

# FilterAK+

Technische Erprobung des Aktivkohleeinsatzes  
zur Elimination von Spurenstoffen  
in Verbindung mit vorhandenen Filteranlagen



Kurzbericht  
zum Forschungsvorhaben

Oktober 2015



**WUPPERVERBAND**  
für Wasser, Mensch und Umwelt

WiW<sub>mbh</sub>



Hydro<sub>+</sub>Ingenieure



# **Kurzbericht**

**zum Forschungsvorhaben**

## **Technische Erprobung des Aktivkohleeinsatzes zur Elimination von Spurenstoffen in Verbindung mit vorhandenen Filteranlagen**

# **FilterAK+**

**AZ: 54.7.10.06-5271/12**

**gerichtet an das**

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



Wuppertal, den

Projektleiterin:

Dipl.-Biol. C. Bornemann  
Gruppenleiterin für Technische Innovation und  
Energie des Wupperverbandes

## Projektbearbeitung

Projektleitung		Bearbeiterinnen
 <p><b>WUPPERVERBAND</b> für Wasser, Mensch und Umwelt</p>	<p>Wuppertal Untere Lichtenplatzer Str. 100 42289 Wuppertal</p> <p>Tel.: 0202 583-0 Fax: 0202 583-317 E-mail: <a href="mailto:info@wuppertal.de">info@wuppertal.de</a> <a href="http://www.wuppertal.de">www.wuppertal.de</a></p>	<p>Dipl.-Biol. C. Bornemann, Dipl. Ing. (FH) M. Hachenberg</p>
Partner		Bearbeiter
	<p>Hydro-Ingenieure Planungsgesellschaft für Siedlungswasserwirtschaft mbH</p> <p>Stockkampstr. 10 40477 Düsseldorf</p> <p>Tel.: 0211 44 991 0 Fax: 0211 44 991 1055 E-Mail: <a href="mailto:klaus.alt@hydro-ingenieure.de">klaus.alt@hydro-ingenieure.de</a> <a href="http://www.hydro-ingenieure.de">www.hydro-ingenieure.de</a></p>	<p>Dipl.-Ing. K. Alt Dipl.-Ing. F. Böhm</p>
	<p>IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH</p> <p>Moritzstr.26 45476 Mülheim an der Ruhr</p> <p>Tel.: 0208 40303 0 Fax: 0208 40303 80 Email: <a href="mailto:info@iww-online.de">info@iww-online.de</a> <a href="http://www.iww-online.de">www.iww-online.de</a></p>	<p>Dr.-Ing. A. Nahrstedt</p>
	<p>Wuppertal Water Association integrated water management mbH</p> <p>Untere Lichtenplatzer Str. 100 42289 Wuppertal</p> <p>Tel.: 0202 583-292 Fax: 0202 583-317 Email: <a href="mailto:kol@wuppertal.de">kol@wuppertal.de</a> <a href="http://www.wiwmbh.de">www.wiwmbh.de</a></p>	<p>Dr.-Ing. G. Kolisch Dipl.-Ing. Y. Taudien</p>

## Inhaltsverzeichnis

<b>Projektbearbeitung</b> .....	<b>1</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>1</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Projektübersicht</b> .....	<b>2</b>
<b>2 Planung, Bau und Inbetriebnahme</b> .....	<b>4</b>
2.1 Standort Wuppertal Buchenhofen .....	4
2.2 Aktivkohleauswahl .....	5
2.3 GAK- und nGAK-Filter .....	6
2.4 PAK-Zugabe in den Flockungsraum der Filtration.....	7
2.5 Probenahme und Analytik.....	8
<b>3 Ergebnisse des Versuchsbetriebs</b> .....	<b>9</b>
3.1 Untersuchungen zum Filterbetrieb .....	9
3.2 Optimierung der PAK-Dosierung.....	13
3.3 Elimination von Standardabwasserparametern .....	15
3.4 Elimination von Spurenstoffen .....	18
3.4.1 Elimination der Spurenstoffe in den Filtern.....	18
3.4.2 Beladung der Aktivkohle mit Spurenstoffen.....	20
3.4.3 Erreichbare Ablaufkonzentrationen .....	21
3.4.4 Elimination in Bezug auf den Zulauf der Kläranlage .....	22
3.4.5 Ausgleichsfunktion als Mittelwert der Elimination für die GAK-Filter.....	24
3.4.6 Parallelschaltung mehrerer GAK-Filter.....	26
3.4.7 Zusätzliche Entnahme von Spurenstoffen durch rückgeführte PAK .....	27
<b>4 Wirtschaftlichkeit am Beispiel der KA Buchenhofen</b> .....	<b>28</b>
4.1 Auslegungsszenarien der Reinigungsleistung.....	28
4.2 Grundvariante für den Verfahrensvergleich.....	30
4.3 Ausbaukonzepte .....	31
4.4 Kosten .....	33
<b>5 Übertragbarkeit und Planungshinweise</b> .....	<b>36</b>
5.1 Planungshinweise zur technischen Umsetzung .....	36
5.2 Übertragbarkeit auf andere Anlagen in NRW .....	37
5.3 Planungshinweise zur Aktivkohle-Auswahl .....	37
<b>6 Zusammenfassung und Gesamtbetrachtung</b> .....	<b>38</b>
<b>Literaturverzeichnis (Langfassung Abschlussbericht)</b> .....	<b>40</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>42</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>43</b>

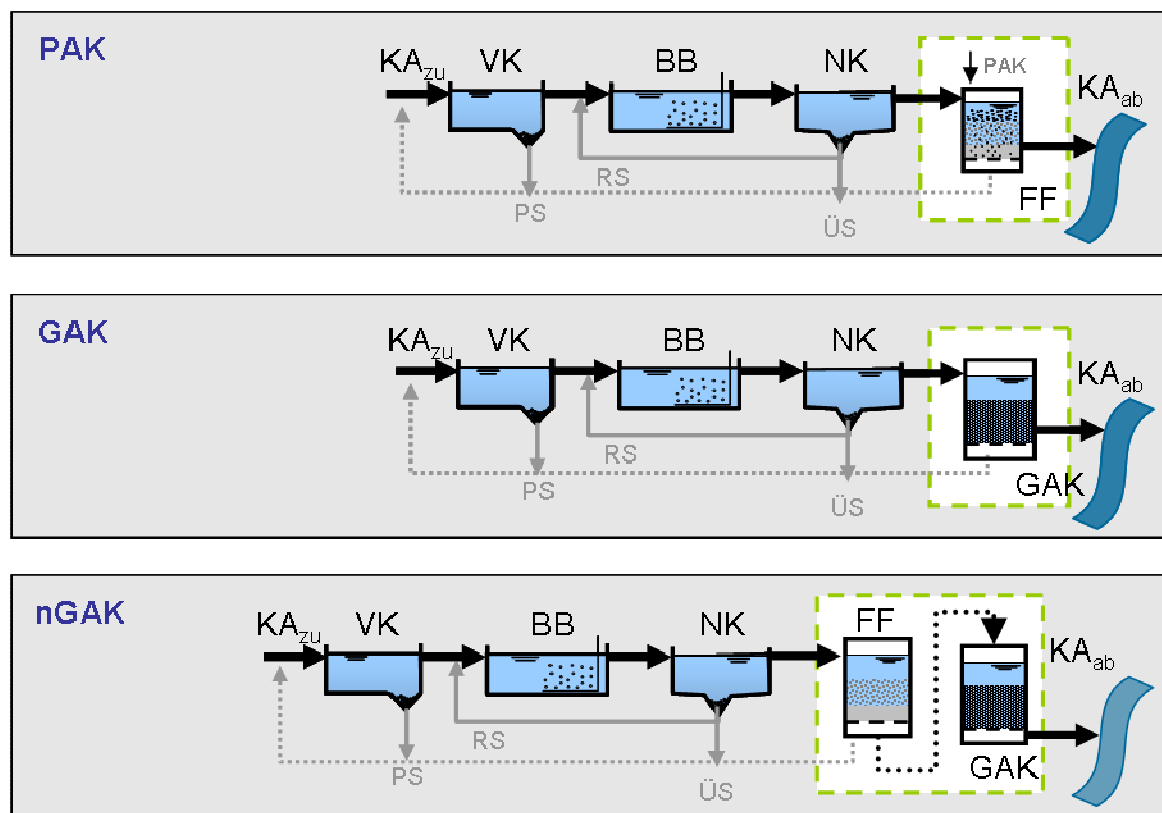
## Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
AFS	Abfiltrierbare Stoffe (entspricht TSS = engl.: total suspended solids)	[mg/l]
AK	Aktivkohle	
BB	Belebungsbecken	
BET	Adsorptionsisotherme nach Brunauer, Emmett und Teller	
BTA	Benzotriazol (Korrosionsschutzmittel)	[µg/l]
Bh / Bd	Stündliche Schmutzfracht / tägliche Schmutzfracht (engl.	[h]
BV	(engl. Bed volumes) = durchgesetzte Bettvolumina	
c	Konzentration	
CBZ	Carbamazepin (Antiepileptikum)	[µg/l]
CSB <sub>hom/filt./el.</sub>	Chemischer Sauerstoffbedarf homogenisiert/filtriert/eliminiert	[mg/l]
d <sub>k</sub>	Korndurchmesser	[mm]
d <sub>p</sub>	Partikeldurchmesser	[µm]
DCF	Diclofenac (Nichtopioid- Analgetikum / Nichtsteroidales Antirheumatikum)	[µg/l]
DOC	(engl.: dissolved organic carbon); Gelöster organischer Kohlenstoff	[mg/l]
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.	
EBCT	(engl.: Empty Bed Contact Time) = Leerrohrkontaktzeit	
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure (Komplexbildner)	[µg/l]
Fe	Eisen	
FF	Flockungsfilter/Flockungsfiltration	
FM	Fällmittel	[mg/l]
FNU	(engl.: formazine nephelometric units); in ISO 7027 vorgeschriebene Einheit für die Messung der Trübung unter 90°-Streulicht	[FNU]
FHM	Flockungshilfsmittel	[mg/l]
GAK	Granulierte Aktivkohle	[mg/l]
nGAK	Nachgeschaltete granulierte Aktivkohle	
ISV	(engl.: index of sludge volume); Schlammvolumenindex	
K	Freundlich-Koeffizient	
KA	Kläranlage	

k.A.	keine Angaben	
LC-MS	(engl.: liquid chromatography-mass spectrometry); Flüssigchromatographie-Massenspektrometrie	
LOQ	(engl.: limit of quantification); Bestimmungsgrenze	[µg/l]
MET	Metoprolol (Betablocker)	[µg/l]
Methyl-BTA	Methylierte Benzotriazolverbindungen	
MID	Magnetisch induktives Durchflussmessgerät	
MP	Mischprobe	
n	Freundlich-Exponent	
NK / NKB	Nachklärung / Nachklärbecken	
n.v.	nicht verfügbar	
N4-SMX	N4-Acetyl-Sulfamethoxazol (Hauptmetabolit von Sulfamethoxazol)	[µg/l]
PAK	Pulverisierte Aktivkohle	[mg/l]
PAK_1 PAK #1	PAK vom Typ Hydrffin ARP	
PAK_2 PAK #2	PAK vom Typ Carbopal AP	
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure	
PFOA	Perfluorooctansäure	
P <sub>ges</sub>	Gesamter Phosphor	[mg/l]
PLS	Prozessleitsystem	
Δp <sub>v</sub>	Druckverlust	[mbar]
qSp	Qualifizierte Stichprobe	
RW	Regenwetter	
SAK	Spektraler Absorptionskoeffizient	[1/m]
SMX	Sulfamethoxazol (Antibiotikum)	[µg/l]
T CPP	Tris(2-chlorisopropyl)phosphat (Phosphororganische Verbindungen)	[µg/l]
t <sub>k</sub>	Kontaktzeit	
TN <sub>b</sub>	(engl. Total Nitrogen bound); Gesamter gebundener Stickstoff	[mg/l]
TOC	(engl.: total organic carbon); Gesamter organischer Kohlenstoff	[mg/l]
TW	Trockenwetter	

# 1 Projektübersicht

Das Forschungsprojekt Filter AK+ wurde vom Land Nordrhein-Westfalen gefördert und durch den Wupperverband zusammen mit der Hydro-Ingenieure GmbH, dem IWW-Mülheim und der WiW mbH durchgeführt. Für die Untersuchungen zum Filterbetrieb und zur Spurenstoffelimination wurden im direkten Vergleich drei technische Verfahrenskonzepte untersucht. Auf der Kläranlage Wuppertal-Buchenhofen wurden sowohl die Dosierung von Pulveraktivkohle (PAK) in den Filterüberstau und die Filtration über granulierten Aktivkohle (GAK) als auch eine zweistufige nachgeschaltete GAK-Filtration (nGAK) über einen Zeitraum von insgesamt 1,5 Jahren betrieben (Bild 1.1).



**Bild 1.1: Prinzipskizze der drei untersuchten Verfahren**

Obwohl es sich jeweils um eine Aktivkohleadsorption handelt, unterscheiden sich die Varianten in ihrer technischen Umsetzung. Im Falle der PAK-Dosierung wird die pulverförmige Aktivkohle in den zu behandelnden Abwasserstrom dosiert, gleichmäßig verteilt, nach erfolgter Adsorption mittels Phasenseparation aus der wässrigen Phase entfernt und anschließend verbrannt. Die GAK wird dagegen als adsorptiv wirkendes Filtermaterial in den Filterbecken eingesetzt. Der Einsatz einer nGAK-Stufe erscheint sinnvoll um die Verfahrensschritte der Partikelseparation und Mikroschadstoff-Elimination voneinander zu trennen und in separaten Stufen zu optimieren. Nach Beladung der GAK mit

den Schadstoffen wird diese ausgebaut und kann thermisch reaktiviert werden, um anschließend erneut als Filtermaterial (Reaktivat) eingesetzt zu werden.

Die drei Verfahren konnten durch den Parallelbetrieb bei identischer Abwassermatrix untersucht werden. Zudem wurden alle Filter in vergleichbarer Weise dynamisch beschickt. Aus diesem Grund ließen sich die erreichte Spurenstoffelimination, die Filterstandzeiten, der Kohleverbrauch, der betriebliche Aufwand sowie die Kosten der Ansätze objektiv vergleichen. Außerdem kamen Aktivkohlen des gleichen Ausgangsmaterials sowohl als PAK als auch als GAK zum Einsatz. In der zweiten Versuchshälfte wurde für weitere Vergleiche noch ein weiteres Pulveraktivkohle-Produkt eingesetzt.

Die Zielstellungen des Vorhabens waren:

- Der Nachweis eines stabilen Betriebs unter realen Bedingungen
- Die Bewertung der Spurenstoffelimination im Langzeitversuch
- Die Ableitung wirtschaftlicher Kennzahlen zum PAK-/GAK-Einsatz
- Die Übertragbarkeit auf andere Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen

Die Auswahl der zu analysierenden Spurenstoffe, erfolgte in Abstimmung mit dem LANUV NRW und dem Fördermittelgeber. Die ausgewählten Substanzen sind in Tabelle 1.1 aufgeführt. Ergänzend zu der Analytik der Spurenstoffe wurde ein analytisches Begleitprogramm durchgeführt, um die Eliminationsleistung in Bezug auf weitere Abwasserparameter wie CSB, TOC und DOC zu ermitteln.

**Tabelle 1.1: Leitsubstanzen für die Spurenstoffanalytik**

Gruppe		Leitsubstanz	Abkürzung
Pharmaka	Antiepileptika	Carbamazepin	CBZ
	Nichtopioid-Analgetika	Diclofenac	DCF
	Betablocker	Metoprolol	MET
	Antibiotika	Sulfamethoxazol (und N4-Acetyl-Sulfamethoxazol) Ciprofloxacin Erythromycin Clarithromycin	SMX (N4 SMX)
Korrosionsschutzmittel		Benzotriazol 4-Methyl-Benzotriazol und 5-Methyl-Benzotriazol	BTA Methyl-BTA
Endokrin wirksame Chemikalien (EDCs)		Bisphenol-A	BPA
Phosphororganische Verbindungen		Tris(2-chlorisopropyl)-phosphat	TCPP



## 2 Planung, Bau und Inbetriebnahme

### 2.1 Standort Wuppertal Buchenhofen

Die Kläranlage Wuppertal-Buchenhofen ist mit einer Ausbaugröße von 600.000 EW die größte der 11 vom Wupperverband betriebenen Kläranlagen. Die Kläranlage ist als Belebungsstufe mit Vor- und Nachklärung ausgeführt und wurde bereits in den 1990er-Jahren um eine Flockungsfiltration ergänzt (Bild 2.1).

Bei der Flockungsfiltrationsanlage der KA Buchenhofen handelt es sich um 28 offene, abwärts durchströmte Mehrschichtfilter. Die Filterschichten bestehen aus Anthrazit mit einer Schichthöhe von 1,4 m und Quarzsand mit einer Schichthöhe von 0,4 m. Die wichtigsten Betriebsdaten können Tabelle 2.1 entnommen werden.



**Bild 2.1:** Kläranlage Buchenhofen mit Flockungsfiltration im Vordergrund

**Tabelle 2.1:** Kenndaten der Flockungsfiltration auf der Kläranlage Buchenhofen

<b>Anzahl Filterzellen insgesamt</b>	28
<b>Filterfläche insgesamt</b>	28 x 60 m <sup>2</sup> = 1.680 m <sup>2</sup>
<b>Überstauhöhe</b>	2,5 m
<b>Betriebsstunden je Zelle bis Rückspülung</b>	24 h (im Durchschnitt)
<b>Zufluss pro Filterzelle</b>	Q <sub>TW</sub> = 180 m <sup>3</sup> /h Q <sub>RW</sub> = 540 m <sup>3</sup> /h
<b>Filtrationsgeschwindigkeit</b>	v <sub>TW</sub> = 3,0 m/h v <sub>RW</sub> = 9,0 m/h

## 2.2 Aktivkohleauswahl

Die Einflüsse auf die Adsorptionskapazität einer Aktivkohle und das Vorgehen zur Qualitätskontrolle bzw. zur Ermittlung geeigneter Leistungskenngrößen werden ausführlich in der Langfassung dieses Berichtes vorgestellt.

