

# Kläranlage Emmerich

## 4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen

Machbarkeitsstudie  
August 2014 | 1. Ausfertigung  
Projektnummer 1217 001





# Kläranlage Emmerich

## 4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen

Machbarkeitsstudie  
August 2014 | 1. Ausfertigung  
Projektnummer 1217 001

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

Aufgestellt:  
Bochum, im August 2014  
bie-ka-uru

Dipl.-Ing. Norbert Biebersdorf

**Gesamtinhaltsverzeichnis****I Textteil**

- Erläuterungsbericht
- Anlagen

**II Zeichnungen**

| <b>Blatt</b> | <b>Titel</b>  | <b>Maßstab</b> | <b>Verwaltungsnummer</b> |
|--------------|---|----------------|--------------------------|
| 1            | Lageplan, Variante 1<br>PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle | 1 : 250        | 030 007 01 00            |
| 2            | Lageplan, Variante 2<br>GAK-Filter                      | 1 : 250        | 030 007 02 00            |
| 3            | Lageplan, Variante 3<br>Ozonung mit Dynasandfilter      | 1 : 250        | 030 007 03 00            |
| 4            | Lageplan, Variante 4<br>Ozonung mit GAK-Filter          | 1 : 250        | 030 007 04 00            |

**Auftraggeber:**

Kommunalbetriebe Emmerich am Rhein  
Blackweg 40  
46446 Emmerich am Rhein

Telefon: 02822 9256 0  
Telefax: 02822 9256 49

**Projektleiter:**

Frau Dipl.-Biol. Ingrid Gerard  
(Gelsenwasser AG)

Telefon: 0209 708 1971  
ingrid.gerard@gelsenwasser.de

Herr Klaus Gruyters

Telefon: 02822 9256 13  
gruytersk@kommunalbetriebe-emmerich.de

Herr Mark Antoni

Telefon: 02822 9256 22  
antonim@twe-emmerich.de

Herr Bernhard Rembarz

Telefon: 02822 92 941  
rembarzb@twe-emmerich.de

**Bearbeitung durch:**

TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft mbH  
Universitätsstraße 74  
44789 Bochum

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

Herr Dr.-Ing. Jan Mauriz Kaub

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

Herr Dipl.-Ing. Norbert Biebersdorf

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

Herr M.Sc. Fernando Urueta

Telefon: 0234 33305-64  
f.urueta@tum-bochum.de

**Inhaltsverzeichnis**

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Veranlassung und Aufgabenstellung .....</b>                             | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Zugrunde liegende Unterlagen.....</b>                                   | <b>1</b>  |
| <b>3</b> | <b>Belastungsdaten Hydraulik .....</b>                                     | <b>2</b>  |
| <b>4</b> | <b>Reinigungsanforderungen.....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>5</b> | <b>Anlagenbestand .....</b>  | <b>3</b>  |
| 5.1      | Kurzbeschreibung .....   | 3         |
| <b>6</b> | <b>Spurenstoffe im Wasserkreislauf.....</b>                                | <b>4</b>  |
| 6.1      | Einleitung .....   | 4         |
| 6.2      | Charakterisierung des Verhaltens von anthropogenen Spurenstoffen .....     | 4         |
| <b>7</b> | <b>Verfahren zur Elimination von Spurenstoffen.....</b>                    | <b>5</b>  |
| 7.1      | Überblick .....  | 5         |
| 7.2      | Adsorption.....  | 5         |
| 7.2.1    | Grundlagen .....   | 5         |
| 7.2.2    | Einsatz Aktivkohle in der Abwassertechnik zur Spurenstoffelimination ..... | 11        |
| 7.2.2.1  | Pulveraktivkohle .....   | 11        |
| 7.2.2.2  | Granulierte Aktivkohle .....   | 13        |
| 7.3      | Ozonung .....  | 14        |
| 7.3.1    | Grundlagen .....   | 14        |
| 7.3.1.1  | Einsatz und Wirkung von Ozon .....   | 14        |
| 7.3.1.2  | Ozonanwendung .....  | 15        |
| 7.3.2    | Einsatz von Ozon in der Abwassertechnik zur Spurenstoffelimination .....   | 16        |
| <b>8</b> | <b>Darstellung der untersuchten Verfahrenskombinationen .....</b>          | <b>18</b> |
| 8.1      | Beschickungsmenge .....  | 18        |
| 8.2      | Verfahrensfestlegung .....   | 21        |
| 8.3      | Randbedingungen .....  | 21        |
| 8.4      | Varianten.....   | 21        |
| 8.4.1    | Variante 1: PAK mit Rücklaufkohle .....                                    | 21        |
| 8.4.1.1  | Allgemein .....  | 21        |
| 8.4.1.2  | Ausführung.....  | 22        |
| 8.4.2    | Variante 2: Filtration über granulierte Aktivkohle.....                    | 24        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 8.4.2.1   | Allgemeines.....   | 24        |
| 8.4.2.2   | Ausführung.....  | 25        |
| 8.4.3     | Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Sandfilter .....                              | 26        |
| 8.4.3.1   | Allgemeines.....   | 26        |
| 8.4.3.2   | Ausführung.....  | 27        |
| 8.4.4     | Variante 4: Ozonung mit nachgeschaltetem biologisch aktiviertem Aktivkohlefilter ..... | 29        |
| 8.4.4.1   | Allgemeines.....   | 29        |
| 8.4.4.2   | Ausführung.....  | 30        |
| 8.5       | Ergebnisübersicht Varianten.....   | 32        |
| <b>9</b>  | <b>Kosten.....</b>   | <b>34</b> |
| 9.1       | Allgemein .....  | 34        |
| 9.2       | Investitionskosten.....  | 34        |
| 9.3       | Betriebskosten .....   | 34        |
| 9.4       | Jahreskosten .....   | 36        |
| 9.5       | Sensitivitätsanalyse .....   | 38        |
| 9.6       | Einfluss der Förderung auf die Jahreskosten.....                                       | 39        |
| <b>10</b> | <b>Bewertung.....</b>  | <b>39</b> |
| <b>11</b> | <b>Zusammenfassung.....</b>  | <b>42</b> |
|           | <b>Literaturverzeichnis .....</b>  | <b>44</b> |

**Bildverzeichnis**

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Bild 1:  | Ablaufmessung KA Emmerich .....   | 2  |
| Bild 2:  | Verfahren zur Spurenstoffelimination (Kompetenzzentrum Spurenstoffe BW 2013).....                                     | 6  |
| Bild 3:  | Grundbegriffe der Adsorption .....  | 6  |
| Bild 4:  | Teilschritte der Adsorption (Breitbach und Bathen, 2001).....   | 7  |
| Bild 5:  | Isotherme Adsorption Phenol an Aktivkohle bei unterschiedlichen NaCl-Konzentrationen (Cooney 1998).....               | 8  |
| Bild 6:  | Adsorptionsverhalten zweier unterschiedlicher Stoffe im Festbettadsorber (DVGW W 239) .....                           | 9  |
| Bild 7:  | Verlagerung der Adsorptionszone über die Filterlaufzeit (Sontheimer u. a., 1985).....                                 | 10 |
| Bild 8:  | Durchbruchskurve eines Adsorptivgemisches (Worch 2004, modifiziert).....  | 10 |
| Bild 9:  | Schema Ozonerzeugung (Gujer 1999, modifiziert).....   | 15 |
| Bild 10: | Ergebnisse Elimination Spurenstoffe ARA Regensdorf (Abegglen u. a. 2009).....   | 17 |
| Bild 11: | Wirkungsgrade bei Vollstrombehandlung (Konzentration beispielhaft) .....  | 18 |
| Bild 12: | Wirkungsgrade bei Teilstrombehandlung (Konzentration beispielhaft) .....  | 18 |
| Bild 13: | Beispielhaft grafische Darstellung Wirkungsgrade bei Teilstrombehandlung .....  | 19 |
| Bild 14: | Summenhäufigkeitskurve für die Ablaufwassermenge im Untersuchungszeitraum .....                                       | 20 |
| Bild 15: | Behandelte Abwassermenge in Abhängigkeit des Bemessungszuflusses der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination ..... | 20 |
| Bild 16: | Blockscheema Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle.....   | 22 |
| Bild 17: | Schnitt eines Tuchfilters, Ausführungsbeispiel (Quelle: Mecana).....  | 23 |
| Bild 18: | Lageplanausschnitt Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle .....  | 24 |
| Bild 19: | Blockscheema Variante 2: GAK-Filtration.....  | 25 |
| Bild 20: | Lageplanausschnitt Variante 2: GAK-Filtration .....   | 26 |
| Bild 21: | Blockscheema Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Filter .....  | 27 |
| Bild 22: | Lageplanausschnitt Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Sandfilter .....  | 28 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Bild 23: | Dyna-Sandfilter: links: Prinzipdarstellung, rechts: Anordnung im Betonbecken<br>(Quelle: Nordic-Water) ..... | 29 |
| Bild 24: | Blockschema Variante 4: Ozonung mit BAK.....   | 30 |
| Bild 25: | Lageplanausschnitt Variante 4: Ozonung mit nachgeschaltetem BAK-Filter.....                                  | 31 |
| Bild 26: | Anteile kapital-, betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten an den<br>Jahreskosten der Varianten.....         | 37 |
| Bild 27: | Vergleich der Jahreskosten mit und ohne 60%-Förderung .....  | 39 |

## **Teil B: Anlagen**

Anlage 1: Auslegung Varianten 1 bis 4

Anlage 2: Investitionskosten Varianten 1 bis 4

Anlage 3: Betriebskosten Varianten 1 bis 4

Anlage 4: Jahreskosten

## 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 Zugrunde liegende Unterlagen

Die Grundlage der vorliegenden Planung bilden im Wesentlichen die folgenden Unterlagen:

- Stundenwerte Ablaufmessung KA Emmerich vom August 2012 bis November 2013,
- Hydraulischer Längsschnitt Kläranlage Emmerich, März 1999, Abwasserwerke Emmerich

- Einleitungserlaubnis, Januar 1997, Bezirksregierung Düsseldorf
- Kostenansätze, Projektgespräch am 13.11.2013, Emmerich
- R-I-Schema Kläranlage Emmerich, Januar 2008, Gelsenwasser AG
- Bestandsplan Kläranlage Emmerich, März 1999, Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. pol. K.-U- Rudolph GmbH

### 3 Belastungsdaten Hydraulik

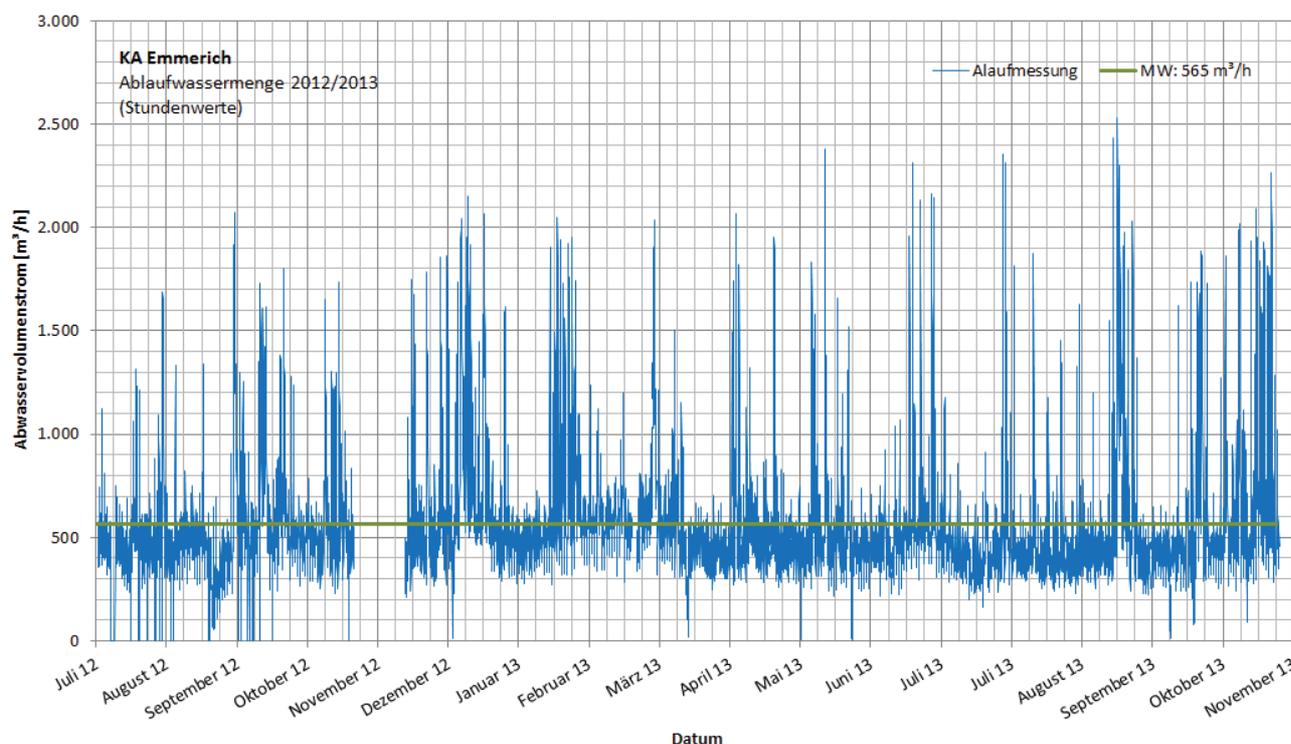
Die Bemessungswerte der Kläranlage Emmerich sind im Folgenden aufgeführt:

$$\text{Trockenwetterabfluss } Q_{T,2h,max} = 2.278 \text{ m}^3/\text{h} \approx 632 \text{ l/s}$$

$$\text{Mischwasserabfluss } Q_M = 2.800 \text{ m}^3/\text{h} \approx 778 \text{ l/s}$$

Die hydraulische Auslegung der 4. Reinigungsstufe, die nach der Nachklärung in den Reinigungsprozess eingebunden wird, basiert auf den Ablaufmengen der Kläranlage.

**Bild 1** stellt die Ganglinie der Abwassermengen im Ablauf der Anlage (Venturi) als Stundenwerte für den Zeitraum August 2012 bis November 2013 dar. Die mittlere Ablaufmenge beträgt 565 m<sup>3</sup>/h. Maximal wurden 2.532 m<sup>3</sup>/h im Betrachtungszeitraum abgeleitet. An 45 h im Betrachtungszeitraum (01.08.2012-13.11.2013 = 10.575 h mit Messwerten) lag die Abflussmenge oberhalb von 2.000 m<sup>3</sup>/h. Es ist aus dem Diagramm erkennbar, dass ab Mai 2013 die maximalen Zuflüsse (Spitzen) zur Kläranlage um ca. 400 m<sup>3</sup>/h angestiegen sind. Hintergrund ist die Erhöhung der Pumpenleistung des PW Rheinpromenade im Mischwasserfall. Die Erhöhung dieses Volumenstroms hat aufgrund der nur kurzen Dauer keinen signifikanten Einfluss auf die der Anlage zufließenden.



**Bild 1: Ablaufmessung KA Emmerich**

## 4 Reinigungsanforderungen

Die Überwachungswerte für die Kläranlage Emmerich sind für die Parameter CSB; Ammoniumstickstoff; Gesamt-Stickstoff, anorganisch und Gesamt-Phosphor festgelegt.

Folgende Überwachungswerte sind gem. Erlaubnisantrag einzuhalten:

|                                |                         |
|--------------------------------|-------------------------|
| Chemischer Sauerstoffbedarf    | 65 mg/l                 |
| Biochemischer Sauerstoffbedarf | 15 mg/l                 |
| Stickstoff, anorganisch        | 14 mg/l ( $\geq 12$ °C) |
| Ammonium-Stickstoff            | 10 mg/l ( $\geq 12$ °C) |
| Phosphor, gesamt               | 1 mg/l                  |

## 5 Anlagenbestand

### 5.1 Kurzbeschreibung

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.

Die mechanische Stufe umfasst eine zweistraßige Rechenanlage mit einem ebenfalls zweistraßigen belüfteten Langsandfang sowie eine aus einem Rundbecken bestehende Vorklärung.

Der Ablauf der Vorklärung wird über ein offenes Gerinne zu den drei als simultane Denitrifikation ausgelegten Belebungsbecken geleitet. Es sind zwei Fahrweisen möglich:

- Dreierkaskade
- Dreistraßiger Betrieb

Das Gesamtvolumen der Belebungsbecken umfasst 19.800 m<sup>3</sup>. In den Ablauf der Belebungsbecken werden Eisensalze zur Phosphorfällung dosiert.

Der Abwasserstrom wird über ein Verteilerbauwerk auf die drei Nachklärbecken verteilt. Die als Rundbecken ausgebildeten Nachklärbecken haben einen Durchmesser von jeweils 43 m und eine Fläche von insgesamt 4.260 m<sup>2</sup>. Das Abwasser aus der Nachklärung wird gesammelt und über eine Mengenummessung dem Rhein zugeführt. Im Hochwasserfall steht ein Hochwasserpumpwerk zur Verfügung.

## **6 Spurenstoffe im Wasserkreislauf**

### **6.1 Einleitung**

Mit Spurenstoffe 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 Mikro-schadstoffe.

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.

### **6.2 Charakterisierung des Verhaltens von anthropogenen Spurenstoffen**

Die anthropogenen Spurenstoffe lassen sich, bedingt durch ihre physiko-chemischen Eigenschaften, keiner Stoffgruppe zuordnen. Daraus folgt auch, dass sich – wie schon gesagt – Unterschiede hinsichtlich der Elimination bei verschiedenen Stoffen ergeben.

Folgende Eigenschaften der Stoffe sind zur Beurteilung ihres Eliminationsverhaltens von besonderer Wichtigkeit:

- Molekülaufbau und –struktur,
- Polarität/Hydrophobie,
- Sorptionsverhalten,
- Abbaubarkeit/Persistenz.

Der Molekülaufbau kennzeichnet entscheidend das Verhalten des Stoffes. Die Bindungsformen der Atome bzw. Molekülgruppen zueinander beispielsweise beeinflussen die Abbaubarkeit und die Reaktionsseigenschaften des Stoffes.

Polarität bezeichnet in der Chemie unterschiedliche Ladungsschwerpunkte innerhalb eines Moleküls. Dieses ist somit gegenüber seiner Umgebung nicht mehr elektrisch neutral. Polare Stoffe weisen eine bessere Wasserlöslichkeit auf. Unpolare Stoffe sind schlechter wasserlöslich; sie werden auch als hydrophob bezeichnet. In wässrigen Lösungen liegen die Spurenstoffe mitunter in dissoziierter Form vor. Dies bedeutet, dass das Molekül eine Ladung angenommen hat. Zu beachten ist, dass diese Ladung pH-Wert-abhängig sein kann.

Als Modellmaß für die Polarität kann der n-Octanol-Wasserverteilungskoeffizient  $K_{OW}$  herangezogen werden. Dieser beschreibt die Verteilung einer Chemikalie zwischen organischer und wässriger Phase (Worch 1997).

Unter Sorption werden als Sammelbegriff Wechselwirkungen an Grenzflächen zwischen festen, flüssigen und gasförmigen Phasen verstanden, die zu einer Anreicherung eines Stoffes führen. Bei der Absorption erfolgt die Anreicherung des Stoffes innerhalb der Phase, wie z. B. bei der Lösung von Gasen in Flüssigkeiten.

Persistenz bezeichnet die Beständigkeit von Stoffen gegenüber biologischen und chemischen Abbau- und Transformationsprozessen. Als persistent werden Substanzen eingestuft, die nicht oder nur sehr langsam abgebaut werden (Worch 1997). Aufgrund ihres ursprünglichen Einsatzes sind Spurenstoffe relativ persistent in der aquatischen Umwelt. So soll z. B. Röntgenkontrastmittel im menschlichen Körper keine Reaktion eingehen. Diese Persistenz beeinflusst jedoch auch die Elimination der Stoffe in der Umwelt bzw. in technischen Reinigungsprozessen.

## **7 Verfahren zur Elimination von Spurenstoffen**

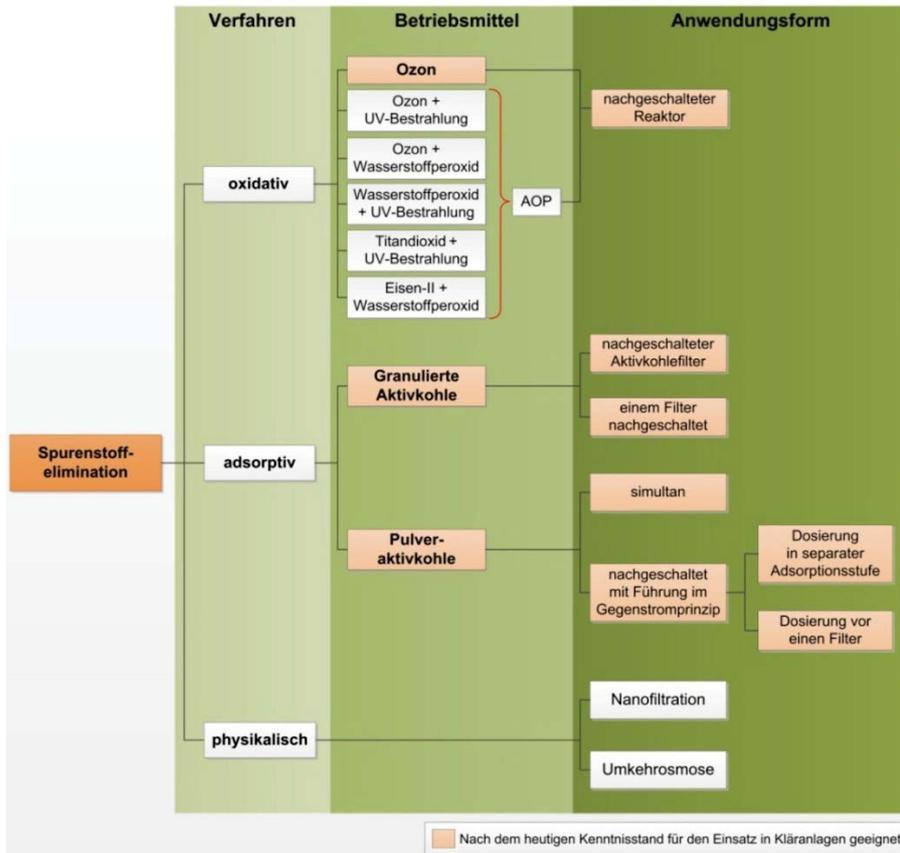
### **7.1 Überblick**

Die nachfolgende Grafik gibt einen schematischen Überblick über die verschiedenen Verfahren zur Elimination von anthropogenen Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen. Für die Kläranlage Emmerich werden die Anwendung von Ozon, Granulierter Aktivkohle und Pulveraktivkohle untersucht (**Kapitel 8**). Die Grundlagen und Möglichkeiten der adsorptiven und oxidativen Verfahren werden im Folgenden kurz erläutert.

### **7.2 Adsorption**

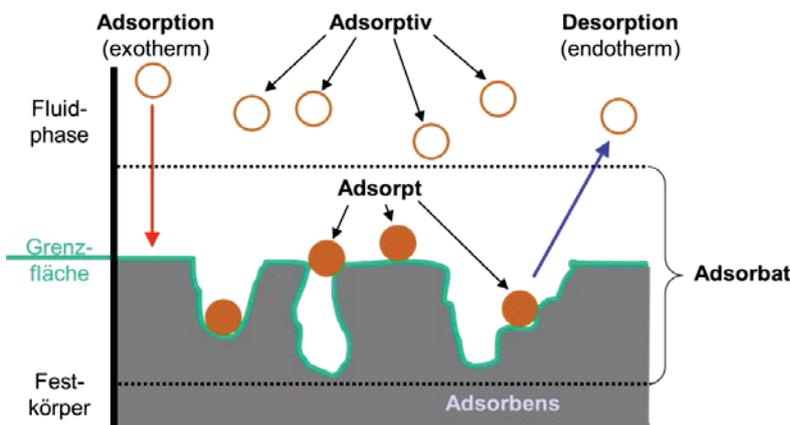
#### **7.2.1 Grundlagen**

Unter Adsorption wird die Anreicherung von Stoffen an der Oberfläche von Flüssigkeiten und besonders Festkörpern verstanden. Sie erfolgt durch die Wechselwirkung der aktiven, energiereichen Zentren einer Grenzfläche mit den Atomen, Molekülen oder Ionen einer benachbarten Phase (Kümmel und Worch 1990).



**Bild 2: Verfahren zur Spurenstoffelimination (Kompetenzzentrum Spurenstoffe BW 2013)**

Die adsorptionsaktive Phase, an der die Anreicherung erfolgt, wird als Adsorbens bezeichnet. An diesem lagern sich das Adsorptiv, also die Teilchen des zu adsorbierenden Stoffes an. Desorption bezeichnet die Remobilisierung bereits fixierter Teilchen. Im **Bild 3** sind schematisch die Zusammenhänge dargestellt.



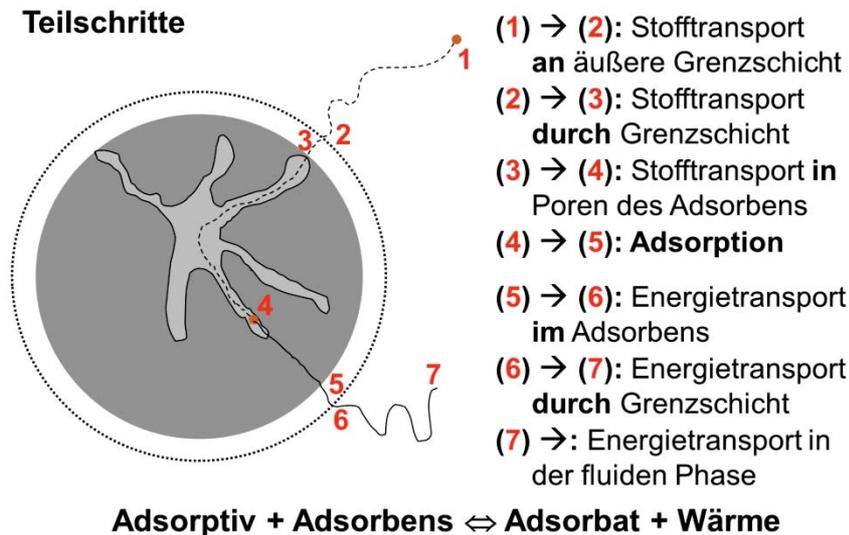
**Bild 3: Grundbegriffe der Adsorption**

Die Adsorption erfolgt in mehreren Teilschritten auch an der inneren Oberfläche des Adsorbens. Dies ist im **Bild 4** dargestellt.

In Abhängigkeit von der Stärke der Bindung des Adsorptivs an das Adsorbens wird zwischen Physisorption und Chemisorption unterschieden. Die physikalische Sorption ist vor allem auf Van-Der-

Waalsche-Wechselwirkungen zurückzuführen. Der chemischen Sorption liegen chemische Reaktionen zwischen dem Adsorbens und dem Adsorptiv zugrunde (Kümmel u. Worch 1990).

Bei der Adsorption aus Flüssigkeiten überwiegt die Physisorption mit den relativ kleinen Bindungskräften. Die Physisorption ist reversibel; damit ist eine Reaktivierung des Adsorbens (Aktivkohle) möglich und gegebenenfalls wirtschaftlich.



**Bild 4: Teilschritte der Adsorption (Breitbach und Bathen, 2001)**

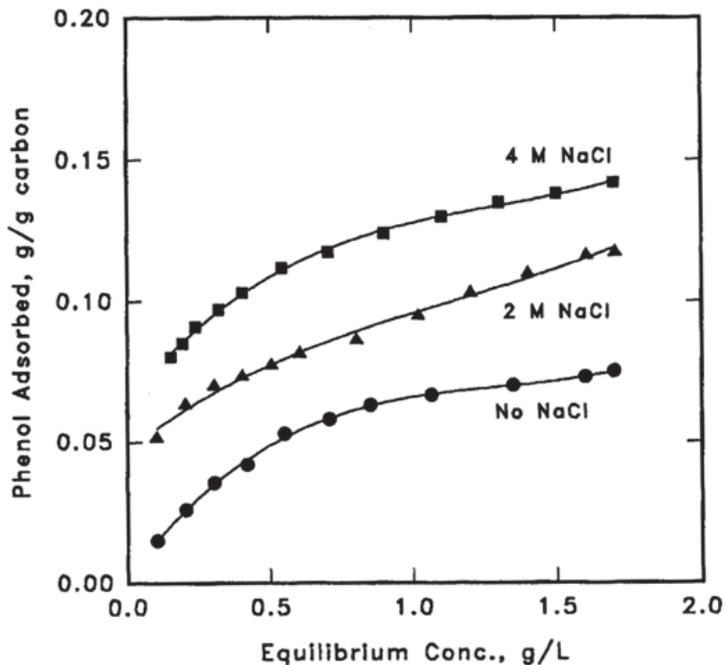
Folgende Eigenschaften des Adsorptivs können nach Cooney (1998) die Physisorption beeinflussen:

- Steigende Unpolarität/Hydrophilität erhöht die Adsorbierbarkeit
- Funktionelle Gruppen
  - Hydroxyl-Gruppe (R-OH) senken die Adsorbierbarkeit
  - Amino-Gruppe (R-NH<sub>2</sub>) senken die Adsorbierbarkeit sehr stark
  - Sulfonsäure-Gruppe (R-SO<sub>3</sub>H) senken meistens die Adsorbierbarkeit
  - Nitro-Gruppe (R-NO<sub>2</sub>) verbessern die Adsorbierbarkeit

Aus dem pH-Wert des Fluids können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Kleiner pH-Wert führt zu einer höheren Adsorbierbarkeit acider Stoffe.
- Ein hoher pH-Wert in der Lösung führt zur besseren Adsorbierbarkeit von basischen Stoffen.

Die Anwesenheit von anorganischen Salzen im Fluid führt zur einer höheren Beladung des Adsorbens (Aktivkohle). In der nachfolgenden Grafik, **Bild 5**, ist die Adsorption von Phenol an Aktivkohle bei unterschiedlichen Konzentrationen von NaCl in der fluiden Phase dargestellt. Durch die Salzionen werden die gleichsinnig geladenen Gruppen des Adsorpt (Phenol) neutralisiert und eine höhere Packungsdichte auf dem Adsorbens erreicht (Cooney 1998).



**Bild 5: Isotherme Adsorption Phenol an Aktivkohle bei unterschiedlichen NaCl-Konzentrationen (Cooney 1998)**

Beim Abwasser handelt es sich um ein Mehrphasensystem. Dies bedeutet, dass die verschiedenen Adsorptive im Wasser um die Adsorptionsplätze auf dem Adsorbens konkurrieren. Dies beeinflusst die Adsorbierbarkeit der einzelnen Stoffe.

Zur Entfernung organischer Spurenstoffe wird in der Wassertechnik Aktivkohle eingesetzt, die aus Holz, Kohlen und ähnlichen Stoffen durch Aktivierung bei hohen Temperaturen und Luftabschluss, zum Teil unter Einsatz von Säuren (chemische Aktivierung), hergestellt werden. Durch die Aktivierung erhalten die Kohlen eine innere Oberfläche von 800...1.200 m<sup>2</sup>/g  $\approx$  1 km<sup>2</sup>/kg, an der die Adsorption erfolgt. Die äußere Oberfläche wird durch den Partikeldurchmesser bestimmt.

Hinsichtlich der Korngröße werden die Kohlen in zwei Gruppen eingeteilt:

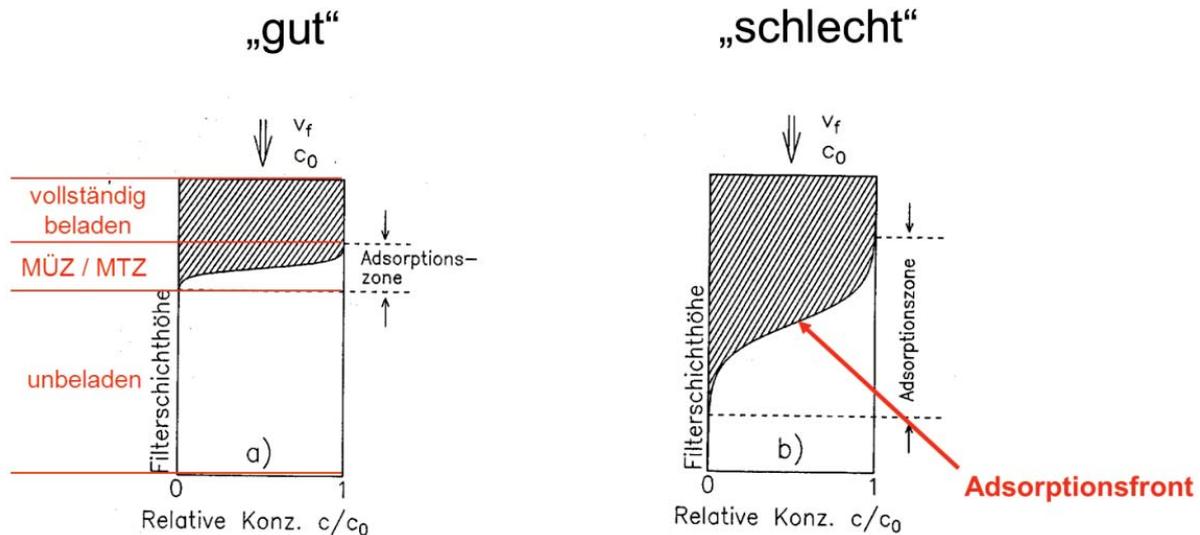
- Pulverkohlen (PAC = powdered activated carbon) weisen einen Durchmesser von weniger als 0,05 mm auf;
- Kornkohlen (GAC = granulated activated carbon) liegen im Durchmesser zwischen 0,5 und 4 mm.

Des Weiteren wird noch Formkohle angeboten. Diese weist eine zylindrische Form auf und liegt im gleichen Größenbereich wie die Kornkohlen.

Die beiden beschriebenen Kohlenarten werden in verschiedenen Reaktortypen eingesetzt – die Pulverkohle in einem Rührreaktor und die Kornkohle in einem Festbettreaktor (Filter).

Dadurch ergibt sich eine andere Kinetik. Beim Rührreaktor stellt sich eine Gleichgewichtsbeladung zwischen der Konzentration des Adsorptivs im Fluid und am Adsorbens ein. Über die Zeit nähert sich diese der maximalen Gleichgewichtsbeladung an.

Beim Einsatz der Kornkohle im Filter erfolgt die Adsorption über die Betttiefe in der sogenannten Adsorptionszone. Im **Bild 6** ist dies für zwei unterschiedlich adsorbierbare Stoffe dargestellt.



MÜZ = Massenübergangszone

MTZ = Mass Transfer Zone

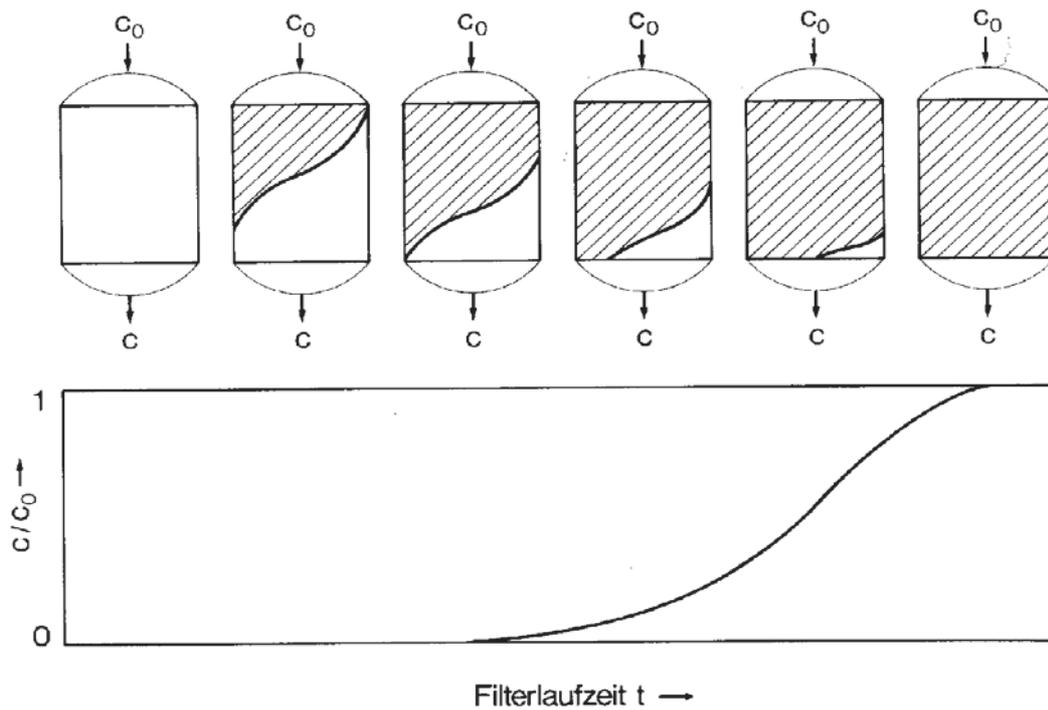
**Bild 6: Adsorptionsverhalten zweier unterschiedlicher Stoffe im Festbettadsorber (DVGW W 239)**

Zu erkennen ist, dass der gut adsorbierbare Stoff eine deutlich kürzere Übergangszone aufweist, in der das Adsorptiv bis auf die Konzentration von nahezu null zurückgehalten wird. Beim schlechter adsorbierbaren Stoff ist die Zone größer; der Stoff bricht also früher durch.

Über die Betriebszeit verlagert sich die aktive Zone tiefer in die Schüttung des Kornkohlefilters, wie **Bild 7** zeigt. In darunterliegenden Graphen ist die Ablaufkonzentration über der Filterlaufzeit aufgetragen. Der Durchbruch des Adsorptivs erfolgt zu dem Zeitpunkt, an dem die Übergangszone den unteren Rand der Schüttung erreicht hat. Im Filter wird zu diesem Zeitpunkt ein Teil des Adsorptivs noch zurückgehalten.

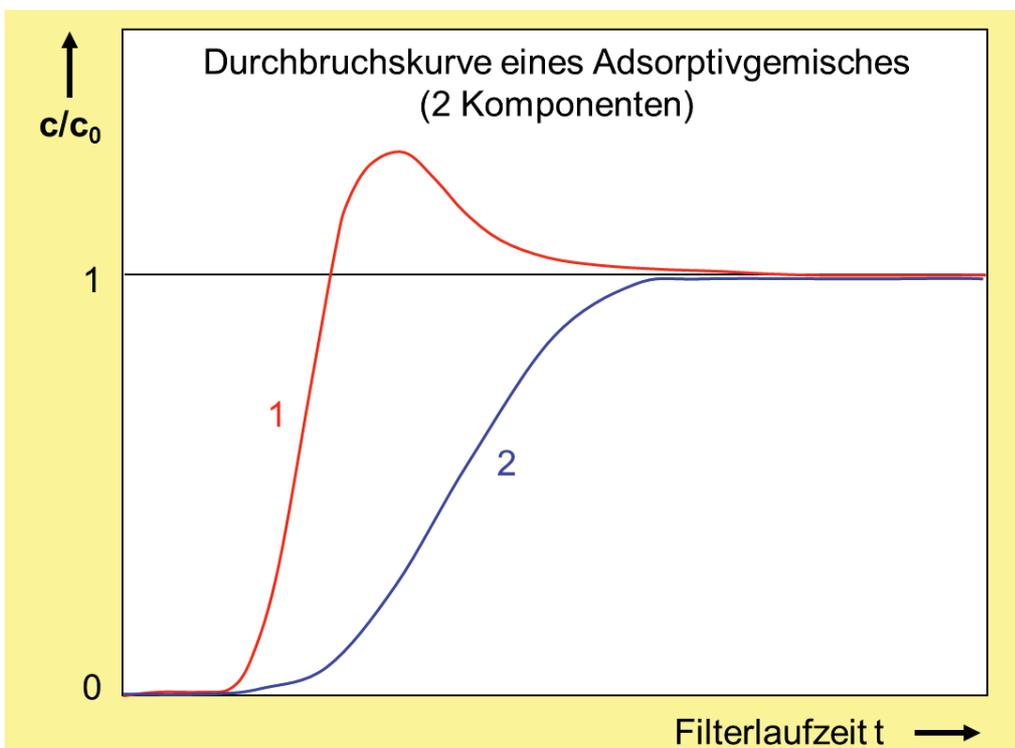
Bei der Adsorption von Mehrstoffgemischen konkurrieren, wie erwähnt, verschiedene Adsorptive um die Adsorptionsplätze auf dem Adsorbens. Dies kann dazu führen, dass ein schlecht adsorbierbarer Stoff, der rasch im Filterbett die Adsorptionsplätze belegt hat, von einem guten adsorbierbaren Stoff verdrängt wird.

Infolgedessen kann die Konzentration des schlecht adsorbierbaren Stoffes im Ablauf des Filters größer sein als die Zulaufkonzentration. Im **Bild 8** ist der Zusammenhang dargestellt. Dieses Verhalten wird „Chromatografie-Effekt“ genannt.



**Bild 7: Verlagerung der Adsorptionszone über die Filterlaufzeit (Sontheimer u. a., 1985)**

Zu beachten ist, dass bei mehreren Kornkohlefiltern mit versetzten Laufzeiten (unterschiedlichen Beladungszuständen) der Verschnitt aller Abläufe eine bessere Qualität hat, als der Ablauf des schlechtesten (beladensten) Filters ist.



**Bild 8: Durchbruchskurve eines Adsorptivgemisches (Worch 2004, modifiziert)**

## 7.2.2 Einsatz Aktivkohle in der Abwassertechnik zur Spurenstoffelimination

### 7.2.2.1 Pulveraktivkohle

Für die Spurenstoffelimination mittels Pulveraktivkohle als Stufe zwischen Nachklärung und Filtration liegen derzeit großtechnische Erfahrungen zu zwei Verfahren vor.

#### 1. Pulveraktivkohle in den Filterüberstau

Bei dem ersten Verfahren wird die Pulverkohle direkt in den Ablauf der Nachklärung vor der Filtration dosiert. Als Kontaktraum zwischen Kohle und Abwasser dient der Filterüberstau. Über die Filterlaufzeit reichert sich die Kohle im Filter und in der Schüttung an. Hier kann weiterhin eine Adsorption erfolgen. Bei der Rückspülung der Filter wird die beladene Kohle aus dem Filterbett entfernt. Über das Schlammwasser wird diese in den Zulauf der Kläranlage geführt. Dort kann eine weitere Beladung auf einem höheren Konzentrationsniveau erfolgen. In der Vorklärung wird die Kohle abgetrennt und mit dem Primärschlamm der Schlammbehandlung zugeführt.

Dieses Verfahren wurde von Meyer (2008) vorgeschlagen. Auf dem Klärwerk Wuppertal-Buchenhofen wurde für einen großtechnischen Versuch eine Filterkammer ( $A = 60 \text{ m}^2$ ) umgerüstet. Innerhalb eines Forschungsprojektes wurde der Betrieb dieser Kammer mit Pulveraktivkohledosierung über 1,5 a begleitet.

Die wesentlichen Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst. Weitere Angaben sind dem Abschlussbericht (Bornemann u. a., 2012) zu entnehmen.

- Favorisierte Dosiermenge PAK: 20 mg/l.
- Fällmitteldosierung ist erforderlich, da sonst rascher Durchbruch der Kohle durch den Filter.
- Optimierte Fällmitteldosierung ( $\text{FeCl}_3$ ): 0,1...0,2 mg Fe/mg PAK.  
Bei 20 mg PAK/l sind dies 2...4 mg Fe/l.
- Rückhaltung der PAK im Filterbett zu 96 %.
- Über die Rückspülung wurde die gesamte Kohle wieder aus dem Filter entfernt.
- Das Rückspülintervall des Filters lag bei einer Rückspülung in 24 d. Dies entsprach dem regulären Betrieb des Filters.
- Bei den beschriebenen Dosierungen scheint für den Standort Buchenhofen eine dauerhafte Unterschreitung des Schwellenwertes der Abwasserabgabe von 20 mg/l erreichbar.
- Eliminationsleistung im PAK-Filter für Carbamazepin, Diclofenac und Metoprolol ca. 80 %, bezogen auf Filterzulauf.
- Gesamtelimination im Klärwerk mit PAK-Filter für die Stoffe Sulfamethoxazol, Diclofenac oder Metoprolol zwischen 80 und 90 %.

## 2. Pulveraktivkohle mit Rückführung

Ein weiteres Verfahren stellt der Einsatz von Pulveraktivkohle in Verbindung mit einer Rückführung der Kohle dar.

Grundgedanke des Verfahrens ist die Zugabe von frischer Pulveraktivkohle (PAK) in biologisch gereinigtes Abwasser, wobei zur besseren Ausnutzung der Adsorptionskapazität der Kohle diese innerhalb der Stufe als Rücklauf im Kreislauf gefahren wird und so mehrmals mit frischem Abwasser in Kontakt kommt. Ein Teil der beladenen Kohle wird als Überschussskohle aus dem System entfernt und durch Frischkohle ersetzt. Die aus der Adsorptionsstufe abgezogene beladene Kohle kann zur weiteren Ausnutzung der Restadsorptionskapazität in die biologische Stufe rückgeführt werden. Alternativ kann sie über die Schlammbehandlung aus dem System ausgeschleust werden.

Für die eigentliche Adsorption ist ein Kontaktbecken mit einer Aufenthaltszeit von insgesamt 30 min vorgesehen. Die Abtrennung der Pulverkohle aus dem Abwasser erfolgt unter Einsatz von Flockungs- und Flockungshilfsmittel in der nachgeschalteten Sedimentation.

Restsuspensa und Kohlepartikel, die nicht in der Sedimentation der Adsorptionsstufe aus dem Wasser entfernt wurden, werden in der nachfolgenden Filtration zurückgehalten.

Dieses Verfahren wurde in Baden-Württemberg schon mehrfach umgesetzt. Als Beispiel sind folgende Kläranlagen zu nennen: Mannheim, Kressbronn-Langenargen, Stockacher Aach sowie Böblingen-Sindelfingen. Weitere Anlagen, wie Ravensburg oder Karlsruhe und Stuttgart, befinden sich im Bau bzw. in der Planung.

Die Ergebnisse aus dem Betrieb der großtechnischen Anlagen in Mannheim und Sindelfingen wurden von Schwentner u. a. (2013) veröffentlicht. Die wichtigsten Punkte werden hier wiedergegeben:

- optimierte PAK-Dosierung: 10 mg/l.
- Feststoffgehalt im Kontaktbecken: ca. 4 g TS/l.
- Einsatz von Fällmittel (Me-Salzen) und Flockungshilfsmittel (0,3 g/m<sup>3</sup>) hilfreich, um Filterdurchbruch zu verhindern.
- P<sub>ges</sub>-Gehalte im Ablauf Filtration von 0,1 mg/l erreichbar, wenn nicht fällbarer P-Anteil gering.
- kein Mehrverbrauch von Fällmittel → Simultanfällung wird reduziert, erhöhte Dosierung in Adsorptionsstufe.
- Reduktion CSB-Konzentration um ca. 30 % gegenüber Ablauf Nachklärung.
- Eliminationsleistung Mikroschadstoffe in Adsorptionstufe Kläranlage Sindelfingen größer 70 % bei 10 mg PAK/l für Bezafirbat, Diclofenac, Naproxen, Fenibrinsäure, Carbamazepin, Metoprolol, Iohexol, Iomeprol, Iopromid. Die Entnahme liegt bei ca. 10 % für das Antibiotikum Sulfamethoxazol.
- Stellenanteil Adsorptionsstufe ca. 0,65 MA/Monat.

### 7.2.2.2 Granulierte Aktivkohle

Der Einsatz von granulierter Aktivkohle in Festbettfiltern wurde in großtechnischen Versuchen in Nordrhein-Westfalen auf der Kläranlage Düren und der Kläranlage Obere Lutter untersucht.

In Düren wurde in einer vorhandenen Filterkammer die bestehende Schüttung (Zweischichtfilter) gegen granulierte Aktivkohle (GAK) ausgetauscht. Innerhalb eines Forschungsprojektes wurden zwei GAK-Füllungen untersucht (Bornemann u. a., 2012).

Die erste Kohle wies mit 1,4 bis 2,5 mm eine Körnung auf, die der oberen Schicht des ursprünglichen Zweischichtfilters entsprach. Die Füllhöhe betrug 1,2 m. Zusätzlich verblieben 0,4 m des alten Filtermaterials als untere Schicht im Filter. Die zweite GAK hatte mit 0,5 bis 2,5 mm eine feinere Körnung. Die Füllhöhe betrug 1,5 m. Das alte Filtermaterial wurde bis auf die Stützschrift beräumt.

Die Filterkammer wurde analog zu den restlichen Filtern mit der regulären Filtergeschwindigkeit betrieben. Diese unterliegt der normalen Dynamik des Filterzulaufs. Bei einer Elimination von rund 78 % können für die **erste GAK** folgende ausgetauschte Bettvolumina (BV) angesetzt werden:

|               |          |
|---------------|----------|
| Carbamazepin: | 500 BV   |
| Diclofenac:   | 900 BV   |
| Metoprolol:   | 5.700 BV |

Bei der **zweiten Aktivkohle** mit der feineren Körnung wurden folgende Ergebnisse erzielt:

|               |          |
|---------------|----------|
| Carbamazepin: | 2.500 BV |
| Diclofenac:   | 4.000 BV |
| Metoprolol:   | 4.600 BV |

Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass sich die Rückspülintervalle bei der zweiten Aktivkohle auf 6 h reduzierten. Bei der ersten Kohle unterschied sich die Rückspülhäufigkeit nicht von den restlichen Filtern.

Auf der Kläranlage „Obere Lutter“ wurde eine Filterkammer der bestehenden Filtration mit GAK ausgerüstet (Nahrstedt u. a. 2011). Der Filtration vorgeschaltet ist eine Festbett-denitrifikation. Die Schütthöhe betrug 2,5 m bei einer Filtergeschwindigkeit von 2 m/h. Dies entspricht einer Leerbettkontaktzeit (EBCT) von 75 min. Über eine Laufzeit von ca. 9.000 BV konnten sehr gute Eliminationsgrade für viele Spurenstoffe erzielt werden. Parallel dazu wurden Untersuchungen mit Versuchssäulen durchgeführt, die mit einer Filtergeschwindigkeit von 10 m/h durchflossen wurden. Die EBCT lag damit bei 15 min. Über eine Betriebszeit von etwa 9.000 Bettvolumina konnten für eine Auswahl von Spurenstoffen folgende mittlere Eliminationsgrade erreicht werden:

|               |      |
|---------------|------|
| Ibuprofen:    | 59 % |
| Bezafibrat:   | 77 % |
| Diclofenac:   | 79 % |
| Carbamazepin: | 90 % |
| Metoprolol:   | 91 % |

Für CSB wurde eine mittlere Elimination von 45 % erzielt. Hinsichtlich der erzielbaren Eliminationsgrade und Standzeiten der Filter wurden mit den nachgeschalteten GAK-Filtern (nach Festbettdenitrifikation) in der Kläranlage „Obere Lutter“ bessere Ergebnisse als mit dem Austausch des Filtermaterials in der bestehenden Filtration, wie in Düren, erzielt.

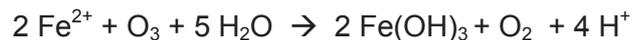
## 7.3 Ozonung

### 7.3.1 Grundlagen

#### 7.3.1.1 Einsatz und Wirkung von Ozon

Ozon wird als starkes Oxidationsmittel in der Wassertechnik schon lange genutzt. Hier ist z. B. die Trink- und Schwimmbadwasseraufbereitung zu nennen. Ozon wurde auch in der Abwasserreinigung eingesetzt, um Abwässer mit einem hohen Anteil schwer abbaubarer CSB-Verbindungen zu behandeln. Als Beispiel kann hier die Kläranlage Ochtrup genannt werden.

Ozon wirkt als Oxidationsmittel entweder durch Transfer eines Sauerstoffatoms oder rein durch Aufnahme von Elektronen des Oxidationspartners. Bei der Oxidation wird es selbst reduziert. Im folgenden Beispiel ist dies an der Oxidation von zweiwertigem zu dreiwertigem Eisen durch Ozon dargestellt:



Das  $\text{Fe}^{2+}$ -Ion gibt ein weiteres Elektron ab und ist dann dreifach positiv geladen. Das Ozon transferiert ein Sauerstoffatom zum sich bildenden dreiwertigen Eisenhydroxid.

Im Vergleich zu molekularem Sauerstoff ist Ozon als Oxidationsmittel mit einem Redoxpotenzial von 1,24 Volt gegenüber 0,401 Volt (bezogen auf pH 14) deutlich stärker.

Ozon oxidiert Nitrit sehr rasch bis zum Nitrat. Dabei werden je g Nitritstickstoff stöchiometrisch 3,43 g Ozon benötigt. Es geht keine Reaktion mit Ammonium ein. Die Reaktionswege des Ozons sind sehr unterschiedlich. Damit ist die Wirkung des Ozons komplex.

Zum einen kann Ozon direkt mit den anorganischen und organischen Wasserinhaltsstoffen reagieren; indirekt erfolgt die Reaktion über Hydroxid-Radikale ( $\text{OH}\cdot$ ). Je nach Milieubedingung überwiegt eine der beiden Reaktionsweisen. Im Wasser mit neutralem pH-Wert, geringer DOC-Hintergrundbelastung und niedrigen Temperaturen dominiert die direkte Reaktion. Bei höheren pH-Werten und DOC-Konzentrationen erfolgt die Reaktion zumeist über den indirekten Weg.

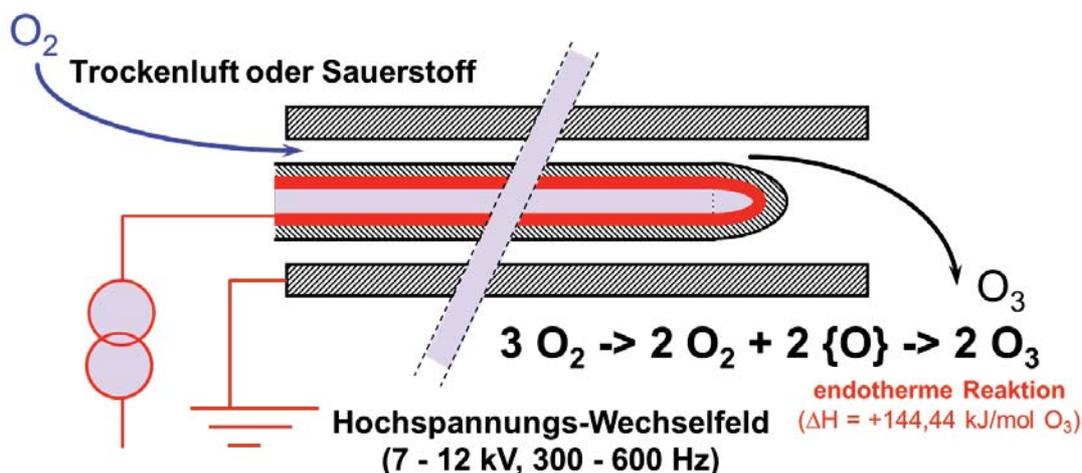
Die Bildung der genannten Radikale erfolgt beispielsweise über die Anwesenheit bestimmter Wasserinhaltsstoffe, wie Huminstoffe. Die  $\text{OH}\cdot$ -Radikale reagieren sehr schnell, jedoch auch sehr unspezifisch. Zudem können sie durch sogenannte Radikalfänger (Scavenger) reduziert werden. Als Fänger können Karbonationen (Härtebildner), Huminstoffe aber auch Ortho-Phosphat wirken. Die Radikale reagieren jedoch auch mit Wasserinhaltsstoffen, die allein mit dem Ozon nicht reagiert hätten.

Bei dem sogenannten AOP (Advanced Oxidation Process) wird die Bildung von Radikalen künstlich unterstützt. Beim Peroxon-Verfahren durch die Dosierung von Wasserstoffperoxid als zweites Oxidationsmittel oder durch eine UV-Bestrahlung parallel zur Ozondosierung.

Insgesamt oxidiert Ozon die meisten organischen Wasserinhaltsstoffe nicht bis zum CO<sub>2</sub>, sondern bewirkt eine Teiloxidation. Die Molekülgröße der Stoffe wird verringert. Ozon wirkt weiterhin bevorzugt auf Doppelbindungen in den Molekülen. Dies bedeutet, dass durch die Ozonbehandlung Zwischenprodukte gebildet werden, die beispielsweise wieder biologisch verfügbar sind. Der Ozonbehandlung in der Trinkwasseraufbereitung wird zumeist standardmäßig eine biologisch arbeitende Stufe nachgeschaltet (z. B. biologisch aktivierter Aktivkohlefilter), um die neu gebildeten Stoffe abzubauen zu können. Weiterhin ist die toxikologische Wirkung der gebildeten Transferprodukte zu beachten.

### 7.3.1.2 Ozonanwendung

Ozon ist aufgrund seiner hohen Reaktivität selbst sehr instabil. Es wird daher in der Regel am Ort der Anwendung hergestellt. Dies erfolgt über die stille elektrische Entladung aus Sauerstoff bzw. sauerstoffhaltigem Gas (Luft) in einem Hochspannungs-Wechselfeld. In nachstehender Grafik ist dies schematisch dargestellt.



**Bild 9:** Schema Ozonerzeugung (Gujer 1999, modifiziert)

Die Reaktion selbst ist endotherm; es muss also Energie in Form von elektrischer Energie zum Ablauf der Reaktion von außen zugeführt werden. Theoretisch werden pro kg Ozon 0,836 kWh benötigt. In der Praxis kann dieser Wert aufgrund von Verlusten (rascher Zerfall) nicht erreicht werden. Moderne Ozonerzeuger benötigen ca. 8...10 kWh/kg O<sub>3</sub>, wenn technischer Sauerstoff als Prozessgas eingesetzt wird.

Die Verluste treten in Form von Wärme auf, die abgeführt werden muss. Dies bedeutet, dass der Ozonerzeuger gekühlt werden muss. Dazu sind wiederum Energieaufwendungen notwendig.

Aufgrund der gesundheitsschädlichen Wirkung des Ozons muss die Abluft aus den Reaktionsbecken vor Abgabe in die Umgebung behandelt werden. Zur sogenannten Restozonvernichtung stehen thermisch/katalytische oder thermische Verfahren zur Verfügung.

Insgesamt addiert man den Energiebedarf von O<sub>3</sub>-Erzeugung, Kühlung und Restozonvernichtung, so ergibt sich ein Bedarf an elektrischer Energie von 10...11 kWh/kg O<sub>3</sub>.

Für den Eintrag des Ozons werden im Abwasserbereich heute zwei Verfahren vorwiegend genutzt.

1. **Eintrag über Diffusoren.** Das ozonhaltige Gas wird über Domdiffusoren aus Keramik in das Abwasser eingetragen.
2. **Eintrag über Injektoren.** Ein Teilstrom des zu behandelnden Abwassers wird über Injektoren mit dem ozonhaltigen Gas versetzt. Dieser ozonhaltige Teilstrom wird nachfolgend mit dem Hauptstrom vermischt.

Für den Eintrag über Injektoren ist ein weiterer Pumpenkreislauf notwendig. Aufgrund der nur geringen Ozoneinträge für die Spurenstoffelimination stellt für diesen Anwendungsfall der Eintrag über Diffusoren das bevorzugte Eintragungssystem dar.

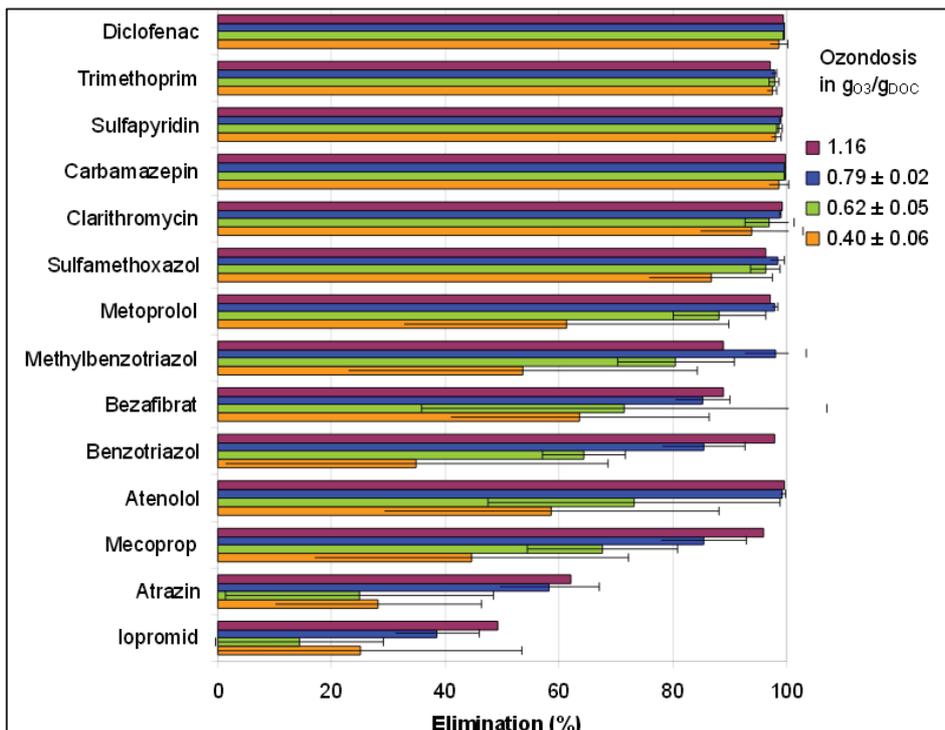
Der Eintrag erfolgt in beiden Systemen in Behältern mit einem Wasserspiegel zwischen 5 und 6 m. Neben dem Eintrag erfolgt in diesen Kammern auch die Reaktion des Ozons mit den Wasserinhaltsstoffen. Die Aufenthaltszeit in den Kontakt-/Traktionsbehältern liegt zwischen 15 und 30 min. Einbauten in den Behältern, mit Ausnahme einer Tauchwand im Abflussbereich, ergeben keine Verbesserungen (Herbst u. a., 2011). Der Ablauf aus dem Behälter wird, wie schon erwähnt, der Restozonbehandlung zugeführt.

### 7.3.2 Einsatz von Ozon in der Abwassertechnik zur Spurenstoffelimination

Zum Einsatz von Ozon in der 4. Reinigungsstufe gibt es verschiedene Untersuchungen auch im großtechnischen Maßstab.

Ternes u. a. (2003) führten Untersuchungen im halbtechnischen Maßstab mit dem Ablauf der Kläranlage Braunschweig durch. Bei einer Ozondosis von 10 mg/l wurden von den 23 untersuchten Arzneimittelwirkstoffen alle bis unter die Nachweisgrenze eliminiert. Eine weitgehende Wirkung war jedoch auch schon bei einer Dosierung von 5 mg/l zu beobachten. Eliminationsgrade von über 80 % konnten bei den drei Röntgenkontrastmitteln Iopamidol, Iomeprol und Iopromid erst bei Dosierung von 15 mg/l erreicht werden. Der DOC des Kläranlagenablaufs betrug 23 mg/l; der pH-Wert lag bei 7,2. Die Kontaktzeit des Ozons lag bei 9 min.

Auf der Kläranlage Regensdorf (30.000 EW) in der Schweiz wurden im technischen Maßstab Untersuchungen durchgeführt (Abegglen u. a. 2009). Der Ablauf aus der Nachklärung der Anlage wurde mit Ozon behandelt. Dem Ozon nachgeschaltet war die (bestehende) Filtrationsanlage. Der DOC im Ablauf der Nachklärung lag mit ca. 5 mg/l auf einem niedrigen Niveau. In der Grafik, **Bild 10**, sind die erzielten Eliminationsgrade dargestellt.



**Bild 10: Ergebnisse Elimination Spurenstoffe ARA Regensburg (Abegglen u. a. 2009)**

In wirtschaftlicher und betrieblicher Hinsicht erwies sich in Regensburg eine Ozondosis von 0,62 mg O<sub>3</sub>/mg DOC als optimal. Aufgrund des geringen DOC im Ablauf der Nachklärung ergab sich daraus eine Ozondosis von 3,1 mg/l. Bei einer Übertragung auf andere Standorte mit einem gegebenenfalls höheren DOC-Gehalt im Zulauf der Ozonstufe ist dies zu berücksichtigen.

Innerhalb des Projektes wurden auch die Bildung von Transferprodukten und ihre Umweltrelevanz untersucht. Es zeigte sich, dass der Ablauf der Ozonung ein erhöhtes ökotoxikologisches Potenzial aufwies. Durch den nachgeschalteten Sandfilter wurde dieses wieder reduziert. Die Bildung von stabilen und toxikologisch relevanten Reaktionsprodukten konnte nicht festgestellt werden. In Regensburg handelte es sich um einen Dynasandfilter, der mit einer Filtergeschwindigkeit von 14,4 m/h im Trockenwetterfall betrieben wurde. Bei einer Filterbetttiefe von 1 m ergibt dies eine Aufenthaltszeit von ca. 4 min.

In Nordrhein-Westfalen wurden die Kläranlagen Bad Sassendorf, Schwerte und Duisburg-Vierlinden mit einer Ozonstufe ausgerüstet. Bei den Kläranlagen Bad Sassendorf und Vierlinden wird der Ablauf ozoniert. Die Ergebnisse beider Anlagen entsprechen sich (Grünebaum u.a., 2012).

Die notwendigen Ozondosen, die in Duisburg-Vierlinden und Bad Sassendorf zur Eliminierung notwendig waren, bewegen sich auf dem Niveau der Werte von Regensburg. Zu berücksichtigen ist, dass der DOC im Ablauf der Nachklärung in Bad Sassendorf ebenfalls auf einem niedrigen Niveau liegt.

## 8 Darstellung der untersuchten Verfahrenskombinationen

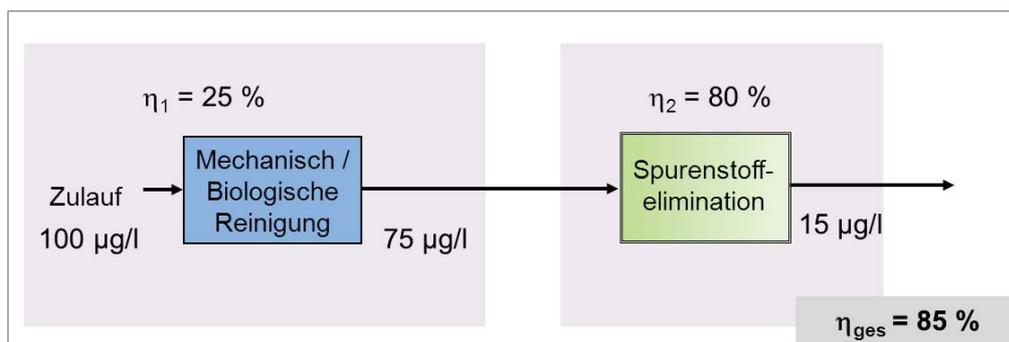
### 8.1 Beschickungsmenge

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.

Im Folgenden wird dies am Beispiel des Arzneimittels Diclofenac dargestellt. Für diesen Stoff kann in der bestehenden mechanisch/biologischen Reinigungsstufe ein Eliminationsgrad von 25 % angesetzt werden (**Siegrist 2013, Bsp. Diclofenac**). In der weitergehenden Abwasserreinigung wird von einer zusätzlichen Eliminationsrate von 80 % in dieser Reinigungsstufe ausgegangen. Unter diesen Rahmenbedingungen kann bei einer Vollstrombehandlung ein Gesamtwirkungsgrad von 85 % erreicht werden. Bei einer Teilstrombehandlung von 90 % der gesamten Abwassermenge können Eliminationsraten von 79 % erzielt werden. Schematische Darstellungen dazu siehe **Bild 11** und **Bild 12**.

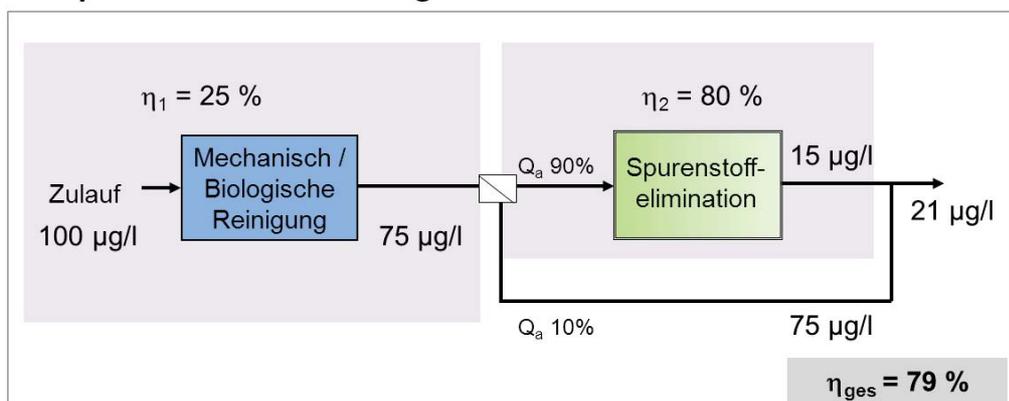
Stellt man den Zusammenhang zwischen den Anteilen Teilstrombehandlung und Eliminationsgrad unter den oben genannten Annahmen grafisch dar, so ergibt sich der in **Bild 13** gezeigte Zusammenhang.

#### Beispiel Vollstrombehandlung



**Bild 11:** Wirkungsgrade bei Vollstrombehandlung (Konzentration beispielhaft)

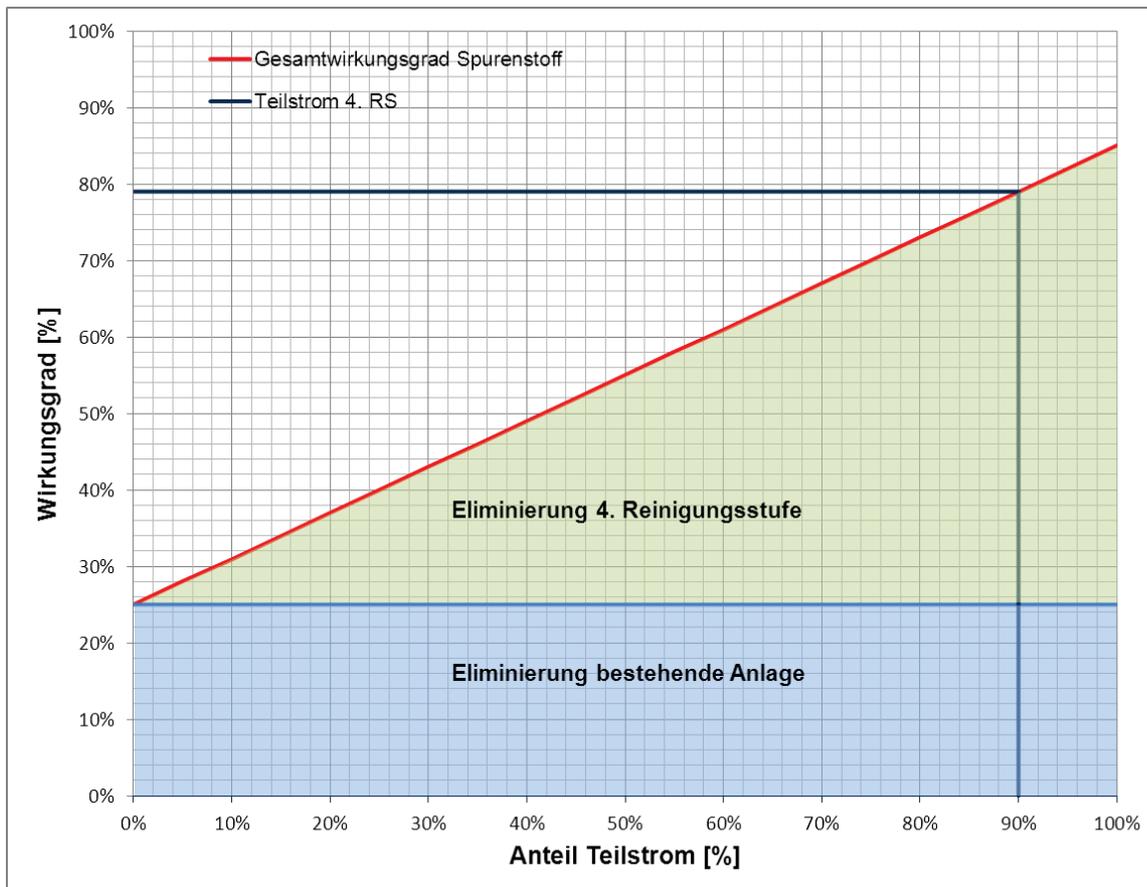
#### Beispiel Teilstrombehandlung



**Bild 12:** Wirkungsgrade bei Teilstrombehandlung (Konzentration beispielhaft)

Die Bemessung der 4. Reinigungsstufe erfolgt auf Basis der Ablaufwerte der Kläranlage Emmerich für den Zeitraum August 2012 bis November 2013 (**Kapitel 3**).

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.



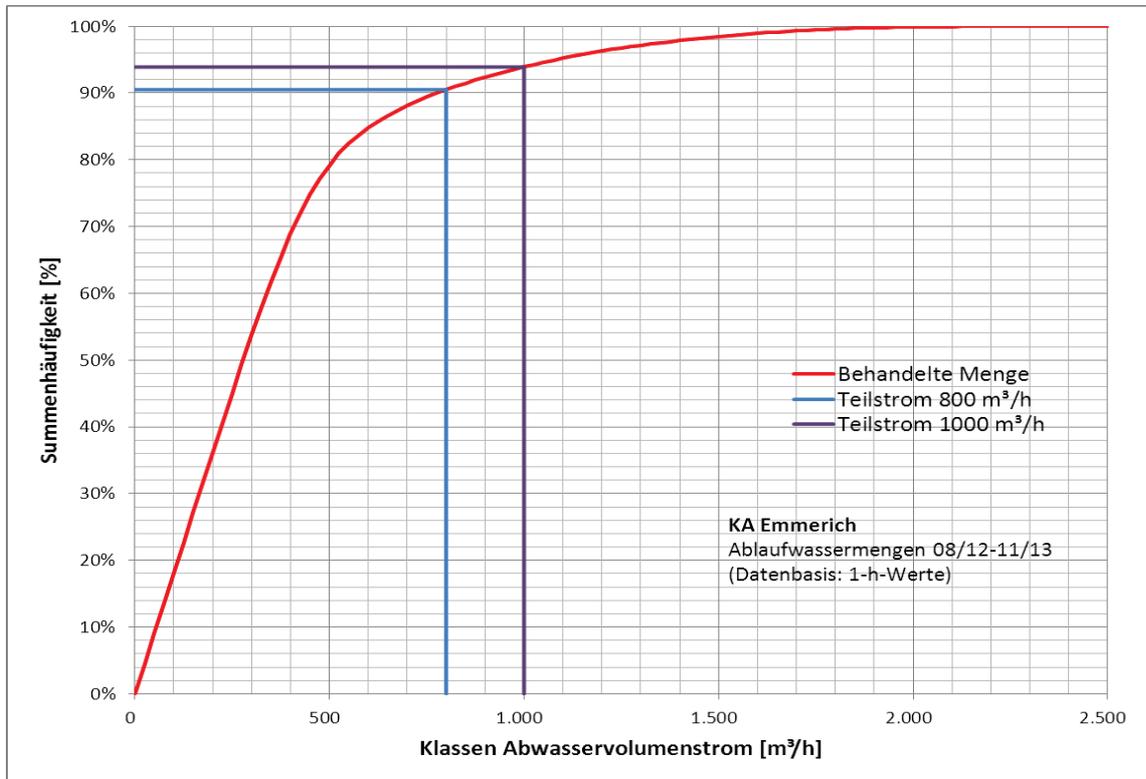
**Bild 13:** Beispielhaft grafische Darstellung Wirkungsgrade bei Teilstrombehandlung

**Bild 14** stellt die Summenhäufigkeit der einzelnen Teilstrommengen dar. Die berechnete Gesamtabwassermenge nach dieser Auswertung beträgt 4.837.011 m<sup>3</sup>/a. Die Mengen beziehen sich auf die eigene Auswertung der Stundenwerte im betrachteten Zeitraum von August 2012 bis November 2013.

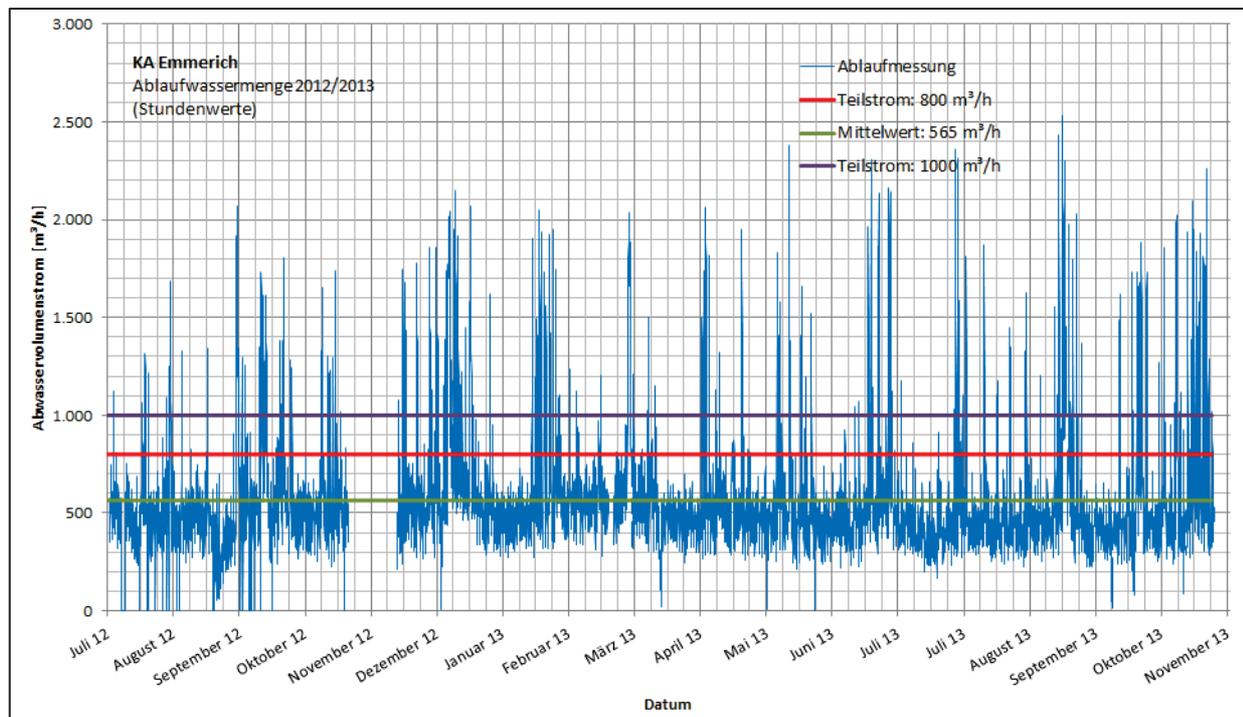
Bei einem Teilstrom von maximal **800 m<sup>3</sup>/h** wird eine Abwassermenge von **4.377.846 m<sup>3</sup>/a** in der 4. Reinigungsstufe behandelt. Unter den gewählten Ansätzen kann somit eine Elimination von 79% erreicht werden. Die Verfahrensstufe kann so bei einer Behandlung im Vergleich zur Vollstrombehandlung um 70 % kleiner ausgeführt werden

Bei einem Teilstrom von **1.000 m<sup>3</sup>/h** belief 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 m³/h** als geeignet betrachtet, so dass die Bemessung und der Verfahrensvergleich auf Grundlage dieser Bemessungswassermenge beruhen.



**Bild 14:** Summenhäufigkeitskurve für die Ablaufwassermenge im Untersuchungszeitraum



**Bild 15:** Behandelte Abwassermenge in Abhängigkeit des Bemessungszuflusses der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination

## 8.2 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.

## 8.3 Randbedingungen

Als Standort für die 4. Reinigungsstufe wurde die Erweiterungsfläche im Südosten des Kläranlagegeländes festgelegt. Hier ist eine einfache Anbindung an den bestehenden Ablauf der Kläranlage möglich. Das Geländeniveau in diesem Bereich liegt unterhalb dem des restlichen Geländes. Die Zuwegung zu dieser Fläche wird bei der zeichnerischen Darstellung der Varianten mitbetrachtet.

Der Ablauf der Kläranlage besitzt zum Rhein hin bei Normalwasserstand ein großes Gefälle, so dass die 4. Reinigungsstufe im freien Gefälle durchflossen werden kann. Aus diesem Grund ergeben sich für diese Bauwerke tiefe Gründungsebenen. Bei Rheinhochwasser ist ein steigender Grundwasserspiegel zu erwarten. In der weiterführenden Planung ist diesem Punkt besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Im Rahmen dieser Studie wurde für Hochwasserschutzmaßnahmen ein Zuschlag von 10% auf die Investitionskosten der Bautechnik angenommen.

## 8.4 Varianten

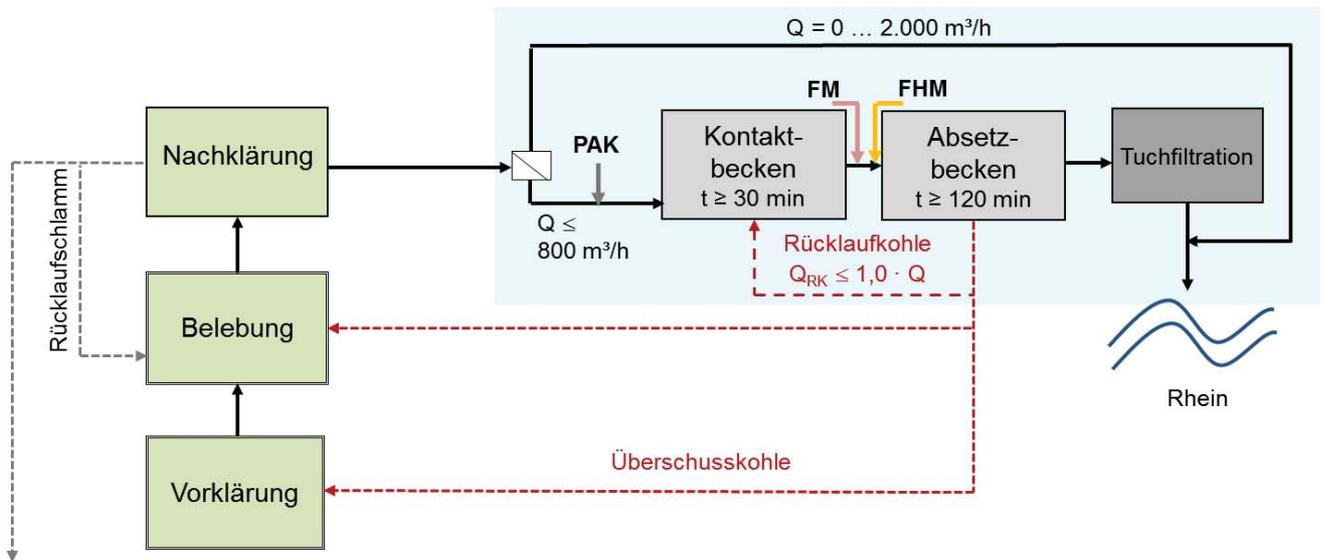
### 8.4.1 Variante 1: PAK mit Rücklaufkohle

#### 8.4.1.1 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. 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 ausnützen 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 16: 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 m³/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.

#### 8.4.1.2 Ausführung

Den Lageplan der Variante stellt **Blatt 1** der Planunterlagen dar. Der Klarwasserstrom wird im bestehenden Ablaufschacht mittels eines Schälblechs geteilt, wobei ein Teilstrom von rund 800 m³/h der 4. Reinigungsstufe zugeführt wird.

#### Kontaktbecken und Absetzbecken

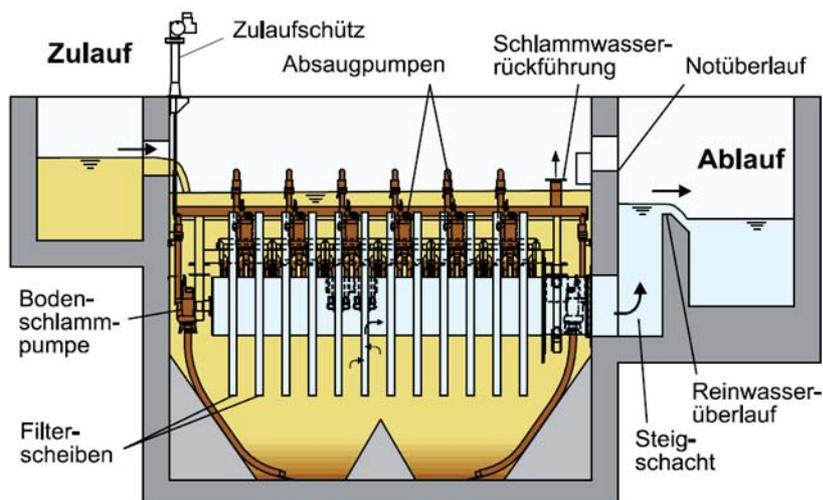
Für die Sedimentationsstufe ist ein horizontal durchströmtes Absetzbecken (Rundbecken) vorgesehen. Das Kontaktbecken wird als umlaufendes Gerinne mit einer Breite von 2 m um das Sedimentationsbecken angeordnet. Das Kontaktbeckenvolumen beträgt 637 m³ und die Aufenthaltszeit 30 min.

Das Absetzbecken wird mit einem Innendurchmesser von 24 m ( $D_a = 24,80$  m) ausgeführt. Das Becken wird mit einem Rundräumer ausgerüstet. Die Oberfläche beträgt 433 m² und das Volumen 1.688 m³. 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 Überschussskohle wird über eine weitere Pumpe aus dem Schacht entnommen und zur Vorklärung (oder zur Belebung) geleitet. Es wird mit einem Rücklaufkohleverhältnis von 1 gerechnet.

## Tuchfiltration

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. In **Bild 17** ist ein Tuchfilter im Schnitt dargestellt.



**Bild 17:** Schnitt eines Tuchfilters, Ausführungsbeispiel (Quelle: Mecana)

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

## PAK-Silo

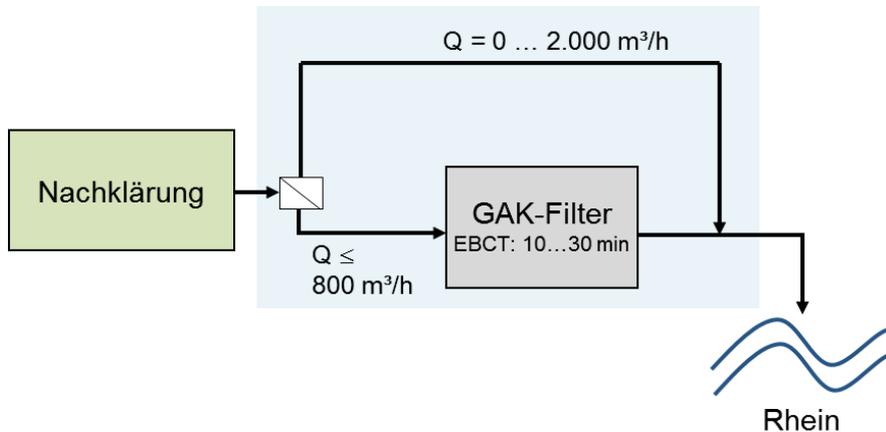
Das Silo zur Lagerung der Aktivkohle mit einem Inhalt von 125 m<sup>3</sup> wird im hinteren Bereich der rechten Beckenhälfte angeordnet. Das Silo verfügt über zwei Dosiergeräte. Das Treibwasser (5 bis 7 m<sup>3</sup>/h je Dosiergerät) für die PAK-Dosierung wird über eine gesonderte Pumpe aus dem Filtrat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

## Flockungs- und Flockungshilfsmittel

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



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 19: Blockschema 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.

#### 8.4.2.2 Ausführung

Den Lageplan der Variante stellt **Blatt 2** der Planunterlagen dar. 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.

#### Filterblock

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.

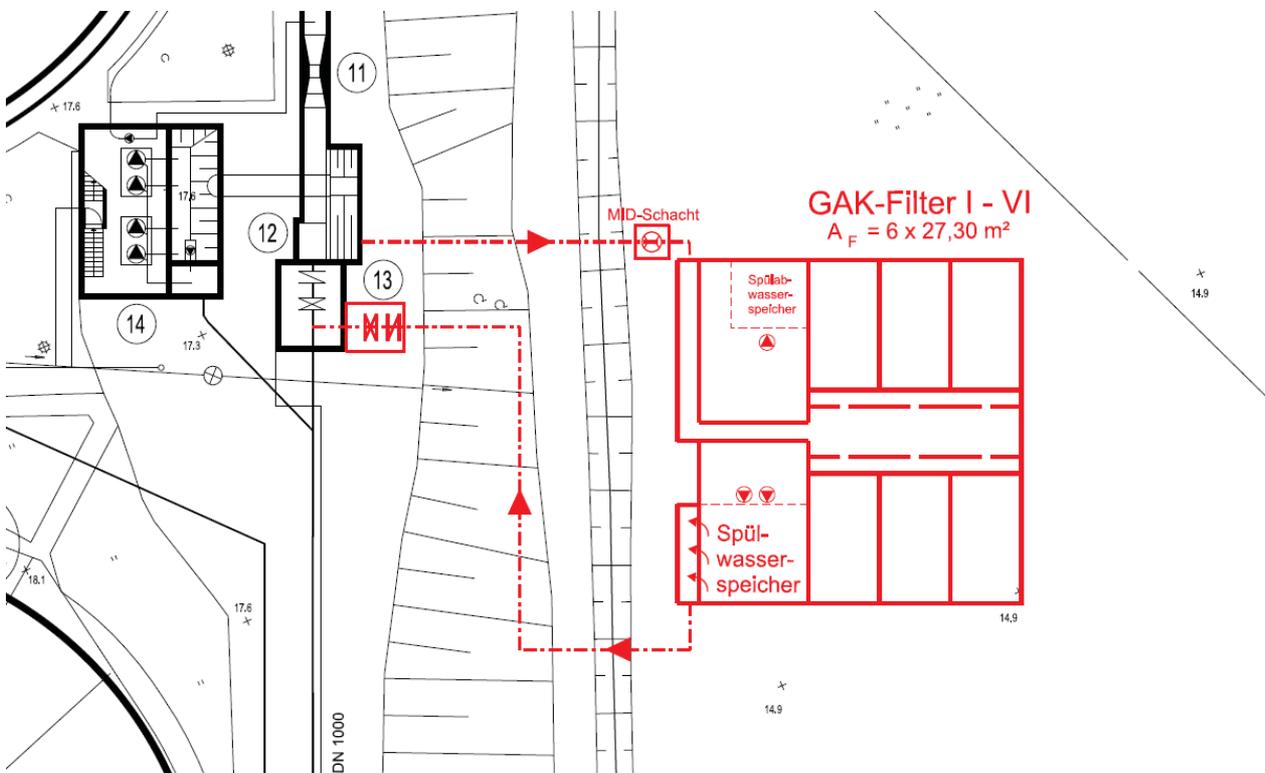
Der Zulauf zu den sechs Filtern erfolgt aus einem offenen Gerinne. Über mit Schiebern versehene Öffnungen im Gerinne fließt das Wasser in die Filterkammern. Die Gleichverteilung des Zulaufs auf alle in Betrieb befindlichen Filterkammern wird über die Schwellen an der Stirnseite der Filter realisiert.

### Spülwasserspeicher

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.

### Spülabwasserspeicher

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



**Bild 20:** Lageplanausschnitt Variante 2: GAK-Filtration

## 8.4.3 Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Sandfilter

### 8.4.3.1 Allgemeines

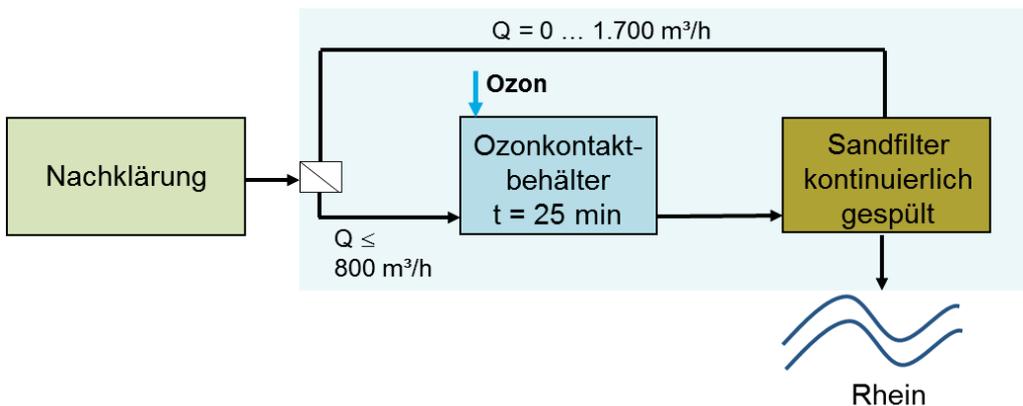
Neben der Entfernung der Spurenstoffe auf adsorptivem Wege ist die Oxidation der Stoffe eine andere Möglichkeit zur Elimination. Hier bietet sich der Einsatz von Ozon als starkes Oxidationsmittel an.

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 Abbelegen u. a. (2009) in einem großtechnischen Versuch auf der ARA Regensdorf nachweisen konnte. Im Filter erfolgt der Abbau eventuell toxikologisch be-

denklicher 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 21: Blockscheema 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:

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

### 8.4.3.2 Ausführung

Den Lageplan der Variante stellt **Blatt 3** der Planunterlagen dar. 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.

### Kontaktbehälter

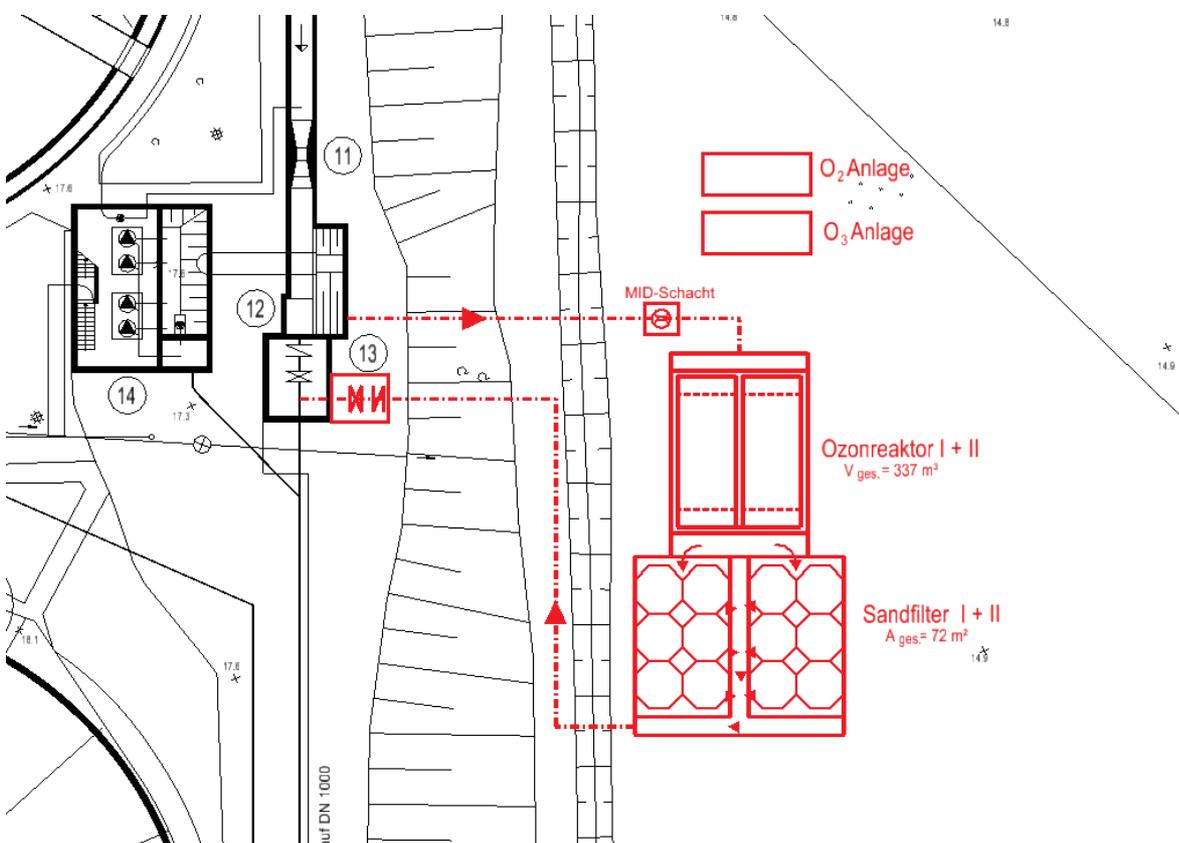
Die beiden Kontaktbehälterstraßen sind als Betonbauwerk ausgeführt. Die Behälter verfügen über keine Einbauten, außer einer unterströmten Tauchwand im letzten Drittel des Behälters. Dieser Bereich dient als Entspannungszone. Untersuchungen von Herbst u. a. (2011) zeigten, dass weitere Einbauten (Leitwände) die Effizienz nicht nachhaltig verbessern. Das Volumen der Kontaktbehälter beträgt  $337 \text{ m}^3$ .

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).

Die Restozonvernichtung erfolgt thermisch/katalytisch. Der Ablauf der Behälter wird über ein Gerinne in die anschließende Filtration geführt.

### Ozonerzeugung

Die Ozonerzeuger weisen eine Leistung von  $2 \times 4.000 \text{ g/h}$  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 Ablauf der Filtration bereitgestellt. Die Erzeuger werden mit der zugehörigen Schaltanlage in Containern untergebracht.



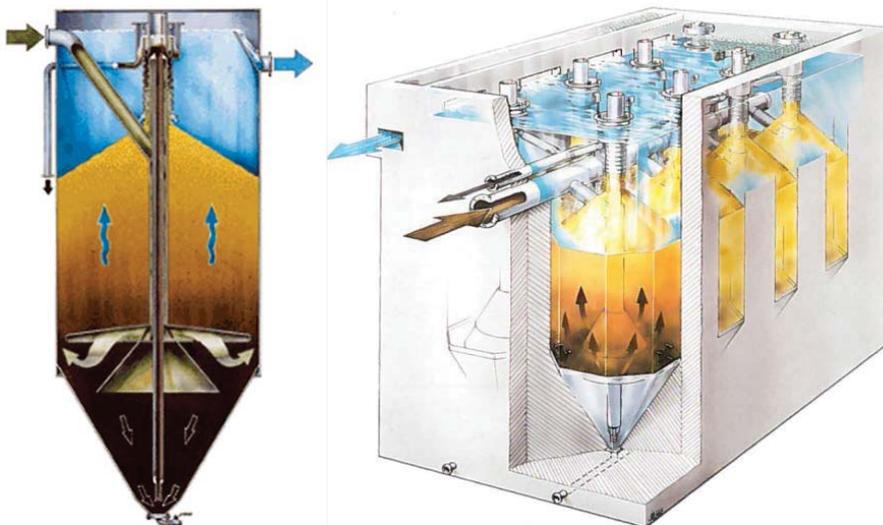
**Bild 22:** Lageplanausschnitt Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Sandfilter

### Sandfilter (kontinuierlich gespült)

Als Nachreaktor wird ein kontinuierlich arbeitender Sandfilter (Dyna-Sandfilter) eingesetzt. Das Sandbett im Filter wird von unten nach oben durchströmt. Die im Abwasser enthaltenen Suspensa werden im Sand zurückgehalten. Über eine Mammutpumpe wird der verunreinigte Sand aus dem Filterbett von unten nach oben transportiert. In einem Sandwäscher wird dieser Sand mit Filtrat gereinigt. Der gereinigte Sand fällt auf das Filterbett zurück. Das anfallende Schlammwasser aus dem Sandwäscher fließt über den Waschwasserablauf ab. Für den Betrieb der Mammutpumpe ist eine Druckluftversorgung (Kompressor) notwendig. Rückspülpumpen werden nicht benötigt. Siehe **Bild 23**.

Es sind insgesamt 12 Filter aufgeteilt auf zwei Straßen vorgesehen. Jeder Filter weist eine Filterfläche von 6 m<sup>2</sup> auf, sodass sich eine Gesamterfläche von 72 m<sup>2</sup> ergibt.

Jeweils 6 Filter werden in ein Betonbecken eingebaut. Der Zulauf auf die einzelnen Filterstraßen erfolgt über Gerinne. Jede Straße kann über ein Schütz abgeschiebert werden.



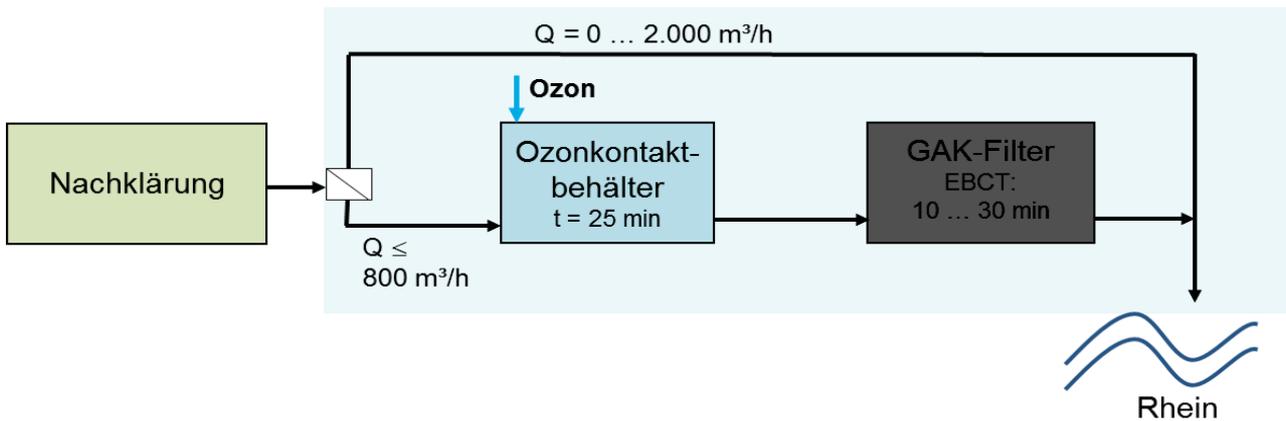
**Bild 23:** Dyna-Sandfilter: links: Prinzipdarstellung, rechts: Anordnung im Betonbecken (Quelle: Nordic-Water)

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

##### 8.4.4.1 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 24: 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.

#### 8.4.4.2 Ausführung

Den Lageplan der Variante stellt **Blatt 4** der Planunterlagen dar. 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.

#### Kontaktbehälter

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.

#### Ozonerzeugung

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.



### 8.5 Ergebnisübersicht Varianten

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

|                  | Variante 1<br>Pulverkohle mit Rücklaufkohle  | Variante 2<br>GAK-Filtration  | Variante 3<br>Ozonung mit nachges. Filtration  | Variante 4<br>Ozonung + BAK-Filtration   |
|------------------|--|---|--|--|
| <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 Ozon-dosis zu erwarten</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Komplexe Wirkung</li> <li>→ 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 Schlammfall 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, 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>   |

## 9 Kosten

### 9.1 Allgemein

Die Wirtschaftlichkeit der vier betrachteten Varianten wird anhand der Investitions- und Betriebskostenschätzung ermittelt. Anhand der Jahreskosten werden dann die Varianten verglichen. In einer Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss einzelner Kostengruppen und der betrieblichen Einstellungen auf die Jahreskosten betrachtet. Die im Rahmen dieser Studie geschätzten Kosten können um  $\pm 30\%$  von den tatsächlichen Kosten abweichen.

### 9.2 Investitionskosten

Anhand der Bemessungen und der Auslegung sowie der zeichnerischen Darstellung der Varianten wurden für die betrachteten Lösungen die Investitionskosten, unterteilt in die Kostengruppen Bau-, Maschinen- und EMSR-Technik, ermittelt. Die genaue Zusammenstellung enthält **Anlage 1**.

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

Als Baunebenkosten wurden 20 % der Netto-Investitionssumme angesetzt. Ein Förderung der Erstinvestition wurde nicht berücksichtigt.

In nachfolgender Tabelle sind die Kosten zusammengestellt:

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

| Pos.-Nr                                      | Text            |            | Variante 1          | Variante 2          | Variante 3          | Variante 4          |
|--|-----------------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|  |                 |            | PAK m. Rücklaufk.   | GAK-Filtration      | Ozon mit Sandfilter | Ozon mit BAK        |
| 1  | Bautechnik      | EUR        | 1.531.171,78        | 1.061.453,00        | 1.030.077,49        | 1.731.874,09        |
| 2  | Maschinenteknik | EUR        | 1.107.073,53        | 739.662,00          | 1.019.760,00        | 1.343.622,00        |
| 3  | EMSR-Technik    | EUR        | 404.122,06          | 379.831,00          | 417.904,00          | 681.811,00          |
| <b>Summe Herstellungskosten, netto</b>       |                 | <b>EUR</b> | <b>3.042.367,38</b> | <b>2.180.946,00</b> | <b>2.467.741,49</b> | <b>3.757.307,09</b> |
| Nebenkosten (Ing.-Honoare, Prüfgebühr, usw.) |                 | EUR        | 608.473,48          | 436.189,20          | 493.548,30          | 751.461,42          |
| <b>Summe Baukosten, netto</b>                |                 | <b>EUR</b> | <b>3.650.840,85</b> | <b>2.617.135,20</b> | <b>2.961.289,78</b> | <b>4.508.768,51</b> |
| Mehrwertsteuer                               |                 | EUR        | 578.049,80          | 414.379,74          | 468.870,88          | 856.666,02          |
| <b>Summe Baukosten, brutto</b>               |                 | <b>EUR</b> | <b>4.228.890,65</b> | <b>3.031.514,94</b> | <b>3.430.160,67</b> | <b>5.365.434,53</b> |
| <b>Anteil</b>                                |                 |            | <b>139%</b>         | <b>100%</b>         | <b>113%</b>         | <b>177%</b>         |

Die Investitionskosten sind für Variante 2 am günstigsten, gefolgt von Variante 3 und 1. Am teuersten ist Variante 4. Dies ist damit zu erklären, dass diese Variante eine Kombination aus den Varianten 2 und 3 darstellt.

### 9.3 Betriebskosten

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

|                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| Strombezugskosten   | 0,14 EUR/kWh, netto |
| Verbrennung Schlamm | 41 EUR/Mg TS, netto |
| Fällmittel          | 127 EUR/Mg, netto   |

Weitere Werte wurden wie folgt angenommen:

|                             |                        |
|-----------------------------|------------------------|
| Personal                    | 40.000 EUR/(MA·a)      |
| Pulveraktivkohle            | 1.500 EUR/Mg, netto    |
| Granulierte Aktivkohle      | 1.300 EUR/Mg, netto    |
| Sauerstoff inkl. Tankmiete  | 0,25 EUR/kg, netto     |
| Entwässerungskosten Schlamm | 80 EUR/Mg TS, netto    |
| Entwässerungsergebnis       | 25 %                   |
| Flockungshilfsmittel        | 2.750 EUR/Mg WS, netto |

Die Kosten für die Aktivkohlen entstammen aus aktuellen Ausschreibungsergebnissen (PAK) oder aus großtechnischen Betriebsversuchen (GAK). Derzeit sind Preise von 1.300 EUR/Mg, netto noch gängig. Eine Steigerung des Preises für Aktivkohle wird erwartet. Daher wird für die Berechnung ein Preis von 1.500 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 515 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 in **Anlage 1** herangezogen.

Für die Variante 1 ist die Dosierung von Flockungs- bzw. Fällmitteln (Me-Salzen) notwendig. In der Summe ist jedoch keine zusätzliche Menge notwendig, da die Dosierung der Fällmittel von der Belegung (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 Sinfeldingen 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 für die Betriebskostenermittlung folgender Ansatz gewählt. Der Schlamm setzt sich zu einem Drittel aus der PAK und zu 2/3 aus Organika (CSB, AFS) und Fällprodukten zusammen.

Bei den Varianten 2 bis 4 ist durch die Filtration mit einem erhöhten Rückhalt an abfiltrierbaren Stoffen zu rechnen, die wiederum den Schlammanfall auf der Anlage erhöhen. Für die Kostenberechnung wurde ein zusätzlicher Rückhalt von 5 mg AFS/l behandeltem Abwasser in Ansatz gebracht.

Neben den Entsorgungskosten des Schlammes fallen im Rahmen der Schlammbehandlung noch die Entwässerungskosten auf der Kläranlage an. Diese wurden mit 80 EUR/Mg TS, netto berücksichtigt.

Bei Variante 1 ist in jedem Fall der Einsatz von Flockungshilfsmitteln notwendig. Es wurden spezifische Kosten von 3.500 EUR/Mg Wirkstoff angesetzt. Weitere Werte sind der Betriebskostenberechnung in **Anlage 3** zu entnehmen.

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

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

Die Betriebskosten sind in **Tabelle 2** aufgeführt. Die betriebsgebundenen Kosten beinhalten Personal- und Wartungs-/Instandhaltungskosten. Die verbrauchsgebundenen Kosten setzen sich aus den Energie-, den Chemikalien- und den Schlammmentwässerungs- sowie Schlamm Entsorgungskosten zusammen.

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

|                                     | Text                       |            | Variante 1<br>PAK m. Rücklaufk. | Variante 2<br>GAK-Filtration | Variante 3<br>Ozonung + SF | Variante 4<br>Ozonung + BAK |
|-------------------------------------|----------------------------|------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 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 Betriebskosten, netto</b>  |                            | <b>EUR</b> | <b>224.797,07</b>               | <b>371.592,03</b>            | <b>222.318,91</b>          | <b>256.047,05</b>           |
|                                     | Mehrwertsteuer: 19%        | EUR        | 42.711,44                       | 70.602,49                    | 42.240,59                  | 48.648,94                   |
| <b>Summe Betriebskosten, brutto</b> |                            | <b>EUR</b> | <b>267.508,52</b>               | <b>442.194,52</b>            | <b>264.559,50</b>          | <b>304.696,00</b>           |
| <b>Anteil</b>                       |                            |            | <b>101%</b>                     | <b>167%</b>                  | <b>100%</b>                | <b>115%</b>                 |

Die Betriebskosten liegen für die Varianten 3 und 1 auf einem vergleichbaren Niveau von rund 264.500...267.500 EUR/a, brutto. Variante 3 weist mit 264.500 EUR/a, brutto die niedrigsten Betriebskosten auf. Die Betriebskosten für die GAK-Filtration sind mit ca. 442.000 EUR/a, brutto am höchsten.

## 9.4 Jahreskosten

Die Jahreskosten wurden anhand folgender Vorgaben berechnet:

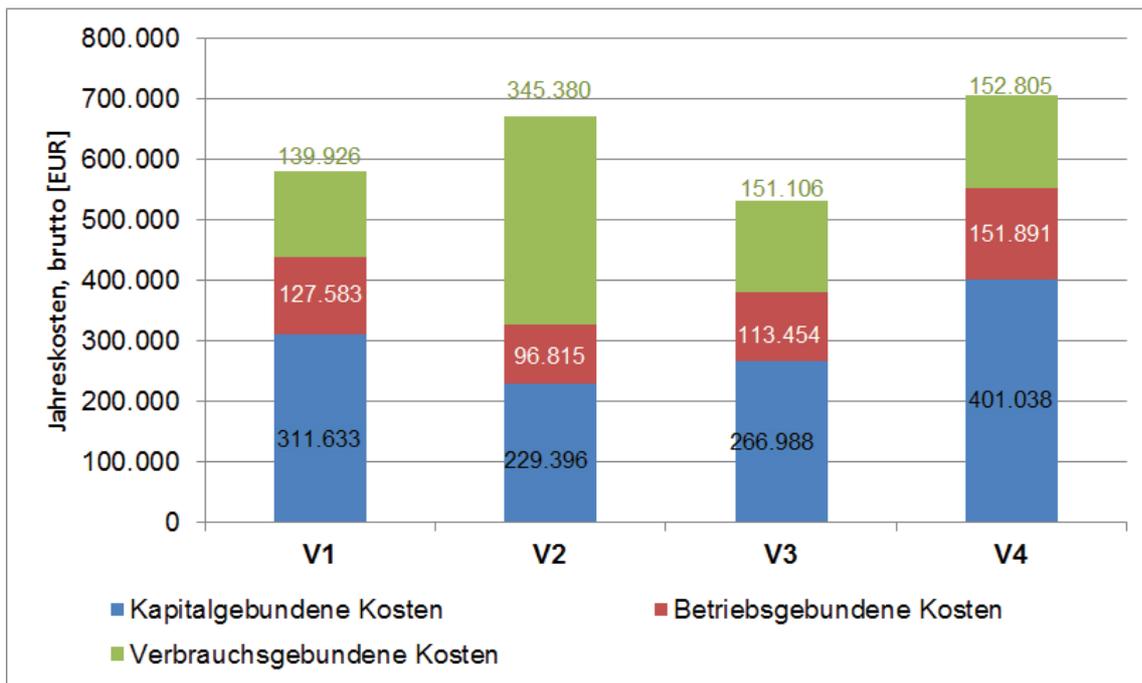
|                               |      |
|-------------------------------|------|
| Betrachtungszeitraum          | 30 a |
| Nutzungsdauer Bautechnik      | 30 a |
| Nutzungsdauer Maschinenteknik | 15 a |
| Nutzungsdauer E-/MSR-Technik  | 10 a |
| Realzinssatz                  | 3 %  |

Die Nutzungsdauern lehnen sich an die Vorgaben der Landesarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) an. Der nominale Zinssatz von 3 % p. a. ist seit 1986 ein Standardwert, der sich auf einer Abstimmung des Bundes und der Länder zur Beurteilung von technischen Infrastrukturmaßnahmen gründet. Er kann auf Projekte in der Siedlungswasserwirtschaft übertragen werden.

**Tabelle 3: Jahreskosten und spezifische Kosten für die Varianten 1 bis 4**

| Pos.-Nr                           | Text                       |                          | Variante 1<br>PAK m. Rücklaufk. | Variante 2<br>GAK-Filtration | Variante 3<br>Ozonung + SF | Variante 4<br>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>           |
| Anteil                            |                            |                          | 109%                            | 126%                         | 100%                       | 133%                        |
| 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. Die errechneten spezifischen Behandlungskosten beziehen sich auf das im Teilstrom behandelte Abwasservolumen. Die Mengen beruhen auf der in **Kapitel 8.1** beschriebenen Auswertung der Mengenummessung im Ablauf der Kläranlage.

**Bild 26: Anteile kapital-, betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten an den Jahreskosten der Varianten**

Aus der im **Bild 26** dargestellten Aufteilung der Jahreskosten ist erkennbar, dass Variante 2 den höchsten Anteil an verbrauchsgebundenen Kosten und Variante 4 die höchsten kapitalgebundenen Kosten aufweisen.

## 9.5 Sensitivitätsanalyse

Die Einflüsse von geänderten Verbrauchsmengen und deren spezifischen 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 0,17 EUR/kWh, netto (0,2 EUR/kWh, brutto),
- Steigerung Bezugskosten für Aktivkohle (PAK bzw. GAK) und Flüssigsauerstoff um 10 %,
- Reduzierung Dosierung Pulverkohle und Ozon um 10 %, Erhöhung Filterstandzeit GAK Filter um 10 % (Bettvolumen).

In **Tabelle 4** sind die prozentualen Steigerungen bzw. Reduzierungen der Jahreskosten dargestellt. Rot bedeutet eine hohe Sensitivität, während gelb und grün auf eine mittlere bzw. niedrige Sensitivität hindeuten.

Die Steigerung des **Bezugspreises für elektrische Energie** um 20 % führt auch bei den energieintensiven Varianten 3 und 4 (Ozonung) zu Steigerungen der Jahreskosten von 2,4 % und 1,37 % (bzw. 13.173 EUR/a, brutto und 9.775 EUR/a, brutto). Bei den Aktivkohlevarianten liegen die Jahreskostensteigerungen zwischen 1.350 EUR/a, brutto und 4.156 EUR/a, brutto. Dies entspricht einer Steigerung von 0,2 % (V2) bzw. 0,7 % (V1). Bei Variante 3 ist die Steigerung mit 13.173 EUR/a, brutto am größten.

Die **Steigerung der Bezugskosten** für die Aktivkohlen um 10 % steigert die Jahreskosten der GAK-Filtration um 33.862 EUR/a, brutto. Die Preissteigerung hat bei den Varianten 1 (PAK mit Rücklaufkohle) und 3 (Ozonung mit Sandfilter) mit rund 7.814 EUR/a, brutto bzw. mit 8.523 EUR/a, brutto weniger Einfluss. Variante 4 (Ozon + BAK) liegt mit 10.392 EUR/a, brutto etwas darüber. Es ergibt sich eine Steigerung von 4,8 % bei Variante 2 (GAK-Filtration) sowie 1,33 % bis 1,58 % bei den Varianten 1, 3 und 4.

Die **Reduzierung der Dosiermengen** um 10 % hat große Einflüsse auf die Jahreskosten. Bei Variante 2 (GAK-Filtration) würden durch die Erhöhung der durchgesetzten Bettvolumina von 8.000 auf 8.800 die Jahreskosten um ca. 30.784 EUR/a, brutto (- 4,8 %) sinken. Bei der Variante 1 (PAK) würden sich Einsparungen von rund 7.814 EUR/a, brutto (-1,4 %) ergeben. Die Reduzierung der Ozondosierung von 7 mg/l auf 6,3 mg/l verringert die Jahreskosten für Variante 3 um rund 13.323 EUR/a, brutto (-2,6 %). Eine Ozondosisreduzierung und eine zusätzliche Erhöhung der Filterstandzeit bei Variante 4 führt zu einer gesamten Jahreskostensenkung von ca. 14.225 EUR/a, brutto (-2,1 %).

Es zeigt sich, dass besonders die Verringerung der Betriebsmittel großen Einfluss auf die Kosten der Varianten hat. Bei Verfahren mit im Vergleich geringen Dosiermengen (PAK mit Rücklaufkohle) sowie den Ozon-Verfahren ist die Auswirkung geringer. Die Variante 2 (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 Variante 1 (PAK mit RLK).

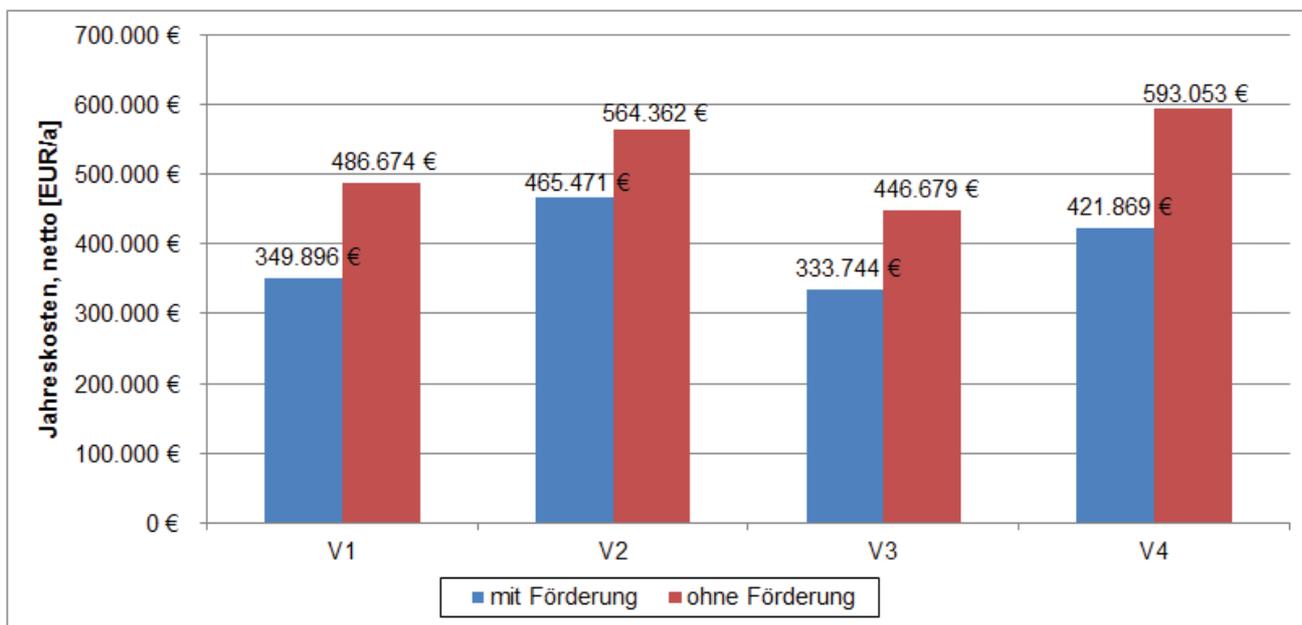
Zu beachten ist, dass die genauen Einsatzmengen nicht exakt vorausgesagt werden können. Sie sind abhängig vom Reinigungsziel, aber auch beispielsweise von der CSB-Fraktion im Ablauf der Nachklärung. Insbesondere bei den Ozon-Varianten können Reduzierung der Dosierungen erwartet werden.

**Tabelle 4: Prozentuale Erhöhung bzw. Erniedrigung der Jahreskosten unter sensitiver Betrachtung der Energie- und Bezugskosten, sowie Einsatzmenge**

| Differenz, Prozentual | Variante 1<br>PAK m. Rücklaufk. | Variante 2<br>GAK-Filtration | Variante 3<br>Ozonung + SF | Variante 4<br>Ozonung + BAK |
|-----------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Energiekosten (+20%)  | 0,71%                           | 0,20%                        | 2,07%                      | 1,04%                       |
| Bezugskosten (+10%)   | 1,33%                           | 4,80%                        | 1,22%                      | 1,18%                       |
| Einsatzmenge (-10%)   | -1,37%                          | -4,80%                       | -1,97%                     | -1,59%                      |

### 9.6 Einfluss der Förderung auf die Jahreskosten

Das Land Nordrhein-Westfalen fördert die Umrüstung von öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen mit innovativen Reinigungsverfahren. Auf der Basis der Förderrichtlinien „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung“ werden Maßnahmen zur Elimination von Mikroschadstoffen bis zu 70% gefördert. Für das Jahr 2015 ist mit einer 60%-Förderung zu rechnen. Bei einer Förderung der Erstinvestition reduzieren sich die Jahreskosten aller Varianten (siehe Bild 27).



**Bild 27: Vergleich der Jahreskosten mit und ohne 60%-Förderung**

## 10 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 5: Bewertungsmatrix für die Varianten 1 bis 4**

| Kriterium   | Wichtung | Wertung                     |             |                          |             |                                |             |                         |             |
|---|----------|-----------------------------|-------------|--------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
|   |          | Variante 1                  |             | Variante 2               |             | Variante 3                     |             | Variante 4              |             |
|   |          | PAK m. Rücklaufk.<br>Punkte | gewichtet   | GAK-Filtration<br>Punkte | gewichtet   | Ozonung + Sandfilter<br>Punkte | gewichtet   | Ozonung + BAK<br>Punkte | gewichtet   |
| <b>Jahreskosten</b>   | 0,40     | 4                           | 1,6         | 3                        | 1,2         | 4                              | 1,6         | 3                       | 1,2         |
| <b>Reinigungsleistung <math>P_{ges}</math>/CSB (zusätz. Reduk.)</b> | 0,16     | 5                           | 0,8         | 4                        | 0,64        | 4                              | 0,64        | 4                       | 0,64        |
| <b>Bildung Nebenprodukte</b>  | 0,06     | 5                           | 0,3         | 5                        | 0,3         | 4                              | 0,24        | 4                       | 0,24        |
| <b>Erfahrungen/Referenzen</b>                                       | 0,06     | 5                           | 0,3         | 4                        | 0,24        | 4                              | 0,24        | 3                       | 0,18        |
| <b>Betriebs- und Wartungsaufwand</b>                                | 0,06     | 3                           | 0,18        | 5                        | 0,3         | 4                              | 0,24        | 4                       | 0,24        |
| <b>Betriebsicherheit</b>  | 0,06     | 4                           | 0,24        | 5                        | 0,3         | 4                              | 0,24        | 4                       | 0,24        |
| <b>Sensitivität Kostensteigerungen</b>                              | 0,14     | 4                           | 0,56        | 2                        | 0,28        | 3                              | 0,42        | 4                       | 0,56        |
| <b>CO<sub>2</sub>-Bilanz</b>  | 0,06     | 4                           | 0,24        | 4                        | 0,24        | 4                              | 0,24        | 4                       | 0,24        |
| <b>Summe</b>  | 1,00     | 34                          | <b>4,22</b> | 32                       | <b>3,50</b> | 31                             | <b>3,86</b> | 30                      | <b>3,54</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. Wie schon im **Kapitel 9.4** dargelegt, sind die Jahreskosten bei Variante 1 (PAK-Dosierung) und 3 (Ozonung + Sandfilter) am geringsten, bei den Varianten 2 (GAK-Filtration) und 4 (Ozonung + BAK) am teuersten. Die Varianten 1 und 3 bekommen aufgrund der geringen Kosten vier Punkte und die Varianten 4 und 2 nur drei Punkte.

Die **Reinigungsleistung  $P_{ges}$**  und **CSB** wurde in Emmerich mit 16 % gewichtet. Sehr gute Ergebnisse hat hier die Variante 1 (PAK mit RLK) in Sindelfingen für  $P_{ges}$  erzielt. Bei den Varianten 2, 3 und 4 wird eine Reduktion des CSB (DOC) erwartet. Bei der GAK-Filtration in erster Linie durch Adsorption und bei Variante 4 durch die biologische Wirkung des Aktivkohlefilters. Diese Varianten erhalten hier vier Punkte. Daher erhält allein Variante 1 fünf Punkte in diesem Kriterium.

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 Regensdorf 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 Ozonvarianten (V3 und V4) hier mit vier 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. Regensdorf, 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 GAK-Filtration liegen Erfahrungen aus großtechnischen Versuchen vor. Deshalb werden an diese Variante ebenfalls 4 Punkte vergeben. Für die Kombination Ozon mit nachgeschaltetem Aktivkohlefilter liegen bislang keine Erfahrungen im technischen Maßstab in der Abwasserbehandlung vor. Dies führt zu einer Bewertung mit drei Punkten.

Der **Betriebs- und Wartungsaufwand** ist für den Betrieb der Kläranlage ein wichtiger Punkt. Hier wurde die GAK-Filtration mit fünf Punkten am besten bewertet. Vier Punkte wurden an die Varianten 3 und 4 vergeben. Die Ozonung stellt aufgrund der Komplexität der Erzeugungsanlage schon einen besonderen Betriebspunkt auf der Kläranlage dar. Die Variante 1 (Pulveraktivkohledosierung) wurde 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 sind. Die Auswirkungen auf weitere Anlagenteile werden in die Beurteilung einbezogen. Die höchste Betriebssicherheit weist die GAK-Filtration auf. Die Anlage mit sechs Filterkammern ist sehr stabil zu betreiben. Weiterhin ist keine Dosierung erforderlich. 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 Varianten 3 und 4 (Ozonung) werden ebenfalls mit vier Punkten bewertet. Die Ozonung ist in diesen Varianten zweistraßig ausgeführt.

Die **Sensitivität** gegenüber Kostensteigerungen bei den Betriebsmitteln ist über die Laufzeit der Anlage zu betrachten, wie schon im **Kapitel 9.5** dargestellt. Hier zeigt die Variante 1 (PAK mit Rückführung) die geringsten Einflüsse auf Kostensteigerungen. Sie wird daher mit drei Punkten bewertet. Variante 4 folgt. Sie erhält ebenfalls 4 Punkte. Variante 3 ist auf dem dritten Rang und wird mit 3 Punkten bewertet. Die GAK-Filtration (Variante 2) reagiert am empfindlichsten auf Kostensteigerungen. Daher werden hier zwei Punkte vergeben.

In letzter Zeit ist die **Nachhaltigkeit (CO<sub>2</sub>-Emissionen)** von Verfahren gerade auch bei der 4. 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 vier Punkten bewertet.

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.

## 11 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, sodass 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 Rücklaufkohleföhrung) und Variante 3 (Ozonung mit Sandfilter) zu berücksichtigen.

## Literaturverzeichnis

### **Abegglen u. a. 2009**

*Abegglen, C.; Escher, B.; Hollender, J.; Koepke, S.; Ort, C.; Peter, A.; Siegrist, H.; von Gunten, U.; Zimmermann, S.; Koch, M.; Niederhauser, P.; Schärer, M.; Braun, C.; Gälli, R.; Junghans, M.; Brocker, S.; Moser, R.; Rensch, D.:* Ozonung von gereinigtem Abwasser – Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf; Studie der Eawag im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (CH), 2009, Download unter: [www.eawag.ch/medien/bulletin/20090616/schlussbericht.pdf](http://www.eawag.ch/medien/bulletin/20090616/schlussbericht.pdf).

### **ATV-A 203**

*DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.:* ATV-Arbeitsblatt A 203/Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung, April 1995.

### **Bornemann u. a. 2012**

*Bornemann, C.; Hachenberg, M.; Kazner, C.; Herr, J.; Jagemann, P.; Lyko, S.; Benstöm, F.; Montag, D.; Platz, S.; Wett, M.; Kaub, J. M.; Kolisch, G.; Osthoff, T.; Rolfs, T.; Stepkes, H.:* Teilprojekt 5: Er-tüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle. Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2012.

### **Breitbach u. Bathen 2001**

*Breitbach, Marc; Bathen, Dieter:* Adsorptionstechnik. 1. Auflage. Springer-Verlag, 2001. – ISBN 9783540419082.

### **Cooney 1998**

*Cooney, D. O.:* Adsorption Design for Wastewater Treatment. 1. Auflage. CRC, 1998. – ISBN 9781566703338

### **DVGW W 239**

DVGW W 239 (A) März 2011. Entfernung organischer Stoffe bei der Trinkwasseraufbereitung durch Adsorption an Aktivkohle.

### **DWA 2008**

*Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.):* Anthropogene Spurenstoffe im Wasserkreislauf – Arzneistoffe. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, 5/2008 (DWA-Themen). – ISBN 9783940173744.

### **Grünebaum u. a. 2012**

*Grünebaum, T.; Herbst, H.; Keysers, C.; Lyko, S.; Türk, J.:* Mikroschadstoffelimination mit Ozon: Beispiele für Kläranlagen; Vortrag auf dem 2. Fachsymposium Mikroschadstoffe. NRW 2012; Elimination von Mikroschadstoffen, Keimen und Bakterien in kommunalen Kläranlagen am 21.06.2012 in Düsseldorf.

### **Gujer 1999**

*Gujer, Willi:* Siedlungswasserwirtschaft. 1. Auflage. Springer-Verlag, 1999.

**Herbst u. a. 2011**

*Herbst, H.; Kaufmann, M.; Türk, J.; Launer, M.:* Abwasserzonierung Kläranlage Duisburg-Vierlinden – Auslegung – Bau – erste Betriebsergebnisse. In Innovation und Flexibilität – Systemoptimierung und Systemerweiterung; Tagungsband der 25. Karlsruher Flockungstage 2011, Schriftenreihe SWW (Bd. 141), Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe, ISBN 978-3-9813069-4-1.

**Joss u. a. 2005**

*Joss, Adriano; Keller, Elvira; Alder, Alfredo C.; Göbel, Anke; McArdell, Christa S.; Ternes, Thomas; Siegrist, Hansruedi:* Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment. In: Water Res 39 (2005), Sep, Nr. 14, S. 3139–3152.

**Kompetenzzentrum Spurenstoffe BW 2013**

<http://www.koms-bw.de>, Abruf: 01.09.2013

**Kümmel u. Worch 1990**

*Kümmel, R.; Worch, E.:* Adsorption aus wässrigen Lösungen. 1. Auflage. VEB Dt. Verl. für Grundstoff-industrie, 1990.

**Meyer 1979**

*MEYER, Hermann:* Untersuchung zur weitergehenden Reinigung biologisch gereinigten Abwassers – Die praktische Anwendung der Abwasserfiltration und ihre Bedeutung in der Abwassertechnologie; Schriftenreihe GWA, Bd. 35, 1979.

**Meyer 2008**

*MEYER, Hermann:* Abwasserreinigung – Qua vadis?, in GWF Wasser, Abwasser, 149, Nr. 4, 2008.

**MUNLV 2004**

*MUNLV NRW:* Untersuchung zum Eintrag und zur Elimination von gefährlichen Stoffen in kommunalen Kläranlagen. 2004 – Forschungsbericht.

**Nahrstedt u. a. 2011**

*Nahrstedt, A.; Alt, K.; Barnscheidt, I.; Fritzsche, J.; Sürder, T.; Burbaum, H.; Klak, A.:* CSB- und Spurenstoffelimination am Aktivkohlefestbettfilter. Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2011.

**Palmowski u. a. 2011**

*Palmowski, L.; Veltmann, K.; Mousel, D.; Mauer, C.; Simsheuser, C.; Schmitz, U.; Eckers, S.; Jagemann, P.; Thöle, D.; Riße, H.; Gredugk-Hoffmann:* Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen – Phase I. Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2011.

**Pinnekamp u. a. 2010**

*Pinnekamp, Johannes; Keyers, Christoph; Montag, David; Veltmann, Karin:* Elimination von Mikro-schadstoffen – Stand der Wissenschaft. In: Gewässerschutz – Wasser – Abwasser (GWA) 220 (2010), S. 28/1 – 28/21.

**Schröder und Grömping 2013**

*Schröder, Karl-Heinz; Grömping, Markus:* Einsatz von Aktivkohle auf der Kläranlage Gütersloh-Putzhagen, Vortrag auf dem DWA-Praxisseminar „Strategien zur Spurenstoffelimination auf Kläranlagen“ am 2. Juli 2013 in Gütersloh, Juli 2013.

**Schwentner u. a. 2013a**

*Schwentner, G; Kremp, W.; Mauritz, A; Hein, A.; Metzger, S; Rössler, A.:* Kosten in der weitergehenden Abwasserreinigung mit PAK – Teil 1, in *Wasserwirtschaft – Wassertechnik (wwt)*, 63, Nr. 4, 2013.

**Schwentner u. a. 2013b**

*Schwentner, G; Kremp, W.; Mauritz, A; Hein, A; Metzger, S; Rössler, A.:* Kosten in der weitergehenden Abwasserreinigung mit PAK – Teil 2, in *Wasserwirtschaft – Wassertechnik (wwt)*, 63, Nr. 5, 2013.

**Siegrist 2013**

*Siegrist, H.-R.:* *Energieverbrauch für die weitergehende Spurenstoffelimination – Maßnahmen zur Reduktion*, in: *Schriftreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum*, Band 65, 31. Bochumer Workshop, Klimaschutz und Energiewende – Welchen Beitrag liefert der Abwassersektor?, 2013

**Sontheimer u. a. 1985**

Sontheimer, H.; Frick, B.; Fettig, J.; Hörner, G.; Hubele, C.; Zimmer, G.: Adsorptionsverfahren zur Wasserreinigung. DVGW Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe (TH), 1985.

**Ternes u. a. 2003**

*Ternes, T. A.; Stüber, J.; Herrmann, N.; McDowell, D.; Ried, A.; Kampmann, M.; Teiser, B.:* Ozonation: A tool for removal of pharmaceuticals contrast media and musk fragrances from wastewater?, *Water Research*, 37, 1976 – 1982, 2003.

**Worch 1997**

*Worch, E.:* *Wasser- und Wasserinhaltsstoffe – eine Einführung in die Hydrochemie*. Teubner-Verlag, Stuttgart-Leipzig, 205 S, 1997.

**Worch 2004**

*Worch, E.:* Vorlesungsunterlagen, Technische Universität Dresden, 2004.

## Anlagen

**Anlage 1:  
Auslegung  
Varianten 1 bis 4**

**KA Emmerich****Projekt:****Studie 4. Reinigungsstufe****Projekt-Nr.:****1217 001****Variante:****Eingangsdaten****Auslegungsdaten Hydraulik**

|   |            |                |
|---|------------|----------------|
| <i>Gesamtzulauf Kläranlage</i>                  |            |                |
| Max. TW-Zufluss (mit Fremdwasser)               | Q_t        | 632,78 l/s     |
|   |            | 2.278 m³/h     |
| Maximaler Wasserzufluss                         | Q_m        | 777,78 l/s     |
|   |            | 2.800 m³/h     |
| <i>Teilstrombehandlung (4. Reinigungsstufe)</i> |            |                |
| Min. Volumenstrom für Teilstrombehandlung       | Q_Teil,min | 250 m³/h       |
| Max. Volumenstrom für Teilstrombehandlung       | Q_Teil,max | 800 m³/h       |
|   |            | 222 l/s        |
| Behandelte Abwassermenge im Teilstrom           | Q_Teil,a   | 4.377.846 m³/a |
| Behandelte Teilstrommenge pro Tag               | Q_Teil,d   | 11.994 m³/d    |

Eingabefelder

Berechnungsfelder

KA Emmerich

Projekt:

Studie 4. Reinigungsstufe

Projekt-Nr.:

1217 001

Variante:

1

PAK-Dosierung mit Rücklaufkohleführung

**Bemessung Absetzbecken**

|  |                     |                      |
|--|---------------------|----------------------|
| Beckentyp                                  |                     | Rundbecken           |
| Schlammräumung (Schildräumung/Saugräumung) |                     | Schildräumung        |
| Durchströmung (vertikal/horizontal)        |                     | horizontal           |
| Anzahl der Becken                          | n                   | 1 Stück              |
| Innendurchmesser Becken                    | $D_i$               | 24,00 m              |
| Außendurchmesser Becken                    | $D_A$               | 24,80 m              |
| Außendurchmesser Königstuhl                | $D_{KS,a}$          | 5,00 m               |
| Oberfläche                                 | A                   | 433 m <sup>2</sup>   |
| Beckentiefe im 2/3-Punkt                   | $h_{2/3} = h_{ges}$ | 3,90 m               |
| Beckenrandtiefe                            | $h_{Rand}$          | 3,63 m               |
| Neigung der Sohle                          | $I_s$               | 0,07                 |
| Beckenvolumen                              | $V_{Sed}$           | 1.688 m <sup>3</sup> |

**Festlegung der Bemessungsdaten**

|                                    |                   |                       |
|------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Max. Zulauf                        | $Q_{max}$         | 800 m <sup>3</sup> /h |
|                                    |                   | 222 l/s               |
| Rücklaufverhältnis                 | RV                | 1,00                  |
| Min. Aufenthaltszeit Sedimentation | $t_{v,Sed}$ , min | 2,00 h                |
| max. Oberflächenbeschickung        | $q_{a,max}$       | 1,8 m/h               |
| Schlammvolumen                     | ISV               | 100,0 ml/g            |
| TS-Gehalt im Kontaktbecken         | TS                | 4,0 g/l               |

**Nachweis Flächenbeschickung und Aufenthaltszeit**

|                    |             |                     |          |
|--------------------|-------------|---------------------|----------|
| Flächenbeschickung | $q_A$       | $Q_{max}/A =$       | 1,80 m/h |
| Aufenthaltszeit    | $t_{v,sed}$ | $V_{Sed}/Q_{max} =$ | 2,11 h   |

**Legende**

|                   |
|-------------------|
| Eingabefelder     |
| Berechnungsfelder |

**KA Emmerich****Projekt:****Studie 4. Reinigungsstufe****Projekt-Nr.:****1217 001****Variante:****1****PAK-Dosierung mit Rücklaufkohleführung****Auslegungsdaten Hydraulik**

| <i>Gesamtzulauf Kläranlage</i>                  |            |                         |
|---|------------|-------------------------|
| Max. TW-Zufluss (mit Fremdwasser)               | Q_t        | 333,3 l/s<br>2.278 m³/h |
| Maximaler Wasserzufluss (Trennsystem)           | Q_m        | 666,7 l/s<br>2.800 m³/h |
| <i>Teilstrombehandlung (4. Reinigungsstufe)</i> |            |                         |
| Min. Volumenstrom für Teilstrombehandlung       | Q_Teil,min | 250 m³/h                |
| Max. Volumenstrom für Teilstrombehandlung       | Q_Teil,max | 800 m³/h<br>222 l/s     |
| Behandelte Abwassermenge im Teilstrom           | Q_Teil,a   | 4.377.846 m³/a          |
| Behandelte Teilstrommenge pro Tag               | Q_Teil,d   | 11.994 m³/d             |

**Auslegung Kontaktbecken**

| <i>Vorgaben (bei Betrieb als Rührkessel)</i>                          |                     |           |
|---|---------------------|-----------|
| Aufenthaltszeit (ohne Berücksichtigung RLK)                           | t_a,min             | 30 min    |
| <i>Bemessung</i>  |                     |           |
| erforderliches Gesamtvolumen KB                                       | V_KB,erf,ges        | 400 m³    |
| <b><u>Als Umlaufbecken um das Sedimentationsbecken ausgeführt</u></b> |                     |           |
| Anzahl Becken   | n_KB,ist            | 1         |
| Breite Gerinne  | B_KB,ist            | 2,00 m    |
| Höhe Wasserspiegel  | h_WS,KB,ist         | 3,78 m    |
| Geschwindigkeit soll  | v_Soll              | 0,40 m/s  |
| Durchfluss (Q <sub>zu</sub> + Q <sub>RK</sub> )                       | Q <sub>Zu+RK</sub>  | 0,44 m³/s |
| Umlaufvolumenstrom  | Q <sub>Umlauf</sub> | 3,03 m³/s |
| Durchmesser Innenseite KB   | Di_KB,ist           | 24,80 m   |
| Durchmesser Mittelachse KB  | Dm_KB,ist           | 26,80 m   |
| Länge   | L_KB,ist            | 84,19 m   |
| Umlaufzeit  | t_KB_Umlauf         | 210,49 s  |
| Volumen eines KB  | V_KB,ist,n          | 637 m³    |
| Gesamtvolumen KB  | V_KB,ist,ges        | 637 m³    |

**Auslegung Rührwerk Kontaktbecken**

| <i>Vorgaben</i>         |             |                          |
|-------------------------|-------------|--------------------------|
| Energieeintrag          |             | 3,00 W/m³                |
| Anzahl Rührwerke        | n_RW        | 2                        |
| Laufzeit, anteilig      |             | 24 h/d                   |
| <i>Bemessung</i>        |             |                          |
| Leistungsbedarf, gesamt | P_RW,KB,ges | 1,91 kW                  |
| Energiebedarf Rührwerke |             | 46 kWh/d<br>16.742 kWh/a |

**Auslegung Rücklaufkohlepumpwerk***Vorgaben*

|                         |         |                          |
|-------------------------|---------|--------------------------|
| Rückführverhältnis      | RV      | 1,00                     |
| Förderhöhe, abgeschätzt | h_gesch | 1,0 m                    |
| spez. Energiebedarf     |         | 7 Wh/(m <sup>3</sup> ·m) |

*Bemessung*

|                            |       |                       |
|----------------------------|-------|-----------------------|
| Volumenstrom Rücklaufkohle | Q_RLK | 800 m <sup>3</sup> /h |
| Energiebedarf              |       | 30.645 kWh/a          |

**Auslegung Überschussschleentnahme***Vorgaben*

|                         |         |                          |
|-------------------------|---------|--------------------------|
| TS-Gehalt Schlamm       |         | 8,00 kg/m <sup>3</sup>   |
| Tagesschlammmenge       | V_ÜS    | 49,78 m <sup>3</sup> /d  |
| angenommene Laufzeit    |         | 5,00 h/d                 |
| Förderhöhe, abgeschätzt | h_gesch | 5,00 m                   |
| spez. Energiebedarf     |         | 7 Wh/(m <sup>3</sup> ·m) |

*Bemessung*

|                        |       |                         |
|------------------------|-------|-------------------------|
| berechnete Fördermenge | Q_ber | 9,96 m <sup>3</sup> /h  |
| Gewählte Fördermenge   | Q_gew | 10,00 m <sup>3</sup> /h |
| Energiebedarf          |       | 6.359 kWh/a             |

**Pulverkohledosierung***Vorgaben*

|                          |           |                        |
|--------------------------|-----------|------------------------|
| min. Dosierkonzentration | c_PAK,min | 5,00 g/m <sup>3</sup>  |
| max. Dosierkonzentration | c_PAK,max | 20,00 g/m <sup>3</sup> |
| max. Dosierung           |           | 16,00 kg/h             |

*gewählte Dosiersysteme*

|                                   |              |                        |
|-----------------------------------|--------------|------------------------|
| 1 Dosiergerät, (Ger. 1)           | m▪_Dos,Ger_1 | 16,00 kg/h             |
| 1 Dosiergerät, (Ger. 2)           | m▪_Dos,Ger_2 | 8,00 kg/h              |
| Regelbereich je Dosiergerät       |              | 0,10                   |
| min. c_PAK bei Q_Str,min (Ger. 1) |              | 6,40 g/m <sup>3</sup>  |
| max. c_PAK bei Q_Str,max (Ger. 1) |              | 20,00 g/m <sup>3</sup> |
| min c_PAK bei Q_Str,min (Ger. 2)  |              | 3,20 g/m <sup>3</sup>  |
| max c_PAK bei Q_Str,max (Ger. 2)  |              | 10,00 g/m <sup>3</sup> |

*PAK-Bedarf*

|  |         |                        |
|--|---------|------------------------|
| mittlere PAK-Dosierkonzentration im Jahr | c_PAK,a | 10,00 g/m <sup>3</sup> |
| Tagesbedarf                              | m_PAK,d | 119,94 kg/d            |
| Jahresbedarf                             | m_PAK,a | 43,78 Mg/a             |

*PAK-Silo*

|                            |             |                          |
|----------------------------|-------------|--------------------------|
| gewähltes Silo-Volumen     | V_Silo      | 125,00 m <sup>3</sup>    |
| Nutzvolumen                | V_Silo,Nutz | 50,00 m <sup>3</sup>     |
| Lagerungsdichte PAK        | rho_B,PAK   | 400,00 kg/m <sup>3</sup> |
| Masse PAK, nutzbar         | m_PAK,nutz  | 20,00 Mg                 |
| Intervall Nachfüllung Silo |             | 0,46 a                   |
|                            |             | 166,75 d                 |

**Pumpen Treibwasser für PAK-Dosierung**

|  |         |                          |
|--|---------|--------------------------|
| <i>Vorgaben</i>                          |         |                          |
| Volumenstrom                             | Q_Treib | 5 m <sup>3</sup> /h      |
| Förderhöhe, abgeschätzt (inkl. Verluste) | h_gesch | 55 m                     |
| spez. Energiebedarf                      |         | 7 Wh/(m <sup>3</sup> ·m) |
| Laufzeit, anteilig                       |         | 24 h/d                   |
| <i>Bemessung</i>                         |         |                          |
| Energiebedarf                            |         | 16.863 kWh/a             |

**Flockungsmitteldosierung (Me-Salze), gewählt: Fe(III)-Chlorid**

|                                      |          |                         |
|--------------------------------------|----------|-------------------------|
| <i>Vorgaben</i>                      |          |                         |
| min. Dosierkonzentration             | c_Me,min | 2,0 g/m <sup>3</sup>    |
| max. Dosierkonzentration             | c_Me,max | 8,0 g/m <sup>3</sup>    |
| mittlere Dosierkonzentration im Jahr | c_Me,a   | 4,0 g/m <sup>3</sup>    |
| WS-Gehalt FeCl im FM                 |          | 0,138 kg Fe/kg FM       |
| <i>FM-Bedarf</i>                     |          |                         |
| Tagesbedarf                          | m_FM,d   | 348 kg/d                |
| Jahresbedarf                         | m_FM,a   | 127 Mg/a                |
| <i>FM-Tank</i>                       |          |                         |
| Dichte FM                            | rho_FM   | 1.430 kg/m <sup>3</sup> |
| FM-Mengenbedarf pro Jahr             |          | 89 m <sup>3</sup> /a    |

**Flockungshilfsmitteldosierung**

|                                      |          |                      |
|--------------------------------------|----------|----------------------|
| <i>Vorgaben</i>                      |          |                      |
| min. Dosierkonzentration             | c_Me,min | 0,1 g/m <sup>3</sup> |
| max. Dosierkonzentration             | c_Me,max | 0,3 g/m <sup>3</sup> |
| mittlere Dosierkonzentration im Jahr | c_Me,a   | 0,2 g/m <sup>3</sup> |
| WS-Gehalt im FHM-Granulat            |          | 1,000 kg WS/kg Gr.   |
| <i>FHM-Bedarf</i>                    |          |                      |
| Tagesbedarf                          | m_FM,d   | 2,4 kg/d             |
| Jahresbedarf                         | m_FM,a   | 0,88 Mg/a            |

**Auslegung Tuchfiltration**

|   |                |                              |
|---|----------------|------------------------------|
| <b>Vorgaben</b>                                 |                |                              |
| Filtergeschwindigkeit, maximal                  | v_F,max        | 8 m/h                        |
| Feststoffflächenbelastung                       | BA,max         | 0,250 kg/(m <sup>2</sup> ·h) |
| max. xTS-Konzentration im Zulauf                | xTS.max,zu     | 35 mg/l                      |
| <b>Bemessung</b>                                |                |                              |
| erforderliche Filterfläche, gesamt nach V_F,max | A_F,erf,ges,vF | 100 m <sup>3</sup>           |
| erforderliche Filterfläche, gesamt nach BA,max  | A_F,erf,ges,BA | 112 m <sup>3</sup>           |
| Anzahl Filterstraßen                            | n_Filt,ist     | 2                            |
| <i>gewählter Filtertyp (Beispielfabrikat)</i>   |                | <i>Meccana SI 15/75</i>      |
| Anzahl Scheiben je Filter                       | n_Scheiben     | 15                           |
| Filterfläche je Filter                          | A_F,ist,Str    | 75 m <sup>2</sup>            |
| Filterfläche, gesamt                            | A_F,ist,ges    | 150 m <sup>2</sup>           |
| <b>Nachweise bezogen auf Q_Teil,max</b>         |                |                              |
| Filtergeschwindigkeit, maximal                  | v_F,ist,max    | 5,33 m/h                     |
| Feststoffflächenbelastung, maximal              | BA,ist,max     | 0,187 kg/(m <sup>2</sup> ·h) |
| <b>Spülwasseranfall und -förderung</b>          |                |                              |
| spez. Spülwasseranfall bezogen auf Filtratmenge |                | 2%                           |
| Schlammwasseranfall pro Tag                     | V_Schlammwas,d | 240 m <sup>3</sup> /d        |
| Schlammwasseranfall pro Jahr                    | V_Schlammwas,a | 87.557 m <sup>3</sup> /a     |
| Förderhöhe, abgeschätzt (incl. Verluste)        | h_gesch        | 2 m                          |
| spez. Energiebedarf                             |                | 7 Wh/(m <sup>3</sup> ·m)     |
| Energiebedarf                                   |                | 7 kWh/d                      |
|   |                | 919 kWh/a                    |

**Legende**

|                   |
|-------------------|
| Eingabefelder     |
| Berechnungsfelder |

**KA Emmerich****Projekt:****Studie 4. Reinigungsstufe****Projekt-Nr.:****1217 001****Variante:****2****GAK-Filtration****Auslegungsdaten Hydraulik**

| <i>Gesamtzulauf Kläranlage</i>                  |                       |                                       |
|---|-----------------------|---------------------------------------|
| Max. TW-Zufluss (mit Fremdwasser)               | Q <sub>t</sub>        | 632,78 l/s<br>2.278 m <sup>3</sup> /h |
| Maximaler Wasserzufluss (Trennsystem)           | Q <sub>m</sub>        | 777,78 l/s<br>2.800 m <sup>3</sup> /h |
| <i>Teilstrombehandlung (4. Reinigungsstufe)</i> |                       |                                       |
| Max. Volumenstrom für Teilstrombehandlung       | Q <sub>Teil,max</sub> | 800 m <sup>3</sup> /h<br>222 l/s      |
| Behandelte Abwassermenge im Teilstrom           | Q <sub>Teil,a</sub>   | 4.377.846 m <sup>3</sup> /a           |
| Behandelte Teilstrommenge pro Tag               | Q <sub>Teil,d</sub>   | 11.994 m <sup>3</sup> /d              |

**Auslegung GAK-Filter**

| <i>Vorgaben</i>                                   |                           |                       |
|---|---------------------------|-----------------------|
| Leerbettkontaktzeit (Bereich)                     | EBCT                      | 10...30 min           |
| Leerbettkontaktzeit, gewählt                      | EBCT, gew                 | 30 min                |
| Filtergeschwindigkeit (Bereich)                   | v <sub>F</sub>            | 5...20 m/h            |
| Filtergeschwindigkeit, gewählt                    | v <sub>F,gew</sub>        | 5,00 m/h              |
| Filterbetthöhe GAK (Bereich)                      |                           | 1,5...3,0 m           |
| Filterbetthöhe GAK, gewählt                       | h <sub>GAK,gew</sub>      | 2,50 m                |
| Gesamthöhe Filteraufbau                           | h <sub>Filter,ges</sub>   | 2,80 m                |
| Anzahl Filter                                     | n <sub>Filter</sub>       | 6                     |
| Schüttdichte GAK                                  | rho <sub>Schütt</sub>     | 400 kg/m <sup>3</sup> |
| <i>Bemessung Filter</i>                           |                           |                       |
| erforderliches Leerbettvol., ber. über EBCTgew    | V <sub>GAK</sub>          | 400 m <sup>3</sup>    |
| erforderliche Filterfläche, ber. über EBCTgew     | A <sub>Filter,erf</sub>   | 160,00 m <sup>2</sup> |
| Fläche Filter, berechnet                          | A <sub>Filter,erf,n</sub> | 26,67 m <sup>2</sup>  |
| Länge Filter, gewählt                             | l <sub>Filter,gew</sub>   | 7,00 m                |
| Bereite Filter, gewählt                           | b <sub>Filter,gew</sub>   | 3,90 m                |
| Filterfläche, gewählt je Filter                   | A <sub>Filter,gew</sub>   | 27,30 m <sup>2</sup>  |
| Filterfläche, gewählt, gesamt                     | A <sub>Filter,ges</sub>   | 163,80 m <sup>2</sup> |
| Leerbettvolumen, gewählt, gesamt                  | V <sub>GAK,ges</sub>      | 409,50 m <sup>3</sup> |
| Masse GAK, gesamt                                 | M <sub>GAK,ges</sub>      | 163,80 Mg             |
| <i>Nachweise bezogen auf Q<sub>Teil,max</sub></i> |                           |                       |
| Filtergeschwindigkeit                             | v <sub>F,ist</sub>        | 4,88 m/h              |
| Filtergeschwindigkeit, bei (n-1) Filter           | v <sub>F,ist,n-1</sub>    | 5,86 m/h              |
| tatsächliche Kontaktzeit im Filterbett            | EBCT, ist                 | 30,71 min             |
| Kontaktzeit bei (n-1) Filter                      | EBCT,ist,n-1              | 25,59 min             |

**Auslegung Spülwasserpumpe**

| <i>Vorgaben</i>                       |              |             |
|---------------------------------------|--------------|-------------|
| Spülgeschwindigkeit (Bereich)         | v_Spül,W     | 25...35 m/h |
| Spülgeschwindigkeit gewählt           | v_Spül_W,gew | 30 m/h      |
| <i>Bemessung</i>                      |              |             |
| Volumenstrom Spülwasser               | Q_Spül,W     | 819 m³/h    |
| Volumenstrom Spülwasserpumpe, gewählt | Q_Spül,W,gew | 900 m³/h    |

**Auslegung Spülluftgebläse**

| <i>Vorgaben</i>                       |              |             |
|---------------------------------------|--------------|-------------|
| Spülgeschwindigkeit (Bereich)         | v_Spül,L     | 60...80 m/h |
| Spülgeschwindigkeit gewählt           | v_Spül_L,gew | 70 m/h      |
| <i>Bemessung</i>                      |              |             |
| Volumenstrom Spülluft                 | Q_Spül,L     | 1911 m³/h   |
| Volumenstrom Spülluftgebläse, gewählt | Q_Spül,L,gew | 1900 m³/h   |

**Rückspülregime**

| <i>Vorgaben</i>                                 |              |             |
|---|--------------|-------------|
| Spülintervall, gewählt                          |              | 24 h        |
|   |              | 7 /Woche    |
| Spülprogramm                                    |              |             |
| Luftspülung                                     | t_Spül,L,gew | 90 s        |
|   |              | 1,5 min     |
| Wasserspülung                                   | t_Spül,L,gew | 300 s       |
|   |              | 5,0 min     |
| Spülwasserbedarf pro Spülung (rechnerisch)      |              | 68 m³/Spül. |
| Spülwasserbedarf (rechnerisch)                  |              | 3150 m³/Wo. |
|   |              | 450 m³/d    |
| Spülwasserspeicher (Gewählt)                    | V_Spülsp,GAK | 200 m³      |
| Energiebedarf je Spülung (mit RF Schlammwasser) |              | 8,54 kWh    |
| Bedarf Spülluftgebläse                          |              | 1,47 kWh    |
| Bedarf Spülwasserpumpen                         |              | 3,86 kWh    |
| Bedarf Schlammwasserförderungen                 |              | 3,21 kWh    |
| Energiebedarf pro Woche                         |              | 359 kWh/Wo  |
| Energiebedarf pro Jahr                          |              | 18646 kWh/a |
| Bedarf Spülluftgebläse                          |              | 3202 kWh/a  |
| Bedarf Spülwasserpumpen                         |              | 8424 kWh/a  |
| Bedarf Schlammwasserförderungen                 |              | 7020 kWh/a  |

**Filterlaufzeit/GAK-Bedarf**

| Berechnung über ausgetauschte Bettvolumina |         |                 |
|--|---------|-----------------|
| Bettvolumina bis Durchbruch (Bereich)      |         | 5.000....30.000 |
| Bettvolumina bis Durchbruch                | BVgew   | 8.000           |
| Standzeit Füllung GAK                      | t_Stand | 273 d           |
| Jahresbedarf GAK (rechnerisch), Volumen    | V_GAK,a | 547,2 m³/a      |
| Jahresbedarf GAK (rechnerisch), Masse      | M_GAK,a | 218,89 Mg/a     |

**Legende**

|                   |
|-------------------|
| Eingabefelder     |
| Berechnungsfelder |

**KA Emmerich****Projekt:****Studie 4. Reinigungsstufe****Projekt-Nr.:****1217 001****Variante:****3****Ozon mit nachgeschaltetem Filter** (kontinuierlich gespült)**Auslegungsdaten Hydraulik**

| <i>Gesamtzulauf Kläranlage</i>                  |                       |                             |                         |
|---|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Max. TW-Zufluss (mit Fremdwasser)               | Q <sub>t</sub>        | 632,78 l/s                  | 2.278 m <sup>3</sup> /h |
| Maximaler Wasserzufluss (Trennsystem)           | Q <sub>m</sub>        | 777,78 l/s                  | 2.800 m <sup>3</sup> /h |
| <i>Teilstrombehandlung (4. Reinigungsstufe)</i> |                       |                             |                         |
| Max. Volumenstrom für Teilstrombehandlung       | Q <sub>Teil,max</sub> | 800 m <sup>3</sup> /h       | 222 l/s                 |
| Behandelte Abwassermenge im Teilstrom           | Q <sub>Teil,a</sub>   | 4.377.846 m <sup>3</sup> /a |                         |
| Behandelte Teilstrommenge pro Tag               | Q <sub>Teil,d</sub>   | 11.994 m <sup>3</sup> /d    |                         |

**Auslegung Kontaktreaktor Ozon**

| <i>Vorgaben</i>                                   |                         |                    |  |
|---|-------------------------|--------------------|--|
| Kontaktzeit (Bereich)                             | t <sub>KR</sub>         | 10...30 min        |  |
| Kontaktzeit, gewählt                              | t <sub>KR,ges,gew</sub> | 25 min             |  |
| davon im Kontaktreaktor                           |                         | 20 min             |  |
| in der Ausgasungszone                             |                         | 5 min              |  |
| Straßen   | n <sub>Str</sub>        | 2                  |  |
| <i>Bemessung Reaktor</i>                          |                         |                    |  |
| erforderliches Volumen                            | V <sub>KR,ges</sub>     | 333 m <sup>3</sup> |  |
| davon im Kontaktreaktor                           |                         | 267 m <sup>3</sup> |  |
| in der Ausgasungszone                             |                         | 67 m <sup>3</sup>  |  |
| <i>Geometrie</i>                                  |                         |                    |  |
| Straßen   | n <sub>Str</sub>        | 2                  |  |
| Wasserspiegelhöhe                                 | h <sub>WS</sub>         | 6,00 m             |  |
| Länge (innen)                                     | l <sub>KR,gew</sub>     | 8,50 m             |  |
| Breite (innen), Straße                            | b <sub>KR,gew</sub>     | 3,30 m             |  |
| Volumen,ist,Str                                   | V <sub>KR,ist,Str</sub> | 168 m <sup>3</sup> |  |
| Volumen,ist,ges                                   | V <sub>KR,ist,ges</sub> | 337 m <sup>3</sup> |  |
| <i>Nachweise bezogen auf Q<sub>Teil,max</sub></i> |                         |                    |  |
| tatsächliche Kontaktzeit im Reaktor               | t <sub>KR,ist</sub>     | 25,25 min          |  |
| Kontaktzeit bei (n-1) Straßen                     | t <sub>KR,ist,n-1</sub> | 12,62 min          |  |

**Auslegung Ozonerzeuger**

|  |             |                               |
|--|-------------|-------------------------------|
| <i>Vorgaben</i>                                    |             |                               |
| min. Dosis   | c_O3,min    | 2,0 g/m <sup>3</sup>          |
| max. Dosis   | c_O3,max    | 10,0 g/m <sup>3</sup>         |
| mittlere Dosis im Jahr                             | c_O3,a      | 7,0 g/m <sup>3</sup>          |
| Prozessgas für Ozonerzeugung                       |             | Sauerstoff                    |
| spez. O3-Konzentration bez. auf Prozessgas         |             | 0,143 kgO3/Nm <sup>3</sup> O2 |
| Dichte O2 bei Standardbedingungen                  | rho_O2,Norm | 1,337 kgO2/m <sup>3</sup>     |
| spez. Energiebedarf O3-Erzeugung mit Restvernicht. |             | 9,4 kWh/kgO3                  |
| <i>Bemessung</i>                                   |             |                               |
| O3-Bedarf bei max. O3-Dosis und Q_Teil,max         |             | 8,00 kg O3/h                  |
| gewählte Anlage                                    |             | 8,00 kg O3/h                  |
| Bedarf bei mittlerer Konzentration und Q_Teil,d    |             | 84 kg O3/d                    |
| Bedarf bei mittlerer Konzentration und Q_Teil,a    |             | 30.645 kg O3/a                |
| <i>Sauerstoffbedarf</i>                            |             |                               |
| Bedarf bei max. Dosierung und Q_Teil,max           |             | 75 kg O2/h                    |
| Bedarf bei mittlerer Konzentration und Q_Teil,d    |             | 785 kg O2/d                   |
| Bedarf bei mittlerer Konzentration und Q_Teil,a    |             | 286.519 kg O2/a               |
| <i>Energiebedarf</i>                               |             |                               |
| Bedarf bei max. Dosierung und Q_Teil,max           |             | 75 kWh                        |
| Bedarf bei mittlerer Konzentration und Q_Teil,d    |             | 789 kWh/d                     |
| Bedarf bei mittlerer Konzentration und Q_Teil,a    |             | 288.062 kWh/a                 |

**Pumpen Kühlwasser Ozonerzeuger**

|  |         |                          |
|--|---------|--------------------------|
| <i>Vorgaben</i>                          |         |                          |
| Volumenstrom                             | Q_Kühl  | 10 m <sup>3</sup> /h     |
| Förderhöhe, abgeschätzt (incl. Verluste) | h_gesch | 30 m                     |
| spez. Energiebedarf                      |         | 7 Wh/(m <sup>3</sup> ·m) |
| Laufzeit, anteilig                       |         | 24 h/d                   |
| <i>Bemessung</i>                         |         |                          |
| Energiebedarf                            |         | 18.396 kWh/a             |

**Auslegung Filtration (kontinuierlich gespülter Sandfilter)**

|  |                 |                             |
|--|-----------------|-----------------------------|
| <i>Vorgaben</i>                                |                 |                             |
| AFS im Zulauf                                  | xTS_AN          | < 20 mg/l                   |
| Oberflächenbelastung                           |                 | 12,5 m/h                    |
| Filterfläche, erf                              | A_F,erf         | 64,0 m <sup>2</sup>         |
| Filterfläche, gesamt                           | A_F,ges         | 72,0 m <sup>2</sup>         |
| Anzahl Filter                                  | n_Filter        | 12                          |
| Filterfläche je Filter, gewählt                | A_F,n           | 6,0 m <sup>2</sup>          |
| Spülwassermenge                                | Q_Spül,max      | 80,0 m <sup>3</sup> /h      |
| Spülwassermenge im Mittel                      |                 | 2...3 % des Zulaufs         |
| Spülwassermenge im Mittel gewählt              |                 | 3%                          |
| Förderhöhe Schlammwasser abgeschätzt           |                 | 10,00 m                     |
| spez. Energiebedarf Schlammwasserförd.         |                 | 7,00 Wh/(m <sup>3</sup> ·m) |
| Luftbedarf maximal                             | Q_Luft,max      | 220 m <sup>3</sup> /h       |
| Luftbedarf normal                              | Q_Luft,normal   | 60 m <sup>3</sup> /h        |
| Luftbedarf, mittel, gew                        |                 | 60 m <sup>3</sup> /h        |
| Energiebedarf Druckluft                        |                 | 0,11 kWh/m <sup>3</sup>     |
| <i>Bemessung</i>                               |                 |                             |
| Spülwasseranfall im Mittel pro Tag             | Q_Spül,mittel,d | 360 m <sup>3</sup> /d       |
| Spülwasseranfall im Mittel pro Jahr            | Q_Spül,mittel,a | 131.335 m <sup>3</sup> /a   |
| Druckluftbedarf pro Tag (mittlerer Bedarf)     |                 | 1.440 m <sup>3</sup> /d     |
| Druckluftbedarf pro Jahr (mittlerer Bedarf)    |                 | 525.600 m <sup>3</sup> /a   |
| <i>Energiebedarf</i>                           |                 |                             |
| Druckluftherzeugung (ohne Adsorptionstrockner) |                 | 158 kWh/d                   |
| Druckluftherzeugung (ohne Adsorptionstrockner) |                 | 57.816 kWh/a                |
| Schlammförderung                               |                 | 9.193 kWh/a                 |

**Legende**

|                   |
|-------------------|
| Eingabefelder     |
| Berechnungsfelder |

**KA Emmerich****Projekt:****Studie 4. Reinigungsstufe****Projekt-Nr.:****1217 001****Variante:****4****Ozonung mit nachgeschalteter BAK-Filtration****Auslegungsdaten Hydraulik**

|   |                       |                                       |
|---|-----------------------|---------------------------------------|
| <i>Gesamtzulauf Kläranlage</i>                  |                       |                                       |
| Max. TW-Zufluss (mit Fremdwasser)               | Q <sub>t</sub>        | 632,78 l/s<br>2.278 m <sup>3</sup> /h |
| Maximaler Wasserzufluss (Trennsystem)           | Q <sub>m</sub>        | 777,78 l/s<br>2.800 m <sup>3</sup> /h |
| <i>Teilstrombehandlung (4. Reinigungsstufe)</i> |                       |                                       |
| Max. Volumenstrom für Teilstrombehandlung       | Q <sub>Teil,max</sub> | 800 m <sup>3</sup> /h<br>222 l/s      |
| Behandelte Abwassermenge im Teilstrom           | Q <sub>Teil,a</sub>   | 4.377.846 m <sup>3</sup> /a           |
| Behandelte Teilstrommenge pro Tag               | Q <sub>Teil,d</sub>   | 11.994 m <sup>3</sup> /d              |

**Auslegung Kontaktreaktor Ozon**

|   |                         |                    |
|---|-------------------------|--------------------|
| <i>Vorgaben</i>                                   |                         |                    |
| Kontaktzeit (Bereich)                             | t <sub>KR</sub>         | 10...30 min        |
| Kontaktzeit, gewählt                              | t <sub>KR,ges,gew</sub> | 25 min             |
| davon im Kontaktreaktor                           |                         | 20 min             |
| in der Ausgasungszone                             |                         | 5 min              |
| Straßen   | n <sub>Str</sub>        | 2                  |
| <i>Bemessung Reaktor</i>                          |                         |                    |
| erforderliches Volumen                            | V <sub>KR,ges</sub>     | 333 m <sup>3</sup> |
| davon im Kontaktreaktor                           |                         | 267 m <sup>3</sup> |
| in der Ausgasungszone                             |                         | 67 m <sup>3</sup>  |
| <i>Geometrie</i>                                  |                         |                    |
| Straßen   | n <sub>Str</sub>        | 2                  |
| Wasserspiegelhöhe                                 | h <sub>WS</sub>         | 6,00 m             |
| Länge (innen)                                     | l <sub>KR,gew</sub>     | 8,50 m             |
| Breite (innen), Straße                            | b <sub>KR,gew</sub>     | 3,30 m             |
| Volumen,ist,Str                                   | V <sub>KR,ist,Str</sub> | 168 m <sup>3</sup> |
| Volumen,ist,ges                                   | V <sub>KR,ist,ges</sub> | 337 m <sup>3</sup> |
| <i>Nachweise bezogen auf Q<sub>Teil,max</sub></i> |                         |                    |
| tatsächliche Kontaktzeit im Reaktor               | t <sub>KR,ist</sub>     | 25,25 min          |
| Kontaktzeit bei (n-1) Straßen                     | t <sub>KR,ist,n-1</sub> | 12,62 min          |

**Auslegung Ozonerzeuger**

| <i>Vorgaben</i>                                    |              |                               |
|--|--------------|-------------------------------|
| min. Dosis   | c_O3,min     | 2,0 g/m <sup>3</sup>          |
| max. Dosis   | c_O3,max     | 10,0 g/m <sup>3</sup>         |
| mittlere Dosis im Jahr                             | c_O3,a       | 6,0 g/m <sup>3</sup>          |
| Prozessgas für Ozonerzeugung                       |              | Sauerstoff                    |
| spez. O3-Konzentration bez. auf Prozessgas         |              | 0,143 kgO3/Nm <sup>3</sup> O2 |
| Dichte O2 bei Standardbedingungen                  | rho_O2, Norm | 1,337 kgO2/m <sup>3</sup>     |
| spez. Energiebedarf O3-Erzeugung mit Restvernicht. |              | 9,4 kWh/kgO3                  |
| <i>Bemessung</i>                                   |              |                               |
| O3-Bedarf bei max. O3-Dosis und Q_Teil,max         |              | 8,00 kg O3/h                  |
| gewählte Anlage                                    |              | 8,00 kg O3/h                  |
| Bedarf bei mittlerer Konzentration und Q_Teil,d    |              | 72 kg O3/d                    |
| Bedarf bei mittlerer Konzentration und Q_Teil,a    |              | 26.267 kg O3/a                |
| <i>Sauerstoffbedarf</i>                            |              |                               |
| Bedarf bei max. Dosierung und Q_Teil,max           |              | 75 kg O2/h                    |
| Bedarf bei mittlerer Konzentration und Q_Teil,d    |              | 245.588 kg O2/d               |
| Bedarf bei mittlerer Konzentration und Q_Teil,a    |              | 12 kg O2/a                    |
| <i>Energiebedarf</i>                               |              |                               |
| Bedarf bei max. Dosierung und Q_Teil,max           |              | 75 kWh                        |
| Bedarf bei mittlerer Konzentration und Q_Teil,d    |              | 676 kWh/d                     |
| Bedarf bei mittlerer Konzentration und Q_Teil,a    |              | 246.911 kWh/a                 |

**Pumpen Kühlwasser Ozonerzeuger**

| <i>Vorgaben</i>                          |         |                          |
|--|---------|--------------------------|
| Volumenstrom                             | Q_Treib | 10 m <sup>3</sup> /h     |
| Förderhöhe, abgeschätzt (incl. Verluste) | h_gesch | 30 m                     |
| spez. Energiebedarf                      |         | 7 Wh/(m <sup>3</sup> ·m) |
| Laufzeit, anteilig                       |         | 24 h/d                   |
| <i>Bemessung</i>                         |         |                          |
| Energiebedarf                            |         | 18.396 kWh/a             |

**Auslegung GAK-Filter**

| <i>Vorgaben</i>                                |                |                       |
|--|----------------|-----------------------|
| Leerbettkontaktzeit (Bereich)                  | EBCT           | 10...30 min           |
| Leerbettkontaktzeit, gewählt                   | EBCT, gew      | 30 min                |
| Filtergeschwindigkeit (Bereich)                | v_F            | 5...20 m/h            |
| Filtergeschwindigkeit, gewählt                 | v_F,gew        | 5,00 m/h              |
| Filterbetthöhe GAK (Bereich)                   |                | 1,5...3,0 m           |
| Filterbetthöhe GAK, gewählt                    | h_GAK,gew      | 2,50 m                |
| Gesamthöhe Filteraufbau                        | h_Filter,ges   | 2,80 m                |
| Anzahl Filter                                  | n_Filter       | 6                     |
| Schüttdichte GAK                               | rho_Schütt     | 400 kg/m <sup>3</sup> |
| <i>Bemessung Filter</i>                        |                |                       |
| erforderliches Leerbettvol., ber. über EBCTgew | V_GAK          | 400 m <sup>3</sup>    |
| erforderliche Filterfläche, ber. über EBCTgew  | A_Filter,erf   | 160,00 m <sup>2</sup> |
| Fläche Filter, berechnet                       | A_Filter,erf,n | 26,67 m <sup>2</sup>  |
| Länge Filter, gewählt                          | l_Filter,gew   | 7,00 m                |
| Bereite Filter, gewählt                        | b_Filter,gew   | 3,80 m                |
| Filterfläche, gewählt je Filter                | A_Filter,gew   | 26,60 m <sup>2</sup>  |
| Filterfläche, gewählt, gesamt                  | A_Filter,ges   | 159,60 m <sup>2</sup> |
| Leerbettvolumen, gewählt, gesamt               | V_GAK,ges      | 399,00 m <sup>3</sup> |
| Masse GAK, gesamt                              | M_GAK,ges      | 159,60 Mg             |
| <i>Nachweise bezogen auf Q_Teil,max</i>        |                |                       |
| Filtergeschwindigkeit                          | v_F,ist        | 5,01 m/h              |
| Filtergeschwindigkeit, bei (n-1) Filter        | v_F,ist,n-1    | 6,02 m/h              |
| tatsächliche Kontaktzeit im Filterbett         | EBCT, ist      | 29,93 min             |
| Kontaktzeit bei (n-1) Filter                   | EBCT,ist,n-1   | 24,94 min             |

**Auslegung Spülwasserpumpe**

|                                       |              |             |
|---------------------------------------|--------------|-------------|
| <i>Vorgaben</i>                       |              |             |
| Spülgeschwindigkeit (Bereich)         | v_Spül,W     | 25...35 m/h |
| Spülgeschwindigkeit gewählt           | v_Spül_L,gew | 30 m/h      |
| <i>Bemessung</i>                      |              |             |
| Volumenstrom Spülwasser               | Q_Spül,L     | 798 m³/h    |
| Volumenstrom Spülwasserpumpe, gewählt | Q_Spül,L,gew | 900 m³/h    |

**Auslegung Spülgebläse**

|                                       |              |             |
|---------------------------------------|--------------|-------------|
| <i>Vorgaben</i>                       |              |             |
| Spülgeschwindigkeit (Bereich)         | v_Spül,L     | 60...80 m/h |
| Spülgeschwindigkeit gewählt           | v_Spül_L,gew | 70 m/h      |
| <i>Bemessung</i>                      |              |             |
| Volumenstrom Spülluft                 | Q_Spül,L     | 1862 m³/h   |
| Volumenstrom Spülluftgebläse, gewählt | Q_Spül,L,gew | 1900 m³/h   |

**Rückspülregime**

|   |              |              |
|---|--------------|--------------|
| <i>Vorgaben</i>                                 |              |              |
| Spülintervall, gewählt                          |              | 72 h         |
|   |              | 2 /Woche     |
| Spülprogramm                                    |              |              |
| Luftspülung                                     | t_Spül,L,gew | 90 s         |
|   |              | 1,5 min      |
| Wasserspülung                                   | t_Spül,L,gew | 300 s        |
|   |              | 5,0 min      |
| Spülwasserbedarf pro Spülung (rechnerisch)      |              | 67 m³/Spül.  |
| Spülwasserbedarf (rechnerisch)                  |              | 2.217 m³/Wo. |
|   |              | 317 m³/d     |
| Spülwasserspeicher (Gewählt)                    | V_Spülsp,GAK | 200 m³       |
| Energiebedarf je Spülung (mit RF Schlammwasser) |              | 8,51 kWh     |
| Bedarf Spülluftgebläse                          |              | 1,46 kWh     |
| Bedarf Spülwasserpumpen                         |              | 3,85 kWh     |
| Bedarf Schlammwasserförderungen                 |              | 3,21 kWh     |
| Energiebedarf pro Woche                         |              | 119 kWh/Wo   |
| Energiebedarf pro Jahr                          |              | 6.199 kWh/a  |
| Bedarf Spülluftgebläse                          |              | 1.064 kWh/a  |
| Bedarf Spülwasserpumpen                         |              | 2.801 kWh/a  |
| Bedarf Schlammwasserförderungen                 |              | 2.334 kWh/a  |

**Filterlaufzeit/GAK-Bedarf**

|   |         |           |
|---|---------|-----------|
| Berechnung über Betriebszeit            |         |           |
| Austausch GAK (Bereich)                 |         | 5...12 a  |
| Austausch Zeitraum GAK                  | T_gew   | 8 a       |
| Standzeit Füllung GAK Bettvolumen       | BW_gew  | 87.776 BV |
| Jahresbedarf GAK (rechnerisch), Volumen | V_GAK,a | 50 m³/a   |
| Jahresbedarf GAK (rechnerisch), Masse   | M_GAK,a | 20 Mg/a   |

**Legende**

|                   |
|-------------------|
| Eingabefelder     |
| Berechnungsfelder |

## KA Emmerich

Projekt: Studie 4. Reinigungsstufe  
 Projekt-Nr.: 1217 001  
 Energiebedarf Varianten

| Pos.       | Bezeichnung                   |              | Variante 1<br>PAK mit<br>Rücklaufkohle | Variante 2<br>GAK | Variante 3<br>Ozonung +<br>Sandfilter | Variante 4<br>Ozonung +<br>BAK |
|------------|-------------------------------|--------------|--|-------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <b>1.0</b> | <b>Pumpen</b>                 | <b>kWh/a</b> | <b>59.298</b>                          | <b>15.444</b>     | <b>27.589</b>                         | <b>23.530</b>                  |
| 1.1        | Beschickungspumpen            | kWh/a        |  |                   |                                       |                                |
| 1.2        | Rücklaufkohlepumpe            | kWh/a        | 30.645                                 |                   |                                       |                                |
| 1.3        | Überschusskohlepumpe          | kWh/a        | 6.359                                  |                   |                                       |                                |
| 1.4        | Dosierpumpen                  | kWh/a        | 5.431                                  |                   |                                       |                                |
|            | Flockungsmittel (Me-Salze)    | kW           | 0,1                                    |                   |                                       |                                |
|            | Flockungshilfsmittel          | kW           | 0,5                                    |                   |                                       |                                |
|            | Laufzeit                      | h/d          | 24                                     |                   |                                       |                                |
| 1.5        | Spülwasserpumpe               | kWh/a        |  | 8.424             |                                       | 2.801                          |
| 1.6        | Schlammwasserpumpe            | kWh/a        |  | 7.020             | 9.193                                 | 2.334                          |
| 1.7        | Treibwasser für PAK-Dosierung | kWh/a        | 16.863                                 |                   |                                       |                                |
| 1.8        | Kühlwasser für Ozonerzeuger   | kWh/a        |  |                   | 18.396                                | 18.396                         |
| <b>2.0</b> | <b>Gebläse</b>                | <b>kWh/a</b> |  | <b>3.202</b>      |                                       | <b>1.064</b>                   |
| 2.1        | Spülluftgebläse               | kWh/a        |  | 3.202             |                                       | 1.064                          |
| <b>3.0</b> | <b>Räumer</b>                 | <b>kWh/a</b> | <b>4.380</b>                           |                   |                                       |                                |
|            | Anzahl Räumer                 |              | 1                                      |                   |                                       |                                |
| 3.1        | Räumer Absetzbecken           | kWh/a        | 4.380,0                                |                   |                                       |                                |
|            | Antrieb                       | kW           | 0,50                                   |                   |                                       |                                |
|            | Laufzeit                      | h/d          | 24                                     |                   |                                       |                                |
| <b>4.0</b> | <b>Rührwerke</b>              | <b>kWh/a</b> | <b>16.742</b>                          |                   |                                       |                                |
| 4.1        | Rührwerke Kontaktbecken       | kWh/a        | 16.742                                 |                   |                                       |                                |
| <b>5.0</b> | <b>Doiserggerät PAK</b>       | <b>kWh/a</b> | <b>5.782</b>                           |                   |                                       |                                |
|            | Anzahl Dosiergeräte           |              | 2                                      |                   |                                       |                                |
| 5.1        | Antrieb Dosierschnecke        | kWh/a        | 2.891                                  |                   |                                       |                                |
|            | Antrieb                       | kW           | 0,55                                   |                   |                                       |                                |
|            | Auslastung                    |              | 60%                                    |                   |                                       |                                |
|            | Laufzeit                      | h/d          | 24                                     |                   |                                       |                                |
| <b>6.0</b> | <b>Ozonanlage</b>             | <b>kWh/a</b> |  |                   | <b>288.062</b>                        | <b>246.911</b>                 |
| 6.1        | Ozonerzeugung                 |              |  |                   | 288.062                               | 246.911                        |

|            |   |                          |                |               |                |                |
|------------|---|--------------------------|----------------|---------------|----------------|----------------|
| <b>7.0</b> | <b>Tuchfilter</b>                         | <b>kWh/a</b>             | <b>16.646</b>  |               |                |                |
|            | Anzahl Filter                             |                          | 2              |               |                |                |
| 7.1        | Betrieb Filter                            |                          | 2.738,6        |               |                |                |
| 7.1.1      | Antrieb Filter                            | kWh/a                    | 2.738,6        |               |                |                |
|            | Antrieb                                   | kW                       | 1,83           |               |                |                |
|            | Laufzeit                                  | h/d                      | 4,1            |               |                |                |
| 7.2        | Rückspülung Filter                        |                          | 5.584,5        |               |                |                |
| 7.2.1      | Filterabsaugpumpen                        | kWh/a                    | 5.518,8        |               |                |                |
|            | Antrieb                                   | kW                       | 1,80           |               |                |                |
|            | Anzahl                                    | n                        | 6              |               |                |                |
|            | Laufzeit                                  | h/d                      | 1,4            |               |                |                |
| 7.2.2      | Bodenschlammumpen                         | kWh/a                    | 65,7           |               |                |                |
|            | Antrieb                                   | kW                       | 1,80           |               |                |                |
|            | Anzahl                                    | n                        | 2              |               |                |                |
|            | Laufzeit                                  | h/d                      | 0,05           |               |                |                |
| <b>8.0</b> | <b>Sandfilter, kontinuierlich gespült</b> | <b>kWh/a</b>             |                |               | <b>57.816</b>  |                |
| 8.1        | Druckluftversorgung                       | kWh/a                    |                |               | 57.816         |                |
| <b>9.0</b> | <b>Messtechnik</b>                        | <b>kWh/a</b>             | <b>21.889</b>  | <b>21.889</b> | <b>21.889</b>  | <b>21.889</b>  |
|            | pauschal                                  | 0,005 kWh/m <sup>3</sup> | 21.889         | 21.889        | 21.889         | 21.889         |
|            | <b>Summe 1: Pumpen</b>                    | <b>kWh/a</b>             | <b>59.298</b>  | <b>15.444</b> | <b>27.589</b>  | <b>23.530</b>  |
|            | <b>Summe 2: Gebläse</b>                   | <b>kWh/a</b>             | <b>0</b>       | <b>3.202</b>  | <b>0</b>       | <b>1.064</b>   |
|            | <b>Summe 3: Räumler</b>                   | <b>kWh/a</b>             | <b>4.380</b>   | <b>0</b>      | <b>0</b>       | <b>0</b>       |
|            | <b>Summe 4: Rührwerke</b>                 | <b>kWh/a</b>             | <b>16.742</b>  | <b>0</b>      | <b>0</b>       | <b>0</b>       |
|            | <b>Summe 5: Dosiergerät PAK</b>           | <b>kWh/a</b>             | <b>5.782</b>   | <b>0</b>      | <b>0</b>       | <b>0</b>       |
|            | <b>Summe 6: Ozonanlage</b>                | <b>kWh/a</b>             | <b>0</b>       | <b>0</b>      | <b>288.062</b> | <b>246.911</b> |
|            | <b>Summe 7: Tuchfilter</b>                | <b>kWh/a</b>             | <b>16.646</b>  | <b>0</b>      | <b>0</b>       | <b>0</b>       |
|            | <b>Summe 8: Sandfilter, kont. gespült</b> | <b>kWh/a</b>             | <b>0</b>       | <b>0</b>      | <b>57.816</b>  | <b>0</b>       |
|            | <b>Summe 9: Messtechnik</b>               | <b>kWh/a</b>             | <b>21.889</b>  | <b>21.889</b> | <b>21.889</b>  | <b>21.889</b>  |
|            | <b>Gesamtsumme</b>                        | <b>kWh/a</b>             | <b>124.737</b> | <b>40.535</b> | <b>395.357</b> | <b>293.395</b> |

**Anlage 2:  
Investitionskosten  
Varianten 1 bis 4**

KA Emmerich

Projekt: Studie 4. Reinigungsstufe

Projekt-Nr.: 1217 001

Variante: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle

| Pos.-Nr | Text  | Menge  | Einheit   | Einheitspreis   | Bautechnik  | Masch.-Tech.                             | Elektro.-Tech. | Gesamtpreis  |
|---------|---|--|---|---|---|--|----------------|--------------|
| 1       | <b>Baustelleneinrichtung</b><br>(10 % Bautechnik)<br>(5 % Maschinentechnik)   |  |   |   | 114.146,43 €  | 52.717,79 €                              |                | 166.864,22 € |
| 2       | <b>Erdarbeiten</b><br>Grundwasserhaltung<br>Bodenaushub Becken<br>Bodenwiederanfüllung Becken<br>Bodenabfuhr Becken<br>Bodenaushub TF<br>Bodenwiederanfüllung TF<br>Bodenabfuhr TF  | 1,00<br>3.173,94<br>879,34<br>2.294,60<br>199,37<br>109,51<br>93,76          | psch<br>m³<br>m³<br>m³<br>m³<br>m³<br>m³                    | 20.000,00 €<br>15,00 €<br>15,00 €<br>15,00 €<br>15,00 €<br>15,00 €<br>15,00 €   | 20.000,00 €<br>47.609,10 €<br>13.190,10 €<br>34.419,00 €<br>2.990,52 €<br>1.642,68 €<br>1.406,34 €                            |  |                | 121.257,74 € |
| 3       | <b>Abtrennung Teilstrom</b><br>Schälblech, Rückschlagklappe, Schieber, Schächte   | 1,00   | psch  | 60.000,00 €   | 60.000,00 €   |  |                | 60.000,00 €  |
| 4       | <b>Kombibecken</b><br>Kontaktbecken mit Schächten<br>Absetzbecken mit Schächten<br>Rührwerke<br>Schlosserarb. (Bediengang + Treppe)<br>Schlosserarb. (Geländer + Gitterrost KB)<br>Räumer<br>Schürze Einlauf<br>Ablaufrinne VA<br>Absenkschieber Zulauf mit Antrieb   | 637,00<br>1.688,00<br>2,00<br>1,00<br>84,19<br>1,00<br>1,00<br>84,19<br>1,00 | m³<br>m³<br>St<br>psch<br>m<br>St<br>St<br>m<br>St          | 150,00 €<br>300,00 €<br>13.000,00 €<br>30.000,00 €<br>650,00 €<br>85.000,00 €<br>15.000,00 €<br>800,00 €<br>12.000,00 € | 95.550,00 €<br>506.400,00 €<br><br>30.000,00 €<br>54.726,54 €<br><br>85.000,00 €<br>15.000,00 €<br>67.355,75 €<br>12.000,00 € | 26.000,00 €                              |                | 892.032,29 € |
| 5       | <b>PAK-Silo 125 m³</b><br>Silo mit Dosiereinrichtung<br>Pumpe Treibwasser m. Verrohr<br>Kompressor mit Lufttrocknung<br>Steuerung   | 1,00<br>1,00<br>1,00<br>1,00   | St<br>psch<br>St<br>St                                      | 285.000,00 €<br>8.000,00 €<br>8.000,00 €<br>46.000,00 €   |   | 285.000,00 €<br>8.000,00 €<br>8.000,00 € |                | 347.000,00 € |
| 5       | <b>Tuchfiltration</b><br>Becken Tuchfilter I + II<br>Anbindung Ablauf AB<br>Schlosserarbeiten (Bediengang + Treppe)<br>Absenkschieber mit E-Antrieb<br>Steuerung + VOST Tuchfilter<br>Tuchfilter<br>Montage + IBN Filter<br>Ablaufgerinne Filter I und II   | 100,00<br>1,00<br>1,00<br>1,00<br>1,00<br>2,00<br>1,00<br>5,00               | m²<br>psch<br>psch<br>St<br>psch<br>St<br>psch<br>m         | 750,00 €<br>8.000,00 €<br>8.000,00 €<br>12.000,00 €<br>16.000,00 €<br>170.000,00 €<br>14.000,00 €<br>750,00 €           | 75.000,00 €<br>8.000,00 €<br>8.000,00 €<br><br><br>340.000,00 €<br>14.000,00 €<br>3.750,00 €                                  | 12.000,00 €                              | 16.000,00 €    | 476.750,00 € |
| 6       | <b>Pulveraktivkohle (Erstbefüllung)</b><br>Aktivkohle   | 20,00  | Mg  | 1.500,00 €  |   | 30.000,00 €                              |                | 30.000,00 €  |
| 7       | <b>Rohrtech. Installation</b><br><i>Rücklaufkohle</i><br>1 Leitung DN 300 VA<br>Formstücke, Flansche, Einbindung<br>Armaturen<br><i>Ablauf Sedimentation</i><br>2 Leitung DN 300 VA<br>Formstücke, Flansche, Einbindung<br>Armaturen<br><i>Zulauf Sedimentation</i><br>1 Leitung DN 300 VA<br>Formstücke, Flansche, Einbindung<br>Armaturen | 15,30<br>1,00<br>1,00<br>4,00<br>1,00<br>1,00<br>15,30<br>1,00<br>1,00       | m<br>psch<br>psch<br>m<br>psch<br>psch<br>m<br>psch<br>psch | 320,00 €<br>2.000,00 €<br>3.000,00 €<br>320,00 €<br>2.000,00 €<br>3.000,00 €<br>320,00 €<br>2.000,00 €<br>3.000,00 €    | 4.896,00 €<br>2.000,00 €<br>3.000,00 €<br>1.280,00 €<br>2.000,00 €<br>3.000,00 €<br>4.896,00 €<br>2.000,00 €<br>3.000,00 €    |  |                | 26.072,00 €  |
| 8       | <b>Flockungsmitteldosierung (Me-Salze)</b><br>Dosierpumpen mit Dosierleit.<br>Dosierleitungen (Schutzrohr + Schlauch)   | 1,00<br>140,00   | psch<br>m   | 40.000,00 €<br>110,00 €   |   | 40.000,00 €<br>15.400,00 €               |                | 55.400,00 €  |
| 9       | <b>Flockungshilfsmitteldosierung</b><br>Bereitungsanlage mit Dosierleitungen<br>Dosierleitungen   | 1,00<br>10,00  | psch<br>m   | 30.000,00 €<br>60,00 €  |   | 30.000,00 €<br>600,00 €                  |                | 30.600,00 €  |
| 10      | <b>Pumpen</b><br>Schnecken-PW Rücklaufkohle<br>ÜS-Kohlepumpe mit Verrohrung   | 1,00<br>1,00   | St<br>St  | 24.000,00 €<br>10.000,00 €  |   | 24.000,00 €<br>10.000,00 €               |                | 34.000,00 €  |
| 11      | <b>Ablaufmessung</b><br>Schacht Ablaufmessung<br>Rohrtech. Inst<br>Einbindung in Bestand RL<br>Messtechnik  | 1,00<br>1,00<br>1,00<br>1,00   | psch<br>psch<br>psch<br>psch                                | 40.000,00 €<br>20.000,00 €<br>10.000,00 €<br>10.000,00 €  | 40.000,00 €<br><br>10.000,00 €  | 20.000,00 €                              | 10.000,00 €    | 80.000,00 €  |

|    |  |        |      |              |                       |                       |                     |                       |
|----|--|--------|------|--------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| 12 | <b>Erdverlegte Rohrleitungen</b>             |        |      |              |                       |                       |                     | 40.708,00 €           |
|    | Zulauf. PE 100 SDR 17 560*33,2               | 46,00  | m    | 180,00 €     | 8.280,00 €            |                       |                     |                       |
|    | Rohrgraben PE 100 SDR 17 560*33,2            | 46,00  | m    | 100,00 €     | 4.600,00 €            |                       |                     |                       |
|    | Formstücke                                   | 2,00   | psch | 680,00 €     | 1.360,00 €            |                       |                     |                       |
|    | Ablauf. PE 100 SDR 17 560*33,2               | 20,00  | m    | 100,00 €     | 2.000,00 €            |                       |                     |                       |
|    | Rohrgraben PE 100 SDR 17 560*33,2            | 20,00  | m    | 80,00 €      | 1.600,00 €            |                       |                     |                       |
|    | Formstücke                                   | 2,00   | psch | 680,00 €     | 1.360,00 €            |                       |                     |                       |
|    | ÜSK-Leitung KB PE 100 SDR 17 90*5,4          | 274,00 | m    | 18,00 €      | 4.932,00 €            |                       |                     |                       |
|    | Rohrgraben PE 100 SDR 17 90*5,4              | 274,00 | m    | 20,00 €      | 5.480,00 €            |                       |                     |                       |
|    | Formstücke                                   | 9,00   | psch | 38,00 €      | 342,00 €              |                       |                     |                       |
|    | Schlammwasserleitung TF PE 100 SDR 17 90*5,4 | 274,00 | m    | 18,00 €      | 4.932,00 €            |                       |                     |                       |
|    | Rohrgraben PE 100 SDR 17 90*5,4              | 274,00 | m    | 20,00 €      | 5.480,00 €            |                       |                     |                       |
|    | Formstücke                                   | 9,00   | psch | 38,00 €      | 342,00 €              |                       |                     |                       |
| 13 | <b>Kabelschächte/Leerrohre</b>               | 1,00   | psch | 15.000,00 €  | 15.000,00 €           |                       |                     | 15.000,00 €           |
| 14 | <b>Hausinstallation/Entwässerung</b>         | 1,00   | psch | 12.000,00 €  | 12.000,00 €           |                       |                     | 12.000,00 €           |
| 15 | <b>Strassen-/Wegebau/Aussenanlagen</b>       | 1      | psch | 30.000,00 €  | 30.000,00 €           |                       |                     | 30.000,00 €           |
| 16 | <b>Inbetriebnahme/Dokumentation</b>          |        |      |              |                       |                       |                     | 17.000,00 €           |
|    | Dokumentation                                | 1,00   | psch | 5.000,00 €   | 5.000,00 €            |                       |                     |                       |
|    | Dokumentation/Inbetriebnahme                 | 1,00   | psch | 12.000,00 €  |                       | 12.000,00 €           |                     |                       |
| 17 | <b>EMSR-Technik</b>                          |        |      |              |                       |                       |                     | 332.122,06 €          |
|    | Pauschal (30 % der MT)                       | 1,00   | psch | 332.122,06 € |                       | 332.122,06 €          |                     |                       |
| 18 | <b>Umbau Probenahmestelle</b>                |        |      |              |                       |                       |                     | 150.000,00 €          |
|    | Pauschal                                     | 1,00   | psch | 150.000,00 € | 150.000,00 €          |                       |                     |                       |
| 19 | <b>Zuschlag Hochwassermaßnahmen</b>          |        |      |              |                       |                       |                     | 125.561,07 €          |
|    | Pauschal (10% der BT)                        | 1,00   | psch | 125.561,07 € | 125.561,07 €          |                       |                     |                       |
|    | <b>Summe Herstellungskosten, netto</b>       |        |      |              | <b>1.531.171,78 €</b> | <b>1.107.073,53 €</b> | <b>404.122,06 €</b> | <b>3.042.367,38 €</b> |
|    | Nebenkosten (Ing.-Honoare, Prüfgebühr, usw.) |        |      | 20%          | <b>306.234,36 €</b>   | <b>221.414,71 €</b>   | <b>80.824,41 €</b>  | <b>608.473,48 €</b>   |
|    | <b>Summe Baukosten, netto</b>                |        |      |              | <b>1.837.406,14 €</b> | <b>1.328.488,24 €</b> | <b>484.946,47 €</b> | <b>3.650.840,85 €</b> |
|    | Mehrwertsteuer                               |        |      | 19%          |                       |                       |                     | 578.049,80 €          |
|    | <b>Summe Baukosten, brutto</b>               |        |      |              |                       |                       |                     | <b>4.228.890,65 €</b> |

|  |  |  |  |  |                    |                     |                    |                     |
|--|--|--|--|--|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|  | <b>Kapitalkosten</b>                             |  |  |  |                    |                     |                    |                     |
|  | Nutzungsdauer Bautechnik in Jahren               |  |  |  | 30                 |                     |                    |                     |
|  | Nutzungsdauer Masch.-Technik in Jahren           |  |  |  |                    | 15                  |                    |                     |
|  | Nutzungsdauer EMSR-Technik in Jahren             |  |  |  |                    |                     | 10                 |                     |
|  | Zinssatz i                                       |  |  |  | 3,0%               | 3,0%                | 3,0%               |                     |
|  | <b>Kapitalwiedergewinnungsfaktor KFAKR (i;n)</b> |  |  |  |                    |                     |                    |                     |
|  | Kapitalwiedergewinnungsfaktor Bautechnik         |  |  |  | 0,05102            |                     |                    |                     |
|  | Kapitalwiedergewinnungsfaktor Masch.-Technik     |  |  |  |                    | 0,08377             |                    |                     |
|  | Kapitalwiedergewinnungsfaktor EMSR-Technik       |  |  |  |                    |                     | 0,11723            |                     |
|  | <b>Kapitalkosten/a, netto</b>                    |  |  |  | <b>93.743,10 €</b> | <b>111.282,92 €</b> | <b>56.850,52 €</b> | <b>261.876,54 €</b> |

|  |   |  |  |  |                    |                    |                   |                    |
|--|---|--|--|--|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
|  | <b>Wartung- und Instandhaltungskosten</b>             |  |  |  |                    |                    |                   |                    |
|  | 1,0 %/a der Baukosten                                 |  |  |  | 18.374,06 €        |                    |                   |                    |
|  | 4,0 %/a der Kosten für technische Installationen      |  |  |  |                    | 53.139,53 €        |                   |                    |
|  | 2,0 %/a der Kosten für EMSR-Technik                   |  |  |  |                    |                    | 9.698,93 €        |                    |
|  | <b>Summe Wartungs-/Instandhaltungskosten/a, netto</b> |  |  |  | <b>18.374,06 €</b> | <b>53.139,53 €</b> | <b>9.698,93 €</b> | <b>81.212,52 €</b> |

KA Emmerich

Projekt: Studie 4. Reinigungsstufe

Projekt-Nr.: 1217 001

Variante: GAK-Filtration

| Pos.-Nr | Text  | Menge  | Einheit  | Einheitspreis  | Bautechnik   | Masch.-Tech.                              | Elektro.-Tech.      | Gesamtpreis           |
|---------|---|--|--|--|--|---|---------------------|-----------------------|
| 1       | <b>Baustelleneinrichtung</b><br>(10 % Bautechnik)<br>(5 % Maschinentechnik)   |  |  |  | 96.495,73 €  | 35.222,00 €                               |                     | 131.717,73 €          |
| 2       | <b>Erdarbeiten</b><br>Grundwasserhaltung<br>Bodenaushub Becken<br>Bodenwiederanfüllung Becken<br>Bodenabfuhr Becken   | 1,00<br>2.299,73<br>751,28<br>1.548,45                                       | psch<br>m³<br>m³<br>m³                             | 20.000,00 €<br>15,00 €<br>15,00 €<br>15,00 €   | 20.000,00 €<br>34.495,88 €<br>11.269,13 €<br>23.226,75 €   |   |                     | 88.991,75 €           |
| 3       | <b>Abtrennung Teilstrom</b><br>Schälblech, Rückschlagklappe, Schieber, Schächte   | 1,00   | psch   | 60.000,00 €  | 60.000,00 €  |   |                     | 60.000,00 €           |
| 4       | <b>Filterbauwerk</b> mit Vorlage u Speicher<br>Bauwerk mit Abdachung Pumpen<br>Filterboden mit Düsen  | 409,00<br>160,00   | m³<br>m²   | 1.063,00 €<br>900,00 €   | 434.767,00 €   | 144.000,00 €                              |                     | 578.767,00 €          |
| 5       | <b>Filtermaterial (Erstbefüllung)</b><br>Aktivkohle<br>Stützschiicht  | 160,00<br>48,00  | Mg<br>m³   | 1.300,00 €<br>280,00 €   |  | 208.000,00 €<br>13.440,00 €               |                     | 221.440,00 €          |
| 6       | <b>Rohrtech. Installation Filter</b><br>Rohrleitung VA incl. Formstücke<br>Armaturen<br>Antriebe Armaturen  | 1,00<br>1,00<br>1,00   | psch<br>psch<br>psch                               | 75.000,00 €<br>70.000,00 €<br>71.000,00 €  |  | 75.000,00 €<br>70.000,00 €<br>71.000,00 € |                     | 216.000,00 €          |
| 7       | <b>Pumpen</b><br>Spülwasserpumpe mit Verrohrung<br>Schlammwasserpumpe mit Verrohrung  | 2,00<br>1,00   | St<br>St   | 26.000,00 €<br>16.000,00 €   |  | 52.000,00 €<br>16.000,00 €                |                     | 52.000,00 €           |
| 8       | <b>Gebälse</b><br>Spülluftgebälse mit Verrohrung  | 1,00   | St   | 25.000,00 €  |  | 25.000,00 €                               |                     | 25.000,00 €           |
| 9       | <b>Ablaufmessung</b><br>Schacht Ablaufmessung<br>Rohrtech. Inst<br>Einbindung in Bestand RL<br>Messtechnik  | 1,00<br>1,00<br>1,00<br>1,00   | psch<br>psch<br>psch<br>psch                       | 40.000,00 €<br>20.000,00 €<br>10.000,00 €<br>10.000,00 €   | 40.000,00 €<br>10.000,00 €   | 20.000,00 €                               | 10.000,00 €         | 80.000,00 €           |
| 10      | <b>Erdverlegte Rohrleitungen</b><br>Zulauf, PE 100 SDR 17 560*33,2<br>Rohrgraben PE 100 SDR 17 560*33,2<br>Formstücke<br>Abltfg PE 100 SDR 17 560*33,2<br>Rohrgraben PE 100 SDR 17 560*33,2<br>Formstücke<br>Schlammwasser TF PE 100 SDR 17 90*5,4<br>Rohrgraben PE 100 SDR 17 90*5,4<br>Formstücke | 19,00<br>19,00<br>1,00<br>40,00<br>40,00<br>3,00<br>274,00<br>274,00<br>9,00 | m<br>m<br>psch<br>m<br>m<br>psch<br>m<br>m<br>psch | 180,00 €<br>100,00 €<br>680,00 €<br>100,00 €<br>80,00 €<br>680,00 €<br>18,00 €<br>20,00 €<br>38,00 € | 3.420,00 €<br>1.900,00 €<br>680,00 €<br>4.000,00 €<br>3.200,00 €<br>2.040,00 €<br>4.932,00 €<br>5.480,00 €<br>342,00 € |   |                     | 25.994,00 €           |
| 11      | <b>Kabelschächte/Leerrohre</b>  | 1,00   | psch   | 15.000,00 €  | 15.000,00 €  |   |                     | 15.000,00 €           |
| 12      | <b>Hausinstallation/Entwässerung</b>  | 1,00   | psch   | 12.000,00 €  | 12.000,00 €  |   |                     | 12.000,00 €           |
| 13      | <b>Strassen-/Wegebau/Aussenanlagen</b>  | 1  | psch   | 30.000,00 €  | 30.000,00 €  |   |                     | 30.000,00 €           |
| 14      | <b>Inbetriebnahme/Dokumentation</b><br>Dokumentation<br>Dokumentation/Inbetriebnahme  | 1,00<br>1,00   | psch<br>psch                                       | 5.000,00 €<br>10.000,00 €  | 5.000,00 €   | 10.000,00 €                               |                     | 15.000,00 €           |
| 15      | <b>EMSR-Technik</b><br>Pauschal (50 % der MT)   | 1,00   | psch   | 369.831,00 €   |  |   | 369.831,00 €        | 369.831,00 €          |
| 16      | <b>Umbau Probenahmestelle</b><br>Pauschal   | 1,00   | psch   | 150.000,00 €   | 150.000,00 €   |   |                     | 150.000,00 €          |
| 17      | <b>Zuschlag Hochwassermaßnahmen</b><br>Pauschal (10% der BT)  | 1,00   | psch   | 93.204,52 €  | 93.204,52 €  |   |                     | 93.204,52 €           |
|         | <b>Summe Herstellungskosten, netto</b>  |  |  |  | <b>1.061.453,00 €</b>  | <b>739.662,00 €</b>                       | <b>379.831,00 €</b> | <b>2.180.946,00 €</b> |
|         | Nebenkosten (Ing.-Honoare, Prüfgebühr, usw.)  |  |  | 20%  | 212.290,60 €   | 147.932,40 €                              | 75.966,20 €         | 436.189,20 €          |
|         | <b>Summe Baukosten, netto</b>   |  |  |  | <b>1.273.743,60 €</b>  | <b>887.594,40 €</b>                       | <b>455.797,20 €</b> | <b>2.617.135,20 €</b> |
|         | Mehrwertsteuer  |  |  | 19%  |  |   |                     | 414.379,74 €          |
|         | <b>Summe Baukosten, brutto</b>  |  |  |  |  |   |                     | <b>3.031.514,94 €</b> |

|   |                    |                    |                    |                     |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| <b>Kapitalkosten</b>                                  |                    |                    |                    |                     |
| Nutzungsdauer Bautechnik in Jahren                    | 30                 |                    |                    |                     |
| Nutzungsdauer Masch.-Technik in Jahren                |                    | 15                 |                    |                     |
| Nutzungsdauer EMSR-Technik in Jahren                  |                    |                    | 10                 |                     |
| Zinssatz i  | 3%                 | 3%                 | 3%                 |                     |
| <b>Kapitalwiedergewinnungsfaktor KFAKR (i;n)</b>      |                    |                    |                    |                     |
| Kapitalwiedergewinnungsfaktor Bautechnik              | 0,05102            |                    |                    |                     |
| Kapitalwiedergewinnungsfaktor Masch.-Technik          |                    | 0,08377            |                    |                     |
| Kapitalwiedergewinnungsfaktor EMSR-Technik            |                    |                    | 0,11723            |                     |
| <b>Kapitalkosten/a, netto</b>                         | <b>64.985,45 €</b> | <b>74.350,75 €</b> | <b>53.433,34 €</b> | <b>192.769,54 €</b> |
| <b>Wartung- und Instandhaltungskosten</b>             |                    |                    |                    |                     |
| 1,0 %/a der Baukosten                                 | 12.737,44 €        |                    |                    |                     |
| 4,0 %/a der Kosten für technische Installationen      |                    | 35.503,78 €        |                    |                     |
| 2,0 %/a der Kosten für EMSR-Technik                   |                    |                    | 9.115,94 €         |                     |
| <b>Summe Wartungs-/Instandhaltungskosten/a, netto</b> | <b>12.737,44 €</b> | <b>35.503,78 €</b> | <b>9.115,94 €</b>  | <b>57.357,16 €</b>  |

KA Emmerich

Projekt: Studie 4. Reinigungsstufe

Projekt-Nr.: 1217 001

Variante: Ozonung mit nachgeschal. Sandfilter (konti. gespült)

| Pos.-Nr | Text   | Menge  | Einheit  | Einheitspreis  | Bautechnik   | Masch.-Tech.   | Elektro.-Tech.      | Gesamtpreis           |
|---------|--|--|--|--|--|--|---------------------|-----------------------|
| 1       | <b>Baustelleneinrichtung</b><br>(10 % Bautechnik)<br>(5 % Maschinentechnik)  |  |  |  | 93.643,41 €  | 48.560,00 €  |                     | 142.203,41 €          |
| 2       | <b>Erdarbeiten</b><br>Grundwasserhaltung<br>Bodenaushub Becken<br>Bodenwiederanfüllung Becken<br>Bodenabfuhr Becken<br>Bodenaushub SF<br>Bodenwiederanfüllung SF<br>Bodenabfuhr SF   | 1,00<br>1.126,54<br>585,68<br>540,87<br>1.969,43<br>1.005,98<br>963,46       | psch<br>m³<br>m³<br>m³<br>m³<br>m³<br>m³   | 20.000,00 €<br>15,00 €<br>15,00 €<br>15,00 €<br>15,00 €<br>15,00 €<br>15,00 €                        | 20.000,00 €<br>16.898,12 €<br>8.785,15 €<br>8.112,98 €<br>29.541,50 €<br>15.089,66 €<br>14.451,84 €                    |  |                     | 53.796,25 €           |
| 3       | <b>Abtrennung Teilstrom</b><br>Schälblech, Rückschlagklappe, Schieber, Schächte  | 1,00   | psch   | 60.000,00 €  | 60.000,00 €  |  |                     | 60.000,00 €           |
| 4       | <b>Reaktionsbehälter</b><br>Behälter, gasdicht + Verteilschacht<br>Installation VA (RL) allgemein<br>Armaturen<br>Antriebe Armaturen<br>Bediensteg   | 337,00<br>1,00<br>1,00<br>1,00<br>1,00                                       | m³<br>psch<br>psch<br>psch<br>psch   | 600,00 €<br>15.000,00 €<br>26.000,00 €<br>15.000,00 €<br>8.000,00 €                                  | 202.200,00 €<br><br><br>8.000,00 €   | 15.000,00 €<br>26.000,00 €<br>15.000,00 €  |                     | 266.200,00 €          |
| 5       | <b>Ozonanlage</b><br>Anlage<br>Ozonерzeuger (2*4 kg/h)<br>Einsatzgasversorgung<br>Instrumentenluft u. N₂-Zudosierung<br>Wärmetauscher Kühlwasser<br>Eintragungssystem (32 Diffusoren)<br>Restozonvernichter<br>Raumluftüberwachung<br>Ozongasüberwachung im Ozongas<br>Ozonmessung Wasser<br>Anlagensteuerung<br>Ventile und Instrumente<br>Verrohrung und Montage<br>Über-/Unterdrucksicherung Kontaktbeh.<br>Pumpen mit Verroh. Kühlwasser | 1,00<br>2,00<br><br>2,00<br><br><br><br><br><br><br><br>1,00<br>2,00<br>1,00 | psch<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>psch<br>St<br>psch | 420.000,00 €<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>75.000,00 €<br>3.600,00 €<br>18.000,00 €     |  | 420.000,00 €<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>75.000,00 €<br>7.200,00 €<br>18.000,00 € |                     | 520.200,00 €          |
| 6       | <b>Aufstellung O2/O3-Anlage m. Halle</b><br>Einhausung Ozonanlage-NSV  | 105,00   | m³   | 370,00 €   | 38.850,00 €  |  |                     | 38.850,00 €           |
| 7       | <b>Sandfilter, kontinuierlich gespült</b><br>Becken SF I + II<br>Anbindung Ablauf KB I und II<br>Install. Sandfilter mit IBN<br>Ablaufgerinne Filter I und II  | 482,40<br>1,00<br>1,00<br>18,50  | m³<br>psch<br>psch<br>m  | 240,00 €<br>18.000,00 €<br>360.000,00 €<br>750,00 €  | 115.776,00 €<br>16.000,00 €<br>360.000,00 €<br>13.875,00 €   | 360.000,00 €   |                     | 505.651,00 €          |
| 8       | <b>Ablaufmessung</b><br>Schacht Abklaffungsmessung<br>Rohrtech. Inst<br>Einbindung in Bestand RL<br>Messtechnik  | 1,00<br>1,00<br>1,00<br>1,00   | psch<br>psch<br>psch<br>psch   | 40.000,00 €<br>20.000,00 €<br>10.000,00 €<br>10.000,00 €   | 40.000,00 €<br><br>10.000,00 €   | 20.000,00 €  | 10.000,00 €         | 80.000,00 €           |
| 9       | <b>Erdverlegte Rohrleitungen</b><br>Zulauf. PE 100 SDR 17 560*33,2<br>Rohrgraben PE 100 SDR 17 560*33,2<br>Formstücke<br>Ablauf. PE 100 SDR 17 560*33,2<br>Rohrgraben PE 100 SDR 17 560*33,2<br>Formstücke<br>Schlammwasserleitung TF PE 100 SDR 17 90*5,4<br>Rohrgraben PE 100 SDR 17 90*5,4<br>Formstücke  | 20,30<br>20,30<br>1,00<br>41,00<br>41,00<br>2,00<br>274,00<br>274,00<br>9,00 | m<br>m<br>psch<br>m<br>m<br>psch<br>m<br>m<br>psch   | 180,00 €<br>100,00 €<br>680,00 €<br>100,00 €<br>80,00 €<br>680,00 €<br>18,00 €<br>20,00 €<br>38,00 € | 3.654,00 €<br>2.030,00 €<br>680,00 €<br>4.100,00 €<br>3.280,00 €<br>1.360,00 €<br>4.932,00 €<br>5.480,00 €<br>342,00 € |  |                     | 15.104,00 €           |
| 10      | <b>Kabelschächte/Leerrohre</b>   | 1,00   | psch   | 15.000,00 €  | 15.000,00 €  |  |                     | 15.000,00 €           |
| 11      | <b>Hausinstallation/Entwässerung</b>   | 1,00   | psch   | 12.000,00 €  | 12.000,00 €  |  |                     | 12.000,00 €           |
| 12      | <b>Strassen-/Wegebau/Aussenanlagen</b>   | 1  | psch   | 20.000,00 €  | 20.000,00 €  |  |                     | 20.000,00 €           |
| 13      | <b>Inbetriebnahme/Dokumentation</b><br>Dokumentation<br>Dokumentation/Inbetriebnahme   | 1,00<br>1,00   | psch<br>psch   | 3.000,00 €<br>12.000,00 €  | 5.000,00 €   | 15.000,00 €  |                     | 20.000,00 €           |
| 14      | <b>EMSR-Technik</b><br>Pauschal (40 % der MT)  | 1,00   | psch   | 407.904,00 €   |  |  | 407.904,00 €        | 407.904,00 €          |
| 15      | <b>Umbau Probenahmestelle</b><br>Pauschal  | 1,00   | psch   | 150.000,00 €   | 150.000,00 €   |  |                     | 150.000,00 €          |
| 16      | <b>Zuschlag Hochwassermaßnahmen</b><br>Pauschal (10% der BT)   | 1,00   | psch   | 90.995,83 €  | 90.995,83 €  |  |                     | 90.995,83 €           |
|         | <b>Summe Herstellungskosten, netto</b>   |  |  |  | <b>1.030.077,49 €</b>  | <b>1.019.760,00 €</b>  | <b>417.904,00 €</b> | <b>2.467.741,49 €</b> |
|         | Nebenkosten (Ing.-Honoare, Prüfgebühr, usw.)   |  |  | 20%  | 206.015,50 €   | 203.952,00 €   | 83.580,80 €         | 493.548,30 €          |
|         | <b>Summe Baukosten, netto</b>  |  |  |  | <b>1.236.092,98 €</b>  | <b>1.223.712,00 €</b>  | <b>501.484,80 €</b> | <b>2.961.289,78 €</b> |
|         | Mehrwertsteuer   |  |  | 19%  |  |  |                     | 468.870,88 €          |
|         | <b>Summe Baukosten, brutto</b>   |  |  |  |  |  |                     | <b>3.430.160,67 €</b> |

|   |                    |                     |                    |                     |
|---|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| <b>Kapitalkosten</b>                                  |                    |                     |                    |                     |
| Nutzungsdauer Bautechnik in Jahren                    | 30                 |                     |                    |                     |
| Nutzungsdauer Masch.-Technik in Jahren                |                    | 15                  |                    |                     |
| Nutzungsdauer EMSR-Technik in Jahren                  |                    |                     | 10                 |                     |
| Zinssatz i  | 3%                 | 3%                  | 3%                 |                     |
| <b>Kapitalwiedergewinnungsfaktor KFAKR (i;n)</b>      |                    |                     |                    |                     |
| Kapitalwiedergewinnungsfaktor Bautechnik              | 0,05102            |                     |                    |                     |
| Kapitalwiedergewinnungsfaktor Masch.-Technik          |                    | 0,08377             |                    |                     |
| Kapitalwiedergewinnungsfaktor EMSR-Technik            |                    |                     | 0,11723            |                     |
| <b>Kapitalkosten/a, netto</b>                         | <b>63.064,55 €</b> | <b>102.506,17 €</b> | <b>58.789,32 €</b> | <b>224.360,04 €</b> |
| <b>Wartung- und Instandhaltungskosten</b>             |                    |                     |                    |                     |
| 1,0 %/a der Baukosten                                 | 12.360,93 €        |                     |                    |                     |
| 4,0 %/a der Kosten für technische Installationen      |                    | 48.948,48 €         |                    |                     |
| 2,0 %/a der Kosten für EMSR-Technik                   |                    |                     | 10.029,70 €        |                     |
| <b>Summe Wartungs-/Instandhaltungskosten/a, netto</b> | <b>12.360,93 €</b> | <b>48.948,48 €</b>  | <b>10.029,70 €</b> | <b>71.339,11 €</b>  |

## KA Emmerich

Projekt: Studie 4. Reinigungsstufe

Projekt-Nr.: 1217 001

Variante: Ozon mit nachgeschalteter BAK-Filtration

| Pos.-Nr | Text   | Menge   | Einheit   | Einheitspreis   | Bautechnik   | Masch.-Tech.   | Elektro.-Tech. | Gesamtpreis    |
|---------|--|---|---|---|--|--|----------------|----------------|
| 1       | <b>Baustelleneinrichtung</b><br>(10 % Bautechnik)<br>(5 % Maschinentechnik)  |   |   |   | 157.443,10 €   |  | 63.982,00 €    | 221.425,10 €   |
| 2       | <b>Erdarbeiten</b><br>Grundwasserhaltung<br>Bodenaushub Becken<br>Bodenwiederanfüllung Becken<br>Bodenabfuhr Becken  | 1,00<br>3.533,65<br>1.215,97<br>2.317,68  | psch<br>m²<br>m²<br>m²  | 20.000,00 €<br>15,00 €<br>15,00 €<br>15,00 €  | 20.000,00 €<br>53.004,78 €<br>18.239,58 €<br>34.765,20 €   |  |                | 126.009,56 €   |
| 3       | <b>Abtrennung Teilstrom</b><br>Schälblech, Rückschlagklappe, Schieber, Schächte  | 1,00  | psch  | 60.000,00 €   | 60.000,00 €  |  |                | 60.000,00 €    |
| 4       | <b>Filterbauwerk</b> mit Vorlage u Speicher<br>Bauwerk komplett mit Ozonreaktor<br>Filterboden mit Düsen   | 1,00<br>160,00  | psch<br>m²  | 900.000,00 €<br>900,00 €  | 900.000,00 €   |  | 144.000,00 €   | 1.044.000,00 € |
| 5       | <b>Filtermaterial (Erstbefüllung)</b><br>Aktivkohle<br>Stüttschicht  | 160,00<br>48,00   | Mg<br>m²  | 1.300,00 €<br>280,00 €  |  | 208.000,00 €<br>13.440,00 €                              |                | 221.440,00 €   |
| 6       | <b>Tech. Installation Kontaktbecken Ozon</b><br>Installation VA (RL) allgemein<br>Armaturen<br>Antriebe Armaturen  | 1,00<br>1,00<br>1,00  | psch<br>psch<br>psch  | 15.000,00 €<br>26.000,00 €<br>15.000,00 €   |  | 15.000,00 €<br>26.000,00 €<br>15.000,00 €                |                | 56.000,00 €    |
| 7       | <b>Pumpen</b><br>Spülwasserpumpe mit Verrohrung<br>Schlammwasserpumpe mit Verrohrung   | 2,00<br>1,00  | St<br>St  | 23.000,00 €<br>16.000,00 €  |  | 46.000,00 €<br>16.000,00 €                               |                | 62.000,00 €    |
| 8       | <b>Gebälse</b><br>Spülluftgebläse mit Verrohrung   | 1,00  | St  | 25.000,00 €   |  | 25.000,00 €  |                | 25.000,00 €    |
| 9       | <b>Rohrtech. Installation</b><br>Rohrleitung VA incl. Formstücke<br>Armaturen<br>Antriebe Armaturen  | 1,00<br>1,00<br>1,00  | psch<br>psch<br>psch  | 75.000,00 €<br>70.000,00 €<br>71.000,00 €   |  | 75.000,00 €<br>70.000,00 €<br>71.000,00 €                |                | 216.000,00 €   |
| 10      | <b>Ozonanlage</b><br>Anlage<br>Ozonzerzeuger (2*6 kg/h)<br>Einsatzgasversorgung<br>Instrumentenluft u. N₂-Zudosierung<br>Wärmetauscher Kühlwasser<br>Eintragssystem (32 Diffusoren)<br>Restozonvernichter<br>Raumlüftüberwachung<br>Ozongasüberwachung im Ozongas<br>Ozonmessung Wasser<br>Anlagensteuerung<br>Ventile und Instrumente<br>Verrohrung und Montage<br>Über-/Unterdrucksicherung Kontaktbeh.<br>Pumpen mit Verroh. Kühlwasser | 1,00<br>2,00<br>incl.<br>incl.<br>2,00<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>1,00<br>2,00<br>1,00 | psch<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>psch<br>St<br>psch | 420.000,00 €<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>incl.<br>75.000,00 €<br>3.600,00 €<br>18.000,00 € |  | 420.000,00 €<br>75.000,00 €<br>7.200,00 €<br>18.000,00 € |                | 520.200,00 €   |
| 11      | <b>Aufstellung O2/O3-Anlage m. Halle</b><br>Einhausung Ozonanlage-NSV<br>Fundament O2-Anlage   | 105,00<br>1,00  | m²<br>psch  | 370,00 €<br>8.000,00 €  | 38.850,00 €<br>8.000,00 €  |  |                | 46.850,00 €    |
| 12      | <b>Ablaufmessung</b><br>Schacht Abklaffungsmessung<br>Rohrtech. Inst<br>Einbindung in Bestand RL<br>Messtechnik  | 1,00<br>1,00<br>1,00<br>1,00  | psch<br>psch<br>psch<br>psch  | 40.000,00 €<br>20.000,00 €<br>10.000,00 €<br>10.000,00 €  | 40.000,00 €<br>10.000,00 €   | 20.000,00 €  | 10.000,00 €    | 80.000,00 €    |
| 13      | <b>Erdverlegte Rohrleitungen</b><br>Zulauf. PE 100 SDR 17 560*33,2<br>Rohrgraben PE 100 SDR 17 560*33,2<br>Formstücke<br>Ablauf. PE 100 SDR 17 560*33,2<br>Rohrgraben PE 100 SDR 17 560*33,2<br>Formstücke<br>Schlammwasserleitung TF PE 100 SDR 17 90*5,4<br>Rohrgraben PE 100 SDR 17 90*5,4<br>Formstücke  | 26,00<br>26,00<br>1,00<br>48,00<br>48,00<br>3,00<br>274,00<br>274,00<br>9,00  | m<br>m<br>psch<br>m<br>m<br>psch<br>m<br>m<br>psch  | 180,00 €<br>100,00 €<br>680,00 €<br>100,00 €<br>80,00 €<br>680,00 €<br>18,00 €<br>20,00 €<br>38,00 €                                      | 4.680,00 €<br>2.600,00 €<br>680,00 €<br>4.800,00 €<br>3.840,00 €<br>2.040,00 €<br>4.932,00 €<br>5.480,00 €<br>342,00 € |  |                | 29.394,00 €    |
| 14      | <b>Kabelschächte/Leerrohre</b>   | 1,00  | psch  | 15.000,00 €   | 15.000,00 €  |  |                | 15.000,00 €    |
| 15      | <b>Hausinstallation/Entwässerung</b>   | 1,00  | psch  | 12.000,00 €   | 12.000,00 €  |  |                | 12.000,00 €    |
| 16      | <b>Strassen-/Wegebau/Aussenanlagen</b>   | 1   | psch  | 30.000,00 €   | 30.000,00 €  |  |                | 30.000,00 €    |
| 17      | <b>Inbetriebnahme/Dokumentation</b><br>Dokumentation<br>Dokumentation/Inbetriebnahme   | 1,00<br>1,00  | psch<br>psch  | 5.000,00 €<br>15.000,00 €   | 5.000,00 €   |  | 15.000,00 €    | 20.000,00 €    |

|    |  |           |                       |                       |                     |                       |
|----|--|-----------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| 18 | <b>EMSR-Technik</b><br>Pauschal (50 % der MT)                | 1,00 psch | 671.811,00 €          |                       | 671.811,00 €        | 671.811,00 €          |
| 19 | <b>Umbau Probenahmestelle</b><br>Pauschal                    | 1,00 psch | 150.000,00 €          | 150.000,00 €          |                     | 150.000,00 €          |
| 20 | <b>Zuschlag Hochwassermaßnahmen</b><br>Pauschal (10% der BT) | 1,00 psch | 150.177,43 €          | 150.177,43 €          |                     | 150.177,43 €          |
|    | <b>Summe Herstellungskosten, netto</b>                       |           | <b>1.731.874,09 €</b> | <b>1.343.622,00 €</b> | <b>681.811,00 €</b> | <b>3.757.307,09 €</b> |
|    | Nebenkosten (Ing.-Honoare, Prüfgebühr, usw.)                 | 20%       | 346.374,82 €          | 268.724,40 €          | 136.362,20 €        | 751.461,42 €          |
|    | <b>Summe Baukosten, netto</b>                                |           | <b>2.078.248,91 €</b> | <b>1.612.346,40 €</b> | <b>818.173,20 €</b> | <b>4.508.768,51 €</b> |
|    | Mehrwertsteuer   | 19%       |                       |                       |                     | 856.666,02 €          |
|    | <b>Summe Baukosten, brutto</b>                               |           |                       |                       |                     | <b>5.365.434,53 €</b> |

|  |                     |                     |                    |  |  |                     |
|--|---------------------|---------------------|--------------------|--|--|---------------------|
| <b>Kapitalkosten</b>                             |                     |                     |                    |  |  |                     |
| Nutzungsdauer Bautechnik in Jahren               | 30                  |                     |                    |  |  |                     |
| Nutzungsdauer Masch.-Technik in Jahren           |                     | 15                  |                    |  |  |                     |
| Nutzungsdauer EMSR-Technik in Jahren             |                     |                     | 10                 |  |  |                     |
| Zinssatz i                                       | 3%                  | 3%                  | 3%                 |  |  |                     |
| <b>Kapitalwiedergewinnungsfaktor KFAKR (i;n)</b> |                     |                     |                    |  |  |                     |
| Kapitalwiedergewinnungsfaktor Bautechnik         | 0,05102             |                     |                    |  |  |                     |
| Kapitalwiedergewinnungsfaktor Masch.-Technik     |                     | 0,08377             |                    |  |  |                     |
| Kapitalwiedergewinnungsfaktor EMSR-Technik       |                     |                     | 0,11723            |  |  |                     |
| <b>Kapitalkosten/a, netto</b>                    | <b>106.030,72 €</b> | <b>135.060,74 €</b> | <b>95.914,86 €</b> |  |  | <b>337.006,32 €</b> |

|   |                    |                    |                    |  |  |                     |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--|--|---------------------|
| <b>Wartung- und Instandhaltungskosten</b>             |                    |                    |                    |  |  |                     |
| 1,0 %/a der Baukosten                                 | 20.782,49 €        |                    |                    |  |  |                     |
| 4,0 %/a der Kosten für technische Installationen      |                    | 64.493,86 €        |                    |  |  |                     |
| 2,0 %/a der Kosten für EMSR-Technik                   |                    |                    | 16.363,46 €        |  |  |                     |
| <b>Summe Wartungs-/Instandhaltungskosten/a, netto</b> | <b>20.782,49 €</b> | <b>64.493,86 €</b> | <b>16.363,46 €</b> |  |  | <b>101.639,81 €</b> |

## KA Emmerich

Projekt: Studie 4. Reinigungstufe  
Projekt-Nr.: 1217 001

### Zusammenstellung Investitionskosten

| Pos.-Nr | Text   | Variante 1<br>PAK m. Rücklaufk. | Variante 2<br>GAK-Filtration | Variante 3<br>Ozon mit Sandfilter | Variante 4<br>Ozon mit BAK |
|---------|--|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 1       | Bautechnik                                   | 1.531.171,78                    | 1.061.453,00                 | 1.030.077,49                      | 1.731.874,09               |
| 2       | Maschinentechnik                             | 1.107.073,53                    | 739.662,00                   | 1.019.760,00                      | 1.343.622,00               |
| 3       | EMSR-Technik                                 | 404.122,06                      | 379.831,00                   | 417.904,00                        | 681.811,00                 |
|         | <b>Summe Herstellungskosten, netto</b>       | <b>3.042.367,38</b>             | <b>2.180.946,00</b>          | <b>2.467.741,49</b>               | <b>3.757.307,09</b>        |
|         | Nebenkosten (Ing.-Honoare, Prüfgebühr, usw.) | 608.473,48                      | 436.189,20                   | 493.548,30                        | 751.461,42                 |
|         | <b>Summe Baukosten, netto</b>                | <b>3.650.840,85</b>             | <b>2.617.135,20</b>          | <b>2.961.289,78</b>               | <b>4.508.768,51</b>        |
|         | Mehrwertsteuer                               | 578.049,80                      | 414.379,74                   | 468.870,88                        | 856.666,02                 |
|         | <b>Summe Baukosten, brutto</b>               | <b>4.228.890,65</b>             | <b>3.031.514,94</b>          | <b>3.430.160,67</b>               | <b>5.365.434,53</b>        |
|         | <b>Anteil</b>                                | <b>139%</b>                     | <b>100%</b>                  | <b>113%</b>                       | <b>177%</b>                |

**Anlage 3:  
Betriebskosten  
Varianten 1 bis 4**

KA Emmerich

Projekt: Studie 4. Reinigungsstufe  
 Projekt-Nr.: 1217 001  
 Laufende Kosten Varianten

| Pos.       | Bezeichnung                                   |             | Variante 1<br>PAK mit<br>Rücklaufkohle | Variante 2<br>GAK | Variante 3<br>Ozonung +<br>Sandfilter | Variante 4<br>Ozonung +<br>BAK |
|------------|---|-------------|--|-------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <b>A</b>   | <b>Kapitalgebundene Kosten</b>                | EUR/a       | <b>261.876,54</b>                      | <b>192.769,54</b> | <b>224.360,04</b>                     | <b>337.006,32</b>              |
| <b>B</b>   | <b>Betriebsgebundene Kosten</b>               | EUR/a       | <b>107.212,52</b>                      | <b>81.357,16</b>  | <b>95.339,11</b>                      | <b>127.639,81</b>              |
| <b>1.0</b> | <b>Personalkosten</b>                         | EUR/a       | <b>26.000,00</b>                       | <b>24.000,00</b>  | <b>24.000,00</b>                      | <b>26.000,00</b>               |
|            | Menge   | MA/a        | 0,65                                   | 0,60              | 0,60                                  | 0,65                           |
|            | spez. Preis                                   | EUR/MA      | 40.000,00                              | 40.000,00         | 40.000,00                             | 40.000,00                      |
|            |   |             | 26.000,00                              | 24.000,00         | 24.000,00                             | 26.000,00                      |
| <b>2.0</b> | <b>Wartungs- und Instandhaltungskosten</b>    | EUR/a       | <b>81.212,52</b>                       | <b>57.357,16</b>  | <b>71.339,11</b>                      | <b>101.639,81</b>              |
| <b>C</b>   | <b>Verbrauchsgebundene Kosten</b>             | EUR/a       | <b>117.584,55</b>                      | <b>290.234,88</b> | <b>126.979,80</b>                     | <b>128.407,25</b>              |
| <b>1.0</b> | <b>Energiekosten</b>                          | EUR/a       | <b>17.463,21</b>                       | <b>5.674,89</b>   | <b>55.349,98</b>                      | <b>41.075,25</b>               |
|            | Menge   | kWh/a       | 124737,24                              | 40534,90          | 395356,97                             | 293394,65                      |
|            | spez. Preis                                   | EUR/kWh     | 0,14                                   | 0,14              | 0,14                                  | 0,14                           |
|            |   |             | 17.463,21                              | 5.674,89          | 55.349,98                             | 41.075,25                      |
| <b>2.0</b> | <b>Chemikalienkosten</b>                      | EUR/a       | <b>68.075,51</b>                       | <b>284.559,99</b> | <b>71.629,83</b>                      | <b>87.331,99</b>               |
| 2.1        | PAK/GAK                                       | Menge       | Mg/a                                   | 43,78             | 218,89                                | 19,95                          |
|            |   | spez. Preis | EUR/Mg                                 | 1.500             | 1.300                                 | 1.300                          |
|            |   |             |  | 65.667,69         | 284.559,99                            | 25.935,00                      |
| 2.2        | Fäll-/Flockungsmittel                         | Menge       | Mg/a                                   | 126,89            |                                       |                                |
|            |   | spez. Preis | EUR/Mg                                 | 127               |                                       |                                |
|            |   |             |  | kein Bedarf       |                                       |                                |
| 2.3        | Flockungshilfsmittel                          | Menge       | Mg/a                                   | 0,88              |                                       |                                |
|            |   | spez. Preis | EUR/Mg                                 | 2.750             |                                       |                                |
|            |   |             |  | 2.407,82          |                                       |                                |
| 2.4        | Sauerstoff (flüssig)<br>inkl. Tankmiete       | Menge       | kg/a                                   |                   | 286.519,31                            | 245.587,98                     |
|            |   | spez. Preis | EUR/kg                                 |                   | 0,25                                  | 0,25                           |
|            |   |             |  |                   | 71.629,83                             | 61.396,99                      |
| <b>3.0</b> | <b>Schlammverbrennungs-/Entsorgungskosten</b> |             | <b>32.045,83</b>                       | <b>0,00</b>       | <b>0,00</b>                           | <b>0,00</b>                    |
| 3.1        | zusätzlicher Schlamm d. PAK                   | Menge       | Mg/a                                   | 131,34            |                                       |                                |
|            | Entsorgungskosten (Verbrennung)               | spez. Preis | EUR/Mg                                 | 41,0              |                                       |                                |
|            | Entwässerungsergebnis                         |             |  | 25%               |                                       |                                |
|            | Entwässerungskosten                           | spez. Preis | EUR/Mg                                 | 80,00             |                                       |                                |
|            |   |             |  | 32.045,83         | 0,00                                  | 0,00                           |
|            | <i>Annahmen:</i><br>1 kg PAK = 3 kg TS        |             |  |                   |                                       |                                |
|            | <b>Summe A: Kapitalgebundene Kosten</b>       | EUR/a       | <b>261.876,54</b>                      | <b>192.769,54</b> | <b>224.360,04</b>                     | <b>337.006,32</b>              |
|            | <b>Summe B: Betriebsgebundene Kosten</b>      | EUR/a       | <b>107.212,52</b>                      | <b>81.357,16</b>  | <b>95.339,11</b>                      | <b>127.639,81</b>              |
|            | <b>Summe C: Verbrauchsgebundene Kosten</b>    | EUR/a       | <b>117.584,55</b>                      | <b>290.234,88</b> | <b>126.979,80</b>                     | <b>128.407,25</b>              |
|            | <b>Gesamtsumme Jahreskosten, netto</b>        | EUR/a       | <b>486.673,61</b>                      | <b>564.361,57</b> | <b>446.678,94</b>                     | <b>593.053,38</b>              |
|            | Mehrwertsteuer                                | 19%         | 92.467,99                              | 107.228,70        | 84.869,00                             | 112.680,14                     |
|            | <b>Summe Jahreskosten, brutto</b>             |             | <b>579.141,60</b>                      | <b>671.590,27</b> | <b>531.547,94</b>                     | <b>705.733,52</b>              |

**KA Emmerich****Projekt: Studie 4. Reinigungstufe****Projekt-Nr.: 1217 001****Zusammenstellung Betriebskosten**

|   | <b>Text</b>                         | <b>Variante 1</b><br>PAK m. Rücklaufk. | <b>Variante 2</b><br>GAK-Filtration | <b>Variante 3</b><br>Ozonung + SF | <b>Variante 4</b><br>Ozonung + BAK |
|---|-------------------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| B | Betriebsgebundene Kosten            | 107.212,52                             | 81.357,16                           | 95.339,11                         | 127.639,81                         |
| C | Verbrauchsgebundene Kosten          | 117.584,55                             | 290.234,88                          | 126.979,80                        | 128.407,25                         |
|   | <b>Summe Betriebskosten, netto</b>  | <b>224.797,07</b>                      | <b>371.592,03</b>                   | <b>222.318,91</b>                 | <b>256.047,05</b>                  |
|   | Mehrwertsteuer: 19%                 | 42.711,44                              | 70.602,49                           | 42.240,59                         | 48.648,94                          |
|   | <b>Summe Betriebskosten, brutto</b> | <b>267.508,52</b>                      | <b>442.194,52</b>                   | <b>264.559,50</b>                 | <b>304.696,00</b>                  |
|   | <b>Anteil</b>                       | <b>101%</b>                            | <b>167%</b>                         | <b>100%</b>                       | <b>115%</b>                        |

## **Anlage 4: Jahreskosten**

KA Emmerich

Projekt: Studie 4. Reinigungstufe

Projekt-Nr.: 1217 001

## Zusammenstellung Jahreskosten

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