

# Kläranlage Frechen



## Studie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Frechen

1. Ausfertigung  
Juni 2019

### **PFI Planungsgemeinschaft GmbH & Co. KG**

Dr.-Ing. Richard Rohlfing  
Prof. Dr.-Ing. Johannes Müller-Schaper  
Dr.-Ing. Christian Wolffson

Konrad-Zuse-Str. 6  
44801 Bochum

Tel.: 0234 / 9 20 03 -0  
Fax: 0234 / 9 20 03 -45

info@pfi.de  
www.pfi.de

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1.</b>	<b>Veranlassung und Auftrag</b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Grundlagenermittlung</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Kläranlage</b> .....	<b>3</b>
2.1.1	Verfahrenstechnik auf der Kläranlage Frechen .....	3
2.1.2	Wassermengen .....	6
2.1.3	Kläranlagenbelastung .....	8
2.1.4	Ablaufwerte .....	10
2.1.5	Überwachungswerte .....	13
2.1.6	Spurenstoffbelastung Ablauf Kläranlage .....	13
<b>2.2</b>	<b>Vorfluter</b> .....	<b>19</b>
2.2.1	Allgemeine Gewässeruntersuchung .....	20
2.2.2	Spurenstoffbelastung .....	23
2.2.2.1	Spurenstoffbelastung im Frechener Bach oberhalb und unterhalb der KA .....	23
2.2.2.2	Spurenstoffbelastung im Südlichen Randkanal oberhalb und unterhalb der Mündungsstelle des Frechener Bachs .....	27
<b>2.3</b>	<b>Metalle im Ablauf der Kläranlage Frechen und im Gewässer</b> .....	<b>30</b>
2.3.1	Metalle im Ablauf der Kläranlage Frechen .....	30
2.3.2	Metalle im Gewässer .....	31
<b>3.</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>34</b>
<b>3.1</b>	<b>Einsatz von Pulveraktivkohle (PAK)</b> .....	<b>34</b>
3.1.1	Allgemeine Beschreibung .....	34
3.1.2	Vor- und Nachteile .....	38
3.1.3	Realisierte Anlage im In- und Ausland .....	39
<b>3.2</b>	<b>Einsatz von granulierter Aktivkohle (GAK)</b> .....	<b>40</b>
3.2.1	Allgemeine Beschreibung .....	40
3.2.2	Vor- und Nachteile .....	42

3.2.3	Realisierte Anlagen im In- und Ausland .....	43
<b>3.3</b>	<b>Einsatz von Ozon.....</b>	<b>45</b>
3.3.1	Allgemeine Beschreibung .....	45
3.3.2	Vor- und Nachteile .....	48
3.3.3	Realisierte Anlagen im In- und Ausland .....	49
<b>3.4</b>	<b>Sonstige Verfahrensvarianten .....</b>	<b>51</b>
3.4.1	Dichte Membranen.....	51
3.4.2	Advanced Oxidation Processes (AOP).....	51
3.4.3	Weitere Verfahren.....	52
<b>4.</b>	<b>Planungs- und Bemessungsgrundlagen .....</b>	<b>54</b>
4.1	Örtliche Gegebenheiten .....	54
4.2	Förderprogramm .....	56
4.3	Wesentliche Stoffeigenschaften.....	56
4.4	Auslegungswassermengen .....	58
<b>5.</b>	<b>Variantenuntersuchung für die Kläranlage Frechen .....</b>	<b>60</b>
5.1	<b>Variante 1: Pulveraktivkohledosierung (PAK) in Kontaktbecken und Nachbehandlung mit einer Tuchfiltration .....</b>	<b>62</b>
5.1.1	Dimensionierung Teilstrombehandlung .....	63
5.1.2	Dimensionierung Vollstrombehandlung.....	64
5.1.3	Kostenaufstellung .....	65
5.2	<b>Variante 2: Filtration mit granulierter Aktivkohle (GAK) .....</b>	<b>68</b>
5.2.1	Dimensionierung Teilstrombehandlung .....	70
5.2.2	Dimensionierung Vollstrombehandlung.....	71
5.2.3	Kostenaufstellung .....	72
5.3	<b>Variante 3: Ozondosierung und Nachbehandlung mit einer kontinuierlichen beschickten Sandfiltration .....</b>	<b>75</b>

5.3.1	Dimensionierung Teilstrombehandlung .....	76
5.3.2	Dimensionierung Vollstrombehandlung .....	79
5.3.3	Kostenaufstellung .....	80
<b>6.</b>	<b>Variantenvergleich .....</b>	<b>83</b>
<b>6.1</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsvergleich .....</b>	<b>83</b>
6.1.1	Teilstrombehandlung .....	84
6.1.2	Vollstrombehandlung .....	86
<b>6.2</b>	<b>Sensitivitätsanalysen .....</b>	<b>88</b>
6.2.1	Teilstrombehandlung .....	89
6.2.1.1	Betriebsmittelverbrauch.....	89
6.2.1.2	Betriebsmittelpreise.....	90
6.2.1.3	Strompreis.....	91
6.2.2	Vollstrombehandlung .....	92
6.2.2.1	Betriebsmittelverbrauch.....	92
6.2.2.2	Betriebsmittelpreise.....	93
6.2.2.3	Strompreis.....	94
6.2.3	Zusammenfassung Sensitivitätsanalysen .....	95
<b>6.3</b>	<b>Variantenbewertung .....</b>	<b>97</b>
6.3.1	Teilstrombehandlung .....	98
6.3.2	Vollstrombehandlung .....	99
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>100</b>
<b>8.</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>104</b>

**ANHANG**

**Anhang 1      Bewertungsmatrix**

**Anhang 2      Herstellkosten**

## 1. Veranlassung und Auftrag

Der Erftverband betreibt die Kläranlage (KA) Frechen, welche für die mechanisch-biologische Abwasserreinigung von 56.100 EW ausgelegt ist. Die Stickstoffelimination auf der KA Frechen erfolgt mittels vorgeschalteter Denitrifikation. Das gereinigte Abwasser wird in den Frechener Bach eingeleitet.

Seit einigen Jahren werden die Auswirkungen von Mikroschadstoffen, wie beispielsweise Arzneimittelrückständen, in den Gewässern intensiv untersucht. Bei diesen Mikroverunreinigungen, die auch Spurenstoffe genannt werden, handelt es sich um Stoffe, die in sehr geringen Konzentrationen im Bereich von wenigen µg/l bis zu ng/l in den Gewässern vorliegen. Da Kläranlagen einen Haupteintragspfad für eine Reihe von Spurenstoffen darstellen können, rückt eine weitergehende Abwasserbehandlung immer stärker in den Fokus der Öffentlichkeit. Von staatlicher Seite resultiert dies z.B. in Nordrhein-Westfalen in einer ausdrücklichen Empfehlung zum Ausbau kommunaler Kläranlagen zur Spurenstoffelimination. Eine gesetzliche Grundlage, die die Betreiber von Kläranlagen zu Errichtung und Betrieb einer Spurenstoffelimination verpflichtet, liegt bislang jedoch nicht vor.

Um eine mögliche Umsetzung, die Auswirkungen und Kosten einer Spurenstoffelimination auf der KA Frechen einschätzen zu können, wurde die PFI Planungsgemeinschaft vom Erftverband mit Schreiben vom 08. August 2018 mit der Erstellung einer Studie zur Spurenstoffelimination auf der KA Frechen beauftragt. In der Studie sollen geeignete Verfahrenskonzepte zur weitergehenden Behandlung des kommunalen Abwassers entwickelt, einander gegenübergestellt und schließlich eine Vorzugslösung herausgearbeitet werden. Dazu werden Varianten zur Aktivkohle- und Ozonbehandlungen untersucht und hinsichtlich einer Reihe von Bewertungskriterien miteinander verglichen. Neben rein monetären Gesichtspunkten werden dabei auch qualitative Aspekte mit in die Bewertung einbezogen. Die derzeitige Situation der Kläranlage sowie die baulichen Gegebenheiten vor Ort werden bei der Entwicklung der Verfahrensvarianten und deren Beurteilung zusätzlich berücksichtigt.

Weiterhin werden die Spurenstoffbelastungen im Ablauf der KA Frechen, in dem Frechener Bach als aufnehmendem Vorfluter und im Südlichen Randkanal analysiert und beurteilt.

Zur Schaffung einer einheitlichen Wissensbasis wird im Rahmen der vorliegenden Studie der derzeitige Stand des Wissens zusammengefasst. Dabei wird vor allem auf die unterschiedlichen Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination und die wesentlichen Stoffeigenschaften der Mikroverunreinigungen eingegangen.

Die Studie zur Spurenstoffelimination auf der KA Frechen wird hiermit vorgelegt.

## 2. Grundlagenermittlung

### 2.1 Kläranlage

#### 2.1.1 Verfahrenstechnik auf der Kläranlage Frechen

Das aus den Stauraumkanälen Frechen Nord und Frechen Bachem / Mitte sowie aus dem Pumpwerk Bonnstraße stammende Abwasser wird auf der vom Erftverband betriebenen KA Frechen behandelt. Bei der KA Frechen handelt es sich um eine KA der Größenklasse 4 mit einer Ausbaugröße von 56.100 EW. Die Reinigung des Abwassers auf der KA Frechen erfolgt mechanisch, biologisch sowie chemisch.

Die mechanische Reinigungsstufe besteht aus einem Feinrechen, einem belüfteten Sand- und Fettfang und einer rechteckigen zweistraßigen Vorklärung. Im Havariefall stehen ein Notrechen und ein Havarie-Becken zur Verfügung. Außerdem kann, bei großen zufließenden Abwassermengen, der Abwasserstrom mittels Drosseleinrichtungen im Kanal auf die maximale hydraulisch zulässige Mischwassermenge eingestaut werden. Das eingestaute Abwasser wird in den Stauraumkanälen und in einem Regenüberlaufbecken (RÜB) zwischengespeichert. Bei Völlfüllung des RÜB fließt das Abwasser über die Überfallschwellen in ein Regenrückhaltebecken (RRB) und schließlich in den Frechener Bach. Das RÜB und das RRB liegen auf dem Betriebsgelände der Kläranlage Frechen. Die Entleerung des Havarie-Beckes erfolgt über das Pumpwerk Bonnstraße.

Das Rechengut aus der Rechenanlage wird mittels einer Rechengutwaschpresse gewaschen und in Rechengutcontainer bis zur Entsorgung zwischengespeichert. Das Sand-Wasser-Gemisch aus dem Sandfang wird mit einer Pumpe zum Sandklassierer und zur Sandwaschanlage gepumpt. Die anfallende Fette, Öle und leichten Schwimmstoffe werden in einen Fettschacht gesammelt und mit einer Pumpe zur Schlammbehandlung gefördert. Der Primärschlamm aus der Vorklärung wird der maschinellen Voreindickung und schließlich der Faulung zugeführt. Im Bereich der Rechenanlage befindet sich außerdem eine gesonderte Fäkal-schlammannahmestation.

Nach der mechanischen Reinigungsstufe fließt das Abwasser durch einen Verteilerschacht in die biologische Reinigungsstufe. Diese besteht aus zwei vorgeschal-



teten Denitrifikationsbecken (mit vier Kammern pro Becken), einem Zwischenhebewerk, zwei DN-/ N-Becken (mit fünf Kammern pro Becken) und zwei Nachklärbecken. Die vorgeschalteten Denitrifikationsbecken sind mit Rührwerken ausgerüstet und können als Bio-P-Becken zur biologischen Phosphorelimination betrieben werden. Beim Betrieb der Becken als vorgeschaltete Denitrifikationsbecken erfolgt eine chemische Phosphorelimination. Hierfür werden Eisen- oder Aluminiumsalze für die Phosphorfällung eingesetzt.

Aufgrund des Höhenunterschieds zwischen den Denitrifikationsbecken und den DN-/ N-Becken ist ein Zwischenhebewerk angeordnet. Das Abwasser aus dem Zwischenhebewerk wird über zwei vollkommene, scharfkantige Überfälle auf die beiden DN / N-Beckenstraßen aufgeteilt. Für die Belüftung der Kammern der jeweiligen Beckenstraßen werden vier Gebläse betrieben. Alle Kammern sind dafür mit einem flächendeckenden Druckbelüftungssystem ausgestattet. Die ersten beiden Kammern sind außerdem mit Rührwerken ausgerüstet und können somit nach Bedarf zur Denitrifikation betrieben werden. Die restlichen Kammern (Schlängelbecken) werden für die Nitrifikation kontinuierlich belüftet. Aus den Belebungsbecken fließt das Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch in einen gemeinsamen Ablaufschacht und von dort zum Verteilerbauwerk in die Nachklärbecken. Das gereinigte Abwasser aus den Nachklärbecken fließt zum Schluss dem Frechener Bach zu.

Ein Teil des nitrathaltigen Abwasser-Belebtschlamm-Gemischs aus dem Ablaufschacht der Belebungsbecken wird mittels interner Rezirkulation in den Denitrifikationsbereich gepumpt. Bei Betrieb der ersten beiden Becken der biologischen Reinigungsstufe als Denitrifikationsbecken, wird das Rezirkulationswasser über die Mittelbauwerke der Becken und den entsprechende Stellung der Absenklappen in die Kammern verteilt. Werden die zwei ersten Becken als Bio-P-Becken betrieben, wird das Rezirkulationswasser dem Zwischenhebewerk zugeführt.

Der Schlamm, der sich in den Nachklärbecken abgesetzt hat, gelangt zum größten Teil als Rücklaufschlamm im Verteilerschacht der biologischen Reinigungsstufe. Der Restliche Schlamm wird als Überschussschlamm abgezogen, welcher der maschinellen Voreindickung und schließlich der Faulung zugeführt wird.

Für die Schlammstabilisierung stehen zwei Faulbehälter zur Verfügung. Dort werden die voreingedickte Primär- und Überschussschlamm anaerob stabilisiert und dabei Faulgas produziert. Dieses wird in einem Gasspeicher zwischengespei-

chert und anschließend über einen BHKW-Modul verwertet. Überschüssiges Gas wird bei Bedarf über eine Gasfackel abgefackelt.

Der ausgefaulte Schlamm aus der Schlammstabilisierung wird vor der Schlammmentwässerung in zwei Nacheindicker eingedickt. Die Schlammmentwässerung erfolgt maschinell mittels einer Zentrifuge. Der entwässerte Schlamm wird zu 100 % thermisch entsorgt bzw. verwertet.

Das Trübwasser aus den Vor- und Nacheindickern sowie das hoch belastete Zentratwasser aus der maschinellen Schlammmentwässerung werden in einem Prozesswasserspeicher zwischengespeichert. Das wird zum Schluss im Zulauf der Vorklärung dosiert zugegeben.

In folgender Abbildung ist das Betriebsgelände der KA Frechen dargestellt.



**Abbildung 1: Luftbild des Betriebsgeländes der KA Frechen**

In Tabelle 1 sind die verschiedenen Bauwerke der KA Frechen mit den dazugehörigen Volumina aufgelistet:

**Tabelle 1: Bauwerke der KA Frechen mit den dazugehörigen Volumen**

<b>Bauwerk</b>	<b>Vol<sub>ges</sub></b>
Regenrückhaltebecken (RRB)	ca. 50.000 m <sup>3</sup>
Regenüberlaufbecken (RÜB)	2.400 m <sup>3</sup>
Havarie-Becken	ca. 2.700 m <sup>3</sup>
Fäkalspeicher	50 m <sup>3</sup>
Sand und Fettfang	200 m <sup>3</sup>
Vorklärung	1.090 m <sup>3</sup>
DN- bzw. Bio-P-Becken (alte BB I)	1.784 m <sup>3</sup>
DN- bzw. Bio-P-Becken (alte BB II)	2.000 m <sup>3</sup>
Blebungsbecken III	4.554 m <sup>3</sup>
Blebungsbecken IV	4.554 m <sup>3</sup>
Nachklärbecken	ca. 3.319 m <sup>3</sup>
Voreindicker	ca. 200 m <sup>3</sup>
Nacheindicker I	310 m <sup>3</sup>
Nacheindicker II	395 m <sup>3</sup>
Prozesswasserspeicher	192 m <sup>3</sup>
Faulbehälter I	1.000 m <sup>3</sup>
Faulbehälter II	1.000 m <sup>3</sup>
Gasspeicher	ca. 500 m <sup>3</sup>

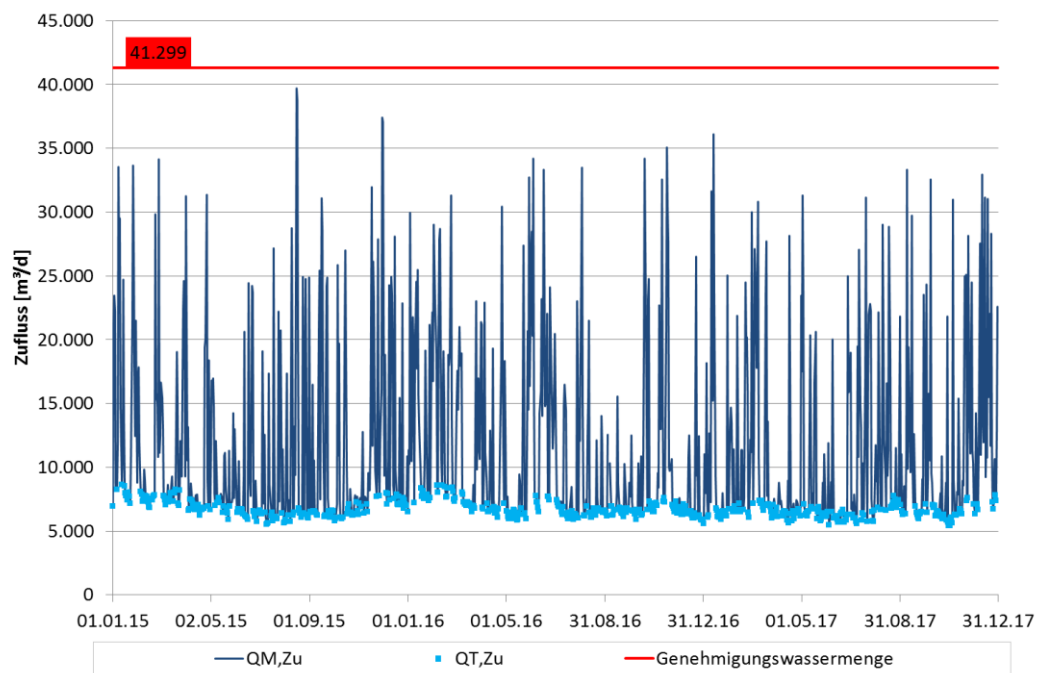
### 2.1.2 Wassermengen

Die Abwassermenge gelangt zur Kläranlage über das Kanalnetz Frechen Bachern / Mitte, das Kanalnetz Frechen Nord und über eine Druckleitung vom Pumpwerk Bonnstraße. Im Regenwetterfall werden die darüber hinausgehenden Abwassermengen in dem RÜB bzw. RRB zwischengespeichert. Laut aktueller Genehmigung darf die Kläranlage Frechen max. 478 l/s (1.721 m<sup>3</sup>/h bzw. 41.299 m<sup>3</sup>/d) biologisch gereinigtes Abwasser sowie max. 4.025 l/s mechanisch gereinigtem Mischwasser aus dem RÜB/RRB einleiten.

Die erfassten Abwassermengen im Zulauf der KA Frechem im Zeitraum 2015 bis 2017 sind in Tabelle zusammengefasst und in Abbildung dargestellt. Die Wassermengen, die der Kläranlage Frechen täglich zur Behandlung zufließen, schwanken aufgrund der angeschlossenen Mischkanalisationen stark (siehe Abbildung 2).

**Tabelle 2: Abwassermengen im Zulauf zur KA im Zeitraum 2015 – 2017**

Mittlerer jährlicher Zufluss	$Q_a$	4.095.052 m <sup>3</sup> /a
Mittlerer täglicher Zufluss	$Q_{d,mittel}$	11.230 m <sup>3</sup> /d
Maximaler täglicher Zufluss	$Q_{d,max}$	39.720 m <sup>3</sup> /d
85% Perzentil täglicher Zufluss	$Q_{d,85\%}$	19.315 m <sup>3</sup> /d
Mittlerer Trockenwetterzufluss	$Q_T$	6.684 m <sup>3</sup> /d
Genehmigungswassermenge	$Q$	41.299 m <sup>3</sup> /d



**Abbildung 2: Misch- und Trockenwetterzufluss Kläranlage Frechen (2015-2017)**

In Tabelle 3 sind die Jahresabwasser- (JAM) und die ermittelte Jahresschmutzwassermengen (JSM) für den Untersuchungszeitraum aufgelistet. Bei der JAM ist zu sehen, dass die Abwassermenge jährlich keine großen Schwankungen aufweist.

**Tabelle 3: Jahresabwasser- und Jahresschmutzwassermengen 2015 – 2017**

Jahr	JAM	Q <sub>TW</sub>	Anzahl TW-Tagen	Mittlerer Q <sub>TW</sub>	JSM
	m <sup>3</sup> /a	m <sup>3</sup> /a	d/a	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /a
<b>2015</b>	4.160.032	1.210.255	177	6.838	2.495.724
<b>2016</b>	4.115.128	1.312.446	194	6.765	2.469.293
<b>2017</b>	4.009.995	1.166.862	181	6.447	2.353.064

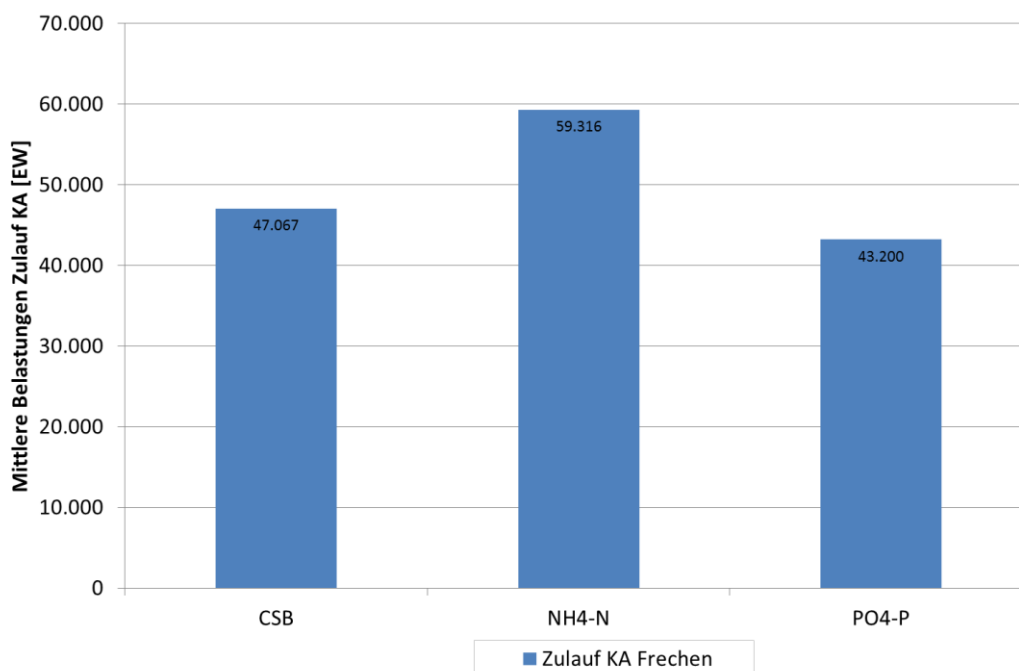
### 2.1.3 Kläranlagenbelastung

Die Kläranlage Frechen hat eine Ausbaugröße von 56.100 EW, wobei die Anzahl der angeschlossenen Einwohner rd. 36.928 E beträgt.

Die für die Studie vorliegende CSB-, NH<sub>4</sub>-N- und P<sub>ges</sub>-Messwerte wurden ausgewertet. Unter Berücksichtigung der in der Literatur üblichen angegebenen spezifischen Kennwerte wurden die einwohnerspezifischen Frachten ermittelt (siehe Tabelle 4 und Abbildung 3). Demnach ergaben sich auf der Kläranlage Frechen im Betrachtungszeitraum eine CSB-Belastung von rd. 47.100 EW, eine NH<sub>4</sub>-N-Belastung von rd. 59.300 EW und eine P<sub>ges</sub>-Belastung von rd. 43.200 EW.

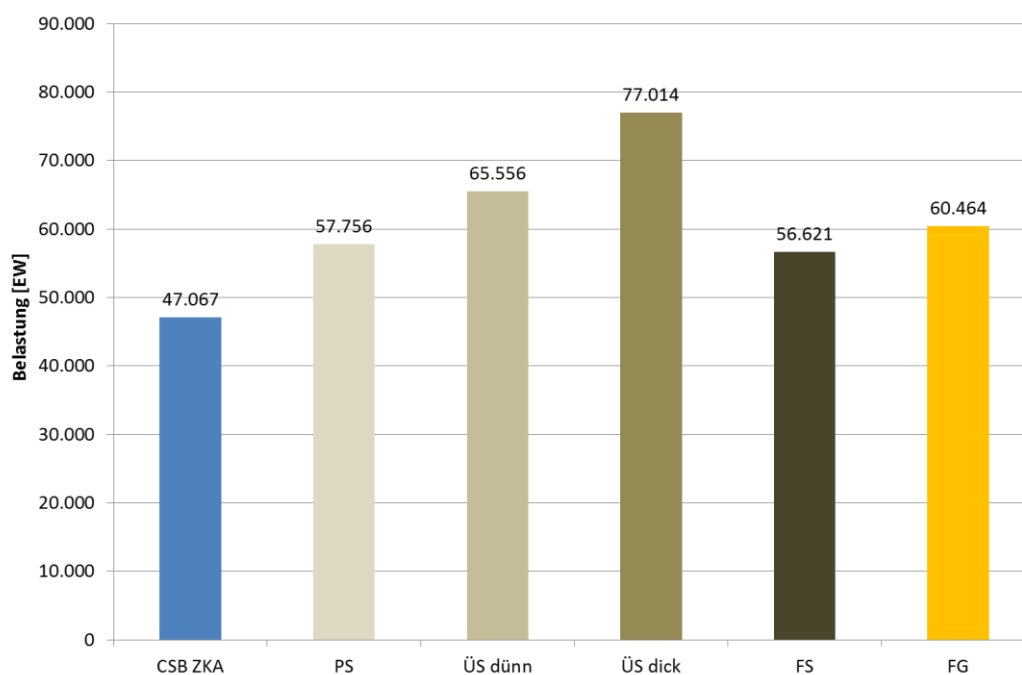
**Tabelle 4: Spezifische Kennwerte zur Belastungsermittlung [g/(EW\*d)]**

		CSB	NH <sub>4</sub> -N	P <sub>ges</sub>
<b>Mittlere Fracht Zulauf KA (2015-2017)</b>	<b>kg/d</b>	5.648	415	78
<b>Einwohnerspezifische Frachten</b>	<b>g/(EW*d)</b>	120	7	2
<b>EW-Belastung Zulauf KA (2015-2017)</b>	<b>EW</b>	47.067	59.316	43.200



**Abbildung 3: Mittlere Belastungen im Zulauf der Kläranlage Frechen (2015-2017)**

Um die Zulaufbelastungen auf Plausibilität zu prüfen, wurde aus den Betriebsdaten die Schlammbelastung der KA Frechen ermittelt. Dafür wurden die ermittelten mittleren Frachten mit einem spezifischen Kennwert multipliziert. Der spezifische Kennwert beträgt für den Primärschlamm 40 g/EW\*d, für den Überschussschlamm 30 g/EW\*d und für den Faulschlamm 44 g/EW\*d. In Abbildung 4 sind die berechneten mittleren Schlammbelastungen im Vergleich zu der mittleren CSB-Belastung im Zulauf der Kläranlage im Untersuchungszeitraum graphisch dargestellt.



**Abbildung 4: Schlamm Bilanz der Kläranlage Frechen (2015-2017)**

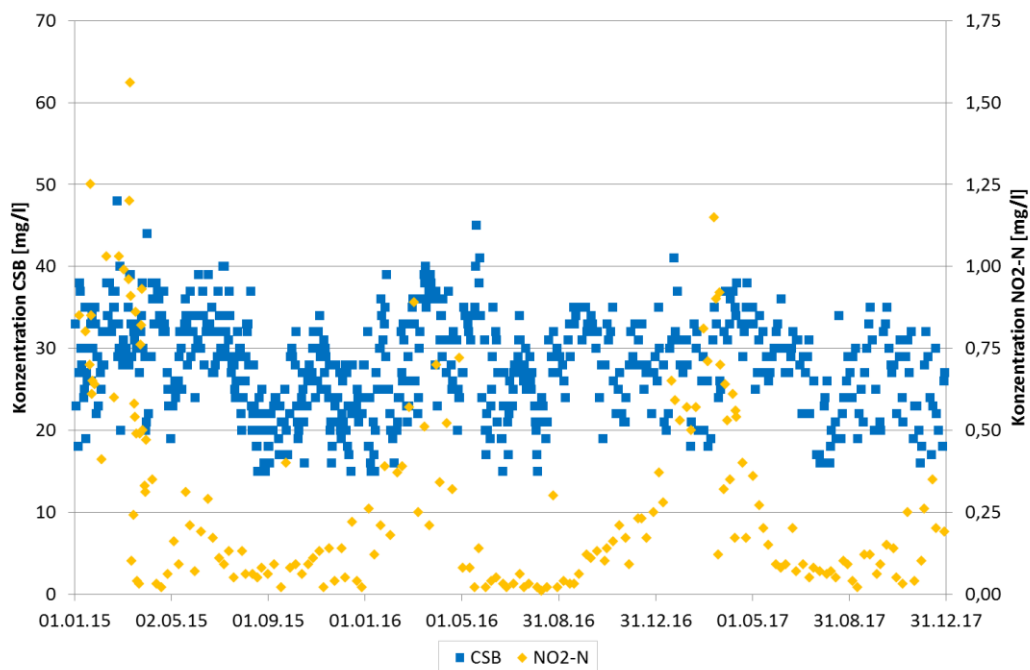
Zunächst ist auffällig, dass die Überschussschlamm im Zulauf zum Faulbehälter (ÜS-dick) deutlich höher als die anderen Belastungen liegt. Der Überschussschlamm aus der Belebungsstufe (ÜS-dünn) sollte in der Größenordnung gleich dem Überschussschlamm zum Faulbehälter (ÜS-dick) sein. Dies ist jedoch nicht der Fall. Das kann allerdings an einer ungenauen Messung des TS-Wertes im Überschussschlamm zum Faulbehälter (ÜS-dick) liegen, was nicht ungewöhnlich ist. Ansonsten liegen die Primärschlamm-, Faulschlamm- sowie Faulgasbelastung in einem plausiblen Bereich von 57.000 – 61.000 EW.

Als Grundlage für die Ermittlung der einwohnerspezifischen Kosten wird die mittlere CSB-Belastung im Zulauf zur Kläranlage auf **50.000 EW** aufgerundet und als maßgebende Kläranlagenbelastung angenommen. Dadurch finden die Stickstoff- und Schlammbelastungen, welche höher als die CSB-Belastung liegen, auch Berücksichtigung.

#### 2.1.4 Ablaufwerte

Für die Bewertung der Umsetzbarkeit einer weitergehenden Spurenstoffelimination ist die Abwasserbeschaffenheit in dessen Zulauf relevant, also in diesem Fall der Ablauf der Nachklärung. Von besonderer Bedeutung sind dabei die CSB- und die Nitrit-Konzentrationen (NO<sub>2</sub>-N).

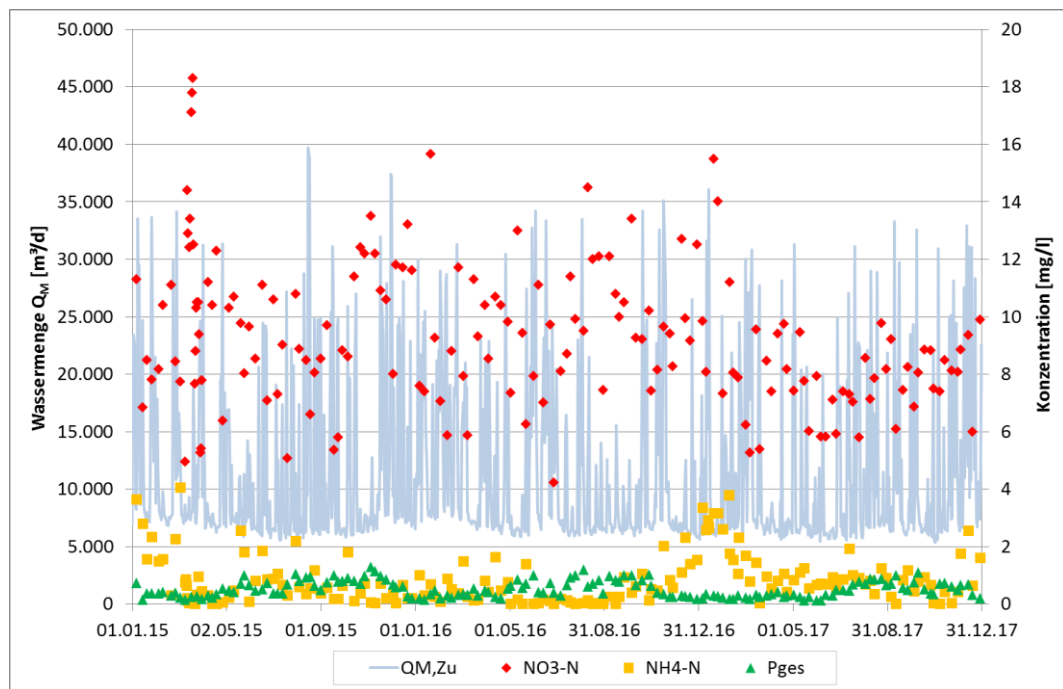
Abbildung 5 stellt die CSB- und NO<sub>2</sub>-Konzentration im Ablauf der Nachklärung dar. Die CSB-Konzentrationen liegen im Betrachtungszeitraum auf einem konstanten Niveau zwischen 20 – 40 mg/l. Die NO<sub>2</sub>-N-Konzentrationen weisen teils starke Schwankungen auf. Insbesondere im Winter zeigen sich zum Teil stark erhöhte NO<sub>2</sub>-N-Konzentration von bis zu 1,5 mg/l. Dies deutet auf eine unzureichende Nitrifikation aufgrund eines zu geringen Schlammalters im Winter hin.



**Abbildung 5: CSB- und NO<sub>2</sub>-N-Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage**

Die im Ablauf der Nachklärung ermittelten Nitrat- (NO<sub>3</sub>-N), Ammonium (NH<sub>4</sub>-N) und Phosphor-Konzentration (P<sub>ges</sub>) im Ablauf der Kläranlage bzw. Ablauf Nachklärung sind in Abbildung 6 dargestellt. Die NO<sub>3</sub>-N- sowie NH<sub>4</sub>-N-Konzentrationen weisen ähnliche Schwankungen wie bei der Nitrit-Konzentration auf. Phosphor befand sich im Untersuchungszeitraum unter 1,3 mg/l mit einem Mittelwert von 0,5 mg/l.





**Abbildung 6:  $\text{NO}_3\text{-N}$ -,  $\text{NH}_4\text{-N}$ - und  $\text{P}_{\text{ges}}$ -Konzentration im Ablauf der Nachklärung**

Abbildung 7 stellt die AFS Konzentration im Ablauf der KA dar. Diese sind von Anfang 2015 bis Anfang 2016 als Tageswerte vorhanden. Ab 2016 bis Ende des Betrachtungszeitraumes sind lediglich Stichproben vorhanden. Trotz Reduzierung der Datendichte ist eine leichte Schwankung der AFS-Ablaufkonzentrationen zu erkennen. Eine Voraussetzung für eine gut funktionierende Stufe zur Mikroschadstoffelimination ist, dass die AFS-Konzentration im Ablauf der Nachklärung unter 15  $\text{mg/l}$  liegen soll [3]. Im Fall der KA Frechen liegen die AFS-Konzentrationen im Mittel bei ca. 6  $\text{mg/l}$ .

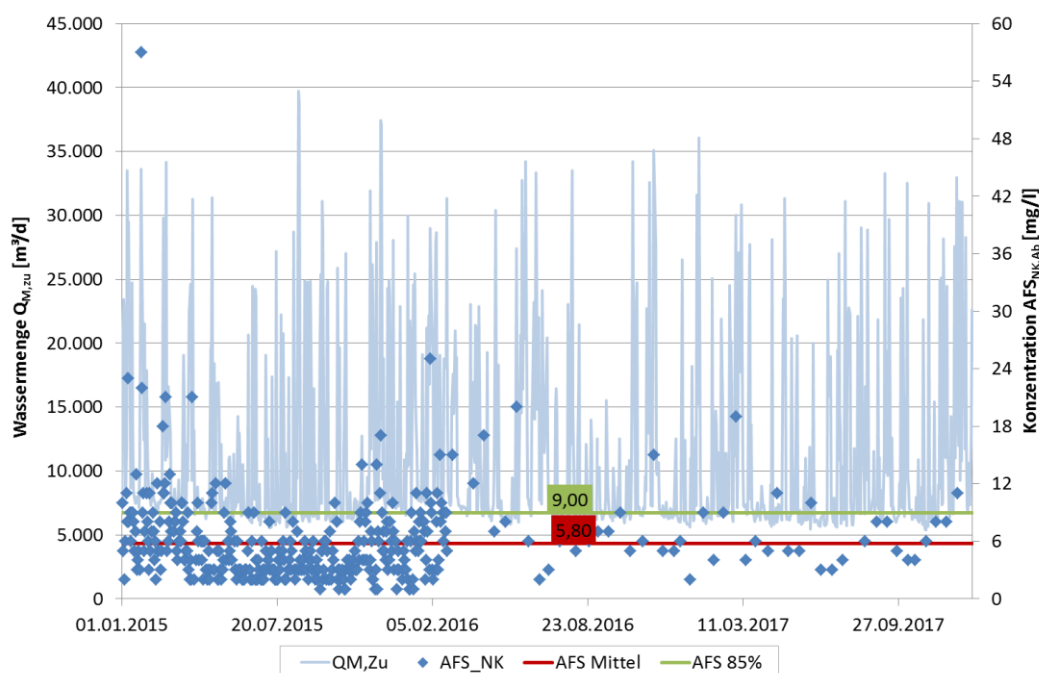


Abbildung 7: AFS-Konzentration im Ablauf der Nachklärung

### 2.1.5 Überwachungswerte

Gemäß Abwasserverordnung und wasserrechtlicher Einleitererlaubnis von 22.04.1997 sind die in Tabelle 5 aufgeführten Überwachungswerte einzuhalten. Weiterhin sind die vom Erfverband erklärten Werte für das Jahr 2018 ebenfalls aufgelistet.

Tabelle 5: Überwachungs- und erklärte Werte der KA Frechen

Parameter	Einheit	Überwachungswerte	Erklärte Werte 01.01.18 - 31.03.18	Erklärte Werte 01.04.18 - 30.06.18	Erklärte Werte 01.07.18 - 30.09.18	Erklärte Werte 01.10.18 - 31.12.18
CSB	mg/l	60	40	35	35	40
BSB <sub>5</sub>	mg/l	10	-	-	-	-
NH <sub>4</sub> -N	mg/l	10	-	-	-	-
N <sub>ges,anorg</sub>	mg/l	18	13	12	10	13
P <sub>ges</sub>	mg/l	2	1,5	1,5	1,5	1,5
pH-Wert	-	6-8,5	-	-	-	-

### 2.1.6 Spurenstoffbelastung Ablauf Kläranlage

In Abstimmung mit der Bezirksregierung Köln wurde zur Studienbearbeitung ein erweitertes Monitoring auf Mikroschadstoffe durchgeführt. Die Probenahme und

Analyse auf Spurenstoffe wurden von dem ISA-Labor in Aachen durchgeführt. Dabei wurden vier 24-Stunden-Mischproben im Zulauf zur biologischen Reinigungsstufe und im Ablauf der Kläranlage innerhalb von zwei Monaten entnommen und hinsichtlich diverser Spurenstoffe analysiert (siehe Tabelle 6). Zwei von den Proben wurden bei Regenwetter und zwei bei Trockenwetter entnommen. Grundsätzlich soll die Probenahme bei Trockenwetter erfolgen, um eine Verdünnung der Konzentration der Spurenstoffe zu vermeiden. Bei Regenwetter können jedoch die regenwetterrelevanten Stoffe wie Biozide und Pestizide besser erfasst werden.

**Tabelle 6: Substanzauswahl für das erweiterte Monitoring auf der KA Frechen**

Stoffgruppe	Stoff	Stoffgruppe	Stoff
<b>Arzneimittelwirkstoffe und Metabolite</b>	Candesartan	<b>Moschusduftstoffe</b>	Galaxolid
	Carbamazepin	<b>Korrosionsschutzmittel</b>	1H-Benzotriazol
	Ciprofloxacin	<b>Süßstoffe</b>	Acesulfam K
	Clarithromycin	<b>Per- und Polyfluorierte Chemikalien (PFC)</b>	Perfluorbutansäure (PFBA)
	Diclofenac		Perfluorbutansulfonsäure (PFBS)
	Gabapentin		Perfluorpentansäure (PFPeA)
	Ibuprofen		Perfluorhexansäure (PFHxA)
	Losartan		Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS)
	Metoprolol		Perfluorheptansäure (PFHpA)
	Sulfamethoxazol		Perfluoroctansäure (PFOA)
Valsartan	Perfluoroctansulfonsäure (PFOS)		
Guanylharnstoff	Perfluormonansäure (PFNA)		
	Perfluordecansäure (PFDeA)		
<b>Östrogene</b>	Östrogene Aktivität		
<b>Pestizide</b>	Terbutryn		
	Mecoprop P		
	Isoproturon		
	Flufenacet		
	Tebuconazol		
	Propiconazol		

Aus der Auswertung der Konzentration der Spurenstoffe im Zulauf der Belebungsbecken und Ablauf der Kläranlage kann keine allgemeine Aussage für die Beurteilung der Leistung der biologischen Reinigungsstufe bzw. für den Abbau der Mikroschadstoffe getroffen werden, weil die Stoffe in der biologischen Reinigungsstufe unterschiedlich reagieren bzw. abgeschieden werden.

Um die Ablaufwerte der Kläranlage beurteilen zu können, wurden diese mit Ablaufwerten aus verschiedenen Kläranlagen aus einer statistischen Erhebung der OWL-Umweltanalytik, die bereits sehr viele Spurenstoffanalysen auf Kläranlagen durchgeführt haben, verglichen. Aus Kostengründen wird auf den meisten Kläranlagen nicht jeder einzelne Stoff analysiert. Es werden für die analytische Untersuchung meistens wenige Stoffe, die für die Belastungssituation repräsentativ sind, ausgewählt. Bei den von der OWL-Umweltanalytik untersuchten Kläranlagen

wurden deswegen hauptsächlich die Indikatorsubstanzen untersucht. Somit sind für 9 der 31 analysierten Spurenstoffe Vergleichswerte vorhanden.

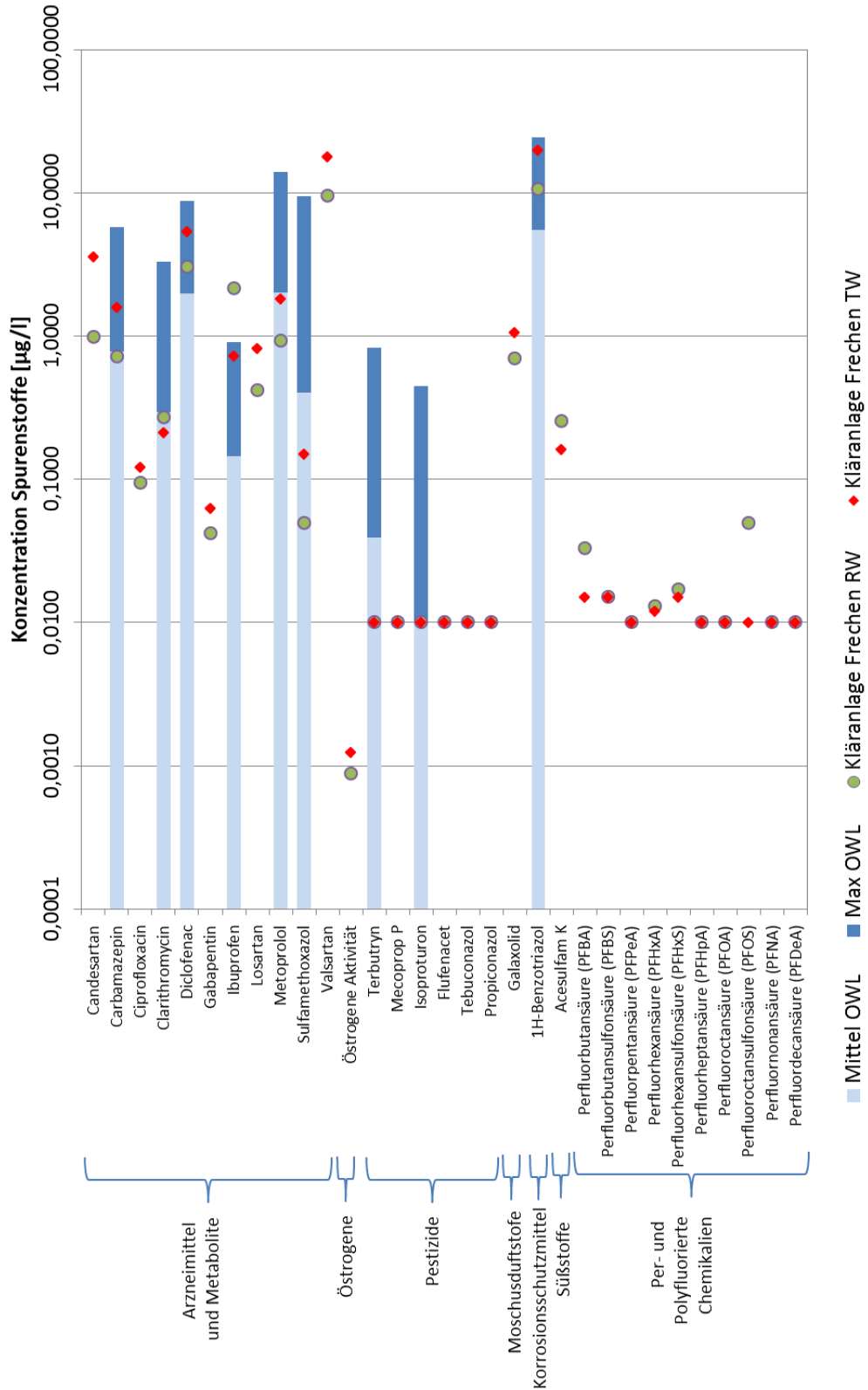
Für die Darstellung der Konzentrationen wurden die Ergebnisse aus Regenwettertagen getrennt von denen aus Trockenwettertagen ausgewertet. Somit wird der Einfluss von Regenwetter verdeutlicht. In Abbildung 8 sind die Mittelwerte der Analyseergebnisse mit der statischen Erhebung der OWL-Umweltanalytik gegenübergestellt.

In Abbildung 8 ist zu erkennen, dass die untersuchten Pestizide sich bei allen Stichproben unter der Bestimmungsgrenze von 0,01 µg/l befinden. Die per- und polyfluorierten Chemikalien befanden sich, abgesehen von PFBA, PFH<sub>x</sub>A, PFHpA sowie PFOS, ebenfalls unter der Bestimmungsgrenze von 0,01 µg/l.

Für die Östrogene Aktivität im Ablauf der KA Frechen sind keine Vergleichswerte vorhanden. Das Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW gibt jedoch für das Bewertungskriterium den Wert 0,000035 µg/l als Orientierungswert bzw. 0,0004 µg/l als höchst zulässige Nachweisgrenze entsprechend EU 2015/495 an. Gemessen wurde im Rahmen des erweiterten Monitorings ein Mittelwert bei Trockenwetter von rd. 0,0013 µg/l. Somit überschreitet der gemessene Wert beide vom Kompetenzzentrum angegebene Werte.

Bei Regenwetter wurden von den Stoffen Clarithromycin, Ibuprofen, Acesulfam K, PFBA, PFH<sub>x</sub>A, PFH<sub>x</sub>S und PFOS höhere Konzentrationen als bei Trockenwetter gemessen.

Bei dem Vergleich der Ablaufwerte der KA Frechen mit den Werten der von OWL-Umweltanalytik untersuchten Kläranlagen werden bei Carbamazepin, Diclofenac, Ibuprofen und 1H-Benzotriazol die Mittelwerte überschritten.



**Abbildung 8: Vergleich der Spurenstoffe im Ablauf KA Frechen mit anderen von OWL-Umweltanalytik analysierten Kläranlagenabläufen**

Von der Bezirksregierung wurde außerdem die Durchführung eines nachfolgenden Monitoring-Programms zur Datenverdichtung angefordert. Dafür wurden fünf 24-Stunden-Mischproben in den ersten drei Wochen im April 2019 bei Trockenwetter entnommen. Dabei wurden die Standardparameter (CSB, AFS, TNb und Nitrit), die chemische Verbindung Bromid sowie die in der Tabelle 7 aufgelisteten Substanzen analysiert. Die Analyse von Östrogenen Aktivität wurde von der Bezirksregierung Köln nachträglich angefordert. Da die Analyseergebnisse dieses Stoffes für die Bearbeitung der Studie nicht vorlagen, wurden diese nicht bewertet.

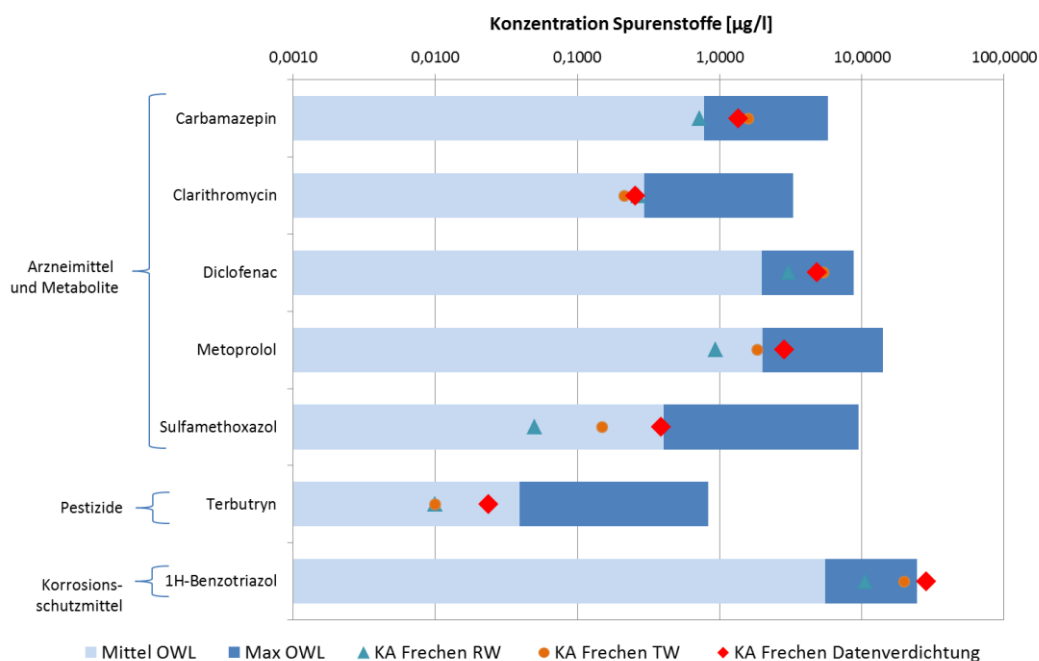
**Tabelle 7: Stoffauswahl für das Monitoring zur Datenverdichtung**

Stoffgruppe	Stoff
<b>Arzneimittelwirkstoffe und Metabolite</b>	Carbamazepin
	Clarithromycin
	Diclofenac
	Metoprolol
	Sulfamethoxazol
<b>Korrosionsschutzmittel</b>	1H-Benzotriazol
<b>Pestizide</b>	Terbutryn
<b>Östrogene*</b>	Östrogene Aktivität

\* Standortrelevanter Stoff

In Abbildung 9 sind die Mittelwerte der Analyseergebnisse der Datenverdichtung mit der statischen Erhebung der OWL-Umweltanalytik gegenübergestellt. Für die ausgewählten Substanzen sind Vergleichswerte vorhanden. Zum Vergleich sind zusätzlich in der Abbildung 9 die Messwerte aus dem ersten erweiterten Monitoring dargestellt. Nachfolgend sind die Spurenstoffeinzelmessungen des Ablaufs der KA Frechen aufgelistet, welche oberhalb des Mittelwertes der Vergleichsanlagen liegen:

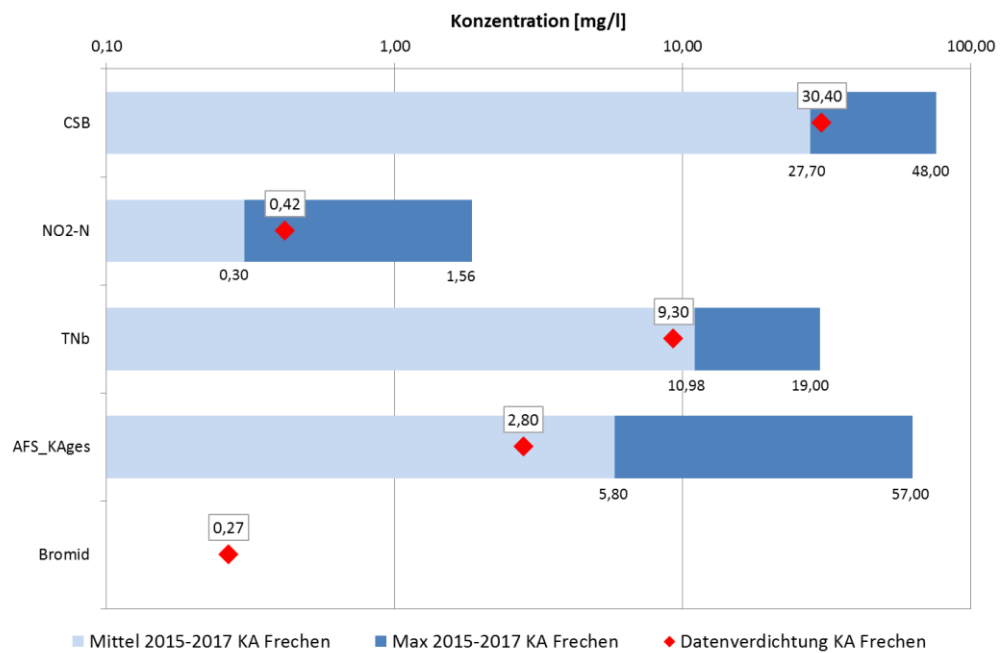
- Carbamazepin (Medikament zur Behandlung von Epilepsie)
- Diclofenac (Medikament zur Behandlung von Schmerzen)
- Metoprolol (Medikament zur Behandlung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen)
- 1H-Benzotriazol (Korrosionsschutzmittel)



**Abbildung 9: Vergleich der Spurenstoffe aus dem Monitoring zur Datenverdichtung im Ablauf der KA Frechen mit anderen von OWL-Umweltanalytik analysierten Kläranlagenabläufen**

In Abbildung 10 ist die Gegenüberstellung der Ablaufwerte der KA Frechen als Mittelwert aus dem Monitoring zur Datenverdichtung mit den Ablaufwerten aus den Jahren 2015 bis 2017 dargestellt. Der Mittelwert des Parametes TNb aus dem Monitoring zur Datenverdichtung wurde aus vier von fünf Messungen gebildet, da für eine Messung kein TNb ermittelt wurde. Der Mittelwert der Mischproben für die Parameter CSB und Nitrit (NO<sub>2</sub>-N) überschreiten die ermittelten Mittelwerte aus den Jahren 2015 bis 2017. Bei TNb sowie bei AFS liegen die Mischproben unterhalb der Mittelwerte aus den Jahren 2015 bis 2017.

Bromid wird nicht als Standardparameter im Ablauf der KA Frechen gemessen, deswegen sind keine Vergleichswerte vorhanden. Im Hinblick auf eine mögliche Ozonbehandlung des Kläranlagenablaufes ist der Bromidkonzentration besondere Beachtung zu widmen. Durch die Ozonung kann Bromid zu kanzerogenem Bromat oxidiert werden. Für Bromid-Konzentrationen von unter 0,10 mg/l kann eine Ozondosis von bis zu 0,7 g<sub>O3</sub>/g<sub>DOC</sub> angesetzt werden [3]. Bei der hier vorliegenden Konzentration von rd. 0,27 mg/l sind daher Einschränkungen für eine Ozonanlage zu erwarten. Für Bromidkonzentrationen über 0,15 mg/l ist eine Einzelfallbewertung der Bromatbildung durchzuführen.



**Abbildung 10: Vergleich der Ablaufwerte der KA Frechen aus der Datenverdichtung mit Ablaufwerten aus den Jahren 2015 bis 2017**

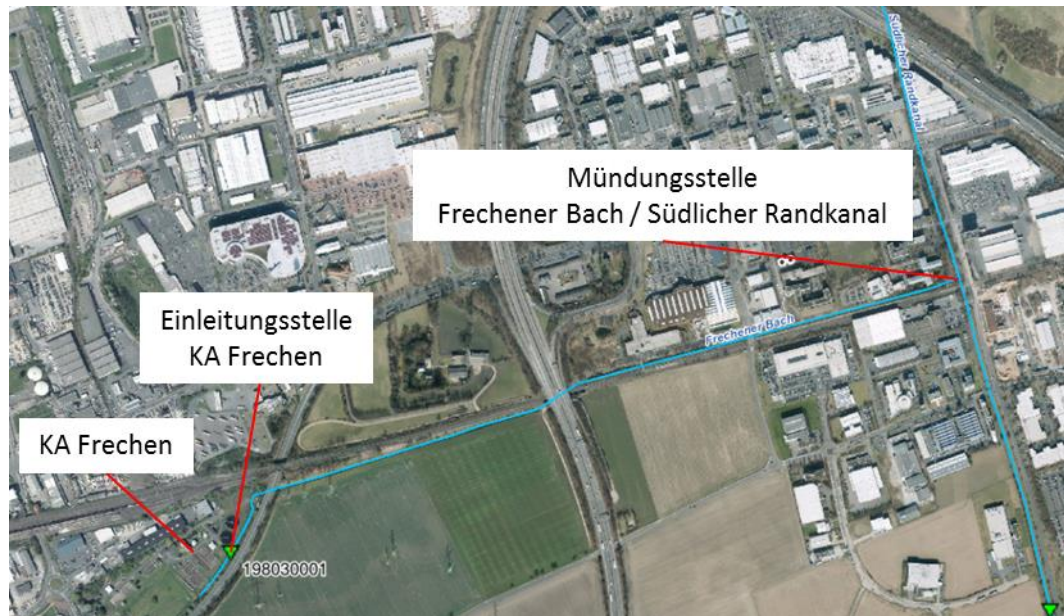
## 2.2 Vorfluter

Bei der Ermittlung der Gewässerbelastung durch eine Kläranlage ist der Abwasseranteil im Gewässer ein wichtiger Indikator. In NRW wird ein Abwasseranteil von mehr als einem Drittel des Niedrigwasserabflusses als kritisch erachtet [1].

Der Frechener Bach besitzt keine natürliche Quelle. Er beginnt am Betriebsgelände der Kläranlage Frechen und mündet nach rd. zwei Kilometern in den südlichen Randkanal, welcher danach in den Kölner Randkanal und schließlich in den Rhein mündet. Der Frechener Bach besteht somit aus biologisch gereinigtem Abwasser der Kläranlage Frechen und, bei starken Regenereignissen, aus mechanisch gereinigten Mischwasserentlastungen aus dem RÜB/RRB.

In Abbildung 11 ist die Einleitungsstelle der KA Frechen, der Verlauf des Frechener Bachs sowie die Mündung des Frechener Bachs in den Südlichen Randkanal graphisch dargestellt.





**Abbildung 11: Verlauf des Frechener Bachs**


### 2.2.1 Allgemeine Gewässeruntersuchung

Der Frechener Bach wird als erheblich veränderter Wasserkörper (heavily modified water body = HMWB) bezeichnet. Gemäß WRRL-Monitoring weist der Frechener Bach einen schlechten ökologischen und chemischen Zustand sowie ein schlechtes ökologisches Potential auf (siehe Abbildung 12).

Der Südliche Randkanal wird als künstliches Gewässer (artificial water body = AWB) bezeichnet. Solche künstlichen Gewässer sind stets von Menschenhand geschaffen, dort wo vorher kein Gewässer vorhanden war. Der Randkanal unterstützt u.a. die Entwässerung des Rhein-Erft-Kreises und nimmt die gereinigten Abwässer von verschiedenen Kläranlagen der Region auf. Der Südliche Randkanal weist, gemäß VRRL-Monitoring, einen schlechten ökologischen und chemischen Zustand auf (siehe Abbildung 13).

Die Überschreitungen von Stoffen und Parameter in den Überwachungszyklus sind auf der rechten Seite der jeweiligen Tabellenausschnitte aufgelistet. Die Auflistung ist wie folgt zu interpretieren:

- Stoffe, unterstrichen: Überschreitung im 2. und 3. Zyklus
- Stoffe ohne weitere Formatierung: Überschreitung nur im 3. Zyklus
- Stoffe, *kursiv geschrieben*; Überschreitung nur im 2. Zyklus

Planungseinheit	PE_RHE_1400	
Wasserkörper-ID	27373226_0	
Gewässername	Frechener Bach	
Wasserkörperbezeichnung	Marsdorf bis Frechen	
LAWA-Fließgewässertyp	18	
Trinkwassergewinnung	nein	
Wasserkörperausweisung	verändert - HMWB	
HMWB-Fallgruppe	BmV-TLB	
<b>Monitoringzyklus</b>	2	3
<b>Ökologischer Zustand</b>	<b>schlecht</b>	<b>schlecht</b>
MZB Saprobie	unbefr.	mäßig
MZB Allgemeine Degradation	unbefr.	unbefr.
MZB Versauerung		nicht rel.
MZB Gesamt	unbefr.	unbefr.
Fische	<b>schlecht</b>	<b>schlecht</b>
Makrophyten (PHYLIB)	unbefr.	mäßig
Makrophyten (NRW)	<b>schlecht</b>	unbefr.
Phytobenthos (Diatomeen)		unbefr.
Phytobenthos o. Diatomeen	mäßig	mäßig
Phytoplankton	nicht rel.	nicht rel.
<b>Ökologisches Potenzial</b>	<b>schlecht</b>	<b>schlecht</b>
MZB Allgemeine Degradation	unbefr.	unbefr.
MZB Gesamt	unbefr.	unbefr.
Fische	<b>schlecht</b>	<b>schlecht</b>
Metalle (Anl. 5 OGeWV)	mäßig	mäßig
PBSM (Anl. 5 OGeWV)	gut	gut
Sonst. Stoffe (Anl. 5 OGeWV)		
ACP Gesamt (OW)	nicht eing.	nicht eing.
Gewässerstruktur		
Metalle n. ges. verb. (OW)	nicht eing.	nicht eing.
PBSM n. ges. verb. (OW)	nicht eing.	nicht eing.
Sonst. St. n. ges. verb. (OW)	nicht eing.	nicht eing.
<b>Chemischer Zustand<sup>1</sup></b>	<b>nicht gut</b>	<b>nicht gut</b>
Ch. Zust. ohne ubiq. Stoffe	gut	gut
Metalle (Anl. 7 OGeWV <sup>2</sup> )	gut	gut
PBSM (Anl. 7 OGeWV)	gut	gut
Sonst. Stoffe (Anl. 7 OGeWV)		
Nitrat (Anl. 7 OGeWV)	gut	

Planungseinheit	PE_RHE_1400
Wasserkörper-ID	27373226_0
Gewässername	Frechener Bach
Wasserkörperbezeichnung	Marsdorf bis Frechen
ACP Gesamt (OW)	<u>Gesamtphosphat-Phosphor;</u> <u>Organischer Kohlenstoff.gesamt (TOC);</u> <u>Orthophosphat-Phosphor;</u> <u>Wassertemperatur;</u> <u>Ammonium-Stickstoff;</u> <u>Sauerstoff</u>
<b>Stoffgruppen des ökologisch</b>	
Metalle (Anl. 5 OGeWV)	Zink; Silber
PBSM (Anl. 5 OGeWV)	
Sonst. Stoffe (Anl. 5 OGeWV)	
<b>Gesetzlich nicht verbindlich</b>	
Metalle n. ges. verb. (OW)	<u>Kobalt; Vanadium;</u> <u>Zink; Bor</u>
PBSM n. ges. verb. (OW)	<u>Glyphosat</u>
Sonst. St. n. ges. verb. (OW)	<u>Carbamazepin;</u> <u>Dimethylsulfanilid</u>
<b>Stoffgruppen des chemische</b>	
Metalle (Anl. 7 OGeWV) <sup>1</sup>	
PBSM (Anl. 7 OGeWV)	
Sonst. Stoffe (Anl. 7 OGeWV)	

Abbildung 12: Auszug Wasserkörpertabelle aus dem Planungseinheitensteckbrief Rheingraben Nord – BP 2016-2021- Frechener Bach [21]


Planungseinheit	PE_RHE_1400		Planungseinheit	PE_RHE_1400	
Wasserkörper-ID	2737322_0		Wasserkörper-ID	2737322_0	
Gewässername	Südlicher Randkanal		Gewässername	Südlicher Randkanal	
Wasserkörperbezeichnung	Köln bis Hürth		Wasserkörperbezeichnung	Köln bis Hürth	
LAWA-Fließgewässertyp	18		ACP Gesamt (OW)	Ammonium-Stickstoff; Gesamtphosphat-Phosphor; Organischer Kohlenstoff, gesamt (TOC); Orthophosphat-Phosphor; Wassertemperatur	
Trinkwassergewinnung	nein				
Wasserkörperausweisung	künstlich - AWB				
HMWB-Fallgruppe	BmV-TLB				
Monitoringzyklus	2	3	<b>Stoffgruppen des ökologischen Zustands / Potenzials</b>		
Ökologischer Zustand	schlecht	schlecht	Metalle (Anl. 5 OGeWV)	Zink	
MZB Saprobie			PBSM (Anl. 5 OGeWV)		
MZB Allgemeine Degradation			Sonst. Stoffe (Anl. 5 OGeWV)		
MZB Versauerung	nicht rel.	nicht rel.	<b>Gesetzlich nicht verbindlich</b>		
MZB Gesamt	schlecht	schlecht	Metalle n. ges. verb. (OW)	Kobalt; Vanadium; Zink	
Fische			PBSM n. ges. verb. (OW)	Glyphosat	
Makrophyten (PHYLIB)			Sonst. St. n. ges. verb. (OW)	Dimethylsulfanilid	
Makrophyten (NRW)			<b>Stoffgruppen des chemischen Zustands</b>		
Phytobenthos (Diatomeen)			Metalle (Anl. 7 OGeWV) <sup>1</sup>		
Phytobenthos o. Diatomeen			PBSM (Anl. 7 OGeWV)		
Phytoplankton	nicht rel.	nicht rel.	Sonst. Stoffe (Anl. 7 OGeWV)		
Ökologisches Potenzial					
MZB Allgemeine Degradation					
MZB Gesamt					
Fische					
Metalle (Anl. 5 OGeWV)		mäßig			
PBSM (Anl. 5 OGeWV)		gut			
Sonst. Stoffe (Anl. 5 OGeWV)		gut			
ACP Gesamt (OW)		nicht eing.			
Gewässerstruktur					
Metalle n. ges. verb. (OW)	eing. s. gut	nicht eing.			
PBSM n. ges. verb. (OW)		nicht eing.			
Sonst. St. n. ges. verb. (OW)		nicht eing.			
<b>Chemischer Zustand<sup>1</sup></b>	nicht gut	nicht gut			
Ch. Zust. ohne ubiq. Stoffe	gut	gut			
Metalle (Anl. 7 OGeWV) <sup>2</sup>	gut	gut			
PBSM (Anl. 7 OGeWV)	gut	gut			
Sonst. Stoffe (Anl. 7 OGeWV)		gut			
Nitrat (Anl. 7 OGeWV)	gut				

Abbildung 13: Auszug Wasserkörpertabelle aus dem Planungseinheitensteckbrief Rheingraben Nord – BP 2016-2021- Südlicher Randkanal [21]

### 2.2.2 Spurenstoffbelastung

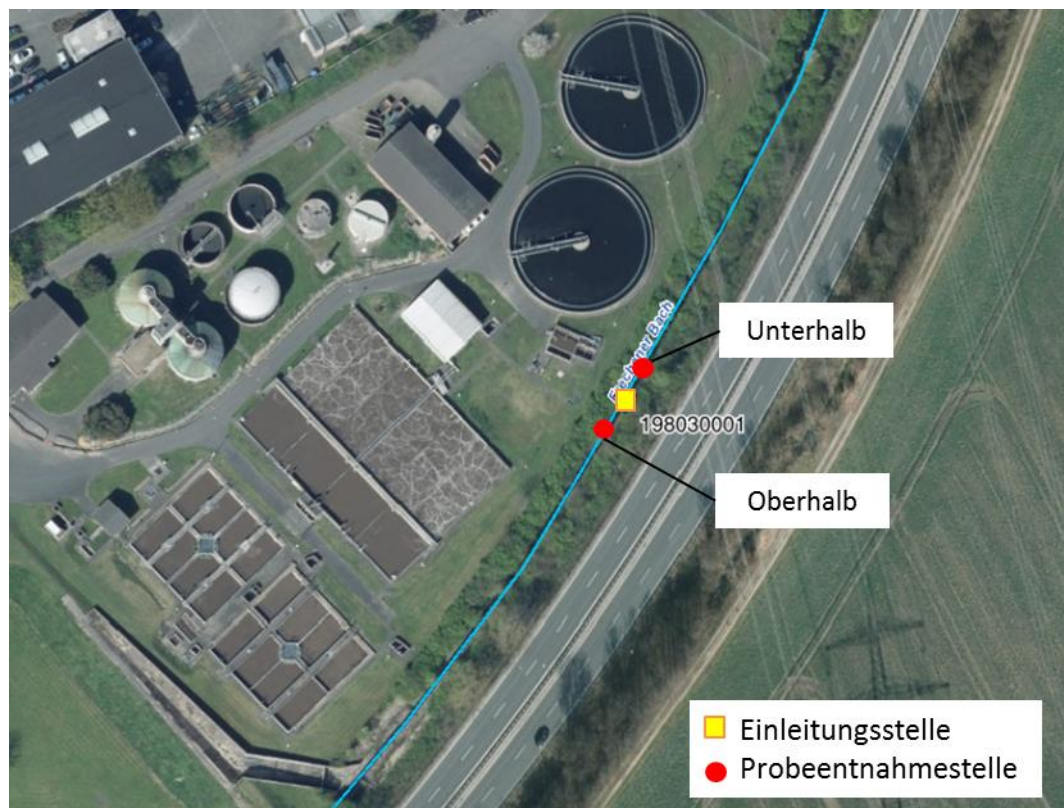
In Abstimmung mit der Bezirksregierung Köln wurde zur Studienbearbeitung ein erweitertes Monitoring auf Mikroschadstoffe am Frechener Bach sowie am Südlichen Randkanal durchgeführt. Die Stichproben wurden im Frechener Bach vor und nach der Einleitungsstelle und im Südlichen Randkanal vor und nach der Mündung des Frechener Bachs genommen. Die Probennahme erfolgte im Januar und Februar 2019. Die untersuchten Stoffe sind in Tabelle 8 aufgelistet.

**Tabelle 8: Stoffauswahl für das Monitoring zur Datenverdichtung**

Stoffgruppe	Stoff	Stoffgruppe	Stoff
<b>Arzneimittelwirkstoffe und Metabolite</b>	Candesartan	<b>Moschusduftstoffe</b>	Galaxolid
	Carbamazepin	<b>Korrosionsschutzmittel</b>	1H-Benzotriazol
	Ciprofloxacin	<b>Süßstoffe</b>	Acesulfam K
	Clarithromycin	<b>Per- und Polyfluorierte Chemikalien (PFC)</b>	Perfluorbutansäure (PFBA)
	Diclofenac		Perfluorbutansulfonsäure (PFBS)
	Gabapentin		Perfluorpentansäure (PFPeA)
	Ibuprofen		Perfluorhexansäure (PFHxA)
	Losartan		Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS)
	Metoprolol		Perfluorheptansäure (PFHpA)
	Sulfamethoxazol		Perfluorooctansäure (PFOA)
	Valsartan		Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)
Guanylharnstoff	Perfluornonansäure (PFNA)		
	Perfluordecansäure (PFDeA)		
<b>Östrogene</b>	Östrogene Aktivität		
<b>Pestizide</b>	Terbutryn		
	Mecoprop P		
	Isoproturon		
	Flufenacet		
	Tebuconazol		
	Propiconazol		

#### 2.2.2.1 Spurenstoffbelastung im Frechener Bach oberhalb und unterhalb der KA

Die tatsächliche Belastungssituation im Gewässer im Bereich der Kläranlage Frechen wurde vom ISA-Labor in Stichproben vor bzw. nach der Einleitungsstelle gemessen und analysiert. Die Probeentnahmestelle ist in Abbildung 14 dargestellt.



**Abbildung 14: Kläranlageneinleitung und Probeentnahmestellen im Frechener Bach**

Die 24-h-Mischproben wurden am 16. Januar und am 11. Februar 2019 entnommen. Die Probeentnahme erfolgte an beiden Tagen bei Regenwetter. In Abbildung 15 ist die Wassermenge in dem Frechener Bach an den Tagen der Probeentnahme abgebildet. Zu beachten ist, dass der Frechener Bach keine natürliche Quelle besitzt. Somit besteht der Frechener Bach bei Trockenwetter praktisch aus mechanisch/biologisch gereinigtem Abwasser. Dementsprechend handelt es sich bei dem Wasser Oberhalb, um einen Rückstau des Kläranlageablaufs. Bei starken Regenereignissen besteht der Frechener Bach zusätzlich aus Mischwasserentlastungen.



**Abbildung 15: Einleitungsstelle der KA Frechen in den Frechener Bach links am 16.01.2019 (Regenwetter) rechts am 11.02.2019 (Regenwetter)**

Abbildung 16 zeigt die Konzentrationen der Spurenstoffe im Gewässer vor und nach der Einleitung des Kläranlageablaufs. Insgesamt liegen, an beiden Probenentnahmetagen, 13 der 31 analysierten Spurenstoffe unterhalb ihrer Bestimmungsgrenze vor. Von den 18 mengenmäßig erfassbaren Spurenstoffen liegen 9 (Candesartan, Carbamazepin, Diclofenac, Ibuprofen, Losartan, Metroprolol, Valsartan, Galaxolid und 1H-Benzotriazol) bereits vor der KA-Einleitung oberhalb des allgemeinen Vorsorgewertes vor. Das kann an Mischwasserentlastungen vor der Kläranlageeinleitung oder an einen möglichen Rückstau in Oberwasser liegen. Bei 14 Spurenstoffen wird durch die KA-Einleitung eine Erhöhung festgestellt.

Die Konzentration von den folgenden 7 Stoffen: Candesartan, Diclofenac, Ibuprofen, Losartan, Valsartan, Östrogene Aktivität und PFOS überschreiten schon vor der KA-Einleitung das Bewertungskriterium gemäß Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW.

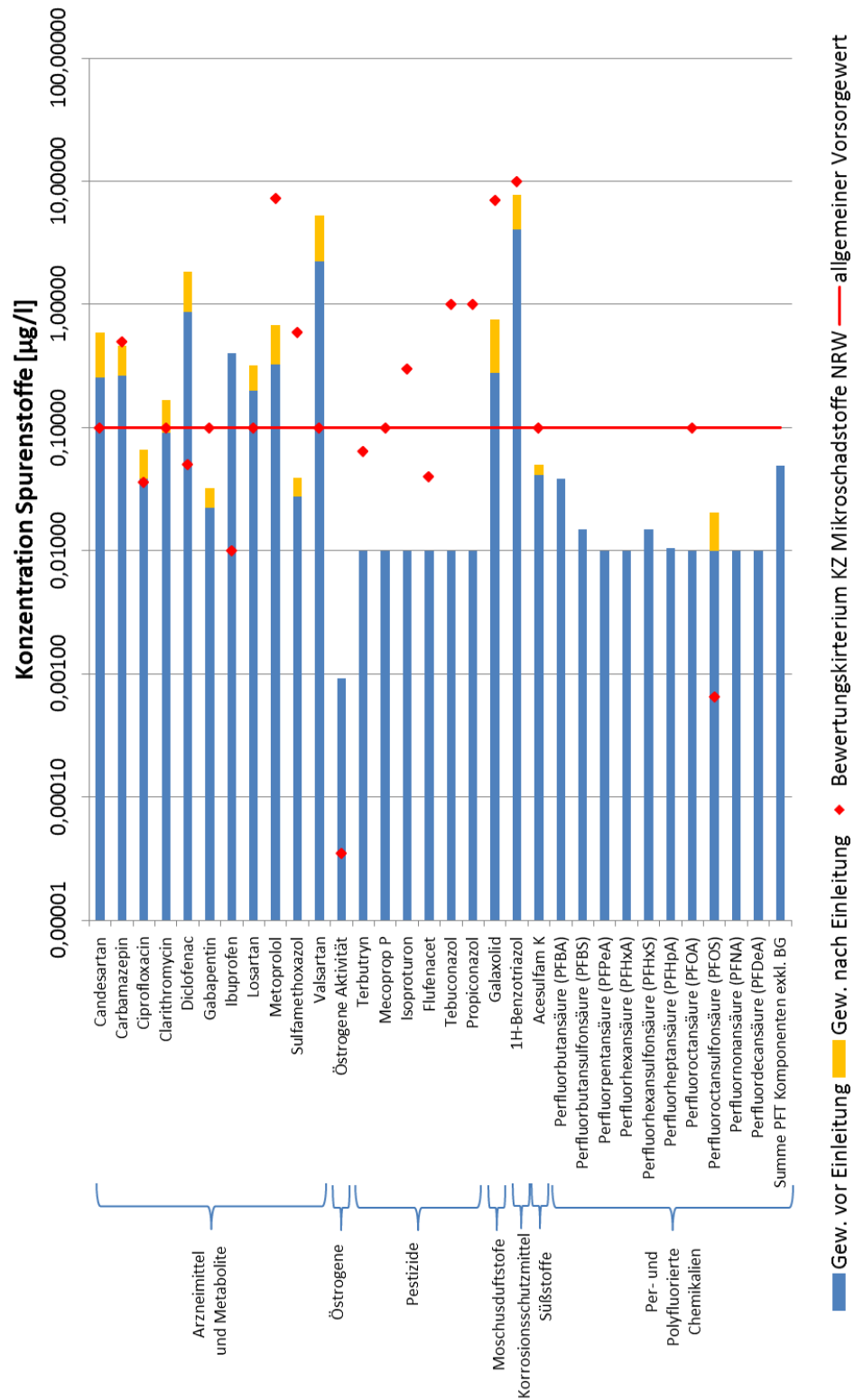


Abbildung 16: Gewässerbelastung des Frechener Bachs vor und nach Einleitung des Kläranlagenablaufs, Bewertungskriterium des KZ Mikroschadstoffe NRW und allgemeiner Vorsorgewert.

### 2.2.2.2 Spurenstoffbelastung im Südlichen Randkanal oberhalb und unterhalb der Mündungsstelle des Frechener Bachs

Die Belastungssituation im Gewässer in dem Südlichen Randkanal wurde vom ISA-Labor in Stichproben vor bzw. nach der Mündungsstelle des Frechener Bachs gemessen und analysiert. Die Entnahme erfolgte am 21. und 24. Januar 2019 bei Trockenwetter. Die Probeentnahmestellen sind in Abbildung 17 dargestellt.



**Abbildung 17: Mündung des Frechener Bachs in den Südlichen Randkanal und Probeentnahmestellen**

Abbildung 18 zeigt die Konzentration der Spurenstoffe im Gewässer vor und nach der Einleitung des Frechener Bachs.

Insgesamt liegen an beiden Probeentnahmetagen 15 der 31 analysierten Spurenstoffe unterhalb ihrer Bestimmungsgrenze vor. Von den 16 mengenmäßig erfassbaren Spurenstoffen liegen 10 Stoffe (Candesartan, Carbamazepin, Clarithromycin, Diclofenac, Ibuprofen, Losartan, Metroprolol, Valsartan, Galaxolid und 1H-Benzotriazol) bereits vor der Mündungsstelle oberhalb des allgemeinen Vorsorgewertes vor. Bei 16 Spurenstoffen wird durch die Einleitung des Frechener Bachs eine Erhöhung festgestellt.



Die Konzentration von folgenden 10 Stoffen: Candesartan, Carbamazepin, Ciprofloxacin, Clarithromycin, Diclofenac, Ibuprofen, Losartan, Vasartan, Östrogene Aktivität und PFOS überschreiten schon vor der KA-Einleitung das Bewertungskriterium gemäß Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW.

Aus der Auswertung der Laborergebnisse ist jedoch zu erkennen, dass durch die Einleitung des Frechener Bachs in den Südlichen Randkanal die Konzentration an Östrogene Aktivität sowie an Perfluorbutansäure (PFBA) reduziert bzw. verdünnt wird. Das obwohl die Konzentration an Östrogenen Aktivität im Ablauf der KA bzw. in dem Frechener Bach bereits hoch ist.

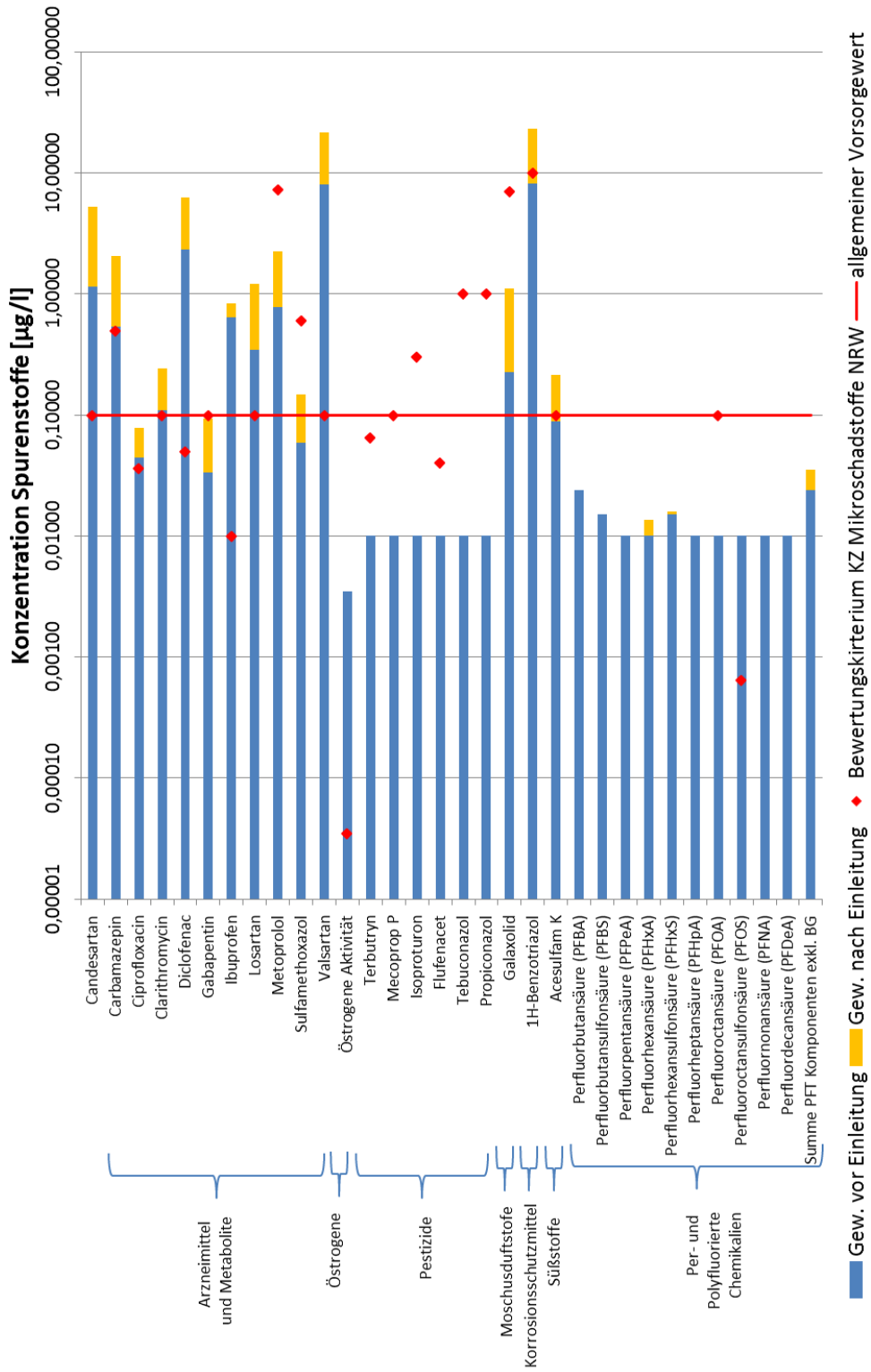


Abbildung 18: Gewässerbelastung des Südlichen Randkanals vor und nach Einleitung des Frechener Bachs, Bewertungskriterium des KZ Mikroschadstoffe NRW und allgemeiner Vorsorgewert.

### 2.3 Metalle im Ablauf der Kläranlage Frechen und im Gewässer

Laut dem „Bewirtschaftungsplan 2016-2021 – Steckbrief der Planungseinheiten im Teileinzugsgebiet Rhein/Rheingraben Nord“ wurden in vielen Rheinzufüssen von Bad Honnef bis Köln Konzentrationen an Metallen wie Beryllium, Kobalt, Molybdän, Silber, Titan, Vanadium, Cadmium, Bor und Zink, welche sich auf die im Gewässer lebenden Organismen auswirken können, gemessen. Allerdings ist die Umweltwirkung von Beryllium, Kobalt, Molybdän, Silber, Titan und Vanadium europaweit wissenschaftlich noch nicht geklärt [21]

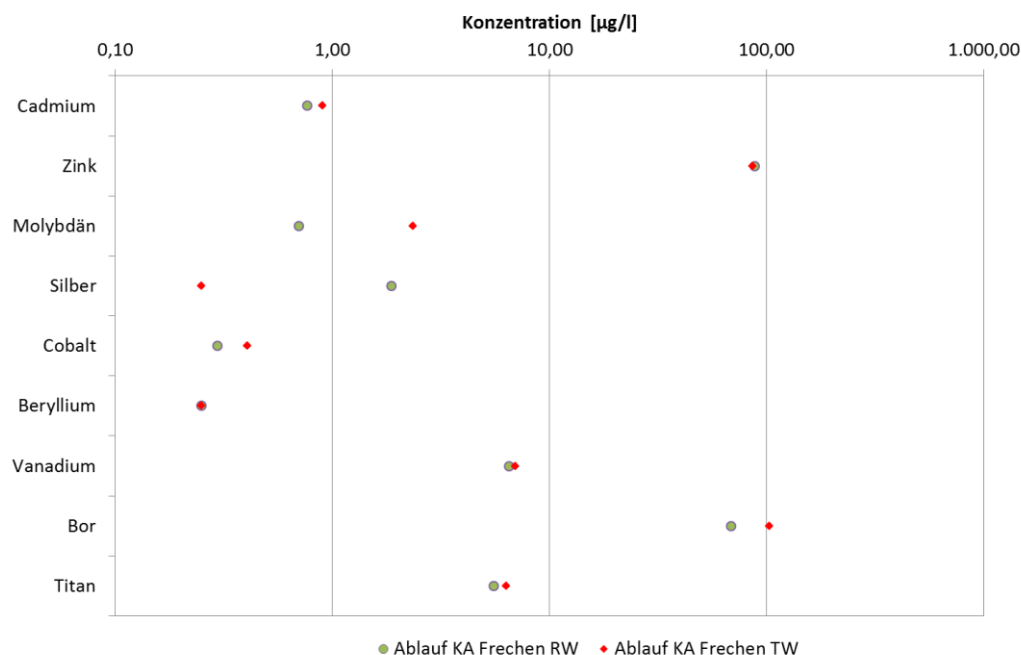
Vor diesem Hintergrund wurden zusätzlich zu den Spurenstoffen auch die in der Tabelle 9 aufgelisteten Metalle im Ablauf der KA Frechen, am Frechener Bach sowie am Südlichen Randkanal analysiert. In folgenden Unterkapiteln werden die Messergebnisse der untersuchten Metalle kurz beschrieben und dargestellt. Metalle werden in der Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination nicht gezielt eliminiert und sind für die Auslegung einer Spurenstoffelimination nicht maßgebend. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Studie lediglich der Einfluss von Metallen des KA-Ablaufs auf den Frechener Bach sowie des Frechener Bachs auf den Südlichen Randkanal beschrieben.

**Tabelle 9:    Analysierte Metalle im Ablauf der KA Frechen**

Stoffgruppe	Stoff
<b>Metalle</b>	Cadmium
	Zink
	Molybdän
	Silber
	Cobalt
	Beryllium
	Vanadium
	Bor
	Titan

#### 2.3.1 Metalle im Ablauf der Kläranlage Frechen

Die Probeentnahme im Ablauf der KA Frechen erfolgte bei Regen sowie bei Trockenwetter. Wie erwartet wird die Konzentration von den meisten Metallen, aufgrund eines Verdünnungseffekts, bei Regenwetter vermindert. Auffällig ist jedoch, dass bei Zink und Silber bei Regenwetter höhere Konzentrationen als bei Trockenwetter gemessen wurden.



**Abbildung 19: Metalle im Ablauf der Kläranlage Frechen**

### 2.3.2 Metalle im Gewässer

Die Konzentrationen an Metallen am Frechener Bach wurden vor und nach der Einleitungsstelle der KA gemessen. Am Südlichen Randkanal erfolgte die Messung vor bzw. nach der Mündungsstelle des Frechener Bachs. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 20 und Abbildung 21 dargestellt.

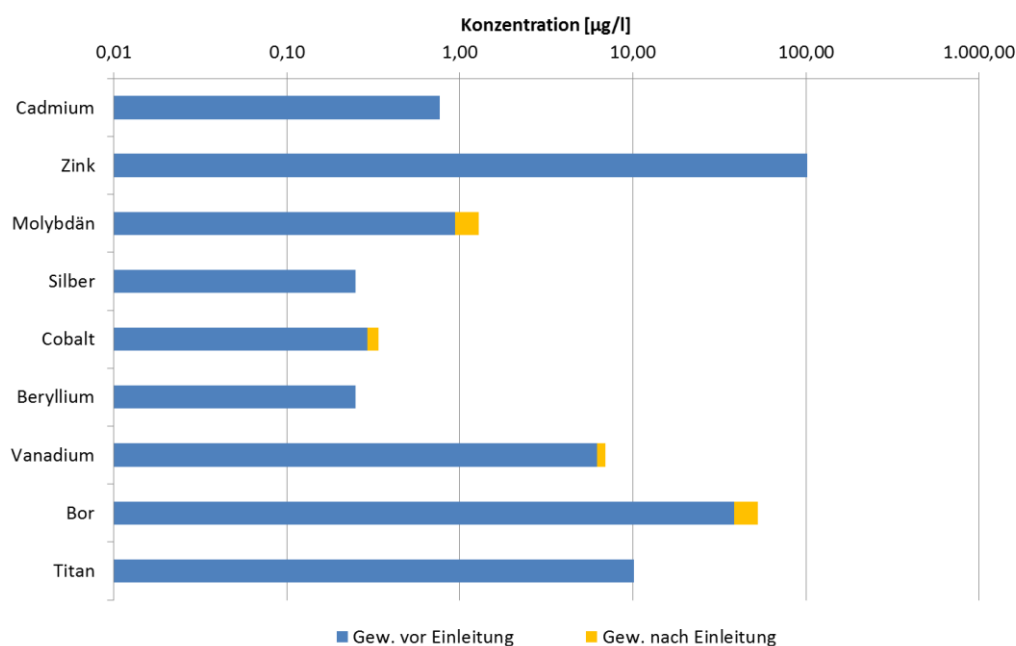
Gemäß WRRL wurden am Frechener Bach bei den Metallen Zink und Silber, welche unter den Metallen nach Anlage 5 der OGewV aufgelistet sind, Überschreitungen von Grenzwerten gemessen. Außerdem wurden bei Kobalt, Vanadium, Zink und Bor, welche zu den gesetzlich nicht verbindlichen Metallen gehören, ebenfalls Überschreitungen von Orientierungswerten gemessen.

Am Südlichen Randkanal wurden gemäß WRRL nur Überschreitungen von Grenzwerten bei Zink, welche zu Metallen nach Anlage 5 der OGewV gehört, gemessen. Bei den nicht gesetzlichen verbindlichen Metallen wurden am Südlichen Randkanal bei Kobalt, Vanadium und Zink die Orientierungswerte überschritten.

Die Auswertung der Daten zeigt, dass durch die Einleitung der KA Frechen nur eine geringfügige Änderung der Konzentrationen stattfindet. Dies ist wenig ver-

wunderlich, da zum Zeitpunkt der Probenahme der Frechener Bach im Wesentlichen aus dem Ablauf der Kläranlage gespeist wurde. Nach Aussage des Betriebes erfolgte zum Zeitpunkt der Probenahme kein Abschlag aus dem RÜB/RRB in den Frechener Bach. Die Probe vor der Einleitung der KA Frechen besteht daher überwiegend aus dem Rückstau der Kläranlageneinleitung.

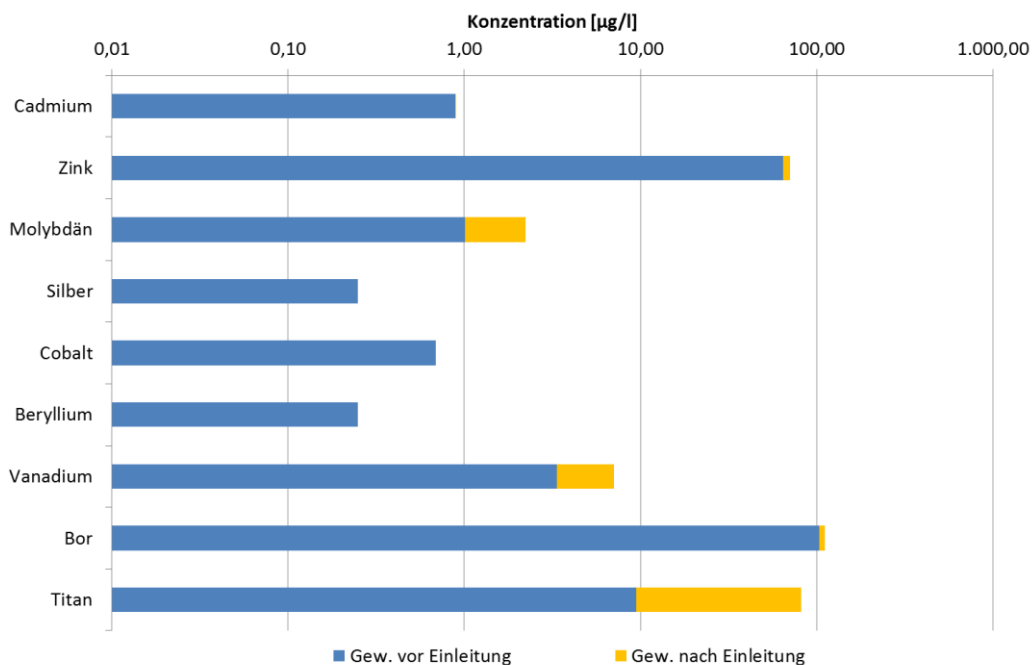
Die Konzentrationen von Silber und Beryllium lagen an beiden Probeentnahmestellen vor und nach der Einleitungsstelle der KA unter deren Bestimmungsgrenze von 0,25 µg/l. In der Abbildung 19 und der Abbildung 20 sind die Metallkonzentrationen im Ablauf der Kläranlage und im Frechener Bach dargestellt.



**Abbildung 20: Konzentration an Metallen im Frechener Bach vor und nach Einleitung des Kläranlagenablaufs**

Am Südlichen Randkanal waren die Konzentrationen von Silber und Beryllium unter deren Bestimmungsgrenze von 0,25 µg/l. Aus der Auswertung war bei der Konzentration an Kobalt eine Minderung der Belastung nach der Einleitung des Frechener Bachs festzustellen. Nach der Einleitungsstelle des Frechener Bachs wurden die Konzentrationen von Cadmium, Zink, Molybdän, Vanadium, Bor und Titan erhöht. Bei Titan wurde an dem ersten Probeentnahme Tag eine Erhöhung der Konzentration von 6,41 µg/l auf 152 µg/l gemessen. Am zweiten Tag lag die Konzentration oberhalb bei 12,45 µg/l und unterhalb bei 11,00 µg/l. Somit ergibt sich aus den Mittelwerten der Messungen eine Erhöhung von rd. 9,5 µg/l auf rd.

81,5 µg/l. Dieser große Unterschied bei den Titan-Messungen deutet auf einen möglichen Messfehler hin.



**Abbildung 21: Konzentration an Metallen im Südlichen Randkanals vor und nach Mündungsstelle des Frechener Bachs**

Wie am Anfang dieses Kapitels erwähnt, werden die Metalle nicht in der Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination gezielt eliminiert oder abgeschieden. Da bei einigen Metallen die Grenzwerte bzw. Orientierungswerte aus der OGewV überschritten werden, werden jedoch weitere Untersuchungen zu diesem Thema empfohlen.

### 3. Stand der Technik

Organische Spurenstoffe werden auf unterschiedliche Wege in die Gewässer eingetragen. Einen wesentlichen Eintragspfad stellt der Ablauf einer Kläranlage dar. Zur Spurenstoffelimination werden derzeit in der Praxis Ozonanlagen, pulverisierter Aktivkohle (PAK) sowie granulierter Aktivkohle (GAK) eingesetzt. Für die ggf. erforderliche Nachbehandlung werden biologische und physikalische Verfahren genutzt. Die einzelnen Verfahren werden nachfolgend erläutert.

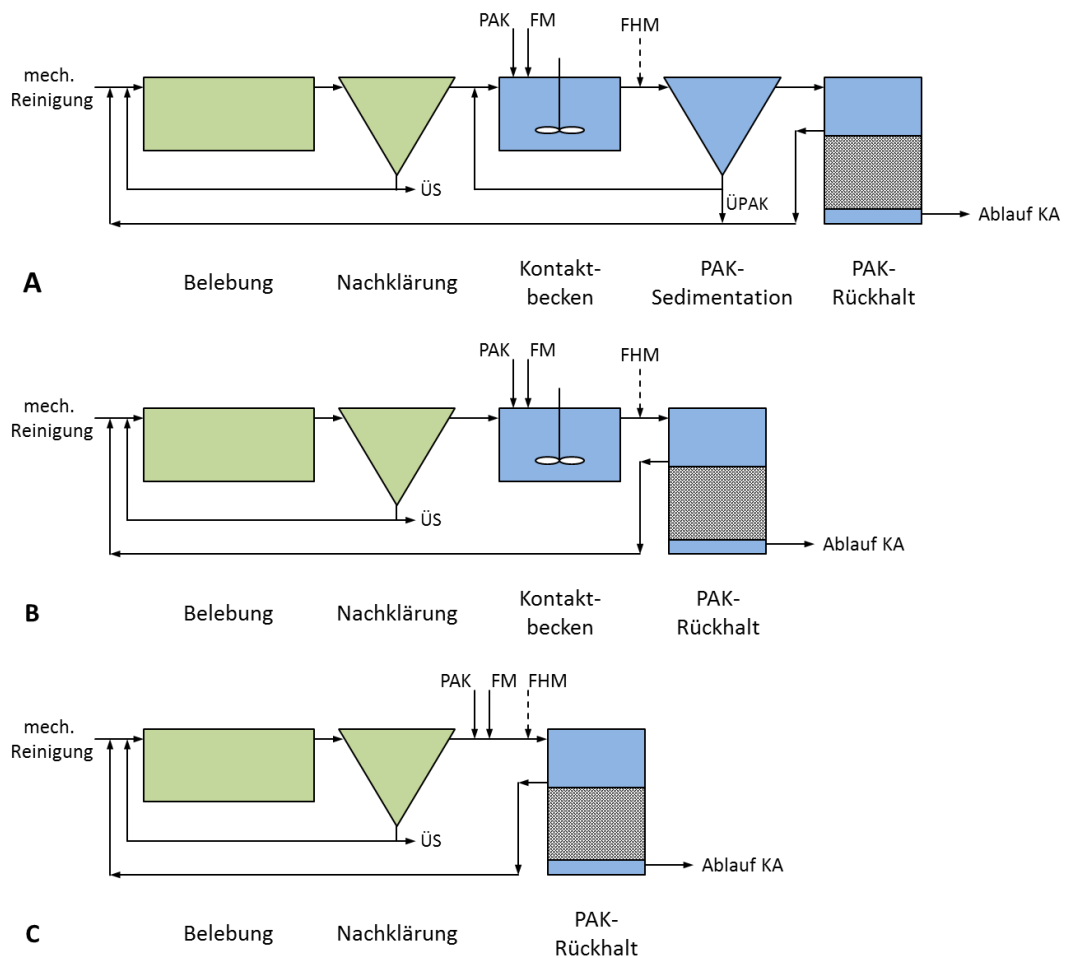
#### 3.1 Einsatz von Pulveraktivkohle (PAK)

##### 3.1.1 Allgemeine Beschreibung

Durch den Einsatz von Aktivkohle in pulverisierter Form kann eine große Bandbreite von Mikroverunreinigungen adsorptiv aus dem Abwasser entfernt werden. Neben der in der Trinkwasseraufbereitung bereits seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzten Filtration mit granulierter Aktivkohle (GAK) ist in der Abwasserbehandlung zur Spurenstoffelimination auch die Verwendung von Pulveraktivkohle (PAK) von Bedeutung. [2]

Die Dosierung von PAK in einer kommunalen Kläranlage erfolgt entweder direkt in die biologische Stufe oder ein nachgeschaltetes Kontaktbecken in das biologisch gereinigte Abwasser. Bei der Dosierung in die Biologie ist mit einem erhöhten PAK-Einsatz zu rechnen, da die organische Hintergrundbelastung relativ hoch ist. Dennoch kann diese Verfahrensweise für kleine Anlagen interessant sein. Die Dosierung in das biologisch gereinigte Abwasser stellt einen möglichst effizienten Einsatz der PAK sicher. Zur Abscheidung der PAK aus dem Abwasser sollte eine Filtration des mit PAK versetzten Volumenstroms unbedingt erfolgen, um die feindispersen PAK-Anteile aus dem gereinigten Abwasser zu entfernen. [2][3]

Mögliche Verfahrensvarianten zur Umsetzung einer PAK-Dosierung auf kommunalen Kläranlagen sind in Abbildung 22 schematisch dargestellt.



**Abbildung 22: Mögliche Umsetzung einer Stufe zur PAK-Dosierung**

Die verfahrenstechnische Einbindung der PAK-Dosierung auf bestehenden Anlagen kann je nach vorhandener Bausubstanz und Verfahrenstechnik unterschiedlich geschehen. In jedem Fall ist ein Kontaktraum erforderlich, der die Adsorption der Spurenstoffe an die Pulveraktivkohle ermöglicht. Dies kann in der Biologie, einem separaten Kontaktbecken (A) oder im Überstand einer evtl. vorhandenen Flockungsfiltration geschehen. Bei Dosierung in ein separates Kontaktbecken kann im Ablauf des Kontaktbeckens zusätzlich eine Sedimentationseinheit angeordnet werden (B). Die abgesetzte PAK kann somit in den Kontaktreaktor zurückgeführt und die Aufenthaltszeit der PAK dadurch erhöht werden. Bei Vorhandensein einer Flockungsfiltration kann die PAK auch in den Filterüberstand dosiert werden (C). Dadurch verkürzt sich die Kontaktzeit von PAK und Abwasser. Das Rückspülwasser der Filtereinheit wird bei allen verfahrenstechnischen Varianten in den Zulauf zur Vorklärung oder zur Belebung gegeben und anschließend mit dem Primärschlamm (PS) oder Überschussschlamm (ÜS) abgeschieden. Eine



Zugabe von Fällmittel und gegebenenfalls Flockungshilfsmittel ist zur vollständigen Abscheidung der PAK erforderlich. Bei einer vorherigen Simultanfällung zur Phosphorelimination ist eine entsprechende Reduzierung der Fällmittelmenge möglich. [3]

Eine Verfahrensstufe zur Pulveraktivkohledosierung besteht im Wesentlichen aus einem PAK-Silo, einer Dosiervorrichtung für die PAK, einem Kontaktbecken, einer Stufe zum Rückhalt der PAK und der erforderlichen Mess-, Steuer-, Regelungs- und Sicherheitstechnik. [3]

Die Lagerung der angelieferten PAK erfolgt in einem Silo. Generell besteht beim Befüllen des Silos oder der Lagerung der PAK die Gefahr von Staubexplosionen. Für den direkten Umgang mit PAK wird außerdem ein Atemschutz empfohlen. Um die gelagerte Aktivkohle aufzulockern und Verblockungen im unteren Silobereich zu vermeiden, muss über entsprechende Vorrichtungen regelmäßig Stickstoff in das PAK-Silo eingeblasen oder dieses gerüttelt werden. Im PAK-Silo ist eine Temperaturmessung zu installieren, um Glimmbrände zu erkennen. Außerhalb des PAK-Silos ist aus Gründen des Arbeitsschutzes eine O<sub>2</sub>- und CO-Messung erforderlich. Direkt unterhalb des Silos wird die Dosieranlage installiert, von wo aus die vorbereitete Aktivkohle in den Zulauf zum Kontaktraum gefördert wird. Die Dosierstation muss in Ex-Schutz-Ausführung installiert werden. [2][3]

Die PAK-Dosierung wird volumenproportional zum Zulauf in den Kontaktraum vorgeschlagen. Als Dosiervorrichtung wird eine gravimetrische Dosierung empfohlen, da diese ausreichend genau ist, um sowohl Über- als auch Unterdosierungen zu vermeiden [3]. Die PAK wird nach dem Abwiegen mittels Wasserstrahlpumpe in einen Wasserstrahl eingemischt und ins Abwasser dosiert. Die Steuerung der dosierten PAK-Menge kann entweder schrittweise anhand der aktuellen, meist stark schwankenden Zulaufmengen oder anhand eines durchschnittlichen Tagesganges erfolgen. [2]

Die Auslegung eines separaten Kontaktbeckens für eine PAK-Anlage sollte mindestens auf den Trockenwetterzufluss als Bemessungsabfluss erfolgen [3]. In Anwendungen in der Schweiz haben sich 20 Minuten für den Kontakt zwischen Aktivkohle und Abwasser als ausreichend erwiesen, wenn ein minimales Schlammalter gewährleistet wird. Dieses liegt bei der Dosierung in eine Flockungsfiltration bei ca. 12 Stunden und bei Rückführung der abgetrennten Aktivkohle in den Kontaktraum bei 1 bis 2 Tagen [2]. Die „Anleitung zur Planung und

Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW schlägt eine minimale hydraulische Aufenthaltszeit im Kontaktraum von 30 Minuten vor. [3]

Wenn eine Sedimentationseinheit vorgesehen wird, wird für die Rückführung der abgetrennten Aktivkohle in den Kontaktraum ein Rückführverhältnis von 0,5 bis 1,0 vorgeschlagen. Dadurch erhöht sich die Aufenthaltszeit der PAK im System und ihre Adsorptionskapazität wird weitgehender ausgenutzt. Durch Rückführung der Überschuss-PAK (ÜPAK) in die Belebung und den anschließenden gemeinsamen Abzug mit dem Überschussschlamm (ÜS) wird die PAK mit dem Belebtschlamm vermischt. PAK-haltiger Faulschlamm darf jedoch nicht landwirtschaftlich verwertet werden, da so die adsorbierten Mikroverunreinigungen wieder in die Umwelt gelangen würden. Daher ist eine Schlammverbrennung erforderlich. Hier kann die PAK durch ihren hohen Heizwert positiv zu einer möglichen Energierückgewinnung (Wärme oder evtl. Strom) beitragen. Insgesamt erhöht sich die Schlammmenge durch die ÜPAK um etwa 5 bis 10 %, was zu erhöhten Kosten bei der Schlammentsorgung führt. [2][3]

Die Dosiermenge der PAK hängt unter anderem von der Kohleart, dem Dosierort und einer ggf. vorgesehenen Rezirkulation der PAK ab. Üblicherweise liegt die dosierte Aktivkohlemenge in biologisch gereinigtes Abwasser bei 10 bis 20 mg<sub>PAK</sub>/l. Bei Dosierung der PAK in die Biologie erhöht sich die erforderliche Menge wesentlich. Hierzu werden aktuell Forschungsvorhaben durchgeführt, da zu diesem Verfahren kaum Erfahrungen vorliegen. [3] In jedem Fall sollten vor Umsetzung einer 4. Reinigungsstufe Versuche zu geeigneter Kohleart und Dosiermenge gemacht werden, um die besonderen Gegebenheiten einer Kläranlage richtig beurteilen zu können.

Für den Einsatz von PAK auf bestehenden kommunalen Kläranlagen sind die abrasiven und korrosiven Eigenschaften der Aktivkohle zu berücksichtigen. Alle mit der Aktivkohle in Kontakt stehenden Anlagenkomponenten müssen eine entsprechende Beständigkeit aufweisen. Bestehende Anlagenteile können entweder durch spezielle Beschichtungen verstärkt oder durch beständige Materialien wie V4A-Edelstahl, HDPE oder Beton ersetzt werden. [2]

### 3.1.2 Vor- und Nachteile

Ein Vorteil des Einsatzes von PAK zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen ist, dass durch PAK ein breites Spektrum an Mikroverunreinigungen aus dem Abwasser entfernt werden können. Dies führt zu einer signifikanten Verbesserung der Qualität des gereinigten Abwassers, was wiederum zu einer deutlichen Verbesserung der Oberflächengewässerqualität führen kann. [2]

In der Regel ist ein Verfahren zur Spurenstoffelimination mit PAK gut in eine bestehende Kläranlage zu integrieren. Es fallen keine problematischen Produkte oder Abfälle an, deren Entsorgungsweg ungeklärt wäre, und die eliminierten Spurenstoffe werden nicht nur inaktiviert bzw. transformiert, sondern durch Sorption gebunden und dadurch vollständig entfernt. Neben der effektiven Entfernung von Spurenstoffen aus dem Abwasser wird auch der DOC reduziert, das Abwasser wird entfärbt und verlässt die Kläranlage praktisch geruchslos. [2]

Nachteilig wirkt sich der um ca. 5 % erhöhte Energiebedarf der Kläranlage aus. Darüber hinaus ist der Primärenergiebedarf zur Herstellung der PAK sehr hoch. Des Weiteren erhöht sich der Schlammfall einer Kläranlage durch den Einsatz von PAK um rd. 5 bis 10 %, was wiederum die Kosten für die Schlamm Entsorgung erhöht. Hier ist zusätzlich zu beachten, dass PAK-haltiger Schlamm nicht landwirtschaftlich verwertet werden darf, da dadurch die adsorbierten Spurenstoffe nicht aus der Umwelt entfernt werden. Außerdem wirkt PAK abrasiv und korrosiv, was im Falle einer Rückführung des mit PAK versetzten Abwassers in bestehende Anlagenteile zu einem rascheren Verschleiß führen kann. [2]

In Tabelle 10 sind die Vor- und Nachteile des PAK-Einsatzes auf kommunalen Kläranlagen gegenübergestellt.

**Tabelle 10: Übersicht der Vor- und Nachteile einer PAK-Anlage**

Vorteile		Nachteile	
+	Vollständige Entfernung durch Sorption	-	erhöhter Energieverbrauch der KA um rd. 5%
+	keine problematischen Produkte oder Abfälle	-	erhöhter Schlammanfall um rd. 5% - 10%
+	Entfernung von Farb- und Geruchsstoffen	-	hoher Primärenergiebedarf zur Herstellung (rd. 18 kg <sub>CO2</sub> /kg <sub>PAK</sub> )
		-	abrasive- und korrosive Eigenschaften fördern Verschleiß
		-	höhere Schlammentsorgungskosten
		-	Landwirtschaftliche Verwertung des Schlammes nicht mehr möglich

### 3.1.3 Realisierte Anlage im In- und Ausland

In der Schweiz wurden seit Januar 2008 bis Juni 2010 Versuche zur PAK-Dosierung im halbtechnischen Maßstab gefahren. In der Pilotanlage der Eawag wurden in drei Versuchsphasen die maßgeblichen Einflussfaktoren zur PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken mit nachgeschaltetem Tuchfilter zur Abtrennung der PAK untersucht. Im Herbst 2008 und Sommer 2010 wurde auf der Schweizer Kläranlage Kloten/Opfikon über vier bzw. neun Wochen die PAK-Dosierung in den Zulauf zu einer bestehenden Flockungsfiltration getestet. Auf der Kläranlage Vidy in Lausanne wurde im Jahr 2009 für ein Jahr eine PAK-Stufe mit Dosierung in ein Kontaktbecken und Abscheidung der PAK durch Ultrafiltration betrieben. Von März 2011 bis November 2012 wurden auf der ARA Birsfelden Versuche zur PAK-Dosierung mit anschließender Abtrennung mittels Ultrafiltration gefahren. Seit März 2012 läuft auf der Kläranlage Flos in Wetzikon ein weiteres Projekt, welches die Dosierung von PAK direkt in ein Belebungsbecken untersucht. [6][7]

Für den Einsatz von PAK auf kommunalen ARA liegen aus Baden-Württemberg bereits mehr als 20 Jahre Betriebserfahrungen vor. Auf drei Kläranlagen in Albstadt-Ebingen, Albstadt-Lautlingen und Hechingen werden seit 1992 und 1999 großtechnische PAK-Anlagen zur Entfärbung von maximal 225 l/s bis 980 l/s Abwasser betrieben. Zur gezielten Elimination von Spurenstoffen werden auf den Kläranlagen Stockacher Aach, Kressbronn und Böblingen-Sindelfingen seit der

2. Jahreshälfte 2011 PAK-Anlagen für Volumenströme von 250 l/s, 265 l/s bzw. 1.000 l/s betrieben. Im Oktober 2013 wurde auf der Kläranlage Langwiese in Ravensburg eine PAK-Anlage für 1.100 l/s in Betrieb genommen. Auf der Kläranlage Mannheim ging im Jahr 2016 eine PAK-Anlage zur Behandlung von rd. 1.500 l/s in Betrieb, nachdem zuvor mehrjährige Betriebserfahrungen mit einer Teilstrom-Anlage für rd. 300 l/s gesammelt wurden. Die PAK-Anlage in Steinheule kann bereits jetzt einen maximalen Volumenstrom von 1.600 l/s behandeln und wird bis zum Jahr 2020 mit einer zweiten Straße ausgestattet. Alle Anlagen funktionieren nach dem sog. „Ulmer Verfahren“, bei welchem ein Kontaktreaktor mit nachgeschalteter Sedimentation und Filtration betrieben wird. [5]

In Nordrhein-Westfalen wurde im Februar 2011 die erste PAK-Anlage auf dem Klärwerk Buchenhofen in Betrieb genommen und seit dem zu Forschungszwecken betrieben. Die PAK wird dabei in den Zulauf einer von insgesamt 28 Filterkammern dosiert und direkt im Filterbett abgeschieden. Die Kläranlage Dülmen ist für 55.000 EW ausgelegt und seit 2016 mit einer PAK-Stufe zur Behandlung von max. 200 l/s ausgestattet. Auch hier wird nach dem „Ulmer Verfahren“ gearbeitet. Auf der Kläranlage Bartrup mit einer Auslegung von 12.400 EW ist im Frühjahr 2018 ein Kontaktbecken als PAK-Stufe in Betrieb genommen worden. Die beladene Aktivkohle wird in nachgeschalteten Fuzzy-Filtern aus dem Abwasser entfernt.[8]

## 3.2 Einsatz von granulierter Aktivkohle (GAK)

### 3.2.1 Allgemeine Beschreibung

Durch den Einsatz von Aktivkohle in granulierter Form kann, ebenso wie durch den PAK-Einsatz, eine große Bandbreite von Mikroverunreinigungen adsorptiv aus dem Abwasser entfernt werden. In der Trinkwasseraufbereitung werden persistente Stoffe bereits seit Jahrzehnten erfolgreich durch GAK-Filtration entfernt.[2]

GAK-Filter werden der biologischen Reinigungsstufe nachgeschaltet. Sie können verfahrenstechnisch an die Stelle einer Flockungsfiltration treten und gewährleisten dadurch nicht nur eine Spurenstoffelimination, sondern auch einen Suspensarückhalt. Alternativ kann ein GAK-Filter einer Filtrationsstufe nachgeschaltet werden. Dadurch wäre der Feststoffanteil im Zulauf zum GAK-Filter nahezu Null und die Konkurrenz der organischen Hintergrundmatrix um die Adsorptionskapazi-



Die beladene, ausgebaute GAK kann mit geringen Verlusten von rd. 10 bis 20 % reaktiviert und anschließend wieder eingebaut werden. Die Reaktivierungsverluste müssen mit frischer GAK aufgefüllt werden [3]. Die Reaktivierung von GAK ist deutlich weniger energieaufwendig als die Herstellung frischer Aktivkohle, der Großteil der GAK-Verlustmenge kann als Pulveraktivkohle wieder in den Handel gelangen. [2][3]

Der Mehraufwand für die Steuerung bzw. Regelung einer GAK-Filtration im Vergleich zu einer Flockungsfiltration ist sehr gering. Lediglich die Überwachung der Eliminationsleistung erfordert zusätzliche Messtechnik. Gut geeignet ist hier eine UV-Absorbanzmessung bei 254 nm im Zulauf und im Ablauf der Reinigungsstufe. Über die Differenz der Absorbanz kann auf die Verringerung der Spurenstoffe rückgeschlossen werden. Zur Kontrolle und Kalibrierung der Messung sind noch Probenahmen zur Spurenstoffanalyse im Labor erforderlich. [2][4]

Eine GAK-Filtration wird auf eine Leerbettkontaktzeit von 5 bis 30 Minuten und eine Filtergeschwindigkeit von 5 bis 15 m/h bemessen. Die Wirtschaftlichkeit von GAK-Filtern hängt wesentlich von der behandelten Wassermenge vor dem Austausch des Filtermaterials ab. Ausgedrückt wird dies in erzielbaren bzw. durchgesetzten Bettvolumina (BV). Die Erfahrungen aus Pilotversuchen belegen, dass mit einer passend gewählten Aktivkohle im Minimum zwischen 3.000 und 7.500 BV behandelt werden können. Das stoffspezifische Maximum liegt zwischen 22.000 und 32.000 BV. [2][3]

Um derart hohe durchgesetzte Bettvolumina erreichen zu können, ist eine zuverlässig und gut funktionierende Nachklärung zwingend erforderlich. Auch die erforderliche Häufigkeit der Filterspülung hängt von der Funktion der Nachklärbecken ab. Je mehr AFS und damit auch CSB aus der Nachklärung abtreibt, desto häufiger muss der GAK-Filter gespült und das Filterbett ausgetauscht werden. Entsprechend steigen auch die Betriebskosten.

### 3.2.2 Vor- und Nachteile

Die Vorteile von GAK-Filtern zur Spurenstoffelimination auf kommunalen ARA sind weitgehend identisch mit den Vorteilen der PAK-Anwendungen, die auf den Eigenschaften der Aktivkohle beruhen. Im Gegensatz zu PAK kann GAK jedoch mit leichten Verlusten regeneriert werden. Für die Regeneration wird deutlich weniger Energie benötigt, als für die Herstellung frischer Aktivkohle. Dadurch

sinken auch die Betriebskosten beim Einsatz von regenerierter GAK. Der Großteil der bei der Regeneration anfallenden Verlustmenge kann als PAK verwertet werden, was sich günstig auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz auswirkt. [2][3]

Die Energiekosten für den Einsatz von GAK-Filtern liegen etwa auf dem Niveau einer herkömmlichen Sandfiltration. Bei bereits vorhandenen Filtrationsanlagen sind sowohl der bauliche Aufwand zur Umrüstung auf GAK-Filter wie auch der Mehr-Energieverbrauch sehr gering. [2]

Ein Nachteil beim Einsatz von GAK-Filtern zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen ist, dass die erzielten Ergebnisse zu durchsetzbaren Bettvolumina und damit die Standzeit eines GAK-Filters aufgrund unterschiedlicher Abwasserzusammensetzungen und unterschiedlicher Wirkweisen der Aktivkohlesorten stark variieren. [2]

In Tabelle 11 sind die Vor- und Nachteile des Einsatzes von GAK-Filtern auf kommunalen Kläranlagen gegenübergestellt.

**Tabelle 11: Übersicht der Vor- und Nachteile von GAK-Filtern**

Vorteile		Nachteile	
+	Vollständige Entfernung durch Sorption	-	Unsicherheiten bei durchsetzbaren Bettvolumina
+	geringer baulicher- und energetischer Aufwand bei bestehenden Filtrationsanlagen	-	hoher Primärenergiebedarf zur Herstellung (rd. 18 kg <sub>CO2</sub> /kg <sub>GAK</sub> Frischkohle; rd. 9,3 kg <sub>CO2</sub> /kg <sub>GAK</sub> regenerierte Kohle)
+	Entfernung von Farb- und Geruchsstoffen		
+	nach Regeneration mit leichten Verlusten wiederverwendbar		
+	keine problematischen Produkte oder Abfälle		

### 3.2.3 Realisierte Anlagen im In- und Ausland

Im Zeitraum von Januar 2011 bis Dezember 2013 wurde in mehreren Forschungsvorhaben auf dem Klärwerk Obere Lutter der Betrieb von bis zu drei umgerüsteten Biofor-Filterzellen mit Aktivkohle getestet. Mit einem mittleren CSB-Zulauf zur GAK-Filtration von rd. 48 mg/l konnte bei einer Filtergeschwindigkeit



von 2 bis 8 m/h und einer Leerbettkontaktzeit von 75 bis 19 Minuten eine Standzeit des Filterbettes von rd. 9 Monaten erreicht werden. Dies entspricht bis zu 16.000 durchgesetzten Bettvolumina. Mittlerweile sind fünf der insgesamt zehn Biofor-Filterzellen umgerüstet und in Betrieb, sodass der Trockenwetterzufluss von 1.125 m<sup>3</sup>/h mit GAK behandelt werden kann. [8][9]

Im Juni 2011 wurde auf der Kläranlage Düren-Merken ein GAK-Filter zu Forschungszwecken in Betrieb genommen. In drei Betriebsphasen wurden drei unterschiedliche Kohlearten bei einer Filtergeschwindigkeit von ca. 7 m/h und einer Leerbettkontaktzeit von rd. 11 bis 14 Minuten miteinander verglichen. Aufgrund des hohen Feststoffanteils von im Mittel rd. 20 bis 30 mg<sub>AFS</sub>/l im Zulauf zur Filtration konnten nur etwa 4.000 bis 7.000 Bettvolumina umgesetzt werden, bevor das GAK-Filterbett ausgetauscht werden musste. [8]

Auf der Zentralkläranlage Rietberg wurden ab Oktober 2012 bis April 2013 halbertechnische Versuche zum Betrieb einer GAK-Filtration mittels DynaSand®-Anlage durchgeführt. In drei Abschnitten wurden zunächst das hydraulische Verhalten der Filter und anschließend zwei unterschiedliche Aktivkohleprodukte auf ihre Eignung zur Spurenstoffelimination geprüft. Seit dem Jahr 2014 befindet sich die Aktivkohlefiltration auf der Zentralkläranlage Rietberg im laufenden Betrieb. [8][10]

Im Januar 2013 wurden auf dem Klärwerk Gütersloh-Putzhagen zwei auf GAK umgerüstete Zellen einer Biofor-Filteranlage in Betrieb genommen. Bei einem mittleren CSB-Zulauf von rd. 37 mg/l, einer Filtergeschwindigkeit von 2 bis 10 m/h und einer Aufenthaltszeit von 11 bis 56 Minuten wurden die Filter zweimal pro Woche gespült. Es konnten 4.500 Bettvolumina durchgesetzt werden, bevor keine CSB-Elimination mehr stattfand. Insgesamt wurden während der Versuchszeit 7.000 BV durchgesetzt. [8]

Darüber hinaus wurden im ersten Quartal 2013 auf dem Klärwerk Buchenhofen zwei GAK-Filterzellen in Betrieb genommen. Eine der beiden Filterzellen wird parallel zu den übrigen Flockungsfiltrationskammern (GAK) betrieben, die zweite wird als nachgeschaltete Filtration anteilmäßig mit dem Ablauf der Flockungsfiltration beschickt (nGAK). Die Standzeit der beiden Filterzellen belief sich auf 18.000 BV für die GAK Filterzelle und 21.000 BV für die nGAK Filterzelle. Die Eliminationsraten lagen dabei für etliche Stoffe noch über 60%. Nach Definition eines Abbruchkriteriums für eine mittlere 80%ige Eliminationsrate für 5 Leitpara-

meter über den gesamten Klärprozess wurden für den GAK-Filter 22.712 BV und für den nGAK-Filter 31.247 BV bis zum Erreichen des Ziels ermittelt.

Neben den Anlagen in NRW wird seit September 2016 in Baden-Württemberg auf der Kläranlage Westerheim eine GAK-Anlage mit vorgeschalteter Sandfiltration betrieben. Die Anlage ist auf einen maximalen Volumenstrom von 22 l/s ausgelegt. Während die Sandfilter kontinuierlich betrieben werden, können die zwei separaten GAK-Filterzellen abwechselnd beschickt werden, um die Standzeit und die Spülfrequenz zu erhöhen. [5]

Darüber hinaus befindet sich derzeit auf der Kläranlage Bad-Oeynhausen, der Kläranlage Vlotho und der Kläranlage Harsewinkel weitere GAK Anlage in Planung oder Bau.

### **3.3 Einsatz von Ozon**

#### **3.3.1 Allgemeine Beschreibung**

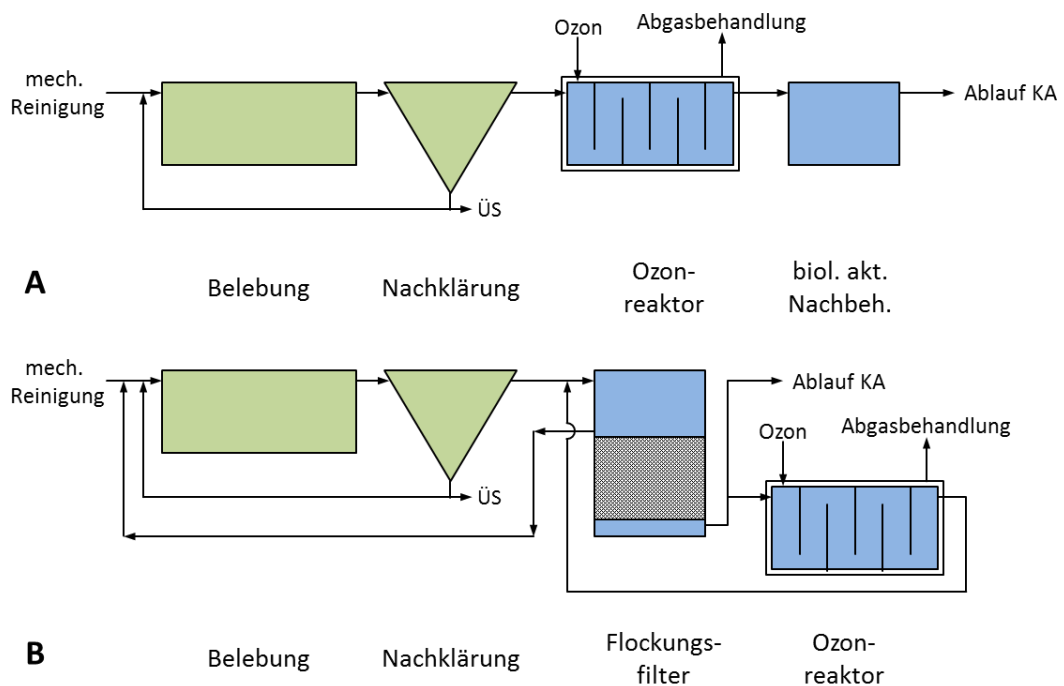
Durch Zugabe von Ozon in das Abwasser kann eine große Bandbreite von Mikroverunreinigungen oxidativ aus dem Abwasser entfernt werden. In der Trinkwasseraufbereitung wird die Ozonung seit Jahrzehnten eingesetzt, um das Wasser zu desinfizieren und von störenden Geruchs- und Geschmacksstoffen zu befreien. [2]

Eine Ozonanlage zur Mikroschadstoffentfernung wird auf einer Kläranlage der biologischen Stufe nachgeschaltet. Im Ablauf der Ozonung ist nach heutigem Kenntnisstand eine Nachbehandlung des Abwassers in einer biologisch aktiven Stufe erforderlich, um die Reaktionsprodukte der Oxidation aus dem gereinigten Abwasser zu entfernen. [3]

Die verfahrenstechnische Einbindung einer Ozonanlage auf einer kommunalen Kläranlage hängt von den baulichen Gegebenheiten ab und kann dementsprechend auf unterschiedliche Weise erfolgen. Ist eine weitere, biologisch aktive Reinigungsstufe (z.B. Flockungsfiltration oder Schönungsteich) vorhanden, kann diese als Nachbehandlung für den mit Ozon behandelten Volumenstrom dienen. Entsprechend wird der Ozonreaktor zwischen der Nachklärung und der weiteren Reinigungsstufe im Voll- oder Teilstrom betrieben. Für eine möglichst geringe organische Hintergrundbelastung und dadurch einen geringen Ozonverbrauch kann der Ozonreaktor im Teilstromverfahren im Ablauf einer Flockungsfiltration

angeordnet werden. Der mit Ozon behandelte Volumenstrom wird dabei in den Zulauf zur Flockungsfiltration zurückgegeben, um sowohl die Vorfiltration, wie auch die Nachreinigung über den Flockungsfilter zu gewährleisten. Ist weder ein Flockungsfilter noch ein Schönungsteich für die biologisch aktive Nachbehandlung vorhanden, so kann der mit Ozon behandelte Volumenstrom in die Biologie zurückgeführt werden. Die Wahl des Ozoneintragssystems ist von der verfahrenstechnischen Einbindung auf der Kläranlage unabhängig. [2][3]

Abbildung 24 zeigt schematisch die Einbindungsmöglichkeiten einer Ozonanlage auf kommunalen Kläranlagen.



**Abbildung 24: Verfahrenstechnische Varianten zur Einbindung einer Ozonanlage (Ozonreaktor A zwischen Nachklärung und biologisch aktiver Nachbehandlung und B im Teilstrom hinter der Flockungsfiltration mit Rückführung in die Filtration)**

Die Ozonanlage besteht im Wesentlichen aus einem Flüssigsauerstofftank bzw. der Sauerstoffproduktion, der Ozonerzeugung, dem Ozonreaktor, einem Restozonvernichter, der Nachbehandlung und der erforderlichen Mess-, Steuer-, Regelungs- und Sicherheitstechnik. [2]

Ozon wird mit Hilfe von Ozongeneratoren auf der Kläranlage erzeugt. Als Betriebsmittel wird flüssiger Sauerstoff (LOX, *Liquid Oxygen*), komprimierte, getrock-

nete Luft oder vor Ort aus der Umgebungsluft erzeugter Sauerstoff aus einer PSA-Anlage (*Pressure Swing Adsorption*) verwendet. Auf kleineren kommunalen ARA kommt aus Gründen der Einfachheit und Wirtschaftlichkeit i.d.R. nur LOX in Frage [3]. Im Ozongenerator werden rd. 10 M.-% des Sauerstoffes in Ozon umgewandelt. Über Diffusoren oder Injektionssysteme wird das ozonhaltige Gas in den Ozonreaktor eingebracht, wo es sich im Abwasser löst. Der Ozonreaktor muss luftdicht abgedeckt sein, um Ozonaustritte in die Umwelt zu verhindern. Der Gasraum über dem Ozonreaktor ist kontinuierlich abzusaugen und durch einen Restozonvernichter zu leiten. Aus Sicherheitsgründen ist der Ozongehalt in geschlossenen Betriebsräumen der Ozonanlage kontinuierlich zu messen. Diese Ozonmessung muss sowohl mit der Ozonanlage, als auch mit einem Alarmsystem gekoppelt sein, um das Betriebspersonal zu schützen. [3]

Als Nachbehandlung zur Elimination der Oxidationsprodukte aus dem gereinigten Abwasser können beispielsweise bereits vorhandene Filteranlagen oder Schönungsteiche in Frage kommen. Auch GAK-Filter mit zusätzlich adsorptiver Wirkung oder Wirbel- und Festbettreaktoren sind möglich. [3]

Die Steuerung des Ozoneintrags kann auf unterschiedliche Weise realisiert werden. Als Steuer- bzw. Regelgrößen hat sich die Abnahme der UV-Absorbanz (SAK) in vielen Forschungsprojekten als eine vielversprechende Regelungsgröße herausgestellt. [2]

Die Auslegung des Kontaktreaktors einer Ozonanlage sollte mindestens auf den Trockenwetterzufluss als Bemessungsabfluss erfolgen [3]. Das Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW empfiehlt in seiner „Anleitung zur Auslegung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ eine Kontaktzeit von 15 bis 30 Minuten bei Trockenwetter. Bei schneller Ozonzehrung, abhängig von der speziellen Abwassermatrix, kann die Kontaktzeit auf bis zu 10 Minuten verkürzt werden. [3]

Die erforderliche Ozondosis hängt direkt von den Abwasserinhaltsstoffen und damit von der Reinigungsleistung der vorgeschalteten Stufen ab. Ein hoher Nitrit- oder DOC-Wert im Zulauf zur Ozonanlage erhöhen die erforderliche Ozondosis und damit die Kosten. Im Zulauf zur Ozonanlage sowie der jeweiligen spezifischen Ozonzehrung. Für DOC ( $z_{\text{DOC}}$ ) liegt diese zwischen 0,6 und 0,8  $\text{mgO}_3/\text{mgDOC}$  und für Nitrit ( $z_{\text{NO}_2\text{-N}}$ ) bei 3,43  $\text{mgO}_3/\text{mgNO}_2\text{-N}$ . Über die Ozondosis kann mit dem Bemessungsabfluss die maximal erforderliche Kapazität der Ozonproduktion ermittelt werden. Analog wird über den minimalen Trockenwetterabfluss als 2h-

Mittel die minimal notwendige Ozonerzeugung ermittelt. Die Leistung der Belebung und der Nachklärung haben somit einen direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Ozonanlage. Daher ist eine weitgehende Nitrifikation im Belebungsbecken und eine zuverlässig funktionierende Nachklärung die Grundvoraussetzung für den effizienten Betrieb einer Ozonanlage. [3]

### 3.3.2 Vor- und Nachteile

Ein Vorteil des Einsatzes von Ozon zur Spurenstoffelimination ist, dass dadurch ein breites Spektrum an Substanzen effektiv aus dem Abwasser entfernt werden kann. Überdies ist eine Ozonanlage in der Regel gut in eine bestehende Abwasserreinigungsanlage integrierbar. Ihr Betrieb hat keine Auswirkungen auf die bestehenden Reinigungsstufen, sofern keine Rückführung von behandelten Volumenströmen vorgesehen wird. Darüber hinaus werden durch die desinfizierende Wirkung des Ozons pathogene Keime weitgehend eliminiert, wenn auch aufgrund der höheren Konzentrationen an Mikroorganismen und Feststoffen im Abwasser nicht so effektiv, wie in der Trinkwasseraufbereitung. [2]

Ein Nachteil des Einsatzes von Ozon auf Abwasserreinigungsanlagen ist die relativ energieintensive Ozonerzeugung. Diese muss vor Ort auf der Kläranlage geschehen, da Ozon aufgrund der Explosionsgefahr nicht in Druckflaschen abgefüllt werden kann. [2] Außerdem muss das Betriebspersonal vor Ozonaustritten geschützt werden. Dies führt zu einer aufwendigen MSR- und Sicherheitstechnik, die eine Vielzahl von Sensoren sowohl im Abwasserstrom, wie auch in den Betriebsräumen der Ozonanlage erfassen muss. [2]

Darüber hinaus wirkt Ozon als starkes Oxidationsmittel und wandelt die Abwasserinhaltsstoffe um, ohne sie aus dem Abwasserstrom zu entfernen. Es erfolgt also keine Entfernung, sondern nur eine Umwandlung der Stoffe. Die Transformationsprodukte sind i.d.R. weniger problematisch, müssen allerdings aufgrund unbekannter Auswirkungen auf Gewässer biologisch aus dem Abwasser entfernt werden. [2]

Insgesamt erhöht sich der Energieverbrauch einer Kläranlage durch die Ozonung um 10 bis 30 %. Die Betriebskosten erhöhen sich dadurch auch insgesamt um etwa 10 bis 20 %. [2]

In Tabelle 12 sind die Vor- und Nachteile einer Ozonanlage auf kommunalen Kläranlagen zusammengefasst.

**Tabelle 12: Übersicht der Vor- und Nachteile einer Ozonanlage**

Vorteile		Nachteile	
+	keine Auswirkungen auf bestehende Reinigungsstufen	-	erhöhter Energieverbrauch der KA um rd. 10% -30%
+	zusätzlich Desinfektion des Abwassers	-	hoher Primärenergiebedarf zur Herstellung (rd. 11 kg <sub>CO2</sub> /kg <sub>Ozon</sub> )
+	geringer Platzbedarf	-	umfangreiche MSR- und Sicherheitstechnik erforderlich
		-	erfordert evtl. höhere Anschlussleistung der KA
		-	Reaktionsprodukte unbekannt
		-	biologisch aktive Nachbehandlung erforderlich

### 3.3.3 Realisierte Anlagen im In- und Ausland

In der Schweiz wurden auf den Kläranlagen in Regensdorf und Lausanne ab Mai 2007 bzw. April 2009 Ozonanlagen im Pilotversuch betrieben. Die Anlage in Regensdorf behandelte maximal 250 l/s (120 l/s bei Trockenwetter) über 18 Monate, während die Anlage in Lausanne einen Teilstrom von 60 l/s über 15 Monate reinigte. Durch den Betrieb dieser Anlagen konnten wertvolle Erkenntnisse über die Auslegung, den Betrieb und die Kosten von Ozonanlagen in der Abwassertechnik erlangt werden. Auf den Abwasserreinigungsanlagen Neugut in Dübendorf wird seit März 2014 eine Ozonanlage zur Behandlung von bis zu 660 l/s betrieben. Die Kläranlage Oberwynental in Reinach betreibt seit Herbst 2016 eine Ozonanlage für bis zu 425 l/s Zufluss. [2][6]

In NRW wird seit Oktober 2009 auf der Kläranlage Bad Sassendorf eine Ozonanlage zur Behandlung von 300 bis 650 m<sup>3</sup>/h biologisch vorgereinigtem Abwasser betrieben. Eine Nachbehandlung erfolgt hier in den vorhandenen Schönungsteichen.

Seit Januar 2010 ist am Kreiskrankenhaus Waldbröl ein Membranbioreaktor mit nachgeschalteter Ozonanlage in Betrieb, die die Spurenstoffbelastung der Krankenhausabwässer vor der Zuleitung zur Kläranlage Brenzingen verringern sollen. Hier können maximal 32 m<sup>3</sup>/h behandelt werden.

Darüber hinaus wurde im Oktober 2010 auf der Kläranlage Schwerte eine Ozonanlage zu Behandlung von maximal 886 m<sup>3</sup>/h in insgesamt 192 m<sup>3</sup> Reaktorvolumen in Betrieb genommen, die in Kombination mit einer PAK-Behandlung betrieben werden kann. Wahlweise kann das mit Ozon behandelte Abwasser zur Nachbehandlung zuerst in die PAK-Stufe geleitet oder direkt in die biologische Stufe rezirkuliert werden [8].

Im Juli 2011 wurde eine weitere Kläranlage für Krankenhausabwässer in NRW fertig gestellt. Die fast 200 m<sup>3</sup>/d des Marienhospitals in Gelsenkirchen werden seit dem durch eine Membranfiltration vorgereinigt, mittels Ozon die Spurenstoffe entfernt und in einer Aktivkohlefiltration nachbehandelt [11].

Seit Oktober 2011 wird auf der Kläranlage Duisburg-Vierlinden eine zweistraßige Ozonanlage zur Behandlung des Trockenwetterzuflusses von 400 m<sup>3</sup>/h betrieben. Die beiden Straßen wurden mit unterschiedlichen Systemen zum Ozoneintrag in den Reaktor ausgerüstet, um diese beiden Systeme zu vergleichen. Zur Nachbehandlung des ozonierten Abwassers wird ein Wirbelbettreaktor betrieben [8].

In Warburg befindet sich eine Ozonanlage mit Wirbelbettreaktor als biologische Nachbehandlung seit 2016 in Betrieb. Hier wird das Abwasser von rd. 70.000 EW behandelt. [8]

Ende 2012 wurde in St. Pourcain-sur-Sioule, Frankreich, eine Anlage zur Spurenstoffelimination in Betrieb genommen. In Frankreich existiert derzeit keine gesetzliche Grundlage zur Spurenstoffelimination. Da jedoch der Neubau der gesamten Kläranlage St. Pourcain-sur-Sioule erforderlich wurde, entschied sich der Betreiber zukunftsorientiert für die Ausrüstung der neuen Kläranlage mit einer Ozonanlage zur Spurenstoffelimination. [6]

Ende 2017 wurde eine Ozonung als 4. Reinigungsstufe auf der Kläranlage Espelkamp installiert. Die Ozonung des Herstellers Xylem behandelt den Ablauf der Nachklärung. Zur biologischen Nachbehandlung ist ein Schönungsteich nachgeschaltet.

Neben den bereits umgesetzten großtechnischen Anlagen in NRW befinden sich derzeit auf der Zentralkläranlage Detmold, der Kläranlage Aachen-Soers, der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock und auf der Kläranlage Köln-Rodenkirchen weitere Anlagen zur Ozonung von biologisch vorgereinigtem Abwasser im Bau. [8]

### 3.4 Sonstige Verfahrensvarianten

Neben dem Einsatz von Aktivkohle und Ozon werden derzeit auch eine Reihe anderer Verfahrenstechniken auf ihre Eignung zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen im Labor- und halbtechnischen Maßstab getestet. Dazu gehören der Einsatz von dichten Membranen oder sogenannten *Advanced Oxidation Processes* (AOP). Darüber hinaus wird an weiteren physikalischen und oxidativen Verfahren zur Spurenstoffelimination geforscht.

#### 3.4.1 Dichte Membranen

Zu den dichten Membranverfahren zählen die Nanofiltration und die Umkehrosmose. Bei beiden Verfahren wird das zu reinigende Abwasser unter hohem Druck (> 2 bar) durch die jeweilige Membran gepresst, wobei gelöste und ungelöste Stoffe zurückgehalten werden. Die Abscheidung erfolgt bei der Nanofiltration durch Größenausschluss und bei der Umkehrosmose durch Ladungseffekte. Daher wird letzteres Verfahren vorwiegend in der Meerwasserentsalzung und der Produktion von Reinstwasser eingesetzt, während beide Verfahren zur Behandlung von industriellen Prozessströmen und in der Trinkwasseraufbereitung verwendet werden. Eine sehr gute Vorreinigung des zu behandelnden Abwassers ist beim Einsatz von dichten Membranen unabdingbar, um die Membranen vor Belagbildung und Verstopfung zu schützen. [2]

Dichte Membranen können sowohl ein breites Spektrum von Spurenstoffen sowie Keime fast vollständig zurückhalten. Allerdings fallen bis zu 25 % des behandelten Volumenstroms als Konzentrat bzw. Retentat an, für dessen Weiterbehandlung oder Entsorgung es derzeit noch keine wirtschaftlichen Lösungen gibt. Außerdem sind der Energiebedarf und damit die Kosten verglichen mit einer Aktivkohle- oder Ozonbehandlung deutlich erhöht. Daher kommen diese Verfahren derzeit für den Einsatz auf kommunalen Kläranlagen nicht oder nur in Einzelfällen in Frage. [2]

#### 3.4.2 Advanced Oxidation Processes (AOP)

Unter AOP versteht man Verfahren, bei denen durch OH-Radikale organische Inhaltsstoffe oxidiert werden. OH-Radikale sind hoch reaktiv und reagieren daher mit fast allen Abwasserinhaltsstoffen. Doch wie beim Einsatz von Ozon werden die Spurenstoffe nicht aus dem Abwasser entfernt, sondern in oft unbekannte Reaktionsprodukte umgewandelt. Da OH-Radikale nicht gelagert werden können,



müssen sie direkt im zu behandelnden Abwasser erzeugt werden. Dies kann zum Beispiel durch die UV-Bestrahlung von mit Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) oder Titan-dioxid ( $\text{TiO}_2$ ) versetztem Abwasser erfolgen.  $\text{H}_2\text{O}_2$  kann auch durch Zugabe von Ozon oder Eisen-II zur OH-Radikalbildung animiert werden. Durch die unspezifische Reaktion der OH-Radikale mit allen Abwasserinhaltsstoffen ist für eine effiziente Spurenstoffelimination eine sehr gute Vorreinigung des Abwassers erforderlich. [2]

Trotz der unspezifischen Reaktion der OH-Radikale mit allen Abwasserinhaltsstoffen können in gut vorgereinigtem Abwasser viele Spurenstoffe weitgehend eliminiert werden. Jedoch liegen bisher nur wenige Untersuchungen zur (Öko)Toxizität des behandelten Abwassers vor. Außerdem sind der Energiebedarf und damit auch die Kosten für AOP deutlich höher als z.B. bei einer Ozonung. Daher kommen AOP für kommunales Abwasser kaum in Frage. Für industrielles Abwasser kann allenfalls eine Kombination von Ozon und  $\text{H}_2\text{O}_2$  durch die verstärkte OH-Radikalbildung in Frage kommen, um besonders persistente Abwasserinhaltsstoffe zu eliminieren. [2]

### 3.4.3 Weitere Verfahren

Zur Spurenstoffelimination wurden auch nachgeschaltete biologische Verfahren sowie die Fällung/Flockung untersucht. Beide Verfahren werden jedoch bereits auf den meisten kommunalen ARA eingesetzt und bewirken erfahrungsgemäß keine ausreichende Spurenstoffelimination. Dagegen entfernen diverse untersuchte Adsorptionsmittel ebenso wie die UV-Bestrahlung einige Spurenstoffe sehr gut aus dem Abwasser. Hier fehlt jedoch die erforderliche Breitbandwirkung für einen effektiven Einsatz auf kommunalen Kläranlagen. Die Nanotechnologie und die Behandlung mit Ultraschall sind derzeit im Interesse der Forschung, jedoch fehlen hier noch Erfahrungen, die eine Aussage über das Potential dieser Verfahren ermöglichen. Zuletzt besteht neben Ozon und OH-Radikalen auch die Möglichkeit der Oxidation mit Chlor bzw. Chlordioxid oder Ferrat. Chlor hat sich jedoch als ungeeignet für den Einsatz auf kommunalen ARA herausgestellt, da es keine Breitbandwirkung hat und durch die große erforderliche Menge eine relativ große Menge an problematischen Nebenprodukten erzeugt. Ferrat wurde dagegen erst vor kurzem für die Behandlung von Abwasser entdeckt. Das sechswertige Eisen reagiert ähnlich wie Ozon, aber weniger stark, mit bestimmten funktionellen Gruppen und wirkt desinfizierend, ebenfalls wie Ozon. Bei der Reaktion zerfällt Ferrat

in dreiwertiges Eisen, dass auf vielen kommunalen Kläranlagen als Mittel für die chemische Phosphorfällung ins Abwasser dosiert wird. Dieses Verfahren ist sehr vielversprechend, jedoch wurde es erst im Labormaßstab getestet, sodass Aussagen über Effektivität oder Wirtschaftlichkeit noch nicht getroffen werden können.

[2]

## 4. Planungs- und Bemessungsgrundlagen

### 4.1 Örtliche Gegebenheiten

Bei der Betrachtung einer weitergehenden Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination spielen die Gegebenheiten vor Ort eine besondere Rolle. Für die Kläranlage Frechen ist folgendes herauszustellen:

- Entlang des Frechener Bachs sollen zukünftig Maßnahmen zur Renaturierung erfolgen. Dazu ist der Bau eines Fahrradweges entlang des renaturierten Frechener Bachs geplant. Deswegen kann die freie Fläche auf der anderen Seite der Holzstraße für den Neubau einer weiteren Verfahrensstufe nicht verwendet werden.
- Eine Membranfiltration ist auf der Kläranlage nicht vorhanden und auch nicht geplant.
- Eine mögliche Fläche für den Neubau einer weiteren Verfahrensstufe befindet sich nordöstlich der Nachklärbecken (siehe roter Bereich in Abbildung 25). Allerdings verlaufen, über einem größten Teil der Fläche, 380 kV Hochspannungsleitungen. Im Rahmen möglicher Baumaßnahmen ist dies zu berücksichtigen.



Abbildung 25: Darstellung der zu bebauenden Fläche (ELWAS-Web)



Abbildung 26: Möglicher Bereich für den Neubau einer weiteren Verfahrensstufe

- Eine Behandlungsstufe nach der Nachklärung (z.B. Schönungsteich, Filtration o.ä.) ist nicht vorhanden.
- Derzeit wird der entwässerte Schlamm der Kläranlage Frechen thermisch in der Mitverbrennung entsorgt bzw. verwertet. Sollte zukünftig eine PAK-Dosierung stattfinden, wird sich der Schlammanfall auf der KA erhöhen. Deswegen ist für die PAK-Variante eine Erhöhung der Kosten vorzusehen. Gleichzeitig würden sich jedoch die thermischen Eigenschaften des Schlammes durch die PAK verbessern.

## 4.2 Förderprogramm

Die NRW-Bank gewährt im Zuge des Förderprogramms „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II (ResA II)“ Zuwendungen für die Umsetzung von fortschrittlichen Reinigungsverfahren. Dabei werden Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination durch Ozon- oder Aktivkohleanlagen, UV-Verfahren oder anderer fortschrittlicher Technologien mit vergleichbarer Reinigungsleistung mit einer Zuwendung in Höhe von 70% der Herstellkosten in den Antragsjahren 2017, 2018 und 2019 bezuschusst. Ab dem Antragsjahr 2020 ist eine Förderung in Höhe von 50% der Herstellkosten möglich. Förderfähig sind dabei die Anlagen selbst, einschließlich der dazugehörigen betrieblichen Einrichtungen und notwendige Ausgaben für die Ausrüstung und den Einbau der mit der Technologie verbundenen Ausrüstungsgegenstände und Investitionen.

Eine Zuwendung der Maßnahmen zur Spurenstoffelimination auf der KA Frechen ist grundsätzlich möglich. Im Rahmen der vorliegenden Studie werden allerdings die anfallenden Investitionskosten ohne Fördermittel berücksichtigt.

## 4.3 Wesentliche Stoffeigenschaften

Die Spurenstoffeliminationsleistungen der einzelnen Verfahren variieren in Abhängigkeit der betrachteten Spurenstoffe.

Mit der Ozonung kann i.d.R. ein breites Spektrum an Mikroschafstoffen entfernt werden. Gut werden beispielsweise Carbamazepin, Diclofenac, hormonaktive Substanzen (z.B. Estron, Estradiol) und Antibiotika (z.B. Sulfamethoxazol, Clarithromycin) eliminiert. Schlechter ist die Eliminationsleistung für Röntgenkontrastmittel, einige Herbizide (z.B. Diuron) und Ibuprofen. Das Monitoring zur Da-

tenverdichtung zeigte, dass die Bromidkonzentration im Ablauf der KA-Frechen hoch ist (270 µg/l). Durch die Ozonbehandlung kann Bromid zu kanzerogenem Bromat oxidiert werden. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird die Variante zur Errichtung einer Ozonanlage trotzdem betrachtet. Sollte zukünftig die Umsetzung dieser Variante in Frage kommen, sollte eine Einzelfallbewertung der Bromatbildung durchgeführt werden.

Mit Aktivkohle kann ebenfalls ein breites Spektrum an Mikroverunreinigungen aus dem Abwasser entfernt werden. Gut werden Carbamazepin, Benzotriazol und Diclofenac adsorbiert. Als mittelmäßig ist die Adsorption von einigen Antibiotika und Röntgenkontrastmitteln an Aktivkohle einzustufen.

Im Rahmen des Monitorings zur Datenverdichtung wurden die Parameter, welchen gemäß „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW als Indikatorsubstanzen bezeichnet werden, analysiert. Diese Stoffe werden zur Bewertung der Reinigungsleistung verwendet (siehe Tabelle 13). Zusätzlich zu diesen Parametern wurde Terbutryn und die Östrogene Aktivität beprobt und untersucht.

Für die im Ablauf der Kläranlage Frechen am meisten enthaltenen Spurenstoffen Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol und 1H-Benzotriazol scheint somit zunächst die Nutzung von Aktivkohle Vorteile aufzuweisen. Ergänzend ist die Adsorbierbarkeit von Clarithromycin und Sulfamethoxazol an Aktivkohle als mittelmäßig einzustufen, so dass letztendlich der Einsatz von PAK oder GAK auf der KA Frechen geeignet erscheinen.

**Tabelle 13: Eliminierbarkeit von Spurenstoffen in Abhängigkeit des Verfahrens [3]**

Stoff	Entfernbarkeit mittels Ozon	Entfernbarkeit mittels PAK/GAK
<b>1H-Benzotriazol</b>	mittel	gut
<b>Carbamazepin</b>	gut	gut
<b>Diclofenac</b>	gut	gut
<b>Metoprolol</b>	mittel	gut
<b>Clarithromycin</b>	gut	mittel
<b>Sulfamethoxazol</b>	gut	mittel

#### 4.4 Auslegungswassermengen

Detaillierte Vorgaben zur Bemessung einer Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination existieren derzeit nicht. Gemäß Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination [3], sind die Auslegungsparameter individuell zu prüfen und mit der Genehmigungsbehörde abzustimmen sofern

1. das Gewässer unterhalb der KA besondere sensible Eigenschaften bzw. Nutzungen aufweist (z. B. FFH Gebiete, Lachslaichgewässer o. a.) oder
2. das Gewässer eine geringe Wasserführung aufweist (z.B. Verhältnis Einleitungsmenge zum mittleren Niedrigwasserabfluss  $Q/MNQ > 1/3$ ) oder
3. der Kläranlagenablauf überdurchschnittliche Mikroschadstoffbelastungen beinhaltet oder
4. das Gewässer unterhalb der Kläranlageneinleitung der oberflächenwassergestützten Trinkwassergewinnung dient oder
5. das Ergebnis des WRRL-Monitorings eine Beeinträchtigung der biologischen Qualitätskomponenten zeigt.

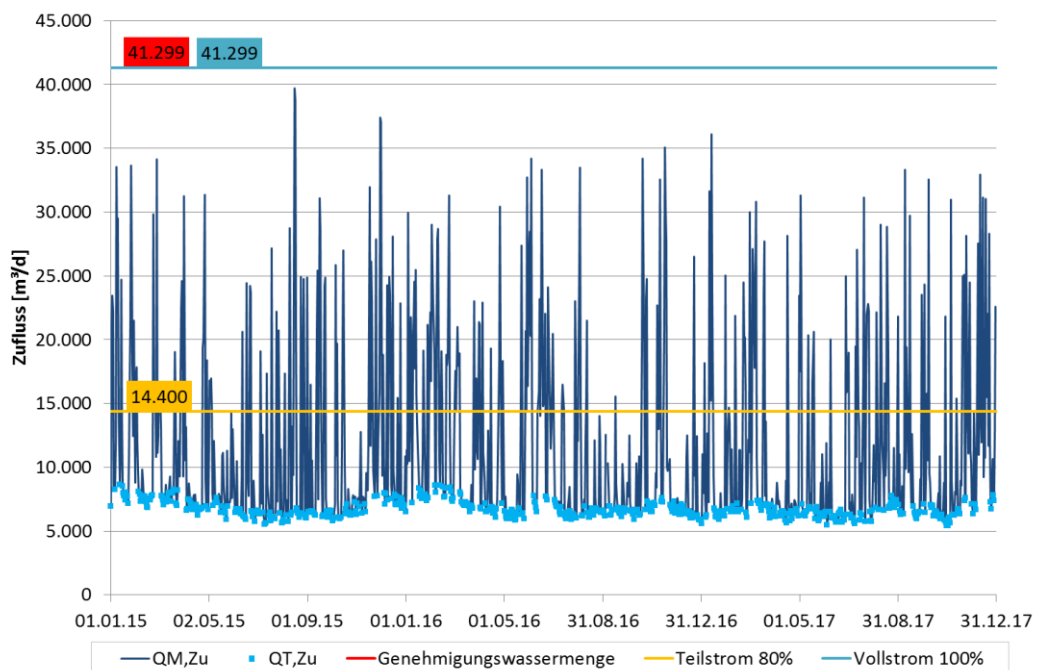
Im betrachteten Anwendungsfall sind die unter Punkte 2 und unter Punkt 5 aufgeführten Restriktionen gegeben. Gemäß Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination sind bei Ermittlung der Auslegungswassermenge folgende Punkte zu berücksichtigen [3]:

1. Läge keine der oben genannten Restriktionen vor, wäre die Anlage zur Spurenstoffelimination als Teilstrombehandlung auf den maximalen stündlichen Trockenwetterabflusses auszulegen.
2. Bei einem reinen Trennsystem (ohne Mischwasseranteil) wäre eine Vollstrombehandlung anzustreben.
3. Bei einem Trennsystem mit begrenztem Mischwasseranteil wäre eine Teilstrombehandlung je nach Mischwasseranteil mit mehr als 90% der Jahresabwassermenge zu berücksichtigen.

4. Sollte die Jahresschmutzwassermenge weniger als 70% der Jahresabwassermenge betragen (hoher Mischwasseranteil), müsste die Auslegungswassermenge mindestens 70% der Jahresabwassermenge betragen. Es wird nicht empfohlen eine Auslegungswassermenge unter 70% der Jahresabwassermenge anzunehmen.

Auf der Kläranlage Frechen sollen bei einer möglichen Umsetzung einer Spurenstoffelimination nach Vorgabe des Erftverbandes mindestens 80 % der Jahresabwassermenge in der Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination behandelt werden. Außerdem soll im Rahmen der vorliegenden Studie die Möglichkeit einer Vollstrombehandlung der Abwassermenge untersucht werden. Deswegen ist im Fall der KA Frechen, eine weitere Überprüfung der Abwassermenge in Anlehnung an den oben benannten Punkten nicht erforderlich. Somit wird die Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination auf der KA Frechen für folgende Wassermengen ausgelegt (siehe Abbildung 27):

- Teilstrombehandlung 80%: 14.400 m<sup>3</sup>/d bzw. 600 m<sup>3</sup>/h
- Vollstrombehandlung 100%: 41.304 m<sup>3</sup>/d bzw. 1.721 m<sup>3</sup>/h



**Abbildung 27: Auslegungswassermenge für die Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination**



## 5. Variantenuntersuchung für die Kläranlage Frechen

Im Folgenden werden, aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Platzangebots auf der KA Frechen, folgende drei verfahrenstechnische Varianten zur Spurenstoffelimination ausgearbeitet:

1. Variante 1: Pulveraktivkohledosierung (PAK) in Kontaktbecken und Nachbehandlung mit einer Tuchfiltration
2. Variante 2: Filtration mit granulierter Aktivkohle (GAK)
3. Variante 3: Ozondosierung und Nachbehandlung mit einer kontinuierlichen beschickten Sandfiltration

Alle weiteren Verfahrensvarianten (z.B. Membranen, AOP, etc.), so vielversprechend sie auch hinsichtlich ihrer Eliminationsleistungen sein mögen, binden entweder deutlich mehr Kapital oder bedürfen weiterer Forschungen, bevor sie großtechnisch für den Dauerbetrieb in Betracht kommen.

Alle drei Varianten sind der Nachklärung nachgeschaltet und werden sowohl für eine Teilstrom- als auch für eine Vollstrombehandlung ausgelegt und miteinander verglichen. Bei der Teilstrombehandlung wird eine maximale Auslegungswassermenge von 600 m<sup>3</sup>/h, entsprechend 14.400 m<sup>3</sup>/d angenommen. Die über die Bemessungswassermenge hinausgehende Abwassermenge wird abgeschlagen und in den Frechener Bach geleitet. Bei der Vollstrombehandlung wird die gesamte erlaubte Einleitungswassermenge von 1.400 m<sup>3</sup>/h entsprechend 38.400 m<sup>3</sup>/d angenommen.

Zur Realisierung einer Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination kann, bei einigen der oben genannten Varianten, die Errichtung eines Hebewerks erforderlich sein. Dafür wird zunächst das vorhandene hydraulische Gefälle im Ablaufbereich überprüft. Der Wasserstand im Nachklärbecken (Überlaufkante) liegt bei ca. +60,50 m ü. NN. Da der Frechener Bach im Prinzip lediglich aus dem Kläranlageablauf gespeist wird, sind Informationen über den Wasserstand im Bach nicht vorhanden. Deswegen wird der Wasserstand im Ablaufschacht für die Berechnung des hydraulischen Gefälles verwendet. Der Wasserstand im Ablaufschacht liegt bei ca. +57,80 m ü. NN (siehe Abbildung 28). Daraus ergibt sich ein hydraulisches Gefälle zwischen der Nachklärung und dem Ablaufschacht von ca. 2,7 m.



**Abbildung 28: Höhenbestimmung am 06.12.2018 im Ablaufbereich auf der KA Frechen**

Zur Realisierung der Variante 1 ist das hydraulische Gefälle von ca. 2,7 m ausreichend. Zur Realisierung der Variante 2 und 3 wird ein Hebwerk benötigt. Auf Grund der Langlebigkeit und Robustheit wird dafür ein Schneckenpumpwerk bestehend aus 2+1 Wasserförderschnecken vorgesehen. Somit wird eine Reserve-Pumpe berücksichtigt. Die Größe der Wasserförderschnecken sowie die Förderhöhe werden in Abhängigkeit der jeweiligen Varianten sowie der zugehörigen Auslegungen und Anordnungen angepasst.

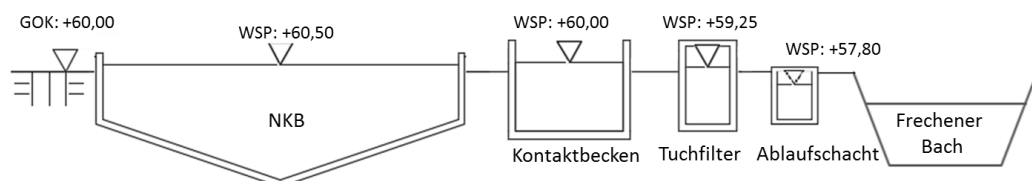
**5.1 Variante 1: Pulveraktivkohledosierung (PAK) in Kontaktbecken und Nachbehandlung mit einer Tuchfiltration**

Bei einer Spurenstoffelimination mit Pulveraktivkohle (PAK) wird die PAK in ein Kontaktbecken dosiert, welches mit mechanisch-biologisch gereinigtem Abwasser beschickt wird. Die Abscheidung der PAK aus dem Abwasser erfolgt durch eine Tuchfiltration. Abbildung 29 stellt die Ausführung eines Mecana-Tuchfilters exemplarisch dar. Die Filter werden in ein Betonbecken eingebaut.



**Abbildung 29: Tuchfilter [Quelle Mecana Umwelttechnik]**

Das vorhandene hydraulische Gefälle zwischen der Nachklärung und dem Ablaufschacht ( $\Delta h = \text{ca. } 2,7 \text{ m}$ ) ist ausreichend groß, um ein Kontaktbecken sowie eine Tuchfiltration ohne zusätzliches Pumpwerk zu integrieren. In Abbildung 30 ist ein vereinfachter hydraulischer Längsschnitt der notwendigen Bauteile dargestellt.



**Abbildung 30: Hydraulischer Längsschnitt der Variante 1**

Eine PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken (KB) und die dafür erforderliche Filtration hätten einige direkte und indirekte Auswirkungen auf den Betrieb der anderen Verfahrensstufen auf der Kläranlage Frechen. Beim PAK-Einsatz ist ein um ca. 5 – 10 % erhöhter Schlammfall zu beachten, der sowohl von den Schlamm-pumpen, als auch von der Schlammbehandlung bewältigt werden muss. Darüber hinaus resultiert aus der Rückführung des bei der Filterspülung anfallenden Schlammwassers in den Zulauf zur Biologie eine kurzzeitig erhöhte hydraulische Belastung für die Belebungsbecken und die Nachklärung. Bei einer Tuchfiltration muss mit ca. 8 m<sup>3</sup>/h Spülabwasser gerechnet werden. Dies entspricht einer hydraulischen Mehrbelastung der Anlage von rd. 0,5 % bezogen auf  $Q_{\max}$ . Nachfolgend wird vorausgesetzt, dass der zusätzliche Schlammstrom mit der vorhandenen Verfahrenstechnik behandelt werden kann und keine zusätzlichen Kläranlagenanpassungen erforderlich sind. Unberücksichtigt bleiben in diesem Zusammenhang auch ggf. erforderliche Ertüchtigungen des Bestandes, welche ggf. bei Nutzung der abrasiver Pulveraktivkohle erforderlich würden.

#### 5.1.1 Dimensionierung Teilstrombehandlung

Das als Rundbecken konzipierte Kontaktbecken wird auf eine maximale Wassermenge von 600 m<sup>3</sup>/h sowie eine Kontaktzeit von 30 Minuten ausgelegt. Somit ist ein Kontaktbeckenvolumen von ca. 300 m<sup>3</sup> erforderlich. Das Kontaktbecken wird in Stahlbetonbauweise ausgeführt. Es weist eine Tiefe von ca. 5 m und ein Durchmesser von ca. 10 m auf. Im Kontaktbecken werden zwei Rührwerke berücksichtigt.

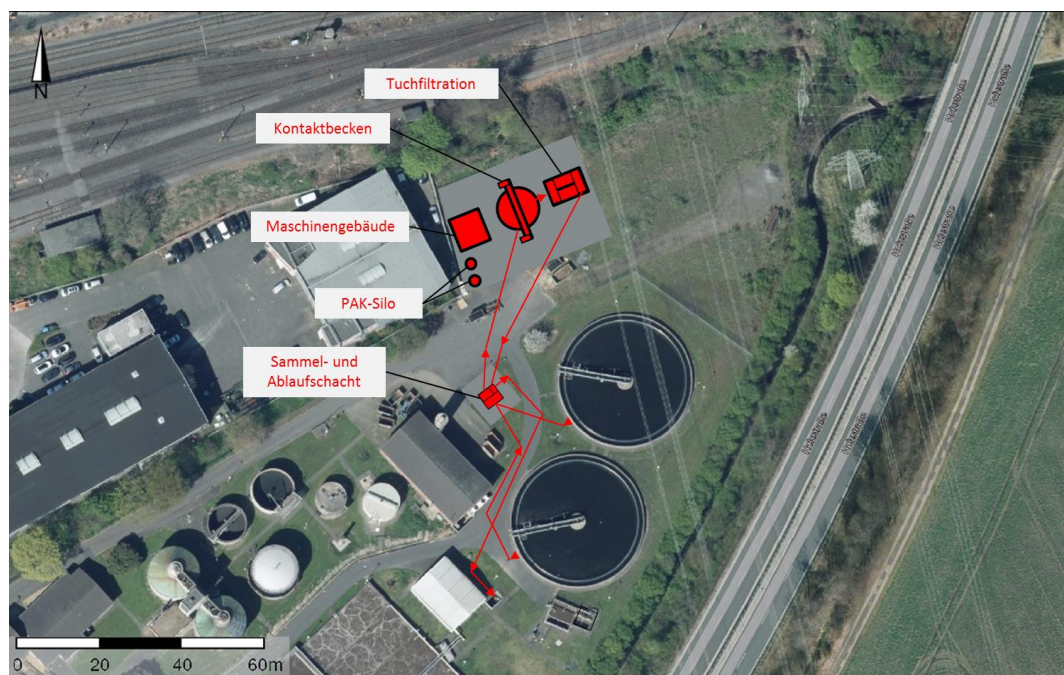
Die Auslegung der Tuchfiltration für die Teilstrombehandlung (600 m<sup>3</sup>/h) erfolgte am Beispiel zweier SF 8/40 Tuchfilters der Firma Mecana Umwelttechnik. Die gesamte Filterfläche beträgt rd. 80 m<sup>2</sup>.

Das Bauwerk für die Tuchfiltration wird mit 2 Filterkammern ausgeführt. Eine Filterkammer hat eine Grundfläche von ca. 6,0 m<sup>2</sup>. Die Außenmaße der Filtration mit Zulauf- und Ablaufrinne betragen ca. 9 m Länge und ca. 6 m Breite. Für das bei der Filterspülung anfallende Spülabwasser werden Rohrleitungen verlegt, welche das Rückspülwasser gesammelt in den Zulauf zur Belebung zurückführen.

Über die neu zu installierende PAK-Dosierleitung wird die Pulveraktivkohle in den Zulauf des Kontaktbeckens dosiert. Die Dosierung der PAK erfolgt volumenproportional zum Zufluss des Kontaktbeckens. Es wird eine PAK-Dosierung von

10 mg/l angenommen. Bezogen auf die behandelbare Abwassermenge von rd. 3.405.811 m<sup>3</sup>/a resultiert eine erforderliche Pulveraktivkohlemenge von rd. 35 t/a. Zur Lagerung der PAK werden zwei Silos gebaut. Die Silos werden so ausgelegt, dass pro Silo eine LKW-Ladung PAK eingelagert werden kann. Es wird Standard-Silogröße mit 70 m<sup>3</sup> Nutzvolumen installiert.

In Abbildung 31 ist die Anordnung der notwendigen Bauteile auf der Karte dargestellt.



**Abbildung 31: Anordnung der erforderlichen Bauwerke für Variante 1 (PAK) bei Teilstrombehandlung auf der KA Frechen**

### 5.1.2 Dimensionierung Vollstrombehandlung

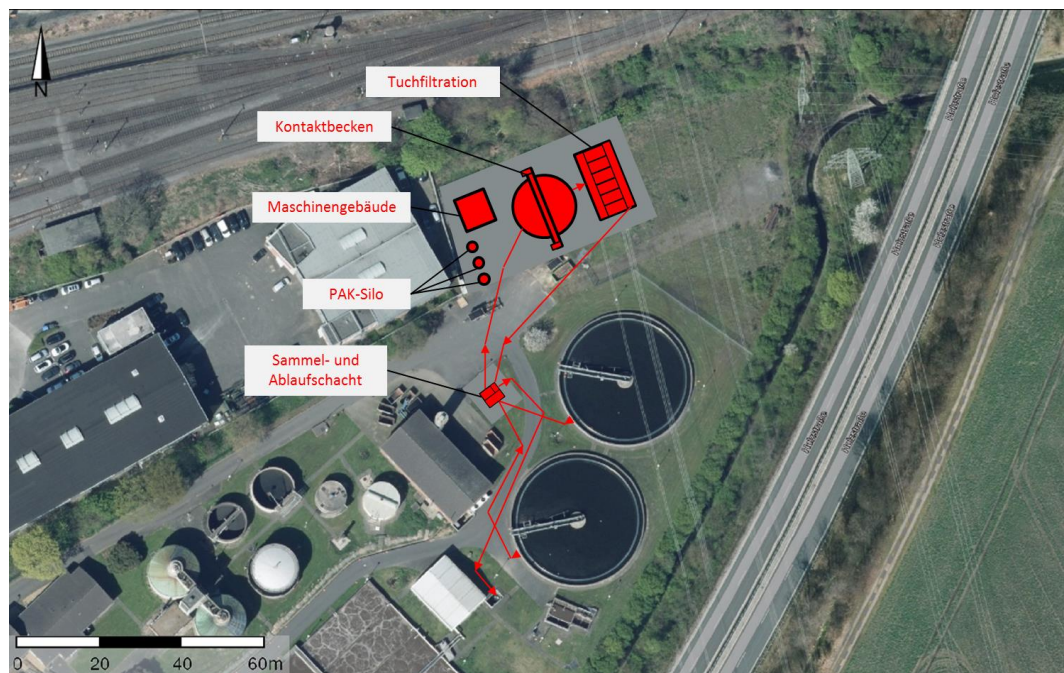
Bei einer Vollstrombehandlung wird ein Kontaktbecken analog wie bei der Teilstrombehandlung dimensioniert. Das Becken wird für eine maximale Wassermenge von 1.724 m<sup>3</sup>/h und eine Kontaktzeit von 30 Minuten ausgelegt. Somit ist ein Kontaktbeckenvolumen von ca. 850 m<sup>3</sup> erforderlich. Daraus ergeben sich eine Beckentiefe von ca. 5 m und ein Durchmesser von ca. 15 m.

Die Auslegung der Tuchfiltration erfolgte am Beispiel eines SF 8/40 Tuchfilters der Firma Mecana Umwelttechnik. Dabei wurden sechs Filter mit einer gesamten Filterfläche von rd. 240 m<sup>2</sup> berücksichtigt. Das Bauwerk für die Tuchfiltration wird daher mit 6 Filterkammern ausgeführt. Eine Filterkammer hat eine Grundfläche

von ca. 6,0 m<sup>2</sup>. Die Außenmaße der Filtration mit Zulauf- und Ablaufrinne betragen ca. 9 m Länge und ca. 17 m Breite.

Die Dosierung der PAK erfolgt volumenproportional zum Zufluss des Kontaktbeckens. Es wird eine PAK-Dosierung von 10 mg/l angenommen. Daraus resultiert eine erforderliche Pulveraktivkohlemenge von rd. 41 t/a. Zur Lagerung der PAK werden drei Silos mit einer Standard-Silogröße von 70 m<sup>3</sup> Nutzvolumen installiert.

In Abbildung 32 ist die Anordnung der notwendigen Bauteile auf der Karte dargestellt.



**Abbildung 32: Anordnung der erforderlichen Bauwerke für Variante 1 (PAK) bei Vollstrombehandlung auf der Kläranlage Frechen**

### 5.1.3 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante 1 (PAK-Dosierung in Kontaktbecken) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Frechen mit der Nachbehandlung mittels einer Tuchfiltration wurden auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen Angebotspreisen, vorliegenden Preisfragen bei Herstellern/Lieferanten und Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Neubau eines Kontaktbeckens inkl. Rührwerk und Bedienbrücke
- Neubau einer Tuchfiltration
- Neubau einer Rohrleitung für die Rückführung des Rückspülwassers aus den Filtern
- Errichtung von PAK-Silo einschl. Dosierstation, Dosierleitungen und Schaltanlage
- Neubau eines Maschinengebäudes
- Errichtung einer neuen Niederspannungsunterverteilung (NSUV)
- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS

Bei den Betriebskosten wurden die anfallenden Kosten für Energie, Betriebsmittel, Schlamm Entsorgung, Spurenstoffanalyse, Wartung und Personal mit berücksichtigt. Darüber hinaus wurden zu erwartende Einsparungen durch verringerte CSB-Ablaufwerte in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes (PKBW) und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung für Schlamm Entsorgung und Wartung von 2,0 % angesetzt. Die Kostensteigerungen für die Energiekosten werden mit 3,0 %, für PAK mit 1,0 % und für Personal mit 0,5 %.

In Tabelle 14 sind der Projektkostenbarwert über 30 Jahre und die zugehörigen Jahreskosten sowie die spezifischen Kosten für eine Aktivkohledosierung in einem Kontaktbecken mit anschließender Tuchfiltration für die Teilstrom- sowie Vollstrombehandlung aufgelistet. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit noch nicht endgültig geklärten Zukunft bezüglich der Gesetzeslage wird zusätzlich ein Abschreibungszeitraum von 15 Jahren betrachtet. Als Preis für die benötigte Energie wird ein Strompreis von 0,21 €/kWh angesetzt.

**Tabelle 14: Zusammenstellung des Projektkostenbarwerts für Variante 1 PAK in KB mit Tuchfiltration**

	Variante 1 (Teilstrom)	Variante 1 (Vollstrom)	
	PAK-KB mit Tuchfiltration	PAK-KB mit Tuchfiltration	
<b>Herstellkosten</b>	<b>3.400.000</b>	<b>5.540.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 15 Jahren</b>	1.035.300	1.963.500	€ brutto
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 10 Jahren</b>	301.070	445.060	€ brutto
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 20 Jahren</b>	301.070	445.060	€ brutto
<b>Barwert Reinvestitionen</b>	<b>1.086.000</b>	<b>1.896.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Energiekosten</b>	7.800	12.100	€/a
<b>Barwert Energiekosten</b>	<b>234.000</b>	<b>363.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Betriebsmittel</b>	54.600	65.600	€/a
<b>Barwert Betriebsmittel</b>	<b>1.226.000</b>	<b>1.473.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Spurenstoffanalytik</b>	30.700	30.700	€/a
<b>Barwert Spurenstoffanalytik</b>	<b>689.000</b>	<b>689.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Wartungskosten</b>	54.600	93.600	€/a
<b>Barwert Wartungskosten</b>	<b>1.413.000</b>	<b>2.423.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Personalkosten</b>	60.000	60.000	€/a
<b>Barwert Personalkosten</b>	<b>1.258.000</b>	<b>1.258.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Mehrkosten Schlamm Entsorgung</b>	16.700	20.000	€/a
<b>Barwert Schlamm Entsorgung</b>	<b>432.000</b>	<b>518.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Einsparung Abwasserabgabe</b>	-85.400	-85.400	€/a
<b>Barwert Einsparung Abwasserabgabe</b>	<b>-2.210.000</b>	<b>-2.210.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>PKBW Kosten</b>	<b>7.528.000</b>	<b>11.950.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>mittlere Jahreskosten</b>	<b>384.000</b>	<b>610.000</b>	<b>€/a</b>
<b>spezifische Kosten</b>			
je m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	0,11	0,15	€/m <sup>3</sup>
je Einwohner und Jahr	7,68	12,20	€/(EW·a)

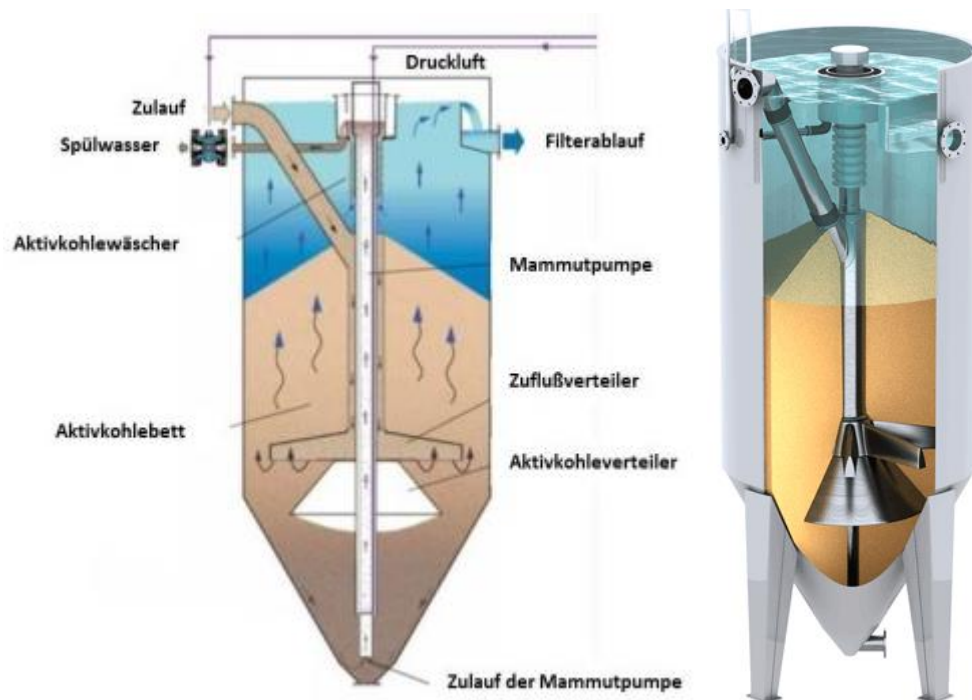
Für einen Zeitraum von 15 Jahren beträgt der PKBW ca. 5,4 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von ca. 451.000 €/a. Die spezifischen Kosten berechnen sich bei einer mittleren jährliche Abwassermenge von ca. 3,4 Mio. m<sup>3</sup>/a und einer mittleren Belastung von ca. 50.000 EW zu 0,13 €/m<sup>3</sup> bzw. 9,02 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen nach 10 Betriebsjahren sind in diesen Kosten enthalten. Für den Fall einer Vollstrombehandlung steigt der PKBW um rd. 57 %. Die spezifischen Kosten steigen um rd. 30 %, je m<sup>3</sup> behandeltes Abwasser, sowie um rd. 56 % pro Einwohner und Jahr.



## 5.2 Variante 2: Filtration mit granulierter Aktivkohle (GAK)

Auf der Kläranlage Frechen kommt grundsätzlich auch die Abwasserfiltration mit granulierter Aktivkohle in Frage. Da auf der Kläranlage keine Filtration vorhanden ist, erfordert diese Verfahrensvariante zur Spurenstoffelimination den Neubau eines Raumfilters. Die Wahl fällt hierbei auf kontinuierlich beschickte Filtereinsätze. Im Vergleich zu herkömmlichen, diskontinuierlich gespülten GAK-Filteranlagen bieten die kontinuierlich gespülten Filter mehrere Vorteile. Eine Beschickung der Filter ist auch während der Filterspülung möglich. Darüber hinaus muss die Kläranlage durch die kontinuierliche Spülung keine hydraulischen Stoßbelastungen durch Spülwasser aufnehmen. Weiterhin werden keine Spülwasserpumpen benötigt. Stattdessen bedienen sich die kontinuierlich beschickten Filter einer integrierten Mammutpumpe zur Spülung des Filtermaterials. Durch die kontinuierliche Laufzeit sind auch keine Spitzen beim Strombedarf zu erwarten. Durch die erhöhte Spüldauer ist aber ein leichter Anstieg der Energiekosten im Vergleich zum herkömmlichen GAK-Filter zu erwarten. Diese werden allerdings durch den geringeren Personalaufwand und reduzierte Wartungskosten ausgeglichen. Weiterhin sind für eine kontinuierlich gespülte GAK-Filter-Anlage wesentlich weniger Antriebe und Messinstrumente nötig, was den Betriebs- und Instandhaltungsaufwand erheblich verringert.

In Abbildung 33 wird beispielhaft eine kontinuierlich gespülte Filteranlage des Typs DynaSand® der Firma Nordic Water GmbH dargestellt.

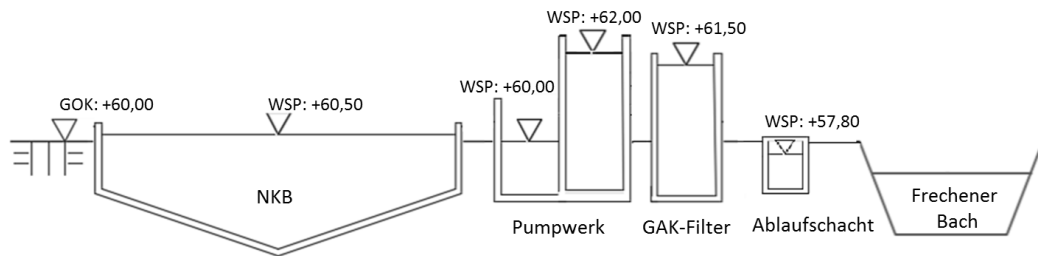


**Abbildung 33: Kontinuierlich beschickter GAK-Filter des Typs DynaSand® der Firma Nordic Water GmbH [10]**

Eine GAK-Filtration hätte geringe Auswirkungen auf den Betrieb der anderen Verfahrensstufen der Kläranlage Frechen. Durch die Filtration anfallendes Spülwasser muss in eine vorangehende Reinigungsstufe, wie z.B. in das Belebungsbecken, zurückgeführt werden. Hierbei fallen rd.  $1-1,5 \text{ m}^3 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Filter})$  Spülwasser an.

Um die Reinigungsstufe durchfließen zu können, muss das Abwasser aus dem Ablauf der Nachklärung mittels eines Hebwerks angehoben werden. Über ein Schachtbauwerk sowie eine neu zu installierende Rohrleitung wird der Ablauf der Nachklärung im Freigefälle zum Hebewerk geleitet. Die Ausführung erfolgt redundant. Unter Berücksichtigung der nachfolgend gewählten Beckengeometrie, Platzierung sowie der Druckverluste wird eine Förderhöhe von 2 m gewählt.

In Abbildung 34 wird ein vereinfachter hydraulischer Längsschnitt der notwendigen Bauteile skizziert.



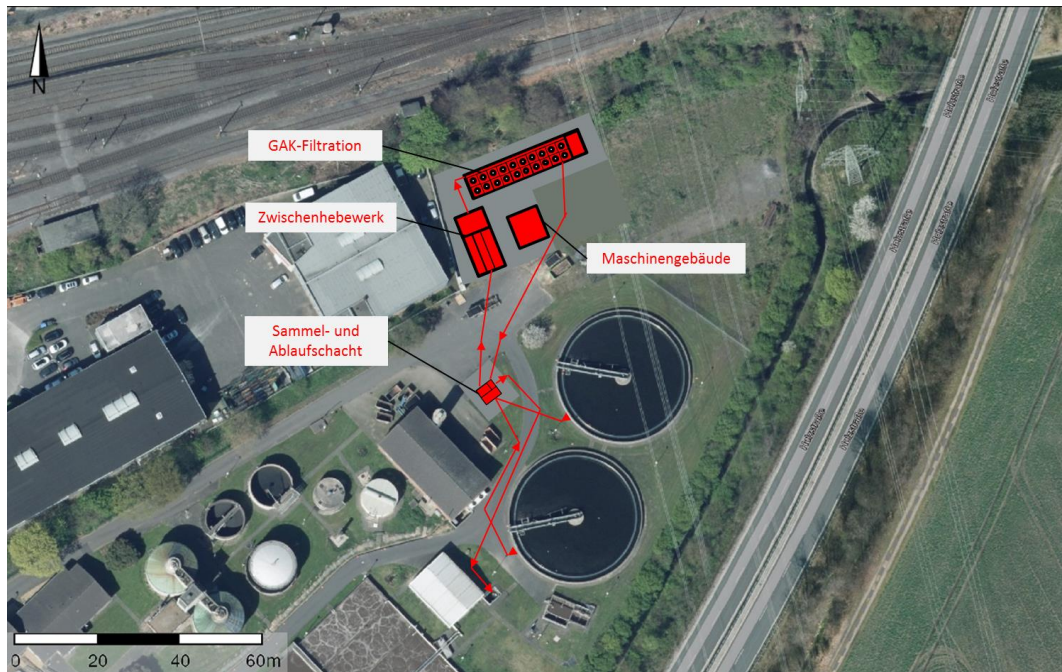
**Abbildung 34: Hydraulischer Längsschnitt der GAK-Filtration**

### 5.2.1 Dimensionierung Teilstrombehandlung

Zur Aufnahme der granulierten Aktivkohle werden kontinuierlich betriebene Dyna-Filter installiert. Es werden Filtereinbauteile vorgesehen, die in ein Betonbecken eingebaut werden. Für die GAK-Filtration wird die Bemessungswassermenge von 600 m<sup>3</sup>/h angesetzt. Weiter wird eine Filtergeschwindigkeit bei Trockenwetter von maximal 7,5 m/h vorausgesetzt. Für die Ermittlung des GAK-Filtervolumens muss die Leerbettkontaktzeit berücksichtigt werden. Dafür gibt das Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW als Auslegungsempfehlung eine Leerbettkontaktzeit von 30 Minuten an [3]. Somit errechnet sich das erforderliche GAK-Filtervolumen zu ca. 300 m<sup>3</sup>. Es werden Filterkammern mit einer Fläche von 25 m<sup>2</sup> und einer Filterbetthöhe von 3 m gewählt, sodass 5 Filterkammern mit jeweils vier Filtereinsätzen benötigt werden. Daraus resultiert ein GAK-Volumen von insgesamt ca. 375 m<sup>3</sup>.

Es werden 14.000 durchsetzbare Bettvolumina bis zum Austausch der GAK angenommen, was für die angenommene behandelte Wassermenge einer Filterstandzeit von gut 20,3 Monaten entspricht. Als Grundlage für die Durchsetzung von 14.000 BV dienen die Betriebserfahrungen der Kläranlagen Obere Lutter (rd. 15.000 BV), Buchenhofen (> 15.000 BV) und Düren-Merken (rd. 9.000 BV bei im Mittel 20 bis 30 mg<sub>AFS</sub>/l im Filterzulauf) [6]. Es werden fünf Filterkammern mit je vier Filtereinsätzen zusammengeschlossen. Bei fünf Filterkammern wäre ca. 1,23-mal im Jahr der Austausch des jeweils am stärksten beladenen Filterbettes erforderlich. In Summe würden so rd. 243 m<sup>3</sup><sub>GAK</sub>/a benötigt.

In Abbildung 35 ist die Anordnung der notwendigen Bauwerke auf der Karte dargestellt.



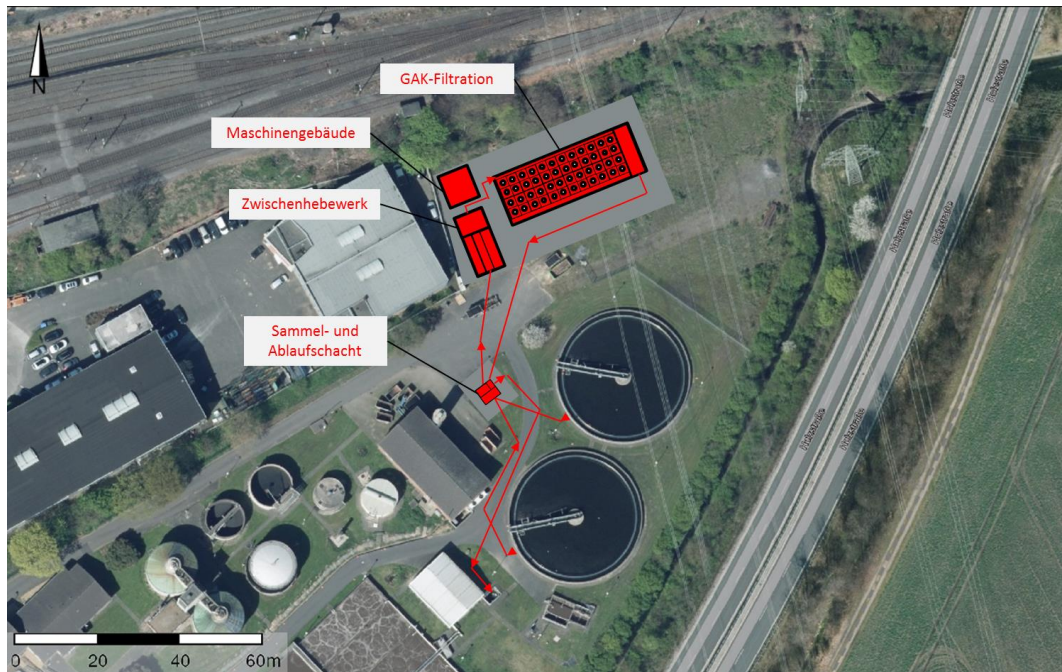
**Abbildung 35: Anordnung der erforderlichen Bauwerke für Variante 2 (GAK) bei Teilstrombehandlung auf der Kläranlage Frechen**

### 5.2.2 Dimensionierung Vollstrombehandlung

Bei einer Vollstrombehandlung wird die Bemessungswassermenge von  $1.721 \text{ m}^3/\text{h}$  angesetzt. Die Dimensionierung des Dyna-Filters wird analog zu der Dimensionierung bei der Teilstrombehandlung durchgeführt. Dabei wird eine Leerbettkontaktzeit von 30 Minuten berücksichtigt. Somit errechnet sich das erforderliche GAK-Filtervolumen zu ca.  $861 \text{ m}^3$ . Es werden Filterkammern mit einer Fläche von  $25 \text{ m}^2$  und einer Filterbetthöhe von 3 m gewählt, sodass 12 Filterelemente benötigt werden. Daraus resultiert ein GAK-Volumen von insgesamt ca.  $900 \text{ m}^3$ .

Angenommen werden 14.000 durchsetzbare Bettvolumina bis zum Austausch der GAK, was für die angenommene behandelte Wassermenge einer Filterstandzeit von gut 20,3 Monaten entspricht. Es werden 12 Filterkammern mit je 4 Filtereinsätzen zusammengeschlossen. Bei 12 Filterkammern wäre ca. 1,03-mal im Jahr der Austausch des jeweils am stärksten beladenen Filterbettes erforderlich. In Summe würden so rd.  $293 \text{ m}^3_{\text{GAK}}/\text{a}$  benötigt.

In Abbildung 36 ist die Anordnung der notwendigen Bauteile auf der Karte dargestellt.



**Abbildung 36: Anordnung der erforderlichen Bauwerke für Variante 2 (GAK) bei Vollstrombehandlung auf der Kläranlage Frechen**

### 5.2.3 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der GAK-Filtration zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Frechen wurden ebenfalls auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen Angebotspreisen, vorliegenden Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten und Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Neubau eines kontinuierlich beschickten Filters einschl. Gebläse
- GAK-Filtermaterial als Erstausrüstung für die Filterkammern
- Neubau eines Pumpwerks mit erdverlegten Zulaufleitungen bis zur Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination sowie Anschluss der neuen Reinigungsstufe an die vorhandene Ablaufleitung
- Neubau einer Rohrleitung für die Rückführung des Rückspülwassers aus den Filtern
- Neubau eines Maschinengebäudes
- Errichtung einer neuen NSUV

- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS

Bei den Betriebskosten wurden die anfallenden Kosten für Energie, Betriebsmittel, Schlamm Entsorgung, Spurenstoffanalyse, Wartung und Personal mit berücksichtigt. Darüber hinaus wurden zu erwartende Einsparungen durch verringerte CSB-Ablaufwerte in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes (PKBW) und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung für Schlamm Entsorgung und Wartung von 2,0 % angesetzt. Die Kostensteigerungen für die Energiekosten werden mit 3,0 %, für PAK mit 1,0 % und für Personal mit 0,5 %.

Der Projektkostenbarwert für diese Variante über 30 Jahre und die dazugehörigen Jahreskosten sowie die spezifischen Kosten sind in Tabelle 15 aufgelistet. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit noch nicht endgültig geklärten Zukunft bezüglich der Gesetzeslage wird zusätzlich ein Abschreibungszeitraum von 15 Jahren betrachtet. Als Preis für die benötigte Energie wird ein Strompreis von 0,21 €/kWh angesetzt.

	Variante 2 (Teilstrom)	Variante 2 (Vollstrom)	
	kontinuierlich beschickter GAK- Filter	kontinuierlich beschickter GAK- Filter	
<b>Herstellkosten</b>	<b>4.770.000</b>	<b>7.430.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 15 Jahren</b>	1.023.400	1.689.800	€ brutto
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 10 Jahren</b>	366.520	543.830	€ brutto
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 20 Jahren</b>	366.520	543.830	€ brutto
Barwert Reinvestitionen	<b>1.163.000</b>	<b>1.840.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Energiekosten</b>	13.700	36.200	€/a
Barwert Energiekosten	<b>411.000</b>	<b>1.086.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Betriebsmittel</b>	91.600	109.400	€/a
Barwert Betriebsmittel	<b>2.057.000</b>	<b>2.457.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Spurenstoffanalytik</b>	30.700	30.700	€/a
Barwert Spurenstoffanalytik	<b>689.000</b>	<b>689.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Wartungskosten</b>	66.900	105.600	€/a
Barwert Wartungskosten	<b>1.731.000</b>	<b>2.733.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Personalkosten</b>	30.000	30.000	€/a
Barwert Personalkosten	<b>629.000</b>	<b>629.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Mehrkosten Schlamm Entsorgung</b>	0	0	€/a
Barwert Schlamm Entsorgung	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Einsparung Abwasserabgabe</b>	-85.400	-85.400	€/a
Barwert Einsparung Abwasserabgabe	<b>-2.210.000</b>	<b>-2.210.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>PKBW Kosten</b>	<b>9.240.000</b>	<b>14.654.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>mittlere Jahreskosten</b>	<b>471.000</b>	<b>748.000</b>	<b>€/a</b>
<b>spezifische Kosten</b>			
je m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	0,14	0,18	€/m <sup>3</sup>
je Einwohner und Jahr	9,42	14,96	€/(EW·a)

**Tabelle 15: Zusammenstellung des Projektkostenbarwert für Variante 2 (Teilstrombehandlung): GAK-Filtration**

Für einen Zeitraum von 15 Jahren beträgt der PKBW für Variante 2 rd. 6,9 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von rd. 581.000 €/a. Die spezifischen Kosten berechnen sich bei einer mittleren jährliche Abwassermenge von rd. 3,4 Mio. m<sup>3</sup>/a und einer mittleren Belastung von ca. 50.000 EW zu 0,17 €/m<sup>3</sup> bzw. 11,62 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen nach 10 Jahre sind in diesen Kosten enthalten. Für den Fall einer Vollstrombehandlung steigt der PKBW um rd. 56 %.

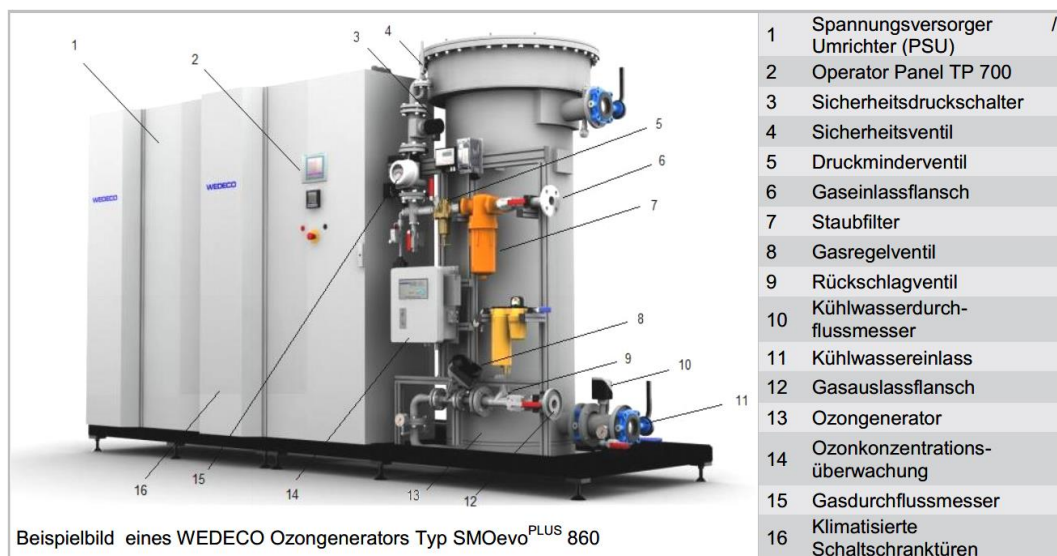
Die spezifischen Kosten steigen um rd. 30 %, je m<sup>3</sup> behandeltes Abwasser, sowie um rd. 56 % pro Einwohner und Jahr.

**5.3 Variante 3: Ozondosierung und Nachbehandlung mit einer kontinuierlichen beschickten Sandfiltration**

Auf der Kläranlage Frechen ist auch der Einsatz von Ozon zur Spurenstoffelimination denkbar. Als Nachbehandlung des mit dem Ozon behandelten Abwassers ist eine nachgeschaltete Sandfiltration vorgesehen.

Für die Umsetzung einer Ozonanlage sind grundsätzlich ein Ozongenerator, ein Ozonreaktor mit Diffusoren (Keramik-Tellerbelüfter) und ein Sauerstofftank erforderlich. Im Ozongenerator wird mittels hochfrequenter Mittelspannung aus Flüssigsauerstoff (LOX) Ozon erzeugt. Über Tellerbelüfter wird das Ozon dem Ozonreaktor mit dem Abwasser in Kontakt gebracht. Der Flüssigsauerstofftank dient zur Lagerung des für die Ozonerzeugung benötigten Sauerstoffs.

In Abbildung 37 wird beispielhaft eine Ozongeneratoreinheit der Reihe SMO<sub>evo</sub><sup>Plus</sup> der Marke Wedeco (Firma Xylem) und die zugehörige Technik dargestellt. Die Aufstellung des Ozongenerators sowie aller zusätzlich benötigter Anlagenkomponenten wie Kühler und Schaltanlage ist in einem Maschinengebäude vorgesehen.



**Abbildung 37: Ozongenerator und zugehörige Schalt- und Steuerschränke (Quelle: Wedeco – Xylem)**

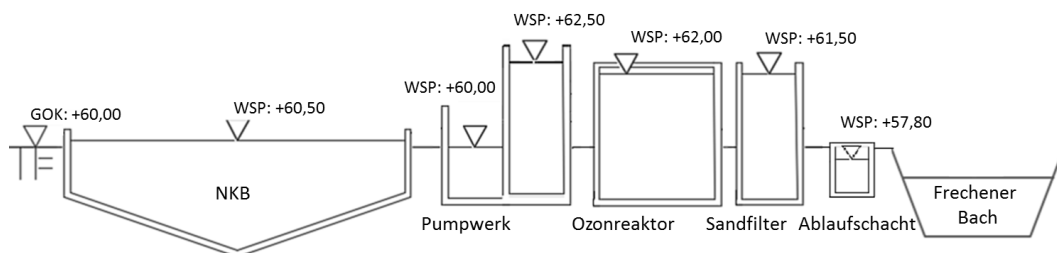


Für die biologische Nachbehandlung des ozonierten Abwassers kann eine Filtration mit herkömmlichem Filtermaterial (Sandfilter) angeordnet werden.

Der Betrieb einer Ozonanlage kann ebenfalls Auswirkungen auf den Betrieb der bestehenden Reinigungsstufen der Kläranlage Frechen haben. Bei dieser Variante ist mit Spülabwasser aus der biologischen Nachbehandlung des ozonierten Abwassers zu rechnen, welches in eine vorhergehende Reinigungsstufe zurückgeführt werden muss.

Um die Reinigungsstufe durchfließen zu können, muss das Abwasser aus dem Ablauf der Nachklärung mittels eines Hebewerks angehoben werden. Über ein Schachtbauwerk sowie eine neu zu installierende Rohrleitung wird der Ablauf der Nachklärung im Freigefälle zum Hebewerk geleitet. Die Ausführung erfolgt redundant. Unter Berücksichtigung der nachfolgend gewählten Beckengeometrie, Platzierung sowie der Druckverluste wird eine Förderhöhe von 2,5 m gewählt.

In Abbildung 38 wird ein vereinfachter hydraulischer Längsschnitt der notwendigen Bauwerke skizziert.



**Abbildung 38: Hydraulischer Längsschnitt der Ozonierung mit Sandfiltration**

### 5.3.1 Dimensionierung Teilstrombehandlung

Für die Berechnung des erforderlichen Volumens des Ozonreaktors ( $V_{\text{Ozonreaktor}}$ ) wird eine Bemessungswassermenge ( $Q_{\text{Bem}}$ ) von ca. 600 m<sup>3</sup>/h und eine Kontaktzeit ( $t_{\text{Kontakt}}$ ) von 15 Minuten angesetzt. Dadurch ergibt sich, bei Einbeziehung eines Faktors zur Berücksichtigung der ungleichmäßigen Durchströmung, ein erforderliches Reaktorvolumen von ca. 429 m<sup>3</sup> [3].

$$V_{\text{Ozonreaktor}} = Q_{\text{Bem}} \cdot t_{\text{Kontakt}} \cdot \text{Faktor} = 600 \cdot \frac{15}{60} \cdot \frac{1}{0,35} = 429 \text{ m}^3$$

Beim Ozoneintrag sollte die Wassertiefe 5-7 m betragen, um einen möglichst weitgehenden Übergang des Ozongases in die Wasserphase zu ermöglichen.

Der Ozonreaktor wird als komplett geschlossenes Betonbecken mit 6,00 m Wassertiefe und 4,0 m Beckenbreite errichtet. Über die Gesamtbeckenlänge von ca. 18,00 m werden insgesamt 10 Strömungsleitwände über die gesamte Beckenbreite vorgesehen, um eine pfpfenartige Strömung im Reaktor zu erzeugen und dadurch Kurzschlussströmungen zu vermeiden. In den ersten beiden abwärts durchströmten Abteilen des Ozonreaktors können 16 Dom-Diffusoren (Keramik-Tellerbelüfter) am Reaktorboden installiert werden, über die der Ozoneintrag erfolgt.

Die erforderliche Ozondosis ( $C_{O_3}$ ) wird sowohl für die Bemessung der Anlagenteile als auch für den mittleren Ozonbedarf ermittelt. Für die Bemessung werden die 85 %-Perzentile der aus der CSB-Konzentration ( $C_{CSB} = 34,0$  mg/l) errechneten DOC-Konzentration ( $C_{DOC} = 11,5$  mg/l) und der Nitrit-Konzentration ( $C_{NO_2-N} = 0,71$  mg/l) im Ablauf der Nachklärung verwendet. Für den mittleren Ozonbedarf werden die entsprechenden Mittelwerte für den DOC ( $C_{DOC} = 9,4$  mg/l) und der Nitrit-Konzentration ( $C_{NO_2-N} = 0,35$  mg/l) gewählt. Die spezifische Ozonzehrung für DOC ( $z_{DOC} = 0,6$  mg $O_3$ /mg $_{DOC}$ ) und für  $NO_2-N$  ( $z_{NO_2-N} = 3,43$  mg $O_3$ /mg $_{NO_2-N}$ ) wurden anhand gängiger Literaturwerte gewählt. [3]

$$C_{O_3,max} = z_{DOC} \cdot C_{DOC} + z_{NO_2-N} \cdot C_{NO_2-N} = 0,6 \cdot 11,5 + 3,43 \cdot 0,71 = 9,3 \frac{mgO_3}{l}$$

$$C_{O_3,Mittel} = z_{DOC} \cdot C_{DOC} + z_{NO_2-N} \cdot C_{NO_2-N} = 0,6 \cdot 9,4 + 3,43 \cdot 0,35 = 6,9 \frac{mgO_3}{l}$$

Für die Bemessungswassermenge resultiert eine maximal erforderliche Ozonproduktionskapazität von ca. 5.580 g $O_3$ /h. Da die Ozonreaktoren eine untere Grenze der Produktionskapazität haben, muss bei einem minimalen Trockenwetterzufluss von ca. 225 m $^3$ /h eine minimale Ozonproduktionskapazität von ca. 1.550 g $O_3$ /h sichergestellt werden. Der mittlere Ozonbedarf beträgt voraussichtlich ca. 2.683 g $O_3$ /h.

$$B_{O_3,max} = Q_{Bem} \cdot C_{O_3,max} = 600 \cdot 9,3 = ca. 5.580 \frac{gO_3}{h}$$

$$B_{O_3,mittel} = Q_{Beh} \cdot C_{O_3,Bem} = 389 \cdot 6,9 = ca. 2.683 \frac{gO_3}{h}$$

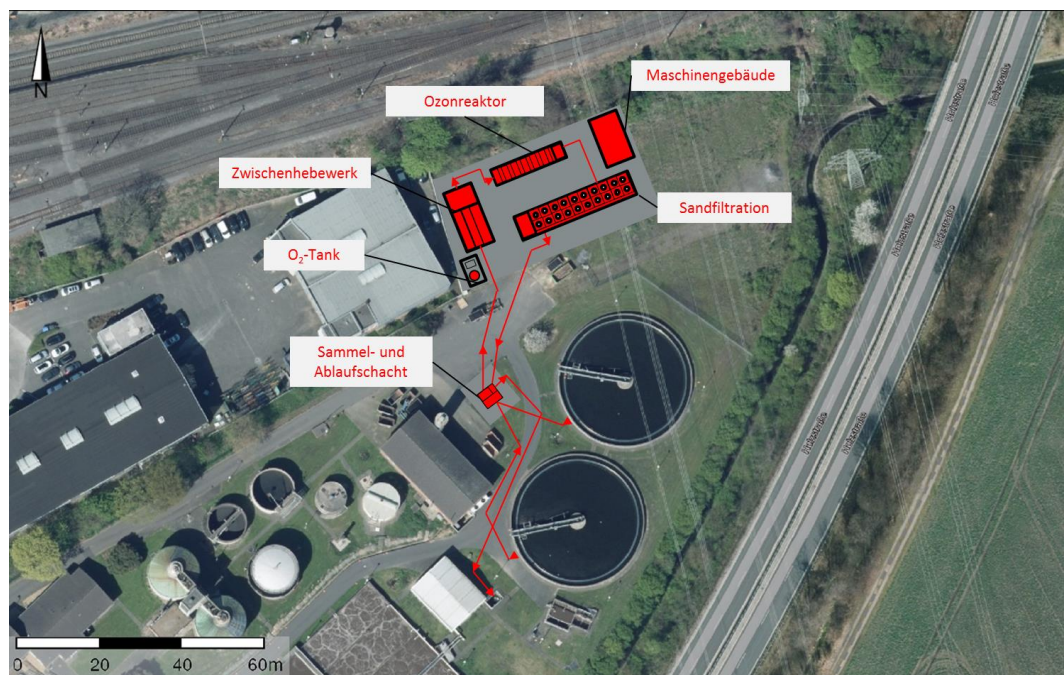
$$B_{O_3,min} = Q_{T,2h,min} \cdot C_{O_3} = 225 \cdot 6,9 = ca. 1.550 \frac{gO_3}{h}$$

Die erforderlichen Ozonmengen können beispielsweise durch den Ozongenerator SMO<sub>evo</sub><sup>Plus</sup> 610 der Marke Wedeco (Firma Xylem, max. 9.290 g<sub>O<sub>3</sub></sub>/h Ozonproduktionskapazität) bereitgestellt werden.

Der Ozongenerator wird mit Reinsauerstoff (Flüssigsauerstoff) als Betriebsmittel versorgt. Hierfür wird ein Tank mit Nutzvolumen von 35.000 l LOX vorgesehen. Der Tank kann in direkter Nähe zur Ozonerzeugungseinheit positioniert werden. Es ist lediglich ein Sicherheitsradius von 5,00 m im Abstand von der Behälterwand zu umliegenden Bauwerken einzuhalten.

Für die biologische Nachbehandlung des ozonierten Abwassers wird eine Filtration angeordnet werden. Die Auslegung erfolgt analog zu Variante 2 (siehe Kapitel 5.2 Filtration mit GAK). Anstelle der GAK wird herkömmliches Filtermaterial (Sandfilter) verwendet. Hierfür werden 5 Filterkammern und je 4 Filtereinsätzen vorgesehen.

In Abbildung 39 ist die Positionierung der notwendigen Bauwerke auf der Karte skizziert.



**Abbildung 39: Anordnung der erforderlichen Bauwerke für Variante 3 (Ozon) bei Teilstrombehandlung auf der Kläranlage Frechen**

### 5.3.2 Dimensionierung Vollstrombehandlung

Für die Berechnung des erforderlichen Volumens des Ozonreaktors ( $V_{\text{Ozonreaktor}}$ ) wird eine Bemessungswassermenge ( $Q_{\text{Bem}}$ ) von ca. 1.721 m<sup>3</sup>/h und eine Kontaktzeit ( $t_{\text{Kontakt}}$ ) von 15 Minuten angesetzt. Dadurch ergibt sich, bei Einbeziehung eines Faktors zur Berücksichtigung der ungleichmäßigen Durchströmung, ein erforderliches Reaktorvolumen von ca. 1.229 m<sup>3</sup> [3]. Unter Berücksichtigung einer erforderlichen Wassertiefe von 6 m ergeben sich eine Beckenbreite von 8,0 m sowie eine Beckenlänge von 26,0 m mit insgesamt 18 Strömungsleitwände. In den ersten beiden abwärts durchströmten Abteilen des Ozonreaktors können 44 Dom-Diffusoren (Keramik-Tellerbelüfter) am Reaktorboden installiert werden, über die der Ozoneintrag erfolgt.

$$V_{\text{Ozonreaktor}} = Q_{\text{Bem}} \cdot t_{\text{Kontakt}} \cdot \text{Faktor} = 1.721 \cdot \frac{15}{60} \cdot \frac{1}{0,35} = 1.229 \text{ m}^3$$

Die Berechnung der erforderlichen Ozondosis ( $C_{\text{O}_3}$ ) erfolgt analog wie bei der Teilstrombehandlung. Daraus ergeben sich folgende Konzentrationen:

$$C_{\text{O}_3, \text{max}} = z_{\text{DOC}} \cdot C_{\text{DOC}} + z_{\text{NO}_2\text{-N}} \cdot C_{\text{NO}_2\text{-N}} = 0,6 \cdot 11,5 + 3,43 \cdot 0,71 = 9,3 \frac{\text{mgO}_3}{\text{l}}$$

$$C_{\text{O}_3, \text{Mittel}} = z_{\text{DOC}} \cdot C_{\text{DOC}} + z_{\text{NO}_2\text{-N}} \cdot C_{\text{NO}_2\text{-N}} = 0,6 \cdot 9,4 + 3,43 \cdot 0,35 = 6,9 \frac{\text{mgO}_3}{\text{l}}$$

Für die Bemessungswassermenge resultieren folgende Ozonproduktionskapazitäten:

$$B_{\text{O}_3, \text{max}} = Q_{\text{Bem}} \cdot C_{\text{O}_3, \text{max}} = 1.721 \cdot 9,3 = \text{ca. } 16.010 \frac{\text{gO}_3}{\text{h}}$$

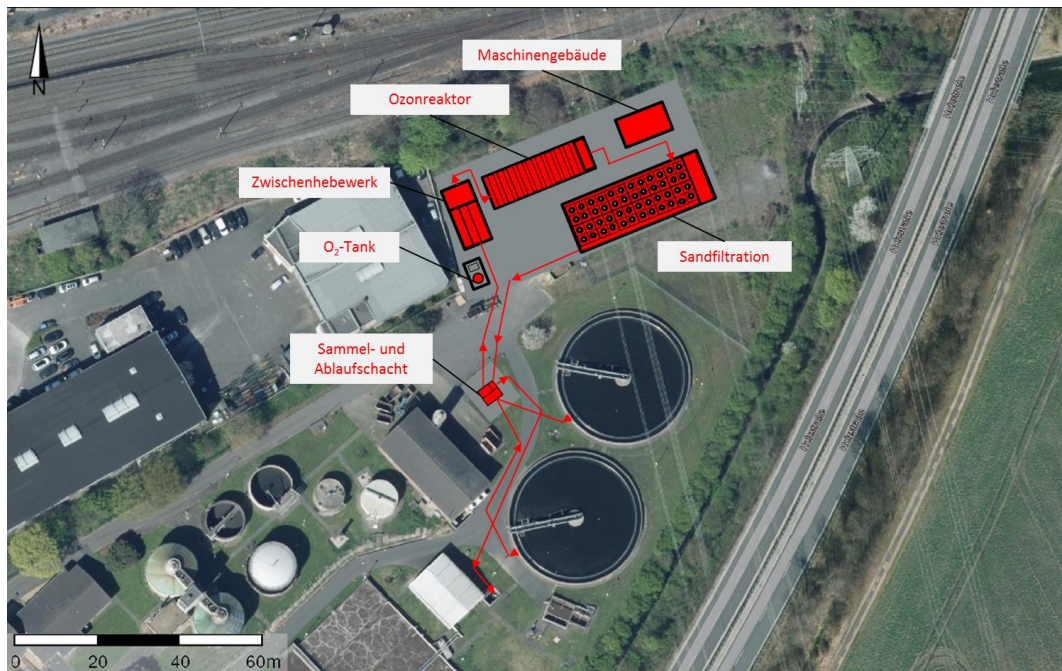
$$B_{\text{O}_3, \text{mittel}} = Q_{\text{Beh}} \cdot C_{\text{O}_3, \text{Bem}} = 467 \cdot 6,9 = \text{ca. } 3.226 \frac{\text{gO}_3}{\text{h}}$$

$$B_{\text{O}_3, \text{min}} = Q_{\text{T}, 2\text{h}, \text{min}} \cdot C_{\text{O}_3} = 225 \cdot 6,9 = \text{ca. } 1.550 \frac{\text{gO}_3}{\text{h}}$$

Die erforderlichen Ozonmengen können beispielsweise durch den Ozongenerator SMO<sub>evo</sub><sup>Plus</sup> 960 der Marke Wedeco (Firma Xylem, max. 9.290 g<sub>O<sub>3</sub></sub>/h Ozonproduktionskapazität) bereitgestellt werden. Für den Ozontank wird ein Nutzvolumen von rd. 35.000 l LOX vorgesehen. Für die biologische Nachbehandlung des ozonierten

Abwassers wird eine Filtration mit 12 Filterkammern und je 4 Filtereinsätzen angeordnet.

In Abbildung 40 ist die Positionierung der notwendigen Bauteile auf der Karte skizziert.



**Abbildung 40: Anordnung der erforderlichen Bauwerke für Variante 3 (Ozon) bei Vollstrombehandlung auf der Kläranlage Frechen**

### 5.3.3 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante (Ozondosierung und Nachbehandlung mit kontinuierlich beschickter Sandfiltration) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Frechen wurden ebenfalls auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen Angebotspreisen, vorliegenden Preisfragen bei Herstellern/Lieferanten und Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Neubau eines Ozonreaktors
- Errichtung eines Fundamentes für den Flüssigsauerstofftank
- Ozongenerator einschl. Dosiervorrichtung und Sauerstofftank

- Neubau eines Filtrationsgebäudes
- Neubau eines Pumpwerks mit erdverlegten Zulaufleitungen bis zur Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination sowie Anschluss der neuen Reinigungsstufe an die vorhandene Ablaufleitung
- Neubau einer Rohrleitung für die Rückführung des Rückspülwassers aus den Filtern
- Neubau eines Maschinengebäudes
- Errichtung einer neuen NSUV
- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS

Bei den Betriebskosten wurden die anfallenden Kosten für Energie, Betriebsmittel, Schlamm Entsorgung, Spurenstoffanalyse, Wartung und Personal mit berücksichtigt. Darüber hinaus wurden zu erwartende Einsparungen durch verringerte CSB-Ablaufwerte in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes (PKBW) und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung für Schlamm Entsorgung und Wartung von 2,0 % angesetzt. Die Kostensteigerungen für die Energiekosten werden mit 3,0 %, für PAK mit 1,0 % und für Personal mit 0,5 %.

In Tabelle 16 ist der Projektkostenbarwert über 30 Jahre und die dazugehörigen Jahreskosten für eine Ozondosierung und Nachbehandlung mit kontinuierlich beschickter Sandfiltration aufgelistet. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit noch nicht endgültig geklärten Zukunft bezüglich der Gesetzeslage wird zusätzlich ein Abschreibungszeitraum von 15 Jahren betrachtet. Als Preis für die benötigte Energie wird ein Strompreis von 0,21 €/kWh angesetzt.

**Tabelle 16: Zusammenstellung des Projektkostenbarwerts für Variante 3: Ozonung mit anschließender kontinuierlich beschickter Sandfiltration**

	<b>Variante 3 (Teilstrom)</b>	<b>Variante 3 (Vollstrom)</b>	
	Ozonung mit kont.besch. Sandfilter	Ozonung mit kont.besch. Sandfilter	
<b>Herstellkosten</b>	<b>7.040.000</b>	<b>11.220.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 15 Jahren</b>	1.428.000	2.296.700	€ brutto
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 10 Jahren</b>	497.420	700.910	€ brutto
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 20 Jahren</b>	497.420	700.910	€ brutto
<b>Barwert Reinvestitionen</b>	<b>1.604.000</b>	<b>2.451.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Energiekosten</b>	66.500	104.700	€/a
<b>Barwert Energiekosten</b>	<b>1.995.000</b>	<b>3.141.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Betriebsmittel</b>	42.700	51.000	€/a
<b>Barwert Betriebsmittel</b>	<b>959.000</b>	<b>1.145.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Spurenstoffanalytik</b>	31.800	31.800	€/a
<b>Barwert Spurenstoffanalytik</b>	<b>714.000</b>	<b>714.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Wartungskosten</b>	96.100	151.900	€/a
<b>Barwert Wartungskosten</b>	<b>2.487.000</b>	<b>3.931.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Personalkosten</b>	90.000	90.000	€/a
<b>Barwert Personalkosten</b>	<b>1.887.000</b>	<b>1.887.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Mehrkosten Schlamm Entsorgung</b>	0	0	€/a
<b>Barwert Schlamm Entsorgung</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Einsparung Abwasserabgabe</b>	-85.400	-85.400	€/a
<b>Barwert Einsparung Abwasserabgabe</b>	<b>-2.210.000</b>	<b>-2.210.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>PKBW Kosten</b>	<b>14.476.000</b>	<b>22.279.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>mittlere Jahreskosten</b>	<b>739.000</b>	<b>1.137.000</b>	<b>€/a</b>
<b>spezifische Kosten</b>			
je m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	0,22	0,28	€/m <sup>3</sup>
je Einwohner und Jahr	14,78	22,74	€/(EW·a)

Für einen Zeitraum von 15 Jahren beträgt der PKBW für Variante 3 rd. 10,6 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von rd. 890.000 €/a. Die spezifischen Kosten berechnen sich bei einer mittleren jährliche Abwassermenge von rd. 3,4 Mio. m<sup>3</sup>/a und einer mittleren Belastung von ca. 50.000 EW zu 0,26 €/m<sup>3</sup> oder 17,80 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen nach 10 Betriebsjahren sind in diesen Kosten enthalten. Für den Fall einer Vollstrombehandlung steigt der PKBW um rd. 54 %. Die spezifischen Kosten um rd. 28 %, je m<sup>3</sup> behandeltes Abwasser, sowie um rd. 54 % pro Einwohner und Jahr.

## 6. Variantenvergleich

### 6.1 Wirtschaftlichkeitsvergleich

Der Wirtschaftlichkeitsvergleich erfolgt auf Grundlage der in den vorherigen Kapiteln ermittelten Investitions-, Reinvestitions- und Betriebskosten. Da die tatsächlichen Kosten für eine Spurenstoffelimination im wesentlichen Maße vom Bedarf an Aktivkohle bzw. Ozon abhängig sind, wird an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass der Verbrauch dieser Betriebsmittel derzeit für die Kläranlage Frechen nur anhand von Literaturangaben und Erfahrungswerten abgeschätzt werden kann. Versuche zum Betriebsmittelverbrauch mit dem biologisch vorgereinigten Abwasser der Kläranlage Frechen wurden bislang weder im Labormaßstab noch im großtechnischen Maßstab durchgeführt. Nachfolgend werden die gewählten Betriebsmittelverbräuche dargestellt:

**Tabelle 17: gewählter Betriebsmittelverbrauch Varianten 1 - 3**

		Betriebsmittelverbrauch gemäß Literatur	Betriebsmittelverbrauch gewählt	Begründung
V1	PAK	10 - 20 mg/l	<b>10 mg/l</b>	passable Nachklärung, daher niedriger Betriebsmitteleinsatz
V2	GAK	7.000 - 25.000 BV	<b>14.000 BV</b>	passable Nachklärung, daher niedriger Betriebsmitteleinsatz
V3	Ozon	0,6 - 0,8 mgO <sub>3</sub> /mgDOC	<b>0,6 mgO<sub>3</sub>/mgDOC</b>	passable Nachklärung, daher niedriger Betriebsmitteleinsatz

Wegen der möglichen Abweichungen im Betriebsmittelverbrauch wird an dieser Stelle auch auf die nachfolgenden Sensitivitätsanalysen zum Betriebsmittelverbrauch (siehe Kapitel 6.2.1) verwiesen.

Zur Prüfung der Wirtschaftlichkeit werden der Projektkostenbarwert und die mittleren Jahreskosten der untersuchten Varianten gemäß KVR-Leitlinie ermittelt. In diesen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen werden aufgrund der neuen Verfahrenstechniken die Projektkostenbarwerte aller Varianten vollständig mit einer Nutzungsdauer von 15 Jahren berechnet. Danach wird bei allen Varianten, in Anlehnung an die Veröffentlichung „Mikroschadstoffentfernung machbar?“ des Kompe-



tenzzentrums NRW, ein Nutzungszeitraum von 30 Jahren berücksichtigt. Dabei wird ein Zinssatz von 3% angesetzt und die Nutzungsdauern und Preissteigerungen werden wie folgt gewählt:

**Tabelle 18: Preissteigerungen und Annahmen für die Berechnung des PKBW**

<b>Preissteigerungen und Annahmen für die Berechnung des PKBW</b>		
Nutzungsdauer Bautechnik	[a]	30
Nutzungsdauer Maschinenteknik	[a]	15
Nutzungsdauer EMSR-Technik	[a]	10
Preissteigerung Personal	[%]	0,5
Preissteigerung Energie/Strom	[%]	3,0
Preissteigerung PAK/GAK	[%]	1,0
Preissteigerung O2	[%]	1,0
Preissteigerung Bautechnik, Nebenkosten	[%]	0,5
Preissteigerung Maschinenteknik	[%]	0,3
Preissteigerung Elektrotechnik	[%]	0,0
Preissteigerung Allgemein	[%]	1,0

Für die Betriebskosten Schlamm Entsorgung und Wartung wurde eine Preissteigerung von 2 % angenommen. Für die Kosten zur Spurenstoffanalytik wurde die allgemeine Preissteigerung von 1 % angesetzt.

6.1.1 Teilstrombehandlung

Bei dem Vergleich der vorgestellten Verfahrensvarianten mit den gewählten Ansätzen zum Betriebsmittelverbrauch vor einem rein monetären Hintergrund (Projektkostenbarwert bzw. Jahreskosten), ergeben sich bei einem Nutzungszeitraum von 15 Jahren die in Tabelle 19 aufgelistete Kosten. Bei einer Betrachtung über 15 Jahren entstehen somit Reinvestitionskosten nach 10 Jahren für die E-MSR-Technik.

**Tabelle 19: Kostenvergleich der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Frechen über 15 Jahre (Teilstrombehandlung)**

	Variante 1 (Teilstrom)	Variante 2 (Teilstrom)	Variante 3 (Teilstrom)	
	PAK-KB mit Tuchfiltration	kontinuierlich beschickter GAK- Filter	Ozonung mit kont.besch. Sandfilter	
<b>Herstellkosten</b>	<b>3.400.000</b>	<b>4.770.000</b>	<b>7.040.000</b>	€ brutto
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 10 Jahren</b>	301.070	366.520	497.420	€ brutto
Barwert Reinvestitionen	<b>224.000</b>	<b>273.000</b>	<b>370.000</b>	€ brutto
<b>Energiekosten</b>	7.800	13.700	66.500	€/a
Barwert Energiekosten	<b>117.000</b>	<b>206.000</b>	<b>998.000</b>	€ brutto
<b>Betriebsmittel</b>	54.600	91.600	42.700	€/a
Barwert Betriebsmittel	<b>703.000</b>	<b>1.179.000</b>	<b>549.000</b>	€ brutto
<b>Spurenstoffanalytik</b>	30.700	30.700	31.800	€/a
Barwert Spurenstoffanalytik	<b>395.000</b>	<b>395.000</b>	<b>409.000</b>	€ brutto
<b>Wartungskosten</b>	54.600	66.900	96.100	€/a
Barwert Wartungskosten	<b>758.000</b>	<b>929.000</b>	<b>1.334.000</b>	€ brutto
<b>Personalkosten</b>	60.000	30.000	90.000	€/a
Barwert Personalkosten	<b>744.000</b>	<b>372.000</b>	<b>1.115.000</b>	€ brutto
<b>Mehrkosten Schlamm Entsorgung</b>	16.700	0	0	€/a
Barwert Schlamm Entsorgung	<b>232.000</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	€ brutto
<b>Einsparung Abwasserabgabe</b>	-85.400	-85.400	-85.400	€/a
Barwert Einsparung Abwasserabgabe	<b>-1.186.000</b>	<b>-1.186.000</b>	<b>-1.186.000</b>	€ brutto
<b>PKBW Kosten</b>	<b>5.387.000</b>	<b>6.938.000</b>	<b>10.629.000</b>	€ brutto
<b>mittlere Jahreskosten</b>	<b>451.000</b>	<b>581.000</b>	<b>890.000</b>	€/a
<b>Rang nach PKBW</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
<b>spezifische Kosten</b>				
je m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	0,13	0,17	0,26	€/m <sup>3</sup>
je Einwohner und Jahr	9,02	11,62	17,80	€/(EW·a)

Die Variante 1 (PAK) liegt wirtschaftlich gesehen auf Rang 1 mit einem PKBW von rd. 5,4 Mio. € und entsprechenden Jahreskosten von rd. 451.000 €/a. Die Variante 2 (GAK) ist, im Vergleich zu Variante 1, ca. 29% teurer und befindet sich auf Platz 2 mit einem PKBW von rd. 6,9 Mio € und entsprechenden Jahreskosten von rd. 581.000 €/a. Mit großem Abstand folgt Variante 3 (Ozonbehandlung mit Sandfiltration) auf Rang 3 mit einem PKBW von rd. 10,6 Mio. € und den entsprechenden Jahreskosten von rd. 890.000 €/a.

Im Betrachtungszeitraum von 30 Jahren fallen einmal Reinvestitionskosten für die Maschinenteknik sowie zweimal Reinvestitionskosten für die EMSR-Technik an.

In Tabelle 20 ist zu erkennen, dass sich die Rangfolge der Varianten nicht ändert. Außerdem ist zu beobachten, dass bei einer Betrachtung von über 30 Jahren die mittleren Jahreskosten bei allen Varianten etwas sinken. Weiterhin ist Variante 1 (PAK in KB + Tuchfilter) auf Rang 1, sowie Variante 2 (GAK) auf Rang 2 anzusiedeln. Variante 3 (Ozon + Sandfiltration) bleibt ebenfalls auf Rang 3.

**Tabelle 20: Kostenvergleich der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Frechen über 30 Jahre (Teilstrombehandlung)**

	Variante 1 (Teilstrom)	Variante 2 (Teilstrom)	Variante 3 (Teilstrom)	
	PAK-KB mit Tuchfiltration	kontinuierlich beschickter GAK- Filter	Ozonung mit kont.besch. Sandfilter	
<b>Herstellkosten</b>	<b>3.400.000</b>	<b>4.770.000</b>	<b>7.040.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 15 Jahren</b>	1.035.300	1.023.400	1.428.000	€ brutto
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 10 Jahren</b>	301.070	366.520	497.420	€ brutto
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 20 Jahren</b>	301.070	366.520	497.420	€ brutto
Barwert Reinvestitionen	<b>1.086.000</b>	<b>1.163.000</b>	<b>1.604.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Energiekosten</b>	7.800	13.700	66.500	€/a
Barwert Energiekosten	<b>234.000</b>	<b>411.000</b>	<b>1.995.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Betriebsmittel</b>	54.600	91.600	42.700	€/a
Barwert Betriebsmittel	<b>1.226.000</b>	<b>2.057.000</b>	<b>959.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Spurenstoffanalytik</b>	30.700	30.700	31.800	€/a
Barwert Spurenstoffanalytik	<b>689.000</b>	<b>689.000</b>	<b>714.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Wartungskosten</b>	54.600	66.900	96.100	€/a
Barwert Wartungskosten	<b>1.413.000</b>	<b>1.731.000</b>	<b>2.487.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Personalkosten</b>	60.000	30.000	90.000	€/a
Barwert Personalkosten	<b>1.258.000</b>	<b>629.000</b>	<b>1.887.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Mehrkosten Schlamm Entsorgung</b>	16.700	0	0	€/a
Barwert Schlamm Entsorgung	<b>432.000</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>€ brutto</b>
<b>Einsparung Abwasserabgabe</b>	-85.400	-85.400	-85.400	€/a
Barwert Einsparung Abwasserabgabe	<b>-2.210.000</b>	<b>-2.210.000</b>	<b>-2.210.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>PKBW Kosten</b>	<b>7.528.000</b>	<b>9.240.000</b>	<b>14.476.000</b>	<b>€ brutto</b>
<b>mittlere Jahreskosten</b>	<b>384.000</b>	<b>471.000</b>	<b>739.000</b>	<b>€/a</b>
<b>Rang nach PKBW</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
<b>spezifische Kosten</b>				
je m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	0,11	0,14	0,22	€/m <sup>3</sup>
je Einwohner und Jahr	7,68	9,42	14,78	€/(EW-a)

### 6.1.2 Vollstrombehandlung

Bei dem Vergleich der vorgestellten Verfahrensvarianten für die Vollstrombehandlung ergeben sich mit den gewählten Ansätzen zum Betriebsmittelverbrauch die in Tabelle 21 aufgelistete Projektkostenbarwerte und Jahreskosten.

**Tabelle 21: Kostenvergleich der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Frechen über 15 Jahre (Vollstrombehandlung)**

	Variante 1 (Vollstrom)	Variante 2 (Vollstrom)	Variante 3 (Vollstrom)	
	PAK-KB mit Tuchfiltration	kontinuierlich beschickter GAK- Filter	Ozonung mit kont.besch. Sandfilter	
<b>Herstellkosten</b>	<b>5.540.000</b>	<b>7.430.000</b>	<b>11.220.000</b>	€ brutto
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 10 Jahren</b>	445.060	543.830	700.910	€ brutto
Barwert Reinvestitionen	<b>331.000</b>	<b>405.000</b>	<b>522.000</b>	€ brutto
<b>Energiekosten</b>	12.100	36.200	104.700	€/a
Barwert Energiekosten	<b>182.000</b>	<b>543.000</b>	<b>1.571.000</b>	€ brutto
<b>Betriebsmittel</b>	65.600	109.400	51.000	€/a
Barwert Betriebsmittel	<b>844.000</b>	<b>1.408.000</b>	<b>656.000</b>	€ brutto
<b>Spurenstoffanalytik</b>	30.700	30.700	31.800	€/a
Barwert Spurenstoffanalytik	<b>395.000</b>	<b>395.000</b>	<b>409.000</b>	€ brutto
<b>Wartungskosten</b>	93.600	105.600	151.900	€/a
Barwert Wartungskosten	<b>1.300.000</b>	<b>1.466.000</b>	<b>2.109.000</b>	€ brutto
<b>Personalkosten</b>	60.000	30.000	90.000	€/a
Barwert Personalkosten	<b>744.000</b>	<b>372.000</b>	<b>1.115.000</b>	€ brutto
<b>Mehrkosten Schlamm Entsorgung</b>	20.000	0	0	€/a
Barwert Schlamm Entsorgung	<b>278.000</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	€ brutto
<b>Einsparung Abwasserabgabe</b>	-85.400	-85.400	-85.400	€/a
Barwert Einsparung Abwasserabgabe	<b>-1.186.000</b>	<b>-1.186.000</b>	<b>-1.186.000</b>	€ brutto
<b>PKBW Kosten</b>	<b>8.428.000</b>	<b>10.833.000</b>	<b>16.416.000</b>	€ brutto
<b>mittlere Jahreskosten</b>	<b>706.000</b>	<b>907.000</b>	<b>1.375.000</b>	€/a
<b>Rang nach PKBW</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
<b>spezifische Kosten</b>				
je m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	0,17	0,22	0,34	€/m <sup>3</sup>
je Einwohner und Jahr	14,12	18,14	27,50	€/(EW·a)

Die Variante 1 (PAK in KB + Tuchfilter) liegt wirtschaftlich gesehen auf Rang 1 mit einem PKBW von rd. 8,4 Mio. € und entsprechenden Jahreskosten von rd. 706.000 €/a. Die Variante 2 (GAK) ist, im Vergleich zu Variante 1, ca. 29% teurer und befindet sich auf Platz 2 mit einem PKBW von rd. 10,8 Mio. € und entsprechenden Jahreskosten von rd. 907.000 €/a. Mit großem Abstand folgt Variante 3 (Ozonbehandlung mit Sandfiltration) auf Rang 3 mit einem PKBW von rd. 16,4 Mio. € und den entsprechenden Jahreskosten von rd. 1,4 Mio. €/a.

Im Betrachtungszeitraum von 30 Jahren entstehen die in Tabelle 22 aufgelisteten Projektkostenbarwerte und Jahreskosten. Die mittleren Jahreskosten sinken bei

einer Betrachtung von über 30 Jahren bei allen Varianten analog zur Teilstrombehandlung. Weiterhin ist Variante 1 (PAK in KB + Tuchfilter) ebenfalls auf Rang 1, sowie Variante 2 (GAK) auf Rang 2 und Variante 3 (Ozon + Sandfiltration) auf Rang 3 anzusiedeln.

**Tabelle 22: Kostenvergleich der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Frechen über 30 Jahre (Vollstrombehandlung)**

	Variante 1 (Vollstrom)	Variante 2 (Vollstrom)	Variante 3 (Vollstrom)	
	PAK-KB mit Tuchfiltration	kontinuierlich beschickter GAK- Filter	Ozonung mit kont.besch. Sandfilter	
<b>Herstellkosten</b>	<b>5.540.000</b>	<b>7.430.000</b>	<b>11.220.000</b>	€ brutto
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 15 Jahren</b>	1.963.500	1.689.800	2.296.700	€ brutto
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 10 Jahren</b>	445.060	543.830	700.910	
<b>Reinvestitionen (IKR) nach 20 Jahren</b>	445.060	543.830	700.910	
Barwert Reinvestitionen	<b>1.896.000</b>	<b>1.840.000</b>	<b>2.451.000</b>	€ brutto
<b>Energiekosten</b>	12.100	36.200	104.700	€/a
Barwert Energiekosten	<b>363.000</b>	<b>1.086.000</b>	<b>3.141.000</b>	€ brutto
<b>Betriebsmittel</b>	65.600	109.400	51.000	€/a
Barwert Betriebsmittel	<b>1.473.000</b>	<b>2.457.000</b>	<b>1.145.000</b>	€ brutto
<b>Spurenstoffanalytik</b>	30.700	30.700	31.800	€/a
Barwert Spurenstoffanalytik	<b>689.000</b>	<b>689.000</b>	<b>714.000</b>	€ brutto
<b>Wartungskosten</b>	93.600	105.600	151.900	€/a
Barwert Wartungskosten	<b>2.423.000</b>	<b>2.733.000</b>	<b>3.931.000</b>	€ brutto
<b>Personalkosten</b>	60.000	30.000	90.000	€/a
Barwert Personalkosten	<b>1.258.000</b>	<b>629.000</b>	<b>1.887.000</b>	€ brutto
<b>Mehrkosten Schlamm Entsorgung</b>	20.000	0	0	€/a
Barwert Schlamm Entsorgung	<b>518.000</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	€ brutto
<b>Einsparung Abwasserabgabe</b>	-85.400	-85.400	-85.400	€/a
Barwert Einsparung Abwasserabgabe	<b>-2.210.000</b>	<b>-2.210.000</b>	<b>-2.210.000</b>	€ brutto
<b>PKBW Kosten</b>	<b>11.950.000</b>	<b>14.654.000</b>	<b>22.279.000</b>	€ brutto
<b>mittlere Jahreskosten</b>	<b>610.000</b>	<b>748.000</b>	<b>1.137.000</b>	€/a
<b>Rang nach PKBW</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
<b>spezifische Kosten</b>				
je m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	0,15	0,18	0,28	€/m <sup>3</sup>
je Einwohner und Jahr	12,20	14,96	22,74	€/(EW·a)

## 6.2 Sensitivitätsanalysen

Die Kosten für Betriebsmittel (PAK, GAK oder LOX) und Energie sind abhängig von dem aktuellen Betriebsmittelverbrauch und den jeweiligen Bezugspreisen. Um die Auswirkungen von abweichenden Mengen oder Preisen auf die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Varianten abschätzen zu können, wurden für den Betriebsmit-

telverbrauch, die Betriebsmittelpreise und den Strompreis Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

Für den Betriebsmittelverbrauch wurden entsprechend der Fachliteratur Annahmen getroffen. Es wurde in der Sensitivitätsanalyse eine PAK-Dosis zwischen  $10 \text{ g/m}^3$  bis  $20 \text{ g/m}^3$  für Variante 1 (PAK) betrachtet. Die Bemessung der Verfahrensvarianten erfolgte mit  $10 \text{ g}_{\text{PAK}}/\text{m}^3$ . Für die Variante 2 (GAK) wurden 14.000 BV für die Bemessung angenommen. Die Sensitivitätsanalyse erfolgte für 7.000 BV bis 25.000 BV. Für die Variante 3 (Ozon) wurde der Ozonverbrauch für die Sensitivitätsanalyse zwischen  $3,1 \text{ gO}_3/\text{m}^3$  und  $15,1 \text{ gO}_3/\text{m}^3$  (entsprechend 15 bis  $48 \text{ mg}_{\text{CSB}}/\text{l}$  bzw.  $0,01$  bis  $1,56 \text{ mg}_{\text{NO}_2\text{-N}}/\text{l}$  im Zulauf zum Ozonreaktor) variiert. Die Bemessung erfolgte mit  $6,9 \text{ gO}_3/\text{m}^3$  entsprechend  $34 \text{ mg}_{\text{CSB}}/\text{l}$ .

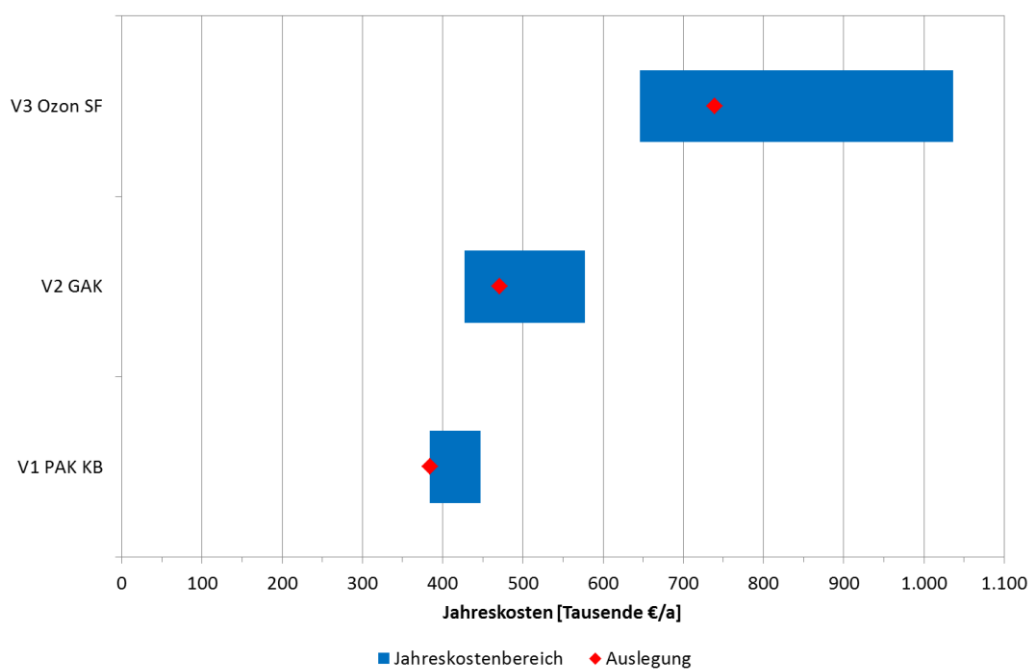
Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurden die angesetzten Preise für die Betriebsmittel jeweils um 10 % nach oben und unten variiert. Für den Bezug von PAK wurde ein Preis von  $1,60 \text{ €/kg}_{\text{PAK}}$  angesetzt. Für GAK wurden  $1,20 \text{ €/kg}_{\text{GAK}}$  zugrunde gelegt und flüssiger Sauerstoff wurde mit  $0,18 \text{ €/kg}_{\text{LOX}}$  angesetzt.

Der für die Berechnung gewählte Strompreis liegt bei  $0,21 \text{ €/kWh}$ . Dieser Preis wurde für die Sensitivitätsanalyse ebenfalls um 10 % nach oben und unten variiert.

## 6.2.1 Teilstrombehandlung

### 6.2.1.1 Betriebsmittelverbrauch

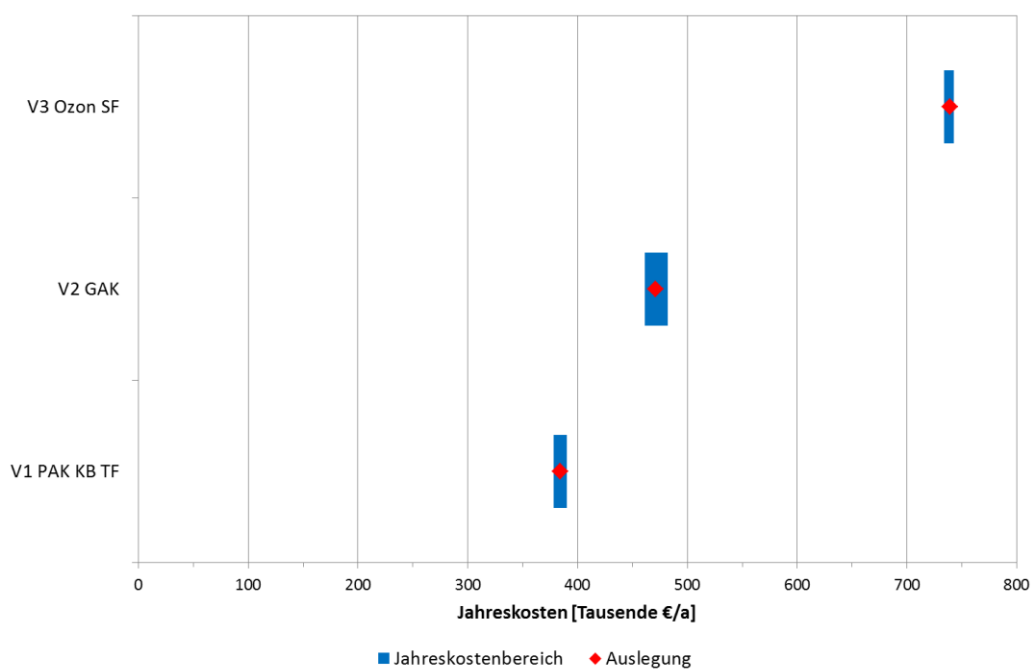
Bezüglich des Betriebsmitteleinsatzes zeigt sich, dass die Variante 3 (Ozonung) am sensibelsten auf Abweichungen von den getroffenen Annahmen reagiert (siehe Abbildung 41). Die Differenz der Jahreskosten für die Variante 3 (Ozon) beträgt rd.  $389.700 \text{ €/a}$  (etwa von  $-12,6 \%$  bis  $+40,1 \%$  der angesetzten Kosten). Für Variante 2 (GAK-Filtration) belaufen sich die Änderungen der Jahreskosten auf bis zu  $150.200 \text{ €/a}$  (etwa von  $-9,3\%$  bis  $+22,5 \%$  der angesetzten Kosten). Für die Variante 1 (PAK) können die Kosten über  $63.000 \text{ €/a}$  variieren (etwa von  $0 \%$  bis  $+16,4 \%$  der angesetzten Kosten).



**Abbildung 41: Sensitivität Betriebsmittelverbrauch bei Teilstrombehandlung**

#### 6.2.1.2 Betriebsmittelpreise

Bezüglich der Bezugspreise für die Betriebsmittel zeigt sich, dass die Variante 2 (GAK) am sensibelsten auf Abweichungen von den getroffenen Annahmen reagiert (siehe Abbildung 42). Die Jahreskosten für die GAK-Filtration können je nach Betriebsmittelpreis über 21.200 €/a variieren (etwa von  $\pm 2,2\%$  der angesetzten Kosten). Für Variante 3 (Ozon) belaufen sich die Änderungen der Jahreskosten auf bis zu 9.000 €/a (etwa von  $\pm 0,6\%$  der angesetzten Kosten). Für die Variante 1 (PAK) beträgt die Kostendifferenz rd. 12.000 €/a (etwa von  $\pm 1,6\%$ ).

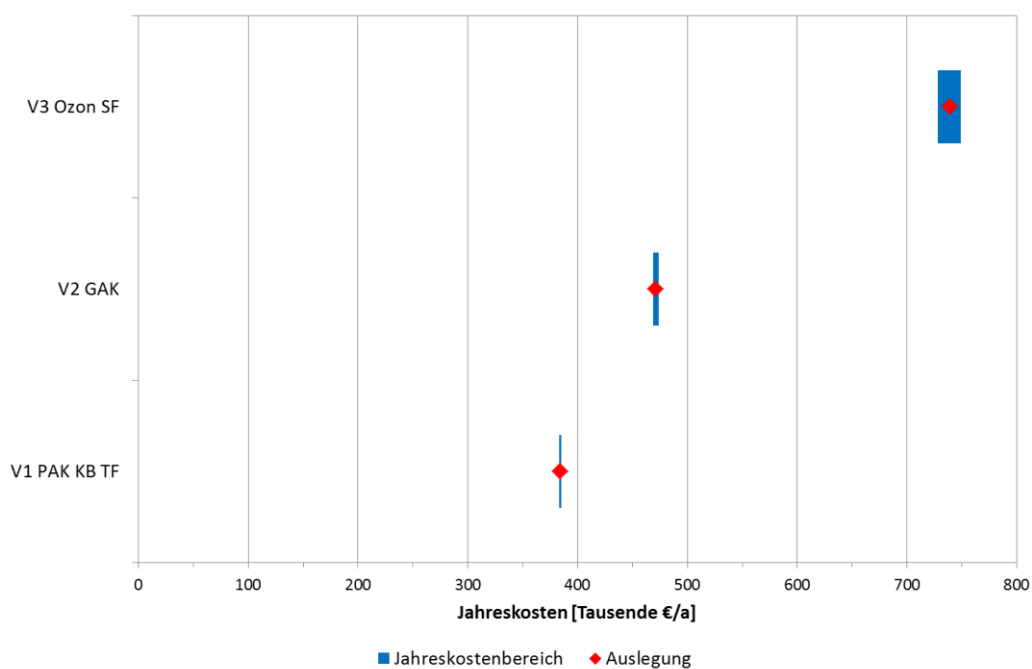


**Abbildung 42: Sensitivität Betriebsmittelpreise bei Teilstrombehandlung**

### 6.2.1.3 Strompreis

Auf Änderungen des Strompreises um  $\pm 10\%$  reagiert erwartungsgemäß die Variante 3 (Ozon) sensibler, als die Varianten 1 und 2 (PAK und GAK). Die Jahreskosten für die Variante 1 (PAK) verändern sich um rd. 2.000 €/a (etwa  $\pm 0,3\%$ ), für Variante 2 (GAK) um rd. 5.000 €/a (etwa  $\pm 0,5\%$ ). Die Variante 3 (Ozon) dagegen benötigt relativ viel Energie für die Ozongeneration und die entsprechende Sicherheitstechnik. Eine Strompreisänderung bewirkt hier eine Kostenänderung von rd. 21.000 €/a (etwa  $\pm 1,4\%$ ). Die Sensitivitäten der Varianten gegenüber der Strompreisänderung sind in Abbildung 43 dargestellt.



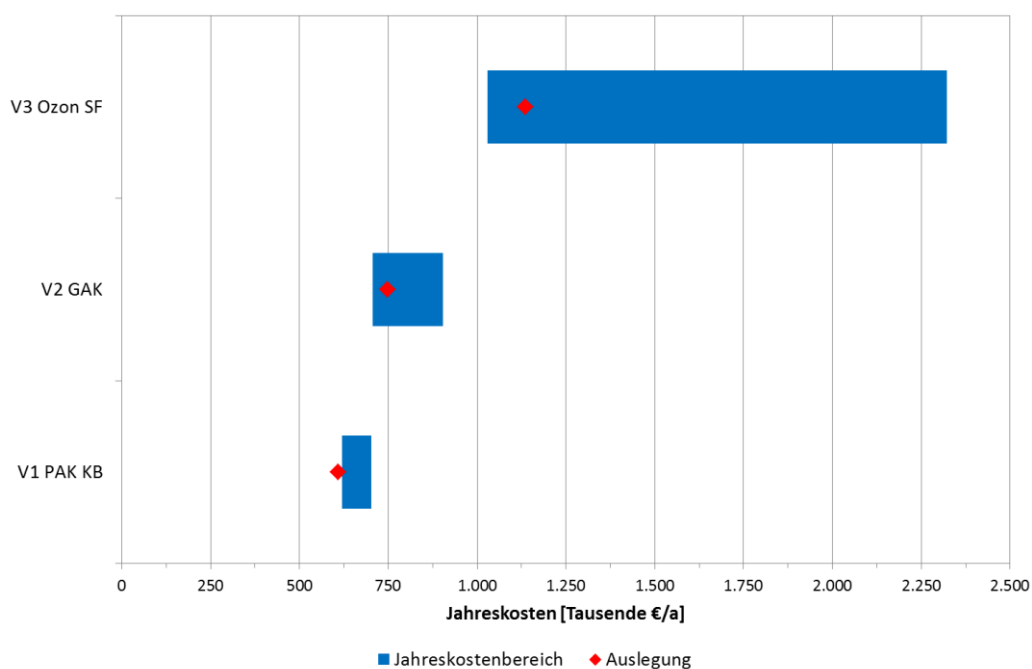


**Abbildung 43: Sensitivität Strompreis  $\pm 10\%$  bei Teilstrombehandlung**

## 6.2.2 Vollstrombehandlung

### 6.2.2.1 Betriebsmittelverbrauch

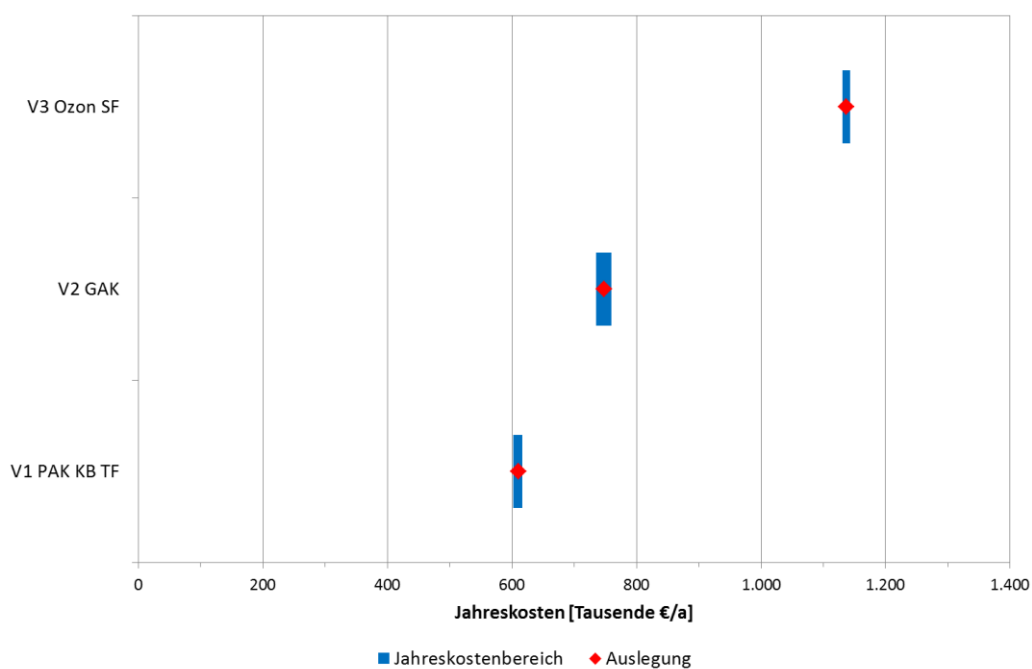
Bezüglich des Betriebsmitteleinsatzes zeigt sich, dass die Variante 3 (Ozonung) am sensibelsten auf Abweichungen von den getroffenen Annahmen reagieren (siehe Abbildung 44). Die Differenz der Jahreskosten für die Variante 3 (Ozon) beträgt rd. 1.3 Mio €/a (etwa von  $-9,5\%$  bis  $+104,2\%$  der angesetzten Kosten). Für Variante 2 (GAK-Filtration) belaufen sich die Änderungen der Jahreskosten auf bis zu 197.000 €/a (etwa von  $-5,5\%$  bis  $+20,9\%$  der angesetzten Kosten). Für die Variante 1 (PAK) können die Kosten über 83.000 €/a variieren (etwa von  $1,5\%$  bis  $+15,1\%$  der angesetzten Kosten).



**Abbildung 44: Sensitivität Betriebsmittelverbrauch Kläranlage Frechen bei Vollstrombehandlung**

#### 6.2.2.2 Betriebsmittelpreise

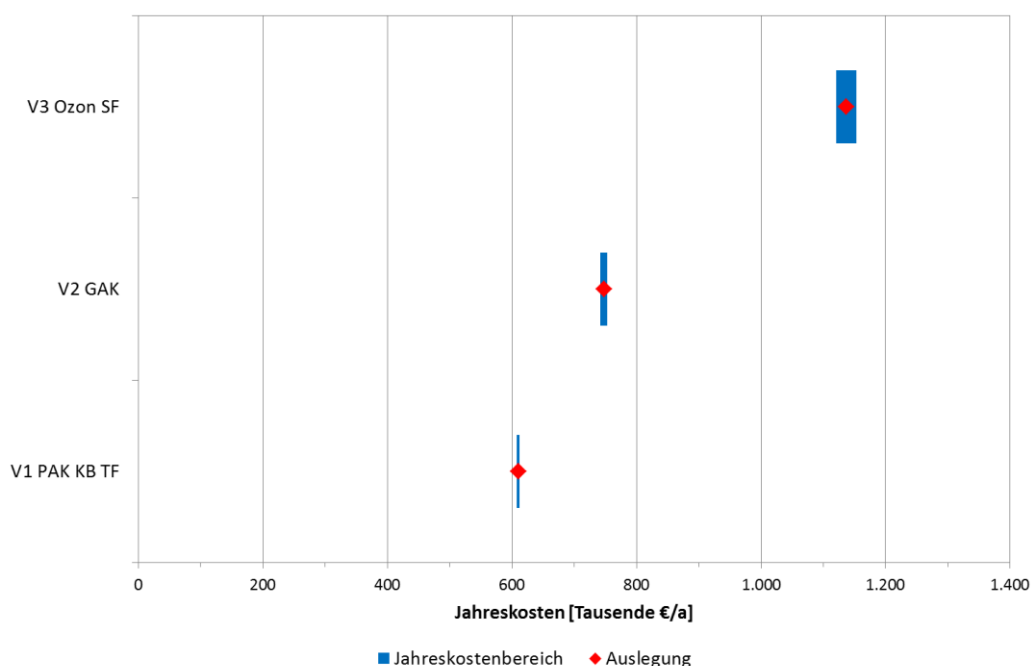
Bezüglich der Bezugspreise für die Betriebsmittel zeigt sich, dass die Variante 2 (GAK) am sensibelsten auf Abweichungen von den getroffenen Annahmen reagiert (siehe Abbildung 45). Die Jahreskosten für die GAK-Filtration können je nach Betriebsmittelpreis über 25.000 €/a variieren (etwa von  $\pm 1,7\%$  der angesetzten Kosten). Für Variante 3 (Ozon) belaufen sich die Änderungen der Jahreskosten auf bis zu 12.000 €/a (etwa von  $\pm 0,5\%$  der angesetzten Kosten). Für die Variante 1 (PAK) beträgt die Kostendifferenz rd. 15.000 €/a (etwa von  $\pm 1,3\%$ ).



**Abbildung 45: Sensitivität Betriebsmittelpreise Kläranlage Frechen bei Vollstrombehandlung**

### 6.2.2.3 Strompreis

Auf Änderungen des Strompreises um  $\pm 10\%$  reagiert erwartungsgemäß die Variante 3 (Ozon) sensibler, als die Aktivkohle-Varianten (Varianten 1 und 2). Die Jahreskosten für die Variante 1 (PAK) verändern sich um rd. 4.000 €/a (etwa  $\pm 0,3\%$ ), für Variante 2 (GAK) um rd. 11.000 €/a (etwa  $\pm 0,8\%$ ). Die Variante 3 (Ozon) dagegen benötigt relativ viel Energie für die Ozongeneration und die entsprechende Sicherheitstechnik. Eine Strompreisänderung bewirkt hier eine Kostenänderung von rd. 32.000 €/a (etwa  $\pm 1,4\%$ ). Die Sensitivitäten der Varianten gegenüber der Strompreisänderung sind in Abbildung 46 dargestellt.



**Abbildung 46: Sensitivität Strompreis  $\pm 10\%$  Kläranlage Frechen bei Vollstrombehandlung**

### 6.2.3 Zusammenfassung Sensitivitätsanalysen

Für die Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen wird ein Punktesystem zur Bewertung genutzt. Ein Punkt steht für keine Sensitivität und fünf Punkte stehen für eine sehr starke Sensitivität. Die Gewichtungen für die drei unterschiedlichen Sensitivitätsanalysen sind folgende:

- Betriebsmitteleinsatz      60 %
- Betriebsmittelkosten      25 %
- Strompreis                    15 %

Folgende Bewertungsgrenzen wurden gewählt:

- Nicht sensibel:              Abweichung < 1%              → 1 Punkt
- Wenig sensibel:              Abweichung 1% bis 2%        → 2 Punkte
- Mäßig sensibel:              Abweichung 2% bis 4%        → 3 Punkte
- Stark sensibel:                Abweichung 4% bis 6%        → 4 Punkte
- Sehr stark sensibel:        Abweichung > 6%              → 5 Punkte

In Tabelle 23 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen bei der Teilstrombehandlung zusammengefasst. Die gewichtete Bewertung zeigt auf, dass Variante 2 (GAK) insgesamt am sensibelsten auf Abweichungen von den getroffenen Annahmen und errechneten Werten reagiert. Die Variante 3 (Ozon) reagiert geringfügig weniger empfindlich auf Abweichungen. Die geringste Sensitivität zeigt die Variante 1 (PAK) mit einer Bewertung von 3,90 auf.

**Tabelle 23: Zusammenfassung Sensitivitätsanalysen**

	Betriebsmittel-einsatz		Betriebsmittel-kosten		Strompreis		Bewertung
	60,00%		25,00%		15,00%		
<b>Variante 1 (Teilstrom)- PAK-KB mit Tuchfiltration</b>	sehr stark sensibel	5	mäßig sensibel	3	nicht sensibel	1	<b>3,90</b>
<b>Variante 2 (Teilstrom)-kontinuierlich beschickter GAK-Filter</b>	sehr stark sensibel	5	stark sensibel	4	wenig sensibel	2	<b>4,30</b>
<b>Variante 3 (Teilstrom)-Ozonung mit kont.besch. Sandfilter</b>	sehr stark sensibel	5	wenig sensibel	2	mäßig sensibel	3	<b>3,95</b>

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen für die Vollstrombehandlung unterscheiden sich geringfügig zu den Ergebnissen der Teilstrombehandlung (siehe Tabelle 24). In diesem Fall weist die Variante 1 (PAK) die geringste Sensitivität mit einer Bewertung von 3,90 auf.

**Tabelle 24: Zusammenfassung Sensitivitätsanalysen**

	Betriebsmittel-einsatz		Betriebsmittel-kosten		Strompreis		Bewertung
	60,00%		25,00%		15,00%		
<b>Variante 1 (Vollstrom)- PAK-KB mit Tuchfiltration</b>	sehr stark sensibel	5	mäßig sensibel	3	nicht sensibel	1	<b>3,90</b>
<b>Variante 2 (Vollstrom)-kontinuierlich beschickter GAK-Filter</b>	sehr stark sensibel	5	mäßig sensibel	3	wenig sensibel	2	<b>4,05</b>
<b>Variante 3 (Vollstrom)-Ozonung mit kont.besch. Sandfilter</b>	sehr stark sensibel	5	wenig sensibel	2	mäßig sensibel	3	<b>3,95</b>

Da die Parameter CSB, AFS und Nitrit im Ablauf der KA Frechen zeitliche Schwankungen unterliegen, beeinflussen diese den Betriebsmitteleinsatz. Dieser Einfluss ist vor allem bei dem Betriebsmitteleinsatz von Ozonung (Variante 3) zu erkennen (siehe Abbildung 41 und Abbildung 44). Aus diesem Grund ist ggf. bei dem Einsatz von Ozonung zur Spurenstoffelimination auf der KA Frechen mit einem instabilen Betrieb zu rechnen.

### 6.3 Variantenbewertung

Bei der Bewertung der vorgestellten Verfahrensvarianten zur Umsetzung einer Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Frechen kommt eine Reihe von Kriterien zum Tragen. Dazu zählen nicht nur ökonomische Gesichtspunkte, sondern auch Aspekte der Ökologie, des Ressourcenverbrauchs, des Arbeitsaufwandes und der Arbeitssicherheit. Die Auswahl der Kriterien für die Bewertung der einzelnen Verfahrensvarianten wurde auf der Grundlage des RiSKWa-Leitfadens „Begriffe und Definitionen zu ausgewählten Technologien zur Elimination von Spurenstoffen und Krankheitserregern aus Abwasser“ getroffen. [20] Die vom RiSKWa-Leitfaden vorgeschlagene Liste von Kriterien wurde angepasst. Die Bewertungskriterien sind in Hauptpunkten zusammengefasst, deren Gewichtung sich aus der Summe der Gewichtungen der einzelnen Kriterien ergibt. Die Gewichtungen verteilen sich wie folgt:

1. Bewertungskriterien zur Ökonomie: 50 %
2. Bewertungskriterien zu betrieblichen Aspekten: 30 %
3. Bewertungskriterien zur Ökologie: 20 %

Tabelle 25 zeigt die gewählten Bewertungskriterien und ihre detaillierte Gewichtung.

**Tabelle 25: Liste der gewählten Bewertungskriterien und Gewichtungen**

Bewertungsmatrix	Gewichtung
<b>1. Ökonomie</b>	<b>50,00%</b>
Projektkostenbarwert	35,00%
Investitionskosten	10,00%
Kostensicherheit / Sensitivitäten	5,00%
<b>2. Betriebliche Aspekte</b>	<b>30,00%</b>
Betriebs- und Wartungsaufwand	20,00%
Arbeitssicherheit	10,00%
<b>3. Ökologie</b>	<b>20,00%</b>
Elimination von Verunreinigungen	10,00%
CO <sub>2</sub> -Belastung	5,00%
Reststoffanfall	5,00%
<b>Summe gewichteter Anteile</b>	<b>100,00%</b>

Eine Reihe der gewählten Kriterien kann durch errechnete Zahlenwerte (z.B. Kosten, Energieverbräuche, Betriebsmittelverbräuche) ausgedrückt und entsprechend bewertet werden. Die Variante, die das Kriterium dabei am besten erfüllt, erhält die gesamte dem Kriterium zugeschriebene prozentuale Gewichtung. Die Varianten, deren Kriterienerfüllung die der Besten Variante um 200% über- bzw. unterschreitet erhält 0 %. Die übrigen Varianten erhalten linear interpolierte Anteile an der prozentualen Gewichtung des Kriteriums. Für die Kriterien, die nicht in Zahlenwerten ausgedrückt werden können, wird manuell eine Abwägung und Gewichtung vorgenommen. Die Variante, die in der Summe über alle Kriterien die höchste prozentuale Gewichtung erreicht, ist die vorzuziehende Variante.

### 6.3.1 Teilstrombehandlung

Werden die monetären und nicht-monetären Kriterien wie z.B. Ökologie, Ressourcenverbrauch, Kostenrisiken, Arbeitsaufwand und Arbeitssicherheit in den Variantenvergleich mit einbezogen, so ergibt sich das in Tabelle 26 zusammengefasste Ergebnis. Die detaillierte Bewertungsmatrix ist in Anhang 1 beigefügt.

**Tabelle 26: Zusammenfassung der Bewertungsmatrix für die Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination bei Teilstrombehandlung**

Bewertungsmatrix	Gewichtung	Variante 1 (Teilstrom)	Variante 2 (Teilstrom)	Variante 3 (Teilstrom)
		PAK-KB mit Tuchfiltration	kontinuierlich beschickter GAK-Filter	Ozonung mit kont.besch. Sandfilter
<b>1. Ökonomie</b>	<b>50,00%</b>	<b>46,40%</b>	<b>31,82%</b>	<b>2,24%</b>
Projektkostenbarwert	35,00%	35,00%	24,92%	0,94%
Herstellkosten	10,00%	10,00%	6,00%	0,00%
Kostensicherheit / Sensitivitäten	5,00%	1,40%	0,90%	1,30%
<b>2. Betriebliche Aspekte</b>	<b>30,00%</b>	<b>26,00%</b>	<b>24,40%</b>	<b>2,00%</b>
Betriebs- und Wartungsaufwand	20,00%	20,00%	16,40%	0,00%
Arbeitssicherheit	10,00%	6,00%	8,00%	2,00%
<b>3. Ökologie</b>	<b>20,00%</b>	<b>16,00%</b>	<b>16,30%</b>	<b>18,00%</b>
Elimination von Verunreinigungen	10,00%	9,00%	9,00%	8,50%
CO <sub>2</sub> -Belastung	5,00%	5,00%	3,80%	5,00%
Reststoffanfall	5,00%	2,00%	3,50%	4,50%
<b>Summe gewichteter Anteile</b>	<b>100,00%</b>	<b>88,40%</b>	<b>72,52%</b>	<b>22,24%</b>
<b>Rangfolge</b>		1	2	3

Die Bewertung der unterschiedlichen Kriterien über Gewichtungen führt dazu, dass die Variante 1 (PAK), mit rd. 88,40 %-Punkten Vorsprung, auf Rang 1 steht. Rang 2 erhält Variante 2 (GAK) mit rd. 72,52 %-Punkten und die Variante 3 (Ozon) steht auf Rang 3 mit rd. 22,24 %-Punkte. Durch die unterschiedlichen Vor- und Nachteile von Aktivkohle und Ozon erzielt keine der drei betrachteten Varianten eine vollständige Kriterienerfüllung.

6.3.2 Vollstrombehandlung

In Tabelle 27 ist das Bewertungsergebnis für die Vollstrombehandlung zusammengefasst. Die detaillierte Bewertungsmatrix ist in Anhang 1 beigefügt.

**Tabelle 27: Zusammenfassung der Bewertungsmatrix für die Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination bei Vollstrombehandlung**

Bewertungsmatrix	Gewichtung	Variante 1 (Vollstrom)	Variante 2 (Vollstrom)	Variante 3 (Vollstrom)
		PAK-KB mit Tuchfiltration	kontinuierlich beschickter GAK-Filter	Ozonung mit kont.besch. Sandfilter
<b>1. Ökonomie</b>	<b>50,00%</b>	<b>46,40%</b>	<b>32,81%</b>	<b>3,13%</b>
Projektkostenbarwert	35,00%	35,00%	25,01%	1,83%
Herstellkosten	10,00%	10,00%	6,60%	0,00%
Kostensicherheit / Sensitivitäten	5,00%	1,40%	1,20%	1,30%
<b>2. Betriebliche Aspekte</b>	<b>30,00%</b>	<b>26,00%</b>	<b>20,30%</b>	<b>2,00%</b>
Betriebs- und Wartungsaufwand	20,00%	20,00%	12,30%	0,00%
Arbeitssicherheit	10,00%	6,00%	8,00%	2,00%
<b>3. Ökologie</b>	<b>20,00%</b>	<b>16,00%</b>	<b>15,60%</b>	<b>17,10%</b>
Elimination von Verunreinigungen	10,00%	9,00%	9,00%	8,50%
CO2-Belastung	5,00%	5,00%	3,10%	4,10%
Reststoffanfall	5,00%	2,00%	3,50%	4,50%
<b>Summe gewichteter Anteile</b>	<b>100,00%</b>	<b>88,40%</b>	<b>68,71%</b>	<b>22,23%</b>
<b>Rangfolge</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

Analog zum Bewertungsergebnis der Teilstrombehandlung führt die Bewertung der unterschiedlichen Kriterien über Gewichtungen dazu, dass die Variante 1 (PAK), mit rd. 88,40 %-Punkten, auf Rang 1 steht. Rang 2 erhält Variante 2 (GAK) mit rd. 68,71 %-Punkten und die Variante 3 (Ozon) steht auf Rang 3 mit rd. 22,23 %-Punkte.



## 7. Zusammenfassung

Der Erftverband betreibt die Kläranlage Frechen mit einer Ausbaugröße von 56.100 EW. Das mechanisch-biologisch gereinigte Abwasser wird in den Frechener Bach eingeleitet, welcher in den Südlichen Randkanal mündet. Von dort aus fließt das Wasser weiter bis zum Kölner-Randkanal und schließlich bis zum Rhein. Der Frechener Bach besitzt keine natürliche Speisung. Deswegen besteht dieser grundsätzlich aus biologisch gereinigtem Abwasser der Kläranlage Frechen und, bei starken Regenereignissen, aus mechanisch gereinigtem Mischwasser aus dem RÜB/RRB. Der Südliche Randkanal ist ein künstliches Gewässer. Gemäß WRRL-Monitoring des Landes NRW weisen der Frechener Bach sowie der Südliche Randkanal hinsichtlich der ökologischen und chemischen Parameter einen schlechten Zustand auf. Da der Frechener Bach renaturiert wird, müssen diese Zustände verbessert werden.

Vor diesem Hintergrund wurde die PFI Planungsgemeinschaft mit der Erstellung einer Studie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Frechen beauftragt. Dabei wurden die vorhandenen Daten zur IST-Situation der Kläranlage ausgewertet. Die Daten zur Spurenstoffbelastung des Kläranlagenablaufes, des Frechener Bachs sowie des Südlichen Randkanals wurden ebenfalls ausgewertet.

Am Kläranlageablauf erfolgte die Probeentnahme bei Regen sowie bei Trockenwetter. Die Ergebnisse der Auswertung wurden mit statistischen Erhebungen aus anderen Kläranlagen verglichen. Daraus war erkennbar, dass bestimmte Stoffe die Mittelwerte von Vergleichskläranlagen überschreiten. Außerdem ergab die Auswertung, dass einige Stoffe eine höhere Konzentration bei Regenwetter als bei Trockenwetter aufweisen. Von der Bezirksregierung wurde zudem die Durchführung eines nachfolgenden Monitoring-Programms zur Datenverdichtung am Kläranlage Ablauf angefordert. Dabei wurden 7 Spurenstoffe, Bromid und die Standardablaufwerte untersucht. Die Auswertung dieser Stoffe zeigte, dass 4 der 7 untersuchten Stoffe die mittlere Konzentration von Vergleichskläranlagen überschreiten. Des Weiteren wurde eine hohe Bromidkonzentration festgestellt, die bei einer möglichen Ozonbehandlung zu Schwierigkeiten führen könnte.

Die Auswertung der Spurenstoffanalysen am Frechener Bach zeigt, dass der Bach oberhalb der Kläranlageeinleitungsstelle bereits durch Spurenstoffe belastet ist, was an Mischwasserentlastungen oder an einem möglichen Rückstau des KA-

Ablaufs liegen kann. Diese Belastung wird durch die Einleitung der Kläranlage für 14 der 31 untersuchten Spurenstoffe erhöht.

Weiterhin zeigte die Auswertung der Spurenstoffanalysen am Südlichen Randkanal, dass der Randkanal vor der Mündungsstelle des Frechener Bachs ebenfalls mit Spurenstoffen bereits belastet ist. Dabei überschreiten 9 der 31 untersuchten Stoffe den allgemeinen Vorsorgewert von 0,1 µg/l. Das kann an Mischwasserentlastungen oder an der Einleitung anderer Kläranlagen liegen. Durch die Einleitung des Frechener Bachs wird die Konzentration von 16 der 31 untersuchten Stoffe erhöht.

Insgesamt kann durch die Errichtung einer Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Frechen eine zusätzliche Belastung an Spurenstoffen am Frechener Bach sowie am Südlichen Randkanal vermieden werden. Durch die Verdünnung mit unbelastetem, von Spurenstoffen gereinigtem Abwasser, wäre es sogar möglich die vorhandene Spurenstoffbelastung zu verringern.

Für eine mögliche Umsetzung einer Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Frechen sollte nach Vorgabe des Erftverbandes mindestens 80 % der Jahresabwassermenge in der Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination behandelt werden. Außerdem sollte die Möglichkeit einer Vollstrombehandlung der Abwassermenge untersucht werden. Aus diesem Grund wurden im Rahmen der vorliegenden Studie, folgende 3 Varianten für eine Teil- sowie für eine Vollstrombehandlung der Jahresabwassermenge untersucht, bewertet und miteinander verglichen:

- Variante 1: PAK im Kontaktbecken + Tuchfiltration
- Variante 2: GAK-Filtration
- Variante 3: Ozonung und Nachbehandlung in Sandfiltration

**Teilstrombehandlung:** Aus den durchgeführten Untersuchungen lässt sich eine Vorzugslösung für eine entsprechende Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Frechen ableiten. Bei rein monetärer Betrachtung stellt die Variante 1 (PAK in KB + Tuchfiltration) mit einem Projektkostenbarwert über 30 Jahre von rd. 7,5 Mio. € die kostengünstigste Lösung dar. Die Investitionssumme für diese Variante beläuft sich auf rd. 3.4 Mio. €, die spezifischen Jahreskosten betragen rd. 7,68 €/ (EW\*a) bzw. 0,11 € je m<sup>3</sup> behandeltes Abwasser. Werden auch nicht-monetäre Aspekte der Ökologie, des Ressourcenverbrauchs, des Arbeitsaufwandes oder der Ar-

beitssicherheit mit einbezogen, steht Variante 1 (PAK in KB + Tuchfiltration) weiterhin mit rd. 88,40 % Kriterienerfüllung an erster Stelle, gefolgt von Variante 2 (kontinuierlich beschickter GAK) mit rd. 72,52 % (siehe Tabelle 28).

**Tabelle 28: Zusammenfassung der Bewertungsmatrix für die Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Frechen bei Teilstrombehandlung**

Bewertungsmatrix	Gewichtung	Variante 1 (Teilstrom)	Variante 2 (Teilstrom)	Variante 3 (Teilstrom)
		PAK-KB mit Tuchfiltration	kontinuierlich beschickter GAK-Filter	Ozonung mit kont.besch. Sandfilter
<b>1. Ökonomie</b>	<b>50,00%</b>	<b>46,40%</b>	<b>31,82%</b>	<b>2,24%</b>
Projektkostenbarwert	35,00%	35,00%	24,92%	0,94%
Herstellkosten	10,00%	10,00%	6,00%	0,00%
Kostensicherheit / Sensitivitäten	5,00%	1,40%	0,90%	1,30%
<b>2. Betriebliche Aspekte</b>	<b>30,00%</b>	<b>26,00%</b>	<b>24,40%</b>	<b>2,00%</b>
Betriebs- und Wartungsaufwand	20,00%	20,00%	16,40%	0,00%
Arbeitssicherheit	10,00%	6,00%	8,00%	2,00%
<b>3. Ökologie</b>	<b>20,00%</b>	<b>16,00%</b>	<b>16,30%</b>	<b>18,00%</b>
Elimination von Verunreinigungen	10,00%	9,00%	9,00%	8,50%
CO2-Belastung	5,00%	5,00%	3,80%	5,00%
Reststoffanfall	5,00%	2,00%	3,50%	4,50%
<b>Summe gewichteter Anteile</b>	<b>100,00%</b>	<b>88,40%</b>	<b>72,52%</b>	<b>22,24%</b>
<b>Rangfolge</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

**Vollstrombehandlung:** Bei einer Vollstrombehandlung stellt sich ebenfalls die Variante 1 (PAK in KB + Tuchfiltration) mit einem Projektkostenbarwert über 30 Jahre von rd. 11,6 Mio. € die kostengünstigste Lösung dar. Die Investitionssumme für diese Variante beläuft sich auf rd. 5,6 Mio. €, die spezifischen Jahreskosten betragen rd. 11,88 €/(EW\*a) bzw. 0,15 € je m³ behandeltes Abwasser. Bei der zusätzlichen Betrachtung nicht monetärer Aspekte bleibt die Rangfolge der Varianten unverändert, wie bei der Teilstrombehandlung. Somit steht die Variante 1 (PAK in KB + Tuchfiltration) weiterhin mit rd. 88,40 % an erster Stelle, gefolgt von Variante 2 (kontinuierlich beschickter GAK) mit rd. 68,71 % (siehe Tabelle 29).

**Tabelle 29: Zusammenfassung der Bewertungsmatrix für die Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination bei Vollstrombehandlung**

Bewertungsmatrix	Gewichtung	Variante 1 (Vollstrom)	Variante 2 (Vollstrom)	Variante 3 (Vollstrom)
		PAK-KB mit Tuchfiltration	kontinuierlich beschickter GAK-Filter	Ozonung mit kont.besch. Sandfilter
<b>1. Ökonomie</b>	<b>50,00%</b>	<b>46,40%</b>	<b>32,81%</b>	<b>3,13%</b>
Projektkostenbarwert	35,00%	35,00%	25,01%	1,83%
Herstellkosten	10,00%	10,00%	6,60%	0,00%
Kostensicherheit / Sensitivitäten	5,00%	1,40%	1,20%	1,30%
<b>2. Betriebliche Aspekte</b>	<b>30,00%</b>	<b>26,00%</b>	<b>20,30%</b>	<b>2,00%</b>
Betriebs- und Wartungsaufwand	20,00%	20,00%	12,30%	0,00%
Arbeitssicherheit	10,00%	6,00%	8,00%	2,00%
<b>3. Ökologie</b>	<b>20,00%</b>	<b>16,00%</b>	<b>15,60%</b>	<b>17,10%</b>
Elimination von Verunreinigungen	10,00%	9,00%	9,00%	8,50%
CO2-Belastung	5,00%	5,00%	3,10%	4,10%
Reststoffanfall	5,00%	2,00%	3,50%	4,50%
<b>Summe gewichteter Anteile</b>	<b>100,00%</b>	<b>88,40%</b>	<b>68,71%</b>	<b>22,23%</b>
<b>Rangfolge</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

Im allgemein liegen die Varianten 1 (PAK in KB + Tuchfiltration) und Variante 2 (kontinuierlich beschickter GA) sowohl bei der Teilstrom- als auch bei der Vollstrombehandlung, abgesehen von der Herstellkosten, nah beieinander. Der Unterschied bei den Herstellkosten entsteht hauptsächlich, weil bei der Variante 1 (PAK in KB + Tuchfiltration) u.a. kein Pumpwerk benötigt wird. Dies beeinflusst ebenfalls die Bewertung der betrieblichen Aspekte. Trotzdem kann die Variante 2 (kontinuierlich beschickter GAK) ebenfalls als zielführende Variante betrachtet werden. Da im Ablauf der Kläranlage die CSB- sowie Nitrit-Konzentration zeitliche Schwankungen unterliegen und die Bromidkonzentration sehr hoch ist, wäre eine Ozonanlage (Variante 3) für die Spurenstoffelimination auf der KA Frechen ungeeignet.

Abschließend danken wir dem Betriebspersonal der Kläranlage Frechen und dem Erftverband für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit.

Aufgestellt:

Bochum im Juni 2019

Prof. Dr.-Ing. Johannes Müller-Schaper

## 8. Literatur

- [1] Mertsch, V. (2014): Mikroschadstoffe aus kommunalem Abwasser - Konzeption Nordrhein-Westfalen
- [2] Abegglen, C.; Siegrist, H. (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser - Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen
- [3] Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (2016): Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination
- [4] Wunderlin, P. (2017): Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung von weitergehenden Verfahren zur Spurenstoffelimination, eingesehen am 21.07.2017: [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch)
- [5] KomS-BW (2017): Internetauftritt und Projektsteckbriefe des Kompetenzzentrums Spurenstoffe Baden-Württemberg, eingesehen bzw. heruntergeladen am 17.02.2015, aktualisiert am 20.01.2017: [www.koms-bw.de](http://www.koms-bw.de)
- [6] VSA (2015): Projektsteckbriefe aus der Rubrik „Anlagen/Projekte“ des Internetauftritts des Verbandes Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), heruntergeladen am 17.02.2015: [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch)
- [7] umtec (2015): Internetauftritt Institute für Umwelt- und Verfahrenstechnik der Hochschule für Technik Rapperswil, eingesehen am 03.03.2015: <http://www.umtec.ch/>
- [8] Kom-M.NRW (2016): Projektsteckbriefe aus der „Tatenbank“ des Internetauftritts des Kompetenzzentrums Mikroschadstoff.NRW, eingesehen Februar 2015, aktualisiert Dezember 2016: [www.masterplan-wasser.nrw.de](http://www.masterplan-wasser.nrw.de)
- [9] Abwasserverband Obere Lutter (2014): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „CSB- und Spurenstoffadsorption im Aktivkohle Festbett – Teil 2“, heruntergeladen am 02.05.2016: <https://www.mikroverunreinigungen.de/wp-content/uploads/2014/10/KurzB-2014-September-final.pdf>
- [10] Fa. Nordic Water (2018): Internetauftritt Firma Nordic Water GmbH, eingesehen am Oktober .2018: <https://spurenstoffelimination.de/index.php/produkte/ds-carbon>
- [11] MKULNV NRW (2012): Abschlussbericht des zum Forschungsvorhaben „Ertüchtigung Kommunaler Kläranlagen durch den Einsatz der Membrantechnik“ („MIKROMEM“)

- [12] RiSKWa (2013): Leitfaden Polare organische Spurenstoffe als Indikatoren im anthropogen beeinflussten Wasserkreislauf
- [13] Luo et al. (2014): A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment
- [14] Türk et al. (2013): Volkswirtschaftlicher Nutzen der Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen zur Elimination von organischen Spurenstoffen, Arzneimitteln, Industriechemikalien, bakteriologisch relevanten Keimen und Viren (TP 9)
- [15] ATV-DVWK-A 198 (2003): Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen
- [16] Margot, J.; Kienle, C.; Magnet, A.; Weil, M.; Rossi, L.; de Alencastro, L. F.; Abegglen, C.; Thonney, D.; Chèvre, N.; Schärer, M.; Barry, D. A. (2013): Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon?
- [17] Oberflächengewässerverordnung - OGeV (2011): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer
- [18] Oekotoxzentrum (2013): Vorschläge für akute und chronische Qualitätskriterien für ausgewählte schweizrelevante Substanzen. Heruntergeladen von [www.oekotoxzentrum.ch](http://www.oekotoxzentrum.ch) am 11.12.2014
- [19] ATV-DVWK-A 201 (2005): Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Abwasserteichanlagen
- [20] RiSKWa (2015): Leitfaden „Begriffe und Definitionen zu ausgewählten Technologien zur Elimination von Spurenstoffen und Krankheitserregern aus Abwasser“
- [21] MKULNV NRW (2015): Steckbriefe der Planungseinheiten in den nordrhein-westfälischen Anteilen von Rhein, Weser, Ems und Maas. Bewirtschaftungsplan 2016-2021. Oberflächengewässer und Grundwasser Teileinzugsgebiet Rhein/Rheingraben Nord