Bei der Auswahl der in diesem Projekt verwendeten Aktivkohlen wurden folgende Kriterien herangezogen:

- Leistungsfähigkeit (CSB-Gleichgewichtsbeladung),
- Wirtschaftlichkeit (Bezugskosten für Frischkohle bzw. Reaktivat)
- Vergleichbarkeit

Die in Tabelle 2.2 aufgeführten GAK wurden in das Auswahlverfahren für die Versuche hinzugezogen. Sie waren auf der Basis der Rohstoffe Stein-/Braunkohle sowie Lignite hergestellt, wiesen eine innere Oberfläche (gemäß BET-Methode) von 1.000 bis 1.150 m<sup>2</sup>/g GAK mit Jodzahlen zwischen 950 und 1.100 mg/g GAK auf und besaßen eine Schüttdichte von 400 bis 500 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabelle 2.2: Spezifischen Daten der von den Herstellern empfohlenen GAK**

Lieferant :	CarboTech	Donau Carbon	Jacobi	CSC	Norit
Produkt :	CarboTech DGF 8x30	Hydraffin AR 8 x 30	AquaSorb 5000 8 x 30	HC HL 1050 8 x 30	GAC 830
Friskohle (F) / Reaktivat (R)	F	F	F	F	F
Rohstoffbasis der Aktivkohle :	Steinkohle	Braun- u. Steinkohle	Lignite	k.A.	Steinkohle
Rütteldichte in kg/m <sup>3</sup> :	450 kg/m <sup>3</sup>				
Schüttdichte in kg/m <sup>3</sup> :	486 kg/m <sup>3</sup>	400 kg/m <sup>3</sup>	280 kg/m <sup>3</sup>	400 kg/m <sup>3</sup>	500 kg/m <sup>3</sup>
Wassergehalt in Gew.-% :	< 5 %	< 5 %	< 5%	< 5%	< 2%
Aschegehalt in Gew.-% :	< 10 %	< 15 %	< 12 %	< 10 %	< 8 %
Korndurchmesser in mm :	0,6 - 2,36	0,425 - 2,36	0,6 - 2,36	0,6 - 2,5	0,6 - 2,6
Härte BP in %:	98	90			97
Iodzahl (Datenblatt) in mg/g :	950 mg/g	1.100 mg/g	1.100 mg/g	1.050 mg/g	1.000 mg/g
Innere B.E.T.-Oberfläche in m <sup>2</sup> /g :	1.000 m <sup>2</sup> /g	1.100 m <sup>2</sup> /g	1.150 m <sup>2</sup> /g	1.050 m <sup>2</sup> /g	1.100 m <sup>2</sup> /g

\* B.E.T.-Oberfläche der GAK bestimmt durch Gasadsorption von Stickstoff nach Brunauer, Emmet und Teller

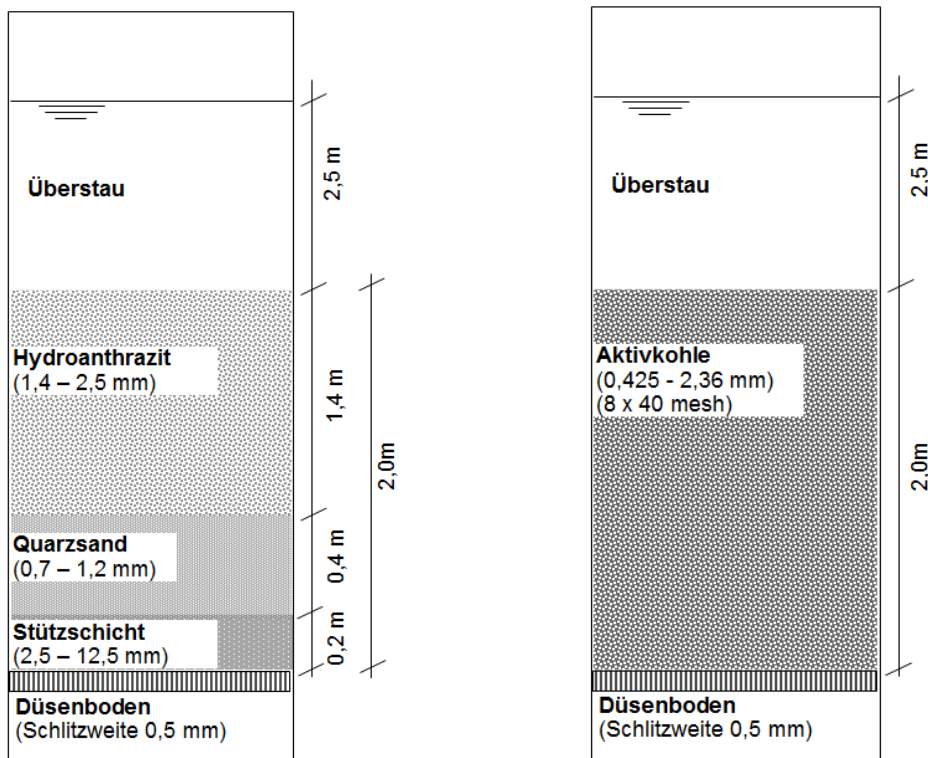
Bei der Bewertung der Kohlen auf der Basis von Preis und Adsorptionsverhalten (€/kg CSB<sub>elim</sub>) schnitt die Hydraffin AR von Donau Carbon am besten ab und wurde für die Versuche ausgewählt. Um bei dem Vergleich zwischen der GAK-Filtration mit der PAK-Dosierung den Einfluss der Kohleprodukte zu vermeiden, wurde für die PAK-Dosierung das gleiche Produkt in aufgemahlener Form eingesetzt. Es firmiert unter dem Handelsnamen Hydraffin ARP. Im zweiten Teil der PAK-Versuche wurde das Produkt Carbopal AP, ebenfalls vom Hersteller Donau Carbon, eingesetzt. Diese Auswahl liegt im besten Abschneiden dieses Produktes bei der PAK-Bewertung aus dem vorangegangenen Projekt Mikroflocc (Bornemann et al., 2012) begründet.

## 2.3 GAK- und nGAK-Filter

Für die großtechnische Anwendung wurden zwei der 28 Filterkammern von einem Mehrschichtfilter auf einen Einschichtfilter umgerüstet. Dafür wurden die bestehenden Filterschichten aus Anthrazit und Quarzsand ausgebaut und gegen eine Filterschicht aus granulierter Aktivkohle (GAK) ausgetauscht. Das nachfolgende Bild 2.2 zeigt dazu die konventionelle Filterschüttung der vorhandenen Filter im Vergleich zu der neuen Filterschüttung aus granulierter Aktivkohle.

**Ausgangszustand: Zweischichtfilter**

**Ausbauzustand: Einschichtfilter mit GAK**



**Bild 2.2: Schema zur Filterschüttung, links Referenzfilter und rechts neue Schüttung im GAK- und nGAK-Filter**

Die maximale Korngröße der Aktivkohle entspricht mit 2,36 mm etwa der des Anthrazits (2,5 mm). Die minimale Korngröße wird vom Hersteller mit 0,425 mm angegeben und ist damit sogar feiner als der zuvor eingebaute Quarzsand. Für die technische Umsetzung einer GAK-Filtration ist insbesondere der betriebliche Aufwand für den Austausch des Filtermaterials von Bedeutung. Der Zeitbedarf für den Ausbau betrug entgegen vorheriger Erfahrungen aus anderen Projekten je Filter 3 Tage. Der Einbau der GAK dauerte einen Tag je Filterkammer. Im Anschluss wurde die Kohle für eine optimale Benetzung der Oberfläche

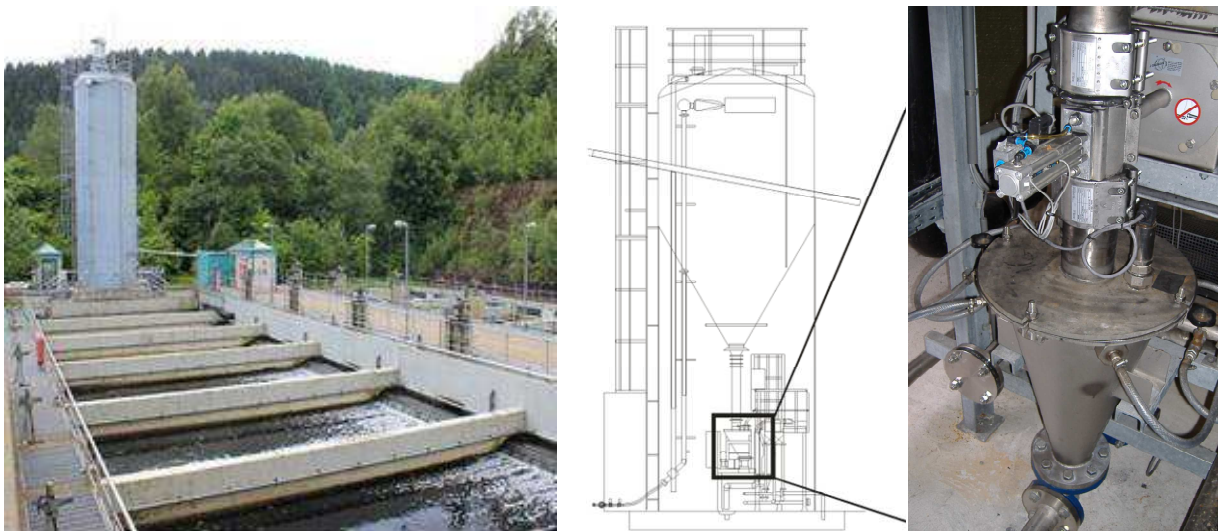
zwei Wochen gewässert und belüftet. In dieser Zeit fanden außerdem einige Spülungen statt, um vorhandenen Kohlestaub aus dem System auszutragen.

Die hydraulische Beschickung des GAK-Filters erfolgte über die übliche Zulaufrinne. Für die zweistufige Filtration mit GAK (nGAK-Filter) wurde der Zulauf zur Versuchsfilterzelle vom Zulauf der anderen Filterzellen abgetrennt. Für die Umrüstung eines Filters in einen nGAK-Filter mussten somit einige anlagentechnische Veränderungen vorgenommen werden.

Da Granulierte Aktivkohle leichter ist als das ursprüngliche Filtermaterial des Zweischichtfilters aus Anthrazit und Sand musste außerdem das vorhandene Spülprogramm modifiziert werden um einen Austrag des neuen Filtermaterials zu verhindern. Die Details der Umprogrammierung sind in der Langfassung des Abschlussberichtes beschrieben.

## 2.4 PAK-Zugabe in den Flockungsraum der Filtration

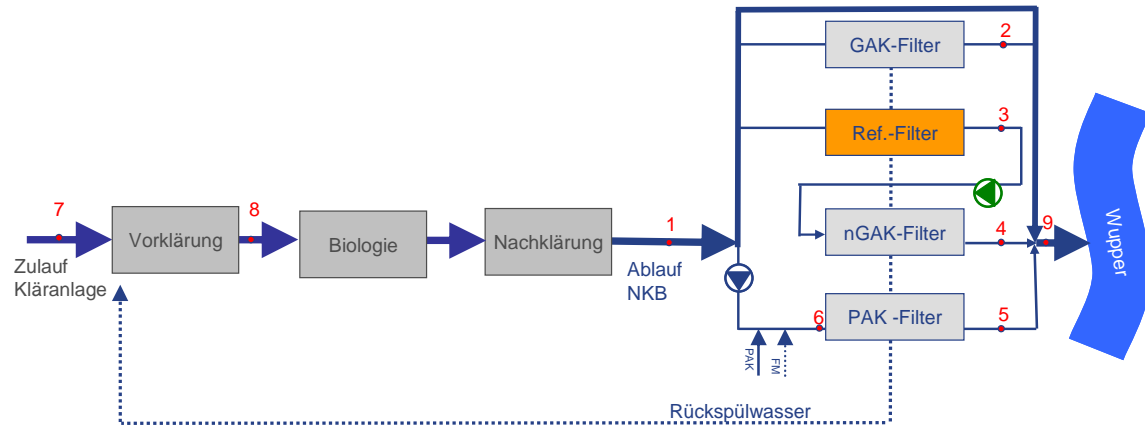
Für die großtechnische Dosierung von Pulveraktivkohle in den Überstand eines Filters wurde eine der 28 Filterkammern umgerüstet. Hierzu wurde der Zulauf dieser Filterkammer vom Zulauf der übrigen Kammern abgetrennt und die Beschickung über zwei Tauchmotorpumpen realisiert. Diese Pumpen sind so geregelt, dass immer  $1/27$  des Gesamtzuflusses der Filterkammer zugeleitet wird. Die PAK-Dosierung erfolgt aus einem  $75 \text{ m}^3$  großen Lagersilo über eine Förderschnecke, welche die trockene pulverförmige Kohle in das Vortex-Gefäß fördert, in dem die Kohle zu einer Suspension mit Wasser vermischt und über eine Treibwasserstrahlpumpe weiter zum Filter transportiert wird (Bild 2.3). Die Dosierung erfolgt dabei proportional zur Wassermenge, so dass eine konstante PAK-Konzentration (z.B.  $20 \text{ mg/l}$ ) erreicht wird.



**Bild 2.3:** Flockungsfiltration der KA Buchenhofen mit PAK-Lagersilo und Dosiereinrichtung

## 2.5 Probenahme und Analytik

Zur Bestimmung der Reinigungsleistung der untersuchten Filtern wurde der Zulauf der Flockungsfiltration (1), sowie die Abläufe der Versuchsfilter (2, 4, 5) und des Referenzfilters (3) beprobt (vgl. Bild 2.4). Zusätzlich wurden Proben aus dem Kläranlagenzulauf (7) und dem Ablauf der Vorklärung (8) analysiert, um die Gesamtelimination ermitteln zu können.



**Bild 2.4:** Fließbild mit Probenahme- und Messstellen

Der Versuchsbetrieb wurde in der letzten Oktoberwoche 2013 gestartet und endete nach 18 Monaten im Mai 2015. Die GAK-Filter und der Referenzfilter waren in dieser Zeit durchgängig in Betrieb (546 Tage, bzw. 1,5 Jahre). Der PAK-Filter wurde mit zwei verschiedenen Aktivkohlen betrieben, insgesamt wurde im Untersuchungszeitraum an 390 Tagen Kohle dosiert. Im Untersuchungszeitraum wurden die Standardabwasserparameter 3x wöchentlich und die Spurenstoffe 2x monatlich analysiert. Insgesamt wurde die in Tabelle 2.3 dargestellte Anzahl an Messungen durchgeführt. In manchen Fällen lag das Ergebnis der Spurenstoffanalyse unter der Bestimmungsgrenze (BG), so dass zwar ein positiver Befund festgestellt wurde, aber keine genaue Quantifizierung möglich war. In diesen Fällen wurde für die Spurenstoffe als Messwert die halbe BG angesetzt.

**Tabelle 2.3:** Zusammenfassung der Messstellen, Parameter und Anzahl der Daten

Messstellen		Anzahl Messwerte im Untersuchungszeitraum				
		CSB/CSBfilt		Fe/AFS	Spurenstoffe	
		24h-MP	online 15min	Stichprobe	24h-MP	72h-MP
Zulauf Kläranlage	KA <sub>zu</sub>			-	-	6
Zulauf Biologie	BB <sub>zu</sub>			-	-	6
Zulauf Filtration	FF <sub>zu</sub>	194	57.756	38	23	6
Abl. Referenz-Filter	Filter 14	193	60.178	-	23	6
Abl. PAK-Filter (PAK_1)	Filter 7	89	-	-	5	3
Abl. PAK-Filter (PAK_2)	Filter 7	34	-	-	5	3
Abl. GAK-Filter	Filter 2	190	-	-	23	6
Abl. nGAK-Filter	Filter 1	193	59.637	-	23	6

## 3 Ergebnisse des Versuchsbetriebs

### 3.1 Untersuchungen zum Filterbetrieb

Auch mit der Erweiterung der Flockungsfiltration zu einer vierten Reinigungsstufe zur Elimination von Spurenstoffen, muss ein stabiler Filterbetrieb gewährleistet bleiben. Folgende Betriebsparameter wurden daher im Rahmen des Versuchsbetriebs kontinuierlich überwacht und ausgewertet:

- **Hydraulik:** Wassermengen, Filtergeschwindigkeiten, Kontaktzeiten
- **Bettvolumina:** Behandelte Wassermenge bezogen auf Filtermaterial
- **Druckverlust / Standzeiten:** Druckverlust und Laufzeiten bis zur Filterspülung
- **Feststoffe:** Feststoffrückhalt und –beladung der Filter

#### Hydraulik

Zum Vergleich mehrerer Verfahrensansätze zur Elimination von Spurenstoffen bei ansonsten gleichen betrieblichen Randbedingungen gehört auch eine vergleichbare hydraulische Belastung der untersuchten Filter. Aus diesem Grund wurden alle Filter in gleichem Maße dynamisch beschickt. Die gemessenen Durchflussmengen der Versuchsfilter weichen allerdings zum Teil voneinander ab. So hat der Referenzfilter die höchste hydraulische Belastung, während für den GAK-Filter die niedrigste Durchflussmenge ermittelt wurde. Ausschlaggebend ist hierbei vermutlich die Lage der Filterkammern entlang des Zulaufgerinnes. Während es sich bei dem Referenzfilter um einen Eckfilter am Ende des Gerinnes handelt, liegt die GAK-Filterzelle weiter vorne. Im Mittel resultieren die in Tabelle 3.1 genannten Filtergeschwindigkeiten für die untersuchten Filter.

**Tabelle 3.1: Filtergeschwindigkeiten im Untersuchungszeitraum (1.11.13 – 1.5.15)**

	Min	Mittel	Max
	[m/h]	[m/h]	[m/h]
<b>Referenzfilter</b>	1,54	3,81	11,09
<b>PAK-Filter</b>	2,13	3,80	8,53
<b>GAK-Filter</b>	1,80	2,87	7,07
<b>nGAK-Filter</b>	1,83	3,27	8,80

Die hydraulische Kontaktzeit im Filterbett (EBCT = Empty Bed Contact Time) und die Zeit im Filterüberstand ergeben sich aus der Filtergeschwindigkeit ( $v_F$ ) und der Filterbetthöhe ( $t_F$ ) bzw. der Überstandhöhe ( $t_U$ ). Dieser Zeitraum, in welchem das Adsorbens (Aktivkohle) mit

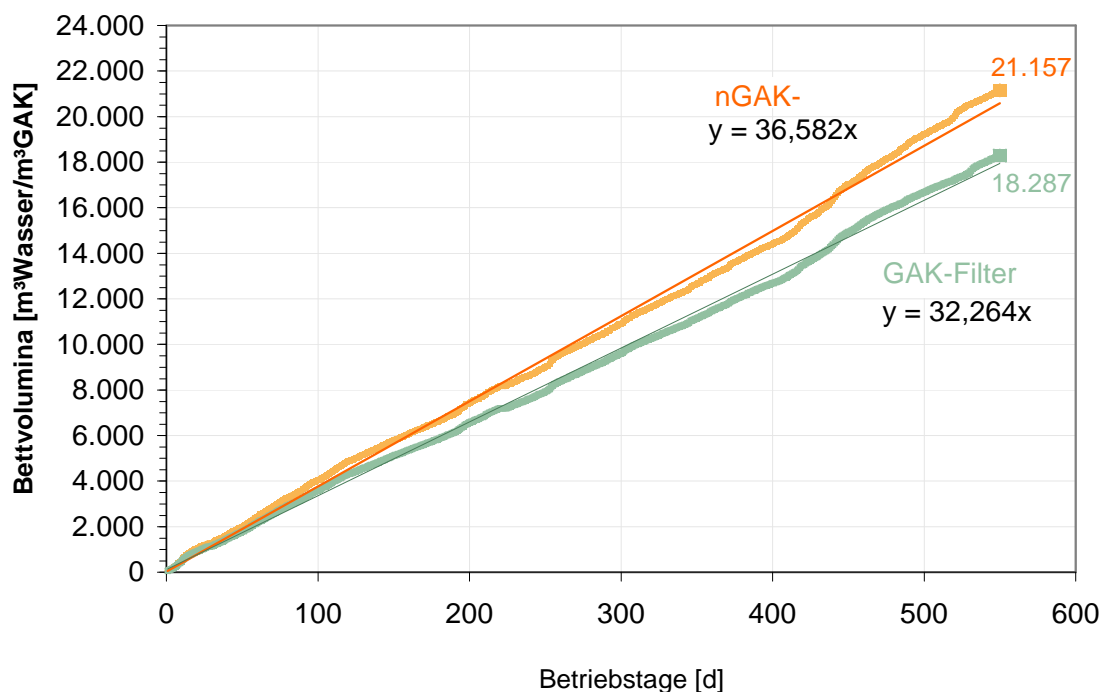
dem Adsorbat (gelöste Schmutzstoffe) in Kontakt kommt, steht für die Kinetik des Adsorptionsvorgangs zur Verfügung. Geringe Kontaktzeiten führen insbesondere bei schwer zu adsorbierenden Stoffen zu einer geringeren Adsorption.

Im Mittel wurden folgende Kontaktzeiten erreicht:

- $t_K$ , GAK-Filter (Filterbett) 46,1 min.
- $t_K$ , nGAK-Filter (Filterbett) 39,9 min.
- $t_K$ , PAK-Filter (Überstand) 41,1 min.

### Bettvolumina

Als Bettvolumina (BV) wird das Verhältnis von behandelter Wassermenge bezogen auf das GAK-Volumen bezeichnet. Der Wert dient als Kennwert für eine spezifische hydraulische Beschickung, um das „Alter“ der GAK-Schüttung im Filterbett zu beschreiben. In Abhängigkeit von der Durchflussumenge stieg die Zahl der Bettvolumina im Untersuchungszeitraum mit der Laufzeit kontinuierlich an und erreichte bis zum Versuche 21.167 BV für den nGAK-Filter bzw. 18.287 BV für den GAK-Filter (vgl. Bild 3.1).



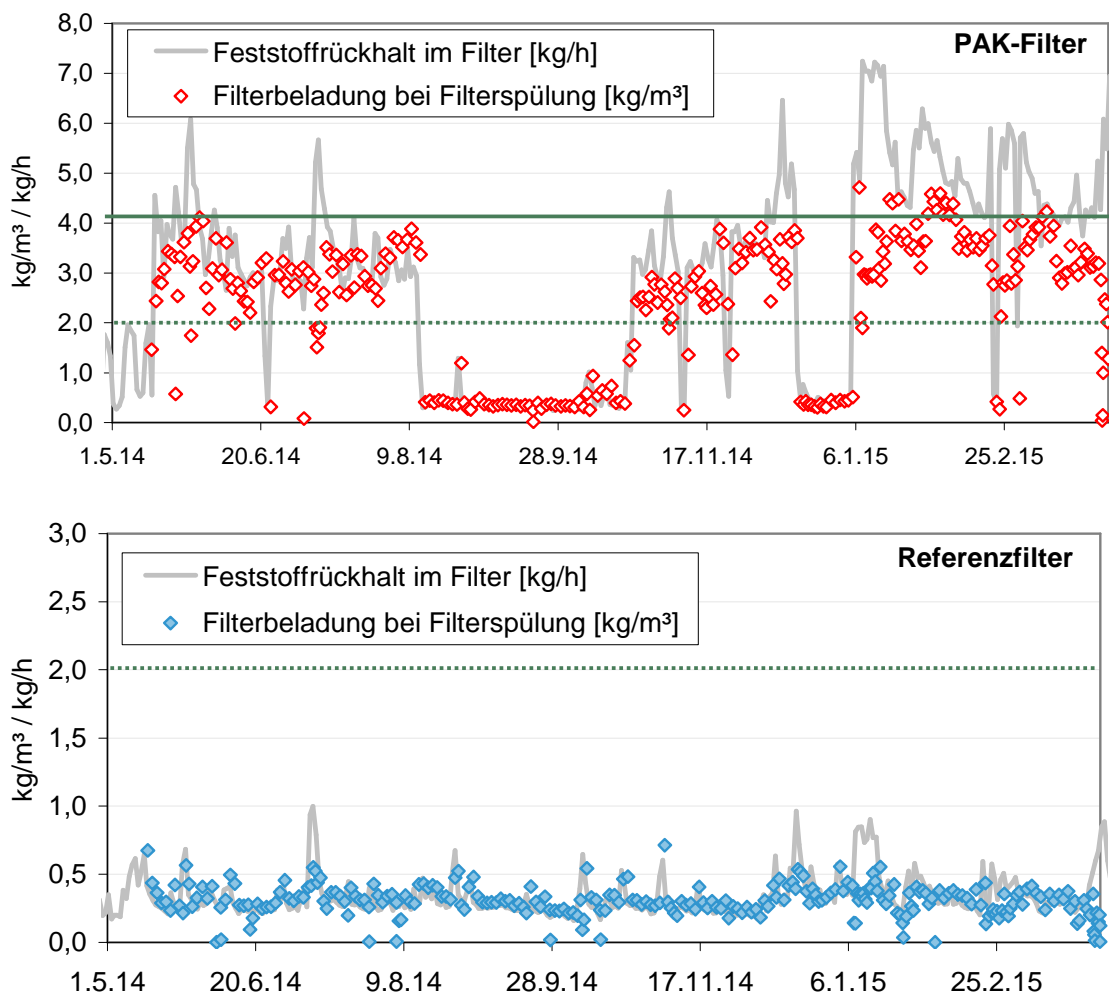
**Bild 3.1: Anstieg der behandelten BV während des Untersuchungszeitraums**

### Feststoffbeladung der Filter

Die Auslegungskennwerte der Filterbeladung liegen bei konventionellen Filterstufen im Trockenwetterfall im Bereich von 3 – 4 kg/m³. Mit zusätzlicher Flockung wird eine geringere nutzbare Beladung von ca. 2,5 kg/m³ angegeben (EAWAG, 2010). In dem Vorprojekt Mikroflock konnte eine maximale Beladung von ca. 2,0 kg/m³ bei Dosierung von Pulverkohle mit gleichzeitiger Fällmittelzugabe ermittelt werden (Bornemann et al. 2012).

Die im Untersuchungszeitraum gemessene AFS-Konzentration im Ablauf der Nachklärung lag bis auf wenige Ausnahmen bei  $c_{\text{AFS, Abl.NK}} \leq 1,0 \text{ mg/l}$ , also in einem sehr geringen, nicht mehr messbaren Bereich. Für die Abschätzung der Filterbeladung wird dennoch ein Mittelwert in Höhe von  $1,5 \text{ mg}_{\text{AFS/l}}$  über den gesamten Versuchszeitraum angesetzt, da für die Analysen unter der Bestimmungsgrenze (BG) ein Wert in Höhe von  $1,0 \text{ mg/l}$  angesetzt wird.

Diese geringe Feststoffbelastung aus dem Ablauf der Nachklärung führt dazu, dass auch mit einer zusätzlichen Feststoffzugabe von  $20 \text{ mg/l}$  durch die PAK die maximale Filterbeladung nicht vor Erreichen des gewünschten Spülzyklus von 24 h erreicht wird. Im Ergebnis kann für jeden Filtrationszyklus eine Filterbeladung in Abhängigkeit der Wassermenge und den oben genannten Feststoffkonzentrationen bzw. Abscheideleistungen abgeschätzt werden. Das folgende Bild 3.2 zeigt die erreichte Beladung ( $\text{kg/m}^3$ ) kurz vor der Filterspülung. Dabei kann die Spülung nach einer vorgewählten Zeit oder aufgrund des Druckverlustes eingeleitet worden sein. Die Endbeladung inklusive der PAK liegt mit 2 bis  $4 \text{ kg/m}^3$  in einem plausiblen Bereich, der sich für Raumfilter auch in den Auslegungskennwerten wiederfindet.



**Bild 3.2: Mittlere Feststoffbelastung und Filterbeladung bei Filterspülung im PAK-Filter und zum Vergleich im Referenzfilter**



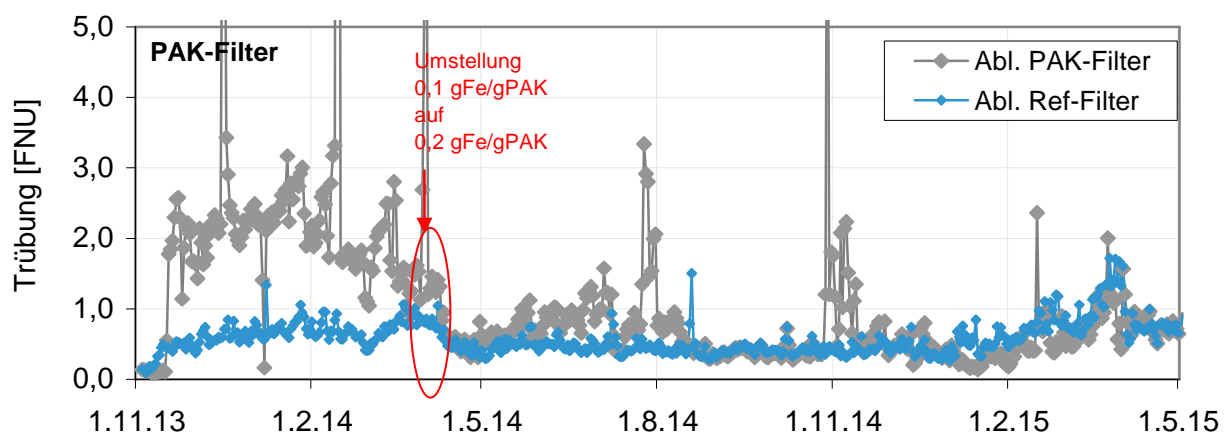
### Feststoffrückhalt

Ein wichtiges Erfolgskriterium ist der vollständige Rückhalt der (teil-)beladenen PAK zusammen mit den übrigen Feststoffen im Filterbett. Bei einem Durchbruch würde einerseits die ausgetragene Kohle zur Steigerung der Trübung im Ablauf und damit zu einer Verschlechterung der Überwachungswerte führen, zum anderen würde die mit Spurenstoffen beladene Kohle in das Gewässer eingetragen.

Während die Partikelgröße der PAK bei  $< 0,045$  mm liegt, hat das Filterbett eine Körnung von  $> 0,7$  mm. Dieser Größenunterschied ist bei einer Tiefenfiltration zwar erwünscht, um eine Raumwirkung für die Trübstoffeinlagerung zu erreichen, führt aber dazu, dass ein guter Abscheidegrad für die PAK nicht erreicht werden kann. Aus diesem Grund wird der Rückhalt durch die Dosierung von Fällmittel, hier Eisen(III)-Chloridsulfat, unterstützt. Durch den Hilfsstoff wird die Oberflächenladung der Partikel entstabilisiert und es kommt teilweise zu einer Agglomeration der Partikel, wodurch ein nahezu vollständiger Rückhalt erreicht wird.

Sowohl für die Kontrolle der Dosierung als auch für die Ablaufkontrolle erwiesen sich Trübungsmessungen als geeignet. Obwohl eine direkte Korrelation der Trübungsmessung zur Feststoffkonzentration vor allem in geringen Konzentrationsbereichen nicht gegeben ist, kann durch eine online-Messung der Trübung sowohl ein Ausfall der Dosierung als auch ein Kohledurchbruch im Ablauf sicher festgestellt werden.

Hierzu zeigt folgende Abbildung (Bild 3.3) die Trübung im Tagesmittel der Versuchsfilter im Vergleich zum Referenzfilter. Die Fe-Dosierung wurde von 2,0 auf 4,0 mg/l erhöht. Nur mit der erhöhten Dosierung konnte für das Filtrat des PAK-Filters die gleiche Trübung ermittelt werden wie im Referenzfilter.



**Bild 3.3:** Trübung im Filtrat als Kontrolle des Feststoffrückhaltes, jeweils PAK-, GAK- und nGAK-Filtrat im Vergleich zum Referenzfilter

## 3.2 Optimierung der PAK-Dosierung

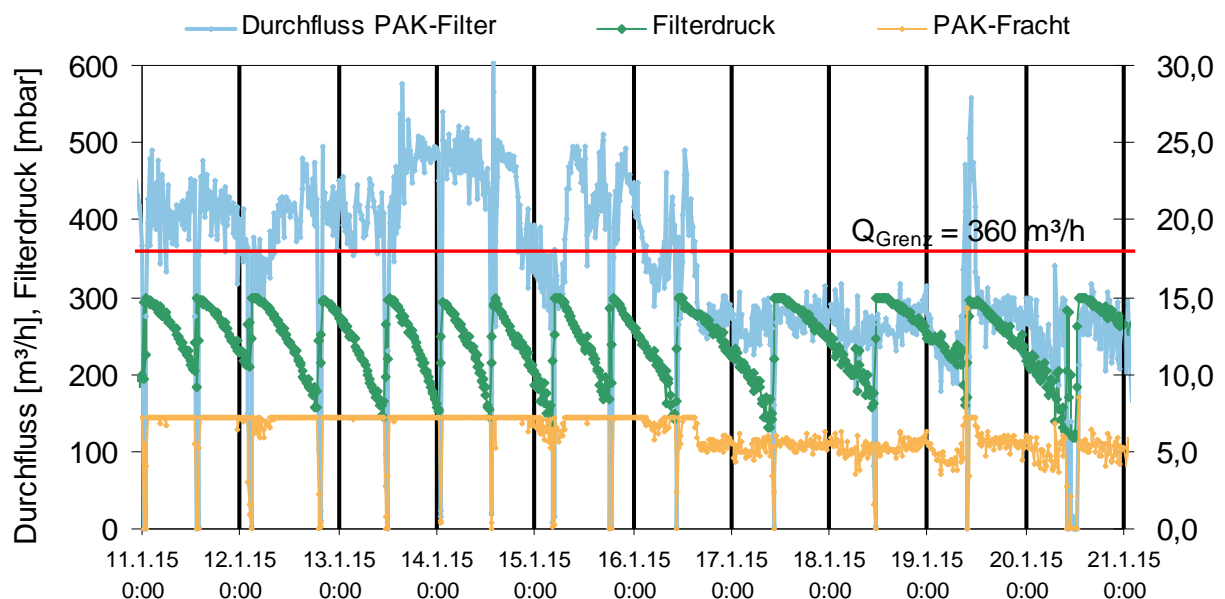
Zur Optimierung der Dosierung wurden nachfolgende Maßnahmen untersucht:

- **Regulierung bei Regenwetter:** Einfrieren der Dosiermenge ab  $Q_{\text{Grenz}}$
- **Intervalldosierung:** Gleiche Dosierfracht in kürzerer Zeit
- **Vergleich PAK-Produkt:** Versuchsbetrieb mit zwei PAK-Produkten
- **Einfluss Rückführkohle:** Rückführung in Zulauf KA / Zulauf BB (Simulation)

### Regulierung der Dosierung bei Regenwetter

Um den Verdünnungseffekt im Mischwasserfall zu berücksichtigen, wurde eine Begrenzung der dosierten Aktivkohlemenge bei erhöhter Wassermenge integriert. Dazu wurde eine Grenzwassermenge in Höhe von  $Q_{\text{Grenz}} = 100 \text{ l/s} = 360 \text{ m}^3/\text{h}$  in der Dosiersteuerung hinterlegt. Bei Überschreitung von  $Q_{\text{Grenz}}$  wird die Dosierfracht eingefroren und nicht weiter an die Wassermenge angepasst. Somit ergibt sich im Mischwasserfall eine Verdünnung der PAK-Konzentration analog zu der Verdünnung der Wasserinhaltsstoffe.

Neben einem verringerten PAK-Verbrauch und damit niedrigeren Verbrauchskosten liegt der Vorteil dieser Begrenzung auch in dem besseren Filterverhalten durch reduzierte Feststoffbelastung. Das nachfolgende Bild 3.4 zeigt hierzu einen längeren Zeitraum mit Mischwasser und Übergang zu Trockenwetter am 17.1.2015. Bei erhöhter Wassermenge wird durch die Begrenzung maximal  $7,2 \text{ kg}_{\text{PAK}}/\text{h}$  dosiert und es sind Filterlaufzeiten von 12 h erreichbar, die für den Mischwasserfall als ausreichend angesehen werden.



**Bild 3.4:** Filterverhalten bei Mischwasser und Trockenwetter

### **Intervalldosierung**

Bei der Intervalldosierung handelt es sich um eine diskontinuierliche Zugabe der PAK über mehrere Stunden statt einer gleich verteilten kontinuierlichen Zugabe über den Tag. Bei gleicher Fracht kann dadurch die mittlere Kontaktzeit der PAK im Filterbett erhöht werden. So wird bei der normalen konstanten PAK-Dosierung auch zum Ende der Filterlaufzeit noch Frischkohle zugegeben obwohl diese kurz darauf bereits über die Filterspülung wieder ausgetragen wird. Dadurch ergibt sich bei einer Filterstandzeit von 24 h eine mittlere Aufenthaltszeit der PAK von nur 12 h. Zur besseren Ausnutzung der Kohle wurde daher eine Zugabe der PAK-Fracht in nur 8 h statt 24 h geprüft. Die Kohle verbleibt nach den 8 Stunden weiter bis zur Spülung im Filterbett, somit erhöht sich die mittlere Aufenthaltszeit bei 24 h Filterstandzeit von 12 h auf 20 h.

Die Umsetzung der Intervalldosierung bei einem Ausbau der PAK-Dosierung für alle Filterzellen ist allerdings technisch kaum zu realisieren. Der Filterzyklus der einzelnen Filterzellen weicht zwangsweise voneinander ab, da immer nur ein Filter pro Filterblock gespült werden kann. Mit einer einzelnen Dosierstation, die alle Filter homogen mit Pulverkohle versorgt, wäre daher eine zeitlich geregelte und an die Filterlaufzeit angepasste Steuerung der Dosierung nur unter großem technischem Aufwand umsetzbar.

### **PAK-Produkt**

Die Wahl des Aktivkohle-Produktes hat einen großen Einfluss auf die erreichbare Reinigungsleistung. Faktoren wie Porenradienverteilung Mahlfineinheit, Oberflächeneigenschaften und das Ausgangsmaterial bestimmen dabei die für die entsprechende Wassermatrix erreichbare Adsorption. Zum Vergleich verschiedener Aktivkohlen hinsichtlich ihrer Eliminationsleistung wurde im Projekt neben der Hydrffin ARP (im Folgenden PAK\_1 genannt) auch die Carbopal AP (im Folgenden PAK\_2 genannt) eingesetzt.

### **Dosierstelle der Rückführkohle und Dosiermenge**

Um die eingesetzte PAK besser auszunutzen, ist es möglich sie nach der Ausspülung aus dem Filterbett zur „Nachbeladung“ in die biologische Stufe zurückzuführen. Zu den Auswirkungen der rückgeführten PAK und der dabei verwendeten Dosierstelle auf die Elimination von Spurenstoffen wird auf Kapitel 3.4.7 verwiesen. Dort werden die anhand eines dynamischen Simulationsmodells erarbeiteten Erkenntnisse beschrieben. Im Versuchsbetrieb konnte der Einfluss nicht nachgewiesen werden, da nur in eine von 28 Filterzellen PAK dosiert wurde und der Anteil der rückgeführten Kohle zu gering war.

### 3.3 Elimination von Standardabwasserparametern

#### Zulaufkonzentrationen der Filtration

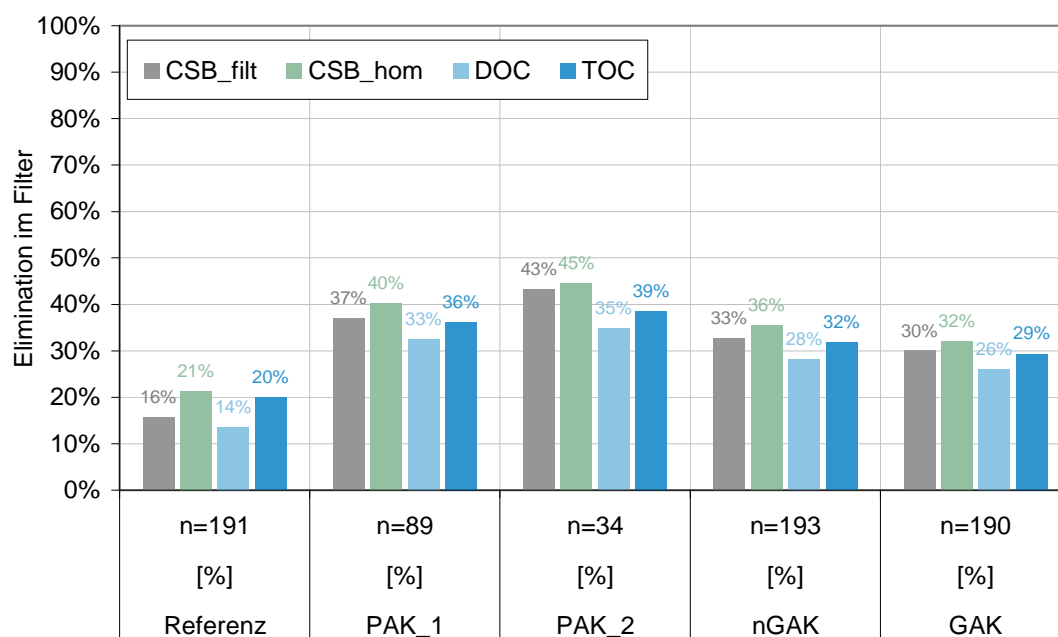
Tabelle 3.2 fasst die gemessenen Konzentrationen im Zulauf zur Filtration zusammen. Die mittlere CSB-Konzentration im Ablauf der Nachklärung der KA Buchenhofen beträgt  $c_{\text{CSB}} = 23,1 \text{ mg/l}$  ( $c_{\text{DOC}} = 7,7 \text{ mg/l}$ ). Damit ist die Reinigungsleistung der vorgelagerten biologischen Stufe als gut zu bewerten und es ergeben sich günstige Voraussetzungen für die Adsorption.

