



# Machbarkeitsstudie zur Mikroschadstoffelimination auf der Kläranlage Bonn Bad Godesberg

Kurzbericht

März 2017

**SWECO** 

**DAHLEM**

Sweco GmbH  
DAHLEM Beratende Ingenieure GmbH  
& Co. Wasserwirtschaft KG

Graeffstraße 5  
50823 Köln

T +49 221 57402-0  
F +49 221 57402-11  
E [koeln@sweco-gmbh.de](mailto:koeln@sweco-gmbh.de)  
W [www.sweco-gmbh.de](http://www.sweco-gmbh.de)

**Impressum**

Auftraggeber: Stadt Bonn

Auftragnehmer: **Sweco GmbH**  
**DAHLEM Beratende Ingenieure GmbH & Co. Wasserwirtschaft KG**  
c/o Sweco GmbH  
Postfach 30 01 06  
50771 Köln  
Graeffstraße 5  
50823 Köln

Laboranalytik: Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA)  
Bliersheimer Straße 58 – 60  
47229 Duisburg  
Dr. rer. nat. Jochen Türk  
Andrea Börgers, M. Sc.

Bearbeitung: Christian Maus, M. Sc.  
Juliane Schulz, M. Sc.

Bearbeitungszeitraum: März 2017

	Seite
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>1 Hintergründe und Veranlassung der Mikroschadstoffelimination</b>	<b>1</b>
<b>2 Kurzbeschreibung des Einzugsgebietes und der Verfahrenstechnik der Kläranlage Bonn Bad Godesberg</b>	<b>2</b>
<b>3 Abwasseranalyse und Auslegungswerte für die Stufe zur Mikroschadstoffelimination</b>	<b>3</b>
3.1 Standardabwasserparameter und Mikroschadstoffe	3
3.2 Bromidkonzentrationen und Bromatbildungspotenzial	6
3.3 Auslegungswassermenge	6
3.4 Eliminationsleistung	7
<b>4 Variantenuntersuchung</b>	<b>8</b>
4.1 Verfügbare Flächen/Ressourcen und Variantenauswahl	8
4.2 Variante 1: Bau einer Ozonung und einer biologischen Nachbehandlung in den ehemaligen Filterkammern ohne Berücksichtigung einer neuen Filtration	9
4.3 Variante 2: PAK-Dosierung in den Zufluss zu einer Membrananlage (Nutzung der ehemaligen Filterkammern)	10
4.4 Variante 3: PAK-Dosierung in den Filterüberstand und anschließende Raumfiltration (Ertüchtigung der Filteranlage)	11
4.5 Auswirkungen der Varianten auf die Klärschlammbehandlung	12
4.6 Sensitivitätsanalyse	13
<b>5 CO<sub>2</sub>-Bilanzierung der Verfahrensvarianten</b>	<b>13</b>
<b>6 Vorzugsvariante</b>	<b>14</b>
6.1 Vorgehensweise zur Ermittlung der Vorzugsvariante	14
6.2 Kosten der Vorzugsvariante	16
<b>7 Empfehlung</b>	<b>17</b>
7.1 Erfordernis zur Mikroschadstoffelimination	17
7.2 Verfahrensempfehlung	18
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>20</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1:	Anteil der behandelbaren Jahresabwassermenge mit der Behandlungswassermenge der Stufe zur Mikroschadstoffelimination	7
Abbildung 4.1:	Verfügbare Flächen und Ressourcen auf der Kläranlage Bad Godesberg	9
Abbildung 4.2:	Lageplan der Variante 1	10
Abbildung 4.3:	Lageplan der Variante 2	11
Abbildung 4.4:	Schematische Darstellung der PAK-Dosierung in den Filterüberstand mit vorgeschaltetem separatem Kontaktbecken	12

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Bewertungsmaßstab der Mikroschadstoffkonzentrationen im Oberflächengewässer im Ablauf der Kläranlage Bonn Bad Godesberg (ZW: Zielwert)	3
Tabelle 3-2:	Konzentrationen der analysierten Mikroschadstoffe im Ablauf der Kläranlage Bonn Bad Godesberg	4
Tabelle 3-3:	Ergebnisse der ausgewählten Mikroschadstoffe im fünftägigen Monitoring vom 08.03. bis 13.03.2016	5
Tabelle 3.4:	Vergleich ausgewählter Mikroschadstoffe im Kläranlagenablauf für Trockenwetter im Rahmen der Machbarkeitsstudien für die Kläranlagen Münster Geist, Wesseling, Hürth, Neuss Ost und Duisburg Vierlinden	5
Tabelle 3-5:	Ermittelte Konzentrationen von DOC, Bromid und Bromat des Kläranlagenablaufs der Kläranlage Bonn Bad Godesberg mit verschiedenen Zugaben von Ozon und der ermittelten spezifischen Ozonzehrung	6
Tabelle 3-6:	Bewertung der Reinigungsleistung von Indikatorsubstanzen nach KOM-M.NRW, 2016	8
Tabelle 5-1:	Zusammenfassung der Ergebnisse der CO <sub>2</sub> -Bilanzierung	14
Tabelle 6-1:	Bewertungsmatrix für die Varianten 1 bis 3	16
Tabelle 6-2:	Kosten für Variante 1 „Bau einer Ozonung und einer biologischen Nachbehandlung in den ehemaligen Filterkammern ohne Berücksichtigung einer neuen Filtration“	17
Tabelle 7-1:	Zusammenfassung der Zielwert-Überschreitungen aus dem Monitoring	18
Tabelle 7-2:	Zusammenfassende Darstellung der betrachteten Varianten	19

## 1 Hintergründe und Veranlassung der Mikroschadstoffelimination

Der Begriff „Mikroschadstoffe“ ist in den vergangenen Jahren immer mehr in den Fokus der Wissenschaft sowie der Öffentlichkeit gerückt. Er beschreibt die Reste der zahlreichen komplexen Chemikalien, die nach dem Gebrauch entweder unverändert oder nach Umbau in Organismen als Konjugate bzw. Metaboliten in die Gewässer gelangen. Beispiele für solche Mikroschadstoffe sind pharmazeutische Wirkstoffe, Flammschutzmittel, Biozide oder viele Industriechemikalien. Charakteristisch für die Gruppe der Mikroschadstoffe ist, dass diese in der Regel in sehr niedrigen Konzentrationen vorliegen. In den letzten Jahren konnte dennoch die Ökotoxizität einer Vielzahl von Mikroschadstoffen in der Umwelt nachgewiesen werden bzw. von vielen Stoffen ist zukünftig aufgrund der steigenden Verbrauchsmengen ein hohes Gefährdungspotenzial zu erwarten (Umweltbundesamt, 2011). Eine Intensivierung der Mikroschadstoffproblematik ist zudem aufgrund des demographischen Wandels und industrieller Weiterentwicklungen zu erwarten. Beispielsweise werden Humanpharmaka insbesondere durch die steigende Lebenserwartung und des damit verknüpften steigenden Arzneimittelkonsums künftig in noch größerer Anzahl und Menge über die kommunale Abwasserentsorgung in die Umwelt eingetragen.

Aufgrund der Persistenz, des Bioakkumulationspotenzials und der Toxizität der Mikroschadstoffe besteht zur langfristigen Sicherung einer hohen Wasserqualität grundsätzlich Handlungsbedarf zur Reduktion der Einträge von Mikroschadstoffen in Gewässer.

Dabei sollen die umweltschädlichen Stoffe in der Regel möglichst an der Quelle minimiert und ggf. mit unschädlichen Alternativen ersetzt werden. Das ist jedoch nicht immer und für jeden Stoff möglich. Eine Vielzahl der Mikroschadstoffe wird mit dem Abwasser in kommunale Kläranlagen transportiert. Die persistenten Mikroschadstoffe können während der biologischen Behandlung im Abwasserreinigungsprozess nur in begrenztem Maße eliminiert werden und sind im Ablauf der Anlagen nach Stand der Technik noch nachweisbar. Die kommunalen Anlagen gehören daher zu den wichtigen Eintragungspfaden der Mikroschadstoffe in die Oberflächengewässer.

Um diesen Eintrag von Mikroschadstoffen in die Kanalisation bzw. in die Gewässer zu minimieren, sind gefächerte Maßnahmen unerlässlich. Im Infrastruktursystem der Wasserver- und Abwasserentsorgung kann die Entfernung der Mikroschadstoffe an unterschiedlichen Stellen und mittels verschiedenster Verfahren realisiert werden. Hierbei kann zwischen der dezentralen Mikroschadstoffelimination am Anfallort (z. B. Industriebetriebe, Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen) und zentralen Maßnahmen in der kommunalen Kläranlage oder bei der zentralen Trinkwasseraufbereitung unterschieden werden. Eine weitgehende Verbesserung der Ablaufqualität bzw. Elimination der Mikroschadstoffe auf Kläranlagen ist durch weitergehende (additive) Maßnahmen realisierbar. Hierzu haben sich bisher die Techniken der Ozonung und der Aktivkohleadsorption als umsetzbare Techniken herauskristallisiert.

Das Land NRW setzt bei der Mikroschadstoffelimination auf einen ganzheitlichen Ansatz auf unterschiedlichen Ebenen. Zum einen soll die Entstehung und Verbreitung von Mikroschadstoffen möglichst an der Quelle verhindert werden, indem beispielsweise gefährlicher Stoffe durch ungefährlichere Alternativen substituiert werden. Einen anderen Ansatz, aber ebenfalls einen Ansatz an der Quelle, verfolgte das Projekt „Den Spurenstoffen auf der Spur“ des Landes Nordrhein-Westfalen, der Stadt Dülmen und des Lippeverbands (DSADS, 2015), in dem die Bevölkerung hinsichtlich eines bewussteren Umgangs mit Arzneimitteln aufgeklärt und sensibilisiert wurde. Der ganzheitliche Ansatz umfasst jedoch auch zentrale Maßnahmen in Form des Ausbaus der Abwasserreinigungsanlagen sowie die Modernisierung der Trinkwasseraufbereitungstechnik (EUWID, 2010). Das Umweltministerium des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW) fördert zu diesem Zweck durch das Investitionsprogramm „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW“ u. a. die Errichtung großtechnischer Anlagen zur Mikroschadstoffelimination.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, auf Basis eines Screenings des Kläranlagenablaufes auf Mikroschadstoffe, Möglichkeiten zur Einbindung einer Anlage zur Mikroschadstoffelimination auf der Kläranlage Bonn Bad Godesberg zu untersuchen. Entwickelt werden sollen hierbei effiziente Anlagenkonfigurationen unter Einbeziehung der vorhandenen Anlagentechnik im Hinblick auf die Mikroschadstoffelimination und die Wirtschaftlichkeit für die großtechnische Umsetzung.

