

# Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg

## Stadtwerke Horn-Bad Meinberg

### **Machbarkeitsstudie Mikroschadstoffentfernung auf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg**

EDV-Ausfertigung

März 2019

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

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

Alte Bahnhofstr. 56  
44892 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>2</b>
<b>2.1</b>	<b>Kläranlage</b> .....	<b>2</b>
2.1.1	Beschreibung.....	2
2.1.2	Kläranlagenbelastung .....	3
2.1.3	Jahresabwasser- und Schmutzwassermengen .....	4
2.1.4	Ablaufwerte.....	6
2.1.5	Wassermengen gemäß Erlaubnisbescheid.....	7
2.1.6	Überwachungswerte gemäß Erlaubnisbescheid .....	8
2.1.7	Anpassung des Phosphorgrenzwertes $P_{ges}$ .....	8
2.1.8	Spurenstoffbelastung Ablauf .....	9
<b>2.2</b>	<b>Vorfluter</b> .....	<b>11</b>
2.2.1	Beschreibung.....	11
2.2.2	Abflussmengen und Abwasseranteil .....	12
2.2.3	Allgemeine Gewässeruntersuchung.....	12
2.2.4	Spurenstoffbelastung .....	13
<b>3.</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Einsatz Pulveraktivkohle</b> .....	<b>15</b>
3.1.1	Allgemeine Beschreibung .....	15
3.1.2	Vor- und Nachteile .....	18
3.1.3	Realisierte Anlagen.....	19
<b>3.2</b>	<b>Einsatz granulierter Aktivkohle</b> .....	<b>20</b>
3.2.1	Allgemeine Beschreibung .....	20
3.2.2	Vor- und Nachteile .....	22
3.2.3	Realisierte Anlagen.....	23
<b>3.3</b>	<b>Einsatz Ozonung</b> .....	<b>24</b>

3.3.1	Allgemeine Beschreibung .....	25
3.3.2	Vor- und Nachteile .....	27
3.3.3	Realisierte Anlagen.....	28
<b>3.4</b>	<b>Sonstige Verfahrensvarianten .....</b>	<b>30</b>
3.4.1	Dichte Membranen.....	30
3.4.2	Advanced Oxidation Processes (AOP).....	31
3.4.3	Weitere Verfahren.....	31
<b>4.</b>	<b>Planungs- und Bemessungsgrundlagen .....</b>	<b>33</b>
4.1	Örtliche Gegebenheiten .....	33
4.2	Verfahrenswahl in Abhängigkeit der Eliminationsleistung .....	34
4.3	Auslegungswassermengen .....	35
4.4	Bromidkonzentration im Ablauf .....	38
4.5	Abschlagbauwerk und Hebewerk.....	38
4.6	Förderprogramm .....	38
<b>5.</b>	<b>Variantenuntersuchung Spurenstoffelimination .....</b>	<b>40</b>
5.1	Auswahl der betrachteten Varianten.....	40
5.2	Ausführung und Dimensionierung.....	40
5.2.1	Variante 1a: PAK im Kontaktbecken + Flockungsfiltration.....	40
5.2.2	Variante 1b: PAK im Kontaktbecken + Tuchfiltration .....	43
5.2.3	Variante 2a: GAK-Filtration in Flockungsfiltrationsbecken .....	44
5.2.4	Variante 2b: GAK-Filtration in Dyna-Filtern .....	45
5.2.5	Variante 3: Ozonung mit Schönungsteich .....	47
<b>5.3</b>	<b>Kostenschätzungen .....</b>	<b>50</b>
5.3.1	Investitionskostenschätzungen .....	50
5.3.2	Betriebskostenschätzungen .....	51

<b>5.4</b>	<b>Wirtschaftlichkeit.....</b>	<b>54</b>
<b>5.5</b>	<b>Sensitivitätsanalysen .....</b>	<b>56</b>
5.5.1	Betriebsmittelverbrauch .....	56
5.5.2	Betriebsmittelpreis .....	57
5.5.3	Strompreis .....	59
5.5.4	Zusammenfassung .....	59
<b>5.6</b>	<b>Variantenbewertung .....</b>	<b>60</b>
5.6.1	Vorgehensweise .....	60
5.6.2	Ökonomie .....	61
5.6.3	Betriebliche Aspekte .....	61
5.6.4	Ökologie .....	62
5.6.5	Zusammenfassung .....	63
<b>6.</b>	<b>Optimierung Nachklärbecken und Belebung .....</b>	<b>64</b>
6.1	Nachklärbecken .....	64
6.2	Belüftungssystem Belebung .....	67
<b>7.</b>	<b>Verfahrensempfehlung.....</b>	<b>71</b>
7.1	Phosphorelimination .....	71
7.2	Spurenstoffelimination.....	71
<b>8.</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>74</b>
<b>9.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>78</b>
<b>10.</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>79</b>
<b>11.</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>80</b>

**ANHANG**

<b>Anhang 1</b>	<b>Übersichtslageplan</b>
<b>Anhang 2</b>	<b>Luftbild</b>
<b>Anhang 3</b>	<b>Untersuchungsbefunde</b>
<b>Anhang 4</b>	<b>Übersicht Spurenstoffanalytik Ablauf Nachklärung</b>
<b>Anhang 5</b>	<b>Übersicht Spurenstoffanalytik Wiembecke</b>
<b>Anhang 6</b>	<b>Steckbrief WRRL-Monitoring Wiembecke</b>
<b>Anhang 7</b>	<b>Lageplan Variante 1a</b>
<b>Anhang 8</b>	<b>Lageplan Variante 2a</b>
<b>Anhang 9</b>	<b>Lageplan Variante 2b</b>
<b>Anhang 10</b>	<b>Lageplan Variante 3</b>
<b>Anhang 11</b>	<b>Investitions- und Betriebskostenschätzungen</b>
<b>Anhang 12</b>	<b>Projektkostenbarwert und Rangfolge</b>
<b>Anhang 13</b>	<b>Sensitivitätsanalyse Betriebsmittelverbrauch</b>
<b>Anhang 14</b>	<b>Sensitivitätsanalyse Betriebsmittelpreis</b>
<b>Anhang 15</b>	<b>Sensitivitätsanalyse Strompreis</b>
<b>Anhang 16</b>	<b>Bewertung Sensitivitäten</b>
<b>Anhang 17</b>	<b>Bewertungsmatrix</b>

## 1. Veranlassung und Auftrag

Die Stadtwerke Horn-Bad Meinberg betreiben die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg, die für die mechanisch-biologische Abwasserreinigung von rd. 34.000 EW ausgelegt und derzeit mit einer CSB-Fracht von rd. 22.100 EW belastet ist. Neben den häuslichen Abwässern von rd. 16.200 Einwohnern gelangen industrielle und gewerbliche Abwässer zur Kläranlage.

Der gereinigte Ablauf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg wird in den Oberlauf der Wiembecke abgeleitet. Der Abwasseranteil im Gewässer ist vergleichsweise hoch: Beim mittleren Abfluss der Wiembecke beträgt der aus der Abwasserreinigung resultierende Anteil knapp 17 %. Beim mittleren Niedrigwasserabfluss der Wiembecke beläuft sich der Anteil des Kläranlagenablaufs am Gesamtabfluss auf knapp 94 %. Gemäß WRRL-Monitoring des Landes Nordrhein-Westfalen weist die Wiembecke hinsichtlich der ökologischen und chemischen Parameter teilweise mäßige oder unbefriedigende Zustände auf. Unter Berücksichtigung des oben genannten Abflussanteils des Kläranlagenablaufs führt die Bezirksregierung Detmold die Beeinträchtigung der Gewässerqualität u.a. auf den durch die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg verursachten Mikroschadstoff- und Phosphorintrag ins Gewässer zurück.

Vor diesem Hintergrund wurden die Stadtwerke Horn-Bad Meinberg gemäß Nebenbestimmung des Erlaubnisbescheids aus Februar 2017 aufgefordert, eine Machbarkeitsstudie zur Elimination von Mikroschadstoffen sowie zur weitergehenden Phosphorelimination zu erstellen. Hierbei ist zunächst die Belastung des Gewässers und des Kläranlagenablaufs mittels vorgegebenem Stoffscreening zu analysieren. Im Anschluss ist die Installation einer 4. Reinigungsstufe unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse technisch und wirtschaftlich zu prüfen und eine Vorzugsvariante zu definieren. Die Bearbeitung soll in Anlehnung an die Veröffentlichung „Mikroschadstoffentfernung machbar?“ [1] des Kompetenzzentrums NRW erfolgen.

Die PFI Planungsgemeinschaft wurde von den Stadtwerken Horn-Bad Meinberg mit Schreiben vom 28.05.2018 mit der Erstellung der Machbarkeitsstudie beauftragt. Die Studie zur Mikroschadstoffentfernung und weitergehenden Phosphorelimination der Kläranlage Horn-Bad Meinberg wird hiermit vorgelegt.

## 2. Grundlagenermittlung

### 2.1 Kläranlage

#### 2.1.1 Beschreibung

Die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg ist als Anlage zum Kohlenstoffabbau mit Schlammstabilisierung und Stickstoff- und Phosphorelimination konzipiert. Die Zentralkläranlage wurde 1975-1977 errichtet. Im Jahr 1995/1996 folgte eine umfangreiche Kläranlagenerweiterung: Es wurden zwei zusätzliche Belebungsbecken, zwei Nachklärbecken sowie ein Schlammsilo inklusive Zubehör installiert. Die neuen Komponenten wurden auf einer Fläche östlich der bestehenden Anlage installiert, welche etwas höher als die Bestandsanlage liegt. Die örtlichen Gegebenheiten sind Anhang 1 „Übersichtslageplan“ und Anhang 2 „Luftbild“ zu entnehmen. Die Zentralkläranlage wird derzeit wie folgt betrieben:

- Das kommunale Abwasser und das Industrieabwasser kommen über gesonderte Sammler auf dem Kläranlagengelände an. In geringen Mengen werden ergänzend Fäkalschlämme von nicht angeschlossenen Haushalten angenommen. Die einzelnen Abwasserströme werden zusammengeführt und über ein Schneckenhebewerk der Rechenanlage und dem belüfteten Sand-Fettfang zugeführt.
- Über Tauchmotorpumpen erfolgt im Anschluss die Verteilung auf die parallel betriebenen Belebungsbecken. Ein Drittel der Gesamtwassermenge wird dem „alten“ Belebungsbecken zugeführt. Die übrige Abwassermenge wird in die „neuen“ Belebungsbecken gepumpt. Alle Belebungsbecken sind als Rundbecken mit einem Beckenvolumen von rd. 5.000 m<sup>3</sup> ausgeführt und mit einem Brücken-Belüfter ausgestattet. Die „neuen“ Belebungsbecken haben eine innenliegende Denitrifikation. Über den Brücken-Belüfter sowie die installierten Antriebsbleche werden der Sauerstoffeintrag und die Umwälzung gewährleistet.
- Dem „alten“ Belebungsbecken sind zwei Nachklärbecken nachgeschaltet. Den beiden „neuen“ Belebungsbecken ist jeweils ein Nachklärbecken zugeordnet. Der im Schlammtrichter anfallende Belebtschlamm wird in das Rücklaufschlammumpwerk abgelassen und zurück ins Belebungsbecken

gefördert. In der Nachklärung anfallender Schwimmschlamm wird aus der Schwimmschlammrinne in einen Schwimmschlammtrichter gefördert und mittels Tauchmotorpumpe der Belebung zugeführt.

- Die Phosphatreduktion erfolgt mittels Simultanfällung im Belebungsbecken. Das Fällmittel wird am Rücklaufschlammumpwerk dosiert. Es wird Eisen-III-Chlorid genutzt.
- Aus der Nachklärung fließt das gereinigte Abwasser im Freigefälle in eine Venturi-Ablaufrinne und von hier über den Schönungsteich in die Wiembecke.
- Zur Speicherung des anfallenden Überschussschlamm sind drei Schlammilos vorhanden. Das Gesamtspeichervolumen beträgt rd. 1.600 m<sup>3</sup>. Der Überschussschlamm wird mittels Zentrifuge entwässert und anschließend kompostiert.
- Neben den zuvor genannten Komponenten sind auf dem Kläranlagengelände zwei Speicherbecken vorhanden, welche bei Starkregenereignissen bzw. in Havariefällen zur Zwischenspeicherung genutzt werden.

### 2.1.2 Kläranlagenbelastung

Die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg ist auf rd. 34.000 Einwohnergleichwerte ausgelegt. Im Einzugsgebiet der Zentralkläranlage ist eine Trennkanalisation installiert. Neben den erfassten häuslichen Abwässern von rd. 16.200 Einwohnern gelangen industrielle und gewerbliche Abwässer zur Kläranlage. Als Industrieeinleiter ist vor allem Firma Sonae zu nennen, welche verschiedene Holzwerkstoffe produziert. Die Produktion am Standort Horn-Bad Meinberg ist rückläufig.

Die Stadt Horn-Bad Meinberg ist ein Kurort mit verschiedenen Rehabilitationszentren. Hinsichtlich möglicher Spurenstoffeinträge sind folgende Einleiter zu nennen:

- „Tagesklinik Horn-Bad Meinberg“ (Psychatrie)
- „Dr. Becker Brunnen-Klinik“ (Rehabilitation)
- „MediClin Rose Klinik“ (Rehabilitation)
- Kurhaus Schanzenberg (Rehabilitation)
- Verschiedene Pflegeheime

Zur Ermittlung der aktuellen Kläranlagenbelastung wurden die Betriebsdaten der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg des Jahres 2017 ausgewertet. Die Daten der vorhergehenden Jahre stehen digital nicht zur Verfügung.

Im Zulauf der Kläranlage werden die Parameter CSB,  $N_{ges}$  und  $P_{ges}$  analysiert. Die Messungen werden wöchentlich durchgeführt. Die Beprobung erfolgt wochentags. Unter Berücksichtigung der einwohnerspezifischen Frachten gemäß DWA-A 198 [3] wurde die Belastung der Anlage wie in Tabelle 1 dargestellt abgeschätzt. Demnach wurde die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg in 2017 mit einer CSB-Fracht von rd. 22.100 EW belastet.

**Tabelle 1: Herleitung EW-Belastung ZKA Horn-Bad Meinberg 2017**

		<b>CSB</b>	<b><math>N_{ges}</math></b>	<b><math>P_{ges}</math></b>
<b>Mittlere Fracht Zulauf ZKA 2017</b>	<b>[kg/d]</b>	2.651	203	37
<b>Einwohnerspezifische Frachten gemäß DWA-A198</b>	<b>[g/(EW*d)]</b>	120	11	1,8
<b>EW-Belastung Zulauf ZKA 2017</b>	<b>[EW]</b>	22.088	18.471	20.747

### 2.1.3 Jahresabwasser- und Schmutzwassermengen

Die Zulaufwassermengen der ZKA Horn-Bad Meinberg werden messtechnisch nicht erfasst. Überschlägig ist davon auszugehen, dass die Jahresabwassermengen den Ablaufwassermengen entsprechen. Die in 2017 erfassten Ablaufwassermengen sind in Tabelle 2 zusammengefasst und in Abbildung 1 dargestellt. Für die Auswertung stehen Tagesmittelwerte des Kläranlagenablaufs zur Verfügung. Daten für kürzere Zeitintervalle z.B. Stunden- oder 5 Minuten-Werte sind nicht verfügbar.

**Tabelle 2: Ablaufwassermengen 2017**

<b>Parameter</b>	
<b>Jährlicher Abfluss <math>Q_a</math></b>	2.343.969 m <sup>3</sup> /a
<b>Mittlerer täglicher Abfluss <math>Q_{d\text{ mittel}}</math></b>	6.422 m <sup>3</sup> /d
<b>Maximaler täglicher Abfluss <math>Q_{d\text{ max}}</math></b>	25.942 m <sup>3</sup> /d
<b>85% Perzentil täglicher Abfluss <math>Q_{d\text{ 85\%}}</math></b>	10.578 m <sup>3</sup> /d

Die gemessenen Ablaufwassermengen schwanken stark und lassen auf einen hohen Fremdwasserzufluss schließen, welche gerade im „nassen“ und gewitterträchtigen Jahr 2017 besonders ausgeprägt auftrat. Gemäß Angabe des Auftraggebers werden die Fremdwasserzuflüsse derzeit geprüft und minimiert, so dass zukünftig von einem geringeren Fremdwasserzufluss auszugehen ist.

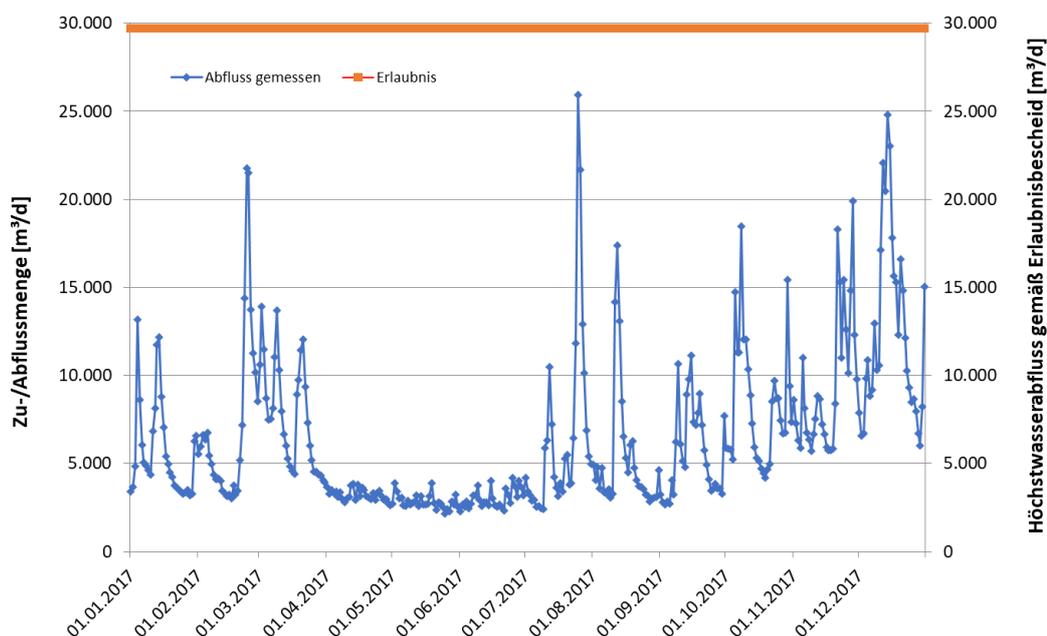


Abbildung 1: Abflussmengen Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg 2017

Tabelle 3: Jahresabwasser- und Jahresschmutzwassermengen 2011-2017

Jahr	Abwassermenge	Abfluss an Trockenwettertagen	Anzahl Trockenwettertage	Mittlerer Abfluss Trockenwettertag	Jahresschmutzwassermenge
	[m³/a]	[m³/a]	[d/a]	[m³/d]	[m³/a]
<b>2011</b>	1.821.592	535.344	169	3.168	1.156.216
<b>2012</b>	2.017.900	504.097	135	3.734	1.366.663
<b>2013</b>	1.812.537	623.397	174	3.853	1.307.701
<b>2014</b>	1.650.225	441.935	133	3.323	1.212.829
<b>2015</b>	2.024.768	524.992	133	3.947	1.440.768
<b>2016</b>	1.766.205	465.569	140	3.325	1.213.625
<b>2017</b>	2.343.969	484.840	117	4.143	1.512.535

In den Jahren 2011 bis 2017 ist von den in Tabelle 3 dargestellten Jahresabwasser- und Jahresschmutzwassermengen auszugehen. Wiederum wird die vergleichsweise hohe Abwassermenge des Jahres 2017 deutlich: Die Anzahl der Regentage in 2017 liegt über dem Durchschnitt der vorhergehenden Jahre. Die gesamte Abwassermenge ist in 2017 überdurchschnittlich hoch.

### 2.1.4 Ablaufwerte

Im Ablauf der Kläranlage werden die Parameter CSB,  $N_{ges}$ ,  $NH_4-N$ ,  $NO_2-N$ ,  $NO_3-N$  und  $P_{ges}$  analysiert. Die Messungen werden wöchentlich durchgeführt. Die Beprobung erfolgt wochentags.

Die CSB- und  $NO_2-N$ -Konzentrationen der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg sind in Abbildung 2 dargestellt. Die CSB-Konzentrationen im Ablauf liegen kontinuierlich unter 30 mg/l auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Die CSB-Konzentration unterschreitet an 85% der beprobten Tage einen Wert von 18 mg/l. Die  $NO_2-N$ -Konzentration im Ablauf der Kläranlage liegt durchgängig unter 0,05 mg/l. An 85% der beprobten Tage liegt die  $NO_2-N$ -Konzentration im Ablauf unter 0,04 mg/l.

