwankungsbreite innerhalb der einzelnen Wochen, so beträgt sie etwa 5 bis 7 mg/l. Der Mittelwert dieses Korridors steigt innerhalb der Messzeit für den DOC kontinuierlich um etwa 2 mg/l an. Die Ablaufkonzentration der drei Adsorber verläuft von anfangs 2 mg/l, die einem extrem schlecht oder nicht adsorbierbaren DOC-Anteil zuzuordnen sind, linear schnell ansteigend. Ein DOC-Durchbruch von 80 % war bereits nach ca. 2.000 BV erreicht (**Abbildung 18**). Da bis 4.000 BV keine Veränderungen im Ablauf der Adsorber mehr zu verzeichnen waren, wurde auf eine weitere Analyse dieses Parameters verzichtet.

Zwischen frischer (GA-2) und reaktivierter (GA-1) Aktivkohle ist auch hinsichtlich ihres Adsorptionsverhaltens gegenüber den Stoffen des Summenparameters DOC kein wesentlicher Leistungsunterschied zu erkennen. Der KA erreicht hingegen aufgrund der höheren Filtergeschwindigkeit und durchgesetzten Bettvolumina in den 6 Wochen zwischen Anfang März und Ende April eine leicht höhere DOC-Konzentration im Ablauf (vgl. **Abbildung 17**) und eine entsprechend geringere bzw. fast erschöpfte Eliminationsleistung (mit einem mittleren $c/c_0 \approx 100 \%$, wie aus **Abbildung 18** ersichtlich ist).

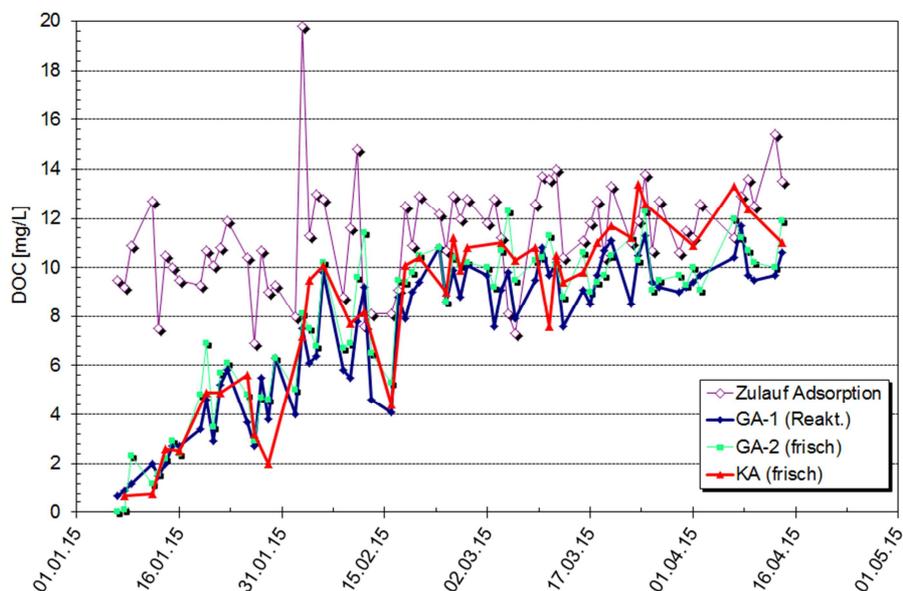


Abbildung 17: Zeitlicher Verlauf der DOC-Konzentrationen

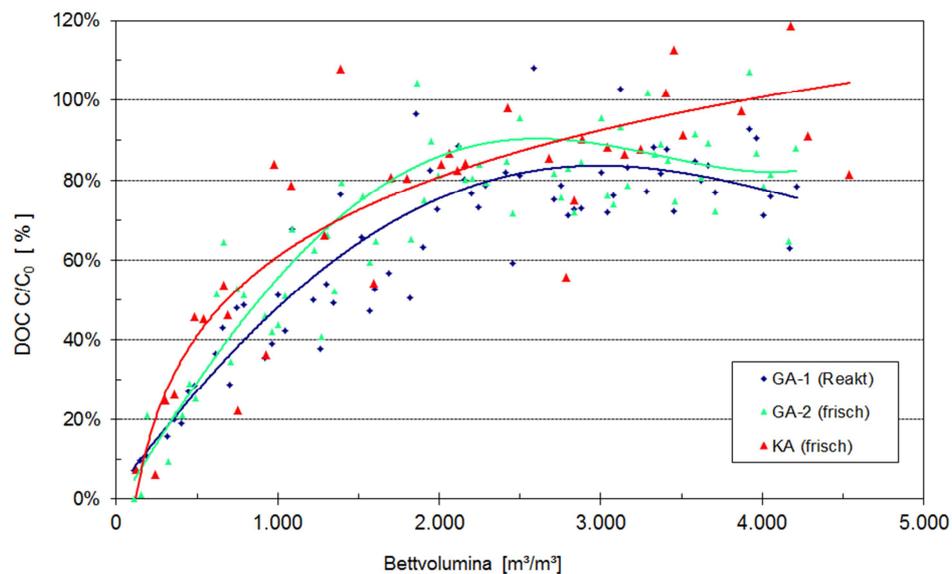


Abbildung 18: Abhängigkeit der auf den Zulauf normierten Filtratkonzentration c/c_0 der Adsorber für den Parameter DOC vom durchgesetzten Bettvolumen

Phosphor (P_{ges})

Die Konzentration an P_{ges} im Zulauf zur Flockungsfiltration lag in den Monaten Januar bis April überwiegend zwischen 0,4 und 1 mg/l (siehe **Abbildung 19**). Ab Mitte April stieg diese Konzentration auf Werte zwischen 1,0 und 1,6 mg/l. Ab Mitte August lagen die Werte überwiegend zwischen 0,8 und 1,4 mg/l. Trotz der unterschiedlichen mittleren Niveaus weisen die Konzentrationen der drei genannten Zeiträume also eine fast identische Schwankungsbreite auf.

Die Flockungsfiltration senkt die Konzentration an 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 Spitzen auf, die vereinzelt oberhalb des Grenzwertes für den Kläranlagenablauf von 0,7 mg/l P_{ges} liegen. In den Adsorbern findet in Bezug auf den Ablauf der Flockungsfiltration noch eine Halbierung der mittleren P_{ges} -Konzentration statt. Beide GA verhalten sich auch hierbei nahezu identisch. Die Adsorber tragen somit dazu bei, den geforderten Grenzwert des Kläranlagenablaufes von 0,7 mg/l P_{ges} 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 Ablaufkonzentration

der Adsorber für P_{ges} gegen Ende der Adsorberstandzeit bis auf das Zulauf-Niveau (entspricht dem Ablauf der 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 in Schüttungen aus GAK 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.

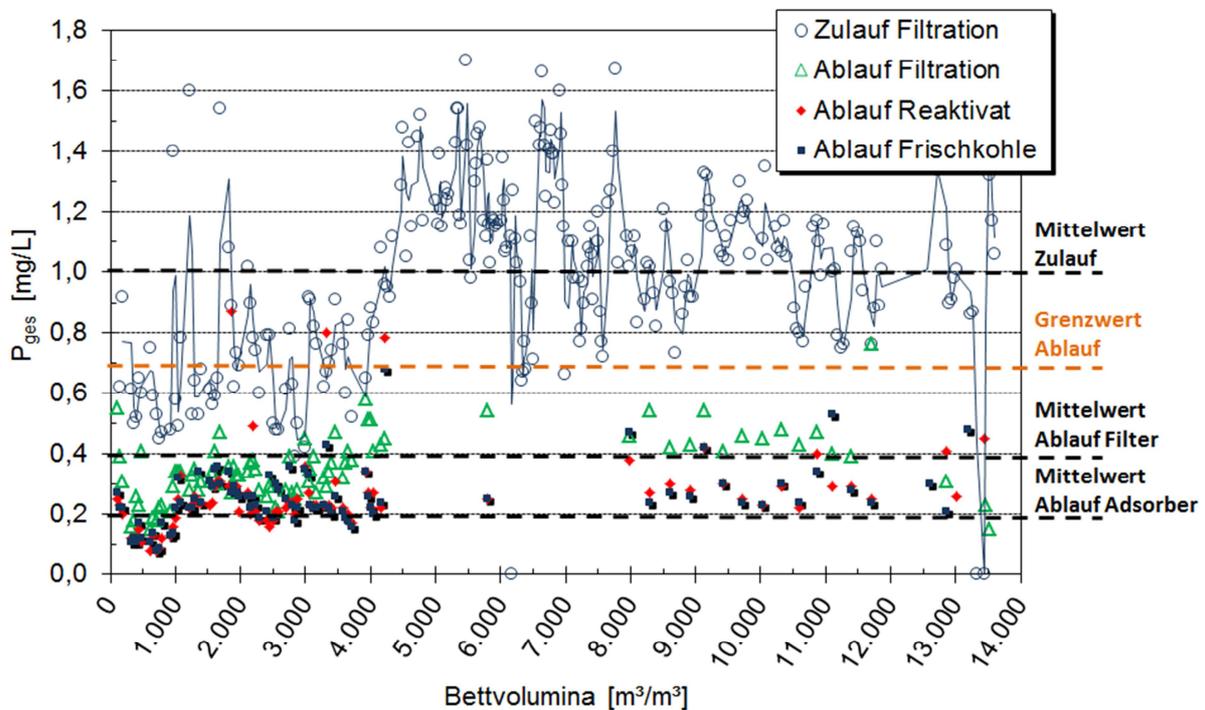


Abbildung 19: Verlauf der P_{ges} -Konzentration im Zu- und Ablauf der Flockungsfiltration sowie in den Abläufen der Adsorber als Funktion der durchgesetzten Bettvolumina

7.1.2 Organische Mikroverunreinigungen

Die Auswahl der für ein Monitoring der Adsorber zu analysierenden gelösten organischen Mikroverunreinigungen (siehe **Tabelle 5**) basiert auf einem umfassenden Screening des Kläranlagenablaufes und beinhaltet:

- aus dem medizinischen Bereich 43 Einzelsubstanzen der Stoffgruppen Antibiotika, Betablocker, Analgetika/Antiphlogistika, Lipidsenker, Antiepileptika, Psychopharmaka, durchblutungsfördernde Mittel und Röntgenkontrastmittel
- aus der Gruppe der Industrie- und Haushaltchemikalien: Benzotriazol und dessen Derivate sowie TMDD
- das Pflanzenschutzmittel 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 5 mit Mittelwert, Median, Maximum, Minimum und Nachweisgrenze angegeben. Konnte ein Spurenstoff in einer Probe nicht nachgewiesen werden, so wurde zur Berechnung einer erzielten Eliminationsleistung seine halbe Nachweisgrenze angesetzt.

In Abbildung 20 wurde beispielhaft für sechs Spurenstoffe ihre Elimination in beiden Großadsorbern jeweils nebeneinander in Abhängigkeit der durchgesetzten Bettvolumina dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass mit der reaktivierten Aktivkohle über den gesamten Versuchszeitraum und den dabei durchgesetzten Bettvolumina hinweg für alle nach Tabelle 5 untersuchten und nachweisbaren Stoffe die gleichen Ergebnisse erzielt wurden wie mit der frischen Kohle.

Dies ist ein unerwartet gutes Ergebnis, da die Jodzahl, als im Markt etablierte Maßzahl für die Adsorptionskapazität einer Aktivkohle, bei der Frischkohle mit einem Wert von 910 mg Jod/g (gemessen mittels DIN-/ASTM-Verfahren) über derjenigen des Reaktivats (741 mg Jod/g) lag. Inklusive Make-up-Anteil von etwa 10 % ergibt sich eine Jodzahl von lediglich knapp 760 mg Jod/g (hierbei bleibt die frische Aktivkohle der GAK-Stüttschicht allerdings unberücksichtigt). Dieses Ergebnis stützt die in vielen F+E-Projekten gemachte Erfahrung, dass die Jodzahl zwar ein geeigneter Parameter ist, um den Aktivierungsgrad einer GAK zu bestimmen, ihre Aussagekraft in Bezug auf die maximale Adsorptionskapazität – selbst für das hierbei eingesetzte Element Jod – oder das Leistungsvermögen einer GAK für konkrete Applikationen ist aber starken Einschränkungen unterworfen (Möller et al. 2014).

Tabelle 5: Statistische Kenngrößen der 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
Iothalaminsäure	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

Das hohe Leistungsvermögen des Reaktivats eröffnet die Möglichkeit einer Reduzierung der Betriebskosten für eine solche Verfahrensstufe um gut 20 %, entsprechend dem Preisunterschied zwischen frischer und reaktivierter GAK inklusive Make-up. Bei den hier eingesetzten Adsorberschüttungen ist jedoch noch zu berücksichtigen, dass neben dem Make-up-Anteil auch eine 0,5 m hohe Stüttschicht aus frischer grobkörniger GAK (vom Typ Epibon) auf dem Düsenboden zu Einsatz kommt, was den Kostenvorteil in dem hier diskutierten konkreten Prozess auf etwa 17 % leicht schmälert.