## **2 Kurzbeschreibung des Einzugsgebietes und der Verfahrenstechnik der Kläranlage Bonn Bad Godesberg**

Das Einzugsgebiet der Kläranlage Bonn Bad Godesberg umfasst die Ortsteile Bad Godesberg, Friesdorf, Plittersdorf, Rügsdorf, Muffendorf, Heiderhof und Lannesdorf. Als Indirekteinleiter der Kläranlage können u.a. verschiedene Arztpraxen identifiziert werden.

Die Kläranlage leitet ihr gereinigtes Abwasser in den Rhein ein. In Klärwerksnähe gilt der Rhein als erheblich verändertes Gewässer und erhält eine „mäßige“ Bewertung für den ökologischen Zustand. Der chemische Zustand wird als „nicht gut“ eingestuft wohingegen der chemische Zustand ohne ubiquitäre Stoffe als „gut“ beschrieben wird (ELWAS-WEB, 2016).

Die Konzentrationen der Stoffe Clarithromycin und Diclofenac unterhalb der Kläranlage Bonn Bad Godesberg im Rhein liegen derzeit oberhalb der derzeitigen Zielwerte und deuten auf eine relevante stoffliche Belastung des Rheins hin.

Die Kläranlage Bad Godesberg ist zwischen 1974 und 1976 als mechanische Kläranlage errichtet worden. Der Ausbau um eine weitergehende Stickstoff- und Phosphorelimination stellt den heutigen Ausbauzustand dar. Die Anlage war in diesem Zustand für 110.000 Einwohnerwerte (EW) ausgebaut und erreichte im Jahre 2014 eine Auslastung von 108.115 EW, die sich aus 25.659 Einwohnergleichwerten (EGW) und 82.456 Einwohnern (E) zusammensetzen, mit einer Jahresabwassermenge von 7.735.000 m<sup>3</sup>/a (ELWAS-WEB, 2016). Aufgrund der demografischen Entwicklung der Stadt Bonn ist jedoch mit einem Bevölkerungswachstum zu rechnen. Daher sind gemäß den Darstellungen aus der Änderungsgenehmigungsplanung von Kolisch et al. (2012) zukünftig verschiedene Optimierungsmaßnahmen vorgesehen, die zu einer Erhöhung der Anschlussgröße von 110.000 auf 121.000 EW führen. Vorgesehene Maßnahmen sind unter anderem die Umstellung auf eine intermittierende Denitrifikation sowie die Regelung der internen Rezirkulation in Abhängigkeit der Denitrifikationskapazität.

Der Abwasserzulauf zur Kläranlage erfolgt über ein Zulaufpumpwerk, das das Wasser zu einer Rechenanlage mit vier Filterstufenrechen fördert. Vom darauf folgenden Sandfang aus wird das Abwasser dem Vorklärbecken bzw. im Regenwetterfall zur Entlastung den Regenüberlaufbecken zugeführt. Insgesamt gibt es drei Regenüberlaufbecken, von denen eins oberirdisch und parallel zum Vorklärbecken angeordnet ist und zwei als unterirdische Längsbecken umgesetzt sind. Im Anschluss an die mechanische Reinigung, zu der auch das Vorklärbecken und die Regenüberlaufbecken gehören, erfolgt die biologische Abwasserbehandlung in den Anaerob-, Denitrifikations- und Nitrifikationsbecken sowie den vier Nachklärbecken. Von dort gelangt das Wasser zur Filtration. Zurzeit befindet sich die Filteranlage der Kläranlage Bad Godesberg aufgrund defekter Filterböden außer Betrieb. Der während des Reinigungsprozesses anfallende Schlamm wird über eine 7,1 km lange Druckleitung zur Kläranlage Salierweg zur weiteren Schlammbehandlung geleitet.

### 3 Abwasseranalyse und Auslegungswerte für die Stufe zur Mikroschadstoffelimination

#### 3.1 Standardabwasserparameter und Mikroschadstoffe

Um eine fundierte Verfahrensauswahl hinsichtlich der Mikroschadstoffelimination zu treffen, müssen die standortspezifischen Abwassereigenschaften auf der Anlage berücksichtigt werden. Die Abwasserinhaltsstoffe werden dabei nachfolgend in zwei Gruppen betrachtet.

In der ersten Gruppe werden die Konzentrationen der Standardabwasserparameter berücksichtigt. Hier liegen die Jahresmittelwerte für die Parameter CSB, Ammoniumstickstoff, anorganischer Stickstoff, Gesamtstickstoff und Phosphor für das Jahr 2014 vor. Darüber hinaus wurden im Rahmen des Mikroschadstoffscreenings die Konzentrationen für AFS und DOC ermittelt. Basierend darauf wird der DOC für die spätere Anlagenauslegung zu 6 mg DOC/L abgeschätzt. Aus den gemessenen und den bereits vorliegenden Konzentrationen dieser Parameter, ergeben sich keine Einschränkungen für die spätere Verfahrenswahl für die Stufe zur Mikroschadstoffelimination. Im Fall einer großtechnischen Realisierung einer vierten Reinigungsstufe sollten die angenommenen Werte in jedem Fall durch zusätzliche separate Messungen verifiziert werden.

Die zweite Gruppe beinhaltet eine Auswahl an sogenannten Mikroschadstoffen. Die zu untersuchenden Substanzen wurden vorab mit der Stadt Bonn und der Bezirksregierung abgestimmt. Die Probenahme erfolgte als 24h-Mischprobe im Ablauf der Kläranlage jeweils an zwei Trockenwettertagen sowie an zwei Regenwettertagen. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgte nach Tabelle 3-1.

**Tabelle 3-1: Bewertungsmaßstab der Mikroschadstoffkonzentrationen im Oberflächengewässer im Ablauf der Kläranlage Bonn Bad Godesberg (ZW: Zielwert)**

sehr gut	gut	mäßig	unbefriedigend	schlecht
< ½ ZW	½ ZW - ZW	ZW – 2 ZW	2 ZW – 4 ZW	> 4 ZW

Durch ein jeweils zweitägiges Screening auf Mikroschadstoffe vom 23./24.11.2015 bzw. 06./07.12.2015 bei Trockenwetter (TW) und vom 24./25.11.2015 bzw. 30.11./01.12.2015 bei Regenwetter (RW) im Ablauf der Kläranlage Bonn Bad Godesberg wurden die Konzentrationen verschiedener Mikroschadstoffe ermittelt. Die untersuchten Mikroschadstoffe lassen sich den Gruppen Arzneimittelwirkstoffe, Korrosionsschutzmittel, Pestizide, Süßstoffe, Röntgenkontrastmittel, Moschusduftstoffe und perfluorierte Substanzen zuordnen. Darüber hinaus wurden das Kunstharz Melamin sowie die östrogene Aktivität untersucht. Die Ergebnisse des Screenings sind Tabelle 3-2 zu entnehmen. In der Spalte Zielwert ist der Vorschlag der D4-Liste als Jahresmittel, die Orientierungswerte und präventiven Vorsorgewerte aufgeführt, sofern dieser vorhanden ist.

Für die gesetzlich noch nicht geregelten Substanzen aus der Gruppe der Arzneimittelwirkstoffe sind im Kläranlagenablauf Überschreitungen der Zielwert-Vorschläge für Oberflächengewässer festgestellt worden. Dabei liegen die Konzentrationen für das Analgetikum Diclofenac, das Antibiotikum Erythromycin und den Betablocker Bisoprolol in den meisten Proben um mehr als das Vierfache über dem Zielwert-Vorschlag. Der Betablocker Sotalol, die Antibiotika Trimethoprim, Clarithromycin und Sulfamethoxazol liegen bei Konzentrationen im für Oberflächengewässer geltenden mäßig bis unbefriedigenden (Zielwert – 4 Zielwert) Bereich. Das Schmerzmittel Ibuprofen überschritt in einer Regenwetterprobe den UQN-Vorschlag um mehr als das Vierfache. Ibuprofen wird bei einer ausreichenden Verweilzeit des Abwas-

sers in der Regel biologisch abgebaut, kann jedoch bei Regenwetterzufluss teilweise im Kläranlagenablauf gemessen werden.

**Tabelle 3-2: Konzentrationen der analysierten Mikroschadstoffe im Ablauf der Kläranlage Bonn Bad Godesberg**

Substanz	Einheit	Zielwert	Ablauf 23./24.11.15 TW	Ablauf 06./07.12.15 TW	Ablauf 24./25.11.15 RW	Ablauf 30.11/01.12.15 RW
Climbazol	ng/L	100	130	75	110	96
Terbutryn*	ng/L	65	120	82	94	86
Bisoprolol	ng/L	100	440	350	510	260
Ciprofloxacin*	ng/L	36	76	120	100	92
Clarithromycin*	ng/L	100	210	270	140	76
Diclofenac*	ng/L	50	1.900	1.500	2.500	1.800
Erythromycin**	ng/L	20	440	150	360	140
Ibuprofen*	ng/L	10	< 10	< 10	95	< 10
Sotalol	ng/L	100	280	350	310	220
Sulfamethoxazol	ng/L	600	660	740	720	400
Trimethoprim	ng/L	100	320	230	320	190
Amidotrizoesäure	ng/L	100	3.800	8.400	13.000	3.300
Iohexol	ng/L	100	750	1.200	4.000	770
Iomeprol	ng/L	100	480	1.700	4.500	930
Iopamidol	ng/L	100	180	1.000	1.500	310
Iopromide	ng/L	100	180	1.300	2.700	460
Ioversol	ng/L	100	< 50	120	710	190
Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)*	ng/L	0,65	12	14	11	< 10

\* durch die DAkkS (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 akkreditiert

\*\* gemessen als Dehydrato-Erythromycin

Für die analysierten Pestizide konnten nur leichte Überschreitungen der Zielwert-Vorschläge für Climbazol und Terbutryn nachgewiesen werden. Die Proben des Trocken- und Regenwetterabflusses weisen keine großen Unterschiede auf. Die deutlichsten Überschreitungen der Zielwert-Vorschläge laut D4-Liste wurden für die Röntgenkontrastmittel ermittelt. Allerdings handelt es sich bei dem Orientierungswert von 100 ng/L um einen präventiven Vorsorgewert. Dieser Vorsorgewert beruht auf einer Konvention und ist fachlich nicht abgeleitet. Des Weiteren ist in 3 von 4 Proben eine Überschreitung des Zielwerts für die perfluorierte Substanz PFOS erkennbar.