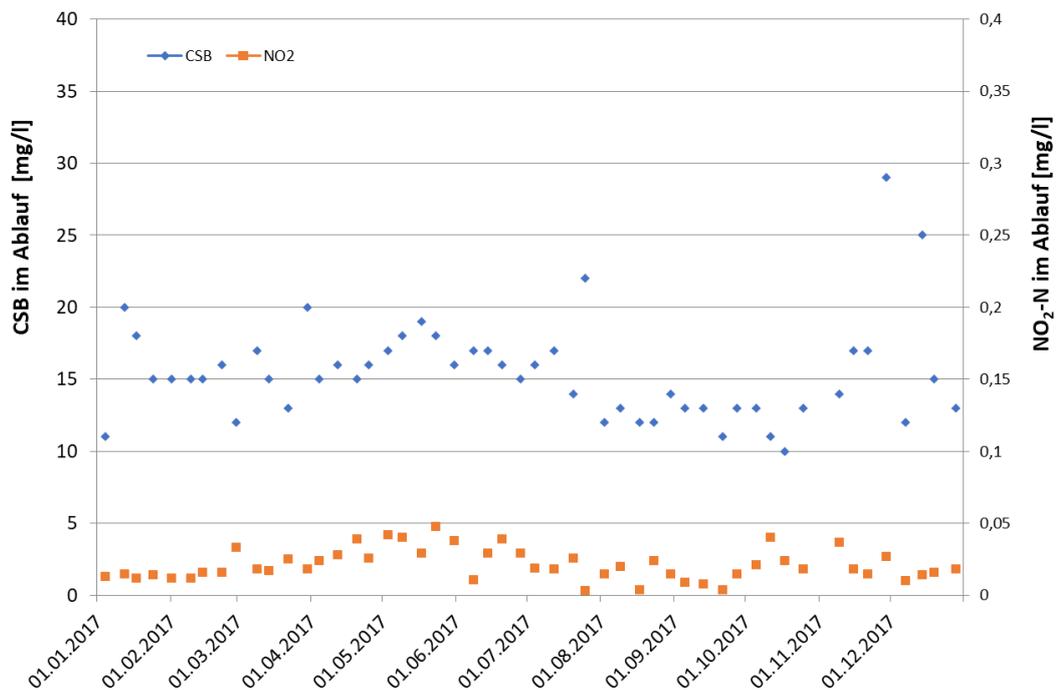


Abbildung 2: CSB-/NO<sub>2</sub>-N-Konzentrationen im Ablauf der Zentralkläranlage 2017

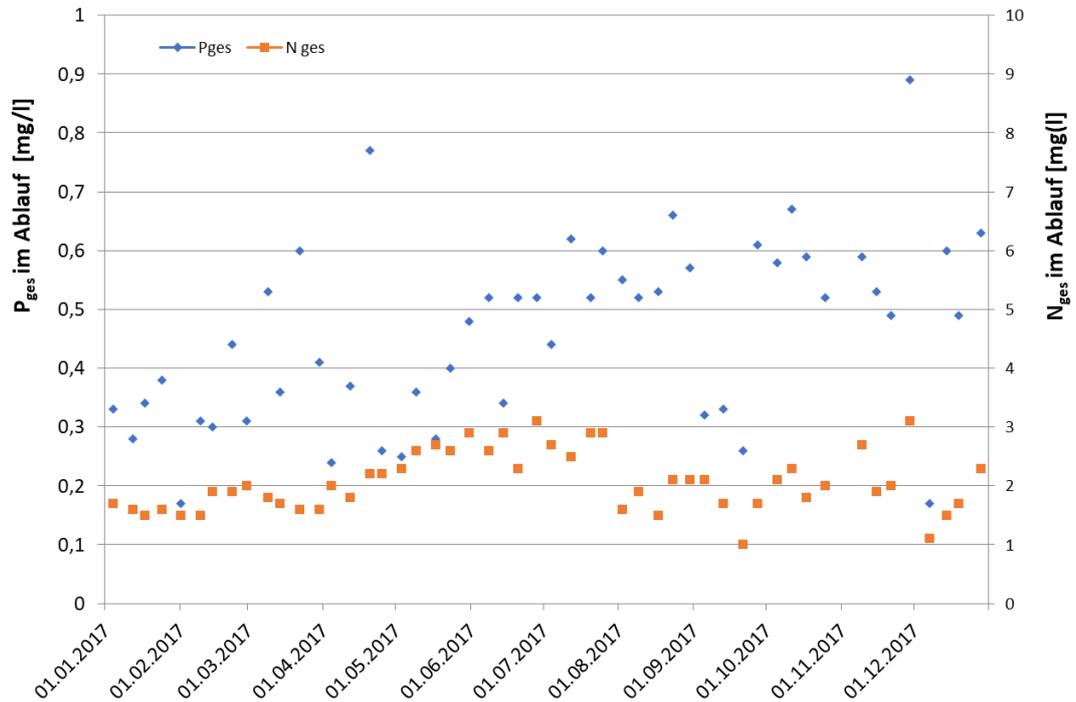


Abbildung 3: P<sub>ges</sub>-/N<sub>ges</sub>-Konzentration im Ablauf der Zentralkläranlage 2017

Die im Ablauf der Nachklärung ermittelten Phosphor- und Stickstoffwerte sind in Abbildung 3 dargestellt. Die P<sub>ges</sub>-Konzentrationen im Ablauf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg liegen kontinuierlich unter 0,9 mg/l auf einem niedrigen Niveau. Die P<sub>ges</sub>-Konzentration unterschreitet an 85% der beprobten Tage einen Wert von 0,60 mg/l. Im Mittel wurde für das Jahr 2017 eine P<sub>ges</sub>-Konzentration von 0,46 mg/l bestimmt.

Die N<sub>ges</sub>-Konzentrationen im Ablauf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg liegen im Betrachtungszeitraum kontinuierlich unter 3,1 mg/l auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Die N<sub>ges</sub>-Konzentration unterschreitet an 85% der beprobten Tage einen Wert von 2,7 mg/l. Im Mittel wurde für das Jahr 2017 eine N<sub>ges</sub>-Konzentration von 2,06 mg/l bestimmt.

### 2.1.5 Wassermengen gemäß Erlaubnisbescheid

Gemäß Erlaubnisbescheid aus 2017 ist die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg berechtigt, einen Höchstwasserabfluss von 343,88 l/s bzw. 1.237,96 m<sup>3</sup>/h in die Wiembecke einzuleiten. Die Jahresschmutzwassermenge wurde zu 1.290.000 m<sup>3</sup> festgesetzt (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Jahresabwasser- und Jahresschmutzwassermengen 2011-2015

Jahr	Abwasser- menge	Abfluss an Trocken- wettertagen	Anzahl Trocken- wettertage	Mittlerer Abfluss Trocken- wettertag	Jahres- schmutzwas- sermenge
	[m³/a]	[m³/a]	[d/a]	[m³/d]	[m³/a]
<b>2011</b>	1.821.592	535.344	169	3.168	1.156.216
<b>2012</b>	2.017.900	504.097	135	3.734	1.366.663
<b>2013</b>	1.812.537	623.397	174	3.853	1.307.701
<b>2014</b>	1.650.225	441.935	133	3.323	1.212.829
<b>2015</b>	2.024.768	524.992	133	3.947	1.440.768
Summe/Mittel 2011-2015		<b>2.629.765</b>	<b>744</b>	<b>3.535</b>	<b>1.290.140</b>
<b>Festgesetzt Erlaubnisbescheid BezReg Detmold</b>					<b>1.290.000</b>

#### 2.1.6 Überwachungswerte gemäß Erlaubnisbescheid

Gemäß Erlaubnisbescheid aus Februar 2017 hat das einzuleitende Abwasser an der Probenahmestelle den in Tabelle 2 aufgeführten Überwachungswerten zu entsprechen. Mit Schreiben aus Mai 2018 erklärten die Stadtwerke Horn-Bad Meinberg, die ebenfalls in Tabelle 5 ebenfalls dargestellten Werte.

Tabelle 5: Überwachungswerte und Erklärte Werte ZKA Horn-Bad Meinberg

Parameter	Einheit	Überwachungswert gemäß Bescheid	Erklärter Wert vom 01.07. bis 30.09.2018
<b>BSB<sub>5</sub></b>	[mg/l]	15	-
<b>CSB</b>	[mg/l]	60	30
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	[mg/l]	3	-
<b>N<sub>gesamt</sub></b>	[mg/l]	15	5,0
<b>P<sub>gesamt</sub></b>	[mg/l]	2	1,2

#### 2.1.7 Anpassung des Phosphorgrenzwertes P<sub>ges</sub>

Gemäß Stellungnahme der Genehmigungsbehörde aus Februar 2018 wurden die Stadtwerke Horn-Bad Meinberg aufgefordert, sowohl eine Mikroschadstoffentfernung als auch die weitergehenden Phosphorelimination im Rahmen der Studie zu berücksichtigen. Dies wurde durch die Genehmigungsbehörde wie folgt begrün-

det: Der Eintrag von Phosphor in die Wiembecke ist über die Oberflächengewässerverordnung limitiert. Da der Abwasseranteil in der Wiembecke vergleichsweise hoch ist, ist eine Verschärfung des Überwachungswertes für Phosphor absehbar.

Mit Schreiben vom 12. November 2018 kündigte die Bezirksregierung Detmold einen zukünftigen Betriebswert für  $P_{\text{ges}}$  von 0,55 mg/l sowie einen Überwachungswert von 1,1 mg/l an. Gemäß Ausführung der Genehmigungsbehörde ist der Betriebswert als Jahresmittelwert einzuhalten und nachzuweisen. Der Betriebswert wurde in 2017 eingehalten. Somit ist die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg bereits jetzt in der Lage die geforderten Überwachungswerte für Phosphor einzuhalten.

Vor diesem Hintergrund wurde die Ausrichtung der Studie auf Wunsch des Auftraggebers geändert: Eine weitergehende Phosphorelimination ist nach aktuellem Kenntnisstand nicht erforderlich und wird somit nicht betrachtet.

#### 2.1.8 Spurenstoffbelastung Ablauf

Gemäß Erlaubnisbescheid aus Februar 2017 sind durch die Stadtwerke Horn-Bad Meinberg im Rahmen der Selbstüberwachung in den Jahren 2017 und 2018 zweimal jährlich Beprobungen des Ablaufs der Kläranlage durchzuführen, welche hinsichtlich der Schwermetalle Kobalt- und Zink sowie ausgewählter Spurenstoffe analysiert werden.

In Abstimmung mit der Bezirksregierung Detmold wurde zur Studienbearbeitung ergänzend ein erweitertes Monitoring auf Mikroschadstoffe im Kläranlagenanlagenablauf durchgeführt: Dem Ablauf der Kläranlage wurden im Abstand von rd. zwei Monaten zwei Proben entnommen und hinsichtlich diverser Spurenstoffe analysiert. Während die erste Probennahme in den Sommerferien im Juli 2018 erfolgte, wurde die zweite Probe nach den Sommerferien, im September 2018 genommen. Sämtliche Probennahmen erfolgten bei Trockenwetter am Ablauf der Nachklärung vor dem Einleiten des Ablaufs in den Schönungsteich. Für jede Analyse wurde eine 72 h-Mischprobe verwendet.

Die einzelnen Untersuchungsbefunde (Selbstüberwachung und Monitoring Studie) sind Anhang 3 zu entnehmen. Die Analyseergebnisse und die Frachtermittlungen wurden in Anhang 4 zusammengefasst und Vergleichswerten der statistischen Erhebungen der OWL Umweltanalytik anderen Kläranlagenabläufe gegenüberge-

stellt. Die gegenüber dem Mittelwert der Vergleichsanlagen erhöhten Spurenstoffe des Ablaufs der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg wurden rot markiert.

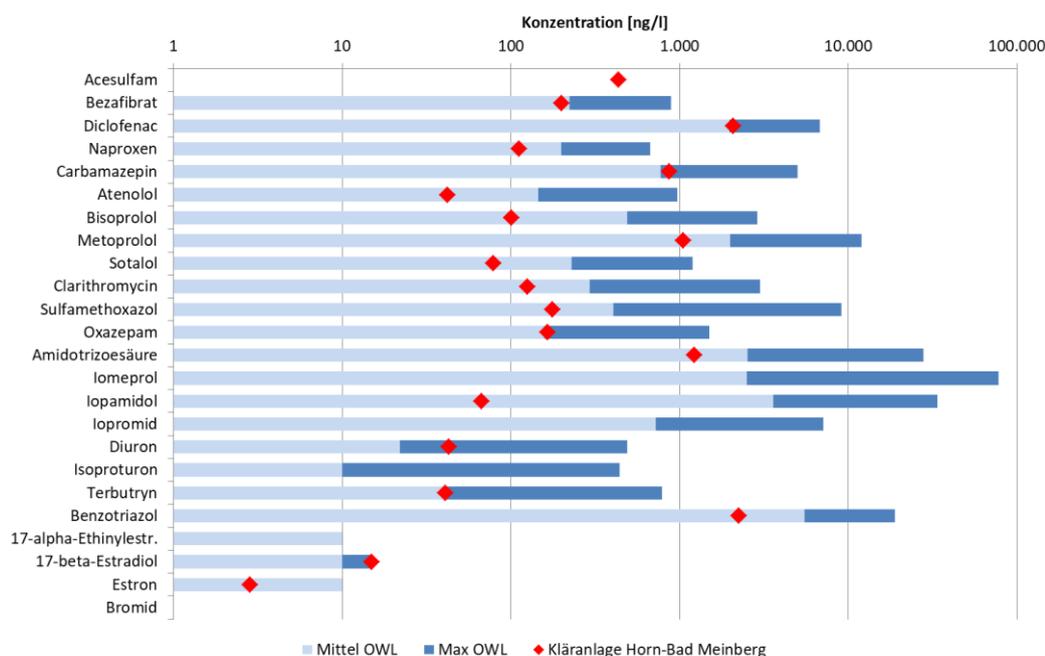
Die Gegenüberstellung des Anhangs 4 verdeutlicht, dass die Konzentrationen diverser Spurenstoffe des Ablaufs der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg im Bereich oder unterhalb des Mittelwerts der Vergleichsanlagen liegen. Teilweise werden die Bestimmungsgrenzen (BG) unterschritten. Nachfolgend aufgelistete Spurenstoffeinzelmessungen des Ablaufs der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg liegen oberhalb des Mittelwertes der Vergleichsanlagen:

- Carbamazepin (Medikament zur Behandlung von Epilepsie)
- Diclofenac (Medikament zur Behandlung von Schmerzen)
- Terbutryn (Algizid in Dispersionsfarbe)
- Bezafibrat (Medikament zur Senkung der Blutfettwerte)
- Oxazepam (Medikament zur Behandlung von Angstzuständen)
- 17-beta-Estradiol (Medikament zur Hormonbehandlung und Verhütung)
- Estron (Medikament zur Hormonbehandlung)
- Diuron (Herbizid zur Unkrautbekämpfung)

Auffällig ist der gemessene Wert des Hormonpräparats 17-beta Estradiol im Ablauf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg: Gemäß der statistischen Auswertung wurden von OWL Umweltanalytik bisher 50 Estradiolmessungen in Kläranlagenabläufen durchgeführt. Nur in drei Fällen konnte Estradiol nachgewiesen werden. Der im Ablauf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg ermittelte Estradiolwert von 15 ng/l ist der maximale von OWL-Umweltanalytik in einem Kläranlagenablauf gemessene Wert.

Ebenfalls als vergleichsweise hoch ist der Estronwert des Ablaufs einzustufen: Durch OWL Umweltanalytik wurden bisher 50 Estronmessungen in einem Kläranlagenablauf vorgenommen. Im Rahmen der Untersuchungen konnten nur bei 6 Messungen ein Wert oberhalb der Bestimmungsgrenze festgestellt werden. Bei beiden im Zuge des Monitorings durchgeführten Analysen wurde Estron im Ablauf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg festgestellt.

In Abbildung 4 sind die Mittelwerte der verfügbaren Einzelmessung der statistischen Erhebungen der OWL Umweltanalytik gegenübergestellt:



**Abbildung 4: Vergleich Spurenstoffe Ablauf ZKA Horn-Bad Meinberg mit anderen von OWL-Umweltanalytik analysierten Kläranlagenabläufen**

Im Rahmen der Mittelwertbetrachtung ist ersichtlich, dass sowohl Diuron als auch 17-beta-Edtradiol oberhalb des Mittelwertes der übrigen Kläranlagen liegen. Die Darstellung von Estron ist leicht verfälscht, da von OWL ein Mittelwert <10ng/l angegeben wurde, da bisher nur 6 Analysen oberhalb der Bestimmungsgrenze vorliegen. Der Bromid-Ablaufwert der ZKA Horn-Bad Meinberg liegt unterhalb der Bestimmungsgrenze und ist somit nicht dargestellt.

## 2.2 Vorfluter

### 2.2.1 Beschreibung

Das gereinigte Abwasser durchströmt zunächst den Schönungsteich und wird im Anschluss in den Oberlauf der Wiembecke eingeleitet. Die Wiembecke ist ein rd. 18 km langer Fluss, welcher über die Berlebecke, den Knochenbach und die Werre in die Weser mündet. Von der Quelle bis zur Stadtgrenze Horn-Bad Meinberg steht die Wiembecke über rd. 3,5 km unter Naturschutz. Die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg ist die einzige Kläranlage, welche in die Wiembecke einleitet.

### 2.2.2 Abflussmengen und Abwasseranteil

Gemäß Angabe der Bezirksregierung Detmold führt die Wiembecke die nachfolgend aufgeführten Wassermengen, aus welchen der Anteil des Kläranlagenabflusses am Mittleren Abfluss der Wiembecke bzw. am mittleren Niedrigwasserabfluss der Wiembecke durch die Bezirksregierung bestimmt wurde.

Den Berechnungen liegt die Jahresabwassermenge der Kläranlage Horn-Bad Meinberg des Jahres 2012 von rd. 2.017.900 m<sup>3</sup>/a, entsprechend 0,064 m<sup>3</sup>/s zu Grunde. Der Abwasseranteil im Gewässer ist vergleichsweise hoch: Beim mittleren Abfluss der Wiembecke beträgt der aus der Abwasserreinigung resultierende Anteil knapp 17 %. Beim mittleren Niedrigwasserabfluss der Wiembecke beläuft sich der Anteil des Kläranlagenabflusses am Gesamtabfluss auf knapp 94 %.

**Tabelle 6: Abflussmengen Wiembecke + Abwasseranteil gemäß BezReg Detmold**

<b>Ort Messpegel</b>	Kläranlage
<b>Mittlerer Abfluss Wiembecke MQ am Messpegel</b>	0,378 m <sup>3</sup> /s
<b>Mittlerer Niedrigwasserabfluss MNQ am Messpegel</b>	0,068 m <sup>3</sup> /s
<b>Betrachtung 2012 (Angabe BezReg Detmold)</b>	
<b>Jahresabwassermenge KA 2012</b>	0,064 m <sup>3</sup> /s
<b>Abwasseranteil der KA am MQ</b>	16,9 %
<b>Abwasseranteil der KA am MNQ</b>	93,6 %

### 2.2.3 Allgemeine Gewässeruntersuchung

Gemäß WRRL-Monitoring weist die Wiembecke einen unbefriedigenden ökologischen und chemischen Zustand sowie ein unbefriedigendes ökologisches Potential auf (vgl. Anlage 6).

Gemäß Erlaubnisbescheid aus Februar 2017 sind durch die Stadtwerke Horn-Bad Meinberg allgemeine Gewässeruntersuchungen jeweils ober- und unterhalb der Einleitstelle durchzuführen. Folgende Parameter werden überwacht:

- Farbe, Sauerstoff, Temperatur, pH
- CSB/TOC, BSB<sub>5</sub>, P<sub>ges</sub>, oPO<sub>4</sub>-P, N<sub>org</sub>, N<sub>ges anorg</sub>, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N
- Biologische Qualitätskomponente Makrozoobenthos nach PERLODES

- Diatomeen nach PHYLIB

Die bisher vorliegenden Untersuchungsbefunde sind Anhang 3 zu entnehmen. Es ist ersichtlich, dass insbesondere die Phosphorkonzentration der Wiembecke nach der Einleitstelle des Kläranlagenablaufs sehr hoch ist und den Phosphorgrenzwert gemäß Oberflächengewässerverordnung von 0,10 mg/l deutlich überschreitet. Während oberhalb der Einleitstelle eine gesamt Phosphorkonzentrationen  $\text{PO}_4\text{-P}$  von 0,03 mg/l (April 2017) bzw. 0,10 mg/l (Juli 2017) gemessen wurde, wurden unterhalb der Einleitstelle Werte von 0,24 mg/l (April 2017) bzw. 0,31 mg/l (Juli 2017) ermittelt.

#### 2.2.4 Spurenstoffbelastung

Gemäß Erlaubnisbescheid aus Februar 2017 sind durch die Stadtwerke Horn-Bad Meinberg im Rahmen der Selbstüberwachung in den Jahren 2017 und 2018 zweimal jährlich Beprobungen der Wiembecke oberhalb und unterhalb der Einleitstelle des Kläranlagenablaufs durchzuführen, welche hinsichtlich der Schwermetalle Kobalt- und Zink sowie ausgewählter Spurenstoffe analysiert werden.

In Abstimmung mit der Bezirksregierung Detmold wurde zur Studienbearbeitung ergänzend ein erweitertes Monitoring auf Mikroschadstoffe durchgeführt: Der Wiembecke wurde jeweils eine qualifizierte Mischprobe oberhalb und unterhalb der Einleitstelle des Kläranlagenablaufs entnommen und hinsichtlich diverser Spurenstoffe analysiert. Die Probennahme erfolgte im Juli 2018.

Die einzelnen Untersuchungsbefunde der Stichproben (Selbstüberwachung und Monitoring Studie) sind Anhang 3 zu entnehmen. Die Analyseergebnisse wurden in Anhang 5 zusammengefasst und in Abbildung 5 aufbereitet. Sowohl die tabellarische Auswertung als auch die zugehörige Grafik verdeutlichen, dass diverse Spurenstoffe unterhalb der Einleitstelle der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg vermehrt auftreten. Vor allem die Spurenstoffe Diclofenac, Carbamazepin, Metoprolol, Amidotrizoesäure und 17-alpha-Ethinylestradiol sind unterhalb der Einleitstelle erhöht.

