

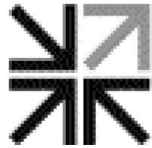
Kommunalbetriebe  
Emmerich am Rhein

## **Kläranlage Emmerich**

### **4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen**

Machbarkeitsstudie - Kurzbericht  
Oktober 2014  
Projektnummer 1217 001





Kommunalbetriebe  
Emmerich am Rhein

# **Kläranlage Emmerich**

## **4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen**

Machbarkeitsstudie - Kurzbericht  
Oktober 2014  
Projektnummer 1217 001

Bearbeitet durch:  
Dr.-Ing. Jan Mauriz Kaub  
Dipl.-Ing. Norbert Biebersdorf  
M.Sc. Fernando Urueta

Aufgestellt:  
Bochum, im Oktober 2014

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Veranlassung und Aufgabenstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Anlagenbestand .....</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Darstellung der untersuchten Verfahrenskombinationen .....</b>	<b>2</b>
3.1	Beschickungsmenge .....	2
3.2	Verfahrensfestlegung .....	3
3.3	Varianten.....	3
3.3.1	Variante 1: PAK mit Rücklaufkohle .....	3
3.3.1.1	Allgemein .....	3
3.3.1.2	Ausführung.....	4
3.3.2	Variante 2: Filtration über granulierte Aktivkohle.....	6
3.3.2.1	Allgemeines.....	6
3.3.2.2	Ausführung.....	7
3.3.3	Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Sandfilter .....	8
3.3.3.1	Allgemeines.....	8
3.3.3.2	Ausführung.....	9
3.3.4	Variante 4: Ozonung mit nachgeschaltetem biologisch aktiviertem Aktivkohlefilter .....	9
3.3.4.1	Allgemeines.....	9
3.3.4.2	Ausführung.....	10
3.4	Ergebnisübersicht Varianten.....	12
<b>4</b>	<b>Kosten.....</b>	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>Bewertung.....</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>15</b>

## 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 sogenannte „Watch-List“ 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 Stadt Emmerich hat die TUTTAHS & MEYER Ing.-GmbH beauftragt, für die Kläranlage Emmerich eine solche Studie auszuarbeiten.

Mit der Studie soll eine Entscheidungsgrundlage geschaffen werden, um die Auswahl eines möglichen Verfahrens durch die Stadt Emmerich am Rhein 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 Blockfließschema.
- 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 Anlagenbestand

Die Kläranlage Emmerich weist eine Ausbaugröße von 195.000 EW auf. Der Vorfluter der Anlage ist der Rhein. Die Anlage gliedert sich in eine mechanische und eine biologische Reinigungsstufe. Der anfallende Schlamm wird anaerob in einer mesophilen Faulung stabilisiert. Der entwässerte Schlamm aus der Schlammbehandlung wird thermisch verwertet.

### 3 Darstellung der untersuchten Verfahrenskombinationen

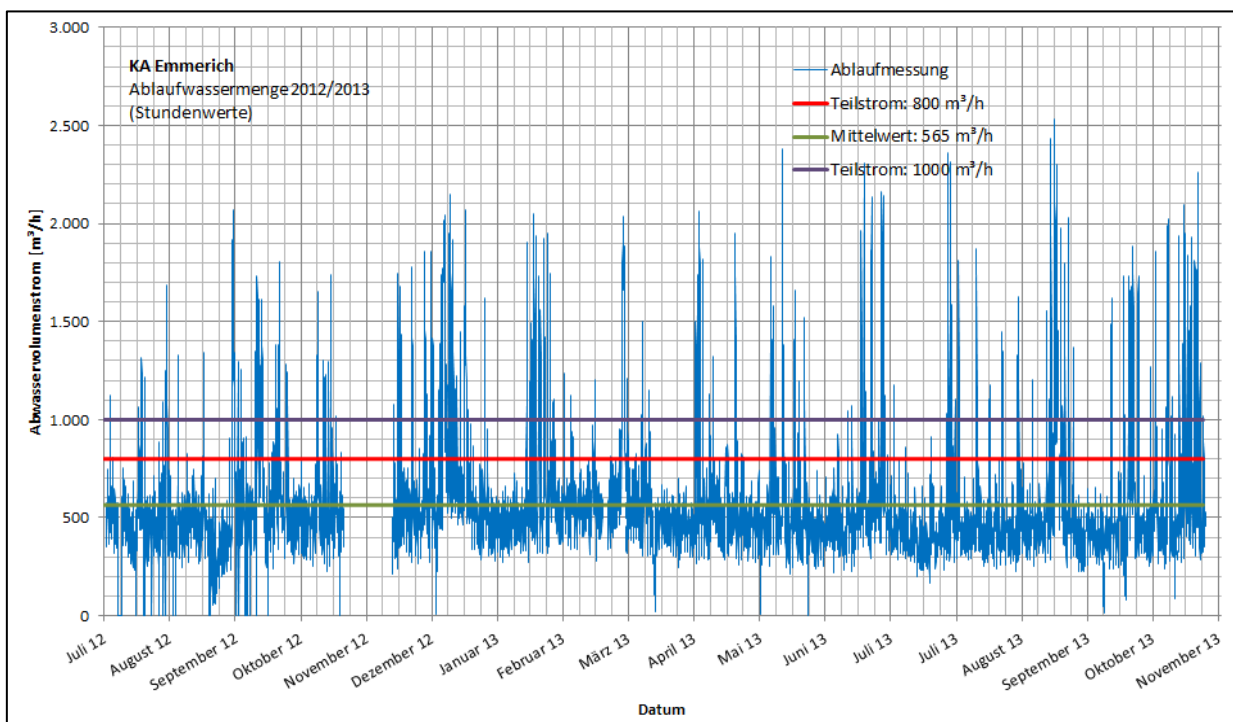
#### 3.1 Beschickungsmenge

Im Hinblick auf eine wirtschaftliche Auslegung der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination ist eine Betrachtung zur Teilstrombehandlung erforderlich. Der Teilstrom wird so gewählt, dass ein Großteil der jährlichen Abflusssituationen darüber abgedeckt wird. Zudem muss sichergestellt sein, dass eine ausreichende Spurenstoffelimination in der Gesamtanlage (bestehende Anlage + 4. Reinigungsstufe) erfolgt.

Für eine Vollstrombehandlung müsste auf der Kläranlage Emmerich eine Kapazität zur Behandlung von 2.800 m<sup>3</sup>/h vorgehalten werden. Die Auswertung der Abwassermengen zeigt jedoch deutlich, dass bereits Abwassermengen > 1.400 m<sup>3</sup>/h an weniger als 2 % Stunden im betrachteten Zeitraum überschritten werden.

Bei einem Teilstrom von maximal **800 m<sup>3</sup>/h** wird eine Abwassermenge von **4.377.846 m<sup>3</sup>/a** in der 4. Reinigungsstufe behandelt. Unter den gewählten Ansätzen kann somit eine Elimination von 79% erreicht werden. Die Verfahrensstufe kann so bei einer Behandlung im Vergleich zur Vollstrombehandlung um 70 % kleiner ausgeführt werden. Bei einem Teilstrom von **1.000 m<sup>3</sup>/h** beliefte sich die Behandlungsmenge auf **4.541.428 m<sup>3</sup>/a**. Dies sind ca. 94% der berechneten Jahresabwassermengen.

Im Verhältnis der erreichbaren Wirkungsgrade von 79 % oder 85 % wird die Teilstrombehandlung mit einem Volumenstrom von **800 m<sup>3</sup>/h** als geeignet betrachtet, so dass die Bemessung und der Verfahrenvergleich auf Grundlage dieser Bemessungswassermenge beruhen.



**Bild 1: Behandelte Abwassermenge in Abhängigkeit des Bemessungszuflusses der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination**

## 3.2 Verfahrensfestlegung

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie werden die folgenden vier Verfahrenskombinationen untersucht:

1. **Pulverkohle mit Rücklaufkohleführung.** Abtrennung der PAK in einem Absetzbecken und in der nachgeschalteten Tuchfiltration,
2. **Filtration über granulierten Aktivkohle.** Festbettadsorber werden der bestehenden Anlage nachgeschaltet,
3. **Ozonung mit Sandfilter.** Ablauf der Nachklärung wird mit Ozon behandelt und anschließend über einen kontinuierlichen Sandfilter als biologisch aktive Stufe geführt,
4. **Ozonung mit biologisch aktiviertem Aktivkohlefilter.** Ablauf der Nachklärung wird mit Ozon behandelt und anschließend durch einen Festbettadsorber geleitet, der als biologisch aktive Stufe fungiert.

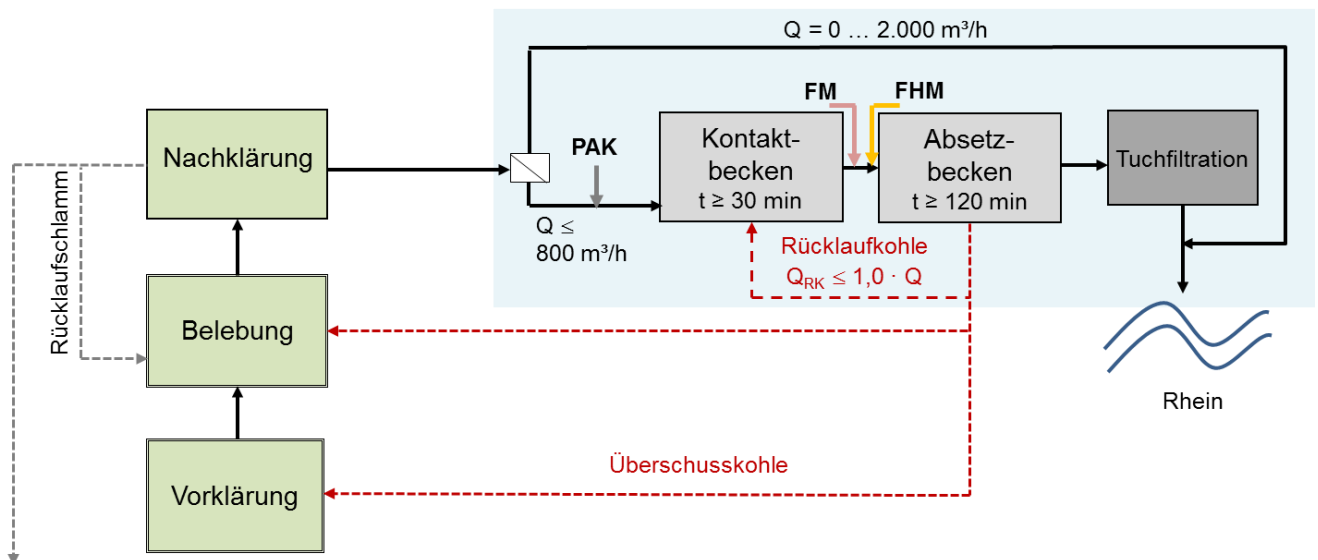
## 3.3 Varianten

### 3.3.1 Variante 1: PAK mit Rücklaufkohle

#### 3.3.1.1 Allgemein

Dieses Verfahren wurde 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. In 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 auszunutzen zu können.

Für die Kläranlage Emmerich würde dies bedeuten, dass ein Kontakt- und ein Absetzbecken sowie eine Filtration gebaut werden müssen. Weiterhin ist ein Silo einschließlich der Dosiertechnik für die Pulveraktivkohle notwendig. Fällmittel wird über die bestehende Anlage bezogen. In der Station ist ausreichend Platz um eine zusätzliche Dosierpumpe nachzurüsten.



**Bild 2: Blockschema Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle**

Diese Variante hat neben der Elimination der Spurenstoffe auch einen großen Einfluss auf die Parameter CSB,  $P_{ges}$  und abfiltrierbare Stoffe im Teilstrom. Insgesamt ist davon auszugehen, dass auch bei diesen Parametern deutlich geringere Ablaufwerte zu erwarten sind. Zu beachten ist, dass jeweils immer nur ein Teilstrom von maximal  $800 \text{ m}^3/\text{h}$  behandelt wird.

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.

Bei dieser Variante erhöht sich der Schlammanfall der Kläranlage. Nach Erfahrungen von bereits in Baden-Württemberg realisierten Anlagen setzt sich der in dieser Stufe anfallende Schlamm zu jeweils einem Drittel aus Aktivkohle, Organik und anorganischen Fällprodukten zusammen.

### 3.3.1.2 Ausführung

#### Kontaktbecken und Absetzbecken

Für die Sedimentationsstufe ist ein horizontal durchströmtes Absetzbecken (Rundbecken) vorgesehen. Das Kontaktbecken wird als umlaufendes Gerinne mit einer Breite von 2 m um das Sedimentationsbecken angeordnet. Das Kontaktbeckenvolumen beträgt  $637 \text{ m}^3$  und die Aufenthaltszeit 30 min.

Das Absetzbecken wird mit einem Innendurchmesser von 24 m ( $D_a = 24,80 \text{ m}$ ) ausgeführt. Das Becken wird mit einem Rundräumer ausgerüstet. Die Oberfläche beträgt  $433 \text{ m}^2$  und das Volumen  $1.688 \text{ m}^3$ . Die Beckentiefe ( $h_{2/3}$ ) liegt bei 3,90 m.

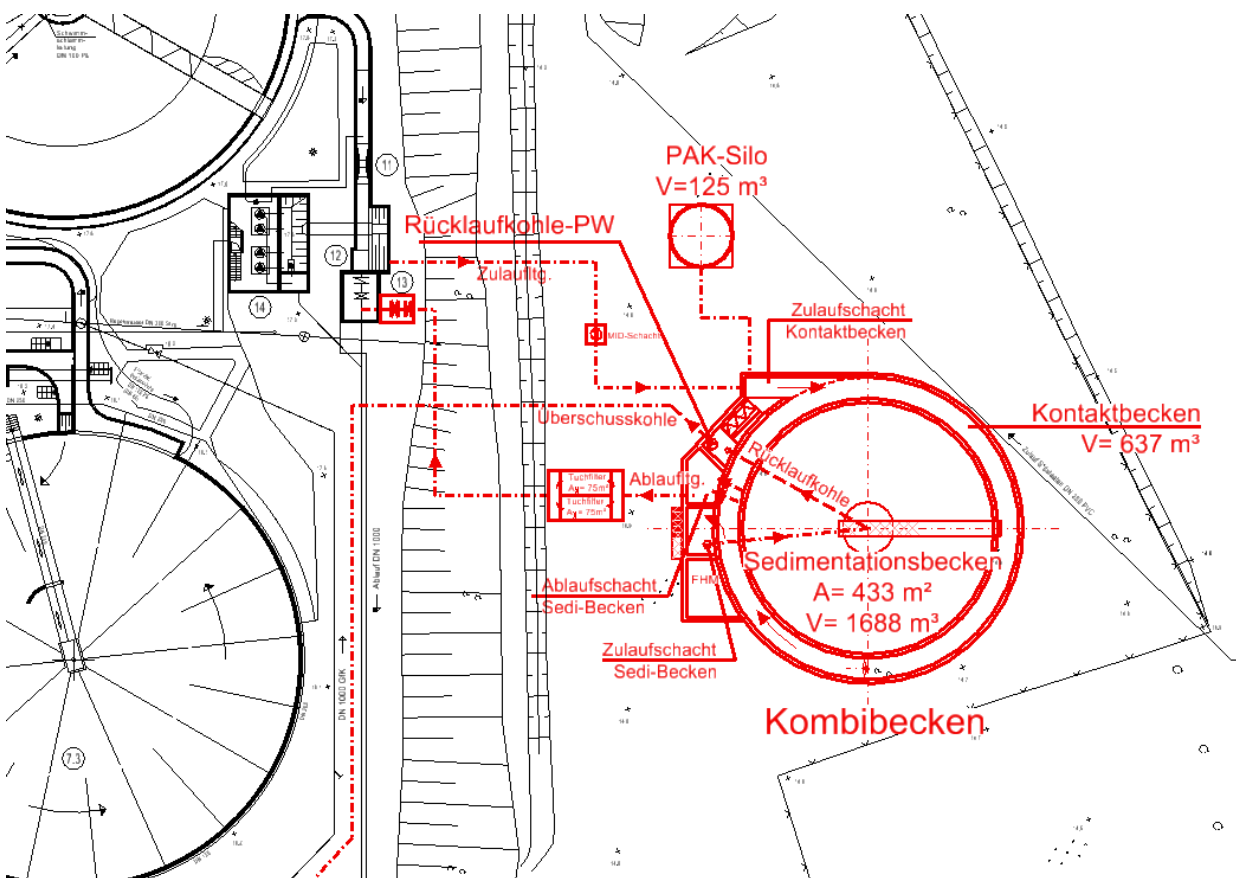
An der Beckenperipherie wird die Rücklaufkohlepumpe (Schneckenpumpwerk) angeordnet. Diese fördert die Rücklaufkohle wieder in den Zulauf vor dem Kontaktbehälter zurück. Die Überschusskohle wird über eine weitere Pumpe aus dem Schacht entnommen und zur Vorklärung (oder zur Belebung) geleitet. Es wird mit einem Rücklaufkohleverhältnis von 1 gerechnet.

Dem Absetzbecken wird eine zweistraßige Filtrationsstufe zur Suspensa-Restentfernung nachgeschaltet. Es wird hier eine Tuchfiltration mit 15 Scheiben à 5 m<sup>2</sup> vorgesehen. Damit ergibt sich eine Gesamtfiltrationsfläche von 75 m<sup>2</sup> pro Straße. Die Tuchfiltration wurde in Bezug auf die Abtrennung von Aktivkohle in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht. Derzeit wird auf der Kläranlage Lahr die erste Anlage im technischen Maßstab umgesetzt. Vorteile der Tuchfiltration sind der geringe Platzbedarf und die geringen Energiekosten im Betrieb (Rückspülung und hydraulische Verluste) gegenüber Raumfiltern. Zu beachten ist, dass die Filtertücher in regelmäßigen Abständen (ca. 5 a) erneuert und jährlich einer Intensiv-Reinigung unterzogen werden müssen.

Der Ablauf der Tuchfilter wird über ein Gerinne wieder in die Ablaufleitung der Kläranlage zurückgeführt.

Das Silo zur Lagerung der Aktivkohle mit einem Inhalt von 125 m<sup>3</sup> wird im hinteren Bereich der rechten Beckenhälfte angeordnet. Das Silo verfügt über zwei Dosiergeräte. Das Treibwasser (5 bis 7 m<sup>3</sup>/h je Dosiergerät) für die PAK-Dosierung wird über eine gesonderte Pumpe aus dem Filtrat der 4. Reinigungsstufe entnommen.

Als Flockungsmittel wird die Dosierung von FeCl<sub>3</sub> vorgesehen. Das Fällmittel wird der bestehenden Anlage auf der Kläranlage entnommen. Die bestehende Dosieranlage wird dazu um eine zusätzliche Dosierpumpe erweitert. Die Bereitungsanlage für das Flockungshilfsmittel wird neben dem Zulaufschacht der Sedimentation errichtet und mit einer Einhausung versehen.



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



### 3.3.2 Variante 2: Filtration über granulierte Aktivkohle

#### 3.3.2.1 Allgemeines

Der ausgewählte Teilstrom (Ablauf Nachklärung) von maximal 800 m<sup>3</sup>/h wird über die Aktivkohlefilter geführt.

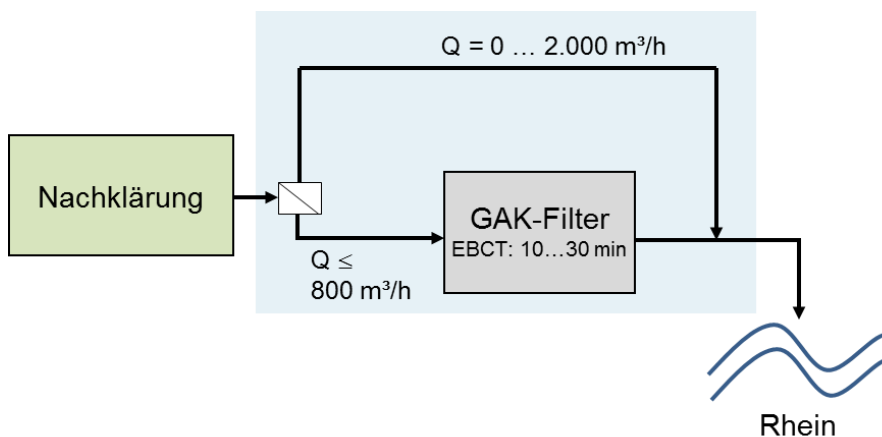
Die Filterstufe wird anhand folgender Bemessungsparameter ausgelegt:

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

Folgende Werte wurden gewählt:

Anzahl Filter:	6 Stück
Bethöhe GAK:	2,5 m
Leerbettkontaktzeit (EBCT):	30 min
Filterfläche gesamt:	160 m <sup>2</sup>

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 kompaktes Bauwerk realisiert werden kann.



**Bild 4: Blockscheema Variante 2: GAK-Filtration**

Zu beachten ist, dass die Aktivkohlefilter neben der adsorptiven Wirkung auch Suspensa zurückhalten. Daher wird von einer täglichen Spülung der Filter ausgegangen.

Die Rückspülgeschwindigkeiten sind geringer als bei Mehrschichtfiltern.

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

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

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

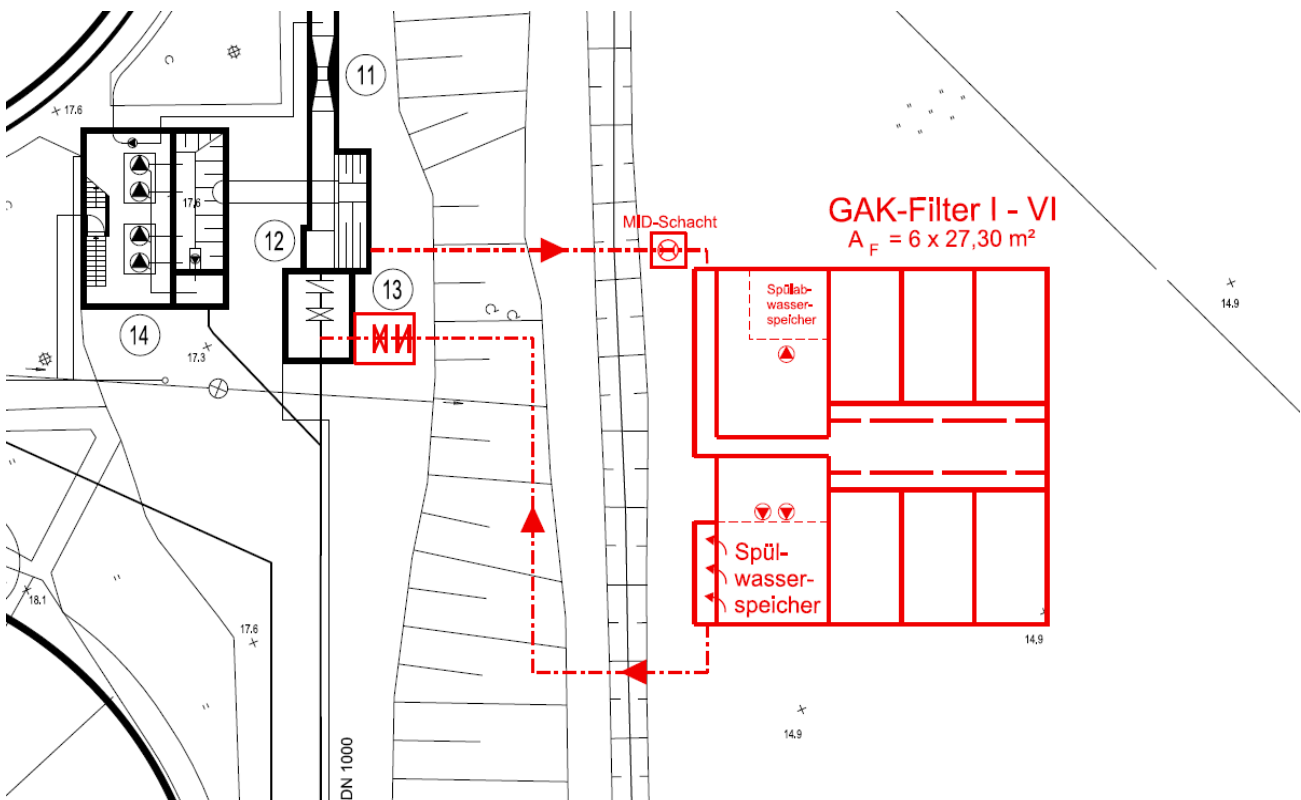
Die Standzeit der granulierten Aktivkohle in den Filtern wird mit 8.000 Bettvolumina (BV) angesetzt. Dieser Wert ist vergleichsweise günstig für das Verfahren gewählt, wenn man bedenkt, dass die Adsorption der Spurenstoffe in Konkurrenz zur Restorganik erfolgt, die noch im Ablauf der Nachklärung enthalten ist.

### 3.3.2.2 Ausführung

Der Klarwasserstrom wird im bestehenden Ablaufschacht mittels eines Schälblechs geteilt, wobei ein Teilstrom von rund 800 m<sup>3</sup>/h der 4. Reinigungsstufe zugeführt wird.

Der Filterblock besteht aus sechs abwärtsdurchströmten offenen Filtern. Jede Filterkammer weist eine Fläche von 26,67 m<sup>2</sup> auf. Die Abmessungen einer Filterkammer liegen bei einer Breite von 3,9 m und einer Länge von 7 m.

Der Zulauf zu den sechs Filtern erfolgt aus einem offenen Gerinne. Über mit Schiebern versehene Öffnungen im Gerinne fließt das Wasser in die Filterkammern. Die Gleichverteilung des Zulaufs auf alle in Betrieb befindlichen Filterkammern wird über die Schwellen an der Stirnseite der Filter realisiert.



**Bild 5: Lageplanausschnitt Variante 2: GAK-Filtration**

### 3.3.3 Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Sandfilter

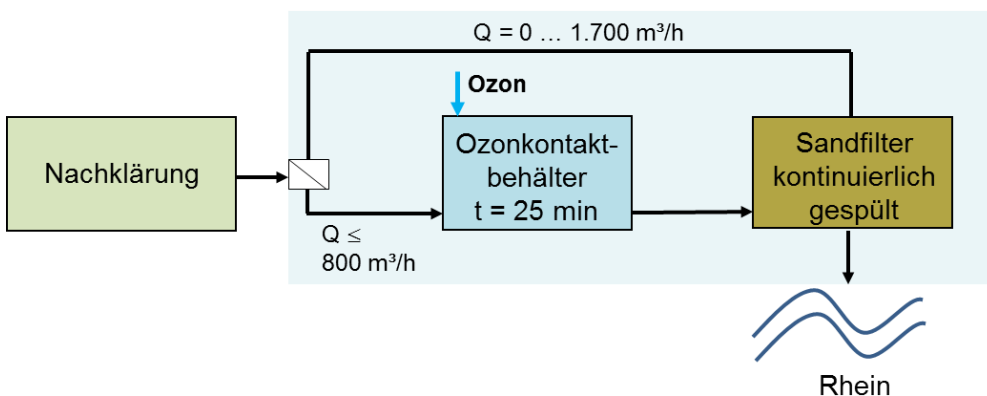
#### 3.3.3.1 Allgemeines

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 Abegglen 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). Die Ozonung wird daher vor der bestehenden Filtration angeordnet. Im konkreten Fall wird der Ozonung ein kontinuierlich gespülter Sandfilter nachgeschaltet. Die Ozonung wird anhand folgender Bemessungsparameter ausgelegt:

Ozondosis: 2...10 g/m<sup>3</sup>

Kontaktzeit im Reaktionsbehälter: 10...30 min



**Bild 6: Blockschema Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Filter**

Folgende Werte wurden gewählt:

Anzahl Kontaktbehälter: 2 Stück

Wassertiefe Kontaktbehälter: 6 m

Die Berechnung der mittleren Ozondosis wurde anhand der CSB-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung bestimmt. Im Mittel kann hier ein CSB-Wert von 30,73 mg/l (Betriebsdaten 2013) 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 10,24 mg/l. Die großtechnischen Versuche in Regensdorf (Abegglen u. a. 2009) kamen zu dem Ergebnis, dass eine Dosis von 0,62 mg O<sub>3</sub>/mg DOC hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Wirkung ein Optimum darstellte. Dieser Wert wurde hier übernommen.

Damit ergibt sich die mittlere Ozondosis zu:

$$c_{O_3,a} = 10,24 \text{ mg DOC/l} \cdot 0,62 \text{ mg O}_3/\text{mg DOC} = 6,35 \text{ mg O}_3/\text{l} \approx 7 \text{ mg O}_3/\text{l}$$

### 3.3.3.2 Ausführung

Die Anlagenteile gliedern sich von hinten (Ablaufseite) nach vorne in Sandfilter, Ozon-Kontaktbecken sowie Ozonanlage und Flüssigsauerstofftankanlage. Die Ozonung mit Ozonerzeuger und Kontaktbecken ist zweistraßig ausgeführt. Bei geringem Durchfluss (z. B. in der Nacht) kann eine Straße außer Betrieb genommen werden.

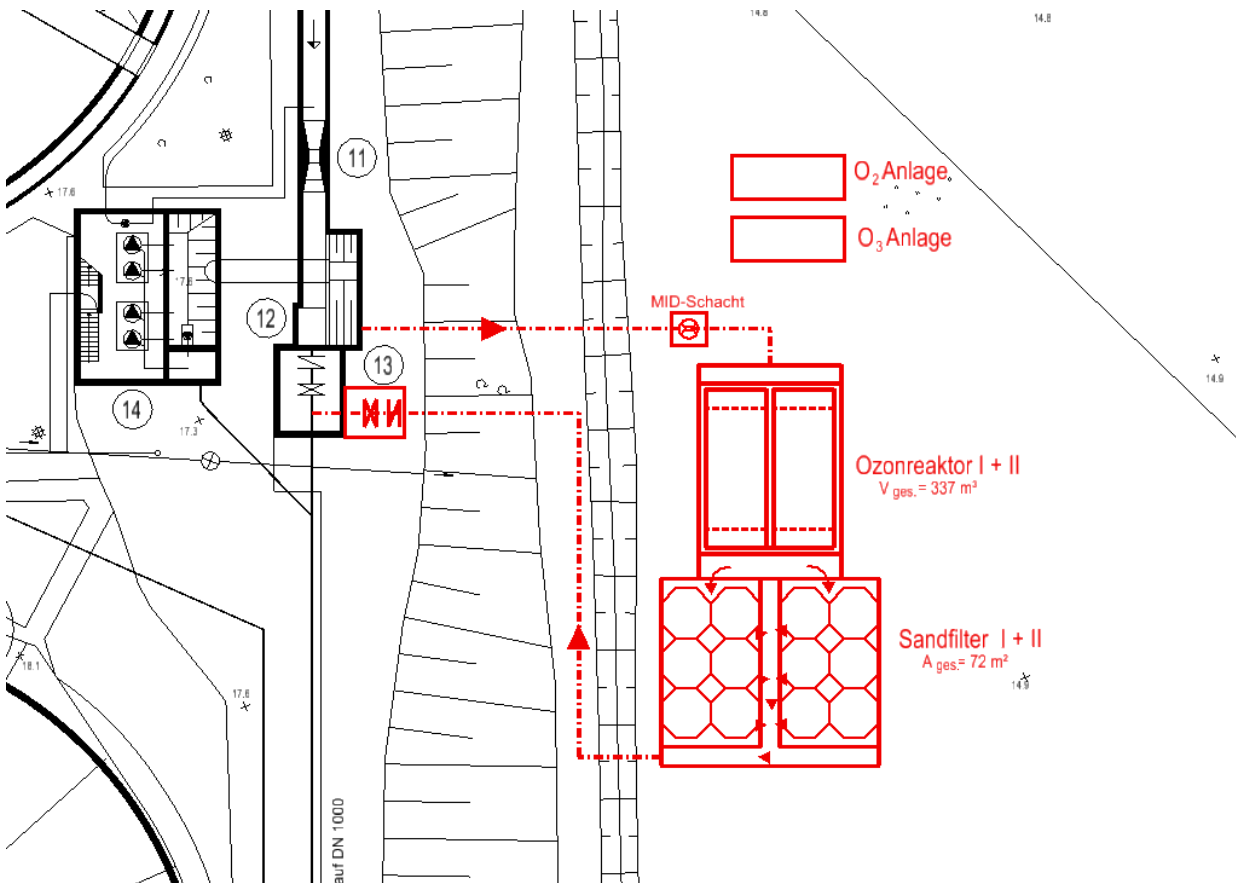


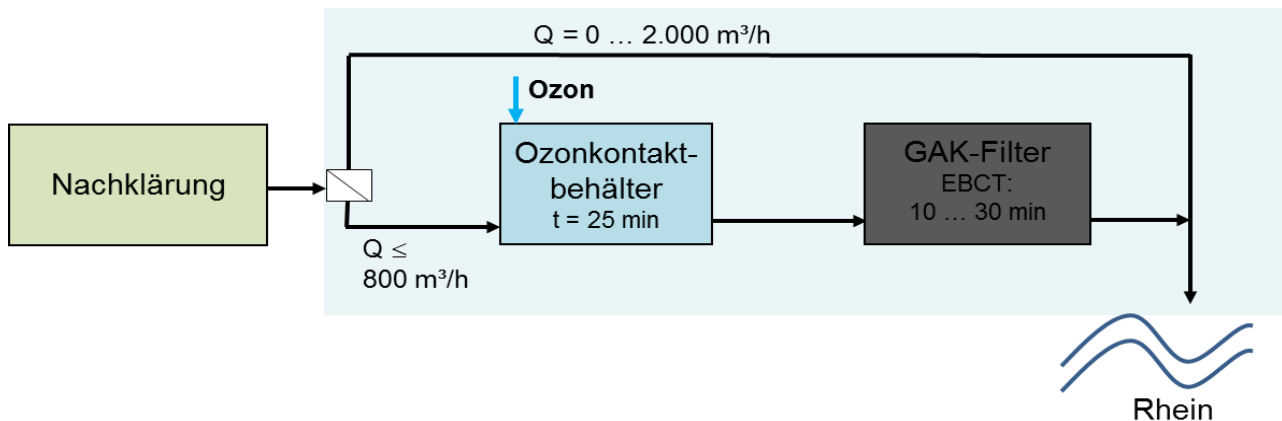
Bild 7: Lageplanausschnitt Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Sandfilter

### 3.3.4 Variante 4: Ozonung mit nachgeschaltetem biologisch aktiviertem Aktivkohlefilter

#### 3.3.4.1 Allgemeines

Dieses Verfahren ist eine Kombination der Varianten 2 (GAK-Filtration) und 3 (Ozonung). Das Abwasser wird zunächst mit Ozon behandelt und anschließend über einen Aktivkohlefilter geführt. Im Unterschied zur reinen GAK-Filtration verbleibt das Filtermaterial sehr lange im Filter. In der Berechnung wird von einer Standzeit von 8 a ausgegangen. Ziel ist es, dass im Filter neben der Adsorption vor allem ein biologischer Abbau stattfindet. Stoffe neben den Spurenstoffen auch biologisch abbaubare Rest-Organika (BDOC) sollen hier abgebaut werden. In der Trinkwasseraufbereitung findet dieses Verfahrenskonzept seit den 1970er-Jahren schon Anwendung. In diesem Zusammenhang wird von einem biologisch aktivierten Aktivkohlefilter (BAK) gesprochen.

Im nachfolgenden Blockschema ist das Verfahren dargestellt:



**Bild 8: Blockschema Variante 4: Ozonung mit BAK**

Die Auslegung der Ozonung und der Kontaktbehälter folgt Variante 3. Es ist davon auszugehen, dass hier noch eine deutliche Optimierung erfolgen kann. Jedoch liegen hierzu noch keine belastbaren Ergebnisse vor.

$$c_{\text{O}_3, \text{a}} = 4,00 \text{ mg O}_3/\text{l}$$

Die GAK-Filtration entspricht in ihrer Auslegung der Variante 2.

### 3.3.4.2 Ausführung

Die Ausführung entspricht der Variante 2 (GAK-Filtration), jedoch werden zwischen dem Filterblock und dem Aggregate-Raum die beiden Kontaktbehälter für die Ozonung platziert.

Die Ozonung mit Ozonerzeuger und Kontaktbecken ist wieder zweistraßig ausgeführt. Bei geringem Durchfluss (z. B. in der Nacht) kann eine Straße außer Betrieb genommen werden.

Die beiden Kontaktbehälterstraßen werden als Betonbauwerk ausgeführt. Der Aufbau entspricht Variante 3. Die Restozonvernichtung erfolgt wiederum thermisch/katalytisch. Der Ablauf der Behälter wird über ein Gerinne in die anschließende Filtration geführt.

Die Ozonerzeuger weisen ebenfalls eine Leistung von  $2 \times 4.000 \text{ g/h}$  auf. Die sonstige Ausführung entspricht Variante 3.

Die Erzeuger werden mit der zugehörigen Schaltanlage in Containern angeordnet. Die Ozonanlage und Sauerstofftankanlage sind neben der Spülwasservorlage angeordnet.

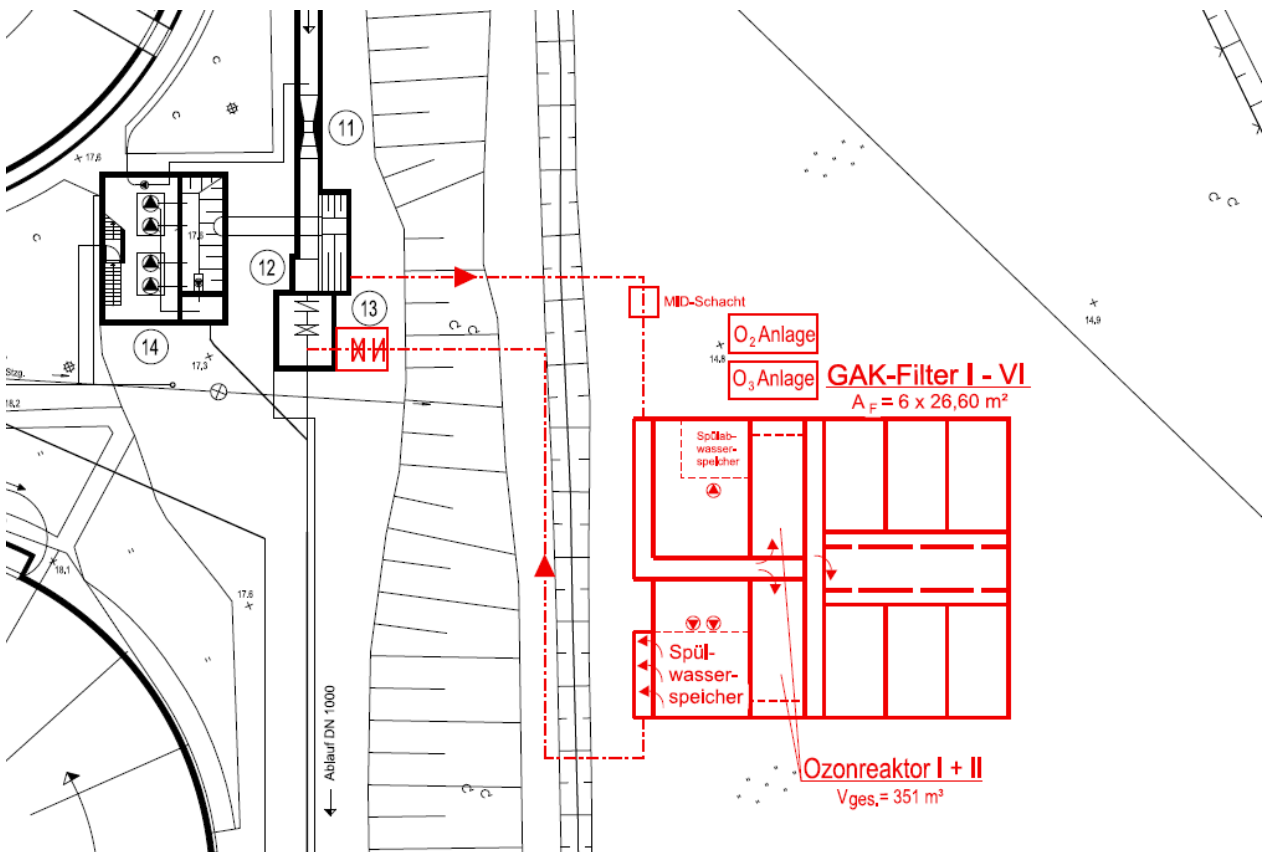
Der Filterblock besteht aus sechs abwärtsdurchströmten offenen Filtern. Jede Filterkammer weist eine Fläche von  $26,67 \text{ m}^2$  auf. Die Abmessungen einer Filterkammer liegen bei einer Breite von  $3,9 \text{ m}$  und einer Länge von  $7 \text{ m}$ .

Der Zulauf zu den sechs Filtern erfolgt aus einem offenen Gerinne. Über mit Schiebern versehene Öffnungen im Gerinne fließt das Wasser in die Filterkammern. Die Gleichverteilung des Zulaufs auf

alle in Betrieb befindlichen Filterkammern wird über die Schwellen an der Stirnseite der Filter realisiert. Die Ausführung entspricht der Variante 2.

Das Filtrat der Adsorptionsstufe wird in einer Spülwasservorlage mit 200 m<sup>3</sup> Inhalt gespeichert. Der Überlauf des Spülwasserspeichers wird wieder in das Ablaufgerinne der Kläranlage zurückgeführt. Für die Rückspülung der Filter stehen zwei Rückspülpumpen zur Verfügung.

Das bei der anfallenden Rückspülung anfallende Spülabwasser wird zwischengespeichert und über eine Pumpe dosiert dem Zulauf der Kläranlage zugeführt.



**Bild 9: Lageplanausschnitt Variante 4: Ozonung mit nachgeschaltetem BAK-Filter**

### 3.4 Ergebnisübersicht Varianten

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
	Pulverkohle mit Rücklaufkohle	GAK-Filtration	Ozonung mit nachges. Filtration	Ozonung + BAK-Filtration
Anlagenkomponenten				
	<p><b>Kontaktbecken:</b>  <math>t_A = 30 \text{ min}</math>, <math>V = 637 \text{ m}^3</math></p> <p><b>Absetzbecken:</b>  <math>D_i = 24 \text{ m}</math>, <math>h_{2/3} = 3,9 \text{ m}</math>  <math>A_{\text{ges}} = 433 \text{ m}^2</math>, <math>V_{\text{ges}} = 1.688 \text{ m}^3</math></p> <p><b>Tuchfiltration (zweistraßig):</b>  <math>A_{F,\text{ges}} = 150 \text{ m}^2</math></p> <p><b>PAK-Silo:</b>  <math>V = 125 \text{ m}^3</math></p>	<p><b>GAK-Filtration:</b>          6 Filter, <math>B \times L = 3,9 \times 7,0 \text{ m}</math>  <math>A = 160 \text{ m}^2</math>, <math>H_{FB} = 2,5 \text{ m}</math>,  <math>V = 400 \text{ m}^3</math></p>	<p><b>Flüssigsauerstoff:</b>          Tankanlage und Verdampfer</p> <p><b>Ozonerzeuger:</b>  <math>2 \times 4 \text{ kg O}_3/\text{h}</math></p> <p><b>Reaktionsbehälter:</b>          2 Straßen,          je <math>L = 8,5 \text{ m}</math>; <math>B = 3,3 \text{ m}</math>;  <math>V = 168,3 \text{ m}^3</math></p> <p><b>Sand-Filtration (kont. Gespült):</b>          2 Straßen          je 6 Filter mit <math>A_F = 6 \text{ m}^2</math>  <math>A_{F,\text{ges}} = 72 \text{ m}^2</math></p>	<p><b>Flüssigsauerstoff:</b>          Tankanlage und Verdampfer</p> <p><b>Ozonerzeuger:</b>  <math>2 \times 4 \text{ kg O}_3/\text{h}</math></p> <p><b>Reaktionsbehälter:</b>          2 Straßen,          je <math>L = 8,5</math>; <math>B = 3,3 \text{ m}</math>;  <math>V = 168,3 \text{ m}^3</math></p> <p><b>GAK-Filtration:</b>          6 Filter, <math>B \times L = 3,9 \times 7,0 \text{ m}</math>  <math>A = 160 \text{ m}^2</math>, <math>H_{FB} = 2,5 \text{ m}</math>,  <math>V = 400 \text{ m}^3</math></p>

	<b>Variante 1</b> <b>Pulverkohle mit Rücklaufkohle</b>	<b>Variante 2</b> <b>GAK-Filtration</b>	<b>Variante 3</b> <b>Ozonung mit nachges. Filtration</b>	<b>Variante 4</b> <b>Ozonung + BAK-Filtration</b>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine Bildung von Reaktionsprodukten</li> <li>Wirkungsweise der Stoffelimination eindeutig</li> <li>Sehr guter Suspensarückhalt im AB und durch Filtration</li> <li>Sehr gute Reduzierung <math>P_{ges}</math> und CSB</li> <li>Mehrfachbeladung der PAK</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine Bildung von Reaktionsprodukten</li> <li>Wirkungsweise der Stoffelimination eindeutig</li> <li>Sicherer und einfacher Betrieb</li> <li>Suspensarückhalt durch Filtration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sehr gut in Baufeld integrierbar</li> <li>Suspensarückhalt durch Filtration</li> <li>Optimierungspotential bei Ozondosis zu erwarten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Komplexe Wirkung → Forschungsbedarf</li> <li>Suspensarückhalt durch Filtrationsstufe</li> <li>minimierte Bildung von Reaktionsprodukten</li> <li>biologische Mitwirkung im GAK-Filter → Biologisch aktivierter GAK-Filter = BAK</li> <li>Optimierungspotential bei Ozondosis gegenüber V3 möglich</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>höhere Schlammanfall als bei den anderen Varianten</li> <li>Betreuungsintensiv, da Dosierung von PAK, FHM und FM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>GAK-Austausch</li> <li>Hoher Kohlebedarf in Vergleich zu anderen Varianten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reaktionsmechanismen und -produkte sind teilweise unbekannt,</li> <li>Wartung erfordert geschultes Personal oder externes Personal,</li> <li>hohe Sicherheitsanforderungen an den Arbeitsschutz, da Ozon toxisch ist und als Reizstoff wirkt</li> <li>hoher Energiebedarf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>derzeit noch keine breite Referenzbasis vorhanden</li> <li>Investitionskosten hoch, da Bau von 2 Stufen (Ozonung + GAK-Filtration)</li> </ul>

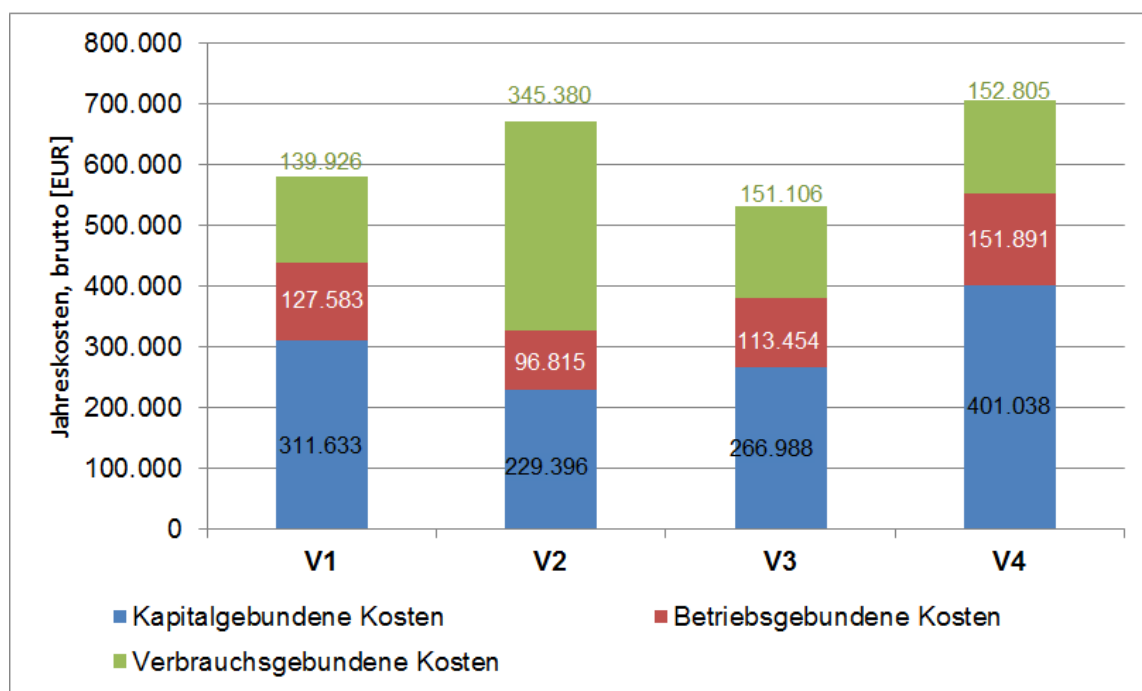


## 4 Kosten

**Tabelle 1: Jahreskosten und spezifische Kosten für die Varianten 1 bis 4**

Pos.-Nr	Text		Variante 1 PAK m. Rücklaufk.	Variante 2 GAK-Filtration	Variante 3 Ozonung + SF	Variante 4 Ozonung + BAK
A	Kapitalgebundene Kosten	EUR	261.876,54	192.769,54	224.360,04	337.006,32
B	Betriebsgebundene Kosten	EUR	107.212,52	81.357,16	95.339,11	127.639,81
C	Verbrauchsgebundene Kosten	EUR	117.584,55	290.234,88	126.979,80	128.407,25
<b>Summe Jahreskosten, netto</b>		<b>EUR</b>	<b>486.673,61</b>	<b>564.361,57</b>	<b>446.678,94</b>	<b>593.053,38</b>
Mehrwertsteuer: 19%		EUR	92.467,99	107.228,70	84.869,00	112.680,14
<b>Summe Jahreskosten, brutto</b>		<b>EUR</b>	<b>579.141,60</b>	<b>671.590,27</b>	<b>531.547,94</b>	<b>705.733,52</b>
<b>Anteil</b>			<b>109%</b>	<b>126%</b>	<b>100%</b>	<b>133%</b>
spez. Kosten, netto		EUR/m <sup>3</sup>	0,11117	0,12891	0,10203	0,13547
<b>spez. Kosten, brutto</b>		<b>EUR/m<sup>3</sup></b>	<b>0,13229</b>	<b>0,15341</b>	<b>0,12142</b>	<b>0,16121</b>

Die günstigsten Jahreskosten wurden für die Variante 3 (Ozonung + Sandfilter) und Variante 1 (PAK mit RLK) mit ca. 531.000 bis 579.000 EUR/a, brutto ermittelt. Die Varianten 2 (GAK-Filtration) und 4 (Ozonung mit BAK) liegen mit 671.000 EUR/a, brutto und 705.000 EUR/a, brutto auf dem dritten und vierten Platz.



**Bild 10: Anteile kapital-, betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten an den Jahreskosten der Varianten**

Aus der im **Bild 10** dargestellten Aufteilung der Jahreskosten ist erkennbar, dass Variante 2 den höchsten Anteil an verbrauchsgebundenen Kosten und Variante 4 die höchsten kapitalgebundenen Kosten aufweisen.

## 5 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 2: Bewertungsmatrix für die Varianten 1 bis 4**

Kriterium	Wichtung	Wertung							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		PAK m. Rücklaufk.		GAK-Filtration		Ozonung + Sandfilter		Ozonung + BAK	
		Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet
Jahreskosten	0,40	4	1,6	3	1,2	4	1,6	3	1,2
Reinigungsleistung $P_{ges}/CSB$ (zusätz. Reduk.)	0,16	5	0,8	4	0,64	4	0,64	4	0,64
Bildung Nebenprodukte	0,06	5	0,3	5	0,3	4	0,24	4	0,24
Erfahrungen/Referenzen	0,06	5	0,3	4	0,24	4	0,24	3	0,18
Betriebs- und Wartungsaufwand	0,06	3	0,18	5	0,3	4	0,24	4	0,24
Betriebssicherheit	0,06	4	0,24	5	0,3	4	0,24	4	0,24
Sensitivität Kostensteigerungen	0,14	4	0,56	2	0,28	3	0,42	4	0,56
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>34</b>	<b>4,22</b>	<b>32</b>	<b>3,50</b>	<b>31</b>	<b>3,86</b>	<b>30</b>	<b>3,54</b>

Wertung nach Punkten  
(steigende Punkte → bessere Wertung)

1 = ungenügend  
5 = sehr gut

In der **Summe** schneidet Variante 1 (PAK-Dosierung mit Rücklaufkohleführung) mit 4,22 Punkten am besten ab. Gefolgt von Variante 3 (Ozonung mit Sandfilter) mit 3,70 Punkten. Die Variante 2 (GAK-Filtration) und Variante 4 (Ozonung mit BAK-Filtration) liegen 3,10 Punkte bzw. 3,54 Punkte auf dem vierten und dritten Platz.

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen der Studie zur Ertüchtigung und Erweiterung der Kläranlage Emmerich 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:** GAK-Filtration,

**Variante 3:** Ozonung mit Sandfilter,

**Variante 4:** Ozonung mit biologisch aktiviertem GAK-Filter (BAK).

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 1 (PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle) mit 4,22 Punkten; die Ozonung mit Sandfilter (Variante 3) kommt auf den zweiten Platz, mit 3,86 Punkten. Die Varianten 4 (Ozonung mit BAK) und 2 (GAK-Filtration) und liegen mit 3,50 bzw. 3,54 Punkten auf dem vierten bzw. dritten Platz.

Bei den Jahreskosten liegt Variante 3 (GAK-Filtration) mit 531.547 EUR/a, brutto vorn. Aufgrund der geringen verbrauchsgebundenen Kosten folgt Variante 1 (PAK) dicht mit 579.141 EUR/a, brutto. Variante 2 (GAK) und Variante 4 (Ozonung + BAK) liegen mit 671.509 EUR/a, brutto und 705.733 EUR/a, brutto auf dem vierten und dritten Platz.

Allen Verfahren können gut auf der KA Emmerich umgesetzt werden. Der zur Verfügung stehende Bauplatz um Südosten der Kläranlage ist ausreichend.

Variante 1 (PAK mit Rücklaufkohle) lag in der Bewertungsmatrix auf dem ersten Rang. Sie stellt das derzeit verbreitetste Verfahren zur Spurenstoffelimination dar (in Baden-Württemberg derzeit sieben Anlagen in Betrieb, weitere in Planung und Bau). Das Verfahren nimmt nahezu den kompletten zur Verfügung stehenden Bauplatz ein. Neben der Pulverkohle wird in diesem Verfahren noch Flockungs- und Flockungshilfsmittel dosiert. Auf der einen Seite führt dies zu einem erhöhten Betriebsaufwand, auf der anderen Seite kann damit auch direkt auf eine Veränderung der Rohwasserbeschaffenheit bzw. der Ablaufziele reagiert werden. Die Erfahrungen aus Baden-Württemberg zeigen, dass ein sehr sicherer Betrieb möglich ist. Durch die Rückführung der Aktivkohle ist eine sehr gute Nutzung der Adsorptionskapazität der Kohle gegeben. Dadurch reduziert sich insgesamt der benötigte Kohlebedarf. Das Verfahren reagiert damit auf Preisschwankungen bei der Aktivkohle weniger sensitiv. Das Verfahren führt neben der Spurenstoffelimination noch zu einer deutlichen Reduzierung bei den Parametern CSB und  $P_{ges}$ . Gegenüber den anderen Verfahren ist der Einfluss hier höher zu bewerten. Bei der PAK-Dosierung ist der zusätzliche Schlammanfall im Vergleich zu den anderen Verfahren erhöht. Der Schlamm enthält neben der Kohle noch Fällprodukte und Organik. Der Energiebedarf liegt im Vergleich zu den Ozonverfahren auf einem unteren Niveau.

Die Ozonung mit Sandfilter (Variante 3) lag in der Bewertungsmatrix auf dem zweiten 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 interessanter. Die weiteren Forschungsergebnisse hinsichtlich der Bildung von Transferprodukten sollten in die Entscheidungsfindung einfließen. Der Einsatz von Ozon bedingt einen hohen Energiebedarf auf der Kläranlage für die Erzeugung des Ozons. Damit reagieren die Ozonvarianten generell sensitiver auf Kostensteigerungen beim Strombezug.

Die Kombination Ozonung mit biologisch aktiviertem Aktivkohlefilter (Variante 4) ist technisch sehr interessant und lag in der Bewertungsmatrix auf dem dritten Rang. Jedoch liegen derzeit noch keine validierten Erfahrungen im Abwasserbereich zu diesem Verfahren vor, so dass die Eliminationsleistungen nur unzureichend eingeschätzt werden können. Dieses Verfahren bietet jedoch noch ein großes Entwicklungspotenzial, das durch Forschungsprojekte begleitet werden sollte.

Die GAK-Filtration (Variante 2) ist aufgrund der hohen verbrauchsgebundenen Kosten und die hohe Empfindlichkeit gegenüber Kostensteigerungen auf dem vierten Rang. Für dieses Verfahren spricht die hohe Betriebssicherheit. Die relativ geringe prognostizierte Standzeit der Aktivkohle im Filter führt zu den hohen Verbrauchskosten. Der Energiebedarf ist von allen Variante am geringsten.

Bei den Varianten 2 (GAK-Filtration) und 4 (Ozonung + BAK-Filtration) ist grundsätzlich neben dem beschriebenen Einsatz von Frischkohlen bzw. reaktivierten Kohlen auch der Einsatz von vorbeladenen Kohlen aus der Trinkwasseraufbereitung möglich. Das Konzentrationsniveau der Spurenstoffe ist in der Trinkwasseraufbereitung i. d. R. niedriger als im Abwasserbereich, sodass diese Kohlen in der vierten Reinigungsstufe weiterbeladen werden könnten. Die Eignung sollte vor dem Einsatz in jedem Fall durch Versuche bzw. eine Pilotierung untersucht werden. In Abhängigkeit von den erreichbaren Standzeiten dieser Kohlen ist dann die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes zu bewerten.

Die TUTTAHS & MEYER Ing.-GmbH empfiehlt für weitere Untersuchungen auf der Kläranlage Emmerich Variante 1 (PAK-Dosierung mit Rücklaufkohleführung) und Variante 3 (Ozonung mit Sandfilter) zu berücksichtigen.