

# Kläranlage Ochtrup

## 4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen

Kurzfassung der Studie  
Juli 2013  
Projektnummer 0485 004





# Kläranlage Ochtrup 4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen

Kurzfassung der Studie  
Juli 2013  
Projektnummer 0485 004

Bearbeitet durch:  
Dipl.-Ing. Norbert Biebersdorf  
Dr.-Ing. Jan Mauriz Kaub

Aufgestellt:  
Bochum, im Juli 2013

Dipl.-Ing. Jörg Alda

**Auftraggeber:**

Stadtwerke Ochtrup – Abwasserwerk  
Witthagen 3  
48607 Ochtrup

Telefon: 02553 71-0  
Telefax: 02553 71-18  
info@stadtwerke-ochtrup.de

**Projektleiter:**

Herr Dipl.-Ing. Johannes Ratering

Telefon: 02553/71-99  
johannes.ratering@stadtwerke-ochtrup.de

Herr Norbert Feldevert  
(techn. Leiter Kläranlage)

Telefon: 02553/3676  
klaeranlage@stadtwerke-ochtrup.de

**Bearbeitung durch:**

TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft mbH  
Universitätsstraße 74  
44789 Bochum

Telefon: 0234 33305-0  
Telefax: 0234 33305-11  
info@tum-bochum.de

Herr Dipl.-Ing. Norbert Biebersdorf

Telefon: 0234 33305-54  
n.biebersdorf@tum-bochum.de

Herr Dr.-Ing. Jan Mauriz Kaub

Telefon: 0234 33305-36  
jm.kaub@tum-bochum.de

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Veranlassung und Aufgabenstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Belastungsdaten Hydraulik .....</b>	<b>1</b>
2.1	Grundlagen.....	1
2.2	Einleitungsmengen .....	2
2.3	Festlegung Teilstrommenge .....	2
<b>3</b>	<b>Anlagenbestand Abwasserbehandlung .....</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Spurenstoffe im Wasserkreislauf.....</b>	<b>3</b>
4.1	Einleitung.....	3
<b>5</b>	<b>Darstellung der untersuchten Verfahrenskombinationen .....</b>	<b>4</b>
5.1	Verfahrensfestlegung und Randbedingungen .....	4
5.2	Varianten .....	5
5.2.1	Variante 1: Pulverkohle mit Rücklaufkohle .....	5
5.2.1.1	Allgemein.....	5
5.2.1.2	Ausführung .....	6
5.2.2	Variante 2: PAK-Dosierung .....	7
5.2.2.1	Allgemein.....	7
5.2.2.2	Ausführung .....	8
5.2.3	Variante 3: Nachgeschaltete Filtration über granulierten Aktivkohle .....	8
5.2.3.1	Allgemeines .....	8
5.2.3.2	Ausführung .....	10
5.2.4	Variante 4: Ozonung .....	10
5.2.4.1	Allgemeines .....	10
5.2.4.2	Ausführung .....	11
<b>6</b>	<b>Kosten .....</b>	<b>12</b>
6.1	Allgemein.....	12
6.2	Investitionskosten.....	12
6.3	Betriebskosten.....	13
6.4	Jahreskosten .....	14
6.5	Sensitivitätsanalyse .....	15
<b>7</b>	<b>Bewertung.....</b>	<b>16</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>19</b>

**Bildverzeichnis**

Bild 1:	Volumenstrom Ablauf KA Ochtrup (03/2012 – 03/2013).....	2
Bild 2:	Summenhäufigkeit Ablauf KA Ochtrup (03/2012 – 03/2013) .....	3
Bild 3:	Blockschema Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle .....	6
Bild 4:	Blockschema Variante 2: PAK-Dosierung.....	8
Bild 5:	Blockschema Variante 3: Nachgeschaltete GAK-Filtration .....	9
Bild 6:	Blockschema Variante 4: Ozonung.....	11

## **1 Veranlassung und Aufgabenstellung**

Die Ertüchtigung von kommunalen Kläranlagen im Hinblick auf die Elimination von anthropogenen Spurenstoffen wird derzeit in der Fachwelt diskutiert.

Diese 4. Reinigungsstufe ist in der Bundesrepublik insbesondere in Baden-Württemberg und auf einigen Anlagen in Nordrhein-Westfalen bereits in Betrieb. In der Schweiz wird eine landesweite Einführung vorbereitet.

Nicht zuletzt lassen die Aktivitäten im Umweltausschuss des Europäischen Parlaments mit der Aufnahme von erstmals drei Pharmaka-Wirkstoffen in die Liste der prioritären Stoffe nach der Wasserrahmenrichtlinie vom November 2012 darauf schließen, dass die 4. Reinigungsstufe zukünftig Pflicht werden könnte.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Verfahrenskombinationen auch im großtechnischen Maßstab untersucht. So stehen verschiedene Konzepte zur Elimination der genannten Stoffe zur Verfügung.

Um die Realisierbarkeit dieser Verfahren auf den Kläranlagen konkret zu untersuchen, fördert das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen Machbarkeitsstudien.

Die Stadtwerke Ochtrup haben die TUTTAHS & MEYER Ing.-GmbH beauftragt, für die Kläranlage Ochtrup eine solche Studie auszuarbeiten.

Mit der Studie soll eine Entscheidungsgrundlage geschaffen werden, um die Auswahl eines möglichen Verfahrens durch die Stadtwerke Ochtrup zu unterstützen. Neben den technischen Aspekten werden auch die Wirtschaftlichkeit und weitere Punkte, wie z. B. die Nachhaltigkeit, bewertet.

Die Machbarkeitsstudie gliedert sich in folgende Punkte auf:

- Datenauswertung mit Ermittlung der für die Auslegung maßgeblichen Teilstrommenge;
- Auslegung der insgesamt vier Verfahrenskombinationen;
- Darstellung der Varianten im Lageplan und im Verfahrensflißbild (RI-Schema);
- Beschreibung und Bewertung der Verfahren;
- Wirtschaftliche Bewertung der Konzepte anhand der Jahreskosten; dazu werden die Investitionskosten und die Betriebskosten abgeschätzt;
- Zusammenfassung der Bewertung in einer Entscheidungsmatrix.

## **2 Belastungsdaten Hydraulik**

### **2.1 Grundlagen**

Die 4. Reinigungsstufe wird für einen Teilstrom bemessen, der einen Großteil der jährlichen Abflusssituationen abdecken soll. Es hat sich bewährt, die Anlagen auf einen Teilstrom aus-

zulegen, mit dem mehr als 80 % der anfallenden Jahreszulaufmenge über die 4. Reinigungsstufe geführt werden kann.

## 2.2 Einleitungsmengen

Die derzeitig genehmigten Einleitungsmengen aus dem 1. Änderungsentwurf vom Oktober 1991 betragen:

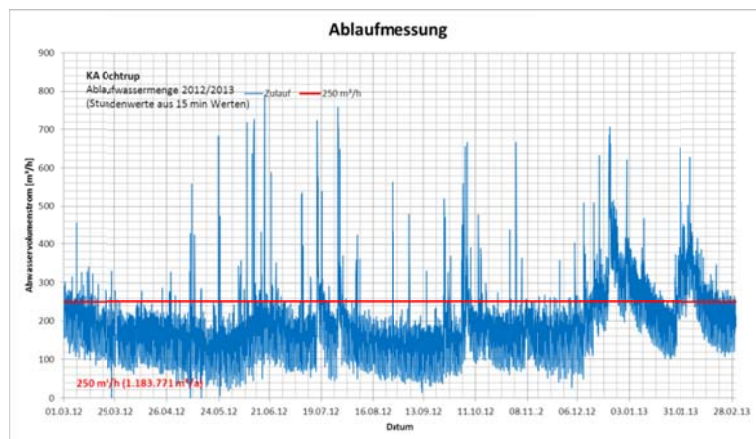
$$\begin{aligned} \text{Maximaler Abfluss} \quad Q_{\max} &= 246 \text{ l/s} \\ &= 885 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Trockenwetterzufluss} \quad Q_t &= 125 \text{ l/s} \\ &= 450 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