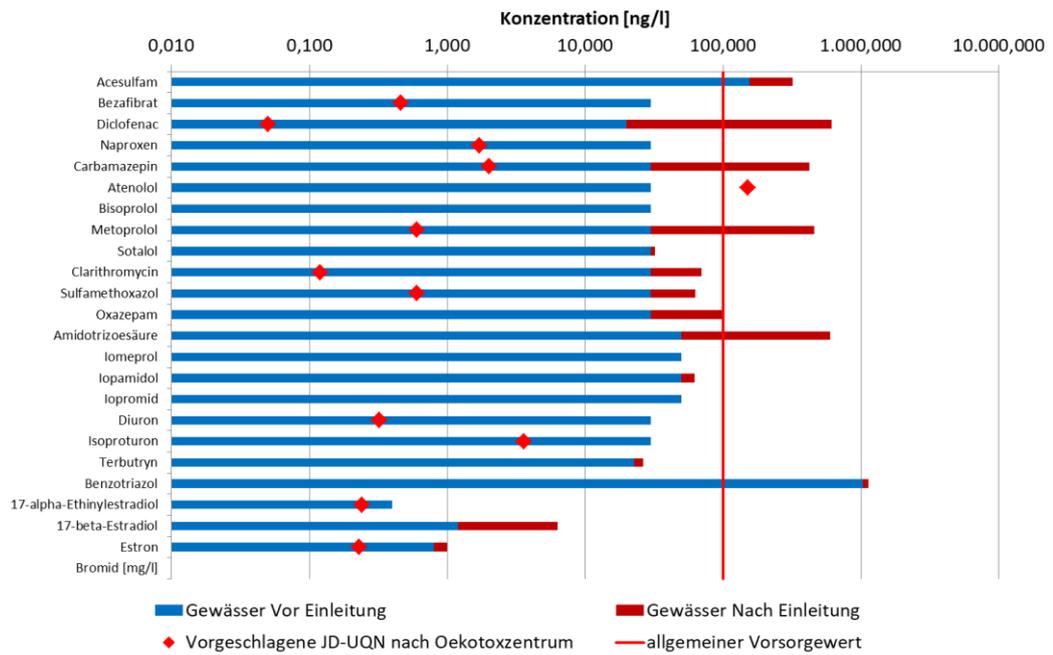


Abbildung 5: Gewässerbelastung Wiembecke vor und nach Einleitung des Kläranlagenablaufs und Zielwerte gemäß Oekotoxzentrum

### 3. Stand der Technik

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 Pulveraktivkohle

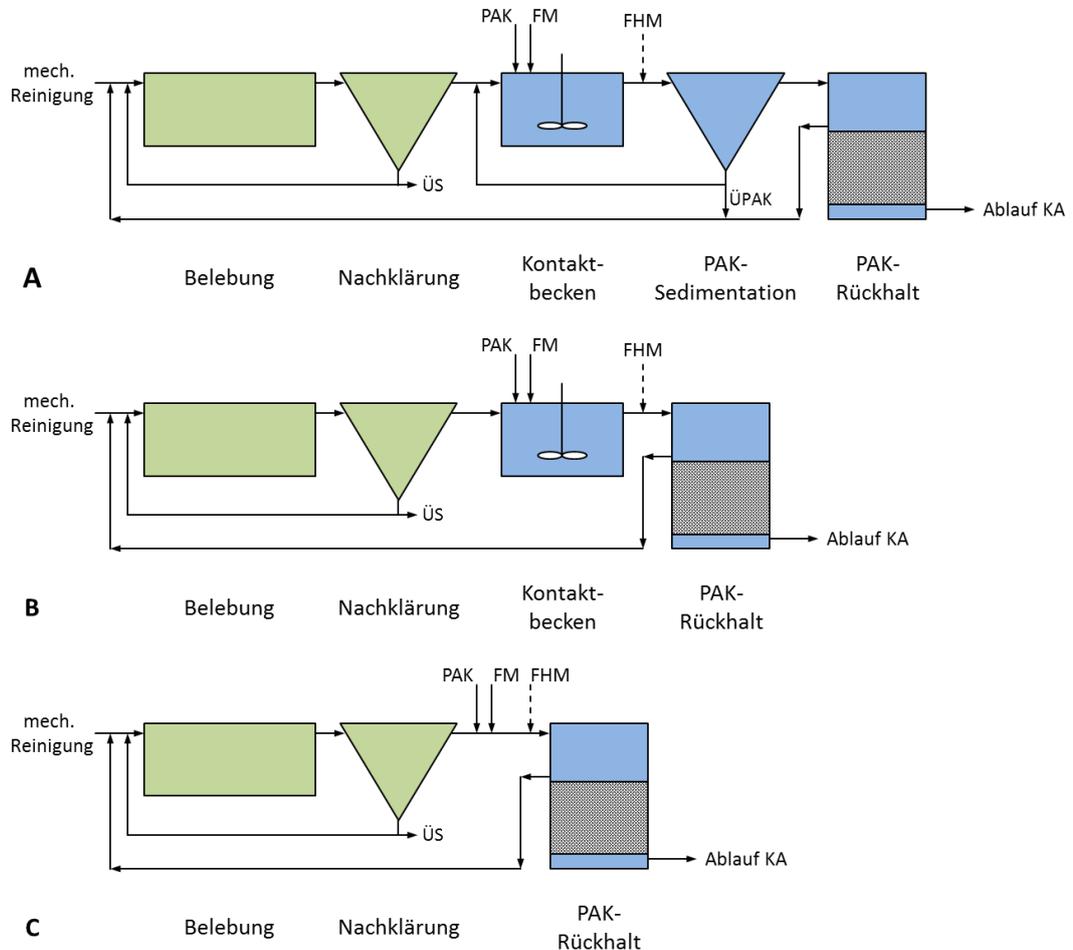
##### 3.1.1 Allgemeine Beschreibung

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.

Durch den Einsatz von Aktivkohle in pulverisierter Form kann eine große Bandbreite von Mikroverunreinigungen adsorptiv aus dem Abwasser entfernt werden. 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. Die Dosierung in das gereinigte Abwasser stellt einen effizienteren Einsatz der PAK sicher. Zur Abscheidung der PAK aus dem Abwasser ist eine Filtration des mit PAK versetzten Volumenstroms erforderlich. [2][4]

Mögliche Verfahrensvarianten zur Umsetzung einer PAK-Dosierung auf kommunalen Kläranlagen sind in Abbildung 6 schematisch dargestellt. Die verfahrenstechnische Einbindung der PAK-Dosierung auf bestehenden Anlagen kann je nach vorhandener Bausubstanz und Verfahrenstechnik unterschiedlich geschehen. Bei Dosierung in ein separates Kontaktbecken kann im Ablauf des Kontaktbeckens zusätzlich eine Sedimentationseinheit angeordnet werden. 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. 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 oder Überschussschlamm abgeschieden. Eine Zugabe von Fällmittel und gegebenenfalls Flo-

ckungshilfsmittel (FHM) ist zur vollständigen Abscheidung der PAK erforderlich. Bei einer vorherigen Simultanfällung zur Phosphorelimination ist eine entsprechende Reduzierung der Fällmittelmenge möglich. [2]



**Abbildung 6: Mögliche Umsetzung einer PAK-Dosierung**

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 ausgeführt werden. [2][4]

Die PAK-Dosierung wird volumenproportional zum Zulauf in den Kontaktraum gegeben. Als Dosiervorrichtung wird eine gravimetrische Dosierung empfohlen, da diese ausreichend genau ist, um sowohl Über- als auch Unterdosierungen zu vermeiden. 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][4]

Die Auslegung eines separaten Kontaktbeckens für eine PAK-Anlage sollte mindestens auf den Trockenwetterzufluss als Bemessungsabfluss erfolgen. 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. 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. [2]

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 Belegung und den anschließenden gemeinsamen Abzug mit dem Überschussschlamm (ÜS) wird die PAK mit dem Belegtschlamm 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 PAK, was zu erhöhten Kosten bei der Schlammentsorgung führt. [2][4]

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 erforderli-

che Menge wesentlich. Hierzu werden aktuell Forschungsvorhaben durchgeführt, da zu diesem Verfahren kaum Erfahrungen vorliegen. 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. [4]

### 3.1.2 Vor- und Nachteile

Bei Einsatz von PAK kann ein breites Spektrum an Mikroverunreinigungen aus dem Abwasser entfernt werden. Dies führt zu einer signifikanten Verbesserung der Qualität des gereinigten Abwassers. 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. [4]

Nachteilig wirkt sich der 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 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. [4] In Tabelle 7 sind die Vor- und Nachteile des PAK-Einsatzes auf kommunalen Kläranlagen gegenübergestellt.

**Tabelle 7: 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 Anlagen

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. Ergänzend ist die Kläranlage Dülmen (Auslegung 55.000 EW) 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 Barntrup (Auslegung 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. [9]

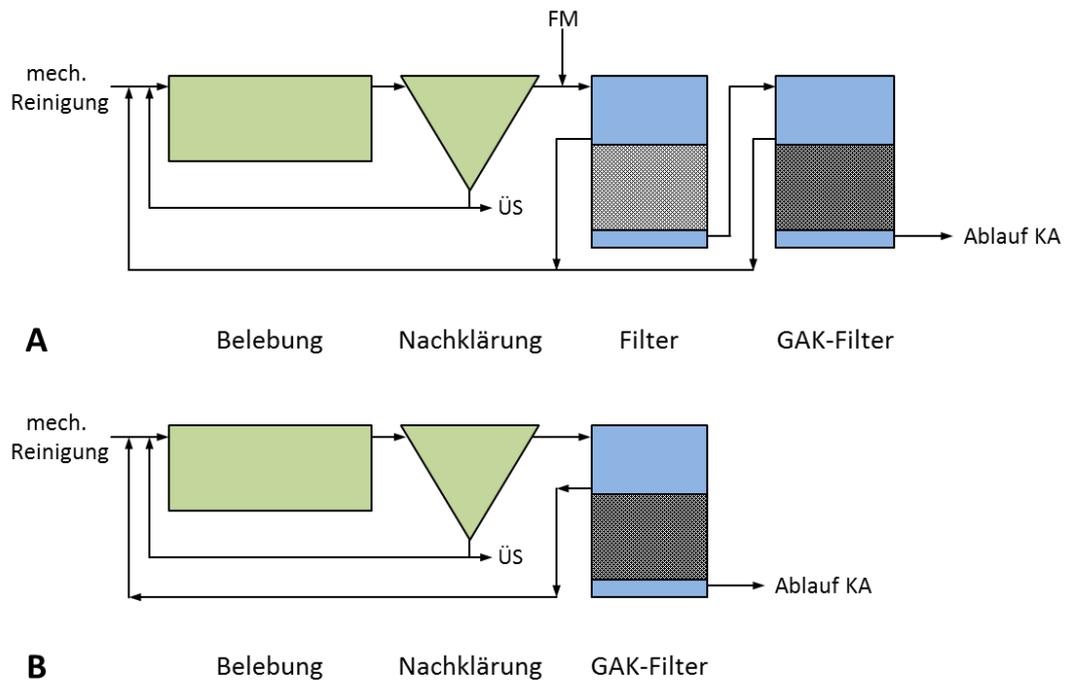
## **3.2 Einsatz granulierter Aktivkohle**

### **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.

GAK-Filter werden der biologischen Reinigungsstufe nachgeschaltet. Abbildung 7 stellt die Einbindungsmöglichkeiten eines GAK-Filters auf einer kommunalen Kläranlage schematisch dar.

Ein GAK-Filter kann einer Filtrationsstufe nachgeschaltet werden. Dadurch wäre der Feststoffanteil im Zulauf zum GAK-Filter nahezu Null und die Konkurrenz der organischen Hintergrundmatrix um die Adsorptionskapazität der Aktivkohle wäre minimiert. Alternativ kann ein GAK-Filter verfahrenstechnisch an die Stelle einer Flockungsfiltration treten.



**Abbildung 7: Mögliche Umsetzung eines GAK-Filters**

Eine GAK-Filtration besteht im Wesentlichen aus parallel betriebenen GAK-Filtereinheiten, welche als diskontinuierlich- oder kontinuierlich gespülte Filter eingesetzt werden können. Ist eine Flockungsfiltration bereits vorhanden, so ist die Umrüstung einzelner Filterkammern zu GAK-Filtern i.d.R. ohne baulichen Aufwand möglich. Das vorhandene Filtermaterial wird ausgebaut und granuliert Aktivkohle eingebaut. Je nach Aktivkohleart ist der Rückspülvorgang anzupassen, um ein ausschwemmen der GAK zu verhindern. Da das Filtermaterial regelmäßig ausgetauscht werden muss, sollten in den Filterkammern spezielle Absaug- und Einfüllstutzen installiert werden. Ist keine Flockungsfiltration vorhanden, kann die GAK in z.B. kontinuierlich gespülten Filtereinheiten realisiert werden (z.B. System Dyna).

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. 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][4]

Eine GAK-Filtration wird auf eine Leerbettkontaktzeit von 5 bis 30 Minuten und eine Filtergeschwindigkeit von 5 bis 10 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][4]

Um 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 einer GAK-Filtration 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. Als weiterer Vorteil ist zu nennen, dass die GAK-Nutzung die Klärschlammverwertung nicht einschränkt, da die GAK nicht übers Schlammsystem ausgetragen wird.

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 stark variieren.

In Tabelle 8 sind die Vor- und Nachteile des Einsatzes von GAK-Filtern auf kommunalen Kläranlagen gegenübergestellt.

**Tabelle 8: 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 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 mgAFS/l im Zulauf zur Filtration konnten nur etwa 4.000 bis 7.000 Bettvolumina umgesetzt werden, bevor das GAK-Filterbett ausgetauscht werden musste. [10]

Auf der Zentralkläranlage Rietberg wurden ab Oktober 2012 bis April 2013 halotechnische 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. [12] [14]

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. [13]

Darüber hinaus wurden im ersten Quartal 2013 auf dem Klärwerk Buchenhofen zwei GAK-Filterzellen in Betrieb genommen. Gemäß mündlicher Aussage des Anlagenpersonals wird eine der beiden Filterzellen 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 Leitparameter 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.

Seit September 2016 wird 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. [15]

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

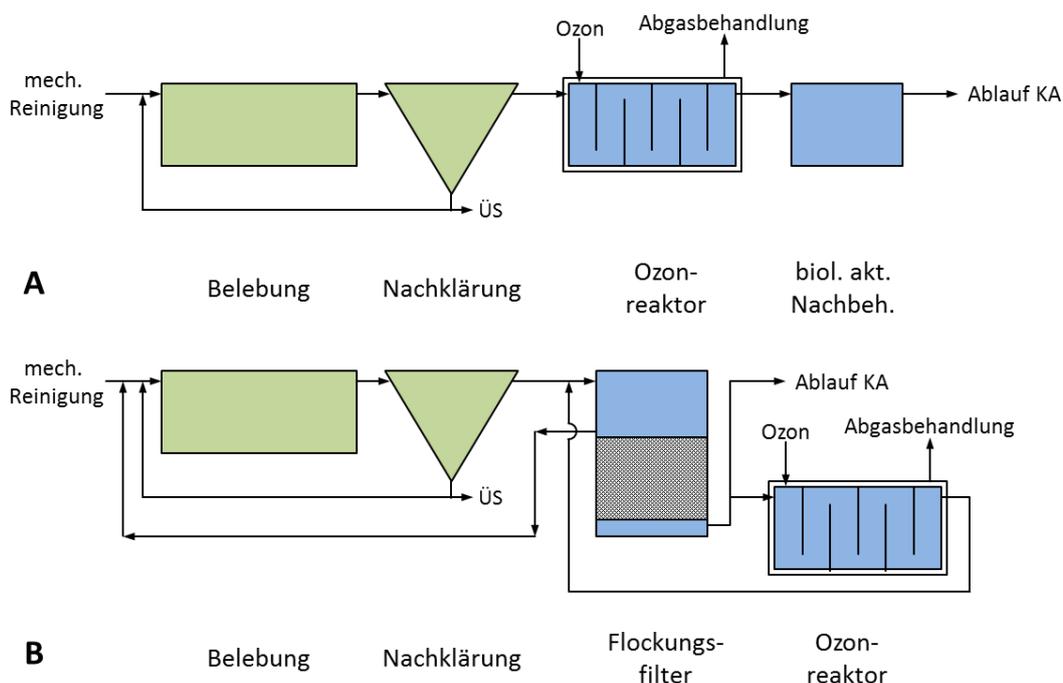
### 3.3 Einsatz Ozonung

### 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][4]

Eine Ozonung 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. 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. Abbildung 8 zeigt schematisch die Einbindungsmöglichkeiten einer Ozonanlage auf kommunalen Kläranlagen. [2][4]

Die 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, als 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 Ozoneintragungssystems ist von der verfahrenstechnischen Einbindung auf der Kläranlage unabhängig. [2][4]



**Abbildung 8: Mögliche Umsetzung einer Ozonung**

Ozon wird mit Hilfe von Ozongeneratoren auf der Kläranlage erzeugt. Als Betriebsmittel wird flüssiger Sauerstoff (LOX, *Liquid Oxygen*), komprimierte, getrocknete 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. 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. [2][4]

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.

Die Auslegung des Kontaktreaktors einer Ozonanlage sollte mindestens auf den Trockenwetterzufluss als Bemessungsabfluss erfolgen. 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 Abwasser-matrix, kann die Kontaktzeit auf bis zu 10 Minuten verkürzt werden. [2]

Die benötigte Ozondosis für die Elimination von Mikroverunreinigungen aus dem biologisch vorgereinigten Abwasser ergibt sich aus der DOC- und Nitrit-Konzentration 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. [2]

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. 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.

### 3.3.2 Vor- und Nachteile

Durch Einsatz von Ozon kann ein breites Spektrum an Substanzen effektiv aus dem Abwasser entfernt werden kann. Ergänzend 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. [4]

Ein Nachteil des Einsatzes von Ozon auf Abwasserreinigungsanlagen ist die energieintensive Ozonerzeugung. Diese muss vor Ort auf der Kläranlage gesche-

hen, da Ozon aufgrund der Explosionsgefahr nicht in Druckflaschen abgefüllt werden kann. 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. [4]

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.

In Tabelle 9 sind die Vor- und Nachteile einer Ozonanlage auf kommunalen Kläranlagen zusammengefasst.

**Tabelle 9: 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
+	Sauerstoffzufuhr Vorfluter	-	erfordert evtl. höhere Anschlussleistung der KA
		-	Reaktionsprodukte unbekannt
		-	biologisch aktive Nachbehandlung erforderlich

### 3.3.3 Realisierte Anlagen

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. [4][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 zur 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. [17]

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. [18]

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. [17]

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. [17]

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 Betrei-

ber 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.

Darüber hinaus befinden sich derzeit auf den Kläranlagen Detmold, Dinslaken, Aachen-Soers, Schloß Holte-Stukenbrock, Paderborn-Sende und Weißenburg weitere Anlagen zur Ozonung von Abwasser in der Planung oder im Bau. [16]

### 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. [4]

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. [4]

#### 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 ( $H_2O_2$ ) oder Titan-dioxid ( $TiO_2$ ) versetztem Abwasser erfolgen.  $H_2O_2$  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. [4]

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  $H_2O_2$  durch die verstärkte OH-Radikalbildung in Frage kommen, um besonders persistente Abwasserinhaltsstoffe zu eliminieren. [4]

#### 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. [4]

## 4. Planungs- und Bemessungsgrundlagen

### 4.1 Örtliche Gegebenheiten

Bei der Betrachtung einer weitergehenden Reinigungsstufe, spielen die Gegebenheiten vor Ort eine besondere Rolle. Für die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg ist Folgendes hervorzuheben:

- Es stehen keine freien Beckenkapazitäten zur Verfügung. Vorhandene Bausubstanz kann nicht für eine neue Verfahrensstufe genutzt werden.
- Auf der Zentralkläranlage ist keine Filtration vorhanden.
- Auf der Zentralkläranlage stehen nur im begrenzten Umfang Flächen für den Neubau einer Verfahrensstufe zur Verfügung.
- Die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg verfügt über einen künstlich angelegten Schönungsteich, welcher derzeit kontinuierlich durchflossen wird. Der Schönungsteich ist für die aktuelle Abwasserreinigung nicht mehr relevant.
- Der entwässerte Schlamm wird der Kompostierung zugeführt und im Anschluss landwirtschaftlich verwertet.
- Es erfolgt eine Verdünnung des Schmutzwassers durch Fremdwasserzuflüsse.

Im Rahmen der weiteren Betrachtungen wird vorausgesetzt:

- Es liegen unkomplizierte Baugrundverhältnisse vor.
- Es liegen übliche Grundwasserverhältnisse vor.
- Beim Erdaushub handelt es sich um unbelastetes Material.

Die gewählten Annahmen sind im Rahmen der weiteren Projektbearbeitung anhand entsprechender Gutachten zu prüfen.

#### 4.2 Verfahrenswahl in Abhängigkeit der Eliminationsleistung

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

Mit der Ozonung kann i.d.R. ein breites Spektrum an Mikroschadstoffen 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.

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.

Wie in Anhang 4 ersichtlich, sind hinsichtlich der absoluten Fracht im Ablauf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg vor allem die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Spurenstoffe von Bedeutung. Hierbei wurden für Diclofenac und Benzotriazol die höchsten Frachten ermittelt. Bis auf Amidotrizoesäure handelt es sich bei allen Parametern um die Indikatorsubstanzen bei welchen gemäß „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW eine Eliminationsleistung von 80% im Jahresmittel zu erreichen ist. [2]

Für die im Ablauf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg am meisten enthaltenen Spurenstoffen Diclofenac und Benzotriazol scheint somit zunächst die Nutzung von Aktivkohle Vorteile aufzuweisen. Zu beachten ist allerdings, dass auch für Benzotriazol und Metoprolol bei der im Rahmen der Studie angesetzten Ozonosis von 0,8 mgO<sub>3</sub>/mgDOC eine Eliminationsleistung > 80% wahrscheinlich ist. Ergänzend ist die Adsorbierbarkeit von Clarithromycin und Sulfamethoxazol an Aktivkohle als mittelmäßig einzustufen, so dass letztendlich beide Verfahren für den Einsatz auf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg gleichermaßen geeignet erscheinen.

**Tabelle 10: Eliminierbarkeit von Spurenstoffen in Abhängigkeit des Verfahrens [3]**

	<b>Adsorbierbarkeit an Aktivkohle</b>	<b>Eliminierbarkeit durch Ozon</b>

Clarithromycin	mittel	gut
Sulfamethoxazol	mittel	gut
Carbamazepin	gut	gut
Metoprolol	gut	mittel
<b>Diclofenac</b>	<b>gut</b>	<b>gut</b>
<b>Benzotriazol</b>	<b>gut</b>	<b>mittel</b>
Amidotrizoensäure	schlecht	schlecht

### 4.3 Auslegungswassermengen

Detaillierte Vorgaben zur Bemessung einer 4. Reinigungsstufe existieren derzeit nicht. Gemäß Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelemination [2], 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, Lachslachgewässer 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. Die Auslegungswassermengen werden nachfolgend individuell geprüft und diskutiert. Die gewählten Parameter sind im Rahmen der weiteren Projektbearbeitung mit der Genehmigungsbehörde abzustimmen.

Bezogen auf die letzten 5 Jahre (2013 bis 2017) ist von den in Tabelle 11 aufgelisteten Jahresabwasser- und Jahresschmutzwassermengen auszugehen. Das Verhältnis der mittleren Jahresschmutzwassermenge zur mittleren Jahresabwassermenge beläuft sich im Betrachtungszeitraum auf knapp 70%.