**Tabelle 3.2: Belastung im Zulauf zur Filtration mit Standardabwasserparametern**

Parameter	Anzahl	Einheit	Mittelwert	Minimum	25% Perzentil	50% Perzentil	75% Perzentil	Maximum
CSB gesamt	n=169	[mg/l]	23,1	13,1	20,1	22,9	26,2	33,4
CSB filtriert	n=169	[mg/l]	19,1	8,5	16,1	19,2	22,2	29,6
DOC	n=165	[mg/l]	7,7	4,3	6,7	7,6	8,8	11,0
TOC	n=165	[mg/l]	9,0	5,3	8,0	9,0	10,0	14,0
TNb	n=162	[mg/l]	6,0	3,0	5,3	6,1	6,8	10,0
pH	n=162	[-]	7,5	6,0	7,4	7,5	7,6	8,4
Leitfähigkeit	n=162	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	811,5	12,9	726,0	819,0	899,8	1.290,0

#### Mittlere Elimination nach 18 Monaten Betrieb

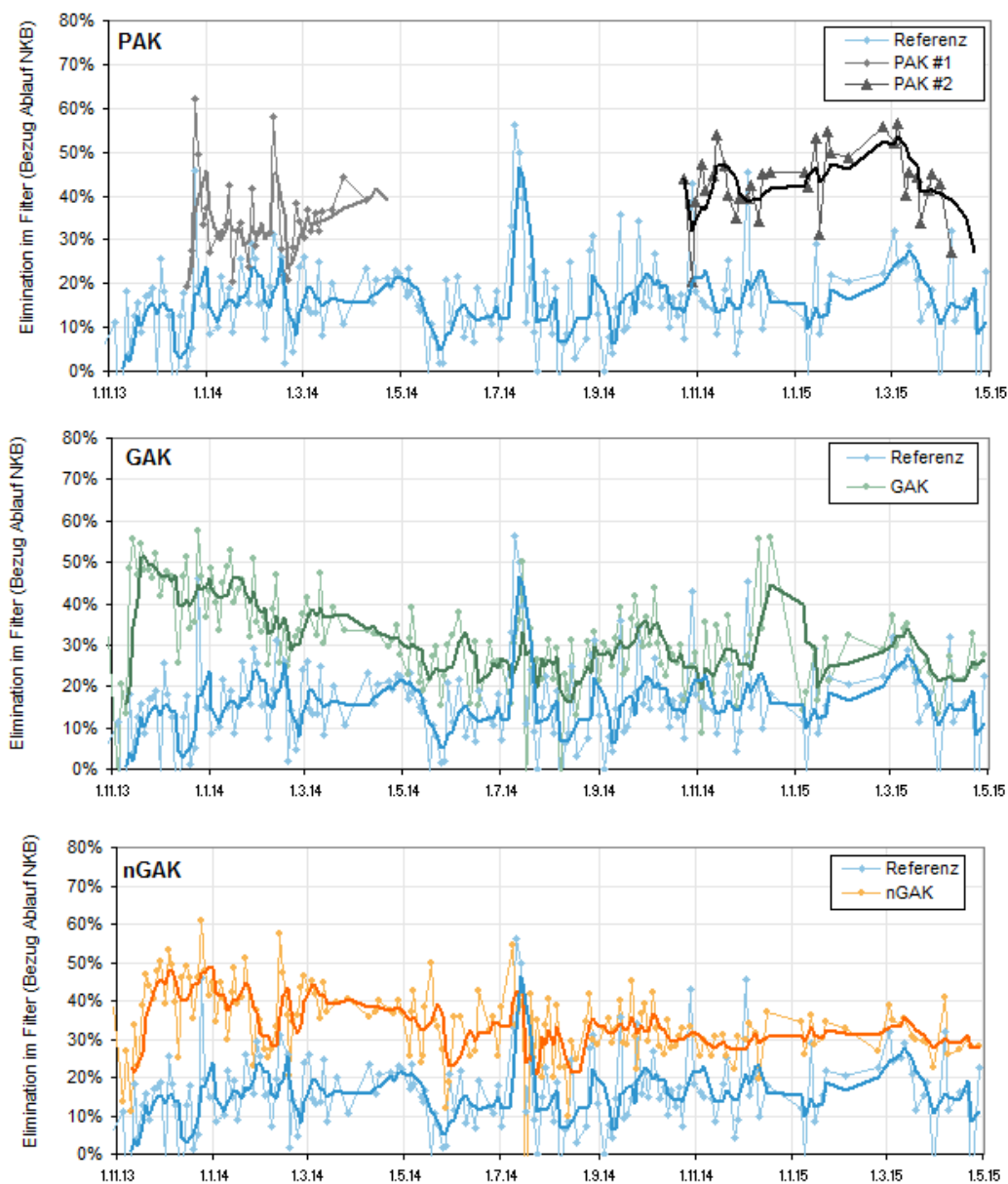
In Bild 3.5 ist die mittlere Elimination in den Filtern für die Standardabwasserparameter  $\text{CSB}_{\text{filt}}$ ,  $\text{CSB}_{\text{ges}}$ , DOC und TOC dargestellt. Im Vergleich zum Referenzfilter, der im Mittel eine CSB-Elimination in Höhe von 21% erreicht, zeigen alle Aktivkohle-Filter eine deutlich höhere Reinigungsleistung von 30 - 43%. Die Reihenfolge der Elimination der Versuchsfilter liegt damit wie folgt bei: PAK\_2 (45%), PAK\_1 (40%), nGAK (36%) und GAK (32%).



**Bild 3.5: Mittlere Reinigungsleistung der Filter in Bezug auf die Standardparameter**

### Zeitlicher Verlauf der Elimination in den Filtern

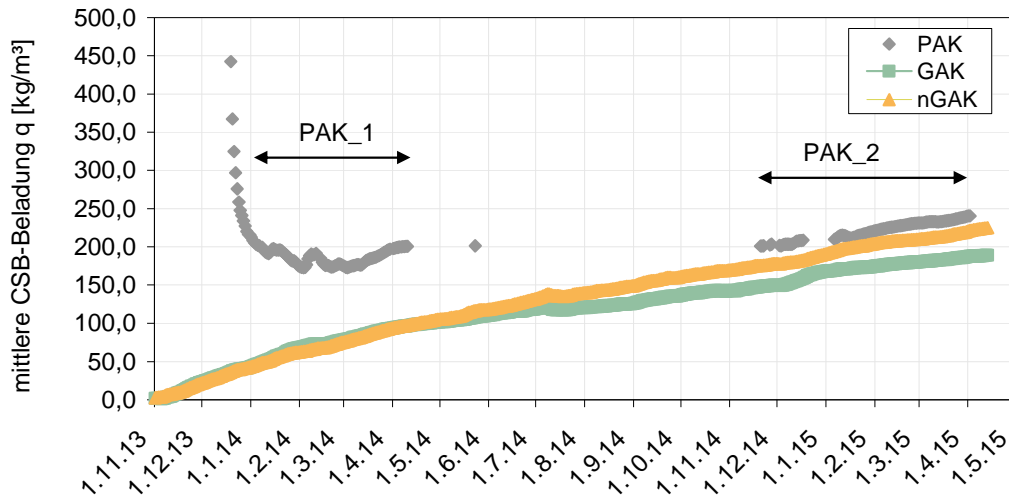
Der zeitliche Verlauf der Elimination in den Filtern unterliegt deutlichen Schwankungen. Hierzu zeigt Bild 3.6 den Verlauf der Elimination des filtrierte CSB in den Versuchsfiltern. Die Einzelmesswerte (24h-MP) sind zur besseren Visualisierung zusätzlich als gleitendes Mittel aus 4 Proben dargestellt. Die deutlichen Abweichungen von diesem Mittel zeigen die große Schwankungsbreite der Reinigungsleistung. Die Elimination der GAK-Filter nimmt innerhalb von 2-3 Monaten von über 50 % zu Beginn bis auf 20-30 % ab. Bis zum Versuchsende verläuft die Elimination bei diesen Filtern danach weitgehend auf einem konstanten Niveau, übersteigt allerdings die des Referenzfilters weiterhin deutlich. Die stets frische Kohle der PAK-Dosierung zeigt im gesamten Zeitraum die höchsten und nahezu unveränderten Eliminationswerte.



**Bild 3.6:** Filtrierter CSB, zeitlicher Verlauf der Elimination (durchgezogene Linie = gleitender Mittelwert aus n=4 Werten)

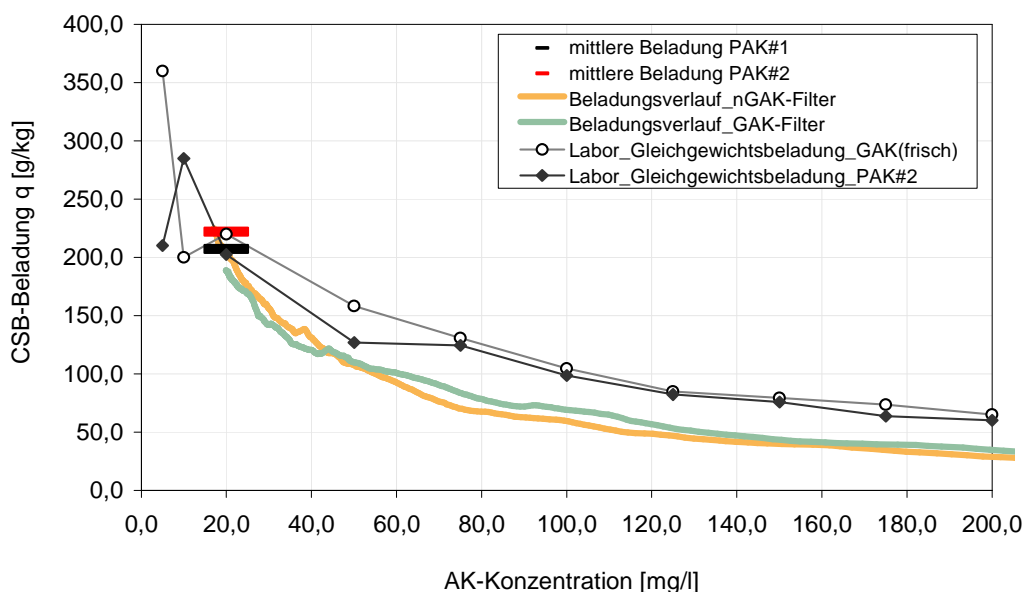
### CSB-Beladung der Aktivkohle

Mit Anstieg der behandelten Bettvolumina nimmt die Beladung der GAK zu, wobei die nGAK aufgrund der etwas höheren zufließenden Wassermenge schneller eine höhere Beladung erreicht. Die PAK zeigt dagegen wegen unterschiedlicher Kohleprodukte und teilweise schwankender Dosiermengen eine Beladung auf unterschiedlichem Niveau (vgl. Bild 3.7)



**Bild 3.7: Berechnete CSB-Beladung der Versuchsfilter**

Zum Ende der Versuchszeit liegen die Beladung des nGAK-Filters bei  $225 \text{ g}_{\text{CSB}}/\text{kg}_{\text{GAK}}$  und die Beladung des GAK-Filters bei ca.  $190 \text{ g}_{\text{CSB}}/\text{kg}_{\text{GAK}}$ . Als Beladung der PAK ergibt sich ein Mittelwert für das erste Produkt (Hydraffin ARP) in Höhe von  $207 \text{ g}_{\text{CSB}}/\text{kg}_{\text{PAK}}$  und für das zweite PAK-Produkt (Carbopal AP) von  $222 \text{ g}_{\text{CSB}}/\text{kg}_{\text{PAK}}$ . Der Vergleich zu der Gleichgewichtsbeladung aus den im Vorfeld im Labor erstellten Adsorptionsisothermen ist in Bild 3.8 dargestellt.



**Bild 3.8: Beladung in Abhängigkeit der Dosiermenge, Vergleich der praktisch erzielten Beladung mit den Werten der Laborversuchen**

## 3.4 Elimination von Spurenstoffen

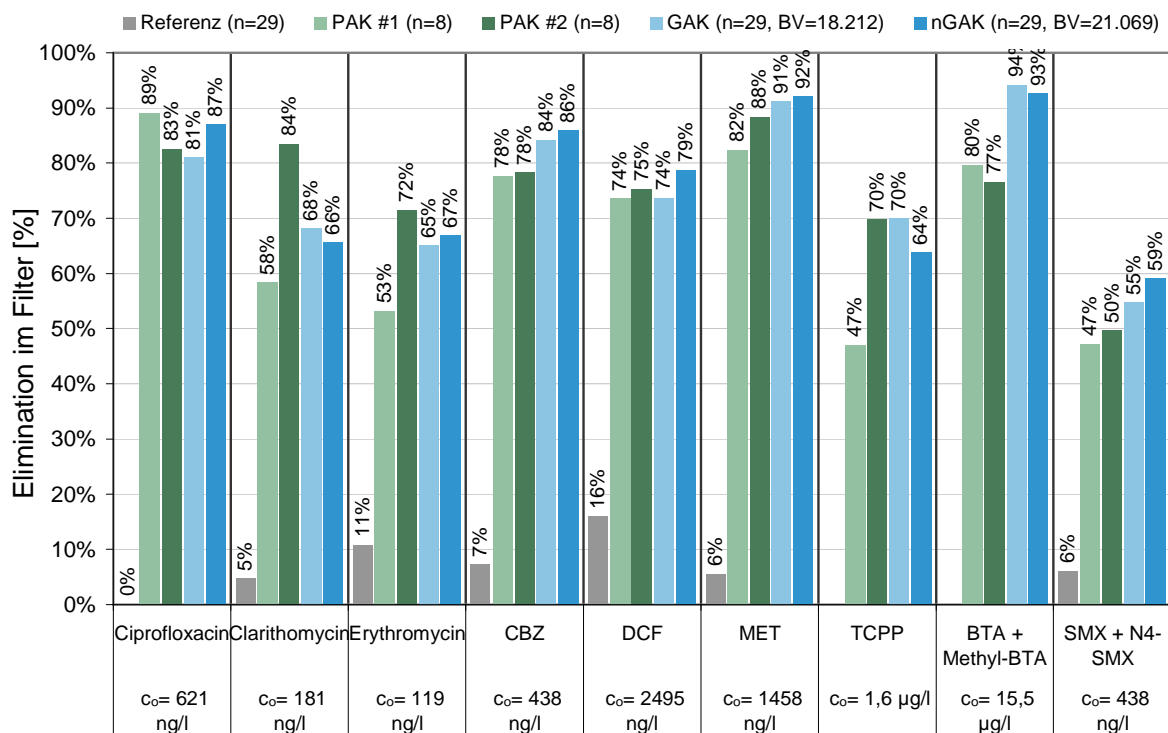
### 3.4.1 Elimination der Spurenstoffe in den Filtern

Die Zulaufkonzentration der untersuchten Spurenstoffe ist sehr inhomogen. Zum besseren Vergleich sind in der nachfolgenden Tabelle 3.3 alle Konzentrationen in µg/l angegeben.

**Tabelle 3.3: Auswertung der Spurenstoff-Messdaten im Zulauf zur Filtration**

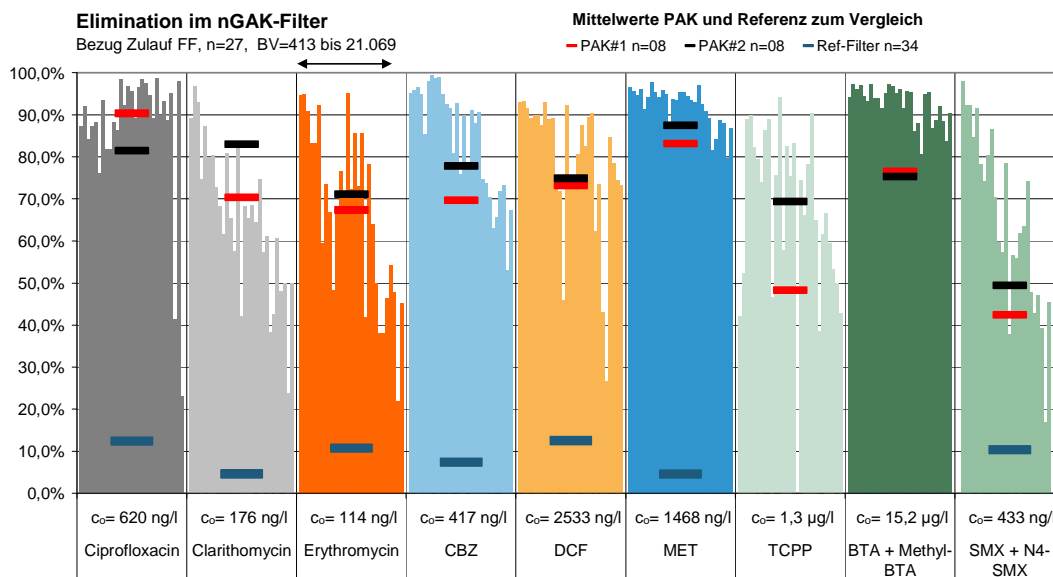
Substanz	Anzahl	Einheit	Mittel	Min	25% Perzentil	50% Perzentil	75% Perzentil	Max
BTA	n=29	[µg/l]	10,49	3,50	6,30	8,30	12,00	26,00
Methyl-BTA	n=29	[µg/l]	5,02	2,00	3,30	4,10	5,80	18,00
DCF	n=29	[µg/l]	2,50	0,96	1,90	2,40	2,70	5,30
MET	n=29	[µg/l]	1,46	0,77	1,10	1,40	1,70	3,10
TCPP	n=28	[µg/l]	1,64	0,25	0,77	1,10	1,90	9,10
Cipro	n=29	[µg/l]	0,62	0,09	0,31	0,55	0,76	1,90
CBZ	n=29	[µg/l]	0,44	0,23	0,34	0,41	0,50	0,88
SMX	n=29	[µg/l]	0,32	0,09	0,22	0,34	0,40	0,50
Clari	n=29	[µg/l]	0,18	0,10	0,14	0,15	0,23	0,34
Erythro	n=29	[µg/l]	0,12	0,04	0,08	0,11	0,15	0,21
N4-SMX	n=29	[µg/l]	0,12	0,03	0,08	0,11	0,17	0,24

Bild 3.9 zeigt die mittlere Elimination in den Versuchsfiltren für den Betriebszeitraum von 18 Monaten. Die Elimination bezieht sich dabei nur auf den Wirkungsgrad der Filter, d.h. Bezugswert ist der Ablauf der Nachklärung.

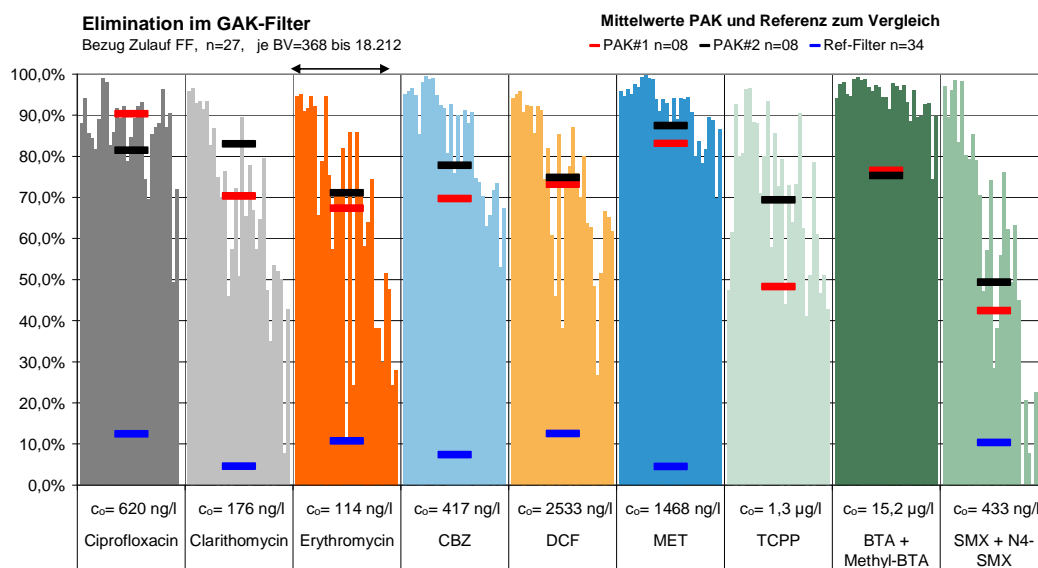


**Bild 3.9: Mittlere Elimination von Spurenstoffen nach 18 Monaten Betrieb**

Die mittlere Elimination der Spurenstoffe ist sehr stoffspezifisch und reicht von 47 % bis 94 %. Die Leistung der zweiten Pulverkohle (Carbopal AP) ist nur in einigen Fällen besser als die der ersten Pulverkohle (Hydraffin ARP). Trotz der langen Standzeit der GAK-Filter liegt die mittlere Elimination bei einigen Substanzen (BTA, SMX, MET, CBZ) noch über der Entnahme des PAK-Filters. Hierbei handelt es sich insbesondere um gut adsorbierbare Stoffe. Die Elimination der schlechter adsorbierbaren Substanzen (DCF, TCPP) liegt auch nach der langen GAK-Laufzeit im Gesamtmittel auf dem Niveau der PAK oder nur unwesentlich niedriger. In Bild 3.10 und Bild 3.11 ist der Verlauf der Spurenstoffelimination im nGAK-Filter und im GAK-Filter dargestellt. Jeder einzelne Balken entspricht einer bilanzierten Elimination. Für einen direkten Vergleich ist außerdem die mittlere Elimination für beide PAK-Sorten und im konventionellen Referenzfilter enthalten.



**Bild 3.10: Zeitlicher Verlauf der Elimination von Spurenstoffen im nGAK-Filter**



**Bild 3.11: Zeitlicher Verlauf der Elimination von Spurenstoffen im GAK-Filter**

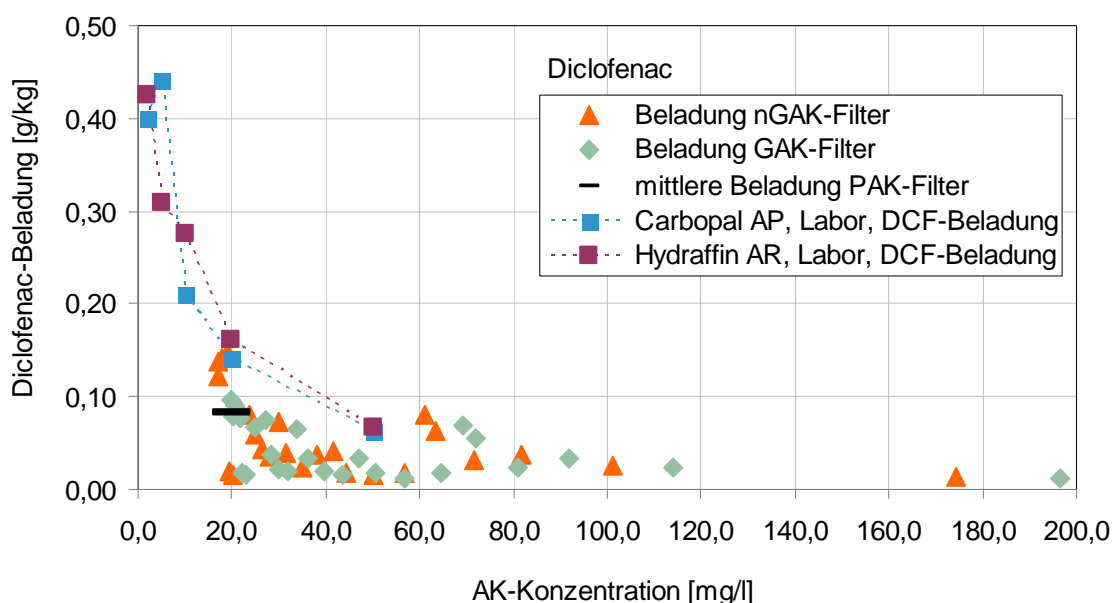


Die Anfangselimination der GAK liegt für alle Stoffe deutlich über dem Mittelwert der PAK-Elimination. Dies ist auf den Unterschied der jeweils frisch eingesetzten Aktivkohle-Masse zurückzuführen, der zu Beginn der GAK-Laufzeit noch sehr hoch ist. So ist die äquivalente (d.h. auf die behandelte Wassermenge bezogene) GAK-Konzentration bis ca. 8.000 BV noch doppelt so hoch wie die eingestellte PAK-Dosierung. Für viele Substanzen zeigt sich im Verlauf der Standzeit eine deutliche Abnahme der Elimination in beiden GAK-Filtern.

Andererseits ist die Elimination für etliche Stoffe auch nach einem Betrieb von 18 Monaten noch bei 60 % oder darüber. Diese auch nach langer Standzeit noch sehr gut adsorbierbaren Stoffe sind z.B. Carbamazepin und Diclofenac. Vor allem aber werden Metoprolol und Benzotriazol nach 18 Monaten noch immer zu über 80 % abgeschieden. Eine Erschöpfung der GAK ist nach den hier vorgestellten Ergebnissen demnach lediglich für einige Stoffe wie z.B. die Antibiotika Clarithromycin, Erythromycin oder Sulfamethoxazol mit einer Restelimination von meist unter 30 % bald erreicht, für andere Stoffe könnte die GAK weiterhin eingesetzt werden.

### 3.4.2 Beladung der Aktivkohle mit Spurenstoffen

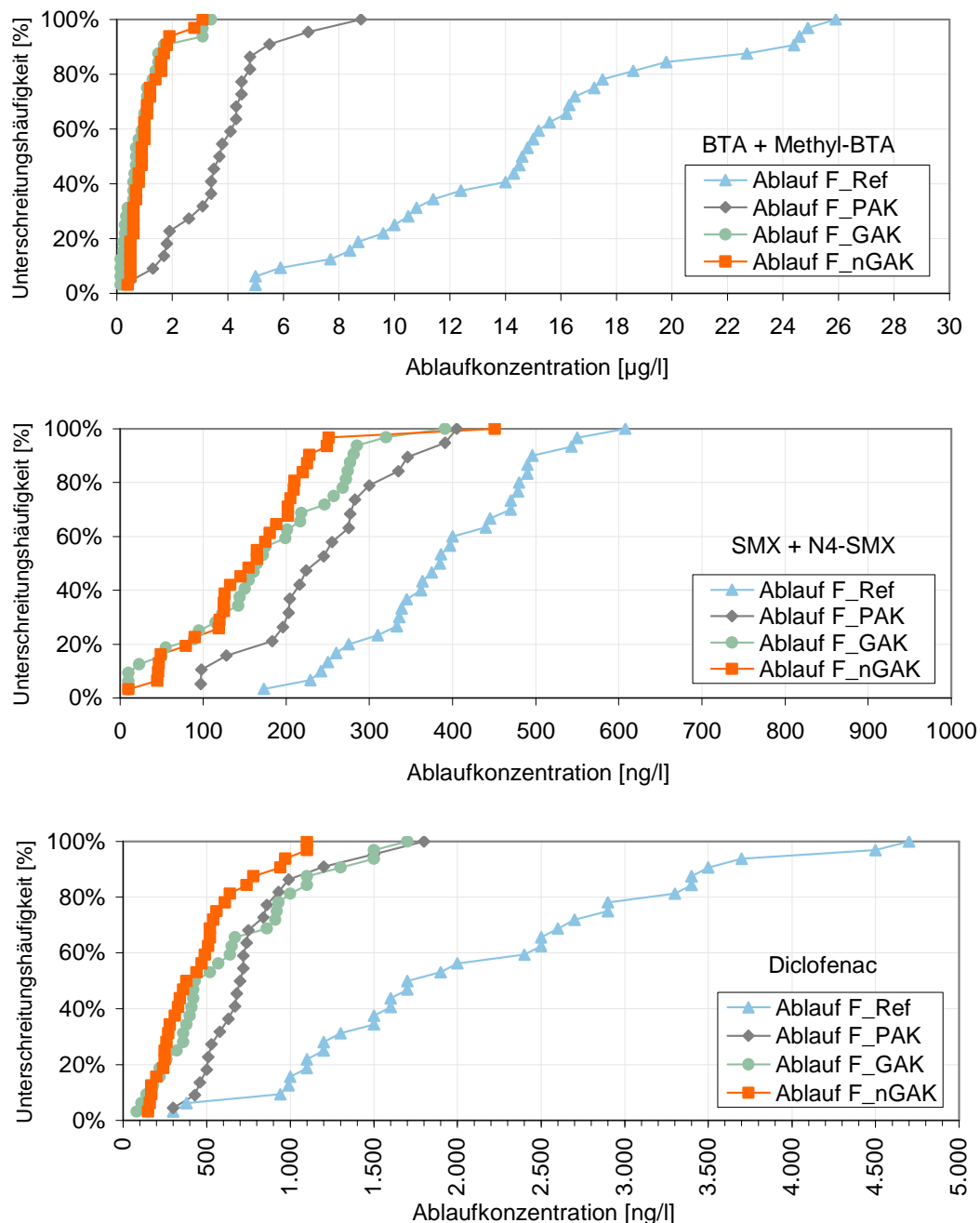
Analog zu der Ermittlung der CSB-Beladung der Aktivkohle aus den Betriebsdaten, wird nachfolgend die adsorptiv entfernte Spurenstoff-Masse auf die jeweilige Masse an Aktivkohle bezogen, um so einen Vergleichswert insbesondere zu den Laborwerten zu erhalten. Für den Vergleich ist in Bild 3.12 beispielhaft die Beladung in Abhängigkeit der Aktivkohlekonzentration aufgetragen. Es zeigt sich, dass für die Spurenstoffe unter den günstigen Laborbedingungen (lange Kontaktzeit) eine deutlich höhere Beladung erreicht werden kann.



**Bild 3.12: Diclofenac-Beladung, Vergleich Betriebsdaten mit Laborergebnissen**

### 3.4.3 Erreichbare Ablaufkonzentrationen

Die Spurenstoffkonzentrationen im Ablauf aller untersuchten Filter sind in Bild 3.13 beispielhaft für drei Substanzen als Summenlinien über den gesamten Versuchszeitraum dargestellt. Die gewählten Stoffe sind die gut adsorbierbaren Benzotriazole (als Summe), das mäßig adsorbierbare Sulfamethoxazol (inkl. Metabolit) und Diclofenac. Die Wirkung der Adsorption ist im Vergleich zum Referenzfilter deutlich zu erkennen. Dennoch weisen die Ablaufwerte der AK-Filter bedingt durch die in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Einflüsse aus Kontaktzeit und Zulaufkonzentration eine hohe Spreizung auf. Dies lässt das Erreichen fester konzentrationsbezogener Ablaufwerte nur bedingt zu.



**Bild 3.13:** Summenlinien der Ablaufkonzentrationen über den Versuchszeitraum

### 3.4.4 Elimination in Bezug auf den Zulauf der Kläranlage

#### Elimination in den konventionellen Reinigungsstufen

Für die Beurteilung der Gesamtelimination der Kläranlage ist die stoffspezifische Reinigungsleistung der konventionellen mechanisch-biologischen Abwasserreinigung einzubeziehen. Für die KA Buchenhofen ergibt sich ein erwartungsgemäß stoffspezifischen Abbau. Während Sulfamethoxazol zu 60 % in der biologischen Stufe abgebaut wird, berechnet sich für Diclofenac ein Abbau von nur 3 % in der biologischen Stufe. Unter Einbezug der Vorklä rung erhöht sich die Diclofenac-Elimination der mechanisch-biologischen Stufe jedoch auf 26 %. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse kann der nachfolgenden Tabelle 3.4 entnommen werden. Zu beachten ist hierbei, dass für einige Substanzen wie beispielsweise TCPP oder Carbamazepin negative Eliminationen in der biologischen Stufe ermittelt wurden. Dies ist auf Stoffumwandlungen, und den Einfluss der Probenahme-strategie und Analytik zurückzuführen

**Tabelle 3.4: Konzentrationen und mittlere Elimination der Spurenstoffe in den mechanisch biologischen Reinigungsstufen der Kläranlage Buchenhofen basierend auf 72h-MP**

Substanz	Mittlere Konzentrationen (n=6) [ $\mu\text{g/l}$ ]			mittlere Elimination <sup>3)</sup> (n=6)	
	Zulauf VK <sup>1)</sup>	Zulauf BB	Zulauf FF <sup>2)</sup>	Elimination "Mechanik + Biologie"	Elimination "Biologie"
	C <sub>KA,zu</sub>	C <sub>BB,zu</sub>	C <sub>FF,zu</sub>	Zulauf VK -> Zulauf FF	Zulauf BB -> Zulauf FF
Ciprofloxacin	3,38	2,87	1,12	<b>66%</b>	<b>60%</b>
Clarithromycin	0,28	0,23	0,24	<b>10%</b>	<b>-3%</b>
Erythromycin	0,41	0,23	0,14	<b>42%</b>	<b>30%</b>
Carbamazepin	0,49	0,40	0,41	<b>8%</b>	<b>-6%</b>
Diclofenac	3,53	2,78	2,57	<b>26%</b>	<b>3%</b>
Metoprolol	1,74	1,62	1,66	<b>1%</b>	<b>-3%</b>
TCPP	3,28	1,43	1,65	<b>36%</b>	<b>-15%</b>
BTA + Methyl-BTA	29,60	23,90	16,45	<b>43%</b>	<b>31%</b>
SMX + N4-SMX	1,50	1,29	0,46	<b>65%</b>	<b>63%</b>
Mittel 5 Substanzen (DCF,CBZ,MET,BTA,SMX)	7,37	6,00	4,31	<b>29%</b>	<b>18%</b>

<sup>1)</sup> Zulauf VK entspricht Zulauf Kläranlage <sup>2)</sup> Zulauf FF entspricht Zulauf Filtration bzw. Ablauf Nachklä rung  
<sup>3)</sup> die mittlere Elimination wurde aus n=6 Einzeleliminationen berechnet

#### Gesamtelimination inklusive Adsorption

Die Darstellung der Gesamtelimination inklusive der Adsorptionsstufe gibt damit einen Überblick, wie groß der Einfluss der 4. Reinigungsstufe in Bezug zum Zulauf der Kläranlage ist. In Tabelle 3.5 sind hierzu zunächst die mittleren gemessenen Konzentrationen für den Zu- und Ablauf der biologischen Stufe und die Abläufe der untersuchten Filter dargestellt.

Die kumulierten Anteile der Verfahrensbereiche Vorklämung, Biologie, Filtration und Adsorption an der Gesamtelimination der Spurenstoffe sind in Bild 3.14 in Bezug auf den Zulauf der biologischen Stufe dargestellt.

**Tabelle 3.5: Mittelwert der gemessenen Konzentrationen an verschiedenen Messstellen entlang des Wasserweges in der Kläranlage und den Abläufen der Versuchsfilter**

Mittelwert (n=6, 72h MP)	Einheit	Zulauf BB	Ablauf NK	Ablauf Ref-Filter	Ablauf PAK-Filter <sup>1)</sup>	Ablauf GAK Filter <sup>2)</sup>	Ablauf nGAK-Filter <sup>2)</sup>
		C <sub>BB,zu</sub>	C <sub>FF,zu</sub>	C <sub>FF,ab</sub>	C <sub>PAK,ab</sub>	C <sub>GAK,ab</sub>	C <sub>nGAK,ab</sub>
Ciprofloxacin	ng/l	2.866,7	1.118,3	766,7	179,7	123,7	115,7
Clarithomycin	ng/l	233,3	243,3	240,0	94,7	89,2	89,3
Erythromycin	ng/l	233,3	135,7	136,2	58,8	50,0	60,8
Carbamazepin	ng/l	396,7	413,3	456,7	163,2	62,7	59,5
Diclofenac	ng/l	2.783,3	2.566,7	2.816,7	875,0	811,7	613,3
Metoprolol	ng/l	1.616,7	1.661,7	1.418,3	405,0	123,3	141,3
TCPP	ng/l	1.400	1.600	1.800	600	500	600
SMX + N4-SMX	ng/l	1.285,0	459,2	424,7	261,5	215,2	168,5
BTA + Methyl-BTA	ng/l	23.900	16.500	16.600	460	100	130

<sup>1)</sup> Ablauf PAK-Filter entspricht dem Mittelwert für beide PAK-Sorten mit jeweils 3 Messwerten

<sup>2)</sup> Die Konzentrationen im Filtrat des GAK und nGAK-Filters sind als Mittel für verschiedene Filterzustände (Bettvoluminat) berechnet.; im Mittel: GAK-Filter: 10.384 BV ; nGAK-Filter: 11.824 BV

Eliminatio, Bezug Zulauf biologische Stufe



**Bild 3.14: Elimination der Spurenstoffe in Bezug auf den Zulauf zur biologischen Stufe**

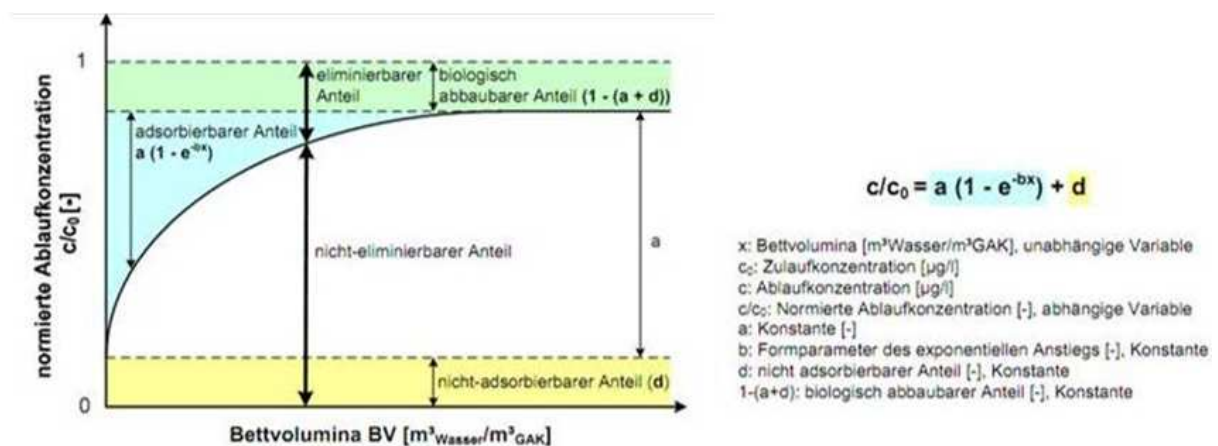
### 3.4.5 Ausgleichsfunktion als Mittelwert der Elimination für die GAK-Filter

#### Mittelwertbildung bei GAK-Filtern

Die Kontaktzeit im Filter und die Ausgangskonzentration der gelösten Spurenstoffe beeinflussen die Adsorptionsleistung der Aktivkohle. Diese Schwankungen können bei der Pulveraktivkohle durch einfaches Mitteln mehrerer Messwerte ausgeglichen werden. Für die GAK-Filter ist diese Mittelwertbildung allerdings nur eingeschränkt möglich, da zu jedem Messwert in Abhängigkeit der bis dahin behandelten Wassermenge (Bettvolumina) eine andere Beladung der Aktivkohle und damit eine andere – abnehmende - Reinigungsleistung gehört.

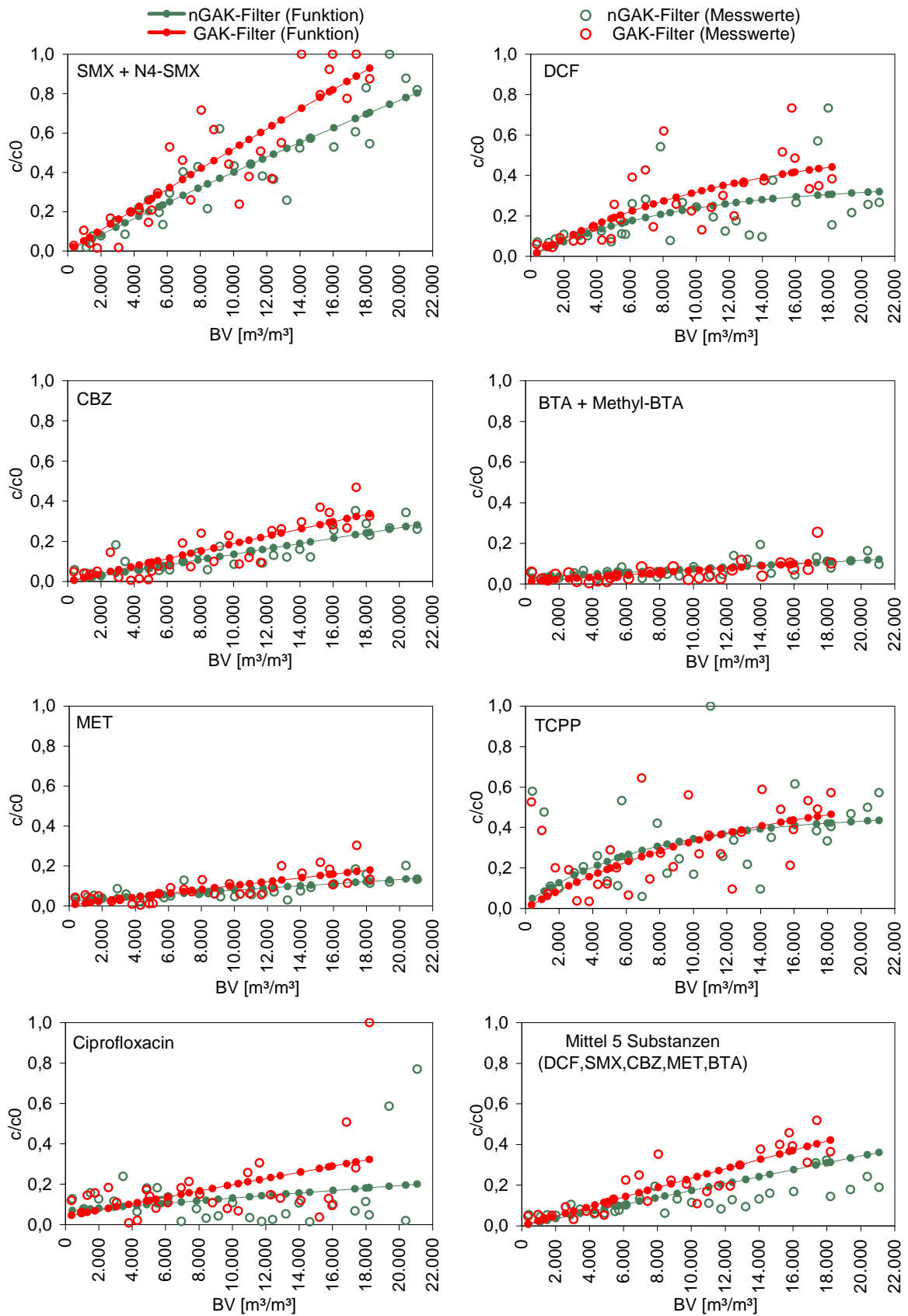
#### Ausgleichsfunktion als Mittelwert für einen Einzelfilter

Um die Elimination bzw. die stoffspezifischen Durchbruchskurve der GAK-Filter auch für einen Einzelfilter als Mittelwert darzustellen, wurde auf eine nichtlineare Ausgleichsfunktion in Abhängigkeit der Filterlaufzeit zurückgegriffen. Die hierfür gewählte Exponentialfunktion wurde bereits von Carlson et al. (1994) entwickelt und ist zuletzt bei Benstöm et al. (2014) verwendet worden. Das nachfolgende Bild zeigt den prinzipiellen Verlauf der Funktion.



**Bild 3.15: Ausgleichsfunktion zur Beschreibung der Durchbruchskurve eines GAK-Filters (entnommen aus Benstöm et al., 2014)**

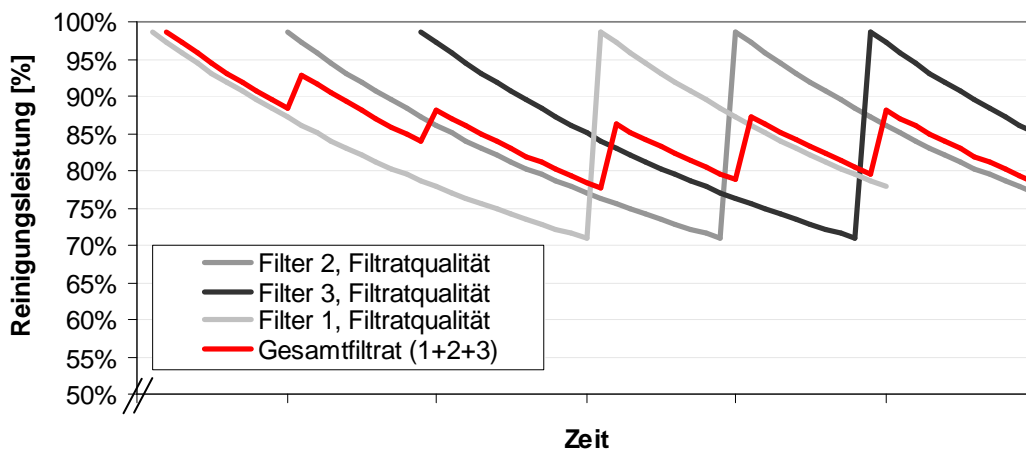
Die Ergebnisse der auf diese Weise ermittelten Ausgleichsfunktionen sind in Bild 3.16 für alle Stoffe dargestellt. Die Verläufe der Ausgleichsfunktion zeigen sehr anschaulich welche Stoffe gut und welche schlecht adsorbierbar sind. So verläuft die Funktion für die gut adsorbierbaren Substanzen (CBZ, MTP und BTZ) sehr flach, wohingegen die Funktion für SMX, einen nicht so gut adsorbierbaren Stoff, eher steil verläuft. Statt der erwarteten exponentiellen Entwicklung zeigen die Ausgleichsfunktionen dabei bis auf diejenigen von Diclofenac und TCPD einen linearen Verlauf. Ähnliches wurde auch durch Benstöm et al. (2014) festgestellt.



**Bild 3.16:** Ausgleichsfunktionen der normierten Ablaufkonzentration verschiedener Referenzparameter für den GAK und nGAK-Filter im Vergleich

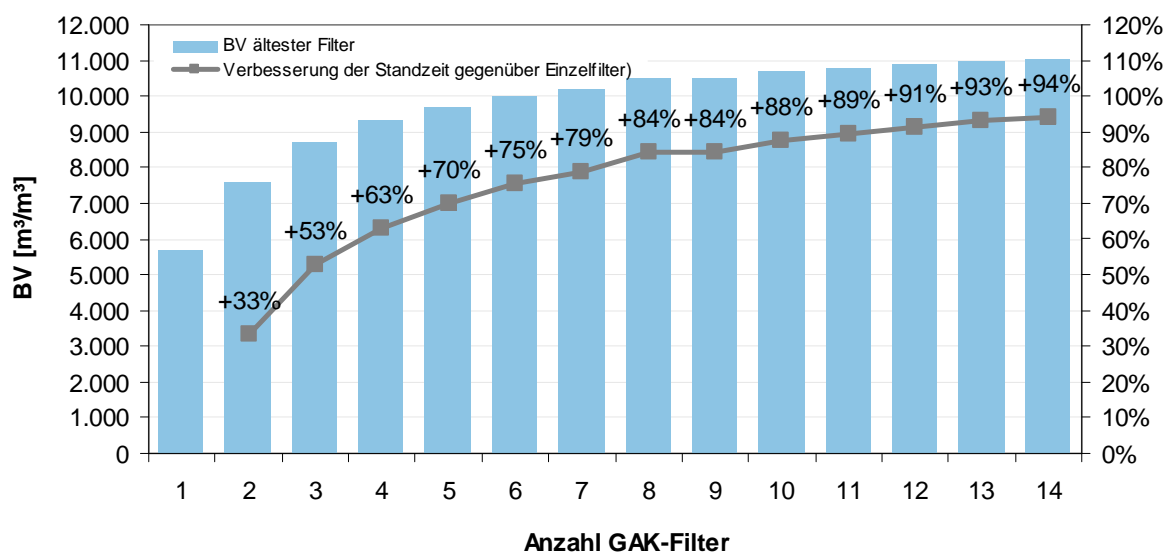
### 3.4.6 Parallelschaltung mehrerer GAK-Filter

Bei einem Betrieb mehrerer Filterzellen bestimmt nicht das Filtrat des Einzelfilters, sondern das Sammelfiltrat der gesamten Filtrationseinheit die Reinigungsleistung der Adsorptionsstufe. Werden die Filterzellen zeitlich gestaffelt betrieben, kann die Ausnutzung der praktisch verfügbaren Adsorptionskapazität deutlich verbessert werden. Das nachfolgende Bild 3.17 zeigt drei versetzte Durchbruchkurven. Das überlagerte Gesamtfiltrat der drei Filter (rote Linie) hat eine deutlich bessere Qualität. Somit könnten die Einzelfilter länger betrieben werden, ohne dass das Gesamtfiltrat den beispielhaften Zielwert von 80% unterschreitet.



**Bild 3.17: Prinzipbild zum Verhalten mehrerer Filter, die versetzt erneuert werden**

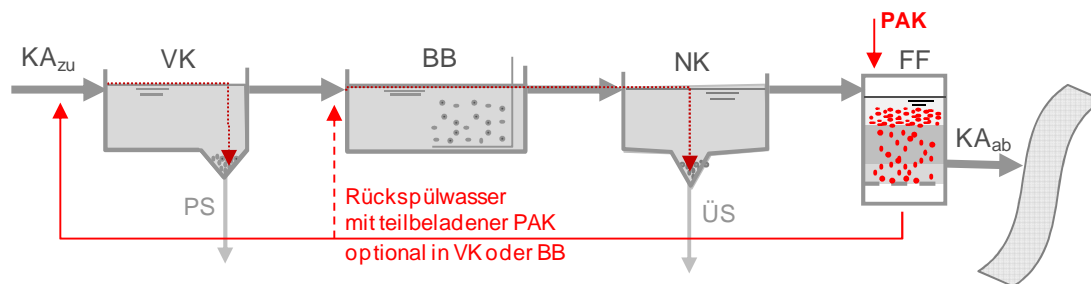
Durch Überlagerung der nichtlinearen DCF-Ausgleichsfunktionen konnte zudem festgestellt werden, dass die Anzahl der Filter einen Einfluss auf den Effekt der Parallelschaltung hat. Während sich bei 4 Filtern die Standzeit bei festgelegtem Ablaufkriterium (hier 80 % Reinigungsleistung für Diclofenac) um 63 % verlängert, ist es bei 8 Filtern nur eine Verbesserung gegenüber einem Einzelfilter um 84 % (Bild 3.18).



**Bild 3.18: Einfluss der Filteranzahl auf den Effekt einer Parallelschaltung**

### 3.4.7 Zusätzliche Entnahme von Spurenstoffen durch rückgeführte PAK

Die Filterrückspülung findet in Buchenhofen bei Trockenwetter einmal täglich. Das Spülwasser-PAK-Gemisch fließt in das gemeinsame Spülwasserbecken aller Filtereinheiten (Bild 3.19). Die Entleerung der Spülwasserkammer erfolgt vor die Rechenanlage. Die PAK durchfließt mit den übrigen Suspensa aus dem Zulauf und den Prozessströmen die weiteren Verfahrensstufen Vorklärung, biologische Reinigung und Nachklärung.



**Bild 3.19: Rückführwege der Pulverkohle**

Auf Grund der geringen PAK-Menge, bezogen auf den Gesamtzulauf ist es nicht möglich, den genauen Verbleib der zurückgeführten Kohle messtechnisch zu ermitteln. Es ist zu vermuten, dass die PAK zum Teil am Rechengut anhaftet und hierüber ausgeschleust wird, die restliche PAK über den Primärschlamm aus der Vorklärung und über den Überschussschlamm aus der Nachklärung in den Faulbehälter gelangt und in der Schlammverbrennungsanlage verbrannt wird.

Die im Überstand der Filterkammer eingesetzte PAK wird während der Filterstandzeit nur teilweise adsorptiv „beladen“. Durch die Filterspülungen gelangt die so teilbeladene PAK mit dem Rückspülwasser in die vorgelagerten Reinigungsstufen. Dort kommt es zu einer weiteren Beladung. Zudem kann unter der Randbedingung der höheren Konzentrationen im Kläranlagenzulauf eine höhere Adsorption erreicht werden.

Durch die Abbildung der Kläranlage in einem Simulationsmodell ist es möglich die Anlage „virtuell“ mit einer Adsorptionsstufe auszustatten und die Auswirkungen auf die in den Modellgleichungen berücksichtigten biologischen Prozesse zu untersuchen. Als Modellgrundlage wurde das Belebtschlammmodell ASM3 verwendet, welches um die Prozesse der Adsorption und Desorption ausgewählter Spurenstoffe an der Pulveraktivkohle erweitert wurde (ASM3\_pac übernommen aus Grünebaum et al., 2011, (Nikulin, 2014).

Mit der dynamischen Simulation konnte das Restadsorptionspotential in der Belebungsstufe ermittelt werden. Durch eine bessere Ausnutzung der teilbeladenen Aktivkohle aus der Filtrationsstufe ergibt sich eine höhere Gesamtelimination. Die Diclofenac-Gesamtelimination steigt im Simulationsmodell von 84 % auf 97% durch die Rückführung.



## 4 Wirtschaftlichkeit am Beispiel der KA Buchenhofen

### 4.1 Auslegungsszenarien der Reinigungsleistung

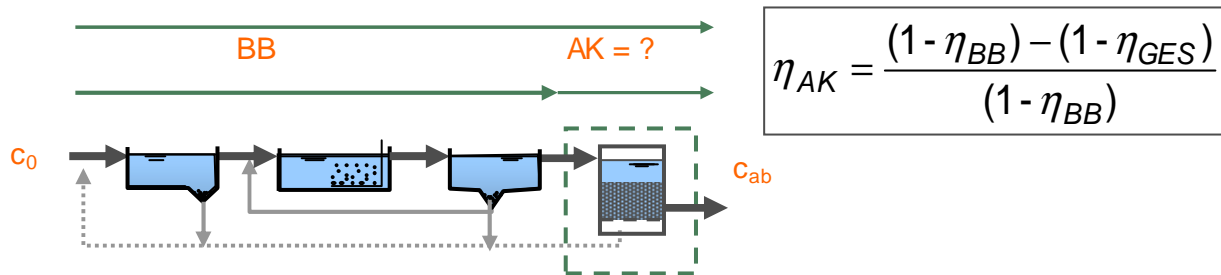
Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die Reinigungsleistung der untersuchten Verfahrensansätze sehr stoffspezifisch ist und daneben insbesondere von der Standzeit der GAK-Filter bzw. der PAK-Dosiermenge abhängt.

Je nach angestrebtem Reinigungsziel kann bei einem PAK-Verfahren die Dosiermenge angepasst werden. Bei GAK-Verfahren müssen Kriterien festgelegt werden, bei deren Erreichung der Austausch des Filtermaterials erfolgt. In Tabelle 4.1 sind unterschiedliche Abbruchkriterien für den GAK-Filter gegenübergestellt. Neben einer Betrachtung von Einzelsubstanzen wird der Mittelwert aus 5 Indikatorsubstanzen und die Gesamtreinigungsleistung der Kläranlage als Kriterium herangezogen. Es zeigt sich, dass das gewählte Kriterium einen großen Einfluss auf die Standzeit des GAK-Filters hat. Sofern nur Sulfamethoxazol herangezogen wird, liegen die Bettvolumina bei 3.800, während eine 80%ige Elimination von Benzotriazol nach den vorliegenden Ergebnissen erst bei 100.000 BV unterschritten wird.

**Tabelle 4.1: Einfluss unterschiedlicher Abbruchkriterien auf die Bettvolumina bis zum Austausch des Filtermaterials (hier GAK-Filter)**

SZ	Kriterium	Substanz	Berechnung mit Ausgleichsfunktion		
			Einzelfilter	14 Filter parallel	$f_{parallel}$ Erhöhungsfaktor Parallelbetrieb
1	Elimination 80% Einzelsubstanz	DCF	5.700	10.605	186%
		SMX + N4-SMX	3.800	7.200	189%
		CBZ	10.029	20.000	199%
		MET	20.500	39.000	190%
		BTA + Methyl-BTA	53.000	101.000	191%
		Ciprofloxacin (Cipro)	10.000	20.000	200%
		TCPP	5.000	10.000	200%
2	Elimination 80% Mittelwert aus 5 Stoffen	Mittelwert (DCF,SMX,CBZ, MET,Cipro)	8.500	16.000	188%
3	Gesamt- wirkungsgang Kläranlage 80%	$\eta_{GES} = \eta_{BB} + \eta_{AK}$ (Beispiel: DCF)	7.907	14.711	186%

Unter Berücksichtigung der ermittelten Abbauleistung der konventionellen mechanisch-biologischen Reinigungsstufe, entfällt bei gegebenem Zielwert für den Gesamtwirkungsgrad der Kläranlage ein verringerter zu eliminierender Anteil auf die Adsorptionsstufe. Wenn die Elimination auf den Zulauf der Kläranlage bezogen wird, kann die prozentuale Elimination der 4. Reinigungsstufe gemäß folgendem Schema angepasst werden.



**Bild 4.1:** Schema zur Ermittlung der notwendigen Reinigungsleistung der Adsorptionsstufe bei gegebener Abbauleistung in der Biologie und gewünschtem Gesamtwirkungsgrad der Kläranlage

Durch die Berücksichtigung des biologischen Abbaus bzw. der Adsorption an den Schlamm ergeben sich in Abhängigkeit der Zielwerte für die Gesamtreinigungsleistung geminderte Anforderungen für die 4. Reinigungsstufe. In der nachfolgenden Tabelle 4.2 ist die notwendige Elimination durch die Aktivkohlestufe dargestellt.

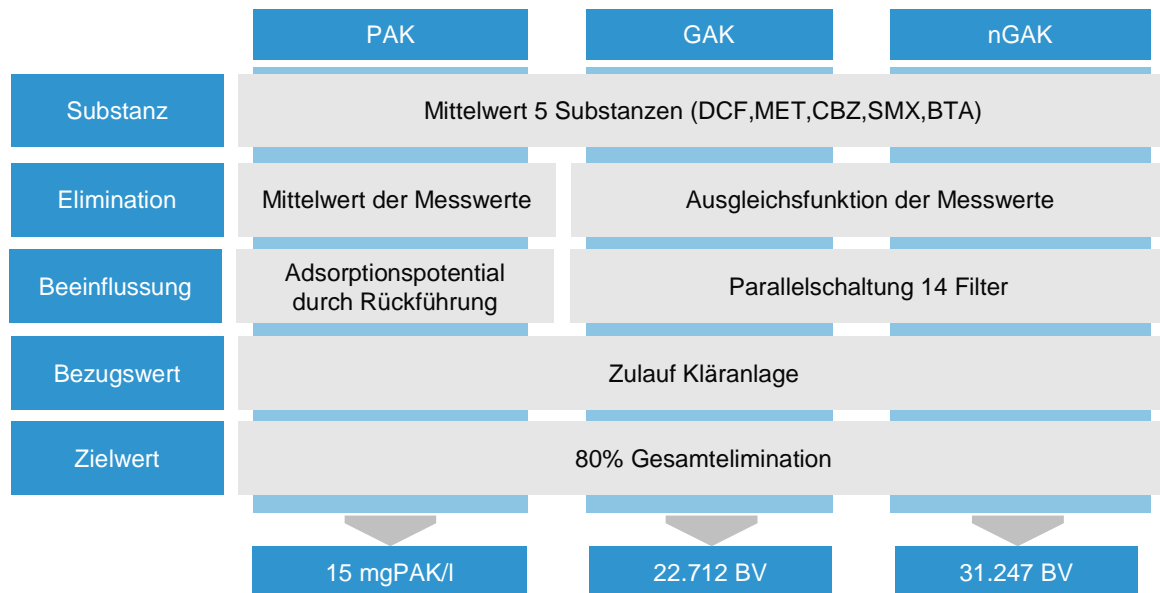
**Tabelle 4.2:** Notwendige Reinigungsleistung der Adsorptionsstufe in Abhängigkeit des gewünschten Gesamtwirkungsgrades

Substanz	$\eta_{BB}$	$\eta_{GES}$ Sollwert für Gesamtelimination				
	Abbau Biologie*	90%	85%	80%	75%	70%
DCF	26%	86%	80%	73%	66%	59%
SMX + N4-SMX	65%	71%	57%	43%	29%	14%
CBZ	8%	89%	84%	78%	73%	67%
MET	1%	90%	85%	80%	75%	70%
BTA + Methyl-BTA	43%	82%	74%	65%	56%	47%
Ciprofloxacin (Cipro)	66%	71%	56%	41%	26%	12%
TCPP	36%	84%	77%	69%	61%	53%
Mittel (DCF, SMX, CBZ, MET, BTA)	29%	86%	79%	72%	65%	58%

\* Mittelwert aus (n=6) 72h Mischproben

## 4.2 Grundvariante für den Verfahrensvergleich

Die Elimination der Spurenstoffe hängt neben der Standzeit der GAK-Filter oder der PAK-Dosiermenge von der betrachteten Substanz und dem Bezugswert ab. Um bei der Vielzahl von möglichen Kombinationen eine Bewertung zu ermöglichen, wird nachfolgend eine Grundvariante gewählt, anhand derer die Kosten der Verfahren detailliert verglichen werden.



**Bild 4.2:** Schema zur Darstellung der gewählten Grundvarianten

**Mittelwert der Indikatorsubstanzen:** Als Eliminationsleistung wird das Mittel der Elimination von 5 Leitsubstanzen definiert: Sulfamethoxazol + Metabolit, Diclofenac, Metoprolol, Benzotriazolole (Summe) und Carbamazepin

**GAK-Parallelbetrieb:** Das Filtermaterial der mit granulierter Aktivkohle betriebenen Filter wird zeitlich sequenziell und nicht parallel ausgetauscht. Beim Betrieb von 14 Filtern ergibt sich daraus eine gegenüber dem parallelen Austausch verlängerte Filterstandzeit von 87 %.

**PAK-Gesamtelimination:** Für die Eliminationsleistung der PAK-Anlage wird die Elimination im Filter und die der in die biologische Stufe zurückgeführten Aktivkohle berücksichtigt.

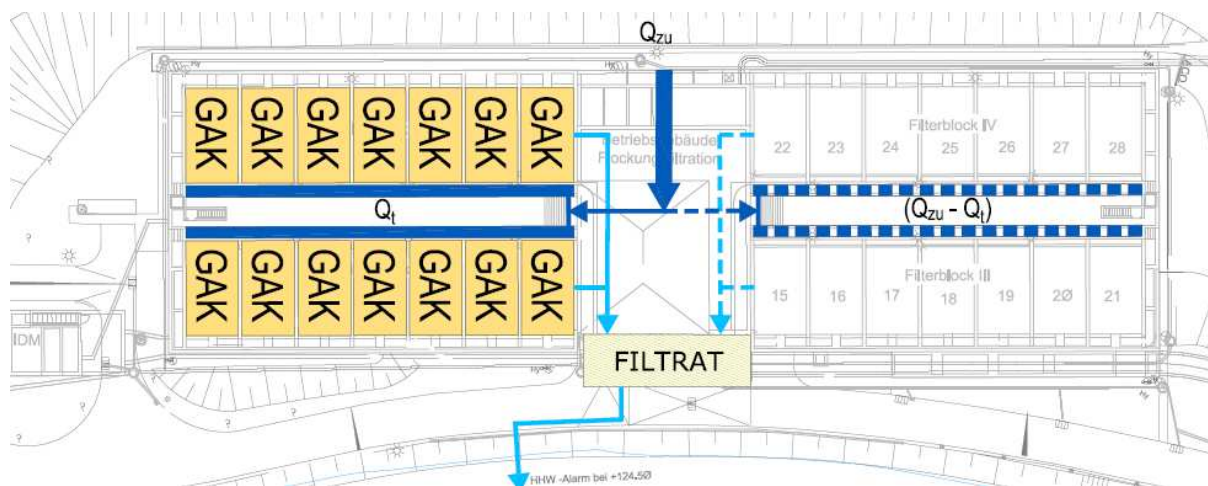
**Zielwert Reinigungsleistung:** Als Abbruchkriterium wird die Ausgleichsfunktion aus den Versuchsreihen zugrunde gelegt. Unterschreitet die Funktion die Eliminationsleistung von 80 % in Bezug auf die Gesamtanlage, so ist das Ende der Filterstandzeit erreicht.

Mit den genannten Ansätzen ergeben sich folgende Standzeiten/Bettvolumina bzw. Dosieraten als Eingangswerte für die Berechnung der Verbrauchsmittelkosten (Bild 4.2):

- GAK-Filter: 12,2 Monate / 22.712 BV
- nGAK-Filter: 16,6 Monate / 31.247 BV
- PAK-Filter: 15 mg/l

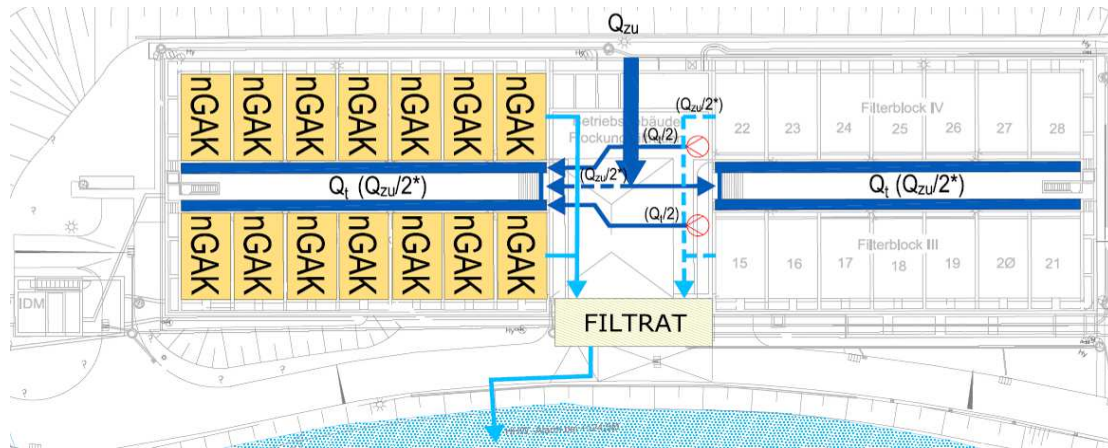
### 4.3 Ausbaukonzepte

Die Flockungsfiltration der Kläranlage Buchenhofen besteht aus vier Blöcken mit jeweils 7 Filtern. Bei allen Ausbaukonzepten wird die bestehende Bau- und Anlagentechnik erhalten. Sowohl das in Bild 4.3 dargestellte Konzept der GAK-Filtration als auch der in Bild Bild 4.4 dargestellte Ausbau als nGAK-Filtration sehen dabei die Befüllung der Filterkammern jeweils zweier Filterblöcke mit GAK vor. Bei einer Filterfläche einer Kammer von 60 m<sup>2</sup> ergibt sich damit eine gesamte Filterfläche von 840 m<sup>2</sup>. Das GAK-Volumen beträgt bei einer Betthöhe von 2 m insgesamt 1.680 m<sup>3</sup>. Bei einem maximalen Volumenstrom von  $Q^t = 1.200 \text{ l/s}$  ergeben sich eine Filtergeschwindigkeit von 5 m/h und eine Kontaktzeit von 23 min. Die Beschickung der GAK-Filter erfolgt über bestehende Pumpen. Es wird davon ausgegangen, dass bei Trockenwetter ( $Q_t$ ) ausschließlich die beiden Filterblöcke, die mit granulierter Aktivkohle befüllt sind, betrieben und beschickt werden. Bei höheren Zuflüssen werden die konventionellen Filter zur Entlastung des GAK-Blocks parallel dazugeschaltet. Das bedeutet, dass die Filterstufe bei Trockenwetter um die Hälfte reduziert wird. Statt der derzeit betriebenen 28 Filterkammern werden nur noch 14 betrieben.



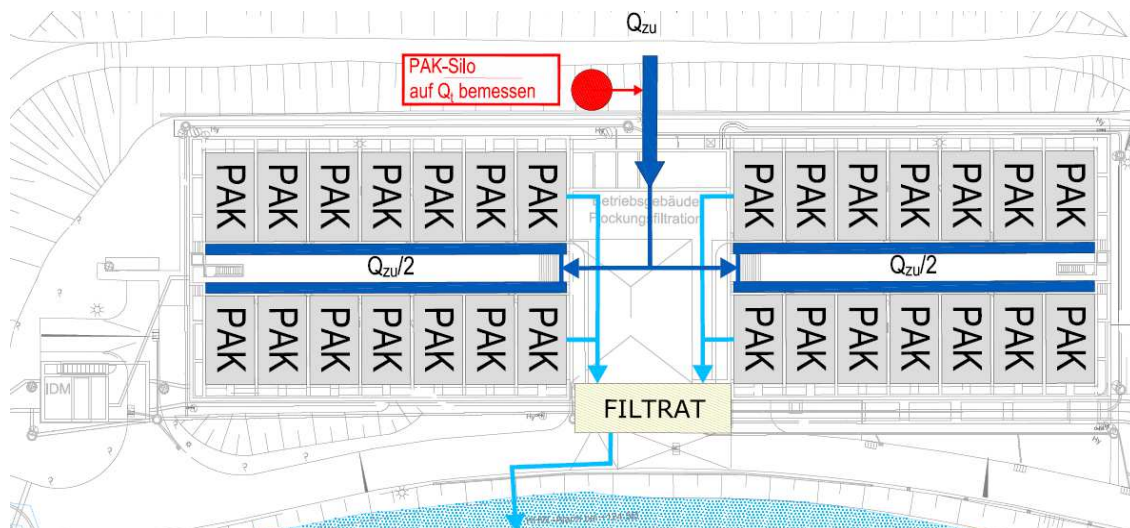
**Bild 4.3: Ausbaukonzept GAK-Filter**

Die Beschickung der nGAK-Filter erfolgt in der Verfahrensalternative über ein neu zu errichtendes Pumpwerk. Dieses fördert den Ablauf der konventionellen Filter in die bestehende Zulaufverteilung der mit granulierter Aktivkohle befüllten Filterzellen. Für die nGAK-Anlage wird ein neuer Spülwasser-/Filtratspeicher mit einem Nutzvolumen von 220 m<sup>3</sup> gebaut. Um die konventionelle Filterstufe bei maximalem Zufluss nicht zu überlasten, ist auch die Möglichkeit der direkten Beschickung der nGAK-Filter mit einem Teilstrom des Ablaufwassers der Nachklärung vorgesehen.



**Bild 4.4: Ausbaukonzept nGAK-Filter**

Die Dosierung der Pulverkohle bei der dritten Verfahrensvariante erfolgt in den Zulauf der Filtrationsstufe. Hierzu wird ein PAK-Silo mit Dosiertechnik und Wägeeinrichtung installiert. Bei diesem Ausbaukonzept werden alle bestehenden Filter als PAK-Filter betrieben. Zusätzlich zur Aktivkohledosierung wird ein Fällmittel-Lager und –Dosierstation installiert.



**Bild 4.5: Ausbaukonzept PAK-Filter**

**Tabelle 4.3: Kenndaten der Ausbaukonzepte**

	GAK	nGAK	PAK
Anzahl Kohlefilter	14	14	28
Filterfläche insgesamt	840 m <sup>2</sup>	840 m <sup>2</sup>	1.680 m <sup>2</sup>
Überstauhöhe (genutzt für PAK)			2,5 m
Max. Filtergeschwindigkeit (TW)	5,1 m/h	5,1 m/h	2,6 m/h
Min. Kontaktzeit	23 min	23 min	-

## 4.4 Kosten

### Investitionskosten

Bei den Investitionskosten ist zu berücksichtigen, dass bei allen Varianten die bestehende Filtrationsanlage weiter genutzt wird und die Umbaumaßnahmen im Bestand bei laufendem Filterbetrieb erfolgen müssen.

Die drei Verfahrensvarianten unterscheiden sich ansonsten hinsichtlich der notwendigen Investitionen deutlich voneinander. Während bei einer GAK-Anlage ein Umbau der Filtration entfallen kann, sind bei der Realisierung einer nGAK-Anlage Investitionen in ein Pumpwerk inkl. zugehöriger Rohrleitungsanbindungen und Steuerung notwendig.

Die Brutto-Investitionskosten für den Umbau der Filteranlage zu einer nGAK-Anlage liegen mit ca. 1,7 Mio. € über den Investitionen von 1,4 Mio. € für eine PAK-Anlage. Für den Betrieb der Filteranlage als direkt beschickte GAK-Anlage fallen keine Investitionskosten an. Gleichzeitig ergeben sich hieraus auch betriebliche Vorteile, da ein Umbau im laufenden Filtrationsbetrieb auch Auswirkungen auf den Personalbedarf der Kläranlage hat.

### Jahreskosten

Die Jahreskosten werden bei allen Varianten von den Verbrauchsmittelkosten geprägt. Die restlichen Kosten sind insbesondere bei der nGAK-Filtration und bei der PAK-Anlage von untergeordneter Bedeutung. Eine Übersicht über Verbrauchsmittel-, Jahres- und spezifische Kosten zeigt Tabelle 4.4.

**Tabelle 4.4: Übersicht Verbrauchsmittel und Jahreskosten**

	<b>GAK</b>	<b>nGAK</b>	<b>PAK</b>
Verbrauchsmittelkosten (netto)	0,67 Mio. €/a	0,49 Mio. €/a	1,19 Mio. €/a
Jahreskosten (brutto)	0,92 Mio. €/a	0,90 Mio. €/a	1,67 Mio. €/a
<b>Spezifische Kosten</b>	<b>0,024 €/m<sup>3</sup></b>	<b>0,024 €/m<sup>3</sup></b>	<b>0,044 €/m<sup>3</sup></b>

Aufgrund der Dominanz der Verbrauchsmittelkosten bei den Jahreskosten sind die Auswirkungen, die Schwankungen der Aktivkohlekosten nach sich ziehen, groß. Neben Preisänderungen der Aktivkohle wurden Änderungen des Kohleverbrauches bei den GAK-Filtern und bei der PAK-Anlage untersucht. Bei allen Untersuchungen ergaben sich Kostenvorteile für den Betrieb der Varianten mit granulierter Aktivkohle. Die spezifischen Kosten für den Betrieb einer GAK-Anlage in Buchenhofen liegen gemäß der Berechnungen bei 0,024 €/m<sup>3</sup>.

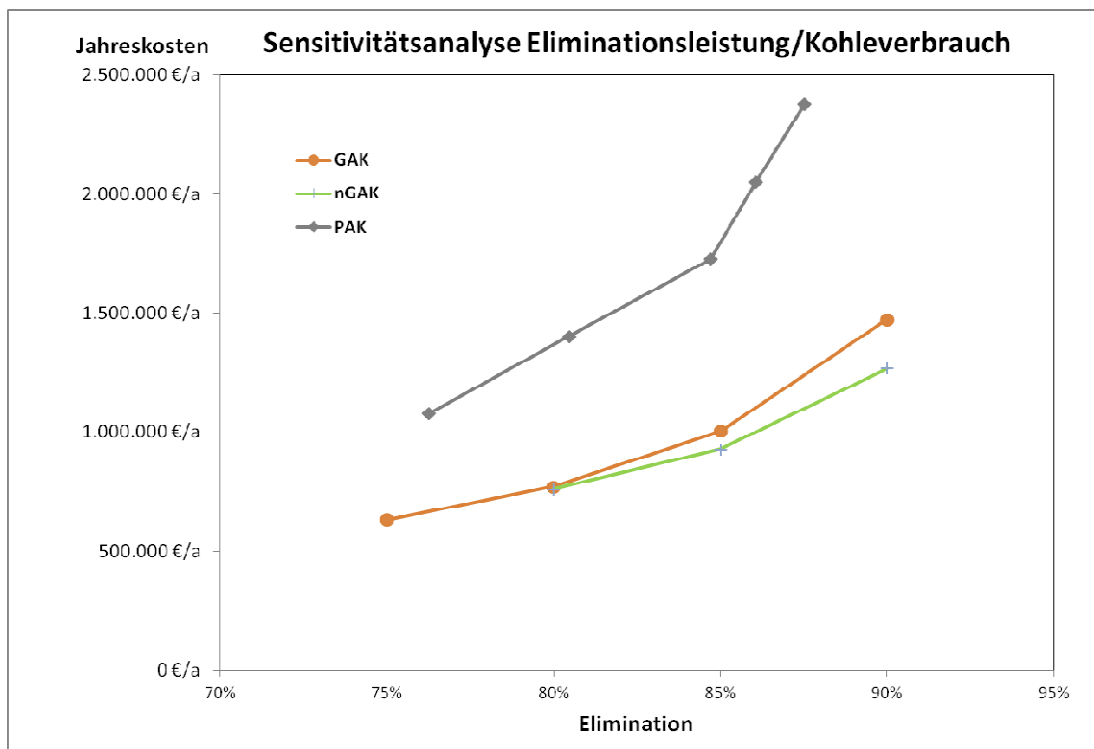
### Einfluss der Aktivkohlekosten und Energiepreise auf die Kosten

Aufgrund des geringen Anteiles der Energiekosten an den Betriebskosten wirken sich Strompreisschwankungen nur in geringem Umfang auf die Betriebskosten aus. Bei einem Anstieg des Strompreises von derzeit 16 ct/kWh (netto) auf 24 ct/kWh wird jedoch eine GAK-Filtration wirtschaftlicher als die nachgeschalteten nGAK-Filter.

Alle Varianten sind dagegen gleichermaßen von dem Kohlebezugspreis abhängig. Der Netto-Preis für granuliert Aktivkohle betrug bei der Beschaffung für den Versuchsbetrieb 1,00 €/kg und für Pulverkohle 1,45 €/kg. Aufgrund von Preisschwankungen können die bei einem Betrieb der Anlage zukünftig anfallenden Kohlekosten hiervon abweichen. Da der nGAK-Filter eine längere Standzeit ermöglicht, wirken sich die Kostensteigerungen nicht so stark aus. Bei 50 % höheren Kohlekosten kommt es daher zu Vorteilen einer nGAK- Anlage gegenüber der GAK-Anlage.

### Einfluss der erreichbaren Eliminationsleistung auf die Kosten

Der Bedarf an Kohle ergibt sich bei den GAK-Filtern durch die Standzeit bzw. die Bettvolumina bis zum Unterschreiten der vorgegebenen Eliminationsleistung. Bei der Pulveraktivkohle bestimmt die eingestellte Dosierrate die benötigte jährliche Kohlemenge und gleichzeitig die erreichbare Elimination. In nachfolgender Grafik ist die Abhängigkeit der Jahreskosten von der Eliminationsleistung dargestellt. Die Grafik verdeutlicht, dass der Betrieb einer PAK-Anlage mit einer Eliminationsleistung von 80 % zu ähnlich hohen Jahreskosten führt, wie der Betrieb einer nGAK-Anlage mit einer Elimination von 90 %.



**Bild 4.6: Jahreskosten in Abhängigkeit der Eliminationsleistung**

### Einfluss der Kläranlagengröße auf die Kosten

Die Gegenüberstellung der Kosten verschiedener Kläranlagengrößen zur Integration einer Spurenstoffelimination nach den beschriebenen Verfahren zeigt, dass der Einsatz direkt beschickter GAK-Anlagen insbesondere bei kleineren Anlagengrößen Vorteile bieten kann. Bei größeren Anlagen nähern sich die Kosten von GAK- und PAK-Anlagen an. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die gewählten Ansätze auf die in Buchenhofen gewonnenen Versuchsergebnisse beziehen und bei anderer Abwasserzusammensetzung abweichen können.

**Tabelle 4.5: Investitionen und Jahreskosten in Abhängigkeit der Anlagengröße**

	Ausbaugröße [EW]	Filteranzahl GAK-Filter	Dosierate [g/m <sup>3</sup> ] bzw. Bettvolumina (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Investkosten Filtration [€]	spez. Gesamtkosten [€/m <sup>3</sup> ]
PAK	10.000	4	15 g/m <sup>3</sup>	360.000	0,097
	50.000	6	15 g/m <sup>3</sup>	950.000	0,063
	200.000	12	15 g/m <sup>3</sup>	1.080.000	0,042
GAK	10.000	4	13.685 BV	0	0,039
	50.000	6	14.670 BV	0	0,037
	200.000	12	15.807 BV	0	0,035
nGAK	10.000	4 + 4 neu <sup>1)</sup>	18.526 BV	1.100.000	0,199
	50.000	6 + 6 neu <sup>1)</sup>	19.858 BV	1.820.000	0,086
	200.000	12+12 neu <sup>1)</sup>	21.396 BV	4.995.000	0,067
Anmerkung: <sup>1)</sup> Entgegen der Umsetzung für Buchenhofen (600.000 EW) wird hier davon ausgegangen, dass die Anzahl der vorhandenen Filter nicht ausreicht, um bei Trockenwetterzulauf die Hälfte der vorhandenen Filter nachgeschaltet zu betreiben. Stattdessen werden zusätzliche Filter in stahlbetonbauweise gebaut.					

Unter Berücksichtigung der Standzeiten und Investitionen ergeben sich spezifische Jahreskosten je nach Anlagentyp und Ausbaugröße zwischen 0,035 und 0,20 €/m<sup>3</sup>. Die geringsten Jahreskosten weist dabei die GAK-Anlage bei Ausbaugrößen von 200.000 EW auf. Auch bei kleinen GAK-Anlagen ergeben sich Jahreskosten in ähnlicher Größenordnung. Die Abweichung resultiert bei den oben beschriebenen Ansätzen einzig aus der höheren Aktivkohleausnutzung beim Betrieb einer größeren Anzahl von Filtern.



## 5 Übertragbarkeit und Planungshinweise

### 5.1 Planungshinweise zur technischen Umsetzung

Wesentlich für die Planung und den Betrieb einer Anlage zur Spurenstoffelimination mittels Aktivkohle ist eine ausreichend dimensionierte und zuverlässig arbeitende biologische Reinigungsstufe. Insbesondere der Funktionstüchtigkeit der Nachklärung ist dabei eine entscheidende Bedeutung beizumessen. So führen hohe Konzentrationen an abfiltrierbaren Stoffen (AFS > 10 mg/l) zu verkürzten Filterstandzeiten und häufiger Filterspülung. Bei Anlagen, auf denen häufiger Flockenabtrieb zu beobachten ist, sollten daher Untersuchungen zur Optimierung der Nachklärung durchgeführt werden. Mittels geeigneter Messverfahren (z.B. Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten und Schlammspiegel) sowie numerischer Strömungssimulationen (CFD) können Optimierungspotentiale an bestehenden Absetzbecken aufgedeckt werden. In einigen Fällen kann auch der Neubau von Sedimentationseinrichtungen notwendig sein. Neben den Regelungen des ATV-Arbeitsblattes A 203 zur Filtration (ATV-DVWK, 1995) und den in der „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe NRW gegebenen Empfehlungen (Kom-M.NRW, 2015) sind speziell für die Umsetzung der betrachteten Ausbauvarianten nachfolgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Die **beengten Platzverhältnisse** auf/in bestehenden Anlagen können den Bau von größeren Anlagenteilen nicht oder nur unter hohem Aufwand zulassen.
- Die **Spülwasservorlage** sollte ausreichend groß bemessen werden.
- Bei der Planung einer GAK-Anlage ergeben sich Vorteile bei der Wahl einer möglichst hohen **Filteranzahl**.
- Die zweistufige nGAK-Filtration erfordert ein zusätzliches **Hebwerk** zur Beschickung der umgerüsteten Filterkammern.
- Bei einer PAK-Anlage sollte eine gute **Wäge- und Dosiertechnik** gewählt werden.

## 5.2 Übertragbarkeit auf andere Anlagen in NRW

Flockungsfiltrationen sind häufig bei Kläranlagen anzutreffen, bei denen aufgrund eines empfindlichen Gewässers erhöhte Anforderungen an die Phosphorelimination gestellt werden. Insgesamt existieren in Deutschland 348 Filteranlagen mit einer Ausbaugröße von 28.014.000 EW (Statistisches Bundesamt, 2009). Davon werden in Nordrhein Westfalen 100 Anlagen mit einer Ausbaugröße von 13.557.645 EW überwiegend in den Größenklassen 4 und 5 betrieben (LANUV-NRW, 2012). Bei einer Gesamtausbaugröße von 35.273.000 EW entspricht dies einem Anteil von 38 % der Einwohnerwerte in NRW, die über Filteranlagen gereinigt werden. Mit einer Ertüchtigung der Filteranlagen zur Elimination organischer Spurenstoffe durch den Einsatz von Aktivkohle würde somit ein hoher Anteil der vorhandenen Ausbaugröße erfasst. Unter der Annahme, dass erhöhte Anforderungen an die Phosphor-Elimination auch mit einer erhöhten Belastung der jeweiligen Vorfluter verbunden sind, würde eine Umrüstung der bestehenden Filteranlagen eine deutliche Verbesserung der Belastungssituation bei diesen Gewässern ermöglichen. Gleichzeitig ist zu beachten, dass bezogen auf die Gesamtzahl der in NRW betriebenen Kläranlagen nur eine vergleichsweise geringe Anzahl von Anlagen betroffen wäre. Im Hinblick auf die zu tätigen Investitionen ist festzustellen, dass die Umnutzung der vorhandenen Filteranlagen zur Spurenstoffelimination sehr kostengünstig erreicht werden kann.