Zur Datenverdichtung wurde ein fünftägiges Monitoring mit reduziertem Parameterumfang anhand von 24-Stunden-Mischproben bei Trockenwetter durchgeführt. Die Ergebnisse des Monitorings sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Insgesamt konnten die Ergebnisse des Screenings bestätigt werden. Überschreitungen der Zielwert-Vorschläge sind vor allem bei den Antibiotika Clarithromycin und Erythromycin und dem Analgetikum Diclofenac zu finden.



**Tabelle 3-3: Ergebnisse der ausgewählten Mikroschadstoffe im fünftägigen Monitoring vom 08.03. bis 13.03.2016**

Substanz		Zielwert	Ablauf KA	Ablauf KA	Ablauf KA	Ablauf KA	Ablauf KA
			08.-09.03.2016	09.-10.03.2016	10.-11.03.2016	11.-12.03.2016	12.-13.03.2016
1H-Benzotriazol*	ng/L	10.000	6.300	7.200	7.200	7.100	7.200
Carbamazepin*	ng/L	500	800	890	910	950	990
Clarithromycin*	ng/L	100	510	600	600	610	860
Diclofenac*	ng/L	50	2.600	3.000	3.100	3.200	3.600
Erythromycin**	ng/L	20	270	260	340	400	410
Metoprolol*	ng/L	7.300	1.500	1.600	1.700	1.800	2.000
Sulfamethoxazol	ng/L	600	510	520	590	660	640
Terbutryn*	ng/L	65	53	48	39	36	44

\* durch die DAkKS (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 akkreditiert

\*\* gemessen als Dehydrato-Erythromycin

Tabelle 3.4 stellt die Konzentrationen verschiedener Mikroschadstoffe für die Kläranlagen Münster Geist, Wesseling, Hürth, Neuss Ost und Duisburg Vierlinden dar. Die Daten entstammen den Machbarkeitsstudien zur Mikroschadstoffelimination auf den jeweiligen Kläranlagen, die auf den Internetseiten des LANUV veröffentlicht sind. Die Tabelle zeigt, dass die im Rahmen des Monitorings gemessenen Mikroschadstoffkonzentrationen im Ablauf der Kläranlage Bonn Bad Godesberg keine bedeutenden Unterschiede zu den Abläufen der benannten Kläranlagen aufzeigen. Im Vergleich zeigen beispielsweise die Konzentrationen für die zwei Antibiotika Clarithromycin und Erythromycin ein mittleres Konzentrationsniveau auf. Die Konzentrationen für Diclofenac liegen beim Vergleich eher im oberen Bereich.

**Tabelle 3.4: Vergleich ausgewählter Mikroschadstoffe im Kläranlagenablauf für Trockenwetter im Rahmen der Machbarkeitsstudien für die Kläranlagen Münster Geist, Wesseling, Hürth, Neuss Ost und Duisburg Vierlinden**

Substanz	Einheit	KA Münster Geist		KA Wesseling		KA Hürth		KA Neuss Ost	KA Dui-Vie
								Mittelwert	Mittelwert
1H-Benzotriazol*	ng/L	8300	7400	5500	6400	5500	12000	4100	1400
Terbutryn	ng/L	170	190	15	22	76	95		
Carbamazepin	ng/L	490	440	1700	1900	710	810	1400	1800
Clarithromycin	ng/L	980	1200	620	940	230	180		
Diclofenac	ng/L	3300	3700	4900	4900	1800	2200	1100	1271
Erythromycin	ng/L			800	950	130	160		
Metoprolol	ng/L	2400	2100	3000	3100	1200	1400		
Sulfamethoxazol	ng/L	870	700	540	760	100	130	700	649

Als Zwischenfazit aus dem Screening und Monitoring ist festzuhalten, dass sowohl die Konzentration der Indikatorsubstanzen Diclofenac und Clarithromycin im Ablauf der Kläranlage Bonn Bad Godesberg als auch die von Götz et al. (2012) modellierten Konzentrationen dieser Stoffe unterhalb der Einleitstelle im Rhein die Zielwerte der D4-Liste des MKULNV zur Bewertung der Oberflächengewässer nach dem Monitoringprogramm gemäß EG-WRRL überschreiten. Vor dem Hintergrund, dass auch der ökologische Zustand des Rheins unterhalb der Einleitstelle nur als „mäßig“ bewertet wird, könnten zukünftig Maß-

nahmen zur Reduzierung der Mikroschadstoffe in den Maßnahmenprogrammen zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie gefordert werden.

### 3.2 Bromidkonzentrationen und Bromatbildungspotenzial

Aus Bromid kann bei der Ozonung des Kläranlagenablaufs das Transformationsprodukt Bromat gebildet werden, welches als potentiell kanzerogen gilt. Aus diesem Grund sind vorab die Bromid und die Bromat-Konzentrationen der beiden Trockenwetter Proben des Screenings im Ablauf der Kläranlage ermittelt worden. Es wurden außerdem zur Ermittlung des Ozonzehrungsverhaltens und des Bromatbildungspotentials mit zwei Proben aus dem Ablauf der Kläranlage bei Trockenwetter Versuche mit einer Zugabe von 5 bzw. 10 mg O<sub>3</sub>/L durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Dosierung von 5 mg O<sub>3</sub>/L nach ca. 6 Minuten kein gelöstes Ozon mehr in der Abwasserprobe detektiert werden kann. Bei einer Zugabe von 10 mg O<sub>3</sub>/L kann erst nach einer Reaktionszeit von knapp 20 Minuten kein gelöstes Ozon mehr detektiert werden. Die Konzentration des gebildeten Bromates und der spezifischen Ozonzehrung sind in Tabelle 3-5 zu finden. Die hohen Konzentrationen an Bromat können durch die hohe spezifische Ozonzehrung von > 1 mg O<sub>3</sub>/mg DOC erklärt werden. Bei üblichen Ozondosen von < 0,7 mg O<sub>3</sub>/mg DOC ist mit keiner deutlichen Bromatbildung zu rechnen, die den Grenzwert für Bromat im Trinkwasser von 10 µg/L überschreitet. Eine Ozonung ist mit den gemessenen Bromidwerten von unter 100 µg/L grundsätzlich möglich.

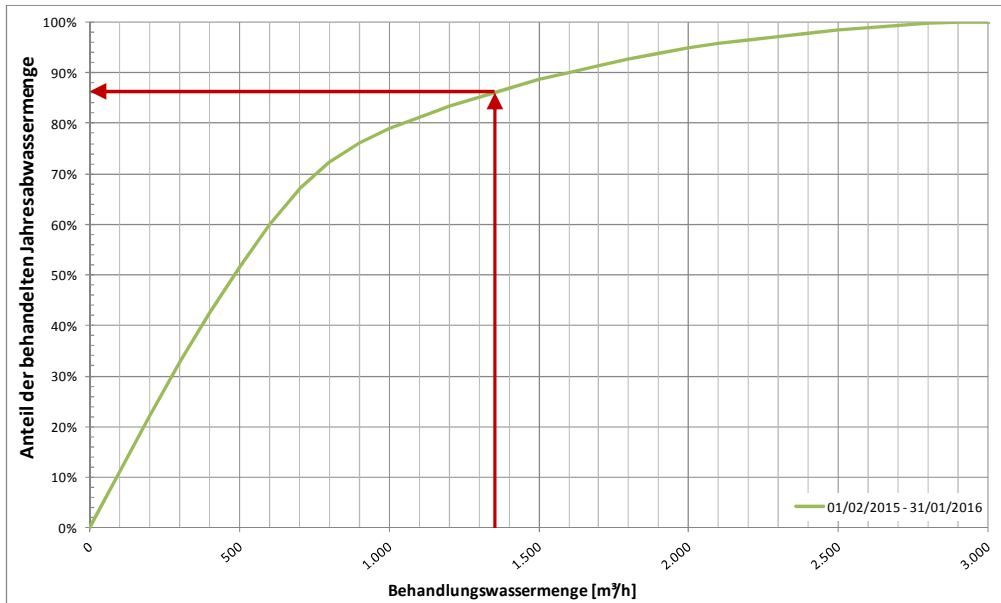
**Tabelle 3-5: Ermittelte Konzentrationen von DOC, Bromid und Bromat des Kläranlagenablaufs der Kläranlage Bonn Bad Godesberg mit verschiedenen Zugaben von Ozon und der ermittelten spezifischen Ozonzehrung**

Probenbezeichnung	DOC mg/L	Zugabe Ozon mg/L	Bromid µg/L	Bromat µg/L	Z <sub>spez.</sub> mgO <sub>3</sub> /mgDOC
Ablauf Kläranlage 23.-24.11.2015	3,8		70	< 1,0	
		5	70	4,2	1,3
		10	50	19	2,6
Ablauf Kläranlage 06.-07.12.2015	5,9		70	< 1,0	
		5	60	6	0,8
		10	40	31	1,7

### 3.3 Auslegungswassermenge

Vor dem Hintergrund dieser Erkenntnisse und Empfehlungen wurde die Auslegungswassermenge der vierten Reinigungsstufe für die Kläranlage Bonn Bad Godesberg auf Grundlage der Ablaufwassermengen der Kläranlage von Mai 2014 bis Januar 2016 ermittelt. Um die Auslegungswassermenge der vierten Reinigungsstufe festzulegen, ist von besonderem Interesse, welcher Anteil der Jahresabwassermenge der Kläranlage in der vierten Stufe behandelt werden kann. Angestrebt wird dabei eine Behandlung von ca. 85 % der Jahresabwassermenge der Kläranlage. Zu diesem Zweck ist in Abbildung 3.1 der prozentuale Anteil der in der vierten Stufe behandelten Jahresabwassermenge in Abhängigkeit von der Behandlungswassermenge abgebildet. Die Grafik zeigt, dass bei einer Behandlungswassermenge in Höhe des maximalen stündlichen Trockenwetterabflusses von 1.350 m<sup>3</sup>/h ca. 86 % der Jahresabwassermenge in der vierten Reinigungsstufe behandelt werden können, womit die Behandlung des Trockenwetterabflusses ausreicht, um die angestrebten 85 % der Jahresabwassermenge zu behandeln.

Die hydraulische Kapazität wird daher bei der nachfolgenden Variantenauslegung in Abhängigkeit der verfügbaren Ressourcen (nutzbare Freifläche/Beckenvolumen) festgelegt, das heißt es wird variantenabhängig entschieden, ob eine Auslegung auf den Voll- oder den Teilstrom erfolgt.



**Abbildung 3.1: Anteil der behandelbaren Jahresabwassermenge mit der Behandlungswassermenge der Stufe zur Mikroschadstoffelimination**

Bei einer Jahresabwassermenge in Höhe von 7.734.820 m³/a können bei Wahl des Trockenwetterabflusses als Bemessungswassermenge der vierten Stufe jährlich 6.651.945 m³/a Abwasser behandelt werden. Im Falle einer konkreten Planung ist die Bemessungswassermenge der Anlage zur Mikroschadstoffelimination in Absprache mit den Genehmigungsbehörden festzulegen.

### 3.4 Eliminationsleistung

Aktuell wird für einen emissionsbasierten Ansatz als Reinigungsziel eine Elimination von 80 % bezogen auf ausgewählte Indikatorsubstanzen angesetzt (KOM-M, 2016). Das Eliminationsziel von 80 % ist im Mittel über die verschiedenen Indikatorsubstanzen als Jahresmittel zu erreichen. Berechnet wird die Gesamtelimination der Kläranlage einschließlich der Anlage zur gezielten Entfernung der Mikroschadstoffe. In Tabelle 3-6 ist die Entfernbarkeit der Indikatorsubstanzen für Verfahren auf Basis von Ozon und Aktivkohle vergleichend gegenübergestellt.

**Tabelle 3-6: Bewertung der Reinigungsleistung von Indikatorsubstanzen nach KOM-M.NRW, 2016**

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

Die zu erwartende Eliminationsrate bzw. die Dosierung von Betriebsstoffen oder die Standzeit des Adsorptionsbettes ist bei den beschriebenen Varianten jeweils in Abhängigkeit von der Abwasserzusammensetzung und den verfahrenstechnischen Randbedingungen gewählt worden. Letztlich ist es erforderlich, die Dosierstoffe und -mengen im Rahmen von Vorversuchen und in Abhängigkeit von den Mikroschadstoffen und dem gewählten Verfahren zu erproben und später in der Inbetriebnahme- und Betriebsoptimierungsphase zu verifizieren. Nach aktuellem Kenntnisstand kann grundsätzlich bei entsprechender Dosierung bzw. Wahl der Standzeiten der GAK die angenommene Reinigungsleistung von im Mittel 80 % sowohl mittels Ozon wie auch mittels Aktivkohle erreicht werden.

## 4 Variantenuntersuchung

### 4.1 Verfügbare Flächen/Ressourcen und Variantenauswahl

Die Kläranlage Bad Godesberg zeichnet sich durch eine enge Bebauung und einen hohen Flächennutzungsgrad aus. Freiflächen stehen für die Errichtung der Anlage zur Mikroschadstoffelimination nicht zur Verfügung. Genutzt werden kann dagegen die bestehende Filteranlage, die zurzeit aufgrund defekter Filterböden außer Betrieb ist (siehe dazu Abbildung 4.1).

Mögliche Verfahrensvarianten sind wie folgt:

- Bau einer Ozonung und einer biologischen Nachbehandlung in die ehemaligen Filterkammern ohne Berücksichtigung einer neuen Filtration
- PAK-Dosierung in den Zufluss zu einer Membrananlage (Nutzung der ehemaligen Filterkammern)
- PAK-Dosierung in den Filterüberstand und anschließende Raumfiltration (Ertüchtigung der Filteranlage)
- GAK-Filtration durch Austausch des Filtermaterials gegen GAK



**Abbildung 4.1: Verfügbare Flächen und Ressourcen auf der Kläranlage Bad Godesberg**

Alle Varianten zeichnen sich durch eine Nutzung der vorhandenen Filterkammern aus. Die beiden zuerst genannten Varianten zeigen dabei eine Nutzung der vorhandenen Filterkammern ohne Ertüchtigung der alten Filteranlage auf. Die anderen Varianten erfordern die Wiederherstellung der alten Filteranlage.

Die Vorbemessung hat ergeben, dass grundsätzlich alle Verfahrensvarianten umsetzbar sind. Die GAK-Filtration weist gegenüber der PAK-Dosierung der Variante 3 jedoch geringere Anpassungsmöglichkeiten an die Eliminationsleistung für Mikroschadstoffe auf, da die Dosierrate der Aktivkohle nicht geregelt werden kann. Bei kurzen Standzeiten des GAK-Filterbetts ist dadurch mit einem erhöhten Aufwand für den Ausbau und die Wiederbefüllung mit frischer Aktivkohle zu rechnen. Der Dosierung von PAK wird daher gegenüber der GAK-Variante der Vorzug gegeben.

Für die Kläranlage Bonn Bad Godesberg sollen demzufolge die folgenden Varianten betrachtet werden:

- Variante 1:** Bau einer Ozonung und einer biologischen Nachbehandlung in den ehemaligen Filterkammern ohne Berücksichtigung einer neuen Filtration
- Variante 2:** PAK-Dosierung in den Zufluss zu einer Membrananlage (Nutzung der ehemaligen Filterkammern)
- Variante 3:** PAK-Dosierung in den Filterüberstand und anschließende Raumfiltration (Ertüchtigung der Filteranlage)

#### **4.2 Variante 1: Bau einer Ozonung und einer biologischen Nachbehandlung in den ehemaligen Filterkammern ohne Berücksichtigung einer neuen Filtration**

Aufgrund der beengten Platzverhältnisse auf der Kläranlage Bad Godesberg wird die Anordnung einer Ozonanlage in den ehemaligen Filterzellen der Flockungsfiltration untersucht (vgl. Abbildung 4.2). Hierzu sind die Filterzellen zu entkernen und mit Vorrichtungen zur Ozondosierung etc. auszustatten.

Die zusätzlich zum Kontaktreaktor erforderlichen Elemente einer Ozonanlage, wie Ozongeneratoren, Mess- und Steuerungstechnik werden im ehemaligen Filtrationsgebäude aufgestellt. Der Flüssigsauerstofftank wird im Außenbereich aufgestellt.

Für die Beschickung der Ozonung kann das bestehende Pumpwerk der außer Betrieb genommenen Filteranlage genutzt werden. Änderungen der bestehenden Prozessabfolge auf der Kläranlage inklusive der Klärschlammverbrennung sowie Anpassungen der Hydraulik sind bei dieser Variante nicht erforderlich. Im Anschluss an die Ozonung ist zudem eine biologische Nachbehandlung vorzusehen. Diese kann gegebenenfalls ebenfalls in den ehemaligen Filterzellen erfolgen. Sollte die Ozonung alle Filterzellen beanspruchen so ist eine separate Nachbehandlungsstufe vorzusehen. Der Ablauf der Nachbehandlung wird wie bisher im freien Gefälle in den Rhein geleitet.

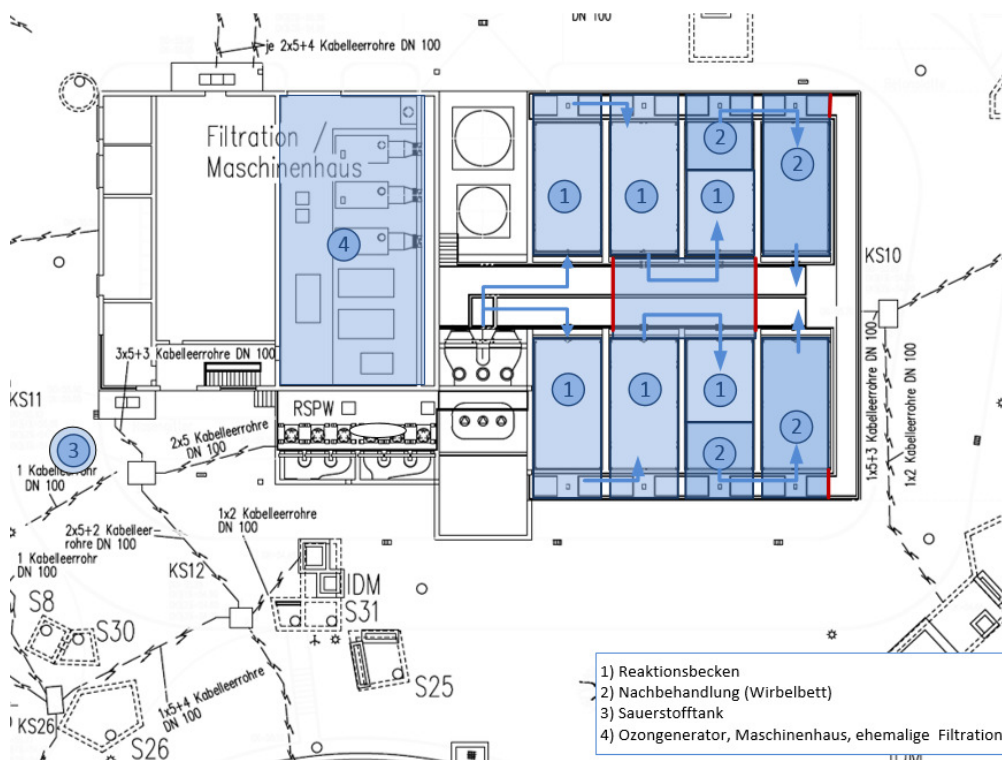


Abbildung 4.2: Lageplan der Variante 1

### 4.3 Variante 2: PAK-Dosierung in den Zufluss zu einer Membrananlage (Nutzung der ehemaligen Filterkammern)

Unter Variante 2 werden der Umbau der bestehenden Filterzellen zu Membranbecken und die Dosierung von Pulveraktivkohle in diese Becken mit anschließender Abscheidung durch die Membranfiltration betrachtet. Darüber hinaus sind Vorrichtungen für die Pulveraktivkohledosierung vorzusehen. Baulich sind für die Dosierung daher als Neuerung Vorrichtungen für die Lagerung der Pulveraktivkohle und eine Dosiereinrichtung für das Ansetzen der Pulveraktivkohle vorzusehen, die in die Zarge unterhalb des PAK-Silos untergebracht wird. Ferner ist ein Lager für Reinigungskemikalien erforderlich, das im bestehenden Betriebsgebäude untergebracht wird. Die Maschinentechnik der Membrananlage wird ebenfalls im alten Maschinenhaus der Filtration installiert. Erforderlich sind Pumpen zur Erzeugung des Unterdrucks in den Membranen, Gebläse zur Bereitstellung von Prozessluft zur Umwälzung der mit Aktivkohle beaufschlagten Becken und Gerinne und eine Dosieranlage für die Reinigungskemikalien.

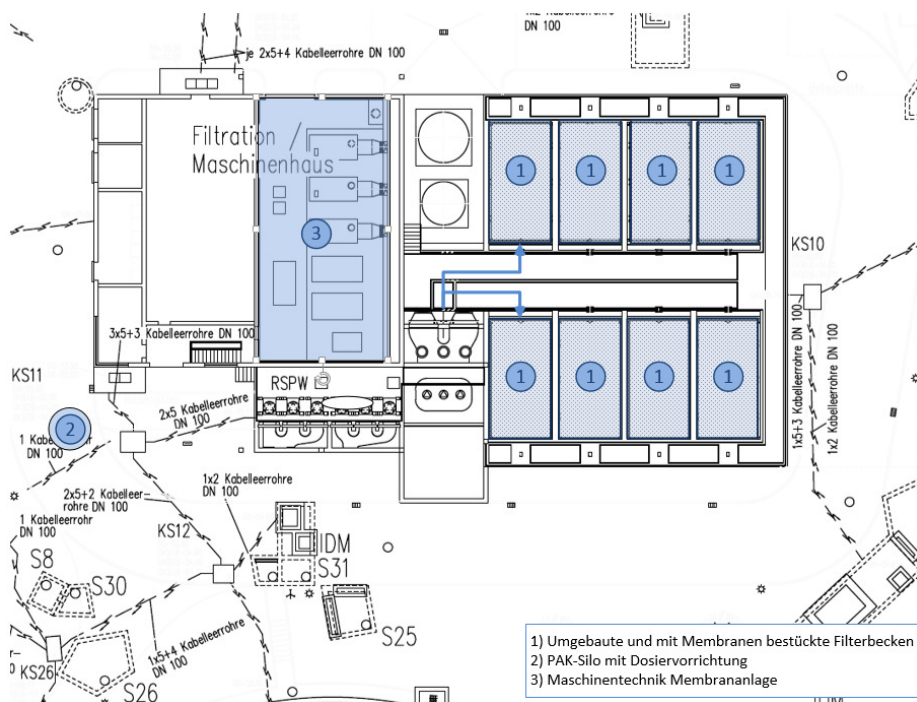


Abbildung 4.3: Lageplan der Variante 2

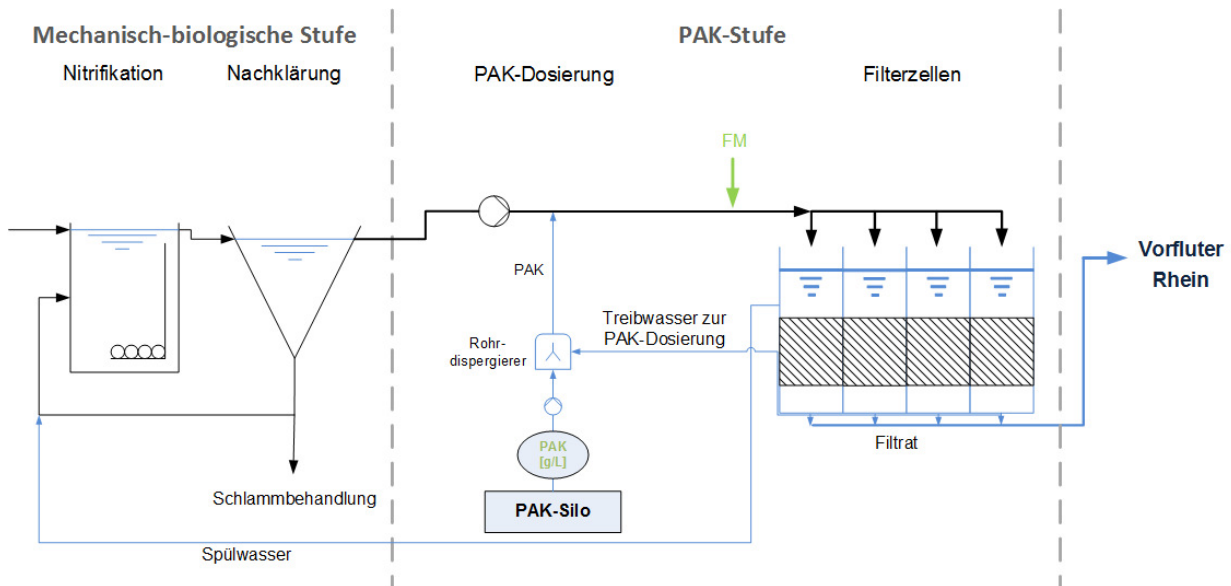
Änderungen in der Prozessabfolge sowie eine Anpassung der Hydraulik sind für die Umsetzung dieser Variante nicht erforderlich. Die Beschickung der Membrananlage erfolgt aus den Nachklärbecken über das bestehende Pumpwerk vor der jetzigen Filteranlage, die das zu behandelnde Wasser von 53,50 m ü. NN auf 58,20 m ü. NN hebt. Der Ablauf der Filterstufe wird wie bisher im freien Gefälle in den Rhein eingeleitet. Eine separate Stufe zur Nachbehandlung ist bei dieser Verfahrensvariante nicht vorzusehen, da durch die Membranen ein vollständiger Rückhalt der Aktivkohle möglich ist.

#### 4.4 Variante 3: PAK-Dosierung in den Filterüberstand und anschließende Raumfiltration (Ertüchtigung der Filteranlage)

Variante 3 beschreibt die Pulveraktivkohledosierung in den Zulauf zur Raumfiltration, die dafür ertüchtigt und wieder in Betrieb genommen werden muss. Die Dosierung der Pulveraktivkohle erfolgt in ein separates Kontaktbecken, welches dem Zulaufpumpwerk zur Filteranlage vorgeschaltet ist. Zur Abscheidung der dosierten Pulveraktivkohle dient das Filtermaterial des Raumfilters. Hierfür ist die Ertüchtigung der Filteranlagen durch den Einbau von neuen Filterböden in die Filterzellen erforderlich.

Änderungen der Prozessabfolge auf der Kläranlage sowie Anpassungen der Hydraulik werden bei dieser Variante durch den Bau des separaten Kontaktbeckens vor der Filteranlage erforderlich, da das Kontaktvolumen in den Filterzellen keine ausreichende Kontaktzeit der Aktivkohle im zu behandelnden Volumenstrom gewährleisten kann. Die Beschickung des separaten Kontaktbeckens erfolgt aus dem Ablauf der Nachklärbecken unter Nutzung der bestehenden Leitungen. Anschließend wird das mit PAK beladene Wasser mithilfe des Pumpwerks zur Filteranlage gefördert. Der Ablauf der Filterstufe wird dann wie bisher im freien Gefälle in den Rhein eingeleitet. Eine Nachbehandlung ist nicht erforderlich, da die Pulveraktivkohle im Flockungsfilter direkt wieder abgeschieden wird. Zur Verbesserung der PAK-Abscheidung wird eine Fällmitteldosierung vorgesehen. Bei dieser Verfahrensvariante wird die Pulverak-

tivkohle über das Rückspülwasser in die biologische Stufe geführt, um die Verweilzeit der Aktivkohle im Reinigungsprozess zu erhöhen und die Beladung der Aktivkohle zu optimieren.



**Abbildung 4.4:** Schematische Darstellung der PAK-Dosierung in den Filterüberstand mit vorgeschaltetem separatem Kontaktbecken

Der Eintrag der Aktivkohle in den Behandlungswasserstrom erfolgt anders als in Variante 2 in das vorgeschaltete Kontaktbecken. Baulich sind als Neuerung die Errichtung einer Lagervorrichtung für die Pulveraktivkohle, eine Dosiereinrichtung für den Eintrag der Pulveraktivkohle in den zu behandelnden Volumenstrom sowie das neue separate Kontaktbecken vorzusehen.

#### 4.5 Auswirkungen der Varianten auf die Klärschlammbehandlung

Die anfallenden Primär- und Sekundärschlämme werden auf der Kläranlage Bonn Bad Godesberg gemeinsam abgezogen und in einem Vorlagebehälter zwischengespeichert, bevor sie über eine 7,1 km lange Druckleitung zur weiteren Behandlung zur Kläranlage Salierweg geführt werden.

Während die Ozonung keine Auswirkungen auf die Prozesse der Klärschlammbehandlung hat, besitzt die Behandlung des Abwassers mit Pulveraktivkohle und die Abscheidung dieser mittels Membranen oder Filtern einen Einfluss auf die Klärschlammbehandlung einer Kläranlage.

Bei den Varianten 2 und 3 wird das Retentat der Membrane bzw. der Filtrerrückstand der Raumfiltration zunächst zur besseren Ausnutzung der Adsorptionskapazität der Pulveraktivkohle in das Belebungsbecken zurückgeführt. Dort erfolgt dann die weitere Beladung der Aktivkohle und die Entnahme aus dem Klärprozess bzw. die Rezirkulation der Aktivkohle über den Rücklaufschlamm.

Durch die zusätzliche Abscheidung der Pulveraktivkohle über den Überschussschlamm erhöht sich das zwischenzuspeichernde und zu behandelnde Schlammvolumen auf der Kläranlage Bad Godesberg. Jedoch zeigte sich z. B. bei den Untersuchungen auf der Kläranlage Schwerte, dass sich die Absetzeigenschaften der PAK-Belebtschlammmischung gegenüber normalem Belebtschlamm verbessern und somit das Schlammvolumen nicht zwangsläufig zunimmt. Der höhere Anteil des biologisch nicht aktiven Anteils im Belebtschlamm infolge einer PAK-Dosierung kann zudem durch einen höheren erzielbaren TS-Gehalt in der biologischen Stufe ausgeglichen werden, sodass sich die Leistungsfähigkeit der biolo-



gischen Stufe nicht zwangsläufig negativ durch eine PAK-Dosierung verändert. Die tatsächlichen Auswirkungen sind jedoch stark von der Schlammstruktur auf der Kläranlage abhängig.

Durch die zusätzliche Abscheidung der Pulveraktivkohle über den Überschussschlamm erhöht sich die zu behandelnde Schlammmenge, die zur Kläranlage Salierweg gepumpt wird. Im Fall der Umsetzung der Variante 2 ist mit einer zusätzlichen Trockensubstanz aus der Aktivkohledosierung von 0,32 t TS/d bzw. 117 t TS/a zu rechnen. Für Variante 3 ist mit einer zusätzlichen Trockensubstanz aus der Aktivkohledosierung und Fällschlamm von 0,64 t TS/d bzw. 235 t TS/a zu rechnen. In Variante 2 würde die zu behandelnde Trockensubstanz um ca. 1 % und in Variante 3 um ca. 2 % steigen.

## 4.6 Sensitivitätsanalyse

Die laufenden Kosten der einzelnen Varianten werden zum einen stark durch die Bezugskosten für die Betriebsstoffe wie Strom, Reinsauerstoff und Aktivkohle beeinflusst. Zum anderen ist die später erforderliche Dosierrate des Ozons bzw. PAK von der zu behandelnden Abwassermatrix und der zu erzielenden Eliminationsleistung abhängig.

Die Energiekosten beeinflussen im Wesentlichen die Wirtschaftlichkeit der Ozonung. Zu erkennen ist jedoch, dass selbst bei einem Strompreis von 0,28 €/kWh die Variante 1 noch deutliche wirtschaftliche Vorteile bietet. Die Kosten für den Bezug für Reinsauerstoff wurde mit 0,14 €/kg O<sub>2</sub> konservativ angenommen. Bei aktuellen Ausschreibungen wurden Preise von bis zu 0,10 €/kg O<sub>2</sub> erzielt, sodass damit die Ozonung im Vergleich zu den beiden anderen Varianten noch wirtschaftlicher ist. Selbst bei einem Preisanstieg auf 0,18 €/kg O<sub>2</sub> ist die Variante 1 immer noch das wirtschaftlichste Verfahren. Die spezifische Ozondosierung wurde mit 0,7 g O<sub>3</sub>/g DOC ebenfalls konservativ eher hoch angesetzt. Nach heutigen Erkenntnissen kann nach einer Optimierungsphase die Ozondosierung auf bis ca. 0,5 g O<sub>3</sub>/g DOC verringert werden. Dies wurde bei einem DOC von 6 mg/L einer Ozondosierung von 4,2 g O<sub>3</sub>/L entsprechen. Die Dosierrate der PAK ist stark von der eingesetzten Kohle, der Aufenthaltszeit der Kohle und der Abwassermatrix abhängig. Auch bei einer geringen PAK-Dosierung von 10 g/m<sup>3</sup> stellt Variante 1 im Vergleich zu den beiden Varianten 2 und 3 mit PAK das wirtschaftlichste Verfahren dar. Der gewählte Ansatz für die erforderliche Dosierrate kann vorab durch zusätzliche Laborschüttelversuche weiter abgesichert werden.

Insgesamt zeigt sich, dass bei den untersuchten Schwankungsbereichen der Parameter die Variante 1 in allen Fällen die wirtschaftlichste Variante darstellt.

## 5 CO<sub>2</sub>-Bilanzierung der Verfahrensvarianten

Als zentrale Maßnahme zum Klimaschutz wird die massive Reduktion der Treibhausgase weltweit angesehen (Grießhammer und Hochfeld, 2009). Das Bundesministerium hat in diesem Zusammenhang die „Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten in sozialen, kulturellen und öffentlichen Einrichtungen“ erlassen, mit der unter anderem Klimaschutz-Teilkonzepte zum Schwerpunkt „Klimafreundliche Abwasserbehandlung“ gefördert werden. Die Stadt Bonn hat in diesem Zusammenhang für die Kläranlage Bonn Salierweg im Jahr 2013 ein Klimaschutz-Teilkonzept durchführen lassen, in dessen Rahmen auch eine CO<sub>2</sub>-Bilanz sämtlicher Verfahrensstufen der Abwasserbehandlung inklusive Schlammbehandlung, Klärgasnutzung und Schlammentsorgung angefertigt wurde. Nachfolgend soll auch für die verschiedenen Varianten der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffelimination für die Kläranlage Bonn Bad Godesberg eine CO<sub>2</sub>-Bilanz erstellt werden, um die Einordnung dieser in die Gesamtbilanz einer Kläranlage für die Stadt Bonn zu ermöglichen.

Tabelle 5-1 zeigt abschließend zusammengefasst die Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung für die drei untersuchten Verfahrensvarianten zur Mikroschadstoffelimination. Die Tabelle gliedert dazu die CO<sub>2</sub>-Emissionen aller Varianten nach den Phasen der Wertschöpfungskette, so dass die Phasen über die Varianten hinweg miteinander verglichen werden können.

**Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung**

	Ozon [Mg CO <sub>2,Äq</sub> /a]	PAK + Membran [Mg CO <sub>2,Äq</sub> /a]	PAK in FÜ [Mg CO <sub>2,Äq</sub> /a]
Herstellung	82,05	-	-
Transport der Rohstoffe	2,21	-	-
Produktion	228,29	2.452,64	3.409,59
Distribution	-	2,34	2,47
Nutzung	41,13	117,90	-49,51
Nachnutzung	-	-	-
Entsorgung	19,69	329,91	439,84
<b>Summe</b>	<b>373</b>	<b>2.903</b>	<b>3.802</b>

Es zeigt sich, dass die Variante 1 mit 373 Mg CO<sub>2,Äq</sub> im Jahr mit Abstand die geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweist. Die Varianten 2 und 3 weisen dagegen deutlich höhere Emissionen auf, was auf die Produktion der eingesetzten Betriebsmittel zurückzuführen ist. In Variante 3 werden im Vergleich zu Variante 2 keine Reinigungsmittel zur Säuerung der Membranen eingesetzt, jedoch ist die PAK-Dosierung bei Variante 3 mit 20 mg PAK/L höher als bei Variante 2 (15 mg PAK/L), woraus die insgesamt höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen für Variante 3 resultieren. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Varianten 2 und 3 sind jedoch insgesamt ähnlich und heben sich deutlich von den Emissionen der ersten Variante ab.

## 6 Vorzugsvariante

### 6.1 Vorgehensweise zur Ermittlung der Vorzugsvariante

Die Verfahrensempfehlung wird aufgrund der Bewertung verschiedener monetärer, betrieblicher und baulicher Aspekte ausgesprochen. Im Rahmen der Bewertung der monetären Aspekte werden zunächst die Ergebnisse der Kostenbetrachtung in Form der Investitionskosten bzw. dem daraus resultierenden investiven Anteil der Jahreskosten sowie der Betriebskosten herangezogen. Bei der Ermittlung der Investitionskosten wird die Förderung des Landes NRW nicht mit einbezogen und Kostenreduzierungen der Abwasserabgabe z.B. durch eine weitergehende Reduzierung der CSB- und Phosphorkonzentration im Kläranlagenablauf werden zunächst nicht berücksichtigt.

Bei der Bewertung der betrieblichen und baulichen Aspekte werden die folgenden Faktoren in die Bewertung einbezogen:

- die Eliminationsleistung Mikroschadstoffe
- Risiken (Transformationsprodukte)
- die Verbesserung der Reinigungsleistung (CSB, AFS, P<sub>ges</sub>)
- der Betriebs- und Wartungsaufwand
- der Stand der Technik – Wissenschaft (Umsetzung vergleichbarer Referenzlage bzw. Erfahrungen in unterschiedlichen Pilotprojekten oder Forschungsanlagen mit den vorgestellten Techniken) sowie

- Zusätzliches LKW-Verkehrsaufkommen
- Klimaschutz, CO<sub>2</sub>-Bilanz
- der Flächenbedarf der Varianten auf der Kläranlage Bonn-Bad Godesberg

Für jeden Bewertungsaspekt werden anschließend Wichtungsfaktoren festgelegt, die den einzelnen Bewertungsaspekten unterschiedliche Bedeutung zumessen und in der Summe 100 % ergeben. Den monetären Bewertungsfaktoren wird dabei genauso viel Bedeutung zugemessen wie den baulichen und betrieblichen Aspekten, weshalb die Wichtungsfaktoren beider Bereiche in Summe jeweils 50 % ergeben.

Dabei wurden bei der monetären Bewertung 15 Punkte an die Variante mit den niedrigsten Jahreskosten vergeben. Die Punkte der anderen Varianten wurden durch Multiplikation der maximal möglichen Punktzahl mit dem Verhältniswert aus niedrigsten Jahreskosten zu den Jahreskosten der zu bewertenden Variante abgemindert. Die Punkte der Varianten ergeben sich dabei wie folgt:

$$\text{Punkte Variante } x = 15 \text{ Punkte} * \text{JK}_{\min} \text{ Variante} / \text{JK Variante } x$$

Die eigentliche Bewertung der verschiedenen nicht monetären Aspekte erfolgt über die Vergabe von Punkten in Anlehnung an Schulnoten. Die Note 1 entspricht dabei 15 Punkten, die Note 2 entspricht 10 Punkten und die Note 3 entspricht 5 Punkten. Auch Halbnotenschritte in Höhe von 2,5 Punkten sind möglich. Die jeweils zugeteilten Punkte werden anschließend entsprechend der Wichtungsfaktoren der einzelnen Bewertungsaspekte gewichtet und aufaddiert und ergeben in Summe die Gesamtpunktzahl einer Variante.

In Tabelle 6-1 sind die Ergebnisse der Bewertung für die in der Kläranlage Bonn Bad Godesberg betrachteten Varianten dargestellt. Es gilt, dass die größte Punktzahl der besten Bewertung entspricht und umgekehrt.

**Ohne Berücksichtigung möglicher Fördermittel erhält die Variante 1 „Bau einer Ozonung und einer biologischen Nachbehandlung in den ehemaligen Filterkammern ohne Berücksichtigung einer neuen Filtration“ mit 12,7 Punkten die höchste Bewertung und stellt unter den gegebenen Bedingungen die Vorzugsvariante für den Bau einer möglichen Stufe zur Mikroschadstoffelimination auf der Kläranlage Bonn Bad Godesberg dar.** Ausschlaggebend für die gute Bewertung sind die monetären Aspekte, da sich die Variante 1 hier deutlich in den Wertungspunkten von den übrigen Varianten abhebt. Im Wertungsbereich „Technik“ liegen die Varianten enger zusammen. Hier punktet insbesondere die Variante 2 durch die Verbesserung der Reinigungsleistung, die aufgrund der Membrantechnik zu erwarten sind. Die Variante 1 punktet gegenüber den adsorptiven Verfahren insbesondere durch ihre gute CO<sub>2</sub>-Bilanz und den geringen Betrieb- und Wartungsaufwand. Am niedrigsten wird Variante 1 in Hinblick auf Risiken aus möglichen Transformationsprodukten und der Verbesserung der Reinigungsleistung bewertet.

Insgesamt ergibt sich das Ranking der betrachteten Varianten wie folgt:

1. Variante 1: Bau einer Ozonung und einer biologischen Nachbehandlung in den ehemaligen Filterkammern ohne Berücksichtigung einer neuen Filtration
2. Variante 3: PAK-Dosierung in den Filterüberstand und anschließende Raumfiltration (Ertüchtigung der Filteranlage)
3. Variante 2: PAK-Dosierung in den Zufluss zu einer Membrananlage (Nutzung der ehemaligen Filterkammer)

Das Ranking gilt unter der Voraussetzung, dass auf der Kläranlage Bonn Bad Godesberg auch zukünftig eine Filtration nicht erforderlich ist. Falls eine Filtration notwendig wird, bieten die Varianten 2 und 3

bereits eine ausreichende Reinigungsleistung, sodass hier keine weiteren Maßnahmen notwendig wären. Die Variante 1 müsste hingegen durch eine zusätzliche Filtrationsstufe ergänzt werden. Dies kann beispielsweise durch eine kompakte Tuchfiltration erfolgen. Die monetären wie auch wirtschaftlichen Vorteile der Variante 1 würden sich unter diesen Randbedingungen gegenüber Variante 2 und 3 verschlechtern, sodass sich ggf. eine andere Rangfolge ergeben könnte.

**Tabelle 6-1: Bewertungsmatrix für die Varianten 1 bis 3**

Variante	Wichtung [%]	Variante 1			Variante 2			Variante 3			
		Ablauf Nachklärung – Ozonung – Filtration			Ablauf Nachklärung - PAK-Dosierung - Abscheidung mittels Membranen			Ablauf Nachklärung - PAK-Dosierung - Abscheidung im Filterbett			
			Punkte	Wertung		Punkte	Wertung		Punkte	Wertung	
Investitionskosten (netto)		2.808.000 €			8.969.018 €			2.856.000 €			
Jahreskosten (netto)	50%	397.340 €/a	15,0	7,5	1.440.268 €/a	4,1	2,1	621.227 €/a	9,6	4,8	
<b>Wertungspunkte Monetär (gerundet)</b>	<b>50%</b>			<b>7,5</b>			<b>2,1</b>			<b>4,8</b>	
Eliminationsleistung Mikroschadstoffe	5%	gut	12,5	0,6	gut	12,5	0,6	gut	12,5	0,6	
Risiken (Transformationsprodukte)	4%	mittel	7,5	0,3	gering	15,0	0,6	gering	15,0	0,6	
Verbesserung der Reinigungsleistung CSB, AFS, Pges	15%	mäßig	5,0	0,8	sehr hoch	15,0	2,3	mittel	7,5	1,1	
Betriebs- und Wartungsaufwand	5%	gering	12,5	0,6	hoch	7,5	0,4	hoch	7,5	0,4	
Stand der Technik - Wissenschaft	5%	bereits Anlagen in Betrieb	15,0	0,8	halbtechnisch untersucht	10,0	0,5	größentechnische Erfahrung	12,5	0,6	
LKW-Aufkommen	1%	gering	12,5	0,1	gering	12,5	0,1	gering	12,5	0,1	
CO <sub>2</sub> -Bilanz	5%	sehr niedrig	15,0	0,8	mäßig bis hoch	5,0	0,3	hoch	2,5	0,1	
Flächenbedarf	10%	gering	12,5	1,3	gering	12,5	1,3	gering	12,5	1,3	
<b>Wertungspunkte Technik (gerundet)</b>	<b>50%</b>			<b>5,2</b>			<b>6,0</b>			<b>4,9</b>	
<b>Gesamtpunkte (gerundet)</b>	<b>100%</b>		<b>12,7 Punkte</b>			<b>8,0 Punkte</b>			<b>9,6 Punkte</b>		

## 6.2 Kosten der Vorzugsvariante

Die Kosten der Variante 1 sind in Tabelle 6-2 dargestellt. Die Investitionskosten betragen demnach 2.808.000 € und die Betriebskosten berechnen sich zu 190.372 €/a. Hieraus resultieren Jahreskosten in Höhe von 397.340 €/a bzw. spezifische Kosten in Höhe von 0,051 €/m<sup>3</sup> behandeltes Abwasser.

Einen wesentlichen Kostenfaktor der ersten Verfahrensvariante stellen die Kosten der Ozonerzeugung dar, die die Kosten für das Betriebsmittel „Sauerstoff“ sowie die Energiekosten für die Ozonerzeugung umfassen. Die Ozonerzeugung wurde hierbei mit zehn Gewichtsprozent Ozon je zugeführtes Sauerstoffgas angenommen. Die Kosten für den Sauerstoff wurden mithilfe des spezifischen Preises von 0,14 €/kg O<sub>2</sub> berechnet. Die Kosten für den Sauerstoff und die Ozonerzeugung machen ca. 53 % der Betriebskosten und ca. 25 % der Jahreskosten aus.

**Tabelle 6-2: Kosten für Variante 1 „Bau einer Ozonung und einer biologischen Nachbehandlung in den ehemaligen Filterkammern ohne Berücksichtigung einer neuen Filtration“**

Investitionskosten			Betrachtungszeitraum	Nutzungsdauer n	Zinssatz i	KFAKR (i:n)	Re-invest nach	DFAKE (i:n)	Re-invest nach	DFAKE (i:n)	Investiver Anteil der Jahreskosten	
Variante 1: Ozonung in Filterzellen mit NB												Jahre
<b>Ozonung</b>												
Umbau von 5 Filterzellen zu Kontaktraum	KG 300	250.000 €	30	BT	30	3,0%	0,0510	0			12.755 €/a	
Anpassung Betriebsgebäude	KG 300	140.000 €	30	BT	30	3,0%	0,0510	0			7.143 €/a	
Technische Anlagen Ozonung (O <sub>2</sub> -Generator, Restozonvernichtung, Raumluftüberwachung, Diffusorsystem, Kühlung etc.)	KG 400	1.150.000 €	30	MT	15	3,0%	0,0510	15	0,6419		96.332 €/a	
Rohrleitungen/Armaturen/O <sub>2</sub> -Versorgung	KG 400	50.000 €	30	MT	15	3,0%	0,0510	15	0,6419		4.188 €/a	
Messgeräte	KG 400	104.000 €	30	MT	15	3,0%	0,0510	15	0,6419		8.712 €/a	
<b>Nachbehandlung Wirbelbett</b>												
Umbau von 3 Filterzellen zu Wirbelbett	KG 300	90.000 €	30	BT	30	3,0%	0,0510	0			4.592 €/a	
Aufwuchskörper für Wirbelbett	KG 400	173.000 €	30	MT	15	3,0%	0,0510	15	0,6419		14.492 €/a	
Technische Anlagen Wirbelbett (Rührwerke, Lochblech, sonstige Einbauten)	KG 400	64.000 €	30	MT	15	3,0%	0,0510	15	0,6419		5.361 €/a	
Gründung LOX-Tank	KG 300	15.000 €	30	BT	30	3,0%	0,0510	0			765 €/a	
Wegeanbindung/Zufahrt/ Außenanlagen etc.	KG 500	10.000 €	30	BT	30	3,0%	0,0510	0			510 €/a	
E/ MSR-Technik	KG 400	200.000 €	30	ET	10	3,0%	0,0510	10	0,7441	20	0,5537	23.446 €/a
Baunebenkosten	KG 700	562.000 €	30	BT	30	3,0%	0,0510	0			28.673 €/a	
<b>Summe</b>		<b>2.808.000 €</b>										<b>206.968 €/a</b>

laufende Kosten	Kennwerte	Betriebsmittelbedarf bei				spezifische Kosten	Kosten pro Tag	Betriebskosten 7.734.820 m <sup>3</sup> /a
		Wassermenge 2880 m <sup>3</sup> /h pro Stunde	pro TW-Tag 24 h/d	mit Lastfaktor pro Tag				
Sauerstoff (z=0,7; DOC = 6 g/m <sup>3</sup> , Ozon 10%wt)	42 g/m <sup>3</sup>	121,0 kg/h	2.903,0 kg/d	31%	899,9	0,14 €/kg	126 €	45.987 €/a
Miete Sauerstofftank								6.000 €/a
Energie Ozonerzeugung (z=0,7; DOC = 6 g/m <sup>3</sup> )	10 kWh/kg <sub>O<sub>3</sub></sub>	121,0 kWh/h	2.903,0 kWh/d	31%	899,9	0,17 €/kWh	153 €	55.841 €/a
Energie Kühlwasserpumpe, sonstige ET	10 kWh	10,0 kWh/h	240,0 kWh/d	67%	160,8	0,17 €/kWh	27 €	9.978 €/a
Energie Umwälzung Wirbelbett	2 kWh	2,0 kWh/h	48,0 kWh/d	67%	32,2	0,17 €/kWh	5 €	1.996 €/a
Restozonvernichter	0,4 kWh/kg O <sub>3</sub>	4,8 kWh/h	116,1 kWh/d	67%	77,8	0,17 €/kWh	13 €	4.828 €/a
Instandhaltung (1,25 % BT, 3% MT/ET)								58.543 €/a
Personalkosten	15 h/Monat					40 €/h	29 €	7.200 €/a
<b>Summe</b>							354 €	<b>190.372 €/a</b>

<b>Jahreskosten (netto)</b>	7.734.820 m <sup>3</sup> /a behandelte Wassermenge	0,051 € pro m <sup>3</sup>	<b>397.340 €/a</b>
<b>Variante 1</b>			

## 7 Empfehlung

### 7.1 Erfordernis zur Mikroschadstoffelimination

Anhaltspunkte für das Erfordernis zum Ausbau der Kläranlage Bonn Bad Godesberg ergeben sich aus dem Zustand des Vorfluters, der zurzeit einen mäßigen ökologischen Zustand aufweist. Im Rahmen des Screenings und Monitorings wurden für mehrere Parameter Überschreitungen der Zielwert-Vorschläge im Ablauf der Kläranlage Bonn Bad Godesberg festgestellt. Die entsprechenden Parameter aus dem Monitoring und die Höhe der Überschreitung sind der Tabelle 7-1 zu entnehmen. Überschreitungen der Zielwert-Vorschläge sind vor allem bei den Antibiotika Clarithromycin, Erythromycin sowie dem Analgetikum Diclofenac zu finden.

Aufgrund der Belastung des Rheins ist nicht für alle eingeleiteten Stoffe eine ausreichende Verdünnung gegeben. Die von Götz et al. (2012) z. B. modellierten Konzentrationen der Stoffe Clarithromycin und Diclofenac unterhalb der Kläranlage Bonn Bad Godesberg im Rhein deuten auf eine relevante stoffliche Belastung des Rheins mit diesen Stoffen hin. Die derzeitigen Zielwerte gemäß der D4-Liste des MKULNV werden im Rhein überschritten, sodass der Bau einer Stufe zur Mikroschadstoffelimination ein sinnvoller Beitrag zur Reduktion darstellt.

**Tabelle 7-1: Zusammenfassung der Zielwert-Überschreitungen aus dem Monitoring**

Substanz		Zielwert	Ablauf KA	Ablauf KA	Ablauf KA	Ablauf KA	Ablauf KA
			08.-09.03	09.-10.03	10.-11.03	11.-12.03	12.-13.03.
Carbamazepin	ng/L	500	800	890	910	950	990
Clarithromycin	ng/L	100	510	600	600	610	860
Diclofenac	ng/L	50	2.600	3.000	3.100	3.200	3.600
Erythromycin	ng/L	20	270	260	340	400	410
Sulfamethoxazol	ng/L	600	510	520	590	660	640

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Ausbau einer Kläranlage um eine Stufe zur Mikroschadstoffelimination zurzeit noch nicht gesetzlich geregelt ist und auf freiwilliger Basis erfolgt. Eine gesetzliche Pflicht zum Ausbau kann für die Zukunft nicht ausgeschlossen werden.

## 7.2 Verfahrensempfehlung




Auf Grundlage der monetären und nicht monetären Bewertung empfehlen wir für den Bau einer Reinigungsstufe zur Mikroschadstoffelimination auf der Kläranlage Bonn Bad Godesberg die Umsetzung der Variante 1 sofern eine Filtration des Abwassers vor der Einleitung weiterhin nicht erforderlich bleibt. Die Variante 1 hebt sich sowohl aus monetärer wie auch technischer Sicht von den Varianten mit Aktivkohledosierung ab.

Es wird empfohlen, bei einer Weiterverfolgung einer Ozonung zur Datenverdichtung und Absicherung der Auslegung die Bromidkonzentration und die DOC-Konzentration im Zulauf zur Filteranlage über mehrere Monate einmal wöchentlich zu messen. Der beprobte Wochentag sollte dabei durchgewechselt werden.

Bei einer Weiterverfolgung der PAK-Varianten werden zur Bestimmung der Adsorptionskapazität und -geschwindigkeit sowie zur Auswahl möglicher Kohlen PAK-Schüttelversuche empfohlen.

Tabelle 7-2 fasst abschließend alle technischen Aspekte sowie die Kosten der empfohlenen Variante 1 „Bau einer Ozonung und einer biologischen Nachbehandlung in den ehemaligen Filterkammern ohne Berücksichtigung einer neuen Filtration“ und vergleichend hierzu die Varianten 2 und 3 tabellarisch zusammen.

Tabelle 7-2: Zusammenfassende Darstellung der betrachteten Varianten

Variante	Variante 1 Ozonung in den vorhandenen Filterzellen und Nachbehandlung mittels	Variante 2 PAK-Dosierung und Abscheidung mittels Membranen	Variante 3 PAK-Dosierung in den Filterüberstand
Schema			
Verfahrens-konfigurationen	<p>Q = 2.880 m³/h  <u>Dosierung</u>  <math>Z_{\text{spez}} = 0,7 \text{ mg O}_3 / \text{mg DOC}</math>  <math>B_{\text{O}_3} = 12,1 \text{ kg O}_3 / \text{h}</math>  <u>Kontaktbecken</u>  <math>t_{\text{Kontakt}} = 21 \text{ min} = 0,35 \text{ h}</math>  <math>V_{\text{Kontakt}} = 1000 \text{ m}^3</math>                      5 Filterzellen zzgl. Ablaufrinne</p> <p><u>LKW-Verkehrsaufkommen</u>                      1 / LKW/a</p>	<p>Q = 2.880 m³/h  <u>Kontaktbereich</u>  <math>t_{\text{Kontakt}} = 29 \text{ min}</math>  <u>Membrane</u>                      Membranfluss: 25 L/m² h                      Umbau von 8 Filterzellen                      56 Membrankassetten  <u>PAK-Bedarf</u>                      321 kg PAK / d</p> <p><u>LKW-Verkehrsaufkommen</u>                      18 LKW/a</p>	<p>Q T = 1.350 m³/h, Q M = 2.880 m³/h  <u>Kontaktbereich</u>  <math>V_{\text{Filter}} = 877 \text{ m}^3</math>  <math>t_{\text{Kontakt}} = 38 \text{ min}</math> (bei Q_T)  <math>t_{\text{Kontakt}} = 18 \text{ min}</math> (bei Q_M)  <u>PAK-Bedarf</u>                      429 kg PAK/d  <u>FM-Bedarf</u>                      1.760 kg FM/d</p> <p><u>LKW-Verkehrsaufkommen</u>                      8 + 11 = 19 LKW/a</p>
Vorteile	Geringe Kosten für Betrieb, kein Anfall zusätzlicher Schlammengen, geringer Flächenbedarf (vorh. Infrastruktur)	Sehr gute Reinigungsleistung, geringer Flächenbedarf (vorh. Infrastruktur)	Günstiger Umbau, zusätzliche Reinigungsleistung, geringer Flächenbedarf (vorh. Infrastruktur)
Nachteile	geringe Verbesserung der Reinigungsleistung	Hohe Investitionskosten, teurer Betrieb und hoher Wartungsaufwand (PAK + Membran), zusätzliche Schlammengen	Zusätzliche Schlammengen
Bewertung	<b>12,7 Punkte</b>	<b>8,0 Punkte</b>	<b>9,6 Punkte</b>

## Literaturverzeichnis

**DSADS (2015):** „DSADS-Den Spurenstoffen auf der Spur“. Projekt des Landes Nordrhein-Westfalen, der Stadt Dülmen und des LIPPEVERBANDS. [www.dsads.de](http://www.dsads.de) [Letzter Zugriff: 17.12.2015].

**ELWAS-WEB (2016):** Elektronisches wasserwirtschaftliches Verbundsystem für die Wasserwirtschaftsverwaltung in NRW. [www.elwasweb.nrw.de/elwas-web/index.jsf](http://www.elwasweb.nrw.de/elwas-web/index.jsf) [Letzter Zugriff: 12.01.2016].

**EUWID (2010):** Europäischer Wirtschaftsdienst “Wasser und Abwasser”. Nr. 45, 9.11.2010 (2010).

**GRIESSHAMMER, R; HOCHFELD, C. (2009):** „Memorandum Product Carbon Footprint – Positionen zur Erfassung und Kommunikation des Product Carbon Footprint für die internationale Standardisierung und Harmonisierung“. Öko-Institut e.V. im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin, Dezember 2009.

**GÖTZ, C; BERGMANN, S.; ORT, C.; SINGER, H.; UND KASE, R. (2012):** „Mikroschadstoffe aus kommunalem Abwasser - Stoffflussmodellierung, Situationsanalyse und Reduktionspotenziale für Nordrhein-Westfalen“. Studie im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MKULNV).

**KOLISCH, G; OSTHOFF, T.; URBAN, I.; SCHWERTE, K. (2012):** „Kläranlage Bonn-Bad Godesberg Optimierung der biologischen Stufe – Änderungsgenehmigungsplanung nach §58 (2) LWG Erläuterungsbericht“. Im Auftrag des Tiefbauamtes der Bundesstadt Bonn. Wuppertal, Mai 2012.

**KOM-M.NRW (2016):** Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination. Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW. Hrsg.: ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW. Stand: 01.09.2016.

**UMWELTBUNDESAMT (2011):** Zusammenstellung von Monitoringdaten zu Umweltkonzentrationen von Arzneimitteln. Texte 66/2011. ISSN 1862-4804