**Tabelle 11: Jahresabwasser- und Jahresschmutzwassermengen 2013-2017**

Parameter	Einheit	
<b>Mittlere Jahresabwassermenge JAM</b>	[m <sup>3</sup> /a]	1.919.282
<b>Mittlere Jahresschmutzwassermenge JSM</b>	[m <sup>3</sup> /a]	1.337.527
<b>Anteil Trockenwetterabfluss JSM/JAM</b>	[%]	70
<b>Mittelwert tägliche Abwassermenge</b>	[m <sup>3</sup> /d]	rd. 5.260
<b>Mittelwert stündliche Abwassermenge</b>	[m <sup>3</sup> /h]	<b>rd. 220</b>

Gemäß Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelemination sind bei Ermittlung der Auslegungswassermenge folgende Punkte zu berücksichtigen [2]:

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. 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.
4. Bei einem Trennsystem mit begrenztem Mischwasseranteil wäre eine Teilstrombehandlung je nach Mischwasseranteil mit mehr als 90% der Jahresabwassermenge zu berücksichtigen.

Diskussion Punkt 1: In Anlehnung an Punkt 1 würde die Auslegungswassermenge wie folgt bemessen: Da im gegebenen Anwendungsfall keine Stundenwerte verfügbar sind, wird der maximale stündliche Trockenwetterabfluss zum 2-fachen

Wert des mittleren stündlichen Trockenwetterabflusses abgeschätzt. Vor diesem Hintergrund wird für die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg ein maximal stündlicher Trockenwetterabfluss von rd. 305 m<sup>3</sup>/h angesetzt. Würde die Anlage auf einen maximalen Durchsatz von 305 m<sup>3</sup>/h ausgelegt, könnten täglich maximal 7.330 m<sup>3</sup> Abwasser behandelt werden. Bezogen auf die ausgewerteten Tageswerte des Jahres 2017 könnten bei einer Auslegung auf 7.330 m<sup>3</sup>/d knapp 79% der in 2017 angefallenen Abwassermenge behandelt werden. Wird die mittlere Jahresabwassermenge der letzten 5 Jahre zur Bemessung angesetzt (und nicht das außergewöhnlich nasse Jahr 2017), ist davon auszugehen, dass knapp 87% der Jahresabwassermenge mit der geplanten Anlage behandelt werden können.

Diskussion Punkt 2: Als Trennsystem konzipiert, weist das Kanalsystem der Kläranlage Horn-Bad Meinberg einen vergleichsweise hohen Fremdwasserzufluss auf, welcher an Regentagen zu starken Zu-/ bzw. Ablaufschwankungen führt. Wäre eine Vollstrombehandlung erforderlich, müssten die Anlagenkomponenten auf den maximal täglichen Abfluss des Jahres 2017 von 25.942 m<sup>3</sup>/d (rd. 1.081 m<sup>3</sup>/h) ausgelegt werden. Dies scheint vor dem Hintergrund der in 2017 aufgetretenen außergewöhnlichen Starkregenereignissen sowie der vom Auftraggeber beabsichtigten Minimierung der Fremdwasserzuflüsse unverhältnismäßig.

Diskussion Punkt 3: Bezogen auf die Tageswerte des Jahres 2017 könnte bei einer Auslegung auf rd. 6.000 m<sup>3</sup>/d (maximal rd. 250 m<sup>3</sup>/h) rd. 70% der Jahresabwassermenge behandelt werden. Wird die mittlere Jahresabwassermenge der letzten 5 Jahre zur Bemessung angesetzt, ist davon auszugehen, dass rd. 80% der Jahresabwassermenge mit einer auf 250 m<sup>3</sup>/h ausgelegten Anlage behandelt werden können.

→ **Unter Berücksichtigung der oben genannten Restriktionen wird nachfolgend eine Behandlung von knapp 80% der in 2017 angefallenen Jahresabwassermenge angestrebt. Bezogen auf die Tageswerte hätten bei einer Auslegung auf maximal 7.330 m<sup>3</sup>/d (rd. 305 m<sup>3</sup>/h) in 2017 knapp 80% der Jahresabwassermenge behandelt werden können. Wird die mittlere Jahresabwassermenge der letzten 5 Jahre zur Bemessung angesetzt (und nicht das außergewöhnlich nasse Jahr 2017), ist davon auszugehen, dass knapp 87% der Jahresabwassermenge mit der geplanten Anlage behandelt werden können. Wird der Fremdwasserzufluss zusätzlich minimiert ist davon auszugehen, dass mit der geplanten Anlage mehr als 90% der Jahresabwassermenge behandelt werden können.**

→ Die Spurenstoffelimination wird auf eine maximale Wassermenge von 305 m<sup>3</sup>/h entsprechend rd. 85 l/s ausgelegt. Es resultiert eine behandelbare Jahresabwassermenge von rd. 1.700.000 m<sup>3</sup>/a.

#### 4.4 Bromidkonzentration im Ablauf

Im Hinblick auf eine mögliche Ozonbehandlung ist die Bromidkonzentration des Kläranlagenablaufes zu prüfen. Durch die Ozonbehandlung kann Bromid zu kancerogenem Bromat oxidiert werden. Die Bestimmungsgrenze bei der Ermittlung der Bromidkonzentration liegt bei 0,05 mg/l (entsprechend 50 µg/l). Die Werte des Ablaufs der Kläranlage Horn-Bad Meinberg liegen unterhalb der Bestimmungsgrenze. Gemäß Angabe des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe NRW [3] ist bei Bromidkonzentrationen unterhalb 100 µg/l sowie einer Ozondosis < 0,7 g<sub>O<sub>3</sub></sub>/g<sub>DOC</sub> keine kritische Bromatbildung abzusehen. Somit ist eine Spurenstoffelimination mittels Ozonanlage auf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg grundsätzlich möglich.

#### 4.5 Abschlagbauwerk und Hebewerk

Alle betrachteten Varianten sind der Nachklärung nachgeschaltet. Es wird eine maximale Auslegungswassermenge von 305 m<sup>3</sup>/h, entsprechend 7.320 m<sup>3</sup>/d angenommen. Die über die Bemessungswassermenge hinausgehende Abwassermenge wird abgeschlagen und über den Schönungsteich in die Wiembecke geleitet.

Auf Grund der Langlebigkeit und Robustheit wird für die nachfolgend betrachteten Varianten ein Schneckenpumpwerk bestehend aus 2 Schnecken vorgesehen. Die Ausführung erfolgt redundant. Die Förderhöhe der Schneckenhebewerke wird in Abhängigkeit der jeweiligen Variante sowie der zugehörigen Auslegungen und Anordnungen angepasst.

#### 4.6 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 bis zu 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.

## **5. Variantenuntersuchung Spurenstoffelimination**

### **5.1 Auswahl der betrachteten Varianten**

Unter Berücksichtigung bereits durchgeführter Variantenbetrachtungen vergleichbarer Projekte, wurden die nachfolgend aufgelisteten Varianten für die weiteren Betrachtungen ausgewählt.

- Variante 1a: PAK im Kontaktbecken + Flockungsfiltration
- Variante 1b: PAK in Kontaktbecken + Tuchfiltration
- Variante 2a: GAK-Filtration in Flockungsfiltrationsbecken
- Variante 2b: GAK-Filtration in Dyna-Filter
- Variante 3: Ozonung und Ableitung in Schönungsteich

Da absehbar ist, dass die PAK-Dosierung nicht die wirtschaftlichste Variante darstellt, wurde auf Prüfung weiterer Varianten (z.B. Nutzung Fuzzy-Filter) verzichtet. Zeichnerisch wurde bei Variante 1 die klassische Flockungsfiltration dargestellt (vgl. Anhang 7), da diese gegenüber der Tuchfiltration den größeren Platzbedarf aufweist. Darüber hinaus wurden die Varianten 2a, 2b und 3 in den Anhängen 8 bis 10 dargestellt.

### **5.2 Ausführung und Dimensionierung**

#### **5.2.1 Variante 1a: PAK im Kontaktbecken + Flockungsfiltration**

Die Umsetzung der Spurenstoffelimination durch Pulveraktivkohle ist in Anhang 7 dargestellt. Ein Ausschnitt ist der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen.

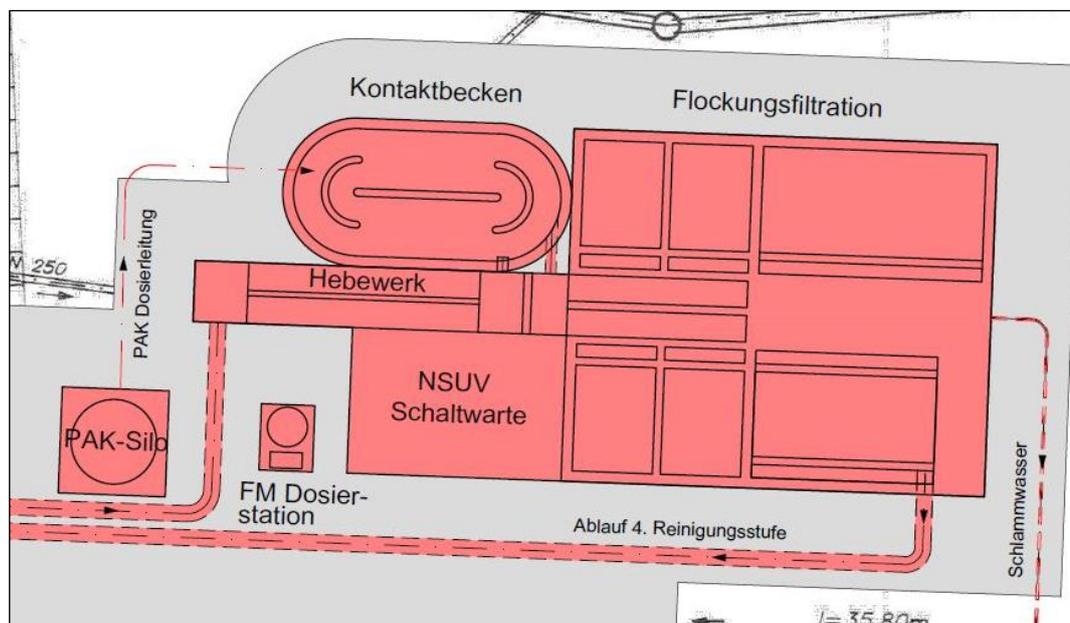


Abbildung 9: Lageplanausschnitt Variante 1a

Folgende Ausführung ist geplant:

- Über ein Schachtbauwerk sowie eine neu zu installierende Rohrleitung wird der Ablauf der Nachklärung im Freigefälle zum Hebewerk geleitet. Das Hebewerk wird auf eine maximale Wassermenge von 305 m<sup>3</sup>/h, entsprechend 7.320 m<sup>3</sup>/d ausgelegt. Die Ausführung erfolgt redundant. Unter Berücksichtigung der nachfolgend gewählten Beckengeometrie und Platzierung wird eine Förderhöhe von 4,0 m gewählt.
- Das als Umlaufbecken konzipierte Kontaktbecken wird auf eine maximale Wassermenge von 305 m<sup>3</sup>/h sowie eine Kontaktzeit von 30 Minuten ausgelegt. Somit ist ein Kontaktbeckenvolumen von knapp 160 m<sup>3</sup> erforderlich. Das Kontaktbecken wird in Stahlbetonbauweise ausgeführt. Es weist eine Tiefe von ca. 4,0 m, eine Breite von ca. 5,0 m und eine Gesamtlänge ca. 10,0 m auf. Im Kontaktbecken werden Leitwände sowie zwei Rührwerke berücksichtigt. Die Beckensohle des Kontaktbeckens befindet sich rd. 1 m unter Geländeoberkante (GOK).
- 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 15 mg/l angenommen. Bezogen auf die behandelbare Abwassermenge von rd. 1.700.000 m<sup>3</sup>/a resultiert eine erforderliche Pulverak-

tivkohlemenge von rd. 26 t/a. Zur Lagerung der PAK wird ein Silo gebaut. Das Silo wird so ausgelegt, dass eine LKW-Ladung PAK eingelagert werden kann. Es wird Standard-Silogröße mit 70 m<sup>3</sup> Nutzvolumen installiert.

- Zur Abscheidung der PAK-Anteile wird eine Flockungsfiltration mit Fällmitteldosierung vorgesehen. Zur Filtration werden 4 abwärts durchströmte offene Filtereinheiten mit einer Gesamterfilterfläche von rd. 60 m<sup>2</sup> vorgesehen. Die jeweiligen Kammern weisen eine Tiefe von ca. 4 m, eine Breite von ca. 3,0 m und eine Länge von ca. 5,0 m auf. Die Beaufschlagung der einzelnen Filter erfolgt über mit Schiebern versehenen Öffnungen aus einem gemeinsamen Gerinne.
- Die Pulveraktivkohle reichert sich im Filter an. Um die beladene Kohle aus den Filtern zu entfernen, werden die Filter in regelmäßigen Abständen mit dem Ablauf der Filtration (Spülwasser) gespült. Hierfür werden ein Spülwasserspeicher und ein Spülwasserpumpwerk vorgesehen.
- Das bei der Spülung anfallende Schlammwasser wird in einem Schlammwasserspeicher zwischengelagert und über ein neu zu installierendes Schlammwasserpumpwerk zum bestehenden Zulaufpumpwerk der Belebung gefördert. Es sind ein Spülwasserspeicher mit einem Volumen von rd. 80 m<sup>3</sup> sowie ein Schlammwasserspeicher von rd. 120 m<sup>3</sup> geplant.
- Die Beckensohle der Flockungsfiltration befindet sich rd. 1 m unterhalb der Geländeoberkante (GOK). Aus der Flockungsfiltration fließt das gereinigte Abwasser im Freigefälle zurück in den Entnahmeschacht.

Eine PAK-Dosierung mit anschließender Flockungsfiltration hat Auswirkungen auf den Betrieb der anderen Verfahrensstufen der Kläranlage: Beim PAK-Einsatz ist ein erhöhter Schlammanfall zu beachten, der sowohl von den Schlammumpfen, 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. 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.

### 5.2.2 Variante 1b: PAK im Kontaktbecken + Tuchfiltration

Grundsätzlich erfolgt die Ausführung und Dimensionierung des Hebewerks, des Kontaktbeckens, der PAK-Dosierung sowie die Rückführung des gereinigten Abwassers analog zu Variante 1a. Statt der zuvor betrachteten Flockungsfiltration wird im Anschluss eine Tuchfiltration genutzt. Beispielhaft wurde die Ausführung eines Mecana-Tuchfilters wie nachfolgend dargestellt angenommen. Die Filter werden in ein Betonbecken eingebaut.



**Abbildung 10: Tuchfilter [Quelle Mecana Umwelttechnik]**

Die Ausführung der Tuchfilteranlage ist wie folgt geplant:

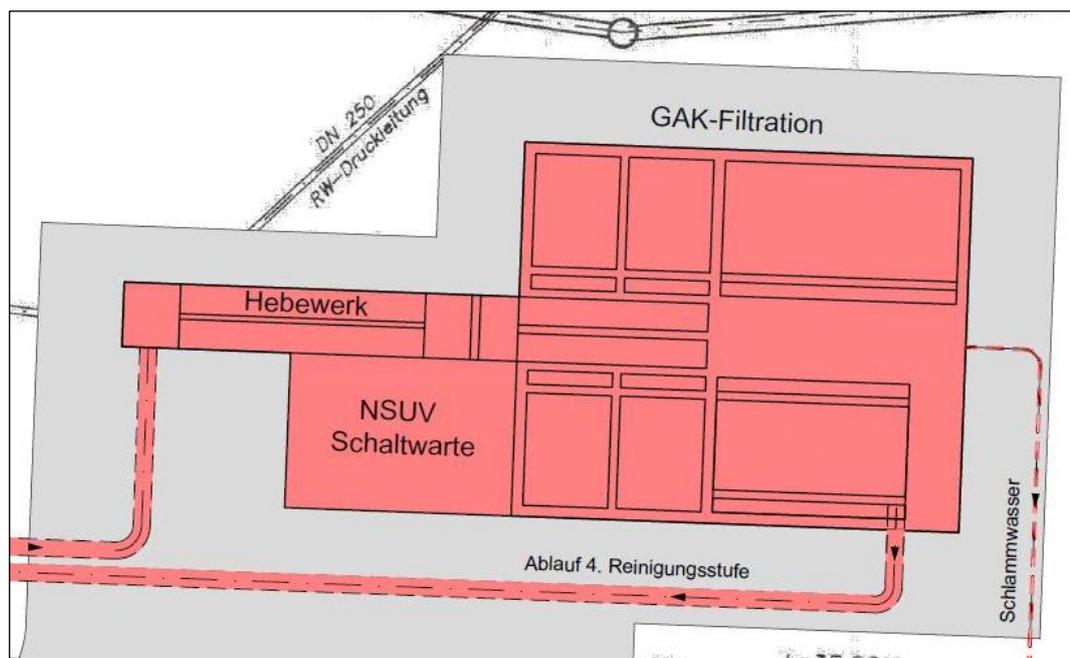
- Aus dem Ablauf des Kontaktbeckens wird das zu behandelnde Wasser über ein Gerinne zwei getauchten Tuchfiltern zugeführt. Die Tuchfilter werden in einem Betonbecken installiert. Je Scheibenfilter wird eine Filterfläche von ca. 30 m<sup>2</sup> angenommen. Die Filterablagerungen werden regelmäßig über eine Absaugvorrichtung entfernt. Das abgesaugte Schlammwasser sowie die sedimentierten Feststoffe werden über die Schlammwasser- bzw. Bodenschlamm pumpen dem Zulaufpumpwerk der Belebung zugeführt. Das für die Tuchfiltration erforderliche Betonbecken weist eine Grundfläche von ca. 4,0 x 4,0 m sowie eine maximale Höhe von ca. 4,50 m auf.

- Die Beckensohle der Tuchfiltration befindet sich rd. 1 m unterhalb der Geländeoberkante (GOK). Aus der Tuchfiltration fließt das gereinigte Abwasser im Freigefälle zurück in den Entnahmeschacht.

Analog zur vorgehenden Variante, hat die PAK-Dosierung mit anschließender Filtration Auswirkungen auf den Betrieb der anderen Verfahrensstufen der Kläranlage. Nachfolgend wird ebenfalls 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.

### 5.2.3 Variante 2a: GAK-Filtration in Flockungsfiltrationsbecken

Die Umsetzung der Spurenstoffelimination durch granuliert Aktivkohle in offenen Filtrationsbecken ist in Anhang 8 dargestellt. Ein Ausschnitt ist der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen.



**Abbildung 11: Lageplanausschnitt Variante 2a**

Folgende Ausführung ist geplant:

- Über ein Schachtbauwerk sowie eine neu zu installierende Rohrleitung wird der Ablauf der Nachklärung im Freigefälle zum Hebewerk geleitet. Das Hebewerk wird auf eine maximale Wassermenge von 305 m<sup>3</sup>/h, entsprechend 7.320 m<sup>3</sup>/d ausgelegt. Die Ausführung erfolgt redundant. Unter Berücksichtigung der nachfolgend gewählten Beckengeometrie und Platzierung wird eine Förderhöhe von 4,0 m gewählt.
- Zur Aufnahme der granulierten Aktivkohle werden offene Stahlbetonbecken installiert. Die Becken werden von oben nach unten durchströmt. Die Beaufschlagung der einzelnen Filter erfolgt über mit Schiebern versehenen Öffnungen aus einem gemeinsamen Gerinne. Die Spurenstoffe werden von der Aktivkohle adsorbiert.
- Es werden 4 Filtereinheiten vorgesehen. Jeder Filter weist eine Filterfläche von rd. 15 m<sup>2</sup> sowie eine Bauhöhe von rd. 4,0 m auf. Für die Bemessung wurden eine maximale Filtergeschwindigkeit von 10 m/h sowie eine minimale Leerbettkontaktzeit von 15 Minuten angesetzt. Die Beckensohle der Filtration befindet sich rd. 1 m unter Geländeoberkante (GOK).
- Der bauliche Unterschied zur Variante 1a besteht bei der Flockungsfiltration in einer Vorrichtung zum Ausbau der Aktivkohle mittels Saugwagen aus den einzelnen Kammern sowie einer weiteren Vorrichtung zur Befüllung jeder einzelnen Filterkammer mit frischer Aktivkohle. Für den Austausch der Filterbetten werden außerdem die einzelnen GAK-Filterkammern durch entsprechende Straßenführungen für einen Tanklastwagen zugänglich gemacht. Aus der Filtration fließt das gereinigte Abwasser im Freigefälle zurück in den Entnahmeschacht.
- Die Aktivkohle ist regelmäßig zu tauschen. Im Rahmen der Betrachtungen werden 10.000 durchgesetzte Bettvolumina angenommen. Zur Behandlung einer Jahresabwassermenge von 1.700.000 m<sup>3</sup>/a sind jährlich rd. 77 t Aktivkohle erforderlich.

#### 5.2.4 Variante 2b: GAK-Filtration in Dyna-Filtern

Die Umsetzung der Spurenstoffelimination durch granuliert Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern (z.B. System Nordic Water), ist in Anhang 9 dargestellt.

Ein Lageplanausschnitt ist Abbildung 12 zu entnehmen. Beispielhaft wurde die Ausführung eines Dyna-Filters wie nachfolgend dargestellt angenommen.