## 5.3 Planungshinweise zur Aktivkohle-Auswahl

Bei Ausschreibungstexten für GAK empfiehlt es sich benötigte Schüttvolumina zu definieren und als Aufmaß das Filterbettvolumen nach Benetzung und erster Spülung zu vereinbaren.

Die mögliche Korngrößenverteilung der GAK orientiert sich an der Schlitzweite der Filterdüsen, um einen Durchtritt von Feinkohleanteilen während der Filtration oder bei der Rückspülung zu verhindern. In der Regel wird sich die Korngrößenauswahl daher an der Korngrößenverteilung des eingesetzten konventionellen Filtermaterials orientieren. Auf Stützsichten aus Sand oder Kies sollte verzichtet werden, da diese den sortenreinen Ausbau des beladenen Filtermaterials und eine mögliche Reaktivierung erschweren bzw. verhindern.

Bei der Auswahl der Aktivkohle sollten die Leistungsfähigkeit (Gleichgewichtsbeladung), die Bezugskosten (Frischkohle bzw. Reaktivat) und die CSB-spezifischen Eliminationskosten ( $\text{€/kg CSB}_{\text{elim.}}$ ) als Kriterien herangezogen werden. Diese können z.B. auf Basis von Adsorptionsisothermen bezogen auf den Parameter CSB ermittelt werden.

## 6 Zusammenfassung und Gesamtbetrachtung

In dem F&E-Projekt „*FilterAK+*“ wurden über einen Versuchszeitraum von 1,5 Jahren drei verschiedene Verfahrensansätze zur Elimination von Spurenstoffen in einer Flockungsfiltrationsanlage einer kommunalen Kläranlage untersucht.

Erstmals wurde das Potential von drei verschiedenen Verfahrensansätzen hinsichtlich der erreichbaren Spurenstoffelimination sowie der verfahrenstechnischen Umsetzbarkeit parallel im großtechnischen Maßstab untersucht und bewertet. Bei den Verfahren handelt es sich um drei Verfahren mit Aktivkohle. Eine Pulveraktivkohle-Dosierung (PAK) direkt in den Überstau einer Filterkammer, eine einstufige Filtration über granuliert Aktivkohle (GAK) sowie eine zweistufige, nachgeschaltete Filtration über granuliert Aktivkohle (nGAK). Während der Versuchsdauer wurden die Verfahren hinsichtlich ihrer Betriebsstabilität sowie ihrer Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Elimination der Standardabwasserparameter und ihrer Eliminationsleistung in Bezug auf ausgewählte Spurenstoffe bewertet.

Die Auswahl der GAK erfolgte aus 5 Produkten über das Kosten/Nutzen-Verhältnis der jeweiligen Produkte. Bei dieser Auswertung schnitt die Hydriffin AR von Donau Carbon am besten ab und wurde für die Versuche ausgewählt. Für die Vergleichbarkeit zwischen der GAK und PAK-Filtration wurde für die PAK-Dosierung das gleiche Produkt in aufgemahlener Form eingesetzt. Im zweiten Teil der PAK-Versuche wurde das Produkt Carbopal AP, ebenfalls vom Hersteller Donau Carbon, eingesetzt. Die eingesetzte Dosiermenge betrug 20 mg/l.

Alle Verfahren zeigte eine hohe Betriebsstabilität. Lediglich bei der Dosierung der PAK, die mittels Trübungssonden kontrolliert wurde, zeigten sich z.T. Unregelmäßigkeiten, die in technischen Defekten und einem nicht optimalen Dosiersystem begründet liegen. Die Standzeiten der PAK und GAK-Filter zwischen 2 Spülungen lagen ebenso wie die Standzeit der restlichen konventionellen Filter in der Regel bei 24 h. Die nGAK-Filtration wurde nur einmal pro Woche gespült und dieses Intervall konnte über den gesamten Versuchszeitraum beibehalten werden.

Die Eliminationsergebnisse beziehen sich bei den GAK-Filtern auf gemittelte Werte über den gesamten Versuchszeitraum von 18.000 BV für den GAK- und 21.000 BV für den nGAK-Filter. Bei der CSB-Elimination zeigen die Filter nach dieser Laufzeit eine mittlere Elimination von 32 bis 36 % und liegen damit noch deutlich über der des Referenzfilters mit 21 %. Mit der PAK-Dosierung kann eine mittlere CSB-Reduktion von über 40 bis 45 % erreicht werden.

Die PAK-Dosierung kann optimiert werden, wenn das Restadsorptionspotenzial in anderen Anlagenteilen, z.B. durch eine Rückführung genutzt wird. Eine Dosierung von 15 mg/l erscheint ausreichend um ein gewähltes Eliminationsziel von 80 % erreichen zu können. Dies

wurde durch Simulationsstudien ermittelt. Weitere Optimierungsmöglichkeiten, wie eine Intervalldosierung wurden erprobt, aber als technisch nicht machbar verworfen.

Die Spurenstoffelimination über GAK liegt zu Beginn der Versuche für alle Stoffe deutlich über dem Mittelwert der PAK-Elimination. Dies ist auf den Unterschied der frisch eingesetzten Aktivkohle-Masse zurückzuführen, der zu Beginn der GAK-Laufzeit noch sehr hoch ist. Die GAK-Filter zeigen sich hinsichtlich der Spurenstoffelimination auch nach 18 Monaten Betrieb noch nicht erschöpft. So ist die Elimination für etliche Stoffe noch bei 60 % oder darüber. Auch nach langer Standzeit noch sehr gut adsorbierbaren Stoffe sind z.B. Carbamazepin und Diclofenac, jedoch vor allem Metoprolol und Benzotriazol (>80 %). Eine Erschöpfung der GAK ist nach den hier vorgestellten Ergebnissen demnach lediglich für einige Stoffe wie z.B. die Antibiotika Clarithromycin, Erythromycin oder Sulfamethoxazol mit einer Restelimination von meist unter 30% bald erreicht.

Die Definition eines Abbruchkriteriums für die GAK-Filter ist notwendig die Wirtschaftlichkeit der Verfahren miteinander vergleichen zu können. Aus den Eliminationswerten für die einzelnen untersuchten Spurenstoffe wurden Ausgleichsgeraden berechnet. Mit Hilfe dieser Ausgleichsgeraden und einer Überlagerung der Reinigungsleistung mehrerer Filterzellen konnte die mögliche erreichbare Anzahl an Bettvolumina einem gewählten Reinigungskriterium gegenübergestellt werden. Dabei ist die Elimination in der biologischen Stufe ebenfalls zu berücksichtigen. Als Zielwert wurde eine mittlere, 80% ige Elimination von 5 Leitparametern über den gesamten Klärprozess gewählt.

Dieses Ziel wird erreicht, wenn PAK mit 15 mg/l dosiert wird, der GAK-Filter für 22.712 BV und der nGAK-Filter 31.247 BV betrieben wird. Die spezifischen Kosten für dieses Reinigungsziel betragen unter der Annahme der in Buchenhofen gegebenen Randbedingungen und bei einem Ausbau von 14 der 28 Filterzellen für die GAK und nGAK-Variante 0,024 €/m<sup>3</sup>, für die PAK 0,044 €/m<sup>3</sup>.

## Literaturverzeichnis (Langfassung Abschlussbericht)

- ARGE "ENVELO" (2011): Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase 1. Abschlussbericht ENVELO Phase 1. Unter Mitarbeit von H. Riße, S. Gredig-Hoffmann, L. Palmowski, K. Veltmann, D. Mousel, C. Mauer et al. Aachen
- ATV-DVWK-(1995): Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung Rückbelastung aus der Schlammbelastung. Hennef, 1995
- BÄCKER, C.; BECKE, C.; NAHRSTEDT, A. und GIMBEL, R. (2009): Einfluss der Spülung von Tiefenfiltern auf die Erstfiltratqualität. Gewässerschutz - Wasser - Abwasser. 42. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 18.3. - 20.3.2009 in Aachen, Aachen, 2009, Vol. 217, 38/1 - 38/12.
- 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, (MKULNV-NRW),
- BORNEMANN, C. (2012): Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle (MIKROFlock) (2012), Abschlussbericht AZ IV-7-042 600 001E, <http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/abwasser.htm>
- CLEASBY, J.L.; ARBOLEDA, J.; BURNS, D.E.; PRENDIVILLE, P.W.; SAVAGE, E.S. (1977): Backwashing of Granular Filters, Journal AWWA 69 (1977), S 219-237
- EAWAG (2012): Faktenblatt Pulveraktivkohle. Unter Mitarbeit von Marc Boehler Adriano Joss. verfügbar unter [http://www.eawag.ch/medien/publ/fb/doc/fb\\_aktivkohle\\_d.pdf](http://www.eawag.ch/medien/publ/fb/doc/fb_aktivkohle_d.pdf), zuletzt geprüft am 27.02.2013.
- EAWAG, 2010 Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser (Abschlussbericht zum MicroPoll), Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz
- FIGAWA Mitteilung Nr. 8 (1979): Kriterien bei der Spülung von Kornmassenfiltern - Filter zur Wasseraufbereitung nach DIN 19605. bbr, 30 (Dez), 474-476
- FIRK und BARJENBRUCH, (2014): Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen. In: Korrespondenz Abwasser 2014 (61) Nr. 10, S. 861–875.
- FIRK und BARJENBRUCH, (2014): Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen. In: Korrespondenz Abwasser 2014 (61) Nr. 10, S. 861–875.
- GIMBEL, R. und NAHRSTEDT, A. (2004): Grundlagen der Tiefenfiltration. In: DVGW (Hrsg.) Lehr- und Handbuch Wasserversorgung Bd. 6 „Wasseraufbereitung - Grundlagen und Verfahren“
- GÖBEL, A.; THOMSEN, A.; MCARDELL, C. S.; JOSS, A. und GIGER, W. (2005): Occurrence and Sorption Behavior of Sulfonamides, Macrolides and Trimethoprim in Activated Sludge Treatment, Environ. Sci. Technol., vol. 39, no.11, pp. 3981 – 3989
- GRÜNEBAUM, T. (2011): Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren : Schlussbericht Phase 1 "Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen". Essen, 21.09.2011
- HERBST, H.; ANTE, S. (2010): Energiebedarf von Anlagen zur Mikroschadstoffentfernung. Zukunftsthema Energie- Sie Siedunglungswasserwirtschaft ist gefordert. Hg. v. G. z. U. Bochum.
- KAWAMURA, S. (1975): Design and Operation of High-Rate-Filters - part 2. Journal AWWA 67 (1975), S 653-662
- KIENLE, H. v., BÄDER, E. (1980): Aktivkohle und ihre industrielle Anwendung, Enke-Verlag, Stuttgart
- KLUDIG, K.-H. (1971): Zur Rückspülung von Filtern. Veröffentlichungen des Bereichs und des Lehrstuhls für Wasserchemie der Universität Karlsruhe (TH) Heft 5 (1971) S. 241-257

- KLUDIG, K.H.; SCHÜRMAN, G. (1965): Ein Beitrag zur Rückspülung von Filteranlagen I; gwf-Wasser/Abwasser 106 (1965), S 371-378
- KOM-M.NRW. (2015): Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination. Hrsg.: ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, Köln
- KRAMPE, L. (2015): Adsorptionsverhalten unterschiedlicher Aktivkohlen in Bezug auf ausgewählte organische Spurenstoffe bei der weitergehenden Abwasserreinigung. Bachelor-Thesis im Studiengang Prozess-, Energie-, und Umwelttechnik an der Hochschule Düsseldorf.
- LANUV-NRW (2012): Kläranlagenkataster für Nordrhein-Westfalen (NIKLAS-KOM), Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Datenstand 2012, Düsseldorf
- MERSMANN, P. (2003): Transport- und Sorptionsverhalten der Arzneimittelwirkstoffe Carbamazepin, Clofibrinsäure, Diclofenac, Ibuprofen und Propyphenazon in der wassergesättigten und -ungesättigten Zone. Berlin, Technische Universität Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften. Dissertation. 2003 – Überprüfungsdatum 2015-07-26
- METZGER, S. (2010): Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser, Dissertation, Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München
- NAHRSTEDT, A., BURBAUM, H., KLAK, A., BARNSCHIEDT, I., ALT, K., SÜRDER, T., FRITZSCHE, J. (2011): CSB- und Spurenstoffadsorption am Aktivkohlefestbett auf dem Verbandsklärwerk ‚Obere Lutter‘. Abschlussbericht, 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. (2014): Der Einsatz von granulierter Aktivkohle auf dem Verbandsklärwerk ‚Obere Lutter‘. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 61. Jahrgang Nr. 5, S. 408 - 426
- NIKULIN, K. (2014): Untersuchung des Einsatzes von Pulveraktivkohle zur Spurenstoffelimination im Überstand einer Flockungsfiltration mit Hilfe der dynamischen Simulation. Master-Thesis im Studiengang Umwelttechnik & Ressourcenmanagement an der Ruhr-Universität Bochum
- SONTHEIMER, H.; FRICK, B.; FETTIG, J.; HÖRNER, G.; HUBELE, C.; ZIMMER, G. (1985): Adsorptionsverfahren zur Wasserreinigung. Hrsg. DVGW-Forschungsstelle am Engle-Bunteinstitut der Universität Karlsruhe (TH), 1984
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2009): Umwelt - Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung, Fachserie 19 Reihe 2.1, erschienen 2009, Datenstand 2007
- STETTER, D., RUDOW, H., NAHRSTEDT, A. (2012). "Spülbildkontrolle und Betriebsoptimierung bei der Enteisung und Entmanganung." bbr 63(11): 60-67.
- STOWA No. 17 (2007): Piron, J.P.H., Kruit, J., Segers, J.G., van Betuw, W.: Effluentnabehandeling op de RWZI Maasbommel (Praktijkonderzoek Nabehandelingstechnieken), Utrecht, Niederlande
- STOWA No. 27 (2010): Van Betuw, W., Ijpelaar, G.F., Hendriks, A.T.W.M.: Actievekoolfiltratie op afloop Nabezinktank (Demonstratieonderzoek op vier RWZI's), Amersfoort, Niederlande
- STOWA No. 34 (2009): Menkveld, H.W.H., Neef, R., Scherrenberg, S.M., Zijlstra, W., Postma, P., te Kloeze, A.M., de Danschutter, J., van den Dikkenberg, J.: 1-Step Filter als Effluentpolishings-Techniek (Pilotonderzoek RWZI Horstermeer), Utrecht, Niederlande
- STOWA No. 35 (2012): Dekker, A., Zijlstra, W. (2012): Monitoring 1-Step Filter Horstermeer, Amersfoort, Niederlande
- UBA (2015a): Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer, Kurzbericht, Umweltbundesamt (Hrsg.), unter Mitarbeit von: T. Hillenbrand, F. Tettenborn, E. Menger-Krug, F. Marscheider-Weidemann, S., S. Toshovski, S. Kittlaus, S. Metzger, I. Tjoeng, P.I Wermter, M. Kersting, C. Abegglen UBA Texte 86/2014
- UBA (2015b): Mikroverunreinigungen und Abwasserabgabe, Umweltbundesamt (Hrsg.), unter Mitarbeit von: E. Gawel, W. Köck, H. Schindlerg, R. Holländer, S. Lautenschläger, J. Schimpke, S. Seim, UBA Texte 26/2015
- W 213-ff.: Filtrationsverfahren zur Partikelentfernung, Teil 1 Allgemeines, Teil 2 Filtermaterialien, Teil 3 Schnellfiltration, DVGW-Arbeits- und Merkblätter, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1:	Prinzipskizze der drei untersuchten Verfahren.....	2
Bild 2.1:	Kläranlage Buchenhofen mit Flockungsfiltration im Vordergrund .....	4
Bild 2.2:	Schema zur Filterschüttung, links Referenzfilter und rechts neue Schüttung im GAK- und nGAK-Filter.....	6
Bild 2.3:	Flockungsfiltration der KA Buchenhofen mit PAK-Lagersilo und Dosiereinrichtung.....	7
Bild 2.4:	Fließbild mit Probenahme- und Messstellen .....	8
Bild 3.1:	Anstieg der behandelten BV während des Untersuchungszeitraums .....	10
Bild 3.2:	Mittlere Feststoffbelastung und Filterbeladung bei Filterspülung im PAK-Filter und zum Vergleich im Referenzfilter .....	11
Bild 3.3:	Trübung im Filtrat als Kontrolle des Feststoffrückhaltes, jeweils PAK-, GAK- und nGAK-Filtrat im Vergleich zum Referenzfilter .....	12
Bild 3.4:	Filterverhalten bei Mischwasser und Trockenwetter .....	13
Bild 3.5:	Mittlere Reinigungsleistung der Filter in Bezug auf die Standardparameter.....	15
Bild 3.6:	Filtrierter CSB, zeitlicher Verlauf der Elimination (durchgezogene Linie = gleitender Mittelwert aus n=4 Werten) .....	16
Bild 3.7:	Berechnete CSB-Beladung der VersuchsfILTER .....	17
Bild 3.8:	Beladung in Abhängigkeit der Dosiermenge, Vergleich der praktisch erzielten Beladung mit den Werten der Laborversuchen.....	17
Bild 3.9:	Mittlere Elimination von Spurenstoffen nach 18 Monaten Betrieb .....	18
Bild 3.10:	Zeitlicher Verlauf der Elimination von Spurenstoffen im nGAK-Filter.....	19
Bild 3.11:	Zeitlicher Verlauf der Elimination von Spurenstoffen im GAK-Filter) .....	19
Bild 3.12:	Diclofenac-Beladung, Vergleich Betriebsdaten mit Laborergebnissen .....	20
Bild 3.13:	Summenlinien der Ablaufkonzentrationen über den Versuchszeitraum .....	21
Bild 3.14:	Elimination der Spurenstoffe in Bezug auf den Zulauf zur biologischen Stufe.....	23
Bild 3.15:	Ausgleichsfunktion zur Beschreibung der Durchbruchkurve eines GAK-Filters (Entnommen aus Benstöm et al., 2014) .....	24
Bild 3.16:	Ausgleichsfunktionen der normierten Ablaufkonzentration verschiedener Referenzparameter für den GAK und nGAK-Filter im Vergleich.....	25
Bild 3.17:	Prinzipbild zum Verhalten mehrerer Filter, die versetzt erneuert werden .....	26
Bild 3.18:	Einfluss der Filteranzahl auf den Effekt einer Parallelschaltung .....	26
Bild 3.19:	Rückführwege der Pulverkohle .....	27
Bild 4.1:	Schema zur Ermittlung der notwendigen Reinigungsleistung der Adsorptionsstufe bei gegebener Abbauleistung in der Biologie und gewünschtem Gesamtwirkungsgrad der Kläranlage .....	29
Bild 4.2:	Schema zur Darstellung der gewählten Grundvarianten .....	30
Bild 4.3:	Ausbaukonzept GAK-Filter .....	31
Bild 4.4:	Ausbaukonzept nGAK-Filter .....	32
Bild 4.5:	Ausbaukonzept PAK-Filter.....	32
Bild 4.6:	Jahreskosten in Abhängigkeit der Eliminationsleistung.....	34

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1:	Leitsubstanzen für die Spurenstoffanalytik.....	3
Tabelle 2.1:	Kenndaten der Flockungsfiltration auf der Kläranlage Buchenhofen.....	4
Tabelle 2.2:	Spezifischen Daten der von den Herstellern empfohlenen GAK .....	5
Tabelle 2.3:	Zusammenfassung der Messstellen, Parameter und Anzahl der Daten.....	8
Tabelle 3.1:	Filtergeschwindigkeiten im Untersuchungszeitraum (1.11.13 – 1.5.15).....	9
Tabelle 3.2:	Belastung im Zulauf zur Filtration mit Standardabwasserparametern .....	15
Tabelle 3.3:	Auswertung der Spurenstoff-Messdaten im Zulauf zur Filtration .....	18
Tabelle 3.4:	Konzentrationen und mittlere Elimination der Spurenstoffe in den mechanisch biologischen Reinigungsstufen der Kläranlage Buchenhofen basierend auf 72h-MP .....	22
Tabelle 3.5:	Mittelwert der gemessenen Konzentrationen an verschiedenen Messstellen entlang des Wasserweges in der Kläranlage und den Abläufen der Versuchsfilter.....	23
Tabelle 4.1:	Einfluss unterschiedlicher Abbruchkriterien auf die Bettvolumina bis zum Austausch des Filtermaterials (hier GAK-Filter) .....	28
Tabelle 4.2:	Notwendige Reinigungsleistung der Adsorptionsstufe in Abhängigkeit des gewünschten Gesamtwirkungsgrades .....	29
Tabelle 4.3:	Kenndaten der Ausbaukonzepte.....	32
Tabelle 4.4:	Übersicht Verbrauchsmittel und Jahreskosten.....	33
Tabelle 4.5:	Investitionen und Jahreskosten in Abhängigkeit der Anlagengröße .....	35