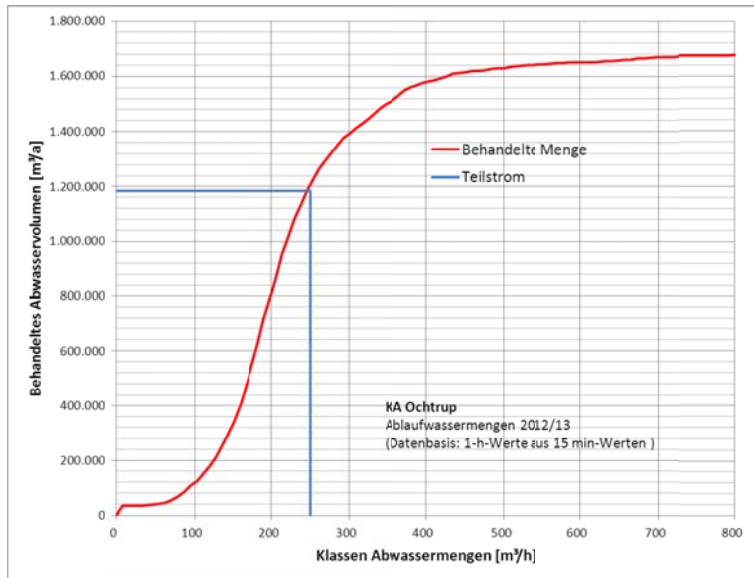
## 2.3 Festlegung Teilstrommenge

Die 15-min-Zulaufwerte von März 2012 bis März 2013, die aus dem Prozessleitsystem der Kläranlage Ochtrup ausgelesen wurden, wurden für die folgende Auswertung genutzt.

Die Auswertung ergab, dass mit einem Volumenstrom von 250 m<sup>3</sup>/h an 7.242 h im Jahr das komplette Abwasser über die 4. Reinigungsstufe geführt wird. Dies sind ca. 83 % des Jahres. In der Stufe werden im Jahr 1.183.771 m<sup>3</sup> behandelt. Die weitere Auslegung erfolgte mit einem Volumenstrom von 250 m<sup>3</sup>/h.



**Bild 1: Volumenstrom Ablauf KA Ochtrup (03/2012 – 03/2013)**



**Bild 2: Summenhäufigkeit Ablauf KA Ochtrup (03/2012 – 03/2013)**

### 3 Anlagenbestand Abwasserbehandlung

Gemäß den erteilten wasserrechtlichen Genehmigungen wurden folgende wesentlichen abwasserseitigen Anlagenteile errichtet:

- Abwasserhebewerk,
- Grob-/Feinrechenanlage,
- Rechenanlage,
- Belüfteter Sandfang mit Fettfang,
- Regenklärbecken,
- Hochlastbelebung,
- Zwischenklärbecken,
- Ozonisierungsanlage/Reaktionsbehälter,
- Bio-P-Becken,
- Deni-/Nitrifikationsbecken,
- Nachklärbecken,
- Rücklaufschlammumpwerk,
- Aktivkohleadsorption,
- Filtration,
- Mengenmess- und Probenahmestation,
- Einleitungsbauwerk.

### 4 Spurenstoffe im Wasserkreislauf

#### 4.1 Einleitung

Mit Spurenstoffen werden Substanzen bezeichnet, die im Konzentrationsbereich von  $10^{-9}$  (ng/l) bis  $10^{-6}$  g/l ( $\mu\text{g/l}$ ) in der aquatischen Umwelt zu finden sind.



Nach der Definition der DWA sind anthropogene Spurenstoffe organische Schadstoffe, wie Humanpharmaka, Industriechemikalien, Körperpflegemittel, Waschmittelinhaltsstoffe, Nahrungsmittelzusatzstoffe, Additive in der Abwasser- und Klärschlammbehandlung, Veterinärpharmaka, Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel sowie Futterzusatzstoffe (DWA 2008).

Andere Bezeichnungen für die genannten Substanzen sind z. B. Mikroverunreinigungen und Mikroschadstoffe.

Die human- und ökotoxikologische Wirkung eines Teils dieser Stoffe ist abschließend geklärt. Hierzu werden gegenwärtig Untersuchungen durchgeführt. Eine direkte Gefährdung für den Menschen besteht in der Regel nicht, jedoch wurden schon Wirkungen von einzelnen Spurenstoffen auf aquatische Lebewesen festgestellt. Im Sinne des Vorsorge- und Minimierungsprinzips sollte daher der Eintrag dieser Stoffe in den Wasserkreislauf minimiert werden.

Eine Hauptemissionsquelle für den Eintrag von Humanpharmaka als eine Teilgruppe stellen kommunale Kläranlagen dar.

Kommunale Kläranlagen sind derzeit ausgelegt für die Kohlenstoff- und, in Abhängigkeit von der Größe, auch für die Nährstoffelimination. Auf gut ausgebauten Anlagen werden organische Spurenstoffe teilweise erheblich eliminiert, wenn auch zumeist nicht vollständig, wie umfangreiche Studien belegen (MUNLV 2004; Joss 2005). Die unterschiedlichen Reinigungsleistungen lassen sich aus der chemischen Struktur der einzelnen Stoffe begründen.

Zur Verbesserung der Reinigungsleistung von Kläranlagen stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die momentan auch noch Gegenstand der Forschung sind. Erste Anlagen wurden großtechnisch umgesetzt. Im weiteren Verlauf der Studie werden insgesamt vier Verfahren vorgestellt. Zu allen Verfahren liegen Ergebnisse von großtechnischen Anlagen oder zumindest Versuchen im großtechnischen Maßstab vor.

## 5 Darstellung der untersuchten Verfahrenskombinationen

### 5.1 Verfahrensfestlegung und Randbedingungen

In der Besprechung am 19. März 2013 wurden die zu untersuchenden Verfahren mit dem Auftraggeber zusammen abgestimmt:

1. **Pulverkohle mit Rücklaufkohleführung.** Abtrennung der PAK in einem Absetzbecken und in der nachgeschalteten vorhandenen Filtrationsstufe.
2. **Direkte Dosierung von Pulveraktivkohle.** Abtrennung der Kohle über die vorhandene Filtrationsstufe.
3. **Filtration über granulierten Aktivkohle.** Festbettadsorber werden der Filtrationsstufe nachgeschaltet.
4. **Ozonung.** Zulauf der Filtration wird mit Ozon behandelt. Nutzung Filtration als biologisch aktive Stufe.

Die Kläranlage Ochtrup verfügt über eine Ozonanlage (2 x 6.000 kg/h), eine Pulverkohledosierung sowie eine Dosiereinrichtung für Pulveraktivkohle mit Silo und zwei Rührbehältern, die zur Behandlung von Textilabwässern vorgesehen waren. Nach Produktionsende des Textilbetriebes werden sie nicht mehr betrieben. Die Anlagen weisen ein Alter von über 20 Jahren auf und entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik. In der Studie wird damit die Maschinen- und E-/MSR-Technik als abgängig eingestuft. Für die Bautechnik wird in Abhängigkeit vom Verfahren eine Nutzung der vorhandenen Bauwerke angestrebt.

Im Bereich der Belebung sind noch freie Beckenkapazitäten vorhanden. Eine Nutzung für die 4. Reinigungsstufe wurde angedacht. Aufgrund der Lage der Becken ist eine direkte Nutzung für die 4. Reinigungsstufe nicht möglich. So müsste das Abwasser durch neu verlegte Rohrleitungen dorthin gefördert und nach der Behandlung wieder zurückgeführt werden. Dies führt neben dem notwendigen Umbau der Becken zu zusätzlichen Investitionskosten. Aus betriebstechnischer Sicht würde die 4. Reinigungsstufe auf verschiedene Betriebspunkte verteilt, die räumlich auf dem Kläranlagengelände verteilt liegen.

Die 4. Reinigungsstufe wird daher im Bereich der Filtration auf dem Baufeld der schon bestehenden Ozon- und PAK-Anlagen angeordnet.