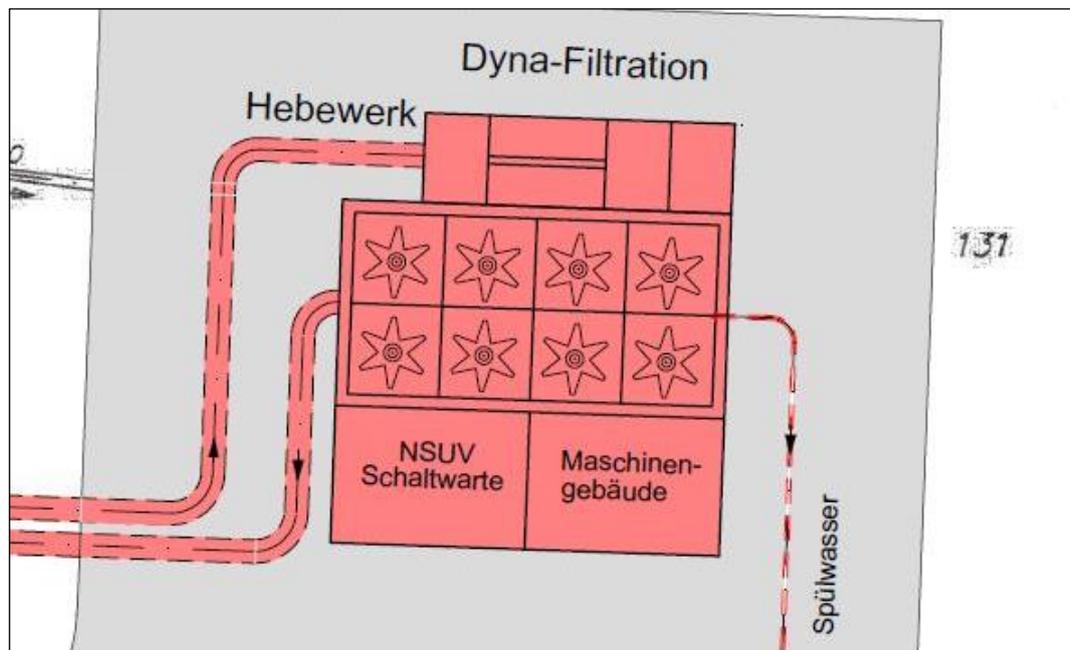


Abbildung 12: Lageplanausschnitt Variante 2b

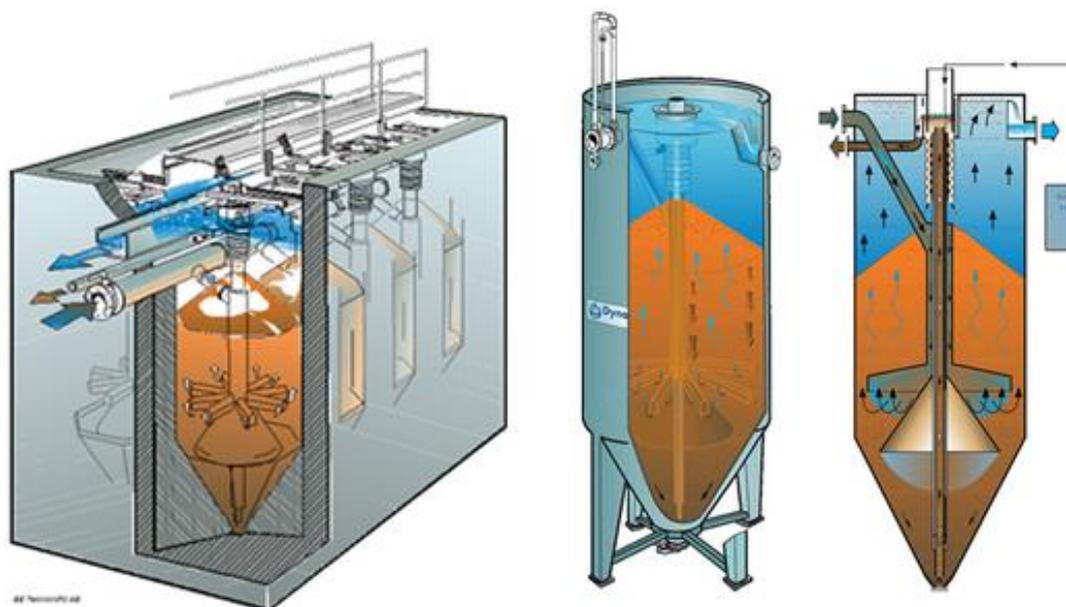


Abbildung 13: Dyna-Filter [Quelle Nordic Water]

Folgende Ausführung ist geplant:

- Über ein Schachtbauwerk sowie eine neu zu installierende Rohrleitung wird der Ablauf der Nachklärung im Freigefälle zum Hebewerk geleitet.

Das Hebewerk wird auf eine maximale Wassermenge von 305 m<sup>3</sup>/h, entsprechend 7.320 m<sup>3</sup>/d ausgelegt. Die Ausführung erfolgt redundant. Unter Berücksichtigung der nachfolgend gewählten Beckengeometrie, Platzierung sowie der Druckverluste wird eine Förderhöhe von 3 m gewählt.

- Zur Aufnahme der granulierten Aktivkohle werden kontinuierlich betriebene Dyna-Filter installiert. Es werden Filtereinbauteile vorgesehen, die in ein Betonbecken eingebaut werden. Das Betonbecken weist eine Gesamthöhe von ca. 7 m auf. Die Beckensohle befindet sich rd. 6 m unterhalb der Geländeoberkante. Über ein Zentralrohr wird das Abwasser in den unteren Teil des Filters geleitet und durchströmt die granulierten Aktivkohle von unten nach oben. Die Spurenstoffe werden von der Aktivkohle adsorbiert. Eine im Zentralrohr angebrachte Mammutpumpe befördert die verschmutzte Aktivkohle mittels Druckluft nach oben. Durch Spülwasser erfolgt hier die Reinigung der Aktivkohle. Hierbei fallen rd. 1-1,5 m<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/(h\*Filter) Spülwasser an, welches in den Zulauf der Belebungsbecken abgelassen wird. Das gereinigte Abwasser fließt im Freigefälle in den Entnahmeschacht ab.
- Es sind insgesamt 8 Filtereinheiten geplant. Jeder Filter weist eine Filterfläche von 4,7 m<sup>2</sup> auf. Für die Bemessung wurden eine maximale Filtergeschwindigkeit von 10 m/h sowie eine minimale Leerbettkontaktzeit von 15 Minuten angesetzt.
- Die Aktivkohle ist regelmäßig zu tauschen. Im Rahmen der Betrachtungen werden 10.000 durchgesetzte Bettvolumina angenommen. Zur Behandlung einer Jahresabwassermenge von 1.700.000 m<sup>3</sup>/a sind dann jährlich rd. 77 t Aktivkohle erforderlich.

#### 5.2.5 Variante 3: Ozonung mit Schönungsteich

Die Umsetzung der Spurenstoffelimination durch Ozonung ist in Anhang 10 dargestellt. Ein Lageplanausschnitt ist Abbildung 14 zu entnehmen.

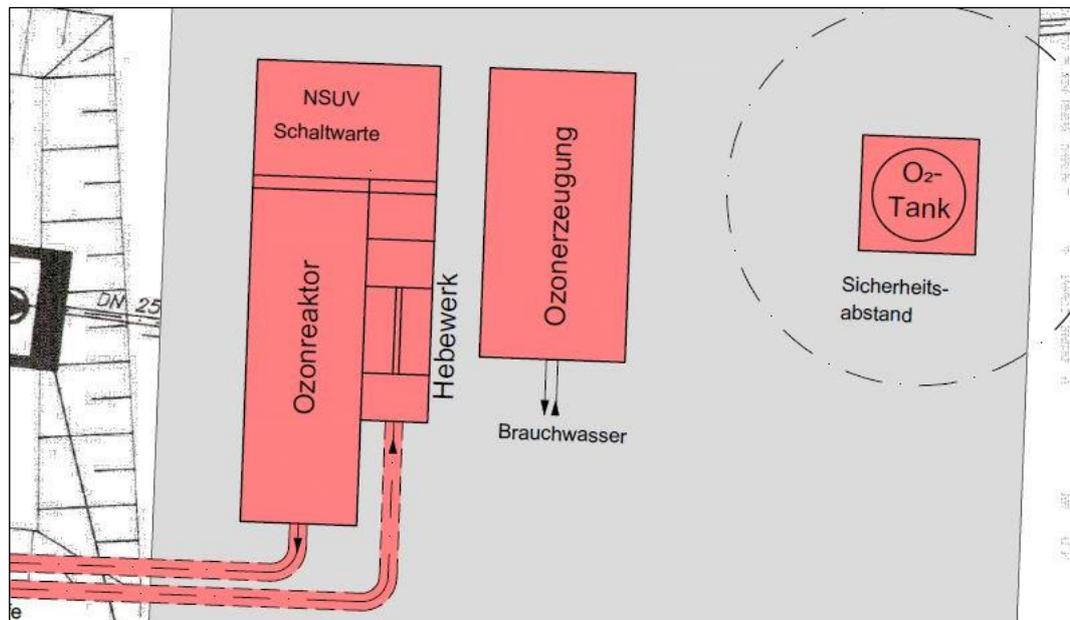


Abbildung 14: Lageplanausschnitt Variante 3

Folgende Ausführung ist geplant:

- Über ein Schachtbauwerk sowie eine neu zu installierende Rohrleitung wird der Ablauf der Nachklärung im Freigefälle zum Hebewerk geleitet. Das Hebewerk wird auf eine maximale Wassermenge von 305 m<sup>3</sup>/h, entsprechend 7.320 m<sup>3</sup>/d ausgelegt. Die Ausführung erfolgt redundant. Unter Berücksichtigung der nachfolgend gewählten Beckengeometrie und Platzierung wird eine Förderhöhe von 2,0 m gewählt.
- Das Abwasser durchströmt kontinuierlich den Ozonreaktor, welcher als geschlossenes Rechteckbecken ausgeführt und mit Strömungsleitwänden ausgerüstet wird, um Kurzschlussströmungen zu vermeiden. Der Ozoneintrag erfolgt über Diffusoren am Reaktorboden. Für die Berechnung des erforderlichen Volumens des Ozonreaktors wird die Bemessungswassermenge von rd. 305 m<sup>3</sup>/h und einer Kontaktzeit von 15 Minuten angesetzt. Es wird ein Reaktorvolumen von rd. 250 m<sup>3</sup> gewählt. Der Reaktor weist eine Breite von ca. 4,0 m, eine Länge von ca. 10 m und eine Höhe von ca. 7,0 m auf. Die Wassertiefe beläuft sich auf 6 m. Die Beckensohle befindet sich rd. 6 m unterhalb der Geländeoberkante.
- Zur Ozonerzeugung ist ein Ozongenerator geplant, welcher flüssigen Sauerstoff (Liquid Oxygen – LOX) als Betriebsmittel verwendet. Inklusive der zugehörigen Komponenten wie Kühler und Schaltanlage wird der Ozonge-

nerator in einem Gebäude installiert. Die mittlere erforderliche Ozondosis ( $C_{O_3}$ ) wurde wie folgt berechnet:

CSB-Konzentration mittel Zulauf Ozonung:	15 mg/l
Nitrit-Konzentration mittel Zulauf Ozonung:	0,02 mg/l
Ozonbedarf DOC:	0,80 mgO <sub>3</sub> /mgDOC
Ozonbedarf Nitrit:	3,43 mgO <sub>3</sub> /mgNO <sub>2</sub> -N
Korrelationsfaktor CSB/TOC:	2,67
→ TOC-Konzentration mittel:	15mg/l : 2,67 = 5,6 mg/l
Anteil DOC am TOC	90%
→ DOC-Konzentration mittel	5,1 mg/l

Ozondosis mittel erforderlich:

$$\begin{aligned} &= 5,1 \text{ mg/l} \times 0,8 \text{ mgO}_3/\text{mgDOC} + 0,02 \text{ mg/l} \times 3,43 \text{ mgO}_3/\text{mgNO}_2\text{-N} \\ &= 4,1 \text{ mg/l} \end{aligned}$$

Für den mittleren Abwasseranfall von knapp 200 m<sup>3</sup>/h resultiert eine mittlere erforderliche Ozonproduktionskapazität von rd. 796 gO<sub>3</sub>/h.

Werden eine maximale DOC-Konzentration ( $C_{DOC}$ ) von rd. 9,1 mg/l sowie eine maximale Nitrit-Konzentration ( $C_{NO_2-N}$ ) von rd. 0,05 mg/l angesetzt, resultiert eine maximal erforderliche Ozondosis ( $C_{O_3}$ ) von 8 mgO<sub>3</sub>/l Abwasser. Bei maximalem Zufluss von 305 m<sup>3</sup>/h ist eine maximale Ozonerzeugung von 2.440 gO<sub>3</sub>/h erforderlich.

- Die im Reaktor anfallende Abluft wird in einem Restozonvernichter behandelt.
- Der flüssige Sauerstoff wird neben dem Ozongenerator in einem gemieteten Flüssigsauerstofftank aufgestellt. Um den Flüssigsauerstofftank wird ein Sicherheitsabstand von 5 m eingehalten. Für die Lieferung des Flüssigsauerstoffs wird der Tank für einen Tanklastwagen zugänglich gemacht.
- Das behandelte Abwasser wird nachfolgend in den bestehenden Schöpfungsteich abgeleitet und dort biologisch nachbehandelt, um Reaktionsprodukte der Ozonung zu entfernen.

### 5.3 Kostenschätzungen

#### 5.3.1 Investitionskostenschätzungen

Es wurden die Investitionskosten der Bau-, Maschinen- und EMSR-Technik der jeweiligen Variante abgeschätzt und in Anhang 11 bzw. Tabelle 12 zusammengefasst. Die Kostenschätzungen erfolgten anhand von Richtpreisangeboten sowie unter Berücksichtigung aktueller Ausschreibungsergebnisse. Zur Ermittlung der gesamten Herstellungskosten wurden Baunebenkosten von 25% angesetzt.

**Tabelle 12: Investitionskostenschätzung**

		Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a	Variante 2b	Variante 3
		PAK in KB und Flockungsfiltration	PAK in KB und Tuchfiltration	GAK-Filtration in Flockungsfiltration	GAK-Filtration in Dyna-Filter	Ozonung mit Schönungsteich
<b>Investitionskosten Ausführung</b>						
Bautechnik	€ netto	1.470.000	1.190.000	1.360.000	1.590.000	1.830.000
Maschinenteknik	€ netto	980.000	930.000	550.000	490.000	760.000
EMSR-Technik	€ netto	310.000	220.000	300.000	190.000	200.000
<b>Summe netto</b>	<b>€ netto</b>	<b>2.760.000</b>	<b>2.340.000</b>	<b>2.210.000</b>	<b>2.270.000</b>	<b>2.790.000</b>
<b>Herstellkosten</b>						
Baunebenkosten 25%	€ netto	690.000	590.000	560.000	570.000	700.000
Summe netto	€ netto	3.450.000	2.930.000	2.770.000	2.840.000	3.490.000
<b>Summe inkl. Mwst.</b>	<b>€ brutto</b>	<b>4.110.000</b>	<b>3.490.000</b>	<b>3.300.000</b>	<b>3.380.000</b>	<b>4.160.000</b>
Eigenanteil 30%	€ brutto	1.233.000	1.047.000	990.000	1.014.000	1.248.000

Im Rahmen der Investitionskostenschätzung wurden die in Tabelle 13 aufgeführten Komponenten berücksichtigt.

Da die Variante 2b „GAK-Filtration in Dyna-Filter“ und die Variante 3 „Ozonung“ rd. 6 m ins Erdreich einbinden, wurde bei diesen Varianten ein höherer Aufwand für die Erd- und Tiefbauarbeiten, den Baugrubenverbau, die Wasserhaltung und die Gründung angenommen.

Inklusive der Baunebenkosten von rd. 25 % belaufen sich die Herstellkosten der günstigsten Varianten (GAK-Filtration in offenen Becken bzw. im Dyna-Filtern) auf rd. 3.300.000 € bzw. 3.380.000 € brutto. Für die teuerste Varianten (PAK in Kontaktbecken mit Flockungsfiltration bzw. Ozonung) sind Herstellkosten von rd. 4.110.000 € brutto bzw. 4.160.000 anzusetzen. Unter Berücksichtigung einer 70%igen Förderung des Landes NRW belaufen sich die Aufwendungen der Stadtwerke Horn-Bad Meinberg für die teuerste Variante auf maximal 1.248.000 € brutto. Bei Umsetzung der günstigsten Variante wären rd. 990.000 € brutto aufzuwenden.

**Tabelle 13: Umfang Investitionskostenschätzung**

Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a	Variante 2b	Variante 3
PAK in KB und Flockungsfiltr.	PAK in KB und Tuchfiltration	GAK-Filtration in Flockungsfiltr.	GAK-Filtration in Dyna-Filtern	Ozonung mit Schönungsteich
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installation Kontaktbecken</li> <li>• Installation Flockungsfiltration</li> <li>• Installation Spülwasserspeicher</li> <li>• Installation Schlammwasserspeicher</li> <li>• Installation PAK-Silo</li> <li>• Installation Fällmitteldosierstation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installation Kontaktbecken</li> <li>• Installation Tuchfiltration</li> <li>• Installation PAK-Silo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installation Flockungsfiltration</li> <li>• Installation Spülwasserspeicher</li> <li>• Installation Schlammwasserspeicher</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installation Dyna-Filter in Betonbecken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installation Ozonreaktor</li> <li>• Installation Ozongenerator und Restozonvernichter in Container</li> <li>• Vorbereitung Aufstellung Flüssigsauerstofftank</li> <li>• Installation Kühlwasserversorgung</li> <li>• Ertüchtigung Schönungsteich</li> </ul>
<p><u>In allen Varianten berücksichtigt</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entnahme- und Abschlagbauwerk vor Venturi-Ablaufrinne</li> <li>• Hebewerk in redundanter Ausführung</li> <li>• Rohrleitungsanbindungen</li> <li>• Verfahrenstechnische Ausrüstung</li> <li>• EMSR-Technik inklusive Schaltanlage, Automatisierung und Anpassung PLS</li> <li>• Herstellung Einhausung Maschinen- und EMSR-Technik</li> <li>• Herstellung Zuwegung und Anpassung der befestigten Flächen</li> </ul>				

### 5.3.2 Betriebskostenschätzungen

Die aus dem Betrieb der 4. Reinigungsstufe resultierenden Betriebskosten der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg sind in Anhang 11 und in Tabelle 14 zusammengefasst.

**Tabelle 14: Betriebskostenschätzung**

		Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a	Variante 2b	Variante 3
		PAK in KB und Flockungsfiltration	PAK in KB und Tuchfiltration	GAK-Filtration in Flockungsfiltration	GAK-Filtration in Dyna-Filter	Ozonung mit Schönungsteich
<b>Zusätzliche Betriebskosten</b>						
Strombezug	€ brutto/a	26.000	20.000	14.000	12.000	28.000
Betriebsmittel	€ brutto/a	58.000	51.000	99.000	99.000	21.000
Schlamm Entsorgung	€ brutto/a	26.000	26.000	0	0	0
Spurestoffanalyse	€ brutto/a	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
Wartung	€ brutto/a	64.000	55.000	47.000	43.000	56.000
Personal	€ brutto/a	60.000	48.000	60.000	30.000	48.000
<b>Summe brutto</b>	<b>€ brutto/a</b>	<b>264.000</b>	<b>230.000</b>	<b>250.000</b>	<b>214.000</b>	<b>183.000</b>

Im Rahmen der Betriebskostenschätzung wurden die zusätzlichen Kosten des Strombezugs, der Betriebsmittel (PAK, GAK, Fällmittel), die erforderlichen Spurenstoffanalyse sowie Wartung und Personal abgeschätzt. Bei den Varianten der PAK-Nutzung wurden ergänzend die zusätzlichen Schlamm Entsorgungskosten (Entwässerung und Verwertung der Schlamm mehrmengen) bewertet. Es wurden die in Tabelle 15 dargestellten Annahmen berücksichtigt.

**Tabelle 15: Annahmen Betriebskosten**

	Annahme Bruttokosten
Bezugskosten Strom	21,3 ct/kWh
Bezugskosten PAK	2.000 €/t
Bezugskosten Fällmittel	170 €/t
Bezugskosten GAK	1.300 €/t
Bezugskosten Sauerstoff	0,30 €/kg
Kosten Schlamm Entsorgung	120 €/tFM
Kosten Schlamm Entwässerung	60 €/tTS
Kosten Wartung Bautechnik Verfahrenstechnik EMSR-Technik	1% der Investitionskosten Bautechnik 3% der Investitionskosten Verfahrenstechnik 3 % der Investitionskosten EMSR-Technik
Kosten Spurenstoffanalysen	30.000 €/a
Kosten Personal	60.000 €/(Mitarbeiter *a)

Bzgl. der Betriebskostenschätzung ist Folgendes hervorzuheben:

- Die Kosten des Strombezugs sind bei der Ozonung am Höchsten. Es wurden die Stromkosten der Ozonerzeugung und des Hebewerks berücksichtigt. In ähnlicher Größenordnung liegt der Strombedarf der Variante 1a „PAK in Kontaktbecken und Flockungsfiltration“ Hier sind beim Strombedarf neben dem Hebewerk (Förderhöhe 4,0 m) die Spülluftgebläse, die Spülwasserpumpen, die Schlammwasserpumpen sowie die Rührwerke des Kontaktbeckens und der Strombedarf des PAK-Silos und der Dosierung berücksichtigt.
- Der Betriebsmittelaufwand ist bei den GAK-Varianten am Höchsten.
- Zusätzliche Kosten durch einen erhöhten Schlammanfall, fallen nur in den Varianten 1a und 1b an (Schlammehrerzeugung durch PAK-Dosierung).
- Die Wartungskosten wurden in Abhängigkeit der Investitionskosten ermittelt. Die niedrigsten Wartungskosten wurden für die GAK-Filtration im Dyna-Filter ermittelt.
- Die Personalkosten der jeweiligen Varianten wurde in Abhängigkeit des technischen Aufwandes der Variante, wie folgt angenommen: Am aufwändigsten wurden die Varianten 1a „PAK in Kontaktbecken mit Flockungsfiltration“ sowie die Variante 2a „GAK-Filtration in Flockungsfiltration“ beurteilt. Bei diesen Varianten ist ein vergleichsweise hoher verfahrenstechnischer Aufwand mit Spül- und Schlammwasserpumpwerk etc. zu betreuen. Zusätzlich ist bei Variante 1a das Kontaktbecken zu warten und bei Variante 2a der Austausch der granulierten Aktivkohle erforderlich. Für die Betrachtungen wurde somit bei beiden Varianten eine Vollzeitstelle (100%) angenommen. Ein etwas geringerer Personalaufwand (75%) wurde für die einfacheren Techniken der Tuchfiltration sowie der Ozonung angenommen. Der Betrieb der Dyna-Filter erscheint am Einfachsten, so dass zum Betrieb der Dyna-Filter eine Teilzeitstelle (50%) angesetzt wurde.

Zusammenfassend weist die Variante Ozonung mit Schöpfungsteich die geringsten jährlichen Betriebskosten von rd. 183.000 € brutto auf während die Varianten 1a „PAK in Kontaktbecken und Flockungsfiltration“ und 2a „GAK-Filtration in Flockungsfiltration“ die höchsten zusätzlichen Betriebskosten von über 250.000 € brutto aufweisen.