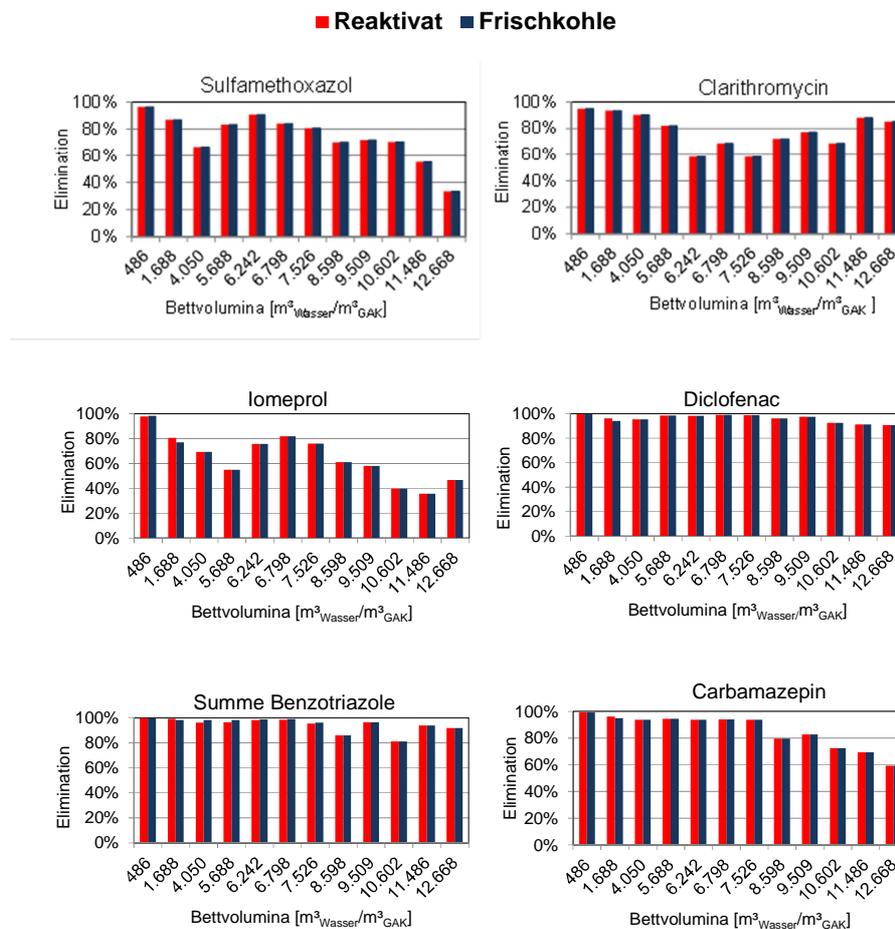


Abbildung 20: Vergleich der Eliminationsleistung bereits in Projektphase 1 eingesetzter und danach reaktiverter Aktivkohle (Reaktivat in GA-1) mit frischer Aktivkohle gleichen Typs (Frischkohle in GA-2) für ausgewählte Spurenstoffe

Da beide Aktivkohlen ein nahezu identisches Eliminationsverhalten für alle untersuchten Spurenstoffe zeigen, werden nachfolgend nur die Daten für die frische Aktivkohle stellvertretend für beide Adsorber verwendet. Obwohl bereits nach relativ kurzer Standzeit der Adsorber eine nahezu vollständige CSB-Beladung der Aktivkohle erreicht ist (vgl.

Abbildung 16), findet nach fast 13.000 BV für die Spurenstoffe Atenolol, Bezafibrat, Bisoprolol, Diclofenac, Metoprolol, Naproxen, Oxazepam, Roxithromycin, die Summe der Benzotriazole und Trimethoprim noch eine Elimination von über 80 % statt, wie in **Abbildung 21** ersichtlich ist. Vereinzelte Ausreißer der Elimination bis auf die Nulllinie sind reine Folge der Berechnungsmethode im Falle von Sprüngen bei den Zulaufkonzentrationen bis an die / bis unter die Nachweisgrenze.

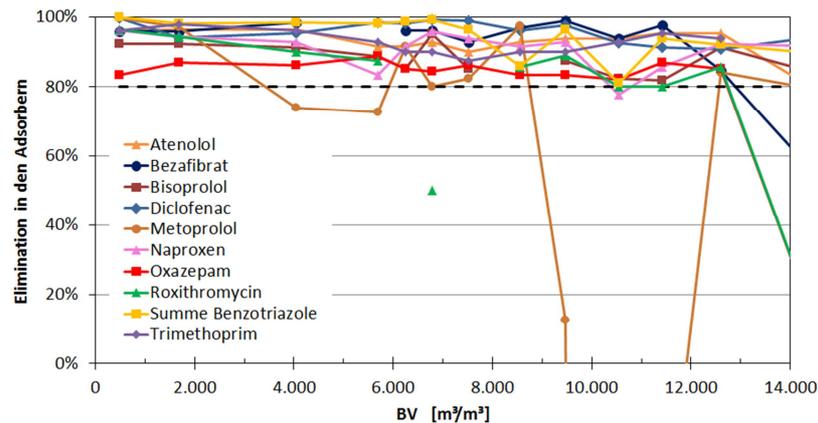


Abbildung 21: Eliminationsverhalten für Spurenstoffe, die bis zum Ende des Versuchszeitraumes (nach ca. 13.000 BV) noch mindestens zu 80 % eliminiert werden

Die in **Abbildung 22** gruppierten und dargestellten Stoffe werden 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 stark von der Zulaufkonzentration geprägt, die nach knapp 5.700 BV kontinuierlich abnimmt, so dass infolge die Elimination in beiden Adsorbentien kontinuierlich bis auf 60 % sinkt.

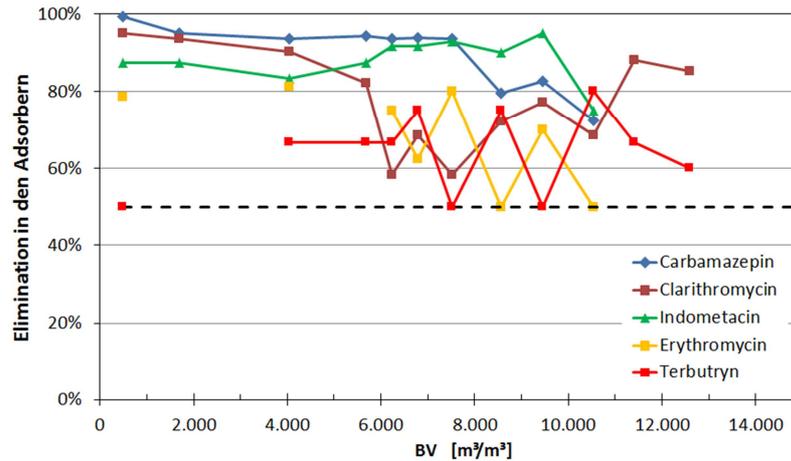


Abbildung 22: Eliminationsverhalten für Spurenstoffe, die bis zum Ende des Versuchszeitraumes (nach ca. 13.000 BV) rechnerisch noch mindestens zu 50 % eliminiert werden, doch tatsächlich (bis auf Carbamazepin) in den Filtraten nicht mehr nachweisbar waren

Eine weitgehende Erschöpfung der GAK war mit einer Restelimination von weniger als 50 % nach ca. 13.000 BV für die Röntgenkontrastmittel Iohexol, Iopamidol, Iomeprol sowie für Sulfamethoxazol, TMDD und Terbutryn erreicht (siehe **Abbildung 23**). Iopromid war hingegen auch in der Laufzeit mit hohen durchgesetzten Bettvolumina in den Filtraten nicht nachweisbar. Leichte kurzzeitige Chromatographieeffekte mit einer Stoffverdrängung vom Aktivkohlekorn ins Filtrat traten bei Iopamidol und auch länger anhaltend in Abhängigkeit schwankender Zulaufkonzentrationen bei TMDD auf.

Insbesondere die Stoffe in **Abbildung 22** aber teilweise auch in **Abbildung 23** waren häufig schon im Zulauf in nur geringen Konzentrationen vorhanden und im Ablauf der Adsorber nicht mehr nachweisbar. In diesem Fall geht die Konzentration des Ablaufes mit der Hälfte der Nachweisgrenze in die Berechnung der Elimination ein. In **Abbildung 24** wurde zur Verdeutlichung des Sachverhalts die Ablaufkonzentration der Adsorber für die betroffenen Stoffe dargestellt und ihre Nachweisgrenzen in **Tabelle 5** angegeben. Möglicherweise wären für diese Stoffe bei einer niedrigeren Nachweisgrenze deutlich höhere Eliminationen nachweisbar.

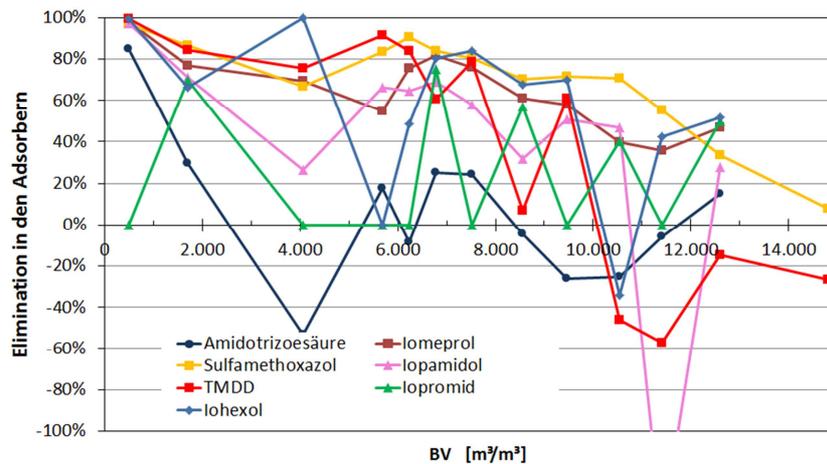


Abbildung 23: Eliminationsverhalten für Spurenstoffe, deren Elimination am Ende des Versuchszeitraumes (nach ca. 13.000 BV) weniger als 50 % beträgt und die zum Teil wieder von der GAK ins Filtrat freigesetzt werden.

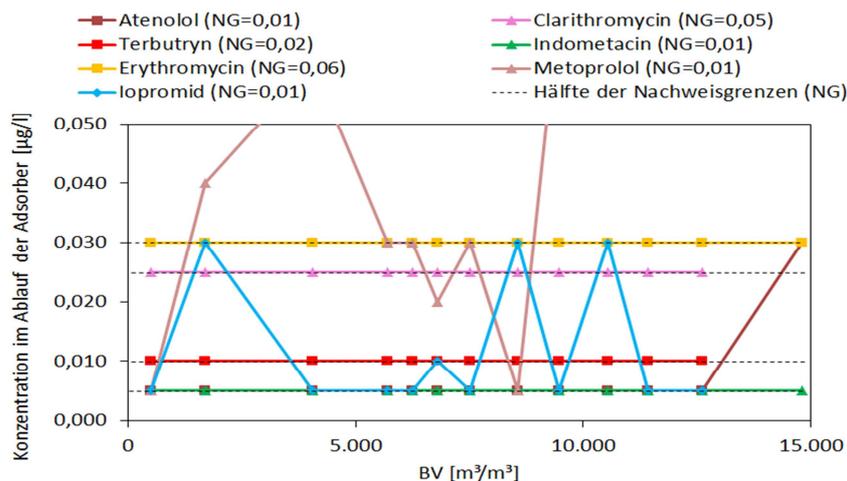


Abbildung 24: Beschickung der Adsorber mit Spurenstoffen, deren Konzentration im Ablauf der Adsorber häufig oder ausschließlich unterhalb ihrer Nachweisgrenze lag

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 BV in den Adsorbieren durch eine Halbierung der Filtergeschwindigkeit auf 2,5 m/h erreicht wurde, erbrachte keine erkennbaren Vorteile in Bezug auf die Spurenstoffelimination.

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 (vgl. GA mit KA in Abbildung 25).

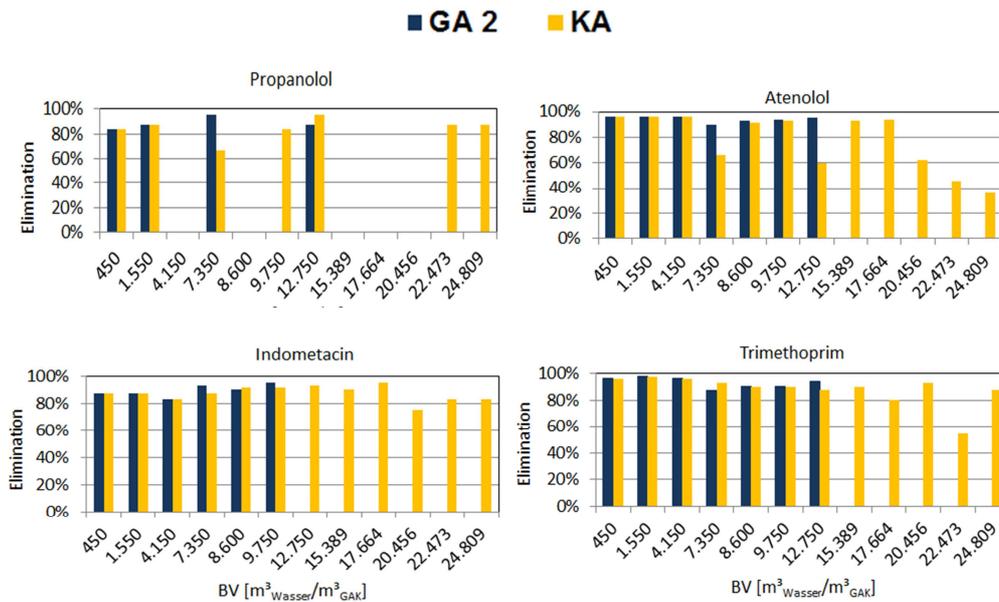


Abbildung 25: Vergleich der Elimination von Spurenstoffen im Kleinadsorber bei deutlich höheren BV mit der im Großadsorber

Einige Spurenstoffe werden im KA im Vergleich zum GA schlechter eliminiert (siehe **Abbildung 26**). Da die Filtergeschwindigkeit des KA erst ab ca. 10.000 BV des KA von 6 auf 10 m/h erhöht wurde, scheidet diese als Ursache aus. Möglicherweise spielen hier Durchmischungseffekte in der GAK-Schichtung infolge der Spülung eine Rolle.

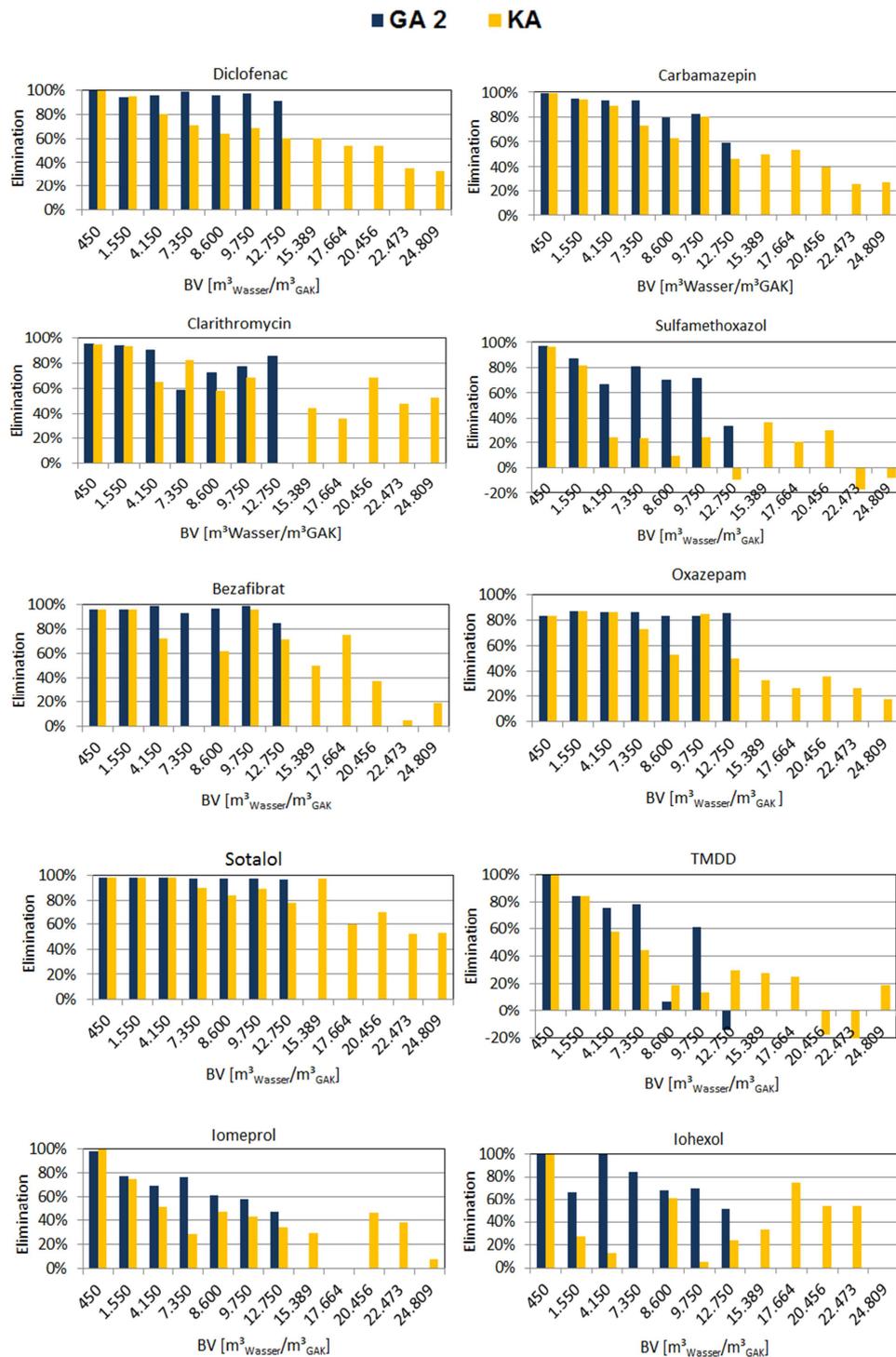


Abbildung 26: Elimination von Spurenstoffen, die im KA schlechter adsorbieren als im GA

Für die meisten Spurenstoffe ist bei Bettvolumina über ca. 12.000 eine abnehmende Elimination zu verzeichnen, so wie für die Stoffe Naproxen und Benzotriazole in **Abbildung 27**.

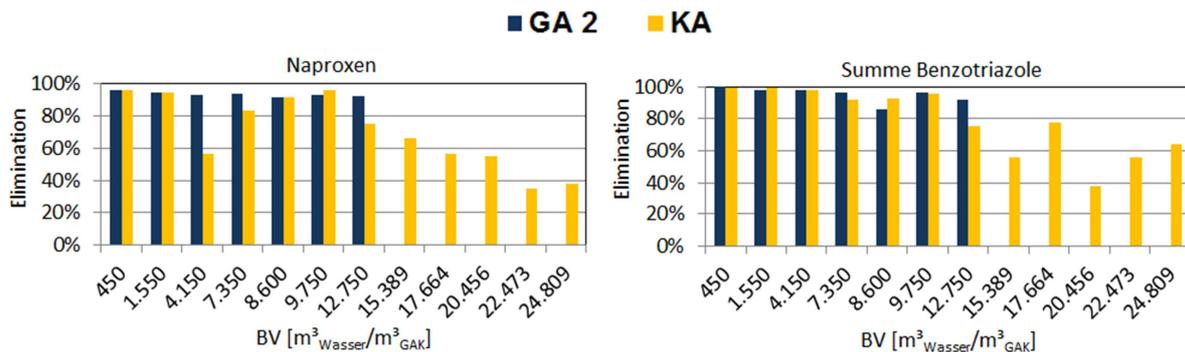


Abbildung 27: Elimination von Spurenstoffen, die im KA ab ca. 12.000 BV abnimmt

8 Vergleich der erzielten Spurenstoffelimination mit anderen Forschungsvorhaben mit Festbettadsorbentien

Ergebnisse aus anderen Studien zur Spurenstoffelimination in Festbettadsorbentien auf Kläranlagen wurden in **Abbildung 28** dargestellt. Es handelt sich dabei um ein Bild aus der Publikation Benstöm et al. (2016), in der entsprechende Studien einheitlich im Kontext der maßgeblichen Verfahrensparameter und Randbedingungen ausgewertet und die jeweils erzielten Eliminationsleistungen vergleichend in Diagrammen gegenübergestellt wurden. **Abbildung 28** zeigt den Einfluss der Vorreinigung und des mittleren DOC im Zulauf, der gewählten Kontaktzeit EBCT und des GAK-Korndurchmessers auf die erzielbaren Bettvolumina der Einzeladsorbentien für das Erreichen der Grenzkriterien DOC ($c/c_0 = 0,8$) sowie Carbamazepin und Diclofenac ($c/c_0 = 0,2$).

Bei den erfassten Vorreinigungsprozessen handelt es sich um:

- V1: Nachklärung
- V2: Nachklärung + Festbettdenitrifikation oder Nachklärung + Flockungsfilter
- V3: Membranbioreaktor oder Nachklärung + Ultrafiltration

Die mittels GAK-Adsorption im Klärwerk Putzhagen erzielten Ergebnisse können somit im Kontext dieses publizierten Diagramms, und zwar innerhalb der Gruppe mit den Vorbehandlungsvarianten V2, bewertet werden (siehe rote Punkte in **Abbildung 28**). Die EBCT lag mit 33 Minuten in Putzhagen unter dem Durchschnitt der anderen Studien, die mittlere DOC-Konzentration des Adsorbentenzulaufs mit 11 mg/l und die mittlere Korngröße der GAK mit 1,5 mm in vergleichbaren Wertebereichen.

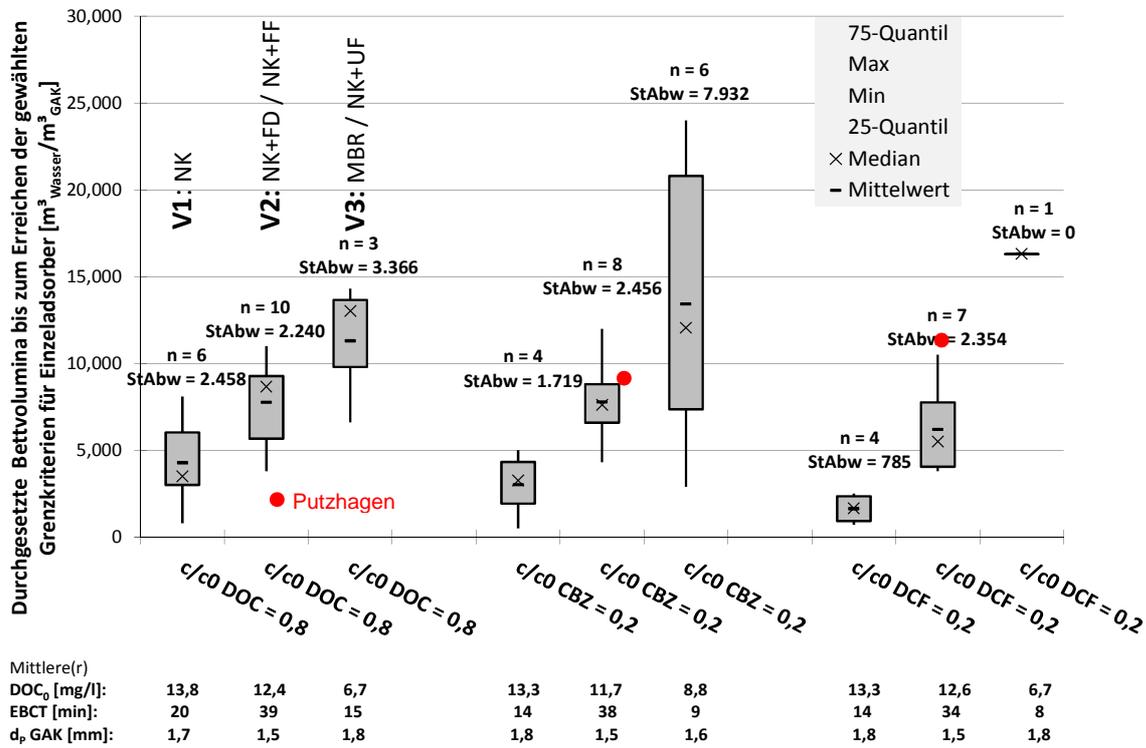


Abbildung 28: Einfluss der Vorreinigung, des mittleren DOC₀ im Zulauf der GAK-Stufe, der Kontaktzeit (EBCT) und des mittleren GAK-Korndurchmessers auf die erzielbaren Bettvolumina der Einzeladsorber für die Grenzkriterien beim DOC ($c/c_0 = 0,8$) sowie bei Carbamazepin und Diclofenac ($c/c_0 = 0,2$) (Quelle: Benstöm et al., 2016)

Das Grenzkriterium $c/c_0 = 0,8$ für die relative DOC-Konzentration im Filtrat wurde auf dem Klärwerk Putzhagen bei etwa 2.000 BV erreicht, so dass die Eliminationsleistung für diesen Parameter schneller als in den anderen 10 Studien abklingt. Allerdings stellt die DOC-Elimination für die Kläranlage in Putzhagen kein Entscheidungskriterium für einen GAK-Austausch dar.

Dagegen liegt die Eliminationsleistung für Carbamazepin im Vergleich zu den für diesen Parameter vorliegenden vier Studien (mit 9.500 BV bei Erreichen des Grenzkriteriums) im oberen Feld. In Bezug auf Diclofenac schneidet der Vergleich der in Putzhagen erzielten BV unter hoher Eliminationsleistung mit den anderen Studien am besten ab, da hier das Grenzkriterium nach knapp 13.000 BV noch nicht erreicht war.

Für die zwei ausgewählten Spurenstoffe Carbamazepin und Diclofenac, denen in vielen Projekten zur weitergehenden Abwasserreinigung eine Leitparameterfunktion zugesprochen wird, wurden die normierten Ablaufkonzentrationen (c/c_0) von Adsorbern aus den anderen

Studien jeweils in ein Diagramm eingetragen, und zwar in Abhängigkeit durchgesetzter Bettvolumina (siehe Abbildung 29 und Abbildung 30).

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.

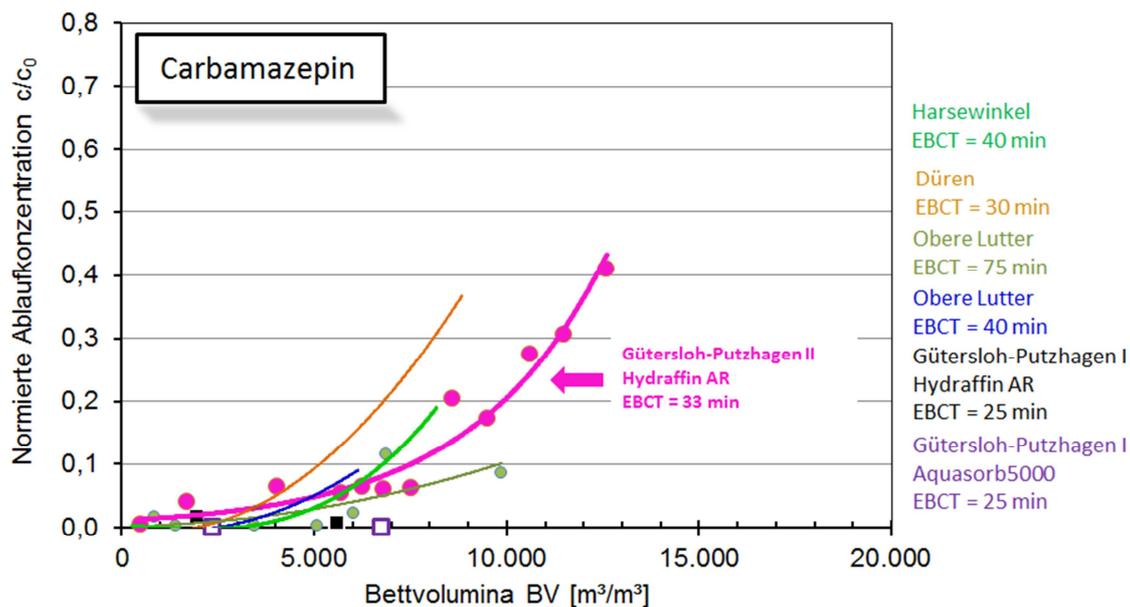


Abbildung 29: Auf den Zulauf normierte Filtratkonzentration c/c_0 für Carbamazepin in Abhängigkeit der BV von Festbettadsorptionsverfahren anderer Anlagen im Vergleich zu denjenigen auf dem Klärwerk Putzhagen

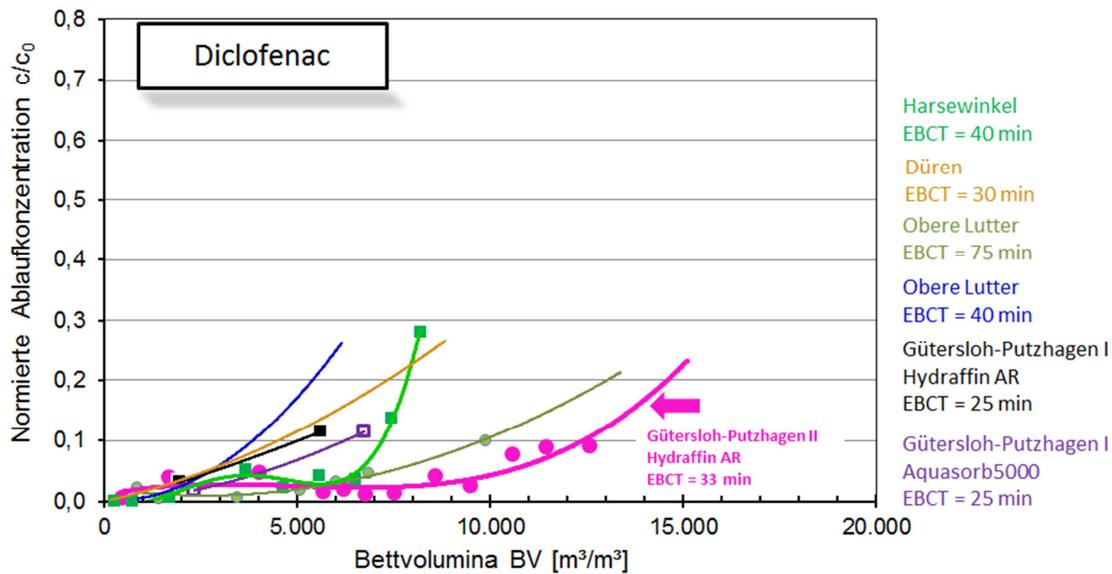


Abbildung 30: Auf den Zulauf normierte Filtratkonzentration c/c_0 für Diclofenac in Abhängigkeit der BV von Festbettadsorptionsverfahren anderer Anlagen im Vergleich zu denjenigen auf dem Klärwerk Putzhagen

9 Erfahrungen und Erkenntnisse des Betriebspersonals

Der Betrieb der beiden Aktivkohlefilter hat sich im Aufbereitungsalltag als ausgesprochen unproblematisch erwiesen. Als wichtigste Punkte des Anlagenbetriebs haben sich die Rückspülungen, das Einbringen und die Entnahme der Aktivkohle gezeigt.

Beide Filter werden gemeinsam einmal wöchentlich gespült. Die gemeinsame, d. h. zeitgleiche Filterspülung erfolgt, weil andernfalls der vom Gebläse geförderte und nicht drosselbare Luftvolumenstrom zu groß wäre. Da dieser ursprünglich für die Filterzellen der Flockungsfiltration ausgelegt worden war, ergibt sich eine Luftspülgeschwindigkeit von 70 m/h für eine einzelne Filterzelle, woraus eine zu hohe mechanische Beanspruchung mit entsprechendem Abtrieb der GAK resultieren würde. Daher werden die beiden GAK-Adsorber zeitgleich mit Spülluft (Luftspülgeschwindigkeit ca 35 m/h) beaufschlagt. Die durchgeführten Spülbildkontrollen am Filterüberstau zeigten eine gleichmäßige Verteilung der Spülluft, sowohl für beide Filter als auch über deren jeweilige Filterfläche.

Die Spülungen werden automatisch mittels Spülprogramm (siehe **Abbildung 31**) durchgeführt, wobei dessen Parametrierung stetig von Hand, d. h. vom Betriebspersonal gemäß Spülbildkontrolle angepasst wird. Zuerst wird nach dem Absenken des Filterüberstaus ca. 10 Minuten lang mit Luft gespült. Nach einer anschließenden kurzen Ruhephase zur Entlüftung des Düsenbodens wird nur dann für die Dauer von ca. 30 Minuten

mit Wasser gespült. Dabei wird sicherheitshalber immer wieder mit Hilfe eines Schöpfsiebes (siehe **Abbildung 32**) entlang der Überlaufkante zur Spülwasserrinne kontrolliert, ob Aktivkohle mit der Spülwasserableitung ausgetragen wird. Zudem enthält das Spülprogramm Stellzeiten für die Armaturen (vergleiche **Abbildung 31**).

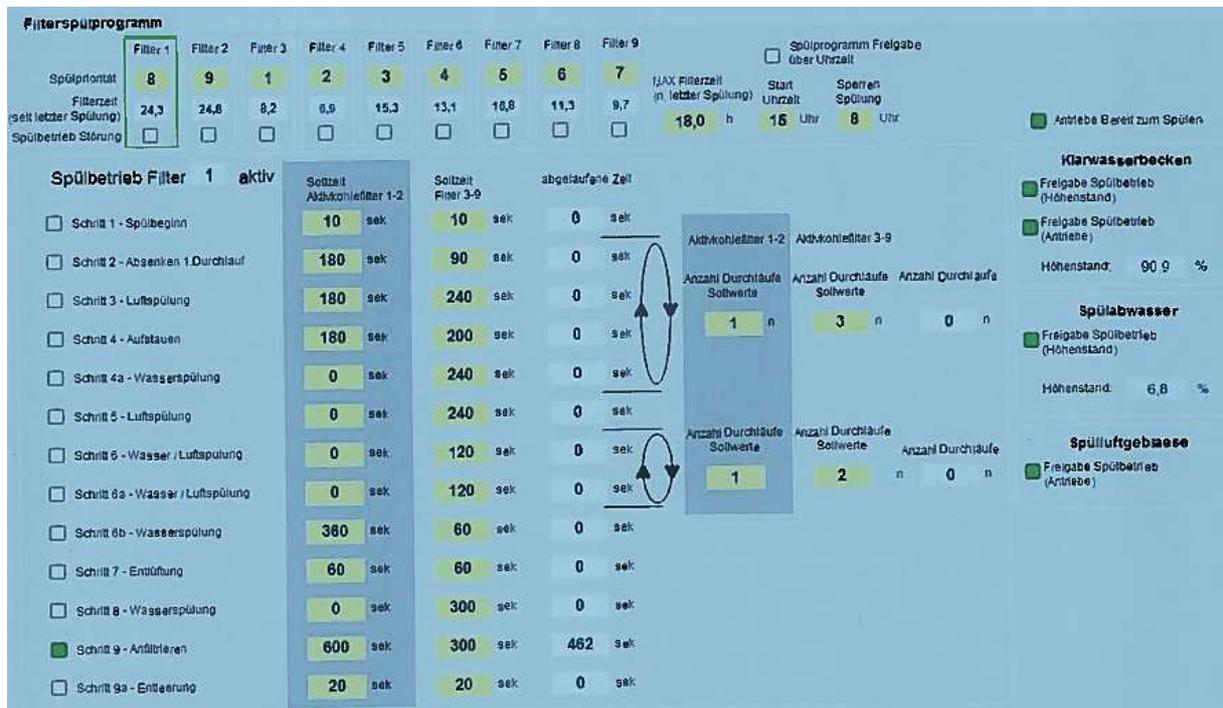


Abbildung 31: SPS-Screenshot mit den Zeitphasen des Spülprogramms für GA-1 und GA-2

Im Rahmen von Vorversuchen am GA während des ersten Projektabschnitts wurde die Wasserspülgeschwindigkeit für eine Bettexpansion einer frischen GAK von etwa 15 % mit 27 m/h festgelegt. Aus mehreren Gründen erfolgt zwar eine automatische Spülung mittels Spülprogramm, jedoch nicht mit einer stets gleichbeliebenden Parametrierung, sondern mit deren jeweiliger Feinjustierung von Hand. Die Dichte der Aktivkohle verändert sich, und zwar ganz erheblich durch die mit der Laufzeit stetig größer werdende Beladung, aber auch nach der Reaktivierung der GAK wird die niedrige Dichte einer Frischkohle nicht mehr erreicht. Zudem nimmt die jahreszeitliche Ganglinie der Wassertemperatur Einfluss auf die Viskosität des Wassers. Alle genannten Faktoren würden bei konstanter Spülwassergeschwindigkeit sowohl diskontinuierlich als auch stetig zur Verminderungen der Bettexpansion auswirken. Mit einer Steuerung von Hand ist die Wasserspülung aber so optimiert, dass mit etwa 15 % Bettexpansion allzeit eine ausreichende Fluidisierung des gesamten Betts erzielt wird, was einen effektiven Trübstoffaustrag, aber keinen Aktivkohleaustrag sicherstellt. Die Dauer der

Wasserspülung kann mittels Sichtkontrollen an die jeweilige Feststoffbeladung des GAK-Betts angepasst werden.

Bei einer dauerhaft erhöhten Trübung im Zulauf der Aktivkohlefilter ist es ratsam, die Aktivkohlefilter ein zweites Mal in einer Woche zu spülen. In diesem Fall wurde und wird allerdings auf eine Luftspülung verzichtet und nur eine reine Wasserspülung durchgeführt.



Abbildung 32: Schöpfesieb zur Prüfung des GAK-Gehalts im abgeleiteten Spülwasser an der Überlaufkante zur Spülwasserrinne

Das Einbringen der Aktivkohle vom Silofahrzeug in die einzelnen Filterzellen erfolgt über eine fest installierte Rohrleitung (siehe Abbildung 33, Mitte bis oben). Dazu wird die Filterzelle etwas mit Wasser gefüllt, damit der Aufprall der hydraulisch geförderten GAK im Filter sanfter und ohne Kornzerstörung stattfindet. Zuerst wird die gröbere GAK als Stützschiicht hydraulisch in die Wasservorlage gefördert. Zur gleichmäßigen Verteilung der GAK wird zudem Spülluft (gedrosseltes Gebläse) zugegeben. Darauf wird danach die feinere GAK hydraulisch eingebracht. Nach dem kompletten Einbringen der Kohle ruht diese ca. 1 Woche im Wasser, damit sich das Einzelkorn „vollsaugen“ und mit gefülltem Porensystem seine Enddichte erreichen kann. Erst danach sind erste Spülaktivitäten sinnvoll, denen zwecks Abrechnung der gelieferten GAK-Mengen ein Aufmaß folgt.

Bei der Entleerung der Filter wird zuerst mit Hilfe eines C-Schlauches die erschöpfte GAK bis zur Stützschiicht (grobe GAK-Körnung) abgesaugt. Es ist darauf zu achten, dass dabei die Stützschiicht so vollständig wie möglich erhalten bleibt, damit kein feines Aktivkohlekorn durch die Schlitze der Filterdüsen unter den Düsenboden gelangt. Erst danach kann die Stützschiicht analog entfernt werden. Beim Absaugen sollte die Kohle immer etwas mit

Wasser überstaut sein, um sie besser absaugen zu können und beim Transport durch Leitungen oder Schläuchen vor mechanischer Beanspruchung zu schützen.

Beim Absaugen der untersten Schicht muss aufgepasst werden, dass infolge Begehung und Schlaucheinsatz die Filterdüsen nicht mechanisch beschädigt werden. Der Ausbau der letzten GAK-Menge, die noch für eine letzte geringe Überdeckung der Düsen sorgt, erfolgt dann hydraulisch mittels Austragsstutzen, der unmittelbar oberhalb des Düsenbodens durch die strinseitige Filterwand angebracht wurde (siehe Abbildung 33 unten).



Abbildung 33: GAK-Befüllleitung der Aktivkohlefilter bzw. Adsorber (Mitte bis oben) und GAK- Austragsstutzen (unten)

10 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

10.1 Bemessungsansätze

Aufgrund der sehr positiven Ergebnisse im Hinblick auf die bei hohen BV noch vorliegende Eliminationsleistung gegenüber Spurenstoffen und des betreuungsarmen und absolut störungsfreien Betriebsverhaltens im gesamten Untersuchungszeitraum ist die Aktivkohleadsorption im Festbett praxistauglich für den Alltagsbetrieb der Kläranlage

Putzhagen. 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. Erste Berechnungen ergeben eine erforderliche Filterfläche der Adsorber, die durch Umnutzung von 3 Filterzellen der vorhandenen Flockungsfiltration (Anlagenbestand) oder durch Neubau von 10 Adsorbern realisiert werden kann (z. B. in zylindrischer Bauweise mit einem Innendurchmessern von $D_{\text{innen}} = 4,0 \text{ m}$).

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

Für die Bemessung des GAK-Bettes der Filter wurde eine mittlere Leerbettkontaktzeit von 33 min zu Grunde gelegt. Der mittlere Trockenwetterabfluss der Kläranlage Putzhagen liegt bei etwa 15.000 m³/Tag.

Anhand der Kurven der normierten Ablaufkonzentrationen in Bild 10, die für jeden einzelnen Adsorber in Abhängigkeit seiner BV angesetzt werden, kann per Mischungsrechnung die Ablaufkonzentration eines Sammelfiltrats ermittelt werden. Als Grenzkriterium für das Sammelfiltrat wurde eine Carbamazepin- sowie eine Diclofenac-Entfernung von mindesten 80 % ($c/c_0 \leq 0,2$) vorgegeben. Durch einen optimal gewählten zeitversetzten Betrieb der Adsorber hält das Sammelfiltrat das Grenzkriterium ein, während der Adsorber mit den jeweils höchsten BV auch ein deutlich höher belastetes Einzelfiltrat aufweisen kann. In Abbildung 34 wurde der Verlauf der c/c_0 -Werte für Diclofenac in den Einzelfiltraten und im Sammelfiltrat für eine Variante mit 3 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 BV bis zum Erreichen des Grenzkriteriums für die drei genannten Verfahrensvarianten und die beiden Spurenstoffe sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

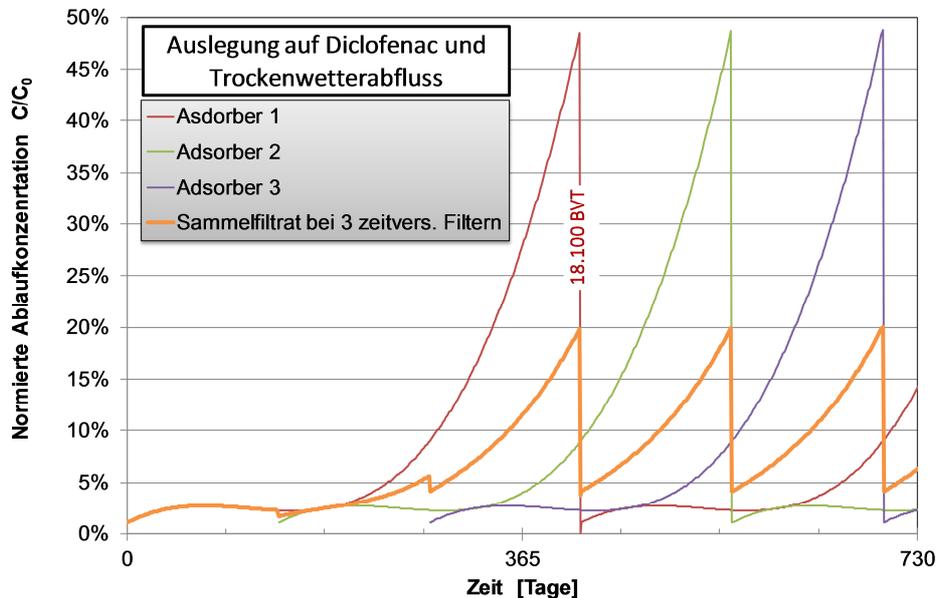


Abbildung 34: Auf den Zulauf normierte Filtratkonzentration c/c_0 für Diclofenac in einzelnen von drei zeitversetzt betriebenen Adsorbern und in ihrem Sammelfiltrat (homogene Beschickung mit Trockenwetterabfluss von 15.000 m³/Tag)

Tabelle 6: 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

10.2 Betriebskosten

Die Betriebskosten wurden auf der Grundlage der berechneten BV in Kapitel 10.1 und unter Berücksichtigung folgender Anteile berechnet (Details siehe Tabelle in Anhang 14.3):

- Personalkosten für Betreuung und Wartung der Anlage sowie die Logistik des GAK-Tauschs
- Energiekosten (Filtrationsbetrieb, Spülluft, Spülwasser, EMSR), für welche die Stromaufnahme der Spülwasserpumpen und des Spülluftgebläses gemessen wurde (siehe Bericht zu Projektphase 1, Nahrstedt et al. 2013)
- Kosten für Transport und Reaktivierung der GAK (inklusive Make-up GAK)

Wie in Abbildung 35 dargestellt, liegen die spezifischen Betriebskosten je nach Betriebsart und Bezugs-Spurenstoff zwischen 0,031 und 0,054 € /m³ Abwasser. Eine zeitversetzte Inbetriebnahme der Adsorber führt zu deutlichen Betriebskosteneinsparungen, weil sich dadurch die Standzeiten der Aktivkohleschüttungen im Vergleich zu einer gleichzeitigen Inbetriebnahme erheblich verlängern. Ob hierbei 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.

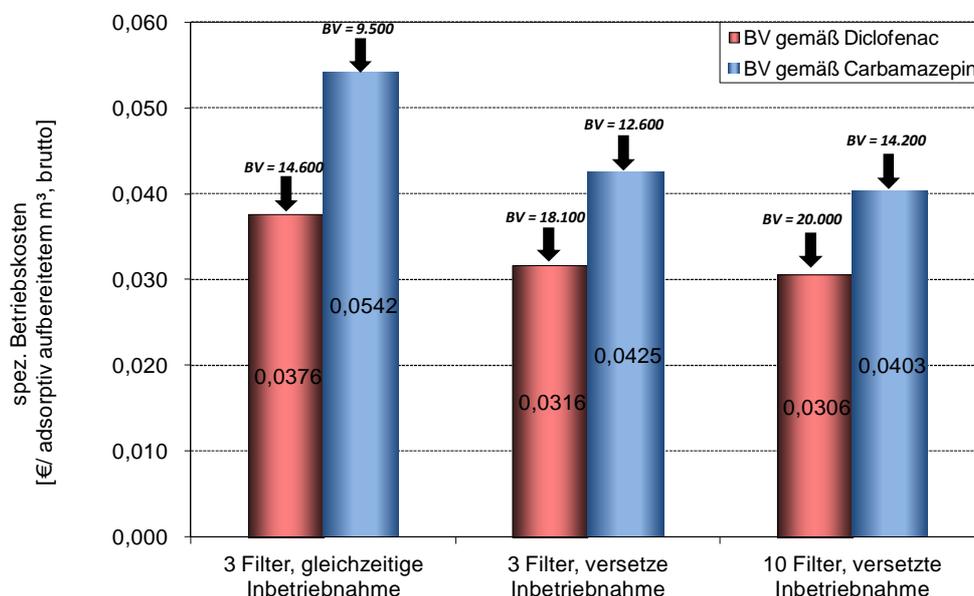


Abbildung 35: Spezifische Betriebskosten bei Auslegung nach Grenzkriterium ($c/c_0=20\%$) für Diclofenac oder Carbamazepin für die 3 unterschiedlichen Auslegungs-/Betriebsvarianten

Bei drei zeitversetzt betriebenen Adsorbern (gemäß Fall 2) ergeben sich jährliche Betriebskosten von 161.679 € (mit den BV gemäß Berechnungen für Diclofenac) bzw. 217.368 € (BV gemäß Carbamazepin). Auf die behandelte Abwassermenge bezogen liegen die spezifischen Betriebskosten bei 3,16 bzw. 4,25 € Cent/m³, welche durchaus in der gleichen Größenordnung liegen wie auf den anderen Kläranlagen mit einer GAK-Adsorptionsstufe zur Spurenstoffelimination (Alt und Bruhn 2016, Bornemann et al. 2015). Im Vergleich zu den Verfahren mit PAK und Ozonung liegen die Jahreskosten ebenfalls in einem sehr konkurrenzfähigen Bereich. In Tabelle 4 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 7: 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

11 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 Gesamphosphats 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, deren mögliche Standorte in Abbildung 36 dargestellt wurden.

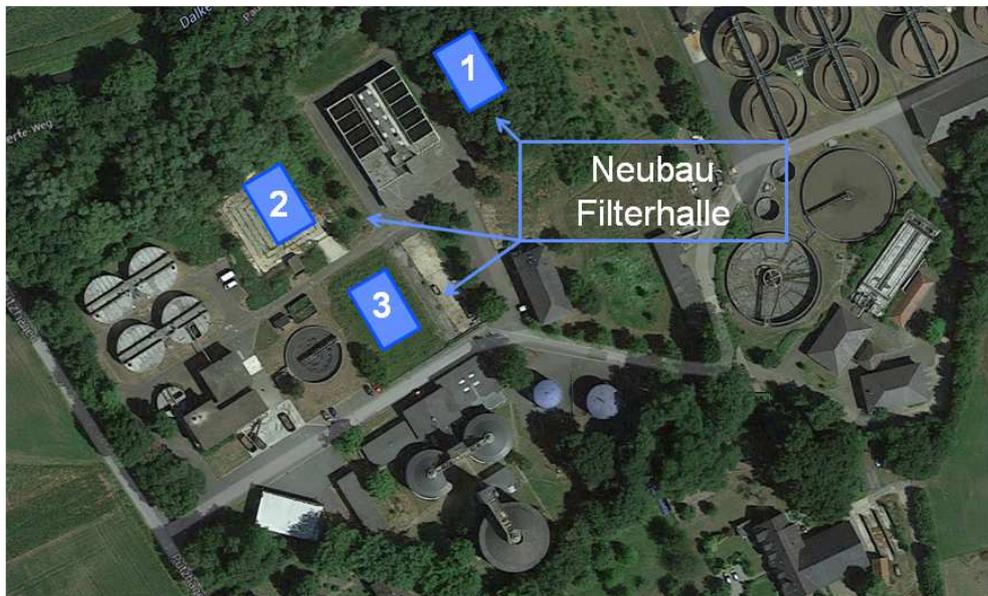


Abbildung 36: Mögliche Standorte für den Neubau der Filterhalle für die Adsorptionsstufe mit 10 Aktivkohlefiltern auf dem Betriebsgelände des Klärwerks Gütersloh-Putzhagen

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 (Götz et al., 2015). 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 8 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 bei GA-1 und GA-2 während der großtechnischen Versuche in Projektphase 2 zeigte innerhalb dieses Stoffspektrums Carbamazepin, so dass die im voranstehenden Kapitel getroffenen Aussagen zu Auslegungskriterien und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen die übrigen vier der in Tabelle 8 genannten Substanzen ebenfalls einbeziehen.

Tabelle 8: 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	

12 Literatur

Alt, K.; Bruhn, G. (2016):

5 Jahre erfolgreicher Betrieb der GAK-Anlage in Obere Lutter. Korrespondenz Abwasser, Abfall (in Vorbereitung)

ATEMIS (2011):

Konzeptstudie Spurenstoffelimination mittels Aktivkohle im Ablauf des Klärwerks Gütersloh-Putzhagen. ATEMIS GmbH, Aachen

Benstöm, F.; Nahrstedt, A.; Böhler, M.; Knopp, G.; Montag, D.; Siegrist, H.; Pinnekamp, J. (2016):

Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen – Ein ReView halb- und großtechnischer Untersuchungen – Teil 2: Methoden, Ergebnisse und Ausblick. KA Korrespondenz Abwasser Abfall, 63. Jahrgang, Nr. 4, S. 276-289

Bergmann, A.; Hembrock-Heger, A. (2008):

Bewertung der Umweltrelevanz von Arzneistoffen. Umweltwiss. Schadst. Forsch. 20, S. 197-208

Bornemann, C.; Alt, K.; Böhm, F.; Hachenberg, M.; Kolisch, G.; Nahrstedt, A.; Taudien, Y. (2015):

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 (MKULNV)

Götz, C.; Otto, J.; Singer, H. (2015):

Überprüfung des Reinigungseffekts. Auswahl geeigneter organischer Spurenstoffe. Aqua & Gas Nr. 2

Mertsch, V. (2009):

Maßnahmen an der Quelle. Vortrag anl. des Kolloquiums „Mikroschadstoffe in der aquatischen Umwelt“, Berlin, 21.10.2009

Möller, M. Treese, J. Pasel, C. Bathen, D. (2014):

Eine kritische Betrachtung zur Charakterisierung von Aktivkohlen mittels der Jodzahl. Chemie Ingenieur Technik 86, Nr. 1-2, S. 67–71

Nahrstedt, A., Alt, K., Mauer, C., Schlösser, F., Schröder, K.-H., Schweinforth, R., Sürder, T. (2013):

Mikroschadstoffelimination mittels granulierter Aktivkohle im Ablauf der Kläranlage Gütersloh-Putzhagen, Zwischenbericht, Förderkennziffer Bez.-Reg. Detmold M-03/12 Gt, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV).

Nahrstedt, A., Burbaum, H., Mauer, C., Alt, K., Sürder, T., Fritzsche, J. (2014a):

Der Einsatz von granulierter Aktivkohle auf dem Verbandsklärwerk ‚Obere Lutter‘; KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 61, Nr. 5, 408-426

Nahrstedt, A.; Burbaum, H.; Alt, K.; Mauer, C.; Fitzsche, J.; Sürder, T. (2014b):
Abschlussbericht Einsatz von granulierter Aktivkohle auf dem Verbandsklärwerk „Obere
Lutter“ - Teil 2 - . Eigenverlag IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser Beratungs-
und Entwicklungsgesellschaft mbH, Mülheim an der Ruhr

Nahrstedt, A.; Rohn, A.; Alt, K.; Wu, X.; Schlösser, F.; Schröder, K.-H. (2016):
Mikroschadstoffelimination mittels granulierter Aktivkohle im Ablauf der Kläranlage
Gütersloh-Putzhagen. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, eingereicht April 2016

13 Glossar

AFS	abfiltrierbare Stoffe
ASTM	American Society for Testing and Materials
BV	durchgesetzte Bettvolumina (m^3 Wasser / m^3 Aktivkohle)
C	Konzentration
C_0	Konzentration im Zulauf
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
DOC	Dissolved Organic Carbon
EBCT	Empty Bed Contact Time
FM	Fällmittel
EW	Einwohnerwert
GA	Großadsorber
GAK:	granulierte Aktivkohle
GF	Großfilter
KA	Kleinadsorber (Filtersäule)
Make-up	dem GAK-Reaktivat zugesetzte Menge an GAK-Frischkohle
Mesh	Korngrößenmaß gemäß ASTM
PAK	pulverförmige Aktivkohle
P_{ges}	Gesamt-Phosphor
TOC	Total Organic Carbon
WRRL	Richtlinie 2000/60/EG (Wasserrahmenrichtlinie)



14 Anhang

14.1 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Projektphase 1

- Es wurden zwei großtechnische Adsorber (GA) und ein kleintechnischer Adsorber (KA) mit granulierter Aktivkohle (GAK) mit einer Schütthöhe von 2,7 m gefüllt und zur weitergehenden Aufbereitung eines Kläranlagenablaufs eingesetzt:
 - Adsorber GA1 gefüllt mit AquaSorb 5000, Filtrationsgeschwindigkeit 5 m/h
 - Adsorber GA2 gefüllt mit Hydraffin AR, Filtrationsgeschwindigkeit 5 m/h
 - Adsorber KA gefüllt mit AquaSorb 5000, verschiedene Filtrationsgeschwindigkeiten von 5, 10 und 15 m/h
- Alle Adsorber wurden aus dem Ablauf der Nachklärung ohne Zusatz von Fäll- oder Flockungsmittel beschickt und täglich gespült. Nur mit dem KA fanden auch separate Versuche unter Einsatz von Fällmittel statt.
- Das Spülprogramm von GA1 und GA2 musste im Laufe des ersten Betriebsmonats angepasst werden; der Spülluftvolumenstrom des vorhandenen Gebläses war zu hoch und ließ sich nicht drosseln. Er führte zu Mischeffekten in den Adsorbern. In GA1 fand hierdurch sogar ein geringer Durchtritt von GAK durch die Düsenslitze unter den Düsenboden statt. Abhilfe wurde dadurch geschaffen, dass die Luftspülung beider Großadsorber immer simultan vorgenommen und die Spülluft dabei entsprechend aufgeteilt wurde.
- Im Anschluss an die Umstellung des Spülprogramms fand ein störungsfreier, praxistauglicher und robuster Alltagsbetrieb der Adsorber statt.
- Trübungsspitzen im Ablauf der Nachklärung wurden solange auf die GAK geleitet, bis ein Wert von 10 FNU überschritten wurde. Bei Überschreitung wurden die GA außer Betrieb genommen und ihr Zulaufwasser auf die übrigen Filter der Flockungsfiltration (Filtermaterial Liaperl) verteilt. Insbesondere Ende Januar und Anfang Februar 2013 war dies stundenweise häufiger der Fall. Daraus wurde der Optimierungsbedarf für die Strömungsführung in den Nachklärbecken abgeleitet.
- Sowohl beide großtechnische Adsorber (GA) als auch der kleintechnische Adsorber erzielen eine gute CSB- und TOC-Elimination von anfänglich 80 bis 90 %. Die großtechnischen Adsorber erreichten als Mittel der gesamten Adsorberlaufzeit von 5 Monaten eine CSB- und TOC-Elimination von etwa 43 bis 45 %. Dabei wurden 7.000

Bettvolumina (m^3 Abwasser je m^3 Aktivkohleschüttung) durchgesetzt bzw. adsorptiv aufbereitet.

- Zieht man einen Vergleich zwischen den Adsorbern (GA und KA bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 5 m/h) auf der Basis einer gleichen Anzahl durchgesetzter Bettvolumina, so verläuft die CSB- und TOC-Elimination mit relativ identischer Effektivität. Auf der Vergleichsbasis einer gleichen CSB- oder TOC-Beladung führt die höhere Schüttdichte der Aktivkohle Hydrffin AR (die Aktivkohlemasse ist das Bezugsmaß für die Beladung) zu einer Verschiebung der Relationen, die aber von keiner praktischen Bedeutung ist, da in den Filterzellen gleiche Volumina und nicht gleiche Massen an GAK vorgelegt wurden.
- Nahezu alle im Zulauf nachgewiesenen Spurenstoffe wurden in den ersten Betriebswochen sehr weitgehend eliminiert. Lediglich GA2 zeigte bereits anfänglich bei mehreren Röntgenkontrastmitteln Schwächen bei der Rückhaltung.
- Für den Komplexbildner EDTA wurde - wie bei analog ausgerichteten Forschungsvorhaben auch zu beobachten - das schlechteste Ergebnis ohne jeden Rückhalt in den Adsorbern erzielt.
- Selbst nach gut 6.700 durchgesetzten Bettvolumina (BVT) und einer nahezu erreichten Erschöpfung der CSB- und DOC-Elimination findet für eine ganze Reihe von Spurenstoffen noch eine deutliche Elimination statt:
 - Clarithromycin, Dehydratoerythromycin, Erythromycin, Atenolol, Bisoprolol und Sotalol werden noch vollständig eliminiert. Das ist auch bei Phenazon und Carbamazepin der Fall.
 - Metoprolol, Diclofenac und die Benzotriazole werden noch deutlich vermindert.
 - Nur noch eine leichte Elimination findet für die Röntgenkontrastmittel Iohexol, Iomeprol, Iopamidol und Iopromid statt.
 - Für EDTA, Roxithromycin, Sulfamethoxazol, Amidotrizoesäure, Iomeprol und Iothalamicsäure ist die Adsorptionskapazität der Adsorber an diesem Punkt erschöpft.
- Extrapoliert man die Eliminationskurve für Diclofenac oder Carbamazepin in Abhängigkeit der durchgesetzten Bettvolumina, ist eine Aufnahmekapazität für beide Stoffe bis zu Durchsätzen von 20.000 Bettvolumina und mehr zu erwarten.
- Trotz des Verzichts auf Fällmittelzugabe leisteten die Großadsorber in der ersten Hälfte ihrer Laufzeit eine gute Phosphat-Elimination ($\text{PO}_4\text{-P}$), die jedoch in der zweiten Laufzeithälfte mehr und mehr rückläufig war.

- Die notwendigen täglichen Spülungen der Adsorber haben aus praktischer Sicht keine negativen Auswirkungen auf das Adsorptionsverhalten.
- Die spezifischen Betriebskosten des Verfahrens je Kubikmeter aufbereitetes Wasser liegen unter Einsatz von Frischkohle voraussichtlich in einem Bereich zwischen knapp 8 und 9,7 Cent/m³ aufbereitetes Wasser (brutto; ohne Fördermittel; ohne Verrechnung der Abwasserabgabe).
- Es ist zu erwarten, dass die Reaktivierung erschöpfter Aktivkohlen die Betriebskosten senkt.
- In dem Rahmen der in Phase 1 durchgeführten Versuche wurde aber nicht ermittelt, wie sich das Adsorptionsverhalten der Aktivkohlen nach einem Reaktivierungsschritt verhält. Erfahrungsgemäß kann der Vergleich mit dem Leistungsvermögen frischer Aktivkohle sowohl positiv als auch negativ (siehe aktuelles Forschungsvorhaben beim Abwasserverband Obere Lutter, AOL) ausfallen.

14.2 Ergebnisse der Spurenstoffanalysen

Probenahmestelle	Probenahme- datum	1H-Benzotriazol	4-Methyl-1H-Benzotriazole	5-Methyl-1H-Benzotriazole	TMDD	Amidotri-zoesäure	lohexol	lomeprol	lopamidol	lopromid	lothalamisäure	Terbutryn	Carbama-zepin	Diazepam	Etofibrat
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Zulauf Adsorber	16.01.2015	12,2	1,7	0,384	2,8	0,6	1,3	18	1,8	<0,01	<0,01	0,02	0,82	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 1	16.01.2015	0,026	0,005	0,003	<0,02	0,09	<0,01	0,38	0,07	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 2	16.01.2015	0,013	0,006	0,006	<0,02	0,09	<0,01	0,3	0,05	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,01	<0,02
Ablauf Kleinadsorber	16.01.2015	0,009	<0,00200	<0,00200	<0,02	0,02	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,01	<0,02
Zulauf Adsorber	13.02.2015	6,8	1,75	0,261	4,5	1,7	0,95	16	3,1	0,1	0,09	<0,02	1	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 1	13.02.2015	0,04	0,008	<0,00200	0,42	1,1	0,12	3,1	0,74	0,02	0,04	<0,02	0,04	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 2	13.02.2015	0,124	0,031	0,005	0,71	1,2	0,32	3,7	0,89	0,03	0,04	<0,02	0,05	<0,01	<0,02
Ablauf Kleinadsorber	13.02.2015	0,018	<0,00200	<0,00200	0,7	1	0,21	4	0,61	0,02	0,06	<0,02	0,06	<0,01	<0,02
Zulauf Adsorber	10.04.2015	4,7	2,05	0,251	3,8	0,62	1,6	12	1,2	<0,01	<0,01	0,03	1,1	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 1	10.04.2015	0,214	0,052	0,007	0,97	0,95	<0,01	3,7	0,88	<0,01	<0,01	<0,02	0,07	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 2	10.04.2015	0,094	0,02	0,004	0,92	0,79	0,48	3,8	0,65	<0,01	<0,01	<0,02	0,06	0,02	0,04
Ablauf Kleinadsorber	10.04.2015	0,099	0,029	0,005	1,6	0,71	1,4	5,9	0,24	<0,01	<0,01	<0,02	0,12	<0,01	<0,02
Zulauf Adsorber	05.06.2015	5,6	3,6	0,021	3,6	1,7	<0,01	8,2	6,5	<0,01	<0,01	0,03	1,27	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 1	05.06.2015	0,254	0,056	0,005	0,33	1,4	<0,01	3,7	2,2	<0,01	<0,01	<0,02	0,07	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 2	05.06.2015	0,133	0,031	0,002	0,3	1,4	<0,01	2,6	1,4	<0,01	<0,01	<0,02	0,04	<0,01	<0,02
Ablauf Kleinadsorber	05.06.2015	0,541	0,211	0,02	2	1,4	<0,01	5,9	1,7	<0,01	<0,01	<0,02	0,34	<0,01	<0,02
Zulauf Adsorber	03.07.2015	17	3,1	0,093	4,7	1,2	0,39	9,9	1,6	<0,01	<0,01	0,03	1,1	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 1	03.07.2015	0,294	0,073	0,007	1	1,3	0,2	2,4	0,57	<0,01	<0,01	<0,02	0,07	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 2	03.07.2015	0,206	0,056	0,005	0,76	1,1	0,14	2	0,69	<0,01	<0,01	<0,02	0,06	<0,01	<0,02
Ablauf Kleinadsorber	03.07.2015	1,05	0,365	0,033	3,8	1,1	0,15	5,3	1,1	<0,01	<0,01	0,02	0,41	<0,01	<0,02
Zulauf Adsorber	29.07.2015	27,7	2,8	0,135	1,5	2,4	0,81	21	5,5	0,04	<0,01	0,04	1,15	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 1	29.07.2015	0,354	0,071	0,008	0,64	1,8	0,16	3,8	1,7	0,01	<0,01	<0,02	0,07	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 2	29.07.2015	0,238	0,046	0,006	0,59	2	0,18	3,5	1,4	<0,01	<0,01	<0,02	0,05	<0,01	<0,02
Ablauf Kleinadsorber	29.07.2015	1,11	0,218	0,024	1,3	2	0,77	12	2,8	0,03	<0,01	<0,02	0,23	<0,01	<0,02
Zulauf Adsorber	02.09.2015	8,34	1,58	0,177	2,7	3,3	1,7	15	6,4	<0,01	<0,01	0,02	1,11	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 1	02.09.2015	0,377	0,07	0,009	0,68	2,5	0,27	3,6	2,7	<0,01	<0,01	<0,02	0,07	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 2	02.09.2015	0,302	0,06	0,007	0,58	2,2	0,25	2,8	1,2	<0,01	<0,01	<0,02	0,06	<0,01	<0,02
Ablauf Kleinadsorber	02.09.2015	1,9	0,468	0,078	1,9	3,4	1,3	9,9	4,1	<0,01	<0,01	<0,02	0,6	<0,01	<0,02
Zulauf Adsorber	30.09.2015	5,4	1,37	0,067	0,58	1,15	2,02	12,88	1,16	0,07	0,02	0,04	0,93	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 1	30.09.2015	0,826	0,123	0,014	0,54	1,2	0,65	5,03	0,79	0,03	0,03	<0,02	0,19	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 2	30.09.2015	0,523	0,078	0,009	0,33	1,21	0,57	5,44	0,84	0,04	0,03	<0,02	0,09	<0,01	<0,02
Ablauf Kleinadsorber	30.09.2015	2,46	0,479	0,058	0,42	1,16	1,34	9,17	0,77	0,06	0,03	0,02	0,47	<0,01	<0,02
Zulauf Adsorber	22.10.2015	33,2	3,39	0,108	3,6	0,69	1,85	18	4,23	<0,01	<0,01	0,02	1,1	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 1	22.10.2015	1,16	0,149	0,014	1,4	0,87	0,56	7,56	2,09	<0,01	<0,01	<0,02	0,19	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 2	22.10.2015	0,867	0,113	0,013	1,6	0,77	0,73	8,6	2,26	<0,01	<0,01	<0,02	0,13	<0,01	<0,02
Ablauf Kleinadsorber	22.10.2015	7,27	0,769	0,09	2,7	0,64	0,47	21	3,01	<0,01	<0,01	<0,02	0,51	<0,01	<0,02
Zulauf Adsorber	18.11.2015	8,88	2,65	<0,002	0,61	0,67	0,85	14,65	13,17	0,05	0,02	0,05	0,8	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 1	18.11.2015	1,95	0,203	0,027	0,89	0,84	1,14	8,82	7,03	0,03	0,02	<0,02	0,22	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 2	18.11.2015	1,54	0,159	0,022	0,81	0,77	0,22	6,65	6,48	0,02	<0,01	<0,02	0,19	<0,01	<0,02
Ablauf Kleinadsorber	18.11.2015	6,05	1,09	0,029	0,72	0,68	0,39	7,87	10,61	0,03	<0,01	0,03	0,48	<0,01	<0,02
Zulauf Adsorber	09.12.2015	39,3	1,47	0,046	0,21	2,57	1,98	23,54	0,35	<0,01	0,05	0,03	0,75	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 1	09.12.2015	2,26	0,214	0,028	0,33	2,72	1,14	15,16	0,87	<0,01	0,05	<0,02	0,23	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 2	09.12.2015	1,53	0,143	0,019	0,31	2,18	2,7	30,48	0,59	<0,01	0,05	<0,02	0,22	<0,01	<0,02
Ablauf Kleinadsorber	09.12.2015	16,9	0,835	0,136	0,28	2,74	0,92	14,59	1,1	<0,01	0,04	0,03	0,56	<0,01	<0,02
Zulauf Adsorber	06.01.2016	30,349	1,853	0,253	0,96	1,32	2,37	35,78	1,45	0,01	<0,01	<0,02	0,86	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 1	06.01.2016	2,28	0,303	0,031	1,1	1,12	1,15	19,04	1,05	<0,01	<0,01	<0,02	0,35	<0,01	<0,02
Ablauf Großadsorber 2	06.01.2016	1,407	0,216	0,024	0,99	1,23	1,26	22,63	1,71	<0,01	0,02	<0,02	0,22	<0,01	<0,02
Ablauf Kleinadsorber	06.01.2016	10,332	1,124	0,079	0,78	1,3	2,47	33,21	1,89	0,01	0,02	<0,02	0,63	<0,01	<0,02

Probenahmestelle	Proebenahme- datum	Fenofibrat	Oxazepam	Pentoxi- fyllin	Phenacetin	Phenazon	Acetyl- salicylsäure	Bezafibrat	Clofibrin- säure	Diclofenac	Feno-profen	Gemfibrozil	Ibuprofen	Indometa- cin	Ketoprofen
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Zulauf Adsorber	16.01.2015	<0,04	0,15	<0,01	<0,01	0,03	0,02	0,12	<0,02	2,49	<0,02	<0,02	<0,01	0,04	<0,01
Ablauf Großadsorber 1	16.01.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Großadsorber 2	16.01.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Kleinadsorber	16.01.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Zulauf Adsorber	13.02.2015	<0,04	0,19	<0,01	<0,01	0,12	<0,02	0,12	<0,02	2,89	<0,02	<0,02	<0,01	0,04	<0,01
Ablauf Großadsorber 1	13.02.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,11	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Großadsorber 2	13.02.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,17	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Kleinadsorber	13.02.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,15	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Zulauf Adsorber	10.04.2015	<0,04	0,18	<0,01	<0,01	0,04	<0,02	0,32	<0,02	2,19	<0,02	<0,02	<0,01	0,03	<0,01
Ablauf Großadsorber 1	10.04.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,1	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Großadsorber 2	10.04.2015	0,1	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,12	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Kleinadsorber	10.04.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	0,01	<0,02	0,09	<0,02	0,43	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Zulauf Adsorber	05.06.2015	0,09	0,22	<0,01	<0,01	0,02	<0,02	<0,01	<0,02	2,04	<0,02	<0,02	<0,01	0,04	<0,01
Ablauf Großadsorber 1	05.06.2015	0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Großadsorber 2	05.06.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Kleinadsorber	05.06.2015	0,06	0,06	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,6	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Zulauf Adsorber	03.07.2015	<0,04	0,17	<0,01	<0,01	0,01	<0,02	0,13	<0,02	2,27	<0,02	<0,02	<0,01	0,06	<0,01
Ablauf Großadsorber 1	03.07.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,04	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Großadsorber 2	03.07.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,05	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Kleinadsorber	03.07.2015	<0,04	0,08	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	0,05	<0,02	0,82	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Zulauf Adsorber	29.07.2015	<0,04	0,16	<0,01	<0,01	0,03	<0,02	0,13	<0,02	3,21	<0,02	<0,02	<0,01	0,06	<0,01
Ablauf Großadsorber 1	29.07.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Großadsorber 2	29.07.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Kleinadsorber	29.07.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	0,01	<0,02	<0,01	<0,02	1	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Zulauf Adsorber	02.09.2015	<0,04	0,18	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	0,07	<0,02	2,52	<0,02	<0,02	<0,01	0,07	<0,01
Ablauf Großadsorber 1	02.09.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Großadsorber 2	02.09.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Kleinadsorber	02.09.2015	<0,04	0,09	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	0,02	<0,02	1	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Zulauf Adsorber	30.09.2015	<0,04	0,15	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	0,16	<0,02	2,02	<0,02	<0,02	<0,01	0,05	<0,01
Ablauf Großadsorber 1	30.09.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,08	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Großadsorber 2	30.09.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,08	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Kleinadsorber	30.09.2015	<0,04	0,1	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	0,08	<0,02	0,8	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Zulauf Adsorber	22.10.2015	<0,04	0,15	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	0,44	<0,02	2,44	<0,02	<0,02	<0,01	0,1	<0,01
Ablauf Großadsorber 1	22.10.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,06	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Großadsorber 2	22.10.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,09	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Kleinadsorber	22.10.2015	<0,04	0,11	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	0,11	<0,02	1,13	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Zulauf Adsorber	18.11.2015	<0,04	0,14	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	0,08	<0,02	2	<0,02	<0,02	<0,01	0,02	0,02
Ablauf Großadsorber 1	18.11.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,15	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Großadsorber 2	18.11.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,2	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Kleinadsorber	18.11.2015	<0,04	0,09	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	0,05	<0,02	0,92	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Zulauf Adsorber	09.12.2015	<0,04	0,19	<0,01	<0,01	0,06	<0,02	0,21	<0,02	2,17	<0,02	<0,02	<0,01	0,03	0,03
Ablauf Großadsorber 1	09.12.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	0,01	<0,02	<0,01	<0,02	0,19	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Großadsorber 2	09.12.2015	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	0,03	<0,02	0,04	<0,02	0,15	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Kleinadsorber	09.12.2015	<0,04	0,14	<0,01	<0,01	0,04	<0,02	0,2	<0,02	1,41	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	0,03
Zulauf Adsorber	06.01.2016	<0,04	0,17	<0,01	<0,01	0,08	<0,02	0,26	<0,02	1,41	<0,02	<0,02	<0,01	0,03	0,01
Ablauf Großadsorber 1	06.01.2016	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	0,01	<0,02	0,04	<0,02	0,13	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Großadsorber 2	06.01.2016	<0,04	<0,05	<0,01	<0,01	0,02	<0,02	0,06	<0,02	0,18	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01
Ablauf Kleinadsorber	06.01.2016	<0,04	0,14	<0,01	<0,01	0,03	<0,02	0,21	<0,02	0,95	<0,02	<0,02	<0,01	<0,02	<0,01

Probenahmestelle	Probenahme- datum	Chloram- phenicol	Clarithro- mycin	Dehydrato- Erythromy- cin	Erythromy- cin	N4-Sulfame- thoxazol	Roxithro- mycin	Sulfadiazin	Sulfadimi- din	Sulfame- thoxazol	Trimetho- prim	Atenolol	Betaxolol	Bisoprolol	Metoprolol
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Zulauf Adsorber	16.01.2015	<0,01	0,5	<0,06	0,14	<0,05	0,27	<0,01	<0,01	0,15	0,13	0,13	<0,01	0,32	1,2
Ablauf Großadsorber 1	16.01.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ablauf Großadsorber 2	16.01.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ablauf Kleinadsorber	16.01.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Zulauf Adsorber	13.02.2015	<0,01	0,39	0,12	<0,06	<0,05	0,18	<0,01	<0,01	0,38	0,23	0,14	<0,01	0,33	1,4
Ablauf Großadsorber 1	13.02.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Ablauf Großadsorber 2	13.02.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,04
Ablauf Kleinadsorber	13.02.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	0,03	<0,01	<0,01	0,07	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Zulauf Adsorber	10.04.2015	<0,01	0,26	<0,06	0,16	<0,05	0,1	<0,01	<0,01	0,21	0,13	0,14	<0,05	0,29	0,23
Ablauf Großadsorber 1	10.04.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,07	<0,01	<0,05	<0,05	<0,05	0,06
Ablauf Großadsorber 2	10.04.2015	<0,01	0,1	<0,06	<0,06	<0,05	0,09	<0,01	<0,01	0,07	0,03	<0,05	<0,05	<0,05	0,06
Ablauf Kleinadsorber	10.04.2015	<0,01	0,09	<0,06	<0,06	<0,05	0,05	<0,01	<0,01	0,16	<0,01	<0,05	<0,05	<0,05	0,07
Zulauf Adsorber	05.06.2015	<0,01	0,14	0,09	<0,06	0,06	0,08	<0,01	<0,01	0,3	0,07	0,06	0,01	0,22	0,11
Ablauf Großadsorber 1	05.06.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,05	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,03
Ablauf Großadsorber 2	05.06.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,02
Ablauf Kleinadsorber	05.06.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,23	<0,01	0,02	<0,01	0,05	0,2
Zulauf Adsorber	03.07.2015	<0,01	0,06	<0,06	0,12	0,07	<0,02	<0,01	<0,01	0,32	0,05	0,06	<0,01	0,17	0,35
Ablauf Großadsorber 1	03.07.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03
Ablauf Großadsorber 2	03.07.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02
Ablauf Kleinadsorber	03.07.2015	<0,01	<0,05	<0,06	0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,29	<0,01	<0,01	<0,01	0,05	0,25
Zulauf Adsorber	29.07.2015	<0,01	0,08	<0,06	0,08	0,06	0,02	<0,01	<0,01	0,25	0,05	0,07	<0,01	0,2	0,1
Ablauf Großadsorber 1	29.07.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,02
Ablauf Großadsorber 2	29.07.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02
Ablauf Kleinadsorber	29.07.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,19	<0,01	<0,01	<0,01	0,04	0,16
Zulauf Adsorber	02.09.2015	<0,01	0,06	0,06	0,15	0,06	<0,02	<0,01	<0,01	0,31	0,04	0,05	<0,01	0,17	0,17
Ablauf Großadsorber 1	02.09.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,06	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03
Ablauf Großadsorber 2	02.09.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03
Ablauf Kleinadsorber	02.09.2015	<0,01	0,06	<0,06	0,08	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,34	<0,01	0,02	<0,01	0,04	0,35
Zulauf Adsorber	30.09.2015	<0,01	0,09	<0,06	0,06	0,07	0,07	<0,01	<0,01	0,27	0,05	0,07	<0,05	<0,05	0,19
Ablauf Großadsorber 1	30.09.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,08	<0,01	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Ablauf Großadsorber 2	30.09.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,18	<0,01	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Ablauf Kleinadsorber	30.09.2015	<0,01	0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,17	<0,01	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Zulauf Adsorber	22.10.2015	<0,01	0,11	0,07	0,1	0,06	0,09	<0,01	<0,01	0,39	0,05	0,08	<0,05	0,2	0,08
Ablauf Großadsorber 1	22.10.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,11	<0,01	<0,05	<0,05	<0,05	0,07
Ablauf Großadsorber 2	22.10.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Ablauf Kleinadsorber	22.10.2015	<0,01	0,07	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,31	0,01	<0,05	<0,05	<0,05	0,25
Zulauf Adsorber	18.11.2015	<0,01	0,08	<0,06	0,06	0,05	0,05	<0,01	<0,01	0,51	0,07	0,08	<0,01	0,17	<0,01
Ablauf Großadsorber 1	18.11.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,15	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,12
Ablauf Großadsorber 2	18.11.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,13	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1
Ablauf Kleinadsorber	18.11.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	0,06	<0,02	<0,01	<0,01	0,36	<0,01	0,03	<0,01	0,09	0,04
Zulauf Adsorber	09.12.2015	<0,01	0,21	<0,06	0,1	0,07	0,05	<0,01	<0,01	0,47	0,11	0,11	<0,01	0,22	0,1
Ablauf Großadsorber 1	09.12.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,21	<0,01	<0,01	<0,01	0,04	0,16
Ablauf Großadsorber 2	09.12.2015	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,2	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,12
Ablauf Kleinadsorber	09.12.2015	<0,01	0,11	<0,06	0,07	<0,05	0,05	<0,01	<0,01	0,55	0,05	0,06	<0,01	0,19	0,42
Zulauf Adsorber	06.01.2016	<0,01	0,17	<0,06	0,1	<0,05	0,07	<0,01	<0,01	0,24	0,08	0,11	<0,01	0,34	1,4
Ablauf Großadsorber 1	06.01.2016	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,16	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,22
Ablauf Großadsorber 2	06.01.2016	<0,01	<0,05	<0,06	<0,06	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	0,16	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,16
Ablauf Kleinadsorber	06.01.2016	<0,01	0,08	<0,06	0,06	<0,05	0,06	<0,01	<0,01	0,26	0,01	0,07	<0,01	0,17	0,62

Probenahmestelle	Proebenahme- datum	Propanolol	Sotalol	loxaglin- säure	loxithala- minsäure
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Zulauf Adsorber	16.01.2015	0,03	0,29	<0,01	7,3
Ablauf Großadsorber 1	16.01.2015	<0,01	<0,01	<0,01	0,36
Ablauf Großadsorber 2	16.01.2015	<0,01	<0,01	<0,01	0,45
Ablauf Kleinadsorber	16.01.2015	<0,01	<0,01	<0,01	0,03
Zulauf Adsorber	13.02.2015	0,04	0,25	<0,01	12
Ablauf Großadsorber 1	13.02.2015	<0,01	<0,01	<0,01	3,9
Ablauf Großadsorber 2	13.02.2015	<0,01	<0,01	<0,01	3,6
Ablauf Kleinadsorber	13.02.2015	<0,01	<0,01	<0,01	3,5
Zulauf Adsorber	10.04.2015	<0,05	0,25	<0,01	2,9
Ablauf Großadsorber 1	10.04.2015	<0,05	<0,05	<0,01	5,6
Ablauf Großadsorber 2	10.04.2015	<0,05	<0,05	<0,01	3,5
Ablauf Kleinadsorber	10.04.2015	<0,05	<0,05	<0,01	6,5
Zulauf Adsorber	05.06.2015	0,06	0,31	<0,01	2,7
Ablauf Großadsorber 1	05.06.2015	<0,01	<0,01	<0,01	1,8
Ablauf Großadsorber 2	05.06.2015	<0,01	<0,01	<0,01	1,6
Ablauf Kleinadsorber	05.06.2015	0,02	0,03	<0,01	3
Zulauf Adsorber	03.07.2015	<0,01	0,25	<0,01	0,3
Ablauf Großadsorber 1	03.07.2015	<0,01	<0,01	<0,01	0,32
Ablauf Großadsorber 2	03.07.2015	<0,01	<0,01	<0,01	0,53
Ablauf Kleinadsorber	03.07.2015	<0,01	0,04	<0,01	0,52
Zulauf Adsorber	29.07.2015	0,03	0,28	<0,01	2
Ablauf Großadsorber 1	29.07.2015	0,02	<0,01	<0,01	0,83
Ablauf Großadsorber 2	29.07.2015	<0,01	<0,01	<0,01	1
Ablauf Kleinadsorber	29.07.2015	<0,01	0,03	<0,01	1,4
Zulauf Adsorber	02.09.2015	0,1	0,23	<0,01	0,89
Ablauf Großadsorber 1	02.09.2015	<0,01	<0,01	<0,01	0,27
Ablauf Großadsorber 2	02.09.2015	<0,01	<0,01	<0,01	0,38
Ablauf Kleinadsorber	02.09.2015	<0,01	0,05	<0,01	0,98
Zulauf Adsorber	30.09.2015	<0,05	0,19	<0,01	2,16
Ablauf Großadsorber 1	30.09.2015	<0,05	<0,05	<0,01	1
Ablauf Großadsorber 2	30.09.2015	<0,05	<0,05	<0,01	1,11
Ablauf Kleinadsorber	30.09.2015	<0,05	<0,05	<0,01	1,5
Zulauf Adsorber	22.10.2015	<0,05	0,2	<0,01	2,46
Ablauf Großadsorber 1	22.10.2015	<0,05	<0,05	<0,01	0,81
Ablauf Großadsorber 2	22.10.2015	<0,05	<0,05	<0,01	1,38
Ablauf Kleinadsorber	22.10.2015	<0,05	0,08	<0,01	1,68
Zulauf Adsorber	18.11.2015	<0,01	0,17	<0,01	1,55
Ablauf Großadsorber 1	18.11.2015	<0,01	<0,01	<0,01	1,04
Ablauf Großadsorber 2	18.11.2015	<0,01	<0,01	<0,01	0,81
Ablauf Kleinadsorber	18.11.2015	<0,01	0,05	<0,01	0,84
Zulauf Adsorber	09.12.2015	0,04	0,19	<0,01	1,49
Ablauf Großadsorber 1	09.12.2015	<0,01	<0,01	<0,01	1,3
Ablauf Großadsorber 2	09.12.2015	<0,01	<0,01	<0,01	2,02
Ablauf Kleinadsorber	09.12.2015	<0,01	0,09	<0,01	1,22
Zulauf Adsorber	06.01.2016	0,04	0,17	<0,01	2,99
Ablauf Großadsorber 1	06.01.2016	<0,01	<0,01	<0,01	1,92
Ablauf Großadsorber 2	06.01.2016	<0,01	<0,01	<0,01	2,34
Ablauf Kleinadsorber	06.01.2016	<0,01	0,08	<0,01	2,88

14.3 Berechnung der Betriebskosten

Pos.	Kostenart	Hydraffin AR, $v_{\text{Filter}} = 5 \text{ m/h}$, ges. Filterfläche = 126 m ²					
		3 Filter BV = 14600 €/a	3 Filter BV = 9500 €/a	3 Filter BV = 18100 €/a	3 Filter BV = 12600 €/a	10 Filter BV = 20000 €/a	10 Filter BV = 14200 €/a
1	Personalkosten (inkl. Labor)						
	Menge	0,24 1/a	0,27 1/a	0,22 1/a	0,24 1/a	0,32 1/a	0,37 1/a
	spez. Preis	68.000 1/a	68.000 1/a	68.000 1/a	68.000 1/a	68.000 1/a	68.000 1/a
		16.024,14	18.107,77	15.273,61	16.640,21	21.587,30	25.444,89
	Gesamtsumme 1 Personalkosten:	16.024,14	18.107,77	15.273,61	16.640,21	21.587,30	25.444,89
2	Energiekosten						
2.1	Filtration						
	ges. Druckverlust	700 mbar	700 mbar	700 mbar	700 mbar	700 mbar	700 mbar
	Laufzeit/Tag	24 h	24 h	24 h	24 h	24 h	24 h
	Menge	124.201 kWh/a	124.201 kWh/a	124.201 kWh/a	124.201 kWh/a	124.201 kWh/a	124.201 kWh/a
	spez. Preis (brutto)	0,175 €/kWh	0,175 €/kWh	0,175 €/kWh	0,175 €/kWh	0,175 €/kWh	0,175 €/kWh
		21.735,24	21.735,24	21.735,24	21.735,24	21.735,24	21.735,24
2.2	Spülung						
	Leistungsaufn. Pumpe	17,6 kW	17,6 kW	17,6 kW	17,6 kW	17,6 kW	17,6 kW
	Dauer Wasserspülung	0,17 h	0,17 h	0,17 h	0,17 h	0,17 h	0,17 h
	Leistungsaufn. Gebläse	23 kW	23 kW	23 kW	23 kW	23 kW	23 kW
	Dauer Luftspülung	0,05 h	0,05 h	0,05 h	0,05 h	0,05 h	0,05 h
	elektr. Leistung Filterspülg.	4,1 kWh/Spülg.	4,1 kWh/Spülg.	4,1 kWh/Spülg.	4,1 kWh/Spülg.	4,1 kWh/Spülg.	4,1 kWh/Spülg.
	Anzahl Spülungen/Jahr	313 1/a	313 1/a	313 1/a	313 1/a	313 1/a	313 1/a
	spez. Preis (brutto)	0,175 €/kWh	0,175 €/kWh	0,175 €/kWh	0,175 €/kWh	0,175 €/kWh	0,175 €/kWh
		223,56	223,56	223,56	223,56	223,56	223,56
	Gesamtsumme 2 Energiekosten:	21.958,81	21.958,81	21.958,81	21.958,81	21.958,81	21.958,81
3	Kosten Aufbereitungsstoffe						
3.1	GAK (Reaktiv)						
	Schüttvolumen/Jahr	350 m ³ /a	538 m ³ /a	282 m ³ /a	406 m ³ /a	256 m ³ /a	360 m ³ /a
	spez. Preis (brutto)	441 €/m ³	441 €/m ³	441 €/m ³	441 €/m ³	441 €/m ³	441 €/m ³
		154.280,00	237.104,00	124.446,85	178.768,89	112.624,40	158.625,92
	Gesamtsumme 3 Chemikalienkosten:	154.280,00	237.104,00	124.446,85	178.768,89	112.624,40	158.625,92
1	Gesamt Personalkosten	16.024,14	18.107,77	15.273,61	16.640,21	21.587,30	25.444,89
2	Gesamt Energiekosten	21.958,81	21.958,81	21.958,81	21.958,81	21.958,81	21.958,81
3	Gesamt Chemikalienkosten	154.280,00	237.104,00	124.446,85	178.768,89	112.624,40	158.625,92
	Summe Betriebskosten brutto	192.263	277.171	161.679	217.368	156.171	206.030
	spez. Betriebskosten [€/m³]	0,0376	0,0542	0,0316	0,0425	0,0306	0,0403