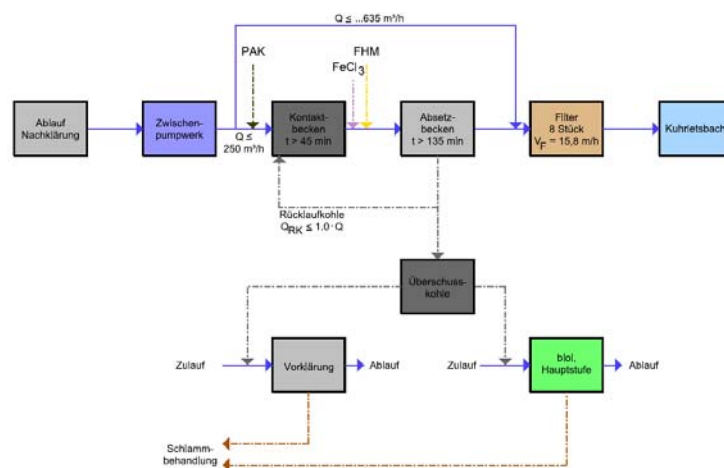
## **5.2 Varianten**

### **5.2.1 Variante 1: Pulverkohle mit Rücklaufkohle**

#### **5.2.1.1 Allgemein**

Dieses Verfahren wurde, wie schon im **Kapitel 7.1.2.1** beschreiben, an einigen Standorten in Baden-Württemberg umgesetzt. Für die Rückführung der Kohle ist ein Absetzbecken notwendig. Die Rücklaufkohle wird zusammen mit der Frischkohle in den Zulauf des Kontaktbeckens dem Ablauf der Nachklärung zugegeben. Im dem Absetzbecken vorgeschalteten Kontaktbecken erfolgt der eigentliche Adsorptionsvorgang. Der im Absetzbecken zurückgehaltene Kohleschlamm wird über eine Pumpe als Rücklaufkohle wieder in den Zulauf des Kontaktbeckens zurückgeführt. Entsprechend der Frischkohledosierung wird ein Teil der rückgeführten Kohle als Überschussskohle aus dem System entnommen. Besonderer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Pulverkohle mehrfach mit dem Abwasser in Kontakt kommt, um die Beladungskapazität möglichst gut ausnützen zu können.

Für die Kläranlage Ochtrup würde dies bedeuten, dass ein Absetzbecken im Bereich der bestehenden Ozonanlage und Sauerstofftankanlage erstellt wird. Der vorhandene Quelltopf und die beiden Rührbehälter können als Kontaktbehälter genutzt werden. Die Dosierung der Frischkohle kann über den bestehenden PAK-Dosierschacht erfolgen. Neu erstellt wird das PAK-Silo mit Fundament. Das bestehende Silo befindet sich im Baufeld des Absetzbeckens. Zudem ist die im Silo vorhandene Dosiertechnik abgängig.



**Bild 3: Blockschema Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle**

Erfahrungen aus Baden-Württemberg zeigen, dass die Suspensabelastung des Filters zurückgeht, da durch den Einsatz von Flockungs- und Flockungshilfsmittel ein Teil der Partikel schon im Absetzbecken abgeschieden wird und nicht auf die Filtration gelangt. Dies bedeutet eine Erhöhung der Betriebssicherheit der Anlage im Hinblick auf den Suspensarückhalt.

Ein Mehrverbrauch an Fällmittel (Me-Salzen) gegenüber dem Ausgangszustand konnte beispielsweise in Böblingen-Sindelfingen nicht festgestellt werden, da die Dosierung der Simultanfällung reduziert werden konnte. Die Dosierung hat sich also in die 4. Reinigungsstufe verlagert.

### 5.2.1.2 Ausführung

Für diese Variante wird das Baufeld vor der Filtration vollgenutzt. Die bestehenden Bauwerke und Anlagen werden bis auf den PAK-Dosierschacht und den Ruhrbehältern mit dem Quelltopf sowie den verbindenden Rohrleitungen zurückgebaut.

Die beiden Ruhrbehälter werden als Kontaktbehälter genutzt. Mit ihrem Volumen von insgesamt ca. 240 m<sup>3</sup> ergibt sich eine Aufenthaltszeit von rund 45 min. Die Ruhrwerke auf den Becken werden erneuert.

Neu erstellt wird das Absetzbecken mit einem Volumen von 632 m<sup>3</sup>/h. Es wird als Rundbecken mit einem Innendurchmesser von 15 m ausgeführt. Das Becken wird mit einem Rundräumer ausgerüstet. Der Wasserspiegel dieses Beckens liegt zwischen dem der Kontaktbecken und dem der Zulaufverteiler in der Filtration. Das Becken liegt damit nahezu komplett oberhalb der Geländeoberkante. Der Zugang zum Räumer wird über eine Treppe und einem Bediengang realisiert. Der Zugang zur Filtration über die bestehende Tür ist weiterhin gegeben.

An der Beckenperipherie wird ein Schacht für die Rücklaufkohlepumpe angeordnet. Diese fördert die Rücklaufkohle wieder in den Quelltopf vor den Kontaktbehältern zurück. Die Überschussschleife wird über eine weitere Pumpe aus dem Schacht entnommen und über eine vorhandene Leitung in die Belebung geleitet.

Eine Pumpe des bestehenden Zwischenhebewerks in der Filtration wird rohrleitungstechnisch direkt der 4. Reinigungsstufe zugeordnet. Die weiteren Pumpen dienen der Beschickung der Filtration bei Zuflüssen oberhalb von 300 m<sup>3</sup>/h. Die gesamte Stufe mit der Filtration wird dann im freien Gefälle durchflossen.

Ein neues Silo mit einem Inhalt von 80 m<sup>3</sup> wird neben dem Absetzbecken erstellt. Der vorhandene PAK-Schacht wird zur Dosierung der Frischkohle weitergenutzt. Das Treibwasser (5 bis 7 m<sup>3</sup>/h) für die PAK-Dosierung wird über eine gesonderte Pumpe aus dem Filtratwasserspeicher entnommen. Alternativ ist eine Entnahme aus dem Betriebswassernetz möglich.

Die Bereitungsanlage für das Flockungshilfsmittel wird im Erdgeschoss des Filtrationsgebäudes untergebracht. Die Filtration verfügt über eine Dosieranlage für Fäll- bzw. Flockungsmittel mit Lagertank und Abfüllplatz. Diese Anlage wird ertüchtigt und für die 4. Reinigungsstufe genutzt.

## 5.2.2 Variante 2: PAK-Dosierung

### 5.2.2.1 Allgemein

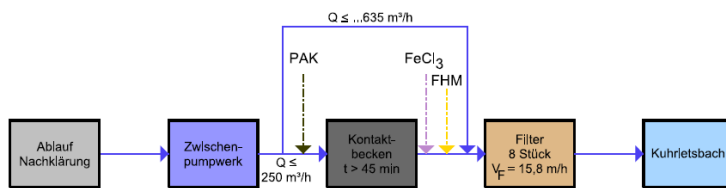
Diese Variante entspricht dem im **Kapitel 7.1.2.1** beschriebenen Verfahren, wie es in Wuppertal-Buchenhofen umgesetzt wurde. Während in Wuppertal nur der Filterüberstau als Kontaktraum zwischen Aktivkohle und Abwasser genutzt wird, stehen in Ochtrup zusätzlich die beiden vorhandenen Rührbehälter dafür zur Verfügung.

Die komplette Abtrennung der Aktivkohle erfolgt über die Filtration. Damit wird auch die zurückgehaltene Pulverkohle über den Schlammwasserspeicher aus der Filtration in den Zulauf der Kläranlage zurückgeführt.

Gegenüber der Variante 1 ist eine höhere Dosierkonzentration erforderlich (20 mg PAK/l statt 10 mg/l), da keine Rückführung der Kohle in den Zulauf erfolgt.

Der Einsatz von Me-Salzen (Fäll- und Flockungsmittel) ist in jedem Fall notwendig, um einen Durchbruch der Kohle durch die Filter zu verhindern. In Wuppertal war die Dosierung von Flockungshilfsmitteln nicht notwendig. Die Filtration wird damit höher belastet. Dies kann zu einer Verkürzung der Rückspülintervalle führen. In den Versuchen in Wuppertal war eine tägliche Rückspülung weiterhin ausreichend. Hinsichtlich der Betriebssicherheit ist die höhere Feststoffbelastung der Filtration gegenüber den anderen Varianten als Nachteil anzusehen.

Setzt man die Auslegungskonzentration für Nachklärbecken nach A 131 von 20 mg/l abfiltrierbare Stoffe (TS) im Ablauf an, so wird ab einer Tageswassermenge von 6.000 m<sup>3</sup>/d (250 m<sup>3</sup>/d) eine TS-Raubeladung in den Mehrschichtfiltern von 2,7 kg TS/(m<sup>3</sup> · d) erreicht. Dieser Wert liegt im Bereich der Empfehlung von Meyer (1979) mit 2,0...3,0 kg TS/(m<sup>3</sup> · d).



**Bild 4: Blockschema Variante 2: PAK-Dosierung**

### 5.2.2.2 Ausführung

Die bautechnischen Veränderungen sind insbesondere beim Vergleich mit Variante 1 in diesem Fall gering.

Die bestehenden Bauwerke und Anlagen auf dem Baufeld werden – wie bei Variante 1 – bis auf den PAK-Dosierschacht und die Rührbehälter mit dem Quelltopf sowie der verbindenden Rohrleitung zurückgebaut.

Die beiden Rührbehälter werden wiederum als Kontaktbehälter genutzt. Mit ihrem Volumen von insgesamt ca. 240 m<sup>3</sup> ergibt sich eine Aufenthaltszeit von rund 45 min. Die Rührwerke auf den Becken werden erneuert.

Das bestehende Silo wird gegen ein neues Silo mit einem Inhalt von 80 m<sup>3</sup> und neuer Dosier-technik ausgetauscht. Der vorhandene PAK-Schacht wird zur Dosierung der Pulveraktivkohle weitergenutzt. Das Treibwasser (5 bis 7 m<sup>3</sup>/h) für die PAK-Dosierung wird über eine gesonderte Pumpe aus dem Filtratwasserspeicher entnommen. Alternativ ist eine Entnahme aus dem Betriebswassernetz möglich.

Die Anbindung der Stufe an das Zwischenhebewerk in der Filtration entspricht Variante 1.

Die Nutzung der vorhandenen Dosieranlage in der Filtration entspricht Variante 1. Die Bereitungsanlage für Flockungshilfsmittel wird im Erdgeschoss der Filtration untergebracht. Zu beachten ist, dass die komplette Zulaufverrohrung der Filtration inklusive der Quelltöpfe in Edelstahl ausgeführt ist. Durch den vermehrten Einsatz von Fe(III)-Lösungen als Fäll- und Flockungsmittel im Zulauf der Filtration müssen gegebenenfalls Maßnahmen ergriffen werden, um die Rohrleitungen vor Korrosion zu schützen.

Die Bereitungsanlage für das Flockungshilfsmittel wird im Erdgeschoss des Filtrationsgebäudes untergebracht. Die Filtration verfügt über eine Dosieranlage für Fäll- bzw. Flockungsmittel mit Lagertank und Abfüllplatz. Diese Anlage wird ertüchtigt.

## 5.2.3 Variante 3: Nachgeschaltete Filtration über granulierte Aktivkohle

### 5.2.3.1 Allgemeines

Die Aktivkohlefilter werden der bestehenden Filtration nachgeschaltet. Der Suspensarückhalt erfolgt damit in der Mehrschichtfiltration, und ein Teilstrom des partikelarmen Abwassers wird über die GAK-Filter geführt. Es ist mit höheren Standzeiten der Kornkohle zu rechnen, wenn die Konkurrenz um die Adsorptionsplätze zwischen den Spurenstoffen und dem Rest-CSB minimiert wird. Im Mehrschichtfilter wird ein Teil des partikulär gebundenen CSB zurückge-

halten. Die GAK-Filter dienen als „Polzeifilter“ für die Spurenstoffe. Nichtsdestotrotz bietet diese zweistufige Filtration besondere Sicherheit im Hinblick auf den Abschlag von Suspensa in den Vorfluter, wenn z. B. Schlamm aus der Nachklärung abtreibt.

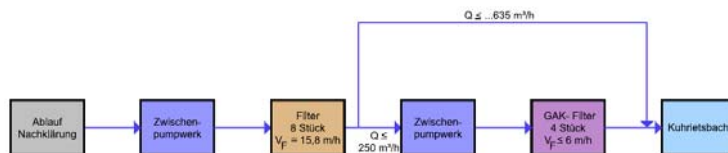
Die Filterstufe wird anhand folgender Bemessungsparameter ausgelegt:

Leerbettkontaktzeit (EBCT):	10...30 min
Filtergeschwindigkeit:	5...20 min
Betthöhe GAK:	1,5...3 m

Folgende Werte wurden gewählt:

Anzahl Filter:	4 Stück
Betthöhe GAK:	2,5 m
Leerbettkontaktzeit (EBCT):	25 min
Filterfläche gesamt:	51,2 m

Die Stufe kann als Druckfiltration – zumeist in Filterkesseln aus Stahl – oder als offene Filtration realisiert werden. Für den Anwendungsfall wurde eine Ausführung als offener Rechteckfilter aus Beton gewählt, da so der Filterblock zusammen mit der benötigten Spülwasservorlage als ein Bauwerk realisiert werden kann. Jede Filterkammer weist eine Breite von 3,0 m und eine Länge von 4,2 m auf.



**Bild 5: Blockscha Variante 3: Nachgeschaltete GAK-Filtration**

Da die GAK-Filter in erster Linie als Adsorber arbeiten und mit partikelarmem Abwasser beaufschlagt werden, kann von einer täglichen Rückspülung abgesehen werden. Die Rückspülungen sollten bei Bedarf erfolgen. Die Rückspülgeschwindigkeiten sind geringer als bei Mehrschichtfiltern.

Sontheimer u. a. (1985) nennen folgende Werte:

Spülluftgeschwindigkeit:	25...35 m/h
Spülwassergeschwindigkeit:	60...80 m/h

Die Filter werden für eine Durchlaufspülung ausgelegt. Die Spülwasserableitung erfolgt über eine Rinne.

### **5.2.3.2 Ausführung**

Auf dem Baufeld vor der Filtration wird das Filterbauwerk, bestehend aus dem Filterblock mit den vier Rechteckfiltern und dem vorgelagerten Spülwasserspeicher sowie der Vorlage für die Beschickungspumpen, angeordnet.

Die Pumpenvorlage wird über eine Rohrleitung (PE 100 SDR 17 355·21,1) mit dem Spülwasserspeicher der vorhandenen Filtration verbunden. Über zwei Pumpen wird das Abwasser auf die vier Filter gehoben. Der Zulauf zu den vier Filtern erfolgt aus einem Quelltopf über vier Gerinne. Jedes Gerinne ist mit einem Schieber ausgerüstet. Die Gleichverteilung des Zulaufs auf alle in Betrieb befindlichen Filterkammern wird über die Schwellen an der Stirnseite realisiert.

Das Filtrat der Adsorptionsstufe wird in einer Spülwasservorlage gespeichert. Der Überlauf des Spülwasserspeichers ist über eine weitere Rohrleitung (PE 100 SDR 17 355 x 21,1) an die bestehende Ablaufleitung der vorhandenen Filtration – vor der Mengemess- und Probenahmestation – angebunden.

Das Spülabwasser der Filtration wird über eine Leitung (PE 100 SDR 17 450 x 26,7) direkt in den vorhandenen Schlammwasserspeicher der bestehenden Filtrationsstufe geleitet.

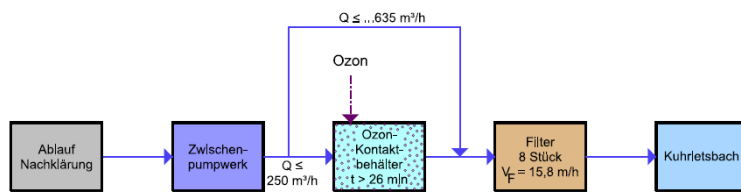
Während die Pumpen im Untergeschoss des Filterbauwerks untergebracht sind, wird das Spülluftgebläse im Erdgeschoss aufgestellt. Weiterhin ist dort die Schaltanlage untergebracht. Dieser Bereich (EG) wird mit einer Stahlhalle eingehaust.

## **5.2.4 Variante 4: Ozonung**

### **5.2.4.1 Allgemeines**

Neben der Entfernung der Spurenstoffe auf adsorptivem Wege ist die Oxidation der Stoffe eine andere Möglichkeit zur Elimination. Hier bietet sich der Einsatz von Ozon als starkes Oxidationsmittel an.

Zu berücksichtigen ist, dass durch den Einsatz von Ozon Oxidationsprodukte gebildet werden können, die toxisch sind. Daher wird empfohlen, eine biologisch arbeitende Stufe der Ozonung nachzuschalten. Dies kann eine Filtration sein, wie Abbegglen u. a. (2009) in einem großtechnischen Versuch auf der ARA Regensdorf nachweisen konnte. Im Filter erfolgt der Abbau eventuell toxikologisch bedenklicher Stoffe auf biologischem Wege. Dieses Vorgehen ist bei der Trinkwasseraufbereitung seit Jahren Standard (Beispiel: Düsseldorfer Verfahren). Das Ozon wird daher vor der bestehenden Filtration angeordnet.