## 5.4 Wirtschaftlichkeit

Zur Prüfung der Wirtschaftlichkeit werden der Projektkostenbarwert und die mittleren Jahreskosten der untersuchten Varianten gemäß KVR-Leitlinie ermittelt. In Anlehnung an die Veröffentlichung „Mikroschadstoffentfernung machbar?“ des Kompetenzzentrums NRW werden ein Betrachtungszeitraum von 30 Jahren sowie ein Zinssatz von 3% angesetzt sowie die Nutzungsdauern und Preissteigerungen wie folgt gewählt:

- Nutzungsdauer Bautechnik 30 Jahre
- Nutzungsdauer Maschinenteknik 15 Jahre
- Nutzungsdauer EMSR-Technik 10 Jahre
- Preissteigerung Personal 0,5%
- Preissteigerung Energie 3,0%
- Preissteigerung PAK 1,0%
- Preissteigerung GAK 1,0%
- Preissteigerung O3 1,0%
- Preissteigerung Bautechnik 0,5%
- Preissteigerung Maschinenteknik 0,3%
- Preissteigerung Elektrotechnik 0,0%

Für die übrigen Betriebskosten (Fällmittel, Schlamm Entsorgung, Analysen und Wartung) wurde eine Preissteigerung von 2% angenommen. Im Betrachtungszeitraum von 30 Jahren werden einmal Reinvestitionskosten für die Maschinenteknik sowie zweimal Reinvestitionskosten für die EMSR-Technik berücksichtigt. Die Gegenüberstellung der Projektkostenbarwerte und die Rangfolge aller Varianten ist Anhang 12 und der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

**Tabelle 16: Projektkostenbarwert**

		Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a	Variante 2b	Variante 3
		PAK in KB und Flockungsfiltration	PAK in KB und Tuchfiltration	GAK-Filtration in Flockungsfiltration	GAK-Filtration in Dyna-Filter	Ozonung mit Schönungsteich
<b>Herstellkosten</b>						
<b>Herstellkosten gesamt</b>	€ brutto	<b>4.110.000</b>	<b>3.490.000</b>	<b>3.300.000</b>	<b>3.380.000</b>	<b>4.160.000</b>
Förderung NRW	€ brutto	2.877.000	2.443.000	2.310.000	2.366.000	2.912.000
Eigenanteil	€ brutto	1.233.000	1.047.000	990.000	1.014.000	1.248.000
<b>Barwert</b>						
Investitionskosten	€ brutto	5.311.000	4.483.000	4.364.000	4.192.000	5.295.000
Zusätzliche Kosten						
Strombezug	€ brutto	789.000	605.000	408.000	373.000	840.000
Betriebsmittel	€ brutto	1.320.000	1.145.000	2.233.000	2.233.000	470.000
Schlammverwertung	€ brutto	666.000	666.000	0	0	0
Spurestoffanalyse	€ brutto	776.000	776.000	776.000	776.000	776.000
Wartung	€ brutto	1.645.000	1.429.000	1.204.000	1.118.000	1.451.000
Personal	€ brutto	1.258.000	1.006.000	1.258.000	629.000	1.006.000
<b>Summe ohne Förderung</b>	<b>€ brutto</b>	<b>11.765.000</b>	<b>10.110.000</b>	<b>10.243.000</b>	<b>9.321.000</b>	<b>9.838.000</b>
Förderung NRW	€ brutto	2.877.000	2.443.000	2.303.000	2.366.000	2.912.000
<b>Summe inklusive Förderung</b>	<b>€ brutto</b>	<b>8.888.000</b>	<b>7.667.000</b>	<b>7.940.000</b>	<b>6.955.000</b>	<b>6.926.000</b>
Mittlere Jahreskosten	€ brutto	387.540	334.460	355.090	308.380	304.380
<b>Rang nach PKBW</b>		<b>5</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>Spezifische Kosten</b>						
je m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	€ brutto/m <sup>3</sup>	0,23	0,20	0,21	0,18	0,18
je Einwohner und Jahr	€ brutto/(EW*a)	17,5	15,1	16,1	14,0	13,8
je m <sup>3</sup> gebührenrelevante Abwassermenge mit Förderung	€ brutto/m <sup>3</sup>	0,43	0,37	0,39	0,34	0,34
je m <sup>3</sup> gebührenrelevante Abwassermenge ohne Förderung	€ brutto/m <sup>3</sup>	0,59	0,51	0,52	0,47	0,50

Erfolgt keine Förderung der 4. Reinigungsstufe durch das Land NRW beläuft sich der Projektkostenbarwert der Variante 2b „GAK-Filtration in Dyna-Filter“ auf 9.321.000 € brutto. Der Projektkostenbarwert der Variante 3 „Ozonung mit Schönungsteich“ liegt mit 9.838.000 € brutto leicht oberhalb der Variante 2b. Die Variante 2b und 3 sind somit die wirtschaftlichsten Varianten.

Werden öffentliche Fördergelder in Höhe von 70% der Herstellkosten berücksichtigt, beträgt der Projektkostenbarwert für Variante 3 „Ozonung mit Schönungsteich“ rd. 6.926.000 € brutto. Der Projektkostenbarwert von Variante 2b „GAK-Filtration in Dyna-Filter“ liegt mit 6.955.000 € brutto in einer vergleichbaren Größenordnung. Die Variante 2b und 3 sind somit wiederum die wirtschaftlichsten Varianten.

Umgerechnet auf die mittlere behandelte Abwassermenge von rd. 1,7 Mio. m<sup>3</sup>/a und einer mittleren Belastung von ca. 22.100 EW sowie unter Berücksichtigung einer 70%igen Förderung ergeben sich bei den Varianten 2b und 3 spezifische Bruttokosten von rd. 0,18 € je m<sup>3</sup> behandeltes Abwasser oder rd. 14 €/(EW\*a).

Gemäß Angabe des Auftraggebers ist derzeit eine gebührenrelevante Abwassermenge von 905.000 m<sup>3</sup>/a anzusetzen. Wird eine 70%ige Förderung berücksichtigt, ist für die Varianten 2b und 3 von spezifischen Kosten von 0,34 € je m<sup>3</sup> gebühren-

relevanter Abwassermenge auszugehen. Erfolgt keine Förderung der Spurenstoffelimination, erhöhen sich die spezifischen Kosten auf 0,47 bzw. 0,5 € je m<sup>3</sup> gebührenrelevanter Abwassermenge.

Unberücksichtigt bleiben in diesem Zusammenhang Kosteneinsparungen der Abwasserabgabe, welche z.B. aus einer Reduktion der CSB- und Phosphorwerte des Ablaufs resultieren.

Hinweis: Die Wirtschaftlichkeit einer Spurenstoffelimination hängt stark vom tatsächlichen Aktivkohle- bzw. Ozonbedarf sowie den aktuellen Bezugskosten ab. Labor- oder großtechnische Versuche zum realen Betriebsmittelverbrauch bei Reinigung des Ablaufs der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg wurden bisher nicht durchgeführt. Der Betriebsmittelbedarf wurde anhand von Literaturangaben und Erfahrungswerten abgeschätzt und ist somit mit Unsicherheiten behaftet. Ergänzend werden nachfolgend Sensitivitätsanalysen zum Betriebsmittelverbrauch und den Bezugskosten durchgeführt.

## 5.5 Sensitivitätsanalysen

Da die Kosten für die Betriebsmittel und den Strombezug die Wirtschaftlichkeit einer Spurenstoffelimination stark beeinflussen, werden nachfolgend die Auswirkungen von abweichenden Mengen und Preisen auf die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Variante geprüft.

### 5.5.1 Betriebsmittelverbrauch

Die Sensitivitätsanalyse des Betriebsmittelverbrauchs ist Anhang 13 und Abbildung 15 zu entnehmen. Im Rahmen der Sensitivitätsanalysen wurden die Betriebsmittelverbräuche um 30% wie folgt variiert:

- Die PAK-Dosierung der Auslegungsvarianten 1a und 1b wurde mit 15 gPAK/m<sup>3</sup> angenommen und im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung zwischen 11 und 20 gPAK/m<sup>3</sup> variiert.
- Die durchgesetzten Bettvolumina der Varianten 2a und 2b wurden bei der Auslegung zu 10.000 Bettvolumina angenommen. In der Sensitivitätsanalyse wurden minimal 7.000 Bettvolumina bis maximal 13.000 Bettvolumina betrachtet.

- Auf Basis der mittleren CSB- und NO<sub>2</sub>-Belastung des Ablaufs der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg wurde für die Ozonung eine mittlere erforderliche Ozondosis von 4,1 gO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> abgeschätzt. Im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung wurden eine minimal erforderliche Ozondosis von 2,9 gO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> und eine maximale erforderliche Ozondosis von 5,3 gO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> geprüft.

Wird der Betriebsmittelbedarf um 30% erhöht, sind weiterhin die Variante 2b „GAK-Filtration in Dyna-Filter“ und die Variante 3 „Ozonung“ die wirtschaftlichsten Varianten. Konkurrenzfähig wird die Variante 1b „PAK in Kontaktbecken und Tuchfiltration“ wenn der Betrieb der Reinigungsstufe mit 30% reduziertem PAK-Bedarf möglich wäre bzw. bei der GAK-Filtration im Dyna-Filter nur 7.000 Bettvolumina durchgesetzt werden könnten. Könnten im Dyna-Filter 13.000 Bettvolumina durchgesetzt werden, stellt sich der Dyna-Filter wirtschaftlicher als die Ozonung dar.

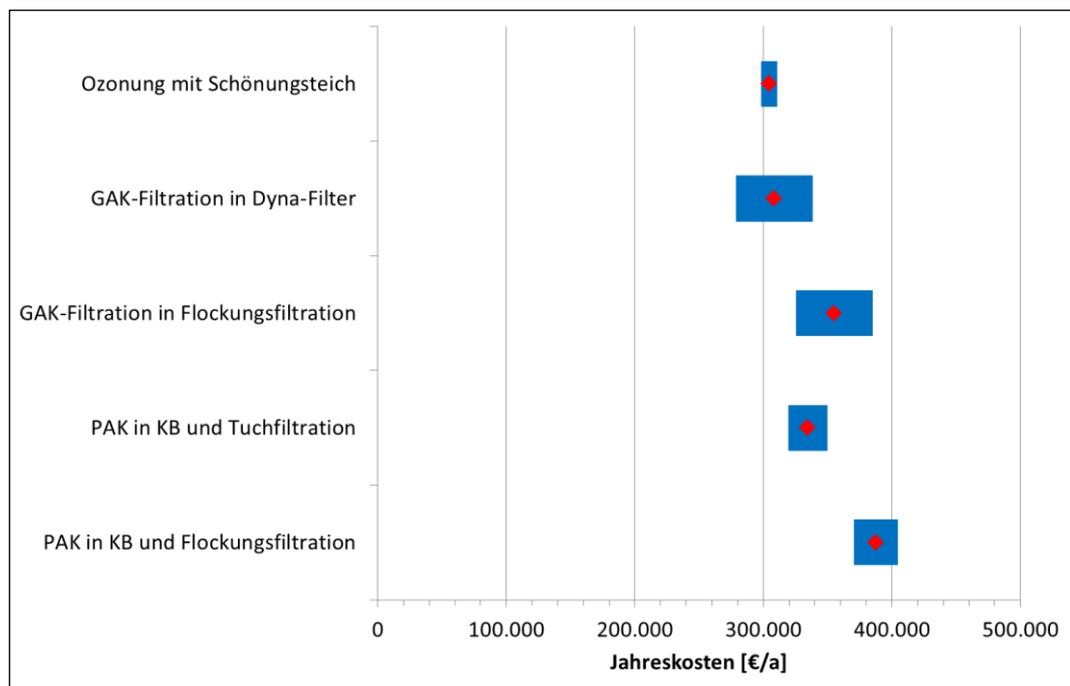


Abbildung 15: Sensitivitätsanalyse Betriebsmittelverbrauch

### 5.5.2 Betriebsmittelpreis

Die Sensitivitätsanalyse des Betriebsmittelpreises ist Anhang 14 und Abbildung 16 zu entnehmen. Im Rahmen der Sensitivitätsanalysen wurden die Betriebsmittelpreise um 10% wie folgt variiert:

- Der PAK-Bruttopreis der Auslegungsvarianten 1a und 1b wurde mit 2.000 €/tPAK angenommen und im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung zwischen 1.800 und 2.200 €/tPAK variiert.
- Der GAK-Bruttopreis der Auslegungsvarianten 2a und 2b wurde mit 1.300 €/tGAK angenommen und im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung zwischen 1.170 und 1.430 €/tGAK variiert.
- Der Brutto-Sauerstoffpreis der Auslegungsvarianten 3 wurde zu 0,30 €/kg angenommen und im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung zwischen 0,27 und 0,33 €/kg variiert.

Wird der Betriebsmittelpreis um 10% erhöht, sind weiterhin die Variante 2b „GAK-Filtration in Dyna-Filter“ und die Variante 3 „Ozonung“ die wirtschaftlichsten Varianten. Auch wenn der Betriebsmittelpreis der PAK 10% unterhalb des in der Auslegungsvariante angenommenen Preises liegt, liegt der Projektkostenbarwert der Variante 1b „PAK in Kontaktbecken und Tuchfiltration“ oberhalb des Projektkostenbarwertes der Varianten 2b und 3.

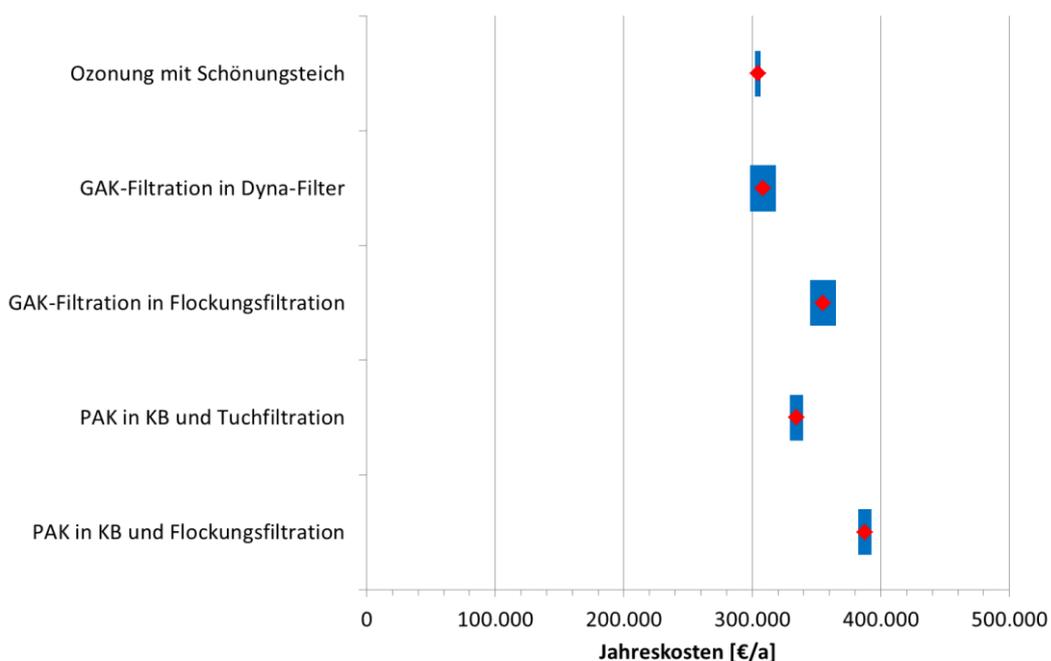


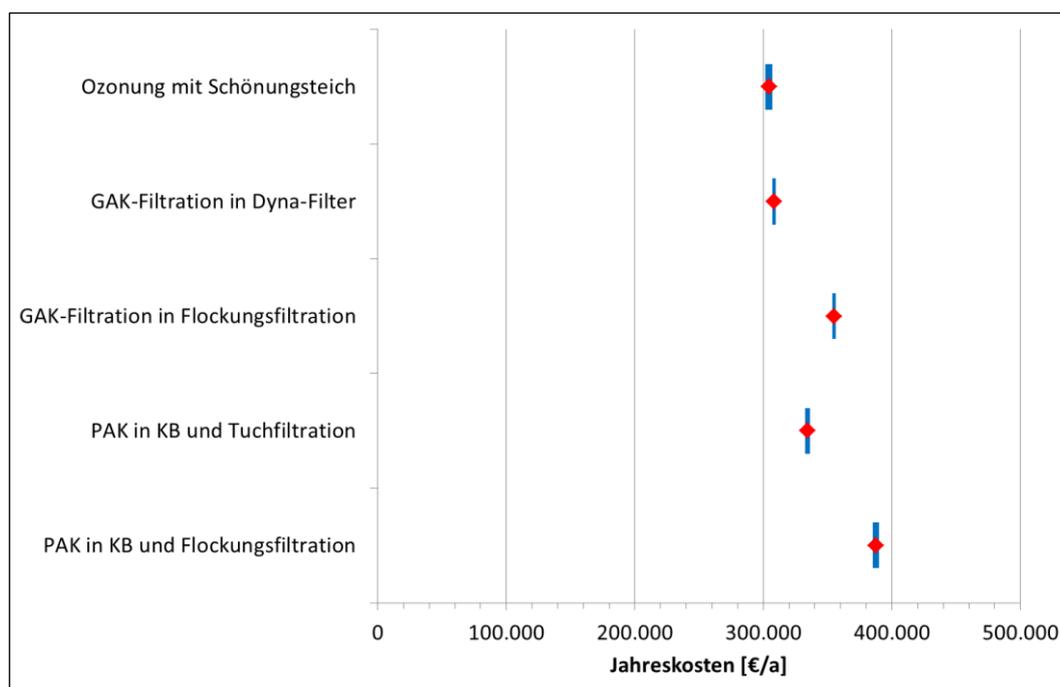
Abbildung 16: Sensitivitätsanalyse Betriebsmittelpreis

### 5.5.3 Strompreis

Die Sensitivitätsanalyse des Strompreises ist Anhang 15 und Abbildung 17 zu entnehmen. Im Rahmen der Sensitivitätsanalysen wurden die Strompreise um 10% wie folgt variiert:

- Der Brutto-Strompreis der Auslegungsvarianten wurde zu 21,3 ct/kWh angenommen und im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung zwischen 19,2 und 23,4 ct/kWh variiert.

Wird der Strompreis um 10% erhöht, bleiben weiterhin die Variante 2b „GAK-Filtration in Dyna-Filter“ und die Variante 3 „Ozonung“ die wirtschaftlichsten Varianten. Auch bei Erhöhung des Strompreises um 10% weist die Variante 3 „Ozonung“ noch geringfügige wirtschaftliche Vorteile gegenüber der Variante 2b „GAK-Filtration in Dyna-Filter“ auf. Der Strompreis hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit.



**Abbildung 17: Sensitivitätsanalyse Strompreis**

### 5.5.4 Zusammenfassung

In Anhang 16 werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen zusammengefasst. Ähnlich wie in der Bewertungsmatrix beim nachfolgenden Variantenvergleich wird ein Punktesystem zur Bewertung genutzt. Die Punkte werden in Abhängigkeit der

Abweichung des Minimums bzw. des Maximums vom Auslegungswert vergeben. Weicht z.B. der Projektkostenbarwert bei minimalem Strompreis weniger als 1% vom Projektkostenbarwert im Auslegungsfall ab, wird der Einfluss des Strompreises als „nicht sensibel“ bewertet. Als „sehr stark sensibel“ wird eine Abweichung >10% gewertet. Folgende Bewertungsgrenzen wurden gewählt:

- Nicht sensibel: Abweichung < 1% → 1 Punkt
- Wenig sensibel: Abweichung 1% bis 2% → 2 Punkte
- Mäßig sensibel: Abweichung 2% bis 5% → 3 Punkte
- Stark sensibel: Abweichung 5% bis 10% → 4 Punkte
- Sehr stark sensibel: Abweichung > 10% → 5 Punkte

In Anhang 16 ist ersichtlich, dass die GAK-Filtrationen mit 3,3 Bewertungspunkten insgesamt am Sensibelsten auf die Abweichung von den getroffenen Auslegungswerten reagieren. Die geringste Sensitivität zeigt die Variante 3 „Ozonung“ mit 2,2 Bewertungspunkten.

## 5.6 Variantenbewertung

### 5.6.1 Vorgehensweise

Neben der Ökonomie werden nachfolgend betriebliche und ökologische Aspekte zur Bewertung der einzelnen Verfahrensvarianten herangezogen und in einer Bewertungsmatrix gewichtet (vgl. Anhang 17). Der Wirtschaftlichkeit fließt zu 50% in die Betrachtung ein. Auch die betrieblichen und ökologischen Aspekte werden gemeinsam zu 50% gewertet.

Die Variante, die das jeweilige Kriterium am besten erfüllt, erhält die gesamte dem Kriterium zugeschriebene prozentuale Gewichtung. Die Varianten, deren Kriterienerfüllung die der besten Variante um 200% bzw. 300% 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 eine Abwägung und Gewichtung vorgenommen. Die Variante mit der höchsten Prozentzahl ist als Vorzugsvariante anzusehen.

### 5.6.2 Ökonomie

Die Wirtschaftlichkeit wird über die bereits ermittelten Projektkostenbarwerte, die Herstellkosten sowie die beschriebenen Sensitivitäten bewertet. Hinsichtlich der Ökonomie sind die Variante 2b „GAK-Filtration in Dyna-Filtern“ und die Variante 3 „Ozonung mit Schönungsteich“ die Vorzugslösung für die Umsetzung einer Spurenstoffelimination auf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg.

### 5.6.3 Betriebliche Aspekte

Die betrieblichen Aspekte fließen zu 30% in die Betrachtungen ein. Im Rahmen der betrieblichen Aspekte wird der Betriebs- und Wartungsaufwand in Abhängigkeit der Wartungspunkte und dem angesetzten Personalaufwand bewertet.

- Der Variante 2b „GAK in Dyna-Filter“ wird hierbei der geringste Betriebs- und Wartungsaufwand zugeordnet, da es sich um eine vergleichsweise einfache Anlagentechnik mit wenig Messstellen und Antrieben handelt.
- Am aufwendigsten werden die Variante 1a „PAK in KB und Flockungsfiltration“ und 2a „GAK-Filtration in Flockungsfiltration“ eingestuft. Bei Varianten 1a sind vergleichsweise große Becken und vergleichsweise viel Anlagentechnik (Pumpen, Rührwerke, Messtechnik) erforderlich. Bei Variante 2a ist zwar kein Kontaktbecken zu betreiben, dafür ist die GAK in regelmäßigen Abständen zu tauschen.
- Generell ist der Betriebs- und Wartungsaufwand für Variante 3 „Ozonung mit Schönungsteich“ überschaubar. Da es sich aber (bedingt durch die Ozonerzeugung) um einen besonderen Betriebspunkt mit diverser Verfahrens- und Sicherheitstechnik handelt und das Kläranlagenpersonal i.d.R. keine Erfahrungen mit der geplanten Anlagentechnik hat, wird der Betriebs- und Wartungsaufwand als mittelmäßig eingestuft.

