



Machbarkeitsstudie zur Mikroschadstoffelimination auf der Kläranlage Bonn Salierweg

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
W 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
Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	II
1 Hintergründe und Veranlassung der Mikroschadstoffelimination	3
2 Kurzbeschreibung des Einzugsgebietes und der Verfahrenstechnik der Kläranlage Bonn Salierweg	4
3 Abwasseranalyse und Auslegungswerte für die Stufe zur Mikroschadstoffelimination	5
3.1 Standardabwasserparameter und Mikroschadstoffe	5
3.2 Bromidkonzentrationen und Bromatbildungspotenzial	8
3.3 Auslegungswassermenge	8
3.4 Eliminationsleistung	9
4 Variantenuntersuchung	10
4.1 Verfügbare Flächen/Ressourcen und Variantenauswahl	10
4.2 Variante 1: Bau einer Ozonung auf der Freifläche und Nachbehandlung im bestehenden Filter	11
4.3 Variante 2: PAK-Dosierung in den Filterüberstand und anschließende Raumfiltration (Nutzung der Filteranlage)	12
4.4 Variante 3: GAK-Filtration durch Austausch des Filtermaterials gegen GAK	14
4.5 Auswirkungen der Varianten auf die Klärschlammbehandlung	14
4.6 Sensitivitätsanalyse	15
5 CO₂-Bilanzierung der Verfahrensvarianten	15
6 Vorzugsvariante	16
6.1 Vorgehensweise zur Ermittlung der Vorzugsvariante	16
6.2 Kosten der Vorzugsvariante	18
7 Empfehlung	19
7.1 Erfordernis zur Mikroschadstoffelimination	19
7.2 Verfahrensempfehlung	20
Literaturverzeichnis	22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1:	Anteil der behandelbaren Jahresabwassermenge mit der Behandlungswassermenge der Stufe zur Mikroschadstