



Untersuchung einer bestehenden Filterstufe mit dem Einsatz von Aktivkohle zur Entfernung organischer Restverschmutzung auf der Kläranlage Düren-Merken

Kurzbericht zum Forschungsvorhaben

Kurzbericht zum Forschungsvorhaben

***„Untersuchung einer bestehenden Filterstufe
mit dem Einsatz von Aktivkohle zur
Entfernung organischer Restverschmutzung
auf der Kläranlage Düren-Merken“***

gerichtet an das

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



Düren, 31. Januar 2014

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Firk

Projektpartner

Projektleiter		Bearbeiter
	Wasserverband Eifel-Rur Eisenbahnstraße 5 52353 Düren Tel.: 02421 494-0 Fax: 02421 494-1508 E-Mail: Kontakt@wver.de www.wver.de	Dipl.-Ing. F. Benstöm Dipl.-Ing. H. Stepkes Dipl.-Ing. T. Rolfs
Partner		Bearbeiter
	Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp Mies-van-der-Rohe-Str. 1 52074 Aachen Tel.: 0241 80 25207 Fax: 0241 80 22285 E-Mail: isa@isa.rwth-aachen.de www.isa.rwth-aachen.de	Dipl.-Ing. F. Benstöm Dr.-Ing. D. Montag

Zitierweise:

BENSTÖM, F.; STEPKES, H.; ROLFS, T.; MONTAG, D.; PINNEKAMP, J. (2014): Untersuchung einer bestehenden Filterstufe mit dem Einsatz von Aktivkohle zur Entfernung organischer Restverschmutzung auf der Kläranlage Düren-Merken, Kurzbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV)

Inhaltsverzeichnis

Projektpartner.....	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Verzeichnis der Bilder.....	V
Verzeichnis der Tabellen	V
Verzeichnis der Abkürzungen.....	VI
1 Veranlassung und Zielsetzung	1
2 Begriffsdefinitionen	1
3 Abwassermatrix	2
4 Labortechnik (Variante 1a)	6
5 Halbtechnik (Variante 1b)	7
6 Großtechnik (Variante 2)	8
7 Eliminationsleistungen der halb- und großtechnischen Versuche	12
8 Kostenbetrachtung	17
9 Literatur.....	20

Verzeichnis der Bilder

Bild 1:	Spurenstoffkonzentration im Zulauf der Biologischen Stufe und im Zulauf des Filters, Betriebszeitraum 2. GAK, Konzentrationsbereich 0 – 10 µg/l (BORNEMANN et al., 2012).....	3
Bild 2:	Boxplot der Spurenstoffkonzentrationen Konzentrationsbereich 0 bis 8.000 ng/l im Filterzulauf, im Ablauf Referenz-Filterzelle und im Ablauf GAK-Filterzelle (Min, 25. Perzentil, Median, 75. Perzentil und Max-Wert, 3. GAK)	4
Bild 3:	CSB _{filt} zu DOC Verhältnis in den drei Betriebszeiträumen	4
Bild 4:	Vergleich des absoluten DOC (1. Säulenbündel links, grau) und der darin enthaltenen Anteile der DOC-Fraktionen der drei Messstellen (Zulauf Filter = Ablauf Nachklärung, Ablauf Referenz-Filterzelle und Ablauf GAK-Filterzelle) der Kläranlage Düren-Merken des WVER.....	6
Bild 5:	Aufbau der nachgeschalteten Adsorptionspassage im labortechnischen Maßstab auf der HtK-Neuss (Ansicht in Querrichtung).....	6
Bild 6:	Verfahrensfließbild der halbtechnischen Filtersäulen mit Probenahmestellen (PN)	8
Bild 7:	Aufbau der Filterschichten in der GAK- und Referenz-Filterzelle während der drei Betriebszeiträume	9
Bild 8:	Dauer der Filtrationszyklen für Referenz-Filterzelle mit altem und neuem Filtermaterial und 1. bis 3. GAK ausgewertet nach dem Druckkriterium.....	11
Bild 9:	DOC, Vergleich 1. GAK, 2. GAK und 3. GAK jeweils mit der Ablaufkonzentration der Referenz-Filterzelle als Median im jeweiligen Betriebszeitraum	13
Bild 10:	Elimination Carbamazepin als Ausgleichsfunktionen der normierten Ablaufkonzentrationen, Vergleich der halb- und großtechnischen Versuche (jeweils Einzeladsorber).....	14
Bild 11:	Erzielbare Bettvolumina ausgewählter Szenarien für 6 Adsorber im Parallelbetrieb	18
Bild 12:	Zusätzliche Brutto-Kosten der Filtration pro m ³ behandeltem Abwasser für 7 Szenarien der 1. – 3. GAK im umgebauten Flockungsfilter sowie der 2. GAK in einer nachgeschalteten weiteren Filtrationsstufe inkl. Investitionskosten (GUHt1 und GUHt2)	18

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Verwendete GAK in den großtechnischen Versuchen.....	9
Tabelle 2:	Erzielbare Bettvolumina für ausgewählte Szenarien für den Betrieb als Adsorber im Parallelbetrieb und Einzeladsorber.....	16

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
AFS	Abfiltrierbare Stoffe (entspricht TSS = engl.: total suspended solids)	[mg/l]
BPA	Bisphenol-A (Weichmacher)	[µg/l]
BV	(engl. Bed volumes) = durchgesetzte Bettvolumina	$\frac{\text{m}^3_{\text{Wasser}}}{\text{m}^3_{\text{GAK}}}$
c	Konzentration, Ablauf	
c ₀	Konzentration, Zulauf	
CBZ	Carbamazepin (Antiepileptikum)	[µg/l]
CSB _{filt}	Chemischer Sauerstoffbedarf (filtrierte Probe)	[mg/l]
CSB _{hom}	Chemischer Sauerstoffbedarf (homogenisierte, nicht-filtrierte Probe)	[mg/l]
DCF	Diclofenac (Nichtopioid- Analgetikum / Nichtsteroidales Antirheumatikum)	[µg/l]
DOC	(engl.: dissolved organic carbon); Gelöster organischer Kohlenstoff	[mg/l]
EBCT	(engl.: Empty Bed Contact Time) = Leerrohrkontaktzeit	[min]
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure (Komplexbildner)	[µg/l]
GAK	Granulierte Aktivkohle	
GT	Großtechnische Versuchsanlage (mit GAK umgerüsteter bestehender Flockungsfilter)	
GUHt1	Großtechnische Umsetzung der Halbtechnischen Versuchsanlage 1, GAK nachgeschaltet hinter bestehendem Flockungsfilter (EBCT ca. 16 min)	
GUHt2	Großtechnische Umsetzung der Halbtechnischen Versuchsanlage 2, GAK nachgeschaltet hinter bestehendem Flockungsfilter (EBCT ca. 33 min)	
HT	Halbtechnische Versuchsanlage	
HtK	Halbtechnische Kläranlage Neuss, Weckhovener Str. 63, 41466 Neuss	
IMID	Iopamidol (Röntgenkontrastmittel)	[µg/l]
LC-MS	(engl.: liquid chromatography-mass spectrometry); Flüssigchromatographie-Massenspektrometrie	
LC-OCD	engl: liquid chromatography-organic carbon detection; Verfahren zur Aufteilung des DOC in Einzelfractionen	
LOQ	Limit Of Quantification (= Bestimmungsgrenze)	
MET	Metoprolol (Betablocker)	[µg/l]
MKULNV	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen	
N4-SMX	N4-Acetylsulfamethoxazol (Hauptmetabolit von Sulfamethoxazol)	[µg/l]
PFOA	Perfluorooctansäure	[µg/l]
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure	[µg/l]
RA	Ritalinsäure (α-Phenyl-D-piperidinessigsäure, Hauptmetabolit von Ritalin® (Methylphenidat))	[µg/l]
SMX	Sulfamethoxazol (Antibiotikum)	[µg/l]
TCP	Tris(2-chlorisopropyl)phosphat (Phosphororganische Verbindungen)	[µg/l]

1 Veranlassung und Zielsetzung

Spurenstoffe und Umweltchemikalien, die mit den derzeitigen nach dem Stand der Technik betriebenen Kläranlagen nur in Teilen abgebaut und zurückgehalten werden können, stehen zum Teil im Verdacht, negative Auswirkungen auf die Gewässerökologie zu haben.

Um eine mögliche Steigerung des Rückhaltes organischer Restverschmutzungen (darunter auch Spurenstoffe) im Ablauf von Kläranlagen zu erzielen, beauftragte das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV) eine Vielzahl von Untersuchungen, um mögliche geeignete Verfahrenstechniken zu erproben.

Dieser Kurzbericht beschreibt die Ergebnisse des Projektes „Untersuchung an einer bestehenden Filterzelle mit dem Einsatz von Aktivkohle zur Entfernung organischer Restverschmutzung auf der Kläranlage Düren-Merken“. Der Abschlussbericht mit u. a. den theoretischen Grundlagen, detaillierten Angaben zu den Methoden und weiteren Ergebnissen wurde als BENSTÖM et al. (2014) veröffentlicht. In diesem Vorhaben wurde das Filtermaterial einer von zwölf bestehenden großtechnischen Filterzellen gegen granuliert Aktivkohle (GAK) ausgetauscht. Ziel war es dabei die organische Restverschmutzung ausgedrückt als Summenparameter CSB und DOC im Ablauf der Kläranlage weiter mittels Adsorption an GAK zu verringern. Zudem wurde auch in Verbindung mit dem abgeschlossenen Projekt MIKROFLOCK (BORNEMANN et al., 2012) die Elimination ausgewählter Spurenstoffe durch granuliert Aktivkohle in den Jahren 2011 bis 2013 untersucht. Wesentliche Teilergebnisse wurden bereits dort (BORNEMANN et al., 2012) veröffentlicht.

Neben den großtechnischen Untersuchungen mit drei unterschiedlichen GAK wurden im vorliegenden Projekt labor- und halbtechnische Untersuchungen durchgeführt, um weitere, alternative Anlagen- und Betriebskonfigurationen abzubilden. Um die für dieses Projekt besonders bedeutende Matrix gelöster Organik abseits der üblichen Summenparameter näher zu charakterisieren, wurde das Verfahren Liquid Chromatography-Organic Carbon Detection (LC-OCD) angewandt.

2 Begriffsdefinitionen

Für die Bemessung von GAK-Filtern sind insbesondere drei Kriterien von entscheidender Bedeutung:

- EBCT (engl. Empty Bed Contact Time = Leerrohrkontaktzeit) [min]
- Korngröße der GAK und verwendetes Produkt
- BV (engl. bed volumes = durchgesetzte Bettvolumina) [$\text{m}^3_{\text{Abwasser}}/\text{m}^3_{\text{GAK}}$]

Die EBCT bezeichnet die Zeit, die sich ein Wasserteilchen rein rechnerisch in der durchströmten Filterkammer (ohne Schüttung) befindet. Sie lässt sich in diesem Fall aus der Beschickungswassermenge und dem Volumen der Filterkammer ermitteln. Prinzipiell ist eine möglichst hohe EBCT und damit eine hohe Kontaktzeit anzustreben, um eine gute Adsorption zu ermöglichen. Die EBCT lässt sich direkt aus der Fließgeschwindigkeit (bzw. Durchfluss und Filterfläche) und der GAK-Schütthöhe ableiten.

Die Korngröße der GAK ist aus zwei Gründen für die Bemessung von GAK-Filtern von Bedeutung. Einerseits ist GAK mit geringer Korngröße in Hinblick auf die zu erwartende Adsorptionsleistung besser als eine grobkörnige, da sie eine größere Oberfläche zur Adsorption bietet. Damit ist eine geringere EBCT erforderlich, um die gleiche Elimination zu erhalten. Andererseits werden in einem GAK-Filter auch partikuläre und kolloide Stoffe aus dem Abwasser abgeschieden, die im Filterbett zur Verblockung führen können. Eine feinere GAK-Körnung bewirkt prinzipiell eine schnellere Verblockung als eine gröbere. Beide Kriterien – Optimale Adsorption und Feststoffelimination – müssen bei der Bemessung gegeneinander abgewogen werden. Das verwendete GAK-Produkt ist ebenfalls von großer Bedeutung und sollte durch Adsorptionsversuche im Labormaßstab mit der örtlich vorliegenden Abwassermatrix und nach den Erfahrungen des Lieferanten ausgewählt werden.

Die BV (Einheit „ $\text{m}^3_{\text{Wasser}}/\text{m}^3_{\text{GAK}}$ “) bezeichnen das Wasservolumen, das pro GAK-Volumen im Filter durchgesetzt wurde.

3 Abwassermatrix

Im Folgenden werden die Ergebnisse für den Betriebszeitraum der 3. GAK zusammen mit den bereits zuvor auf der Kläranlage Düren-Merken gewonnenen Ergebnissen für die Betriebszeiträume der 1. und 2. GAK (BORNEMANN et al., 2012) dargestellt.

Der Rückhalt der betrachteten Spurenstoffe in der vorgeschalteten biologischen Stufe ist insgesamt als gering zu bewerten. Bereits im Betriebszeitraum der 1. GAK sind die ermittelten PFOA (Median: $0,35 \mu\text{g/l}$) und PFOS (Median: $0,05 \mu\text{g/l}$) Konzentrationen im Filterzulauf gering, im Betriebszeitraum der 2. GAK lassen sich weder im Zulauf der biologischen Stufe noch im Zulauf des Filters PFOA bzw. PFOS nachweisen (Bild 1).

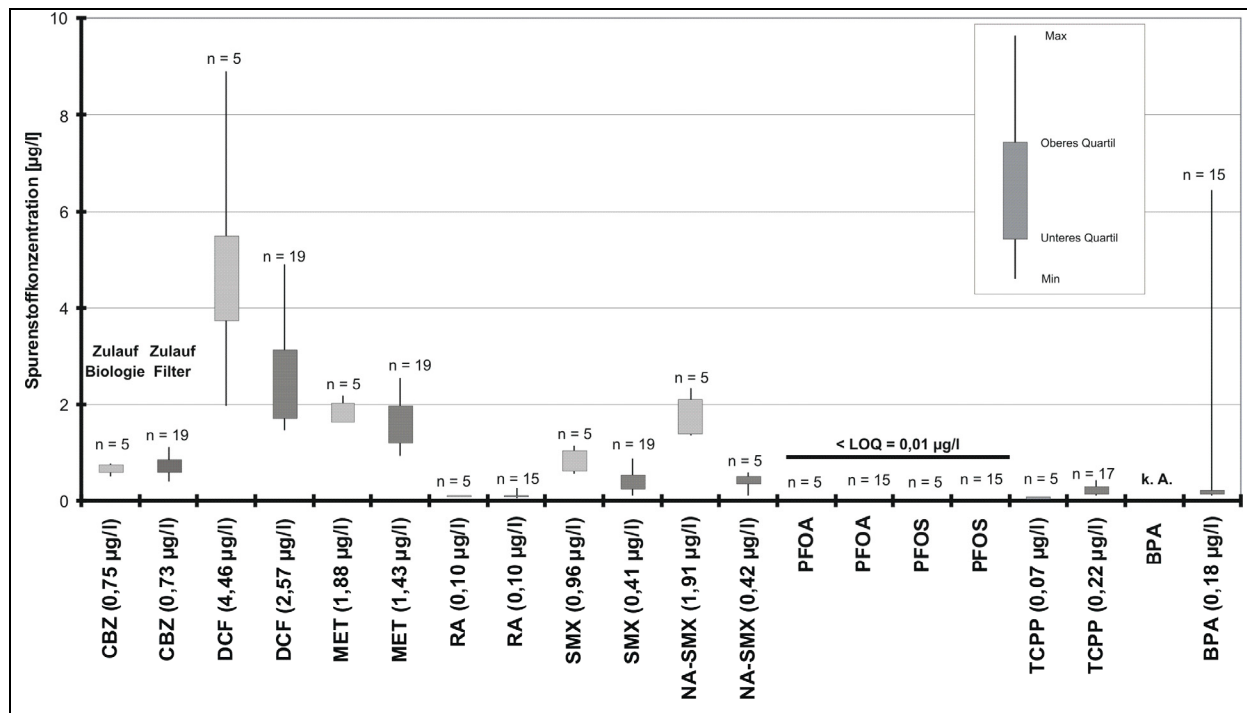


Bild 1: Spurenstoffkonzentration im Zulauf der Biologischen Stufe und im Zulauf des Filters, Betriebszeitraum 2. GAK, Konzentrationsbereich 0 – 10 µg/l (BORNEMANN et al., 2012)

Diclofenac tritt im Betriebszeitraum der 2. und 3. GAK in höherer Konzentration (Median: 2,57 µg/l und 2,96 µg/l) auf als im Betriebszeitraum der 1. GAK (Median: 1,62 µg/l). Eine mögliche Erklärung ist gemäß MIEHE (2010) eine vermehrte Verschreibung von Rheumamitteln (in denen Diclofenac zum Teil enthalten ist) in den Wintermonaten (Betriebszeiträume der 2. und 3. GAK).

Carbamazepin zeigt im Filterzulauf in beiden Betriebszeiträumen (Median Betriebszeitraum 1. GAK: 0,86 µg/l und Median Betriebszeitraum 2. GAK: 0,75 µg/l) eine sehr geringe und nahezu symmetrische Streuung der Messwerte. Bei der 3. GAK liegt der Median mit 1,25 µg/l höher, jedoch auch mit einer im Vergleich zu anderen Spurenstoffen wie Diclofenac geringer Streuung (Bild 2).

Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol und H-Benzotriazol zeigen über den gesamten Betrachtungszeitraum eine eindeutige (das 75. Perzentil des Ablaufs liegt unterhalb des 25. Perzentils des Zulaufs) Reduktion im Ablauf der GAK-Filterzelle (Bild 2).

H-Benzotriazol, EDTA, Iopromid und Amidotrizoesäure kommen im Vergleich zu den anderen untersuchten Spurenstoffen in hohen Konzentrationen im Filterzulauf vor. Ritalinsäure kommt im Betriebszeitraum der 2. GAK mit einer Konzentration von 0,10 µg/l in vergleichsweise geringer Konzentrationen vor. Die untersuchten Hormone E1-Estron, E2-17β-Estradiol und EE2-17α-Ethinylestradiol lagen in allen untersuchten Proben unterhalb der Bestimmungsgrenze von 10 ng/l (BORNEMANN et al., 2012).

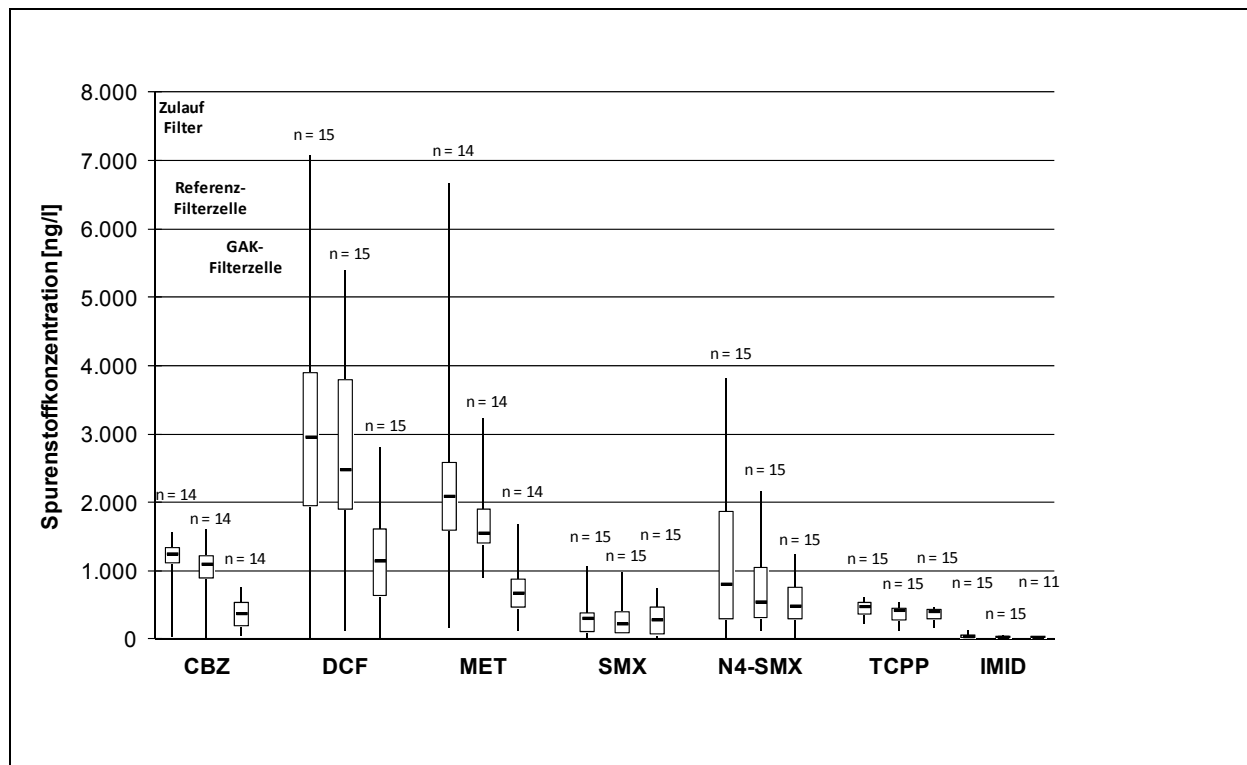


Bild 2: Boxplot der Spurenstoffkonzentrationen (Konzentrationsbereich 0 bis 8.000 ng/l) im Filterzulauf, im Ablauf Referenz-Filterzelle und im Ablauf GAK-Filterzelle (Min, 25. Perzentil, Median, 75. Perzentil und Max-Wert, 3. GAK)

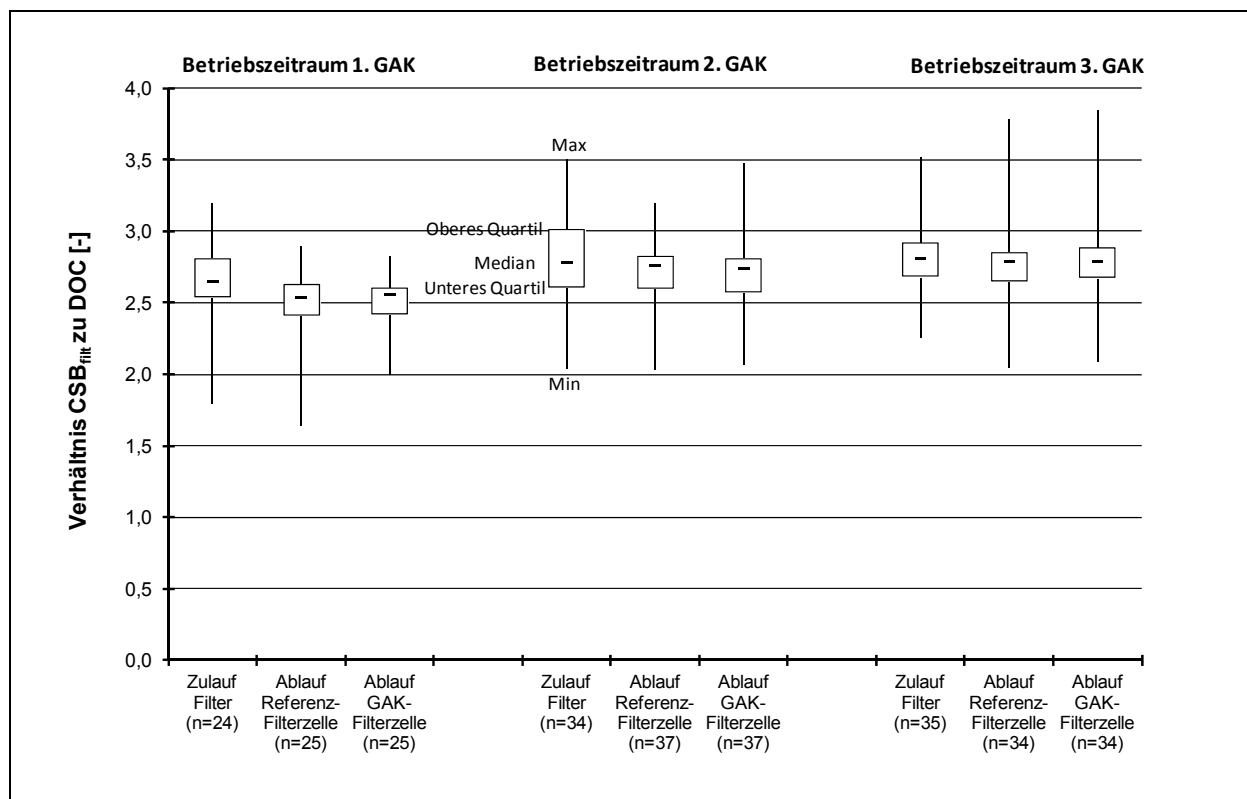


Bild 3: CSB_{filtr} zu DOC Verhältnis in den drei Betriebszeiträumen

Die Untersuchung des homogenisierten CSB ergab innerhalb der Betriebszeiträume der 1., 2 und 3. GAK für den Ablauf der großtechnischen Referenz-Filterzelle Mediane von 34, 40 und 48 mg CSB_{hom}/l, was als relativ hoch zu bewerten ist. Das Verhältnis CSB_{filt} zu DOC wurde in allen drei Betriebszeiträumen für den Zulauf des Filters, sowie die Abläufe der Referenz- und GAK-Filterzelle ermittelt. Die Mediane der Verhältnisse liegen zwischen 2,5 und 2,8. Die existierenden Schwankungsbreiten zwischen den Betriebszeiträumen und den Probenahmestellen sind vergleichsweise gering (Bild 3).

Der DOC wurde mittels LC-OCD weiter charakterisiert. Dabei handelt es sich um eine Analyse-methode, bei der die Wasserprobe nach Abtrennung der Feststoffe über eine chromatographische Trennsäule (LC = Liquid Chromatography) geführt wird und so die einzelnen Fraktionen des DOC entsprechend ihrer Eigenschaften diese mehr oder weniger verzögert passieren. Im Ablauf der Trennsäule befindet sich ein Detektor zur Messung des DOC (OCD = Organic Carbon Detector). Untersucht wurden Abläufe von drei - hinsichtlich ihrer Abwasserzusammensetzung (Mittlerer CSB im Zulauf der biologischen Stufe: 384, 708, 608 mg/l) und Größe (9.705, 32.927 und 131.509 E) sehr unterschiedlichen - Kläranlagen (Hambach, Setterich und Düren-Merken) sowie (Bild 4) der Zulauf des Flockungsfilters und die Abläufe der Referenz- und GAK-Filterzelle (25.10.12: 1.175 BV; 29.10.12: 1.534 BV; 19.11.2012: 3.353 BV) der Kläranlage Düren-Merken. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Abläufe der drei untersuchten Kläranlagen unterscheiden sich deutlich aufgrund der absoluten Höhe ihres DOC (6, 7 und 11 mg/l).
- Die Abläufe der drei untersuchten Kläranlagen unterscheiden sich in der prozentualen Zusammensetzung der Einzelfraktionen des DOC nicht grundlegend.
- Die Huminstoffe bilden immer die Hauptfraktion des DOC, die hydrophobe Fraktion und niedermolekularen Neutralstoffe zeigen die größten Schwankungen, die jedoch durch das Analyseverfahren bedingt sein können.
- Die Streuung des absoluten DOC im Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Düren ist gering und liegt auf dem gleichen Niveau wie der Ablauf der Referenz-Filterzelle.
- Die prozentuale Zusammensetzung des DOC im Zulauf des Filters liegt für alle Fraktionen auf dem gleichen Niveau wie der Ablauf der Referenz-Filterzelle.
- Der DOC im Ablauf der GAK-Filterzelle ist geringer als im Zulauf des Filters sowie im Ablauf des Referenz-Filters.
- Die Abnahme des DOC bei der GAK-Filterzelle ist durch die Abnahme der hydrophoben Anteile und der niedermolekularen Neutralstoffe bedingt.
- Anders als beim Vergleich der drei unterschiedlichen KA untereinander sind die Schwankungen der niedermolekularen Neutralstoffe innerhalb der KA Düren geringer.

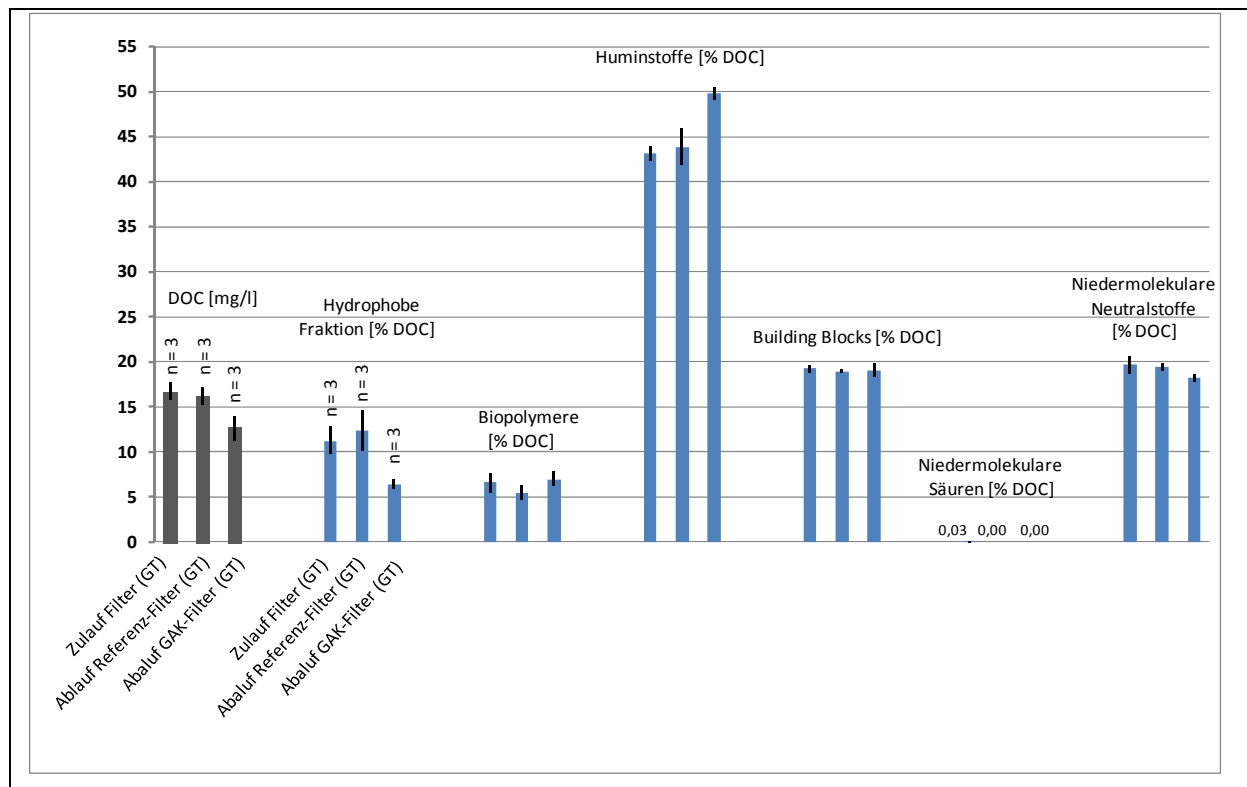


Bild 4: Vergleich des absoluten DOC (1. Säulenbündel links, grau) und der darin enthaltenen Anteile der DOC-Fractionen der drei Messstellen (Zulauf Filter = Ablauf Nachklärung, Ablauf Referenz-Filterzelle und Ablauf GAK-Filterzelle) der KA Düren-Merken

4 Labortechnik (Variante 1a)

In der Variante 1a wurde im labortechnischen Maßstab geprüft, ob sich eine dem Flockungsfilter nachgeschaltete Adsorptionspassage zur Reduzierung organischer Restverschmutzungen eignet. Dazu wurde ein Gerinne erprobt, in das GAK in Körben eingebracht wird (Bild 5).

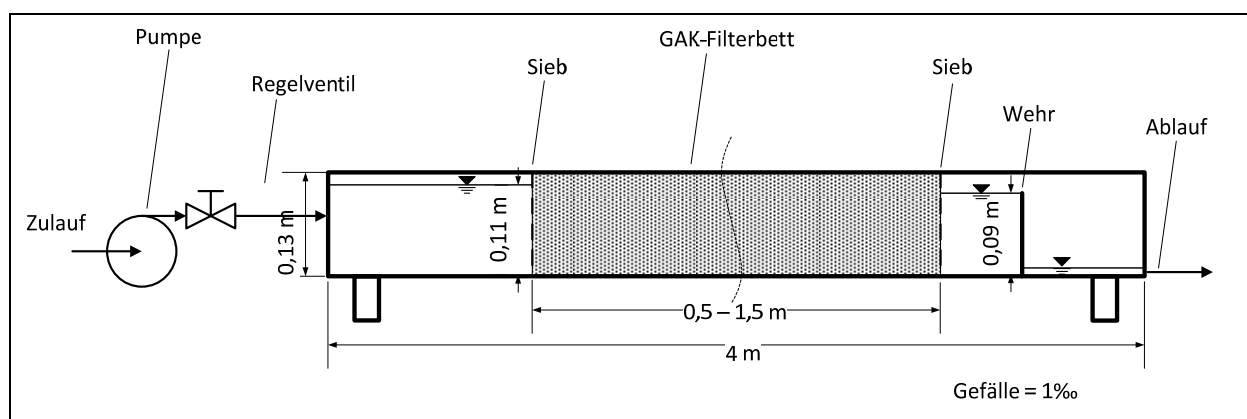


Bild 5: Aufbau der nachgeschalteten Adsorptionspassage im labortechnischen Maßstab auf der HtK-Neuss (Ansicht in Querrichtung)

Nach Auswertung der Versuche lässt sich feststellen, dass eine als Gerinne ausgebildete nachgeschaltete Adsorptionspassage aus folgenden Gründen nicht praktikabel ist:

- Das Filterbett ist konstruktionsbedingt nicht rückspülbar. Zwar wird die Passage mit feststoffarmen Ablauf der Filter beschickt, eine Rückspülmöglichkeit ist aber zwingend erforderlich, wie die Betriebserfahrungen der halbtechnischen Versuche zur Variante 1b zeigten, bei denen ebenfalls feststoffarmes Wasser auf die Adsorptionspassage gegeben wurde und dennoch Rückspülungen erforderlich wurden.
- Es ergeben sich keine Vorteile hinsichtlich der Handhabung beim Ein- und Ausbau der GAK aus den Gerinnen, da hier die GAK nicht besser als aus einem großtechnischen Filter abgesaugt werden kann.
- Die für die großtechnische Umsetzung der Adsorptionspassage erforderliche Filterfläche beträgt in einer orientierenden Dimensionierung 990 m^2 (Filtrationsfläche des existierenden Flockungsfilters: $A_{\text{fil}} = 450 \text{ m}^2$). Damit benötigt die Adsorptionspassage im besten anzunehmenden Fall die doppelte Filterfläche und damit bei etwa gleicher Kontaktzeit die doppelte Menge an GAK, die vorzuhalten wäre.
- Die relativ kurze Leerbettkontaktzeit von 10 min in Verbindung mit einer marktuntypisch groben GAK führt aufgrund der trägen Kinetik eines solchen Systems zwangsweise zu schlechten Eliminationsergebnissen. Die feineren, marktgängigen GAK erbrachten zwar eine hohe Kontaktzeit, aber demzufolge auch einen sehr geringen Durchfluss, der großtechnisch nicht umsetzbar gewesen wäre.

5 Halbtechnik (Variante 1b)

Da sich Variante 1a als praktisch nicht durchführbar erwies, wurde Variante 1b halbtechnisch untersucht. Für diese halbtechnischen Versuche kamen zwei Filtersäulen zum Einsatz, die seriell verschaltet wurden. Die Säulen wurden mit einer Tauchpumpe beschickt, die in den Ablaufkanal der KA Düren-Merken unmittelbar hinter dem Flockungsfiler, vor Einleitung in die Vorflut eingebaut war. Die Beschickung erfolgte kontinuierlich und mit konstantem Durchfluss. Durch Probenahme vor den Säulen, hinter der 1. Säule und hinter der 2. Säule war es möglich die Adsorptionsleistung der verwendeten GAK für zwei unterschiedliche Kontaktzeiten EBCT (ca. 16 resp. 33 min) zu untersuchen (Bild 6).

Die Ergebnisse der halbtechnischen Versuche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Eine Spülung der Säulen zur Entfernung von Feststoffen aus dem Filterbett war im Mittel erst nach 40 d erforderlich (Gesamtbetriebszeit: 219 d).
- Eine Luftspülung war nicht erforderlich, reine Wasserspülungen waren aufgrund des geringen Feststoffgehalts im Zulauf ausreichend.

- Die erzielten Eliminationen sind mit doppelter EBCT (ca. 33 min statt ca. 16 min) für alle untersuchten Spurenstoffe sowie die Summenparameter DOC und CSB_{filt} deutlich höher.
- Das Durchbruchverhalten der betrachteten relativ gut adsorbierbaren Spurenstoffe Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac und Metoprolol ist um ein Vielfaches langsamer als das des DOC oder CSB_{filt} .

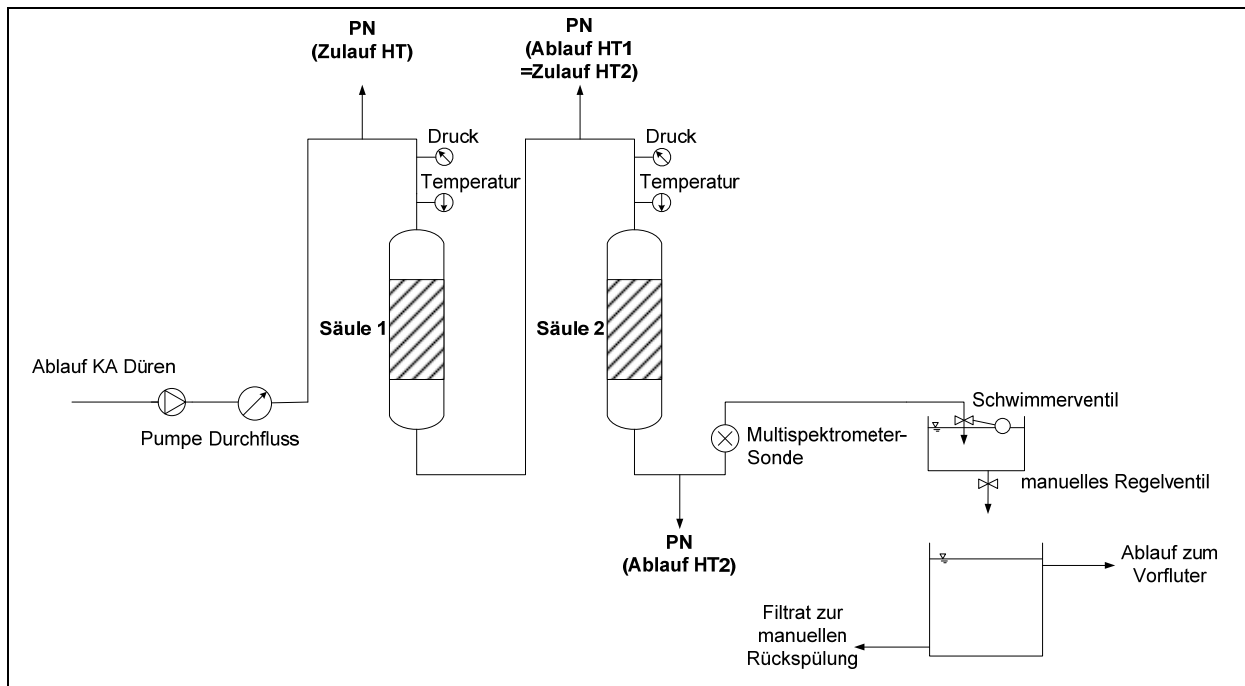


Bild 6: Verfahrensfliessbild der halbtechnischen Filtersäulen mit Probenahmestellen (PN)

6 Großtechnik (Variante 2)

In großtechnischen Versuchen wurde das Filtermaterial einer der zwölf bestehenden Filterzellen im Ablauf der Nachklärung gegen drei unterschiedliche GAK ausgetauscht (Bild 7). Die GAK zeichneten sich u. a. durch unterschiedliche Körnungen aus, wobei die 1. GAK mit 1,4 – 2,5 mm die größte Körnung aufwies (Sondersiebung), und damit der Körnung der oberen Filterschicht des ursprünglichen Filtermaterials des Flockungsfilters entsprach. Die 2. GAK und 3. GAK waren handelsübliche GAK mit 0,5 – 2,5 mm resp. 1,0 – 2,4 mm. Bei allen drei GAK handelte es sich um reaktivierte Aktivkohlen auf Steinkohlenbasis (Tabelle 1).

Bei der 1. GAK stellte sich aufgrund der Schütthöhe und der Filtrationsgeschwindigkeit eine EBCT von ca. 11 min, bei der 2. und 3. GAK von je etwa 14 min ein.

Die Untersuchung der betrieblichen Aspekte, wie das Einfüllen und der Ausbau der beladenen GAK, wurde bereits im Projekt MIKROFLOCK (BORNEMANN et al., 2012) beschrieben und im vorliegenden Projekt für die 3. GAK fortgeführt. Die Auswahl der GAK ist ausführlich in BORNEMANN et al. (2012) dargestellt.

Tabelle 1: Verwendete GAK in den großtechnischen Versuchen

Bezeichnung	Lieferant	Produktname	Korngröße [mm]	Typ	Rohstoffbasis
1. GAK	Carbon Service & Consulting GmbH (CSC) & Co. KG, Vettweiß	HCR 700	1,4 – 2,5	Reaktivat	Steinkohle
2. GAK	Norit, Amersfoort, Niederlande	NRS GA	0,5 – 2,5	Reaktivat	Steinkohle
3. GAK	Jacobi Carbons GmbH, Frankfurt a. M.	Resorb HC	1,0 – 2,4	Reaktivat	Steinkohle

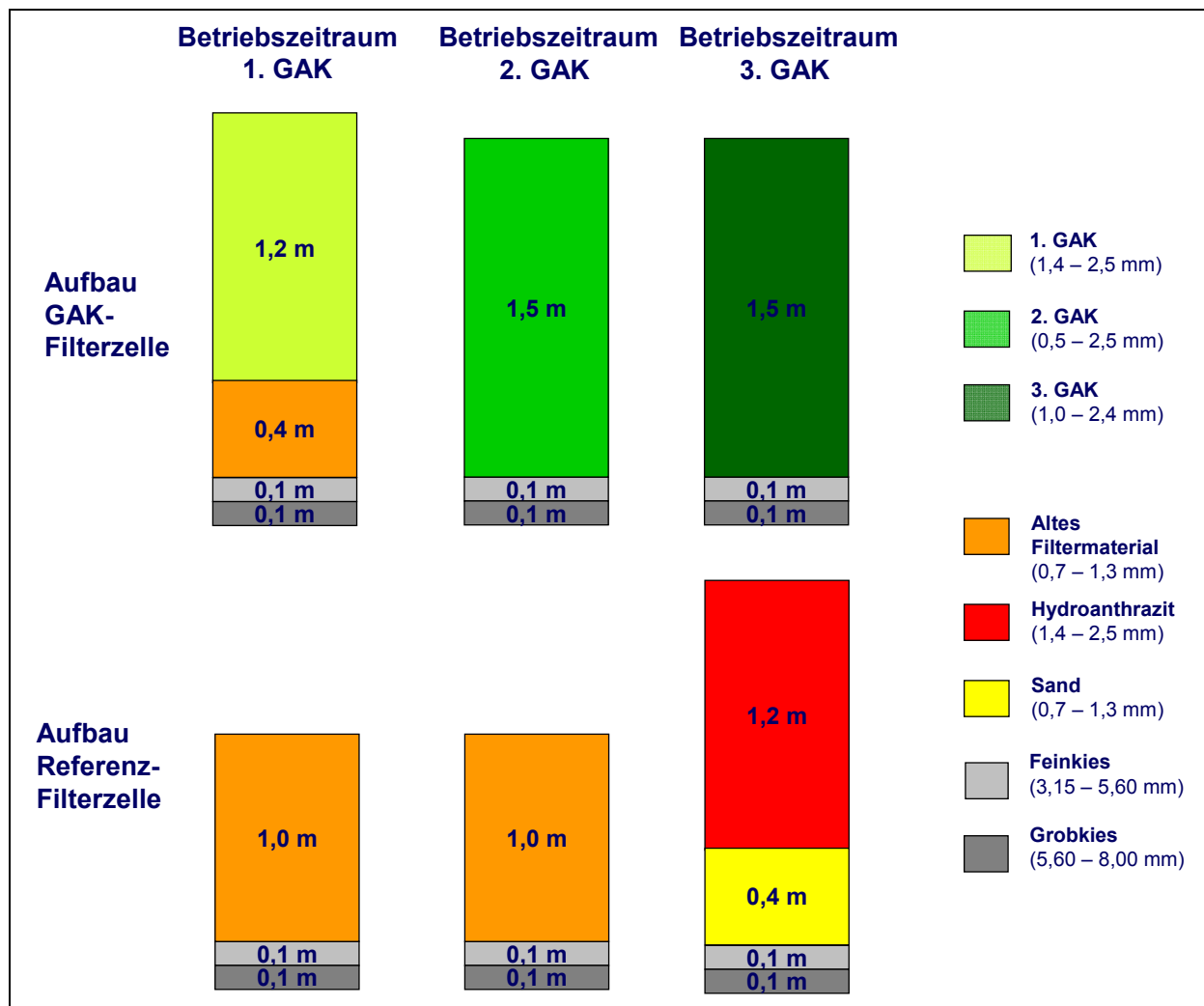


Bild 7: Aufbau der Filterschichten in der GAK- und Referenz-Filterzelle während der drei Betriebszeiträume

Sowohl eine nasse, mittels Injektor, als auch trockene Einbauweise mittels Big-Bags und Kran wurde großtechnisch getestet, beide Varianten waren realisierbar. Erstere dürfte sich jedoch bei einer großtechnischen Umsetzung über den reinen Versuchsbetrieb hinaus dauerhaft als praktikabler erweisen. Für den Ein- und Ausbau der GAK im großtechnischen Versuchsbetrieb waren jeweils etwa 1 – 2 d erforderlich. Nach Einbringung der GAK (trocken oder nass) ist eine ausreichende, etwa 2 – 3 tägige Wässerung der GAK im Überstau unabdingbar, um diese vollständig mit Wasser zu benetzen und damit einen Abtrieb während der ersten Inbetriebnahmespülung zu verhindern. Die Inbetriebnahmespülung der GAK wurde mit sukzessiv gesteigerter Spülgeschwindigkeit durchgeführt, um den Feinstkornanteil aus der GAK-Schüttung zu entfernen. Der Feinstkornanteil würde andernfalls zu einem zu schnellen Druckabfall während des Filtrationsbetriebs führen. Die hier getesteten drei GAK wurden mit Wasserspülgeschwindigkeiten zwischen 25 m/h und 50 m/h betrieben, um die erforderliche Bettexpansion von etwa 25 % zur optimalen Feststoffentfernung zu erreichen. Bei der 2. getesteten GAK wurde die Spülgeschwindigkeit im Winterbetrieb von 30 m/h auf 25 m/h reduziert, um der veränderten Viskosität des Wassers Rechnung zu tragen. Zur Auflockerung des verschmutzten GAK-Betts erfolgte vor jeder Wasserspülung eine Luftspülung mit etwa 70 m/h.

Während der großtechnischen Untersuchungen wurde die Höhe des GAK-Bettes gemessen. Der GAK-Verlust während des Betriebs der 1. und 2. GAK konnte darauf zurückgeführt werden, dass die Befüllungsklappe des Filters zu schnell öffnete und damit einen Teil der GAK während der Befüllung nach erfolgter Rückspülung aus dem Filter spülte. Nach Umprogrammierung der Klappe, so dass diese selbst im manuellen Betrieb nur langsam öffnete, zeigte die 3. GAK nach 148 d Betriebsdauer eine Reduktion der Betthöhe von etwa 3 %. Vor der Umprogrammierung wurde eine Reduktion um knapp 10 % nach 148 d Betrieb der 2. GAK verzeichnet.

Alle drei GAK wurden seitens der Lieferanten nach adsorptiver Beladung ausgebaut. Eine erfolgreiche Reaktivierung der verwendeten Aktivkohlechargen wurde bestätigt. Ein Wiedereinbau der Reaktivate in den gleichen Filter war in diesem Projekt nicht vorgesehen.

Die AFS-Konzentration lag im Zulauf des Filters im Betriebszeitraum der 1. GAK bei etwa 20 mg/l, im Betriebszeitraum der 2. und 3. GAK jeweils bei etwa 30 mg/l (jeweils Mediane) und damit auf einem vergleichsweise hohen Niveau für den Ablauf einer Nachklärung. Wie in BORNEMANN et al. (2012) dargestellt, eliminierten die GAK-Filterzelle mit der 1. und 2. GAK ebenso wie die Referenz-Filterzelle bis auf etwa 3 – 4 mg AFS/l. Diese Ergebnisse konnten für die 3. GAK bestätigt werden. Die vor dem Betriebszeitraum der 3. GAK mit neuem Filtermaterial (Hydroanthrazit, Sand und Kies) befüllte Referenz-Filterzelle bewirkte ebenso eine Elimination bis auf 3 – 4 mg AFS/l. Damit erbrachten die Referenz-Filterzelle mit altem Fil-

termaterial und mit neuem Filtermaterial sowie die GAK-Filterzelle mit 3 GAK unterschiedlicher Körnung die gleiche AFS-Elimination.

Durch Verwendung der groben 1. GAK konnte eine Verlängerung des Filtrationsintervalls gegenüber der Referenz-Filterzelle von ca. 11 h auf ca. 22 h bis zur erforderlichen Spülung erreicht werden. Die 2. GAK hingegen musste selbst nach Heraufsetzung des Druckkriteriums, durch das die Spülung ausgelöst wird, bereits nach ca. 5 h gespült werden und zeigt damit eine sehr schlechte Raumfiltrationswirkung (Bild 8).

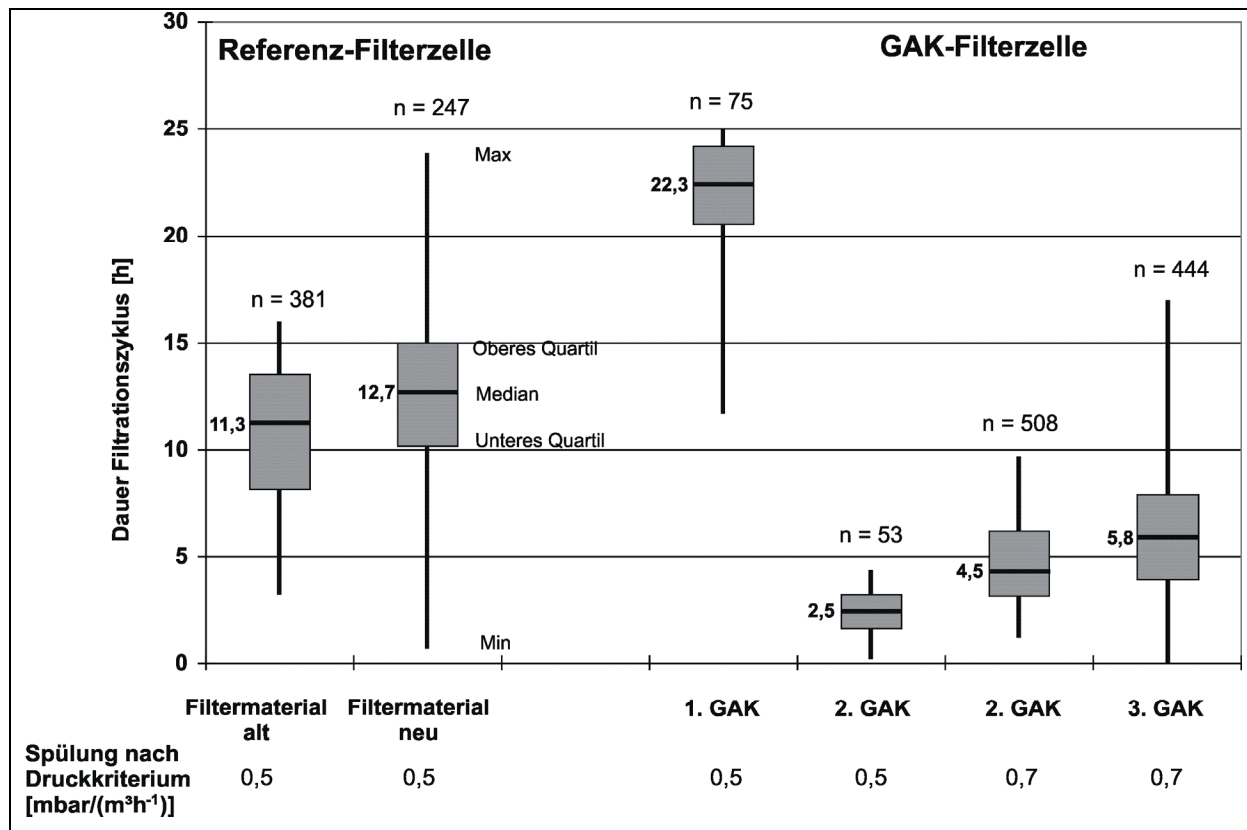


Bild 8: Dauer der Filtrationszyklen für Referenz-Filterzelle mit altem und neuem Filtermaterial und 1. bis 3. GAK ausgewertet nach dem Druckkriterium

Die 3. GAK musste bereits nach ca. 6 h gespült werden und ist damit nur geringfügig besser als die 2. GAK. Die Referenz-Filterzelle mit dem neuen Filtermaterial musste nach 13 h gespült werden und ist damit nur unwesentlich besser als die Referenz-Filterzelle mit dem alten Filtermaterial, was jedoch wahrscheinlich an einer betrieblich gewollten zu langsamen Spülgeschwindigkeit liegt. Die erzielten Filterbettbeladungen lagen für die Referenz-Filterzelle mit altem Filtermaterial bei 1,4 kg AFS/m³, für das neue Filtermaterial (mit noch nicht optimaler Rückspülung) bei 1,9 kg AFS/m³, für die GAK-Filterzelle mit der 1. GAK bei 1,8 kg AFS/m³, für die 2. GAK und 3. GAK bei nur 0,5 resp. 0,6 kg AFS/m³. Abschließend lässt sich feststellen, dass die 2. und 3. GAK bei unverändert hohem AFS im Zulauf des Filters (= Ablauf Nachklärung) der Kläranlage Düren-Merken hydraulisch nicht zu betreiben sind.

Die GAK-Filterzelle war in den realen Anlagenbetrieb eingebunden und wurde so auf einen relativ konstanten Durchsatz und damit auf eine relativ konstante EBCT seitens des Leitsystems eingeregelt. Gelegentlich kommt es betriebsbedingt dazu, dass eine Filterzelle nicht direkt gespült wird. Damit fällt der Durchsatz der Filterzelle aufgrund des Druckabfalls unter den Sollwert und die EBCT erhöht sich entsprechend. Mit Hilfe der Multispektrometersonde im Ablauf der GAK-Filterzelle konnte gezeigt werden, dass eine EBCT von länger als 20 min zu höheren CSB_{filt} -Eliminationen führte. Die aufgrund der baulichen und hydraulischen Randbedingungen auf der KA Düren vorgegebene EBCT muss damit als zu kurz für eine optimale Reduktion des CSB_{filt} bezeichnet werden.

Durch Auftragung der auf den Filterzulauf normierten Ablaufkonzentration ausgewählter Spurenstoffe (c/c_0) und Iteration von Ausgleichsfunktionen, wurden Durchbruchskurven erstellt. Durchbruchskurven wurden nur für diejenigen Spurenstoffe erstellt, die während des 3. Betriebszeitraums eine eindeutige Spurenstoffelimination (das 75. Perzentil des Ablaufs liegt unterhalb des 25. Perzentils des Zulaufs) erkennen ließen, so dass jeweils eine Ausgleichsfunktion erstellt werden konnte. Dabei handelt es sich um die Spurenstoffe Carbamazepin, Diclofenac, H-Benzotriazol und Metoprolol. Für alle anderen untersuchten Spurenstoffe konnte unter den vorliegenden Versuchsbedingungen (z. B. geringe EBCT von 11 resp. 14 min) im großtechnischen Versuch der 1. bis 3. GAK aufgrund der starken Messwert-schwankungen und der geringen Elimination keine Ausgleichsfunktion iteriert werden.

7 Eliminationsleistungen der halb- und großtechnischen Versuche

Gem. Bild 9 liegt die Elimination des gelösten Kohlenstoffs, ausgewertet über den Parameter DOC innerhalb des Filterbetts der großtechnischen Referenz-Filterzelle, in den Betriebszeiträumen der 1., 2. und 3. GAK jeweils unter 10 % (Mediane). Nach erschöpfter Adsorptionskapazität der GAK verbleibt in der GAK-Filterzelle eine Restelimination gleicher Größenordnung, die vermutlich auf biologischen Abbau zurückzuführen ist. Auch in den halbtechnischen Versuchen zeigt die GAK bei unterschiedlichen EBCT eine verbleibende Elimination von etwa 10 %, wobei der stationäre Zustand für die längere EBCT von etwa 33 min zu Versuchsende noch nicht eindeutig erreicht war. Der ebenfalls gemessene CSB_{filt} verhält sich dazu analog (BENSTÖM et al., 2014).

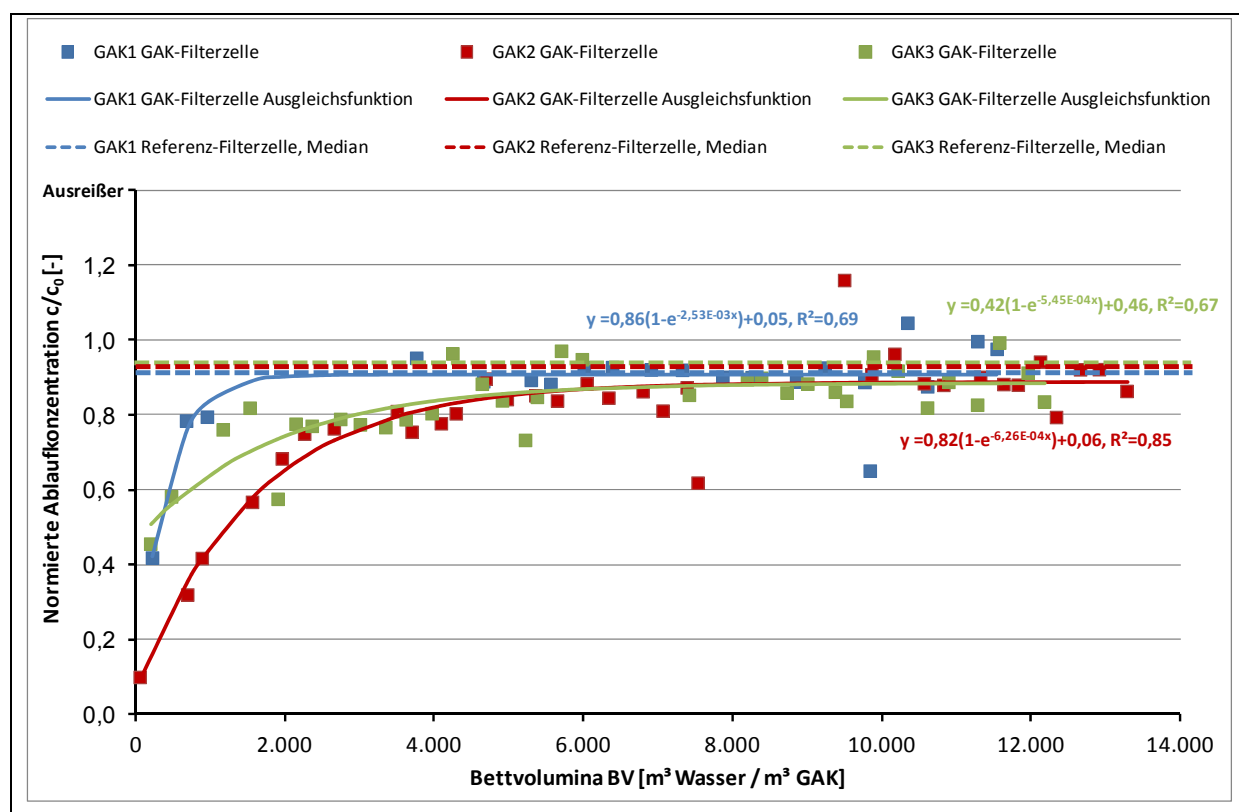


Bild 9: DOC, Vergleich 1. GAK, 2. GAK und 3. GAK jeweils mit der Ablaufkonzentration der Referenz-Filterzelle als Median im jeweiligen Betriebszeitraum

Im Folgenden werden beispielhaft für einen Spurenstoff die erzielten Eliminationsleistungen in den halb- und großtechnischen Versuchen gegenübergestellt. Dazu wurden die Ausgleichsfunktionen der jeweiligen Versuche (BENSTÖM et al., 2014) in Bild 10 zusammengefasst. Als Spurenstoff wurde beispielhaft Carbamazepin ausgewählt, da die Abbauraten in der biologischen Stufe als sehr gering zu bewerten ist. Zudem liegen die Schwankungen der Messwerte im Zulauf des Filters auf einem niedrigen Niveau (Bild 1, Bild 2 und BORNEMANN et al., 2012).

Aus Bild 10 lässt sich im Falle der Elimination von Carbamazepin Folgendes ableiten:

- Die GAK mit der größten Körnung und gleichzeitig der geringsten EBCT von 11 min (GT (1. GAK)) zeigt die schlechtesten Eliminationsleistungen.
- Die Eliminationsleistung der 2. GAK liegt für den umgebauten Flockungsfilter (GT (2. GAK)) und die nachgeschaltete Variante (HT1 (2. GAK)) auf dem gleichen Niveau.
- Die Eliminationsleistung der 2. GAK mit verdoppelter EBCT von etwa 33 min zeigt eine deutlich bessere Eliminationsleistung, jedoch keine doppelte so hohe Elimination.

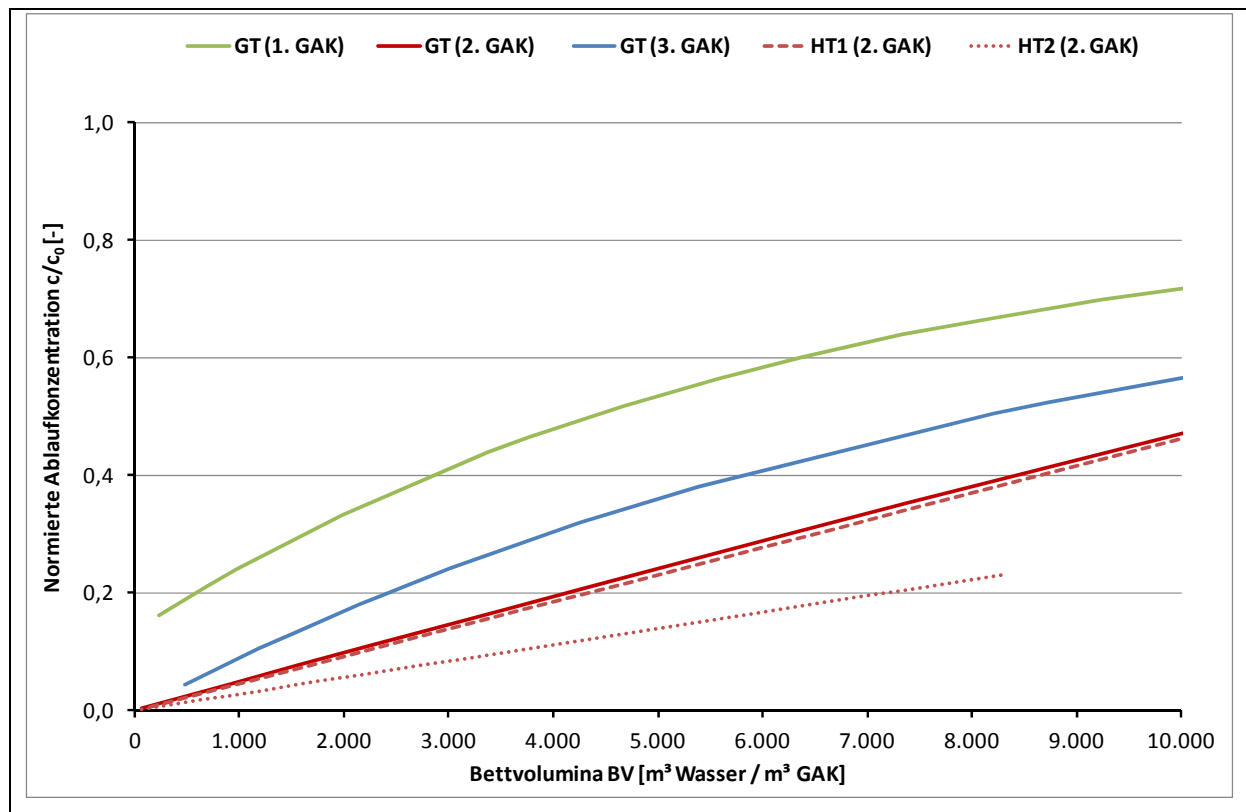


Bild 10: Elimination Carbamazepin als Ausgleichsfunktionen der normierten Ablaufkonzentrationen, Vergleich der halb- und großtechnischen Versuche (jeweils Einzeladsorber)

Wie in BENSTÖM et al. (2014) dargelegt, führt die praxisrelevante Parallelschaltung von Filterzellen insgesamt zu einer erhöhten Anzahl durchsetzbarer Bettvolumina, bis ein gewähltes (GAK-) Wechselkriterium am Ablauf der gesamten Filteranlage erreicht wird. Im Folgenden werden aus den an den Einzeladsorbern (GT und HT) ermittelten Ausgleichsfunktionen mittels einer Mischungsrechnung erzielbare Bettvolumina für eine Parallelschaltung berechnet.

Dazu wurden sieben Szenarien gewählt, die sich hinsichtlich ihres Austauschkriteriums, bei dem die GAK in der Filterzelle mit der längsten Laufzeit (= höchste Beladung = höchste durchgesetzte Bettvolumina) gegen neue ausgetauscht werden muss, unterscheiden. Szenario 1 und 2 beruhen auf der Unterschreitung einer Konzentration im Ablauf der Kläranlage, die Szenarien 3 bis 7 beruhen auf der Unterschreitung von Eliminationen bezogen auf den Zulauf der Kläranlage. Die Wahl der Szenarien erklärt sich wie folgt:

- Szenario 1 bezieht sich auf die Unterschreitung des CSB-Schwellenwerts von 20 mg/l entsprechend der Abwasserverordnung (ABVV, 2013)
- Szenario 2 bezieht sich auf die Unterschreitung des vorgeschlagenen Vorsorgewertes (Umweltqualitätsnorm, UQ-V) von 0,1 µg/l Diclofenac für aquatische Lebensgemeinschaften unter Berücksichtigung histologischer Veränderungen bei Forellen (UBA, 2013)

- Szenario 3, 5, 6 und 7 beziehen sich auf die Reduktion des jeweils betrachteten Spurenstoffs um 80 % zwischen Filterzulauf und Filterablauf. Eine Elimination von 80 % wurde bereits in BORNEMANN et al. (2012) zur Kostenbetrachtung herangezogen. Die ggf. zusätzliche Elimination innerhalb der vorgeschalteten biologischen Stufe bleibt hierbei ebenso wie in BORNEMANN et al. (2012) unberücksichtigt, so dass es sich um einen konservativen Ansatz handelt.
- Szenario 4 basiert auf Szenario 3 für Diclofenac, jedoch wird hier eine zusätzliche Elimination in der biologischen Stufe von 10 % angenommen, so dass im GAK-Filter selbst nur noch 78 % in Bezug auf den Filterzulauf eliminiert werden müssen.

Die Szenarien sind mit den berechneten erzielbaren Bettvolumina für die maßgebliche Parallelschaltung in Tabelle 2 und Bild 11 dargestellt.

Im Falle von Carbamezepin und einer Kontaktzeit von 33 min kann z. B. durch Parallelschaltung eine Erhöhung der durchsetzbaren Bettvolumina um etwa 70 % erzielt werden.

Von den drei großtechnisch untersuchten GAK stellt sich die 2. GAK eindeutig als vorteilhaft dar, wobei die Unterschiede zwischen den drei GAK abhängig vom Szenario sehr stark variieren. Die 2. GAK ist jedoch, wie zuvor erläutert wurde, aufgrund der spezifischen Randbedingungen der KA Düren-Merkmale hydraulisch nicht zu betreiben.

Ein Vorteil für die nachgeschaltete Variante HT1 (EBCT ca. 16 min bei der 2. GAK) in Bezug auf die Adsorptionsleistung gegenüber der GT (EBCT etwa 14 min bei der 2. GAK) mit etwa gleicher EBCT lässt sich nicht eindeutig ableiten. Für die Variante HT2 mit verdoppelter EBCT (33 min statt 16 min) hingegen, lassen sich signifikant höhere Bettvolumina erzielen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Erzielbare Bettvolumina für ausgewählte Szenarien für den Betrieb als Adsorber im Parallelbetrieb und Einzeladsorber

Szenario	Austauschkriterium (Eliminationen sind auf den Zulauf der Kläranlage bezogen)	Angenommene Elimination in der biologischen Stufe	Zu leistende Elimination im Filter bezogen auf Zulauf Filter	GT (1. GAK)	GT (2. GAK)	GT (3. GAK)	HT1 (2. GAK)	HT2 (2. GAK)
				erzielbare BV Parallelbetrieb (in Klammern erzielbare BV Einzeladsorber)				
1	CSB _{hom} < 20 mg/l (Schwellenwert Abwasserabgabe) im Ablauf der Kläranlage	nicht relevant	nicht relevant	300 (180)	3.120 (1.680)	420 (240)	2.220 (1.180)	2.940 (1.560)
2	DCF < 0,1 µg/l (GOW-Wert) im Ablauf der Kläranlage	nicht relevant	nicht relevant	660 (390)	780 (480)	660 (400)	1.680 (990)	1.860 (1.110)
3	DCF-Elimination < 80%	0 %	80 %	1.140 (660)	4.260 (2.330)	4.260 (2.480)	6.480 (3.790)	13.320 (7.740)
4	DCF-Elimination < 80% ¹	10 %	78 %	1.380 (780)	4.920 (2.660)	4.680 (2.730)	7.140 (4.170)	14.700 (8.540)
5	MET-Elimination < 80%	0 %	80 %	6.480 (3.670)	15.480 (8.980)	2.280 (1.220)	10.800 (6.300)	22.440 (13.070)
6	BTZ-Elimination < 80%	0 %	80 %	10.560 (6.100)	17.460 (7.240)	9.960 (5.810)	15.840 (9.230)	99.960 (57.880)
7	CBZ-Elimination < 80%	0 %	80 %	900 (530)	7.080 (4.120)	4.260 (2.410)	7.380 (4.310)	12.300 (7.180)

¹ Durch die Annahme, dass 10 % des Stoffes zwischen Zulauf der Kläranlage und Ablauf der Nachklärung eliminiert werden, muss im Filter noch eine Elimination von 78 % (= 70 % / 90 %) bezogen auf den Zulauf des Filters geleistet werden, um eine Elimination von 80 % bezogen auf den Zulauf der Kläranlage zu erreichen.

8 Kostenbetrachtung

Die 3 untersuchten GAK sind hinsichtlich der betrachteten Szenarien (Tabelle 2), d. h. hinsichtlich der Eliminationsziele unterschiedlich gut geeignet. Die 2. GAK wäre mit 0,04 – 0,81 €/m³ (Bruttokosten) behandeltem Abwasser im bestehenden Flockungsfilter die günstigste Variante, unter den derzeitigen Bedingungen der Kläranlage Düren-Merken ist diese Variante jedoch hydraulisch nicht betreibbar. Eine Verwendung der 2. GAK in einer **G**roßtechnischen **U**msetzung der **H**albtechnik (d. h. Umsetzung der Ergebnisse aus den halbtechnischen Varianten HT1 und HT2 in großtechnische nachgeschaltete Filter GUHt1 und GUHt2) in einem nachgeschalteten Filter ist mit Bruttokosten von 0,08 – 0,41 €/m³ behandeltem Abwasser die nächst günstigere Variante (GUHt2).

Der Vergleich der Kosten der nachgeschalteten Filter mit einer EBCT von ca. 16 min (GUHt1) und ca. 33 min (GUHt2) zeigt einen leichten Kostenvorteil für den Einsatz eines größeren Filter mit einer Kontaktzeit von etwa 33 min (450 m² vs. 900 m²). Die Bruttokosten für die 7 betrachteten Szenarien liegen für GUHt1 (EBCT ca. 16 min) zwischen 0,11 und 0,43 €/m³ und für GUHt2 (EBCT ca. 33 min) zwischen 0,08 und 0,41 €/m³ behandeltem Abwasser.

Erhebliche Kosten entstehen bei der Erfüllung des Ziels, den CSB sicher unter dem Schwellenwert von 20 mg CSB/l zu halten. Hier liegen die Bruttokosten in der günstigsten, betrieblich durchführbare Variante GUHt2 bei 0,29 €/m³. Auch das Reinigungsziel einer Eliminierung des Diclofenacs bis zu einem Grenzwert von unter 0,1 µg/l verursacht noch in der günstigsten, praktikablen Variante Bruttokosten von 0,41 €/m³ (GUHt2: Betriebskostenanteil an Jahreskosten 81%). Eine Reduzierung des Diclofenacs um 80 % innerhalb der betrachteten Filterstufe wäre mit Bruttokosten von 0,12 €/m³ (GUHt2: Betriebskostenanteil an Jahreskosten 38%) inkl. den dazu notwendigen Investitionen für eine nachgeschaltete Filterstufe zu erzielen.

Ausschlaggebend für die Kosten der Eliminierung sind vor allem die Kosten für den Austausch der GAK (Betriebsmittelkosten).

In Bild 11 sind für die betrachteten 7 Szenarien die erzielbaren BV, in Bild 12 die damit verbundenen Brutto-Kosten (darin enthalten Investitions- und Betriebskosten), die zusätzlich zum jetzigen existierenden Filter anfallen würden, dargestellt. An dieser Stelle sei erneut darauf hingewiesen, dass die 2. GAK ebenso wie die 3. GAK im Flockungsfilter in Düren unter den derzeitigen Randbedingungen hydraulisch nicht zu betreiben ist (Bild 8), sie ist jedoch der Vollständigkeit halber und zum Zwecke des Vergleichs jeweils mit dargestellt.

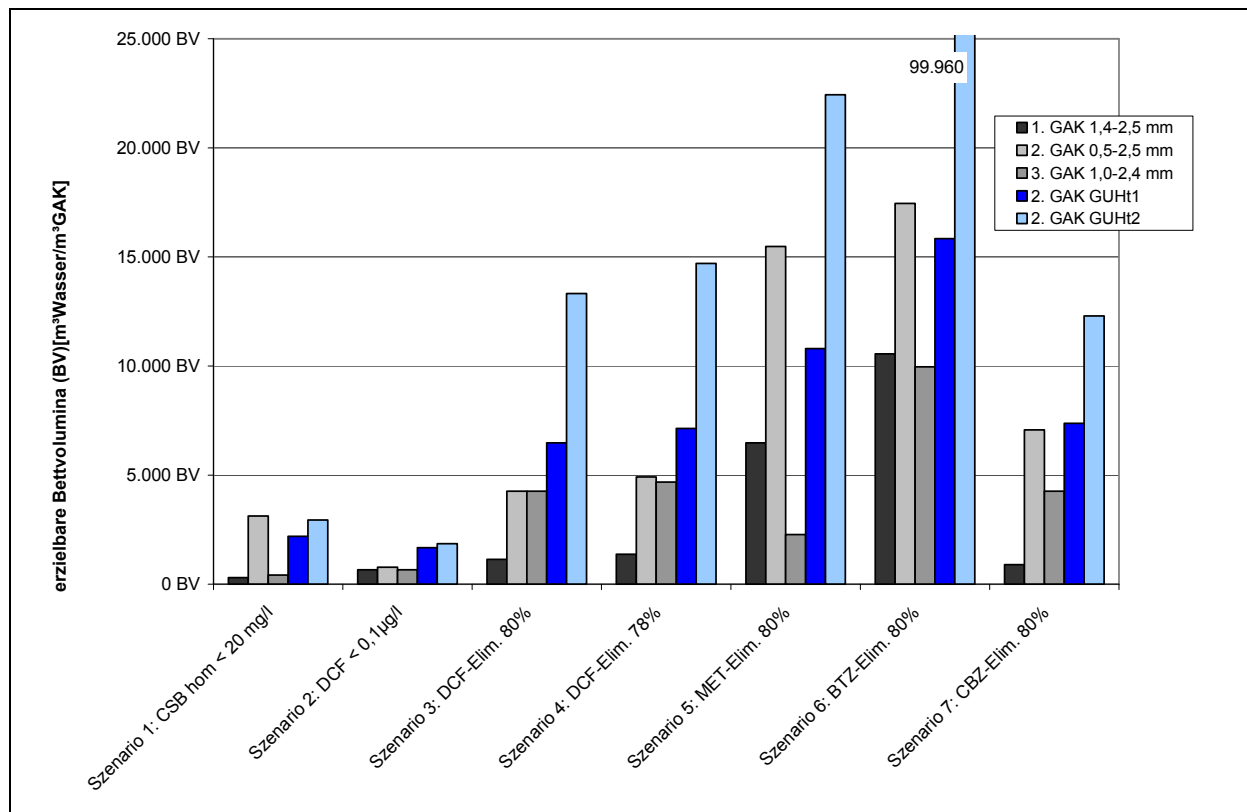


Bild 11: Erzielbare Bettvolumina ausgewählter Szenarien für 6 Adsorber im Parallelbetrieb

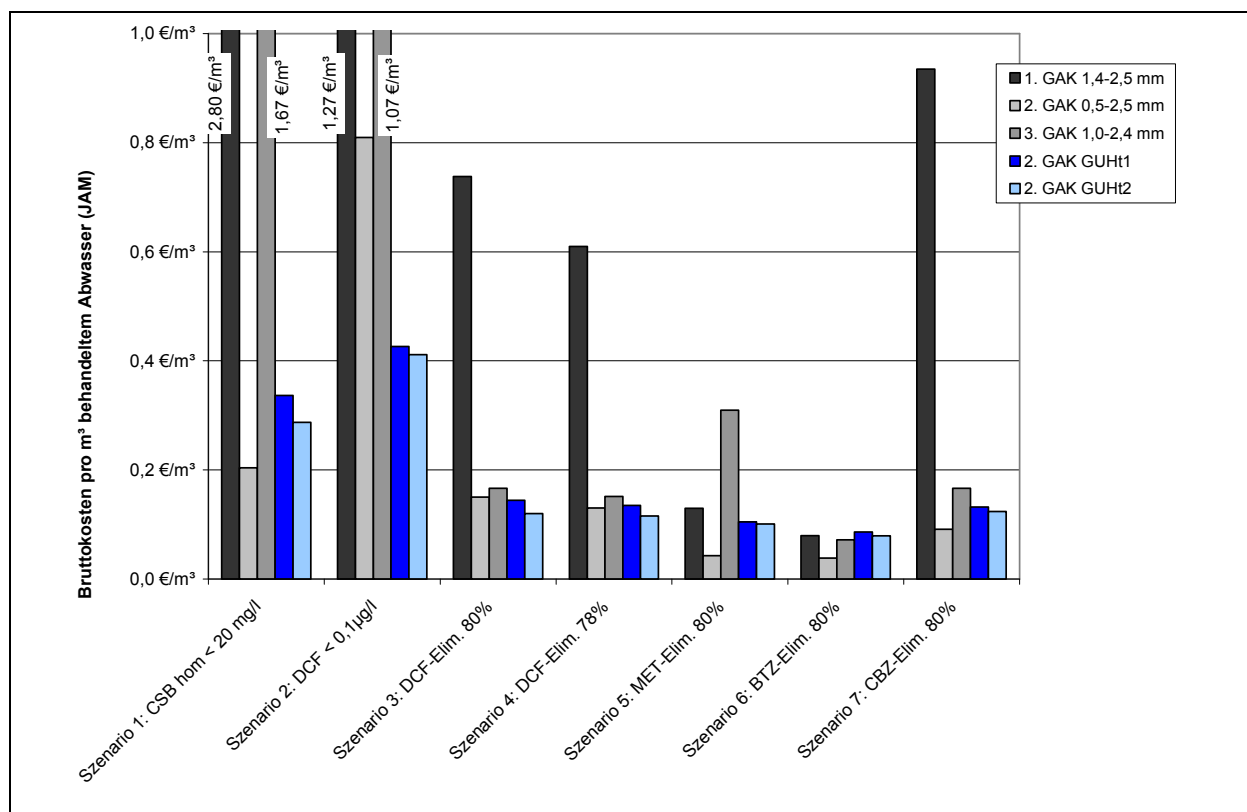


Bild 12: Zusätzliche Bruttokosten der Filtration pro m³ behandeltem Abwasser für 7 Szenarien der 1. – 3. GAK im umgebauten Flockungsfilter sowie der 2. GAK in einer nachgeschalteten weiteren Filtrationsstufe inkl. Investitionskosten (GUHt1 und GUHt2)

In den Betrachtungen wurde die behandelte Jahresabwassermenge von 22,23 Mio. m³ angenommen. Eine Betrachtung einer auf die Jahresschmutzwassermenge reduzierte Wasserbehandlungsmenge (~ 20 Mio. m³) führt zu keiner nennenswerten Kostenverschiebung. Dies liegt am relativ hohen und kontinuierlichen Industrieabwasseranteil und dem überwiegend im Trennsystem entwässerten Einzugsgebiet der Kläranlage Düren-Merken.

Zur Ermittlung der tatsächlichen Dauer erzielbarer Filtrationszyklen bis zur Spülung nach möglicher Optimierung der Nachklärung der KA Düren-Merken mit daraus resultierenden geringerem Feststoffgehalt im Zulauf des Filters müssten Filtrationsversuche unter realen Bedingungen stattfinden.

Ein Vergleich mit theoretisch untersuchten oder praktisch durchgeführten ähnlichen Projekten zeigt, dass für die Kosten der GAK-Filtration im Wesentlichen durch die erzielbaren Bettvolumina und die Beschaffungskosten für die GAK bestimmt werden. Für die Kläranlage Düren-Merken wurden 7 Szenarien untersucht, die für die einzelnen Eliminationsziele sehr unterschiedliche erzielbare Bettvolumina ergeben. Da bislang von der Politik und den Aufsichtsbehörden keine Eliminationsziele vorgegeben sind, wurden für den Vergleich mit anderen Studien ca. 10.000 erzielbare Bettvolumina angenommen. Die damit ermittelten Bruttokosten liegen in allen Untersuchungen in der Größenordnung ~ 0,10 €/m³ behandelten Abwassers, nahezu unabhängig von der betrachteten peripheren Technik (bestehender Filter, nachgeschalteter Filter, umgerüsteter Dynasandfilter), da wesentlicher Kostenfaktor die betrieblichen Aufwendungen und hier vor allem die Beschaffungs- und Wiederbeschaffungskosten für die Aktivkohle sind. Dies liegt vor allem daran, dass in den Jahreskosten die Investitionskosten nur anteilig, da bis zu 30 Jahre abgeschrieben, enthalten sind.

Die am Filter der Kläranlage Düren-Merken erzielten Ergebnisse sind aufgrund des hohen AFS-Gehaltes im Zulauf der Filtrationsstufe bzgl. der erzielbaren BV nicht übertragbar. Die halbtechnischen Versuche mit einer dem Filter nachgeschalteten Adsorption zeigen aber, dass ein weitgehend feststofffreies Abwasser den Einsatz einer GAK feinerer Körnung betrieblich ermöglichen kann und die erzielbaren Bettvolumina auch durch eine höhere Kontaktzeit EBCT von etwa 33 statt 16 min erhöht werden können.

9 Literatur

- ABWV (2013): Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung- AbwV), Bund, zuletzt geändert am 02.05.2013
- BENSTÖM, F.; STEPKES, H.; ROLFS, T.; MONTAG, D.; PINNEKAMP, J. (2014): Untersuchung einer bestehenden Filterstufe mit dem Einsatz von Aktivkohle zur Entfernung organischer Restverschmutzung auf der Kläranlage Düren-Merken, Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV)
- BORNEMANN, C.; HACHENBERG, M.; YÜCE, C.; HERR, J.; JAGEMANN, P.; LYKO, S.; BENSTÖM, F.; MONTAG, D. PINNEKAMP, J.; PLATZ, S.; WETT, M.; BIEBERSDORF, N.; KAUB, J. M.; KOLISCH, G.; OSTHOFF, T.; TAUDIEN, Y.; ROLFS, T.; STEPKES, H. (2012): Teilprojekt 5: Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle. Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV)
- MIEHE, U. (2010): Wirksamkeit technischer Barrieren zur Entfernung von anthropogenen Spurenstoffen – Kläranlagen und Raumfilter, Dissertation an der TU Berlin
- UBA (2013): Internetauftritt Umweltbundesamt, ETOX: Informationssystem Ökotoxikologie und Umweltqualitätsziele, Abruf am 24.10.2013, <http://webetox.uba.de/webETOX/public/basics/ziel.do?id=3247>