Hinsichtlich der betrieblichen Aspekte ist die Variante 2b „GAK-Filtration in Dyna-Filtern“ die Vorzugslösung für die Umsetzung einer Spurenstoffelimination auf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg.

#### 5.6.4 Ökologie

Die ökologischen Aspekte fließen zu 20% in die Betrachtungen ein. Im Rahmen der ökologischen Aspekte werden die Elimination von Verunreinigungen, die CO<sub>2</sub>-Belastung, der Reststoffanfall, die Entfernung multiresistenter Keime und die Entfernung von Mikroplastik bewertet.

- Hinsichtlich der Elimination von Verunreinigungen werden alle Verfahren als gleichwertig eingestuft.
- Die Ermittlung der jeweiligen CO<sub>2</sub>-Belastung erfolgte anhand des jeweiligen Strombedarf sowie des erforderlichen Energiebedarfs zur Herstellung bzw. Regenerierung der Aktivkohle bzw. zur LOX-Herstellung. Die geringste CO<sub>2</sub>-Belastung tritt bei Variante 3 „Ozonung mit Schönungsteich“ auf. Die höchste CO<sub>2</sub>-Belastung ist Variante 2a „GAK-Filtration in Flockungfiltration“ zuzuordnen.
- Bei den PAK-Varianten treten PAK-haltige Klärschlämme auf, die nicht landwirtschaftlich verwertet werden dürfen und der Verbrennung zuzuführen sind. Somit wurden diese Varianten beim Reststoffanfall am Schlechtesten bewertet. Bei der Ozonung wird die ozonhaltige Abluft nachbehandelt. Allerdings treten ggf. unerwünschte Reaktionsprodukte im Abwasser auf, so dass die Ozonung hinsichtlich der Reststoffe als mittelmäßig eingestuft wurde. Hinsichtlich des Reststoffanfalls wurden die GAK-Varianten am besten bewertet, da die GAK nach Reaktivierung wiederverwendet werden kann und keine unerwünschten Reaktionsprodukte im Abwasser auftreten.
- Bei den PAK- und GAK-Varianten ist die Entfernung multiresistenter Keime nur durch Nachschaltung einer UV-Desinfektion möglich. Mit der geplanten Ozonung ist die Entfernung multiresistenter Keime ebenfalls nicht möglich. Allerdings könnte zur Entfernung multiresistenter Keime wahlweise eine UV-Desinfektion nachgeschaltet oder die Ozonung erweitert werden, welches ggf. verfahrenstechnische und wirtschaftliche Vorteile bietet. Hinsichtlich der Entfernung multiresistenter Keime wurde somit die Ozonung etwas besser als die Aktivkohlevarianten eingestuft.
- Eine Ozonung hat keinen Einfluss auf das im Abwasser vorhandene Mikroplastik. Auch bei Nutzung von Aktivkohle kann Mikroplastik nicht gesi-

chert zurückgehalten werden. Allerdings ist davon auszugehen, dass ein Rückhalt in der Aktivkohle stattfindet. In welchem Maß Mikroplastik abgetrennt wird, ist derzeit nicht bekannt. Hinsichtlich der Entfernung von Mikroplastik wurden somit die Aktivkohlevarianten etwas besser als die Ozonung bewertet.

In Summe sind die Varianten mit granulierter Aktivkohle und die Ozonung hinsichtlich der Ökologie als gleichwertig einzustufen.

### 5.6.5 Zusammenfassung

Bei Berücksichtigung aller Bewertungskriterien ergibt sich die in Tabelle 17 dargestellte Rangfolge der betrachteten Variante. Die Variante 2b „GAK-Filtration in Dyna-Filter“ liegt in der Gesamtbewertung mit rd. 93 % vor der Variante 3 „Ozonung mit Schönungsteich“, welche mit rd. 83 % bewertet wurde.

**Tabelle 17: Auszug Bewertungsmatrix**

Bewertungsmatrix	Gewichtung	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a	Variante 2b	Variante 3
		PAK in KB und Flockungsfiltration	PAK in KB und Tuchfiltration	GAK-Filtration in Flockungsfiltration	GAK-Filtration in Dyna-Filter	Ozonung mit Schönungsteich
1. Ökonomie	50,00%	36,99%	45,06%	42,38%	47,15%	47,40%
2. Betriebliche Aspekte	30,00%	18,00%	23,00%	20,00%	30,00%	20,00%
3. Ökologie	20,00%	13,70%	14,00%	16,00%	16,00%	16,00%
<b>Summe gewichtete Anteile</b>	<b>100,00%</b>	<b>68,69%</b>	<b>82,06%</b>	<b>78,38%</b>	<b>93,15%</b>	<b>83,40%</b>
<b>Rangfolge</b>		<b>5</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>

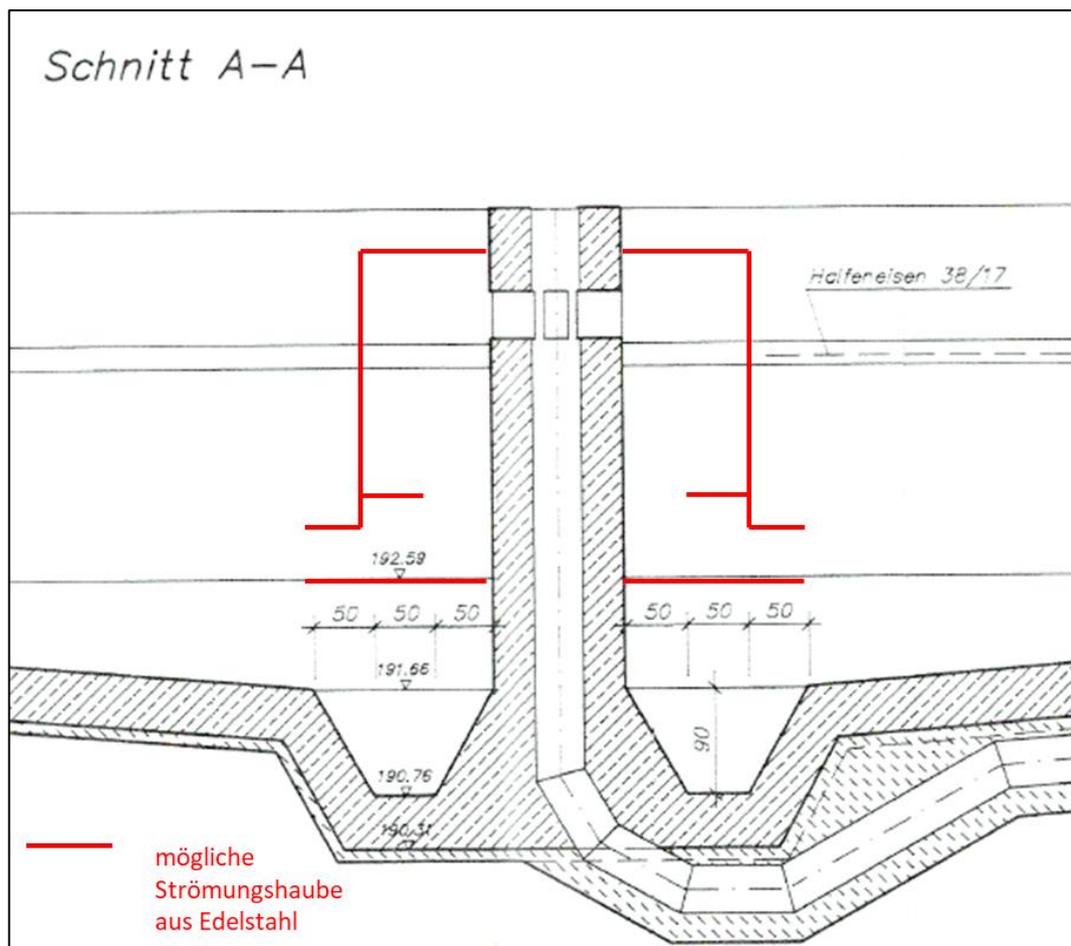
## 6. Optimierung Nachklärbecken und Belebung

### 6.1 Nachklärbecken

Um eine Spurenstoffelimination möglichst wirtschaftlich, effizient und mit geringem Ressourcenverbrauch betreiben zu können, sollte das mechanisch-biologisch vorgereinigte Abwasser möglichst frei von Feststoffen sein. Ein erhöhter Feststoffanteil im Ablauf der biologischen Reinigung bedeutet eine höhere CSB-Fracht im Zulauf zur Spurenstoffelimination. Die erhöhte CSB-Fracht verursacht bei allen Verfahrensvarianten höhere Betriebskosten (z.B. durch die erhöhte Ozonzehrung, erhöhten Zugabe von PAK, kürzere Intervalle zum Austausch der granulierten Aktivkohle).

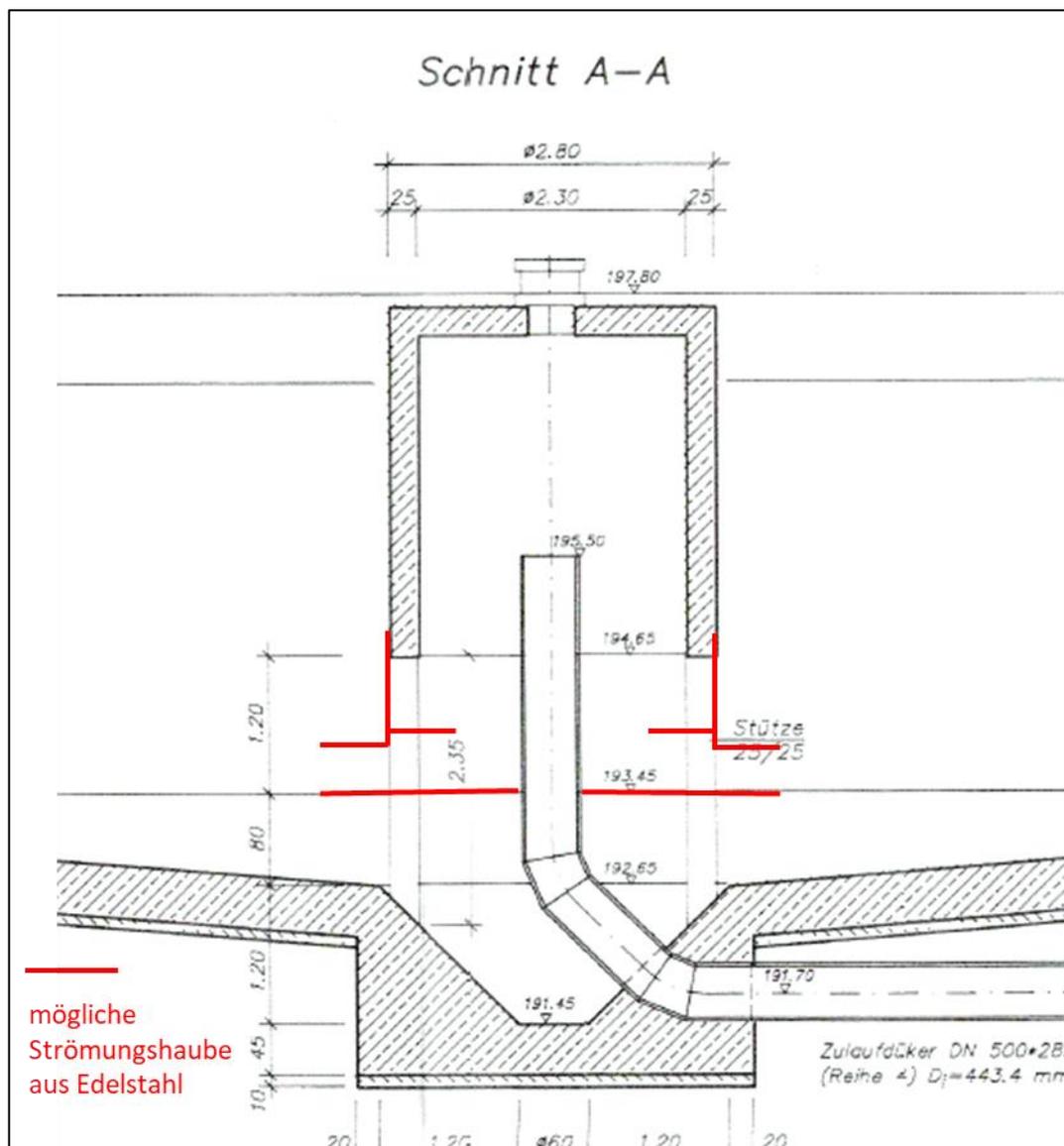
Maßgeblichen Einfluss auf die Betriebskosten der Spurenstoffelimination haben damit die bestehenden Nachklärbecken. Die Nachklärbecken der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg reichen zwar aktuell aus, um die geforderten Ablaufwerte einhalten zu können, ein Feinstflockenabtrieb bei Trockenwetter und in gewissem Umfang auch ein Schlammabtrieb während starkem Regenwetterzufluss werden jedoch beobachtet. Ursache hierfür sind nicht zu geringe Beckenabmessungen, sondern eine strömungstechnisch besonders ungünstige Ausbildung der Mittelbauwerke. Zur Zeit der Errichtung der Nachklärbecken in den 1970iger-Jahren (alte Nachklärbecken) bzw. 1990iger-Jahren (neue Nachklärbecken) lagen noch keine detaillierten Erkenntnisse zu den Strömungsverhältnissen in Nachklärbecken vor. Heutzutage weiß man, unterstützt von dreidimensionalen computergestützten Strömungssimulationen (CFD-Simulationen), weit mehr über die Strömungsverhältnisse in Nachklärbecken. Ein optimaler Einlauf in das Nachklärbecken kann die Leistungsfähigkeit des Nachklärbeckens erheblich steigern. Nach Begutachtung der bestehenden Mittelbauwerke besteht hier ein erhebliches Optimierungspotenzial.

Bei den alten Nachklärbecken aus den 1970iger-Jahren ist zu erkennen, dass der Einlauf in die Becken deutlich zu hoch erfolgt. Außerdem steht kein Volumen zur Verfügung, indem sich das Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch nach dem Ausströmen aus dem Zulaufrohr beruhigen kann. Dementsprechend sollte hier eine Strömungshaube aus Edelstahl installiert werden, die das Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch beruhigt, nach unten führt und möglichst gleichmäßig knapp oberhalb des Schlammspiegels in das Nachklärbecken einleitet.



**Abbildung 18: Beispiel Einbau Strömungshaube in die alten Nachklärbecken**

Bei den neueren Nachklärbecken aus den 1990iger-Jahren ist das Mittelbauwerk unten geöffnet. Dadurch strömt das Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch ungeführt in das Nachklärbecken ein und wirbelt insbesondere den bereits eingedickten Schlamm im Sohl- und Trichterbereich auf. Auch hier empfiehlt sich der Einbau einer Edelstahl-Strömungshaube, um das bestehende Mittelbauwerk herum. Die Strömungshaube sorgt für einen unteren Abschluss des Mittelbauwerks und für eine gleichmäßige Einströmung des Abwasser-Belebtschlamm-Gemisches knapp oberhalb des Schlammspiegels.



**Abbildung 19: Beispiel Einbau Strömungshaube in die neuen Nachklärbecken**

Es wird darauf hingewiesen, dass die dargestellten Strömungshauben lediglich einen ersten Vorschlag auf Grundlage der Erfahrungswerte des Verfassers darstellen. Im Rahmen einer weiteren Planung sind in jedem Fall CFD-Strömungssimulationen durchzuführen, um die genaue Ausführung und Abmessungen der Strömungshauben festzulegen.

Fest steht jedoch, dass mit der Durchführung entsprechender CFD-Strömungssimulation und dem nachträglichen Einbau entsprechender Strömungshauben aus Edelstahl die Leistungsfähigkeit der Nachklärbecken erheblich verbessert werden kann. Gleichzeitig können somit die Betriebsmittelkosten der Spurenstoffelimination nach unserer Einschätzung um 10 – 20 % reduziert wer-

den. Bei den wirtschaftlich vorne liegenden Varianten würde dies folgende Betriebskosteneinsparung pro Jahr ergeben:

- Variante 2b GAK-Filtration: 10.000 – 20.000 €/a
- Variante 3 Ozonung: 4.000 – 8.000 €/a

Die Herstellkosten für die Durchführung der Strömungsoptimierung durch den Einbau von entsprechenden Strömungshauben werden wie folgt abgeschätzt:

**Tabelle 18: Kostenschätzung Strömungsoptimierung Nachklärbecken**

<b>Kosten Strömungsoptimierung Nachklärbecken</b>	
CFD-Strömungssimulationen Nachklärbecken alt	15.000,00 €
CFD-Strömungssimulationen Nachklärbecken neu	15.000,00 €
Strömungshauben Nachklärbecken alt	140.000,00 €
Strömungshauben Nachklärbecken neu	120.000,00 €
<b>Summe netto</b>	<b>290.000,00 €</b>
Baunebenkosten, rd. 30 % (auf Strömungshauben)	78.000,00 €
<b>Herstellkosten netto</b>	<b>368.000,00 €</b>
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.	70.000,00 €
<b>Herstellkosten brutto, rd.</b>	<b>438.000,00 €</b>

Gemäß Abstimmung mit der BezReg Detmold ist die Strömungsoptimierung der Nachklärbecken im Rahmen des Förderprogrammes „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II (ResA II)“ nicht förderfähig. Allerdings wird die Umsetzung dringend empfohlen, um die Spurenstoffelimination möglichst wirtschaftlich, effizient und mit geringem Ressourcenverbrauch betreiben zu können.

## 6.2 Belüftungssystem Belebung

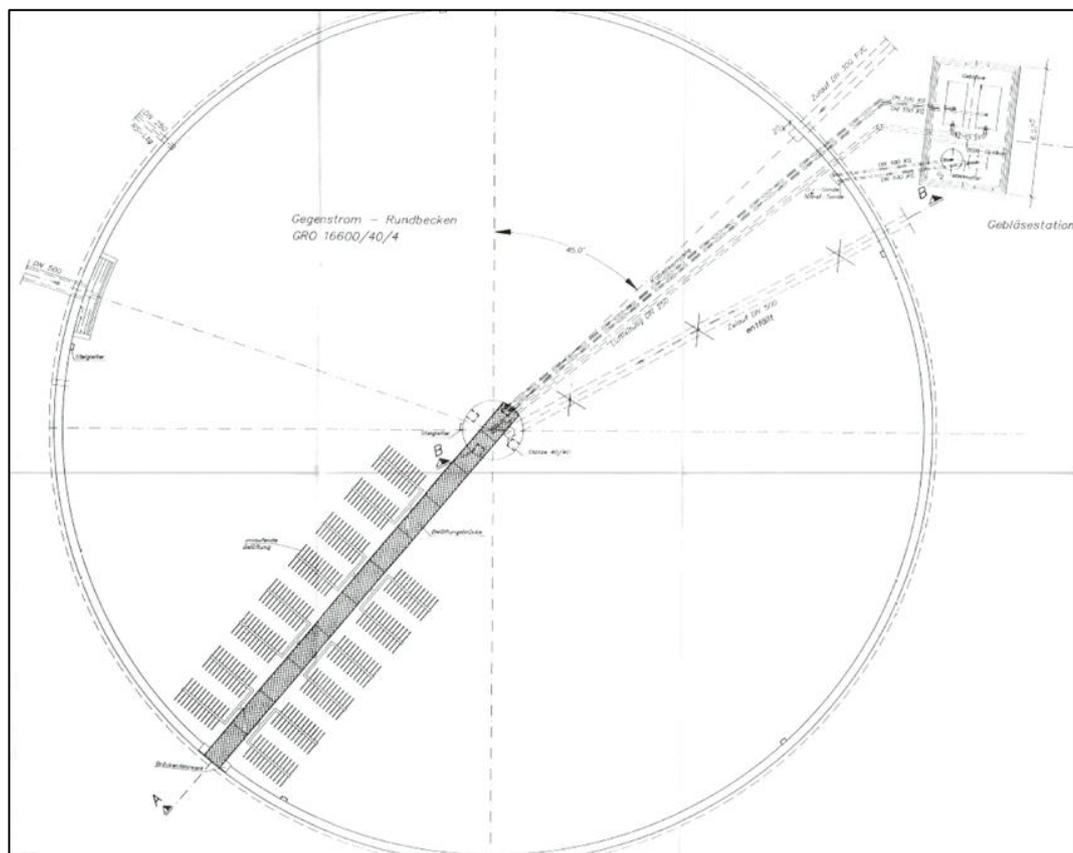
Im Rahmen des Förderprogramms „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II (ResA II)“ wird bei Umsetzung einer Spurenstoffelimination auch die Erneuerung von Belüftungssystemen in der Belebungsanlage mit bis zu 30 % der Herstellkosten gefördert.

Ein weiteres Förderprogramm besteht derzeit mit der „Kommunalrichtlinie 2019“ des Bundesumweltministeriums. Auch bei diesem Förderprogramm wird die Er-

neuerung des Belüftungssystems in Belebungsanlagen mit bis zu 30 % der Herstellkosten gefördert. Die Fördersumme ist je Maßnahme auf 200.000 € begrenzt.

Voraussetzung zur Beantragung der Fördermittel ist in beiden Fällen die vorherige Durchführung einer energetischen Feinanalyse gemäß dem DWA-Arbeitsblatt 216. Die Feinanalyse darf nicht älter als zwei Jahre sein.

Aktuell sind die Belüfter im alten Belebungsbecken an einer umlaufenden Räumerrücke befestigt (System Fa. Schreiber).



**Abbildung 20: Belebungsbecken alt**

In den beiden neuen Belebungsbecken sind die Belüfter auf dem Boden installiert. An der umlaufenden Räumerrücke sind lediglich Rührwerke zur Durchmischung des Beckenvolumens installiert.



**Abbildung 21: Belebungsbecken neu**

Das bestehende Belüftungssystem der drei Belebungsbecken der Kläranlage Horn-Bad Meinberg entspricht aus energetischer Sicht nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik. Die vorhandene Belegungsdichte der Membranbelüfter, die maßgeblich für die Energieeffizienz ist, ist in allen Becken als sehr gering einzustufen. Für die Druckluftherzeugung stehen am Markt mittlerweile deutlich energieeffizientere Maschinen zur Verfügung als die bislang seit mehr als 20 Jahren eingesetzten Drehkolbengebläse.