**Bild 6: Blockschema Variante 4: Ozonung**

Die Ozonung wird anhand folgender Bemessungsparameter ausgelegt:

Ozondosis:  $2 \dots 10 \text{ g/m}^3$   
 Kontaktzeit im Reaktionsbehälter:  $10 \dots 30 \text{ min}$

Folgende Werte wurden gewählt:

Anzahl Kontaktbehälter:  $2 \text{ Stück}$   
 Wassertiefe Kontaktbehälter:  $6 \text{ m}$

Die Berechnung der mittleren Ozondosis wurde anhand der CSB-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung bestimmt. Im Mittel kann hier ein CSB-Wert von  $33 \text{ mg/l}$  angesetzt werden. Als Verhältnis CSB/DOC wird ein Wert von  $3 : 1$  angesetzt. Der Einfluss des partikulär gebundenen CSB wird hierbei nicht betrachtet. Damit ergibt sich eine berechnete DOC-Konzentration im Ablauf der Nachklärung von  $11 \text{ mg/l}$ . Die großtechnischen Versuche in Regendorf (Abegglen u. a. 2009) kamen zu dem Ergebnis, dass eine Dosis von  $0,62 \text{ mg O}_3/\text{mg DOC}$  hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Wirkung ein Optimum darstellte. Dieser Wert wurde hier übernommen. Damit ergibt sich die mittlere Ozondosis zu:

$$c_{\text{O}_3, \text{a}} = 11 \text{ mg DOC/l} \cdot 0,62 \text{ mg O}_3/\text{mg DOC} = 6,82 \text{ mg O}_3/\text{l} \approx 7,00 \text{ mg O}_3/\text{l}$$

### 5.2.4.2 Ausführung

Der vorhandene Aufstellplatz für die Flüssigsauerstoffanlage wird weitergenutzt. Der Stellplatz für die vorhandene Ozonanlage wird als Stellplatz für die neue kleinere Anlage genutzt. Die Anlage wird wiederum in einem Container untergebracht.

Der Ozonerzeuger weist eine Leistung von  $3.000 \text{ g/h}$  auf. Als Prozessgas ist flüssiger Sauerstoff vorgesehen. Die Kühlung erfolgt über einen Nass/Nass-Wärmeübertrager, der ebenfalls im Container untergebracht ist. Das benötigte Kühlwasser im Sekundärkreislauf wird über zwei Pumpen (eine Reserve) aus dem Filtratwasserspeicher bereitgestellt.

Der Ozoneintrag kann über eine Teilstrombegasung mit Injektoren erfolgen oder über Diffusoren direkt in das Abwasser. Im konkreten Fall wird der Eintrag über Diffusoren gewählt, da er verfahrenstechnisch einfacher zu realisieren ist (kein weiterer Kreislauf mit Pumpe). Eine abschließende Bewertung über das bessere Verfahren für den hier geschilderten Anwendungsfall steht derzeit noch aus.



Die beiden Kontaktbehälterstraßen werden als Betonbauwerk hinter der Ozonanlage angeordnet. Die Behälter verfügen über keine Einbauten, außer einer unterströmten Tauchwand im letzten Drittel des Behälters. Dieser Bereich dient als Entspannungszone. Untersuchungen von Herbst u. a. (2011) zeigten, dass weitere Einbauten (Leitwände) die Effizienz nicht nachhaltig verbessern.

Die Restozonvernichtung erfolgt thermisch/katalytisch.

Die hydraulische Anbindung der Ozonstufe erfolgt über die rohrtechnische Umrüstung einer Pumpe im Zwischenhebewerk der Filtration, wie auch bei den Varianten 1 und 2.

## 6 Kosten

### 6.1 Allgemein

Die Wirtschaftlichkeit der vier betrachteten Varianten wird anhand der Investitions- und Betriebskostenschätzung ermittelt. Anhand der Jahreskosten können dann die Varianten verglichen werden. In der Sensitivitätsanalyse werden der Einfluss einzelner Kostengruppen sowie der betrieblichen Einstellungen auf die Jahreskosten betrachtet.

### 6.2 Investitionskosten

Anhand der Bemessungen und Auslegung sowie der zeichnerischen Darstellung der Varianten wurden für die betrachteten Lösungen die Investitionskosten, unterteilt in die Kostengruppen Bau-, Maschinen- und E-/MSR-Technik, ermittelt.

Grundlage der eingesetzten Preise waren aktuelle Ausschreibungsergebnisse in vergleichbaren Projekten sowie Richtpreisangebote von Herstellern.

Als Baunebenkosten wurden 20 % der Netto-Investitionssumme angesetzt.

Da alle Varianten von einer verbesserten Wirkung der bestehenden Mehrschichtfiltration profitieren, wurde die Optimierung der Filtration (Austausch Filtermaterial) in allen Varianten bei den Investitionskosten berücksichtigt.

In nachfolgender Tabelle sind die Kosten zusammengestellt:

**Tabelle 1: Investitionskosten für die Varianten 1 bis 4**

Pos.-Nr	Text		Variante 1 PAK m. Rücklaufk.	Variante 2 PAK-Dosierung	Variante 3 GAK-Filtration	Variante 4 Ozonung
1	Bautechnik	EUR	303.050,00	45.188,00	414.948,56	255.448,56
2	Maschinentechnik	EUR	552.530,46	404.160,00	416.861,60	611.970,00
3	EMSR-Technik	EUR	194.000,00	162.000,00	251.000,00	215.000,00
<b>Summe Herstellungskosten, netto</b>		<b>EUR</b>	<b>1.049.580,46</b>	<b>611.348,00</b>	<b>1.082.810,16</b>	<b>1.082.418,56</b>
Nebenkosten (Ing.-Honoare, Prüfgebühr, usw.)		EUR	209.916,09	122.269,60	216.562,03	216.483,71
<b>Summe Baukosten, netto</b>		<b>EUR</b>	<b>1.259.496,55</b>	<b>733.617,60</b>	<b>1.299.372,19</b>	<b>1.298.902,27</b>
Mehrwertsteuer		EUR	199.420,29	116.156,12	205.733,93	205.659,53
<b>Summe Baukosten, brutto</b>		<b>EUR</b>	<b>1.458.916,84</b>	<b>849.773,72</b>	<b>1.505.106,13</b>	<b>1.504.561,80</b>
<b>Anteil</b>			<b>172%</b>	<b>100%</b>	<b>177%</b>	<b>177%</b>

Die Investitionskosten sind für Variante 2 (PAK-Dosierung) am günstigsten. Die drei anderen Varianten liegen alle auf einem vergleichbaren Niveau. Die Pulveraktivkohlevarianten (1 und 2) haben bautechnisch einen Kostenvorteil, da die beiden bestehenden Rührbehälter weitergenutzt werden können. Insbesondere für Variante 1 entfällt damit der Neubau eines Kontaktbeckens.

### 6.3 Betriebskosten

Für die Berechnung der Betriebskosten wurden folgende Werte mit dem Auftraggeber abgestimmt:

Elektrische Energie	0,15 EUR/kWh, netto
Sauerstoff inkl. Tankmiete	0,22 EUR/kg, netto
Verbrennung Schlamm	51,5 EUR/Mg, netto

Weitere Werte wurden wie folgt angenommen:

Personal	40.000 EUR/(MA·a)
Pulveraktivkohle	1.400 EUR/Mg, netto
Granulierte Aktivkohle	1.250 EUR/Mg, netto

Die Kosten für die Aktivkohlen entstammen aus aktuellen Ausschreibungsergebnissen (PAK) oder aus großtechnischen Betriebsversuchen (GAK). Derzeit sind noch Preise von 1.300 EUR/Mg, netto gängig. Eine Steigerung des Preises für Aktivkohle wird erwartet, daher wird für die Berechnung ein Preis von 1.400 EUR/Mg, netto angesetzt. Für die GAK wurde mit einer Schüttdichte von 400 kg/m<sup>3</sup> gerechnet. Kohlen mit diesen Schüttdichten wurden auch bei den Versuchen in Düren (Bornemann u. a. 2012) eingesetzt. Bei den Versuchen im KW „Obere Lutter“ wurde eine Kohle auf Braunkohlenbasis mit einer Schüttdichte von 300 kg/m<sup>3</sup> (Nahrstedt u. a. 2011) eingesetzt. Die Unterschiede in der Dichte haben erheblichen Einfluss auf die Verbrauchskosten. Bezogen auf das Volumen in anderen Projekten lagen die Kosten zwischen 450 und 500 EUR/m<sup>3</sup> Frischkohle, netto. Schröder und Grömping (2013) geben Werte zwischen 425 und 550 EUR/m<sup>3</sup>, netto für Frischkohle an. Mit einem Preis von 500 EUR/m<sup>3</sup> Kohle wird eine Kontrollrechnung durchgeführt.

Für alle verbrauchsgebundenen Kosten wurden die mittleren Verbrauchsmengen aus der Bemessung und Auslegung der Varianten herangezogen.

Für die Varianten 1 und 2 ist die Dosierung von Flockungs- bzw. Fällmitteln (Me-Salzen) notwendig. In Summe ist jedoch keine zusätzliche Menge notwendig, da die Dosierung der Fällmittel von der Belebung (Simultanfällung) in die Adsorptionsstufe verlagert wird. Insgesamt ergeben sich damit keine erhöhten Kosten für den Einsatz von Me-Salzen als Fäll- und Flockungsmittel. Wie die Anlage in Sindelfingen zeigt, ist mit einem Mehranfall an Schlamm zu rechnen. Zum einen ist dies die dosierte Pulverkohle. Zum anderen ist dies Schlamm, der aus den zusätzlich gefällten Stoffen (Phosphor, CSB, u. Ä.) gebildet wird. Hierfür wurde in der Betriebskostenermittlung ein Ansatz von 2,5 kg TS je kg Fe gewählt.

Bei Variante 1 ist in jedem Fall der Einsatz von Flockungshilfsmitteln notwendig, bei Variante 2 nur bedingt. Es wurden spezifische Kosten von 3.500 EUR/Mg Wirkstoff angesetzt. Bei Einsatzmengen von 0,28 Mg/a ergeben sich daraus Verbrauchskosten von rund 965 EUR, netto.

Für die Wartung und Instandhaltung wurden folgende Prozentsätze der Netto-Investitionskosten angesetzt:

Bautechnik:	1,0 % der Investitionskosten/a
Maschinentechnik:	4,0 % der Investitionskosten/a
E-/MSR-Technik:	2,0 % der Investitionskosten/a

Die ermittelten Kosten sind in **Tabelle 2** zusammengefasst. Die betriebsgebundenen Kosten beinhalten Personal- und Wartungs-/Instandhaltungskosten. Die verbrauchsgebundenen Kosten setzen sich aus den Energie-, den Chemikalien- und den Schlammentsorgungskosten zusammen.

**Tabelle 2: Betriebskosten für die Varianten 1 bis 4**

	Text		Variante 1 PAK m. Rücklaufk.	Variante 2 PAK-Dosierung	Variante 3 GAK-Filtration	Variante 4 Ozonung
B	Betriebsgebundene Kosten	EUR	60.814,06	47.829,94	51.012,74	57.599,94
C	Verbrauchsgebundene Kosten	EUR	31.603,91	48.135,82	65.912,75	31.954,68
	<b>Summe Betriebskosten, netto</b>	<b>EUR</b>	<b>92.417,97</b>	<b>95.965,76</b>	<b>116.925,49</b>	<b>89.554,63</b>
	Mehrwertsteuer: 19%	EUR	17.559,41	18.233,49	22.215,84	17.015,38
	<b>Summe Betriebskosten, brutto</b>	<b>EUR</b>	<b>109.977,39</b>	<b>114.199,25</b>	<b>139.141,33</b>	<b>106.570,01</b>
	<b>Anteil</b>		<b>103%</b>	<b>107%</b>	<b>131%</b>	<b>100%</b>

Die Betriebskosten liegen für die Varianten 1, 2 und 4 auf einem vergleichbaren Niveau von rund 106.000...115.000 EUR/a, brutto. Der Einsatz von GAK liegt mit ca. 139.000 EUR/a, brutto etwas darüber.

## 6.4 Jahreskosten

Die Jahreskosten wurden anhand folgender Vorgaben berechnet:

Betrachtungszeitraum	40 a
Nutzungsdauer Bautechnik	40 a
Nutzungsdauer Maschinentechnik	20 a
Nutzungsdauer E-/MSR-Technik	10 a
Zinssatz	3 %

**Tabelle 3: Jahreskosten für die Varianten 1 bis 4**

Pos.-Nr	Text		Variante 1 PAK m. Rücklaufk.	Variante 2 PAK-Dosierung	Variante 3 GAK-Filtration	Variante 4 Ozonung
A	Kapitalgebundene Kosten	EUR	87.590,53	57.734,62	90.475,40	92.867,84
B	Betriebsgebundene Kosten	EUR	60.814,06	47.829,94	51.012,74	57.599,94
C	Verbrauchsgebundene Kosten	EUR	31.603,91	48.135,82	65.912,75	31.954,68
<b>Summe Jahreskosten, netto</b>		<b>EUR</b>	<b>180.008,50</b>	<b>153.700,38</b>	<b>207.400,89</b>	<b>182.422,47</b>
Mehrwertsteuer: 19%		EUR	34.201,62	29.203,07	39.406,17	34.660,27
<b>Summe Jahreskosten, brutto</b>		<b>EUR</b>	<b>214.210,12</b>	<b>182.903,45</b>	<b>246.807,06</b>	<b>217.082,74</b>
<b>Anteil</b>			<b>117%</b>	<b>100%</b>	<b>135%</b>	<b>119%</b>

Die günstigsten Jahreskosten wurden für Variante 2 (PAK-Dosierung) mit ca. 183.000 EUR/a, brutto ermittelt. Die Varianten 1 (PAK mit Rücklaufkohle) und 4 (Ozonung) liegen etwa gleichauf (ca. 216.000 EUR/a, brutto). Die GAK-Filtration weist mit rund 247.000 EUR/a, brutto die höchsten Jahreskosten aus.

## 6.5 Sensitivitätsanalyse

Die Einflüsse von geänderten Verbrauchsmengen und deren spezifische Kosten auf die Betriebs- und damit Jahreskosten wurden untersucht. Hierbei sind die entscheidenden Parameter herauszuarbeiten und zu bewerten. Folgende Punkte werden betrachtet:

- Steigerung der Energiekosten (elektrisch) um 20 % auf 0,18 EUR/kWh, netto (0,21 EUR/kWh, brutto),
- Steigerung Bezugskosten für Aktivkohle (PAK bzw. GAK) und Flüssigsauerstoff um 10 %,
- Reduzierung Dosierung Pulverkohle und Ozon um 20 %,
- Erhöhung Filterstandzeit GAK-Filter um 20 % (Bettvolumen).

Die Steigerung des Bezugspreises für elektrische Energie um 20 % führt auch bei der energieintensivsten Variante 4 (Ozonung) zu einer Steigerung der Betriebskosten von rund 3,3 %. Die Kostensteigerung beträgt für diese Variante ca. 3.500 EUR, brutto. Bei den anderen Varianten liegen die Kostensteigerungen unter 2.300 EUR, brutto. Dies entspricht einer Steigerung von maximal 2,0 %. Bei Variante 3 (GAK) ist die Steigerung vom 1.600 EUR, brutto am geringsten. Bezogen auf die Jahreskosten beträgt die Steigerung 1,6 % bei Variante 4 und 0,6 bis 1,2 % bei den anderen Varianten.

Die Steigerung der Bezugskosten um 10 % für die Aktivkohlen und den Flüssigsauerstoff steigert die Betriebskosten der GAK-Filtration um 7.043 EUR, brutto, der PAK-Dosierung (Variante 2) um 3.944 EUR, brutto. Die Preissteigerung hat bei den Varianten 1 (PAK mit Rücklaufkohle) und der Variante 4 (Ozonung) mit rund 2.000 EUR, brutto weniger Einfluss. Bei den Betriebskosten ergibt sich so eine Steigerung von 5,1 % bei Variante 3 (GAK-Filtration) und 3,5 % bei Variante 2 (PAK). Die Varianten 1 und 4 liegen 1,8 % bzw. 1,9 % auf einem vergleichbaren Niveau. Bezieht man die Veränderung auf die Jahreskosten, so ergeben sich nachstehende Werte: 2,9 % bei Variante 3; 2,2 % bei Variante 2 sowie 0,9 % bei den Varianten 1 und 4.

Die Veränderung der Dosiermengen um etwa 20 % hat erhebliche Einflüsse auf die Betriebskosten. Bei Variante 3 (GAK-Filtration) würden durch die Erhöhung der durchgesetzten Bettvolumina von 10.000 auf 12.000 die Betriebskosten um ca. 12.000 EUR, brutto (8,4 %) sinken. Bei der Variante 2 (PAK) würden sich Einsparungen von rund 8.200 EUR, brutto (7,2 %) ergeben. Die Reduzierung der Ozondosierung von 7 mg/l auf 5,8 mg/l verringert die Betriebskosten der Variante 4 um rund 6.900 EUR, brutto (6,5 %). Bei Variante 1 ergeben sich Einsparungen von rund 4.100 EUR, brutto (3,7 %).

Es zeigt sich, dass besonders die Verringerung der Betriebsmittel großen Einfluss auf die Betriebskosten der Varianten hat. Bei Verfahren mit im Vergleich geringen Dosiermengen (PAK mit Rücklaufkohle) ist die Auswirkung geringer. Die Variante 3 (GAK-Filtration) zeigt eine sehr starke Abhängigkeit bei Veränderungen der durchgesetzten Bettvolumina und bei Kostensteigerungen. Dieses Verfahren weist immer die höchsten Betriebskosten auf. Relativ stabil in Bezug auf die angenommenen Kostensteigerungen verhält sich die Ozonung, obwohl sie den höchsten Energieverbrauch aufweist.

Zu beachten ist, dass die genauen Einsatzmengen nicht exakt vorausgesagt werden können. Sie sind abhängig vom Reinigungsziel, aber auch beispielsweise von der CSB-Fraktion im Ablauf der Nachklärung.

## 7 Bewertung

Neben den Kosten sind noch weitere Kriterien, wie Reinigungsleistung, Betriebssicherheit, Bildung von Abbauprodukten, Betriebs- und Wartungsaufwand, Sensitivität bei Kostensteigerungen für die Bewertung der Varianten wichtig. In der nachfolgenden Bewertungsmatrix wurden diese Kriterien zusammengestellt und gewichtet. Die Variante mit der jeweils höchsten Punktzahl ist als Vorzugsvariante anzusehen.

**Tabelle 4: Bewertungsmatrix für die Varianten 1 bis 4**

Kriterium	Wichtung	Wertung							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		PAK m. Rücklaufk. Punkte	gewichtet	PAK-Dosierung Punkte	gewichtet	GAK-Filtration Punkte	gewichtet	Ozonung Punkte	gewichtet
Jahreskosten	0,40	3	1,2	4	1,6	2	0,8	3	1,2
Reinigungsleistung $P_{ges}/CSB$ (zusätz. Reduk.)	0,16	4	0,64	4	0,64	4	0,64	2	0,32
Bildung Nebenprodukte	0,06	5	0,3	5	0,3	5	0,3	3	0,18
Erfahrungen/Referenzen	0,06	5	0,3	3	0,18	3	0,18	4	0,24
Betriebs- und Wartungsaufwand	0,06	3	0,18	3	0,18	5	0,3	4	0,24
Betriebssicherheit	0,06	4	0,24	3	0,18	5	0,3	4	0,24
Sensitivität Kostensteigerungen	0,14	4	0,56	3	0,42	2	0,28	3	0,42
CO <sub>2</sub> -Bilanz	0,06	4	0,24	4	0,24	4	0,24	4	0,24
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>	<b>32</b>	<b>3,66</b>	<b>29</b>	<b>3,74</b>	<b>30</b>	<b>3,04</b>	<b>27</b>	<b>3,08</b>

Wertung nach Punkten                      1 = ungenügend  
(steigende Punkte → bessere Wertung)      5 = sehr gut

Die **Jahreskosten** werden mit einer Wichtung von 40 % als wichtigstes Entscheidungskriterium eingestuft. Die Jahreskosten sind bei Variante 2 (PAK-Dosierung) am geringsten, bei der Variante 3 (GAK-Filtration) am teuersten. Variante 2 bekommt aufgrund der geringen Kosten vier Punkte und Variante 3 zwei Punkte. Die Jahreskosten der Variante 1 (PAK mit

Rücklaufkohle) und 4 (Ozonung) liegen auf etwa einem Niveau dazwischen. Sie kommen daher jeweils auf drei Punkte.

Die **Reinigungsleistung**  $P_{ges}$  und **CSB** wurde in Ochtrup mit 16 % gewichtet. Sehr gute Ergebnisse hat hier die Variante 1 (PAK mit RLK) in Sindelfingen für  $P_{ges}$  erzielt. Bei Variante 2 dürften ähnliche Ergebnisse zu erwarten sein, jedoch belastet der zusätzlich gebildete Fällschlamm die Filtration zusätzlich. Gegebenenfalls ist durch GAK als zweite Filterstufe noch ein zusätzlicher Partikelrückhalt zu erwarten; dadurch könnte auch der partikulär gebundene Phosphor reduziert werden.

Bei den Aktivkohlevarianten ist eine Elimination des CSB zwischen ca. 30 % bei den PAK-Varianten und bis zu 45 % bei der GAK-Filtration möglich. Bei der Ozonung ist kein Einfluss auf die CSB- und  $P_{ges}$ -Konzentration zu erwarten.

Daher werden an die Aktivkohlevarianten 4 Punkte vergeben. Die Ozonung wird mit 2 Punkten bewertet.

Die Reinigungsleistung in Bezug auf die Spurenstoffe wird für alle Varianten gleich eingestuft, daher wird sie als Kriterium hier nicht herangezogen. Der Einsatz der Betriebsmittel wurde so gewählt, dass alle Varianten eine vergleichbare Elimination erzielen.

Die **Bildung von Transformationsprodukten** ist beim Einsatz von oxidativen Verfahren wie dem Ozon gegeben. In Versuchen wurde die Bildung bestätigt. Durch eine nachgeschaltete biologische Stufe können diese Produkte wieder abgebaut werden. Die Untersuchungen in Regendorf zeigten, dass ein Sandfilter ausreicht. Auch in der Trinkwasseraufbereitung werden biologisch aktivierte Filter (z. B. GAK) der Ozonung aus diesem Grund nachgeschaltet. Dies erfolgt auch in der vierten vorgestellten Variante. Um der besonderen Bedeutung dieses Punktes Rechnung zu tragen, wurde die Ozonung hier mit drei Punkten bewertet und alle anderen Verfahren, bei denen keine Abbauprodukte entstehen können, mit fünf Punkten.

Für die vorgestellten Varianten ist die Situation hinsichtlich **Erfahrungen und Referenzen** unterschiedlich. Für die Variante 1 (PAK mit Rücklaufkohle), die bislang in Baden-Württemberg bevorzugt umgesetzt wurde, liegen derzeit schon sehr gute Erfahrungen vor. Derzeit sind Anlagen bis 1.000 l/s in Betrieb. Größere sind in Planung. Daher werden hier fünf Punkte vergeben. Auch für die Ozonung liegen schon einige Erfahrungen aus Referenzanlagen vor (z. B. Regensburg, Duisburg-Vierlingen, Bad Sassendorf). Insgesamt ist die Referenz- und Erfahrungslage jedoch geringer als bei der PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle. Daher werden vier Punkte vergeben. Für die PAK-Dosierung und die GAK-Filtration liegen Erfahrungen aus großtechnischen Versuchen vor. Die Bewertung liegt bei diesen Varianten jeweils bei drei Punkten.

Der **Betriebs- und Wartungsaufwand** ist für den Betrieb der Kläranlage ein wichtiger Punkt. Hier wurden die GAK-Filtration und die Ozonung mit jeweils vier Punkten am besten bewertet. Eine höhere Punktzahl wurde nicht vergeben, da zum einen der regelmäßige Wechsel der granulierten Kohle bei Variante 4 einen erhöhten Betriebsaufwand nach sich zieht. Die Ozonung stellt aufgrund der Komplexität der Erzeugungsanlage schon einen besonderen Betriebspunkt auf der Kläranlage dar. Die Varianten mit der Aktivkohledosierung werden mit drei Punkten schlechter eingestuft. Der Betriebsaufwand ist größer als bei der GAK-Filtration

und der Ozonung. Die Erfahrungen zeigen jedoch, dass die Dosierung von Pulveraktivkohle mit hoher Genauigkeit und vertretbarem Betriebsaufwand erfolgen kann.

Beim Punkt **Betriebssicherheit** wird das Verhalten des Verfahrens beim Ausfall eines Aggregates bewertet. Auch inwieweit durch redundante Anlagenteile ein Weiterbetrieb und die Einhaltung der Reinigungsziele möglich ist. Die Auswirkungen auf weitere Anlagenteile werden in die Beurteilung einbezogen. Die höchste Betriebssicherheit weist die GAK-Filtration auf. Die Anlage mit vier Filterkammern ist sehr stabil zu betreiben. Weiterhin ist keine Dosierung erforderlich. Als nachgeschaltete Stufe beeinflusst sie nicht die bestehende Filtration, sondern erhöht als zweite Stufe sogar deren Betriebssicherheit. Mit vier Punkten wird Variante 1 bewertet. Aufgrund der verschiedenen Aggregate und Pumpen, die für die Dosierung von PAK, Me-Salzen und Flockungshilfsmittel sowie die Rücklaufkohleförderungen erforderlich sind, wird die Betriebssicherheit etwas schlechter als bei der GAK-Filtration bewertet. Bei Ausfall der PAK-Dosierung erfolgt weiterhin die Spurenstoffelimination, da durch den Rücklaufstrom der Zulauf weiterhin mit Aktivkohle behandelt wird. Die Variante 4 (Ozonung) wird mit vier Punkten bewertet. Die Erfahrungen des Betriebspersonals auf der Kläranlage Ochtrup zeigten, dass die bestehende Anlage in den vergangenen 20 Jahren zuverlässig gearbeitet hat. Die Betriebssicherheit der Variante 2 wird am schlechtesten bewertet. Bei Ausfall der PAK-Dosierung ist die Wirkung in Bezug auf die Spurenstoffelimination nur noch sehr eingeschränkt gegeben (Kohle in den Kontaktbehältern). Die Abtrennung der Kohle erfolgt in der nachgeschalteten Mehrschichtfiltration. Dies bedeutet, dass diese Stufe zusätzlich belastet wird. Die zusätzliche Belastung der Filtration mit Feststoffen in Variante 2 liegt noch im empfohlenen Rahmen. Durch die Optimierung der bestehenden Filtration (Filteraufbau, Filterregelung) kann hier noch eine Verbesserung erzielt werden. Variante 2 wird mit 3 Punkten bewertet.

Die **Sensitivität** gegenüber Kostensteigerungen bei den Betriebsmitteln ist über die Laufzeit der Anlage zu betrachten. Hier zeigen die Variante 1 (PAK mit Rückführung) die geringsten Einflüsse auf Kostensteigerungen. Sie wird daher mit 4 Punkten bewertet. Variante 2 besitzt aufgrund der höheren PAK-Dosierung eine größere Sensitivität bei den Betriebskosten und erhält daher 3 Punkte. Die Ozonung (Variante 4) hat ebenfalls eine mittlere Sensitivität gegenüber Kostensteigerungen bei den Betriebsmitteln. Die Bewertung erfolgt ebenfalls mit 3 Punkten. Die GAK-Filtration reagiert am empfindlichsten auf Kostensteigerungen. Daher werden hier 2 Punkte vergeben.

In letzter Zeit ist die **Nachhaltigkeit (CO<sub>2</sub>-Emissionen)** von Verfahren gerade auch bei der vierten Reinigungsstufe immer stärker in den Fokus gerückt. Die Bewertung ist derzeit noch schwierig, da entsprechend weitreichende Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann noch keine eindeutige Bewertung abgegeben werden (Palmowski u. a. 2011). Vor diesem Hintergrund werden alle Verfahren mit 4 Punkten bewertet.

In der **Summe** schneidet Variante 2 (PAK-Dosierung) mit 3,74 Punkten am besten ab. Dicht gefolgt von Variante 1 (PAK mit Rückführung) mit 3,66 Punkten. Die Ozonung (Variante 4) und Variante 3 (GAK-Filtration) liegen 3,08 Punkte bzw. 3,04 Punkte auf einem vergleichbaren Niveau.

## 8 Zusammenfassung

Im Rahmen der Studie zur Ertüchtigung und Erweiterung der Kläranlage Ochtrup in Bezug auf die Elimination von anthropogenen Spurenstoffen (4. Reinigungsstufe) wurden folgende vier Verfahrensvarianten untersucht, die mit dem Auftraggeber abgestimmt wurden:

- Variante 1: Pulverkohledosierung mit Rücklaufkohle,
- Variante 2: Pulverkohledosierung,
- Variante 3: Nachgeschaltete GAK-Filtration,
- Variante 4: Ozonung.

Die ausgewählten Varianten wurden auf ihre Umsetzbarkeit geprüft und zeichnerisch in Lageplanausschnitten sowie in einem Fließbild dargestellt. Basierend auf den Abschätzungen der Betriebs- und Investitionskosten wurden die Jahreskosten ermittelt. Die Bewertung der einzelnen Varianten erfolgte anhand einer Entscheidungsmatrix, in der neben den Jahreskosten noch weitere Kriterien berücksichtigt wurden. Maximal konnte eine Punktzahl von 5 Punkten erreicht werden.

Die höchste Punktzahl erreicht Variante 2 (PAK-Dosierung) mit 3,74 Punkten; dicht darauf folgt Variante 1 (PAK mit Rücklaufkohle) mit 3,66 Punkten. Die Ozonung (Variante 4) kommt auf den dritten Rang mit 3,08 Punkten. Die Variante 3 (GAK-Filtration) liegt mit 3,04 Punkten auf dem vierten Platz.

Bei den Jahreskosten liegt Variante 2 (PAK-Dosierung) aufgrund der geringen kapitalgebundenen Kosten mit 183.000 EUR, brutto vorn. Bei dieser Variante sind die geringsten Investitionen (Baukosten) zu tätigen. Die Varianten 1 (PAK mit Rücklaufkohle) und 4 (Ozonung) liegen mit 214.000 EUR, brutto bzw. 217.000 EUR, brutto etwa auf einem Niveau. Die Variante 3 (GAK-Filtration) kommt mit 247.000 EUR, brutto auf höhere Jahreskosten.

Die Pulveraktivkohlevarianten profitieren davon, dass die bestehenden Rührbehälter als Kontaktbehälter weitergenutzt werden können. Weiterhin kann die bestehende Fällmitteldosieranlage nach Ertüchtigung weitergenutzt werden. In den Investitionskosten wurde angenommen, dass für die Aktivkohle-Varianten ein neues Silo erstellt wird. Bei Variante 2 (PAK-Dosierung) besteht die Möglichkeit, dass das vorhandene Silo weitergenutzt und ertüchtigt wird. Die bestehende Dosiertechnik des Silos wird jedoch komplett ausgetauscht. Die daraus resultierenden Einsparpotenziale bei den Investitionskosten für Variante 2 werden geprüft und sind hier noch nicht berücksichtigt. Bei Variante 1 befindet sich das bestehende Silo im Baufeld des Absetzbeckens.

Gerade Variante 2 kann aufgrund der bestehenden Anlagentechnik relativ einfach auf der Kläranlage implementiert werden. Damit erreicht es in der Bewertung den ersten Rang. Hinsichtlich der Kostensteigerung der Betriebsmittel ist dieses Verfahren aufgrund der höheren Dosiermenge empfindlicher als Variante 1.

Variante 1 (PAK mit Rücklaufkohle) lag in der Bewertungsmatrix auf dem zweiten Rang. Sie stellt das derzeit verbreitetste Verfahren zur Spurenstoffelimination dar (in Baden-Württemberg derzeit sieben Anlagen in Betrieb, weitere in Planung und Bau).



Die Ozonung (Variante 4) lag in der Bewertungsmatrix auf dem hinteren Platz. Die Jahreskosten dieses Verfahrens sind stark von der angewandten Ozondosis abhängig. In der Berechnung wurde derzeit von einer vergleichsweise hohen Dosis ausgegangen. Sollte sich zeigen, dass diese reduziert werden kann, so wird dieses Verfahren wirtschaftlich interessant. Die weiteren Forschungsergebnisse hinsichtlich der Bildung von Transferprodukten sollten in die Entscheidungsfindung einfließen.

Die GAK-Filtration (Variante 3) ist aufgrund der hohen kapital- und verbrauchsgebundenen Kosten auf dem letzten Rang. Für dieses Verfahren spricht die hohe Betriebssicherheit. Die relativ geringe prognostizierte Standzeit der Aktivkohle im Filter führt zu den hohen Verbrauchskosten. Die GAK-Filtration ist gegenüber Kostensteigerungen am anfälligsten. Durch Versuche am Standort Ochtrup könnte geprüft werden, ob die angenommenen Standzeiten realistisch sind oder sich gegebenenfalls günstigere Werte ergeben.

Aufgrund der vorhandenen Anlagentechnik sollten sich die weiteren Untersuchungen in Ochtrup auf die Varianten 2 (PAK-Dosierung) und 1 (PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle) konzentrieren.