Daher wird für das Belüftungssystem insgesamt ein mögliches Einsparpotenzial von etwa 25 - 35 % beim Energieverbrauch erwartet.

Die Kosten für die vollständige Erneuerung der Belüftungssysteme im alten und den beiden neuen Belebungsbecken werden gemäß Tabelle 19 abgeschätzt. Bei einer Förderquote von 30 % verbleibt ein Eigenanteil für die Erneuerung des Belüftungssystems von rd. 574.000 € brutto einschl. Baunebenkosten

Tabelle 19: Kostenschätzung Erneuerung Belüftungssystem

<b>Kosten Erneuerung Belüftungssystem</b>	
Belüftungssystem Belebungsbecken alt	90.000,00 €
Belüftungssysteme Belebungsbecken neu	180.000,00 €
Erneuerung Gebläse Belebung alt	90.000,00 €
Erneuerung Gebläse Belebung neu	170.000,00 €
Summe netto	530.000,00 €
Baunebenkosten, rd. 30 %	159.000,00 €
Herstellkosten netto	689.000,00 €
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.	131.000,00 €
<b>Herstellkosten brutto, rd.</b>	<b>820.000,00 €</b>

## 7. Verfahrensempfehlung

### 7.1 Phosphorelimination

Da die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg die einzige Kläranlage ist, die in die Wiembecke einleitet und der Abwasseranteil im Gewässer vergleichsweise hoch ist, ist der ökologische und chemische Zustand der Wiembecke unmittelbar mit der Qualität des Kläranlagenablaufs verknüpft.

Gemäß WRRL-Monitoring weist die Wiembecke einen unbefriedigenden ökologischen und chemischen Zustand sowie ein unbefriedigendes ökologisches Potential auf. Insbesondere die Phosphorkonzentration der Wiembecke ist unterhalb der Einleitstelle des Kläranlagenablaufs vergleichsweise hoch (0,24 bzw. 0,31 mg/l). Der Phosphorgrenzwert gemäß Oberflächengewässerverordnung von 0,10 mg/l wird überschritten. Vor diesem Hintergrund kündigte die Bezirksregierung Detmold mit Schreiben vom 12. November 2018 an, den zukünftigen Betriebswert der Kläranlage für  $P_{ges}$  auf 0,55 mg/l sowie den Überwachungswert auf 1,1 mg/l zu beschränken. Gemäß Ausführung der Genehmigungsbehörde ist der Betriebswert als Jahresmittelwert einzuhalten und nachzuweisen.

Anhand der Datenauswertung ist ersichtlich, dass der zukünftig geforderte Betriebswert von der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg im Jahr 2017 bereits eingehalten wurde. Ergänzend wurde der Überwachungswert in 2018 bereits auf 1,2 mg/l erklärt. Der im Rahmen der Eigenüberwachung maximal gemessene  $P_{ges}$ -Wert lag bei knapp 0,9 mg/l. Vor diesem Hintergrund ist die Erweiterung der Zentralkläranlage um eine zusätzliche Phosphorelimination aktuell nicht erforderlich.

Sollten sich die Rahmenbedingen ändern, ist die Erforderlichkeit einer Phosphorelimination erneut zu prüfen. Die Ausrichtung der Studie ist dann zu ändern, da bei Erforderlichkeit einer Phosphorelimination andere Verfahrensvarianten zu betrachten sind.

### 7.2 Spurenstoffelimination

Da die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg die einzige Kläranlage ist, die in die Wiembecke einleitet und der Abwasseranteil im Gewässer vergleichsweise hoch ist, ist die Spurenstoffbelastung der Wiembecke unmittelbar mit der Qualität des Kläranlagenablaufs verknüpft.

Die Analysen bestätigen, dass der Spurenstoffgehalt der Wiembecke durch die Einleitung des Kläranlagenablaufs deutlich erhöht wird. Dies betrifft insbesondere die Parameter Diclofenac, Carbamazepin und Metoprolol, welche häufig in Kläranlagenabläufen zu finden sind. Ergänzend wurden unterhalb der Einleitstelle der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg eine deutliche Erhöhung von Amidotrizoesäure (Kontrastmittel) sowie hohe Hormongehalte (17-beta-Estradiol und Estron) festgestellt. Obwohl derzeit keine rechtliche Verpflichtung zur Installation einer Spurenstoffelimination besteht, sollte der Ausbau der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg aus folgenden Gründen in Betracht gezogen werden:

- Durch Installation einer Spurenstoffelimination kann die bestehende Spurenstoffbelastung des Ablaufs der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg und somit die Belastung der Wiembecke deutlich reduziert werden.
- Gleichzeitig könnte bei Beantragung der Maßnahme bis Ende 2019 eine bis zu 70%ige Investitionskostenförderung im Zuge des Förderprogramms „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II (ResA II)“ erfolgen.

Unter Berücksichtigung der vorhergehenden Variantenuntersuchung sind die Variante 2b „GAK-Filtration in Dyna-Filtern“ oder die Variante 3 „Ozonung mit Schönungsteich“ die Vorzugslösungen für die Umsetzung einer Spurenstoffelimination auf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg.

Wird eine Ozonung installiert, erfolgt eine sinnvolle Nachnutzung des bereits bestehenden Schönungsteichs. Gleichzeitig ist von einer Verbesserung der Wasserqualität des Schönungsteichs durch den zusätzlichen Sauerstoffeintrag auszugehen. Als nachteilig sind der vergleichsweise hohe verfahrens- und sicherheitstechnische Aufwand und die bei einer Ozonung ggf. anfallende Reaktionsprodukte zu bewerten. Im Vergleich zur Ozonung handelt es sich bei der GAK-Filtration um eine einfachere Anlagentechnik.

Die Wirtschaftlichkeit beider Varianten hängt stark von der Entwicklung der Strom- und Betriebsmittelpreise sowie den erforderlichen Betriebsmittelmengen ab. Während bei der GAK-Filtration die tatsächlich durchgesetzten Bettvolumina mit Unsicherheiten behaftet sind, kann bei der Ozonung der tatsächliche Ozonbedarf vorab nur abgeschätzt werden.

Hinsichtlich ggf. zukünftiger Anforderungen an die Abwasserreinigung sind die Desinfektion des Abwassers und die Entfernung von Mikroplastik zu nennen. Bei

den Aktivkohlevarianten ist die Entfernung multiresistenter Keime nur durch Nachschaltung einer UV-Desinfektion möglich. Mit der geplanten Ozonung ist die Entfernung multiresistenter Keime ebenfalls nicht möglich. Allerdings könnte zur Entfernung multiresistenter Keime wahlweise eine UV-Desinfektion nachgeschaltet oder die Ozonung erweitert werden, welches ggf. verfahrenstechnische und wirtschaftliche Vorteile bietet. Zur Entfernung von Mikroplastik ist die Ozonung ungeeignet. Auch bei Nutzung von Aktivkohle kann Mikroplastik nicht gesichert zurückgehalten werden. Allerdings ist davon auszugehen, dass ein Rückhalt in der Aktivkohle stattfindet. In welchem Maß Mikroplastik abgeschieden wird, ist derzeit nicht bekannt.

Auf Grund der vorgestellten Variantenuntersuchungen wird empfohlen, die Variante 2b „GAK-Filtration im Dyna-Filter“ als Spurenstoffelimination auf der Zentralkläranlage Horn-Bad-Meinberg umzusetzen.

## 8. Zusammenfassung

Die Stadtwerke Horn-Bad Meinberg betreiben die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg, die für die mechanisch-biologische Abwasserreinigung von rd. 34.000 EW ausgelegt und derzeit mit einer CSB-Fracht von rd. 22.100 EW belastet ist. Neben den häuslichen Abwässern von rd. 16.200 Einwohnern gelangen industrielle und gewerbliche Abwässer zur Kläranlage.

Der gereinigte Ablauf der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg wird in den Oberlauf der Wiembecke abgeleitet. Der Abwasseranteil im Gewässer ist hoch: Beim mittleren Abfluss der Wiembecke beträgt der aus der Abwasserreinigung resultierende Anteil knapp 17 %. Beim mittleren Niedrigwasserabfluss der Wiembecke beläuft sich der Anteil des Kläranlagenablaufs am Gesamtabfluss auf knapp 94 %. Gemäß WRRL-Monitoring des Landes NRW weist die Wiembecke hinsichtlich der ökologischen und chemischen Parameter teilweise mäßige oder unbefriedigende Zustände auf. Unter Berücksichtigung des oben genannten Abflussanteils des Kläranlagenablaufs ist die Beeinträchtigung der Gewässerqualität u.a. auf den durch die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg verursachten Mikroschadstoff- und Phosphoreintrag ins Gewässer zurückzuführen.

Vor diesem Hintergrund wurden den Stadtwerken Horn-Bad Meinberg eine Verschärfung des Phosphorgrenzwertes durch die Genehmigungsbehörde angekündigt. Gemäß Nebenbestimmung des Erlaubnisbescheids aus Februar 2017 wurden die Stadtwerke Horn-Bad Meinberg aufgefordert, eine Machbarkeitsstudie zur Elimination von Mikroschadstoffen sowie zur weitergehenden Phosphorelimination zu erstellen.

Mit Schreiben vom 12. November 2018 kündigte die Bezirksregierung Detmold einen zukünftig einzuhaltenden Betriebswert für  $P_{\text{ges}}$  von 0,55 mg/l sowie einen Überwachungswert von 1,1 mg/l an. Gemäß Ausführung der Genehmigungsbehörde ist der Betriebswert als Jahresmittelwert einzuhalten und nachzuweisen. Der Betriebs- und der Überwachungswert wurden in 2017 eingehalten. Somit ist die Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg bereits jetzt in der Lage die geforderten Werte für Phosphor einzuhalten. Vor diesem Hintergrund wurde die Ausrichtung der Studie auf Wunsch des Auftraggebers geändert: Eine weitergehende Phosphorelimination ist nach aktuellem Kenntnisstand nicht erforderlich und wurde nicht betrachtet.

Im Rahmen der hier vorliegenden Studie wurden zunächst die Grundlagen ermittelt: Neben den Datenauswertungen und der Erfassung der örtlichen Verhältnisse wurde die Spurenstoffbelastung der Wiembecke und des Kläranlagenablaufs mittels vorgegebenem Stoffscreening analysiert. Auf Basis der Planungs- und Bemessungsgrundlagen erfolgte im Anschluss die Prüfung und Bewertung der nachfolgend dargestellten Ausführungsvarianten.

- Variante 1a: PAK im Kontaktbecken + Flockungsfiltration
- Variante 1b: PAK in Kontaktbecken + Tuchfiltration
- Variante 2a: GAK-Filtration in offenen Filtrationsbecken
- Variante 2b: GAK-Filtration in Dyna-Filtern
- Variante 3: Ozonung und Nachbehandlung im Schönungsteich

Unter Berücksichtigung der durchgeführten Variantenuntersuchungen lassen sich zwei Vorzugslösungen für die Installation einer 4. Reinigungsstufe auf der Kläranlage Horn-Bad Meinberg ableiten:

- Wird ausschliesslich die Ökonomie anhand des Projektkostenbarwerts betrachtet sowie eine 70%ige Förderung des Projektes im Rahmen ResA II-Förderprogramms berücksichtigt (vgl. Anhang 12), stellt sich die Variante 3 „Ozonung mit Schönungsteich“ als wirtschaftlichste Variante dar (Rang 1). Inklusiv der angesetzten Baunebenkosten von rd. 25 % belaufen sich die Herstellkosten der Variante 3 auf rd. 4.160.000 € brutto. Erfolgt eine 70%igen Förderung, belaufen sich die Aufwendungen der Stadtwerke Horn-Bad Meinberg auf rd. 1.2480.000 € brutto. Ein vergleichbarer Projektkostenbarwert wurde für die Variante 2b „GAK-Filtration in Dyna-Filter“ ermittelt. Die Herstellkosten dieser Variante belaufen sich auf rd. 3.380.000 € brutto. Bei entsprechender Förderung sind hiervon 1.014.000 € durch die Stadtwerke Horn-Bad Meinberg zu finanzieren.
- Bei Berücksichtigung weiterer Bewertungskriterien wie Sensitivitäten, Betriebs- und Wartungsaufwand, Arbeitssicherheit sowie ökologischer Aspekte ergibt sich die in Anhang 17 dargestellte Rangfolge der betrachteten Variante. Hierbei liegt die Variante 2b „GAK-Filtration in Dyna-Filter“ mit rd. 93 % auf Rang 1, gefolgt vor der Variante 3 „Ozonung mit Schönungsteich“ (rd. 83 %).

Obwohl derzeit keine rechtliche Verpflichtung besteht, eine Spurenstoffelimination umzusetzen, sollte der Ausbau der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg aus folgenden Gründen in Betracht gezogen werden:

- Durch Installation einer Spurenstoffelimination kann die bestehende Spurenstoffbelastung des Ablaufs der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg und somit die Belastung der Wiembecke deutlich reduziert werden.
- Gleichzeitig könnte bei Beantragung der Maßnahme bis Ende 2019 eine bis zu 70%ige Investitionskostenförderung im Zuge des Förderprogramms „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II (ResA II)“ erfolgen.

Um eine Spurenstoffelimination möglichst wirtschaftlich, effizient und mit geringem Ressourcenverbrauch betreiben zu können, sollte das mechanisch-biologisch vorgereinigte Abwasser möglichst frei von Feststoffen sein. Es ist davon auszugehen, dass die Leistungsfähigkeit der Nachklärbecken der Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg bei Durchführung einer CFD-Strömungssimulation und Nachrüstung von Strömungshauben erheblich verbessert werden kann und somit die Betriebskosten der Spurenstoffelimination reduziert werden. Die Herstellkosten für die Durchführung der Strömungsoptimierung durch den Einbau von Strömungshauben werden zu 438.000 € brutto abgeschätzt. Gemäß Abstimmung mit der BezReg Detmold ist die Strömungsoptimierung der Nachklärbecken im Rahmen des Förderprogrammes „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II (ResA II)“ nicht förderfähig.

Das vorhandene Belüftungssystem der Zentralkläranlage Horn Bad Meinberg, im Wesentlichen bestehenden aus in den Becken installierten Belüftern sowie der zugehöriger Druckluftherzeugung entspricht aus energetischer Sicht nicht mehr dem Stand der Technik. Bei Erneuerung des Belüftungssystems ist davon auszugehen, dass der Energiebedarf der Belüftung um 25-35% reduziert werden kann. Die Kosten für die vollständige Erneuerung der Belüftungssysteme im alten und den beiden neuen Belebungsbecken wird zu rd. 820.000 € brutto abgeschätzt. Im Rahmen des Förderprogramms „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II (ResA II)“ wird bei Umsetzung einer Spurenstoffelimination auch die Erneuerung von Belüftungssystemen in der Belebungsanlage mit bis zu 30 % der Herstellkosten gefördert. Bei einer Förderquote von 30 % verbleibt somit ein Eigenanteil für die Erneuerung des Belüftungssystems von rd. 574.000 € brutto einschl. Baubenebenkosten.

Auf Grund der vorgestellten Untersuchungen wird empfohlen, die Variante 2b „GAK-Filtration im Dyna-Filter“ als Spurenstoffelimination auf der Zentralkläranlage Horn-Bad-Meinberg umzusetzen sowie die Nachklärung und das Belüftungssystem der Belebung zu optimieren.

## 9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abflussmengen Zentralkläranlage Horn-Bad Meinberg 2017 .....	5
Abbildung 2: CSB-/NO <sub>2</sub> -N-Konzentrationen im Ablauf der Zentralkläranlage 2017 .....	7
Abbildung 3: P <sub>ges</sub> -/Ng <sub>es</sub> -Konzentration im Ablauf der Zentralkläranlage 2017 .....	7
Abbildung 4: Vergleich Spurenstoffe Ablauf ZKA Horn-Bad Meinberg mit anderen von OWL-Umweltanalytik analysierten Kläranlagenabläufen.....	11
Abbildung 5: Gewässerbelastung Wiembecke vor und nach Einleitung des Kläranlagenablaufs und Zielwerte gemäß Oekotoxzentrum .....	14
Abbildung 6: Mögliche Umsetzung einer PAK-Dosierung .....	16
Abbildung 7: Mögliche Umsetzung eines GAK-Filters.....	21
Abbildung 8: Mögliche Umsetzung einer Ozonung .....	26
Abbildung 9: Lageplanausschnitt Variante 1a .....	41
Abbildung 10: Tuchfilter [Quelle Mecana Umwelttechnik] .....	43
Abbildung 11: Lageplanausschnitt Variante 2a .....	44
Abbildung 12: Lageplanausschnitt Variante 2b .....	46
Abbildung 13: Dyna-Filter [Quelle Nordic Water] .....	46
Abbildung 14: Lageplanausschnitt Variante 3 .....	48
Abbildung 15: Sensitivitätsanalyse Betriebsmittelverbrauch .....	57
Abbildung 16: Sensitivitätsanalyse Betriebsmittelpreis .....	58
Abbildung 17: Sensitivitätsanalyse Strompreis .....	59
Abbildung 18: Beispiel Einbau Strömungshaube in die alten Nachklärbecken .....	65
Abbildung 19: Beispiel Einbau Strömungshaube in die neuen Nachklärbecken .....	66
Abbildung 20: Belebungsbecken alt.....	68
Abbildung 21: Belebungsbecken neu.....	69

## 10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Herleitung EW-Belastung ZKA Horn-Bad Meinberg 2017 .....	4
Tabelle 2: Ablaufwassermengen 2017.....	4
Tabelle 3: Jahresabwasser- und Jahresschmutzwassermengen 2011-2017 .....	5
Tabelle 4: Jahresabwasser- und Jahresschmutzwassermengen 2011-2015 .....	8
Tabelle 5: Überwachungswerte und Erklärte Werte ZKA Horn-Bad Meinberg .....	8
Tabelle 6: Abflussmengen Wiembecke + Abwasseranteil gemäß BezReg Detmold .....	12
Tabelle 7: Übersicht der Vor- und Nachteile einer PAK-Anlage .....	19
Tabelle 8: Übersicht der Vor- und Nachteile von GAK-Filtern .....	23
Tabelle 9: Übersicht der Vor- und Nachteile einer Ozonanlage.....	28
Tabelle 10: Eliminierbarkeit von Spurenstoffen in Abhängigkeit des Verfahrens [3].....	34
Tabelle 11: Jahresabwasser- und Jahresschmutzwassermengen 2013-2017 .....	36
Tabelle 12: Investitionskostenschätzung .....	50
Tabelle 13: Umfang Investitionskostenschätzung .....	51
Tabelle 14: Betriebskostenschätzung .....	52
Tabelle 15: Annahmen Betriebskosten .....	52
Tabelle 16: Projektkostenbarwert .....	55
Tabelle 17: Auszug Bewertungsmatrix .....	63
Tabelle 18: Kostenschätzung Strömungsoptimierung Nachklärbecken.....	67
Tabelle 19: Kostenschätzung Erneuerung Belüftungssystem .....	70

## 11. Literaturverzeichnis

- [1] Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (2015): Mikroschadstoffentfernung machbar? Wesentliche Inhalte einer Machbarkeitsstudie für Anlagen zur Mikroschadstoffelimination mit aktualisierter Stoffliste vom 01.09.2016
- [2] Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (2016): Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination
- [3] ATV-DVWK-A 198 (2003): Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen
- [4] Abegglen, C.; Siegrist, H. (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser - Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen
- [5] Internetauftritt und Projektsteckbriefe des Kompetenzzentrums Spurenstoffe Baden-Württemberg, eingesehen Februar 2015 [www.koms-bw.de](http://www.koms-bw.de)
- [6] Projektsteckbriefe aus der Rubrik „Anlagen/Projekte“ des Internetauftritts des Verbandes Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), eingesehen Februar 2015 [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch)
- [7] Internetauftritt Institute für Umwelt- und Verfahrenstechnik der Hochschule für Technik Rapperswil, eingesehen März 2015 <http://www.umtec.ch/>
- [8] Fachartikel Korrespondenz Abwasser 05/2014 [www.hydro-ingenieure.de/images/Referenzen/201405-KA\\_Aktivkohle-Obere-Lutter.pdf](http://www.hydro-ingenieure.de/images/Referenzen/201405-KA_Aktivkohle-Obere-Lutter.pdf)
- [9] Internetauftritt Abwasserverband Obere Lutter, eingesehen September 2018 <http://www.mikroverunreinigungen.de/obere-lutter/>
- [10] Internetauftritts des Kompetenzzentrums Mikroschadstoff.NRW Projektsteckbriefe „Aktivkohleadsorption auf der Kläranlage Düren-Merken“, heruntergeladen August 2018 [www.masterplan-wasser.nrw.de](http://www.masterplan-wasser.nrw.de)
- [11] Internetauftritt bosmanwater, eingesehen Dezember 2018 <https://www.bosmanwater.de/>
- [12] Modernisierungsreport 2018/2019 Sonderausgabe der Fachzeitschrift WWT „4. Reinigungsstufe“

- [13] IWW Abschlussbericht „Mikroschadstoffelimination mittels granulierter Aktivkohle im Ablauf der Kläranlage Gütersloh-Putzhagen“ Mai 2016
- [14] Internetauftritt Firma Nordic Water, eingesehen Oktober 2018  
<https://spurenstoffelimination.de/index.php/produkte/ds-carbon>
- [15] Internetauftritt Kompetenzzentrum Spurenstoffe-BW „Spurenstoffentnahme auf der Kläranlage Westerheim“ <https://www.koms-bw.de/cms/content/media/Steckbrief%20KA%20Westerheim.pdf>
- [16] Internetauftritt Kompetenzzentrum Spurenstoffe-BW „Spurenstoffelimination auf Kläranlagen“ Mai 2017 eingesehen November 2018
- [17] Projektsteckbriefe aus der „Tatenbank“ des Internetauftritts des Kompetenzzentrums Mikroschadstoff.NRW, eingesehen Februar 2015:  
[www.masterplan-wasser.nrw.de](http://www.masterplan-wasser.nrw.de)
- [18] Internetauftritt WAZ, eingesehen Februar 2015:  
<http://www.derwesten.de/staedte/gelsenkirchen/klaeranlage-im-gelsenkirchener-marienhospital-fertiggestellt-id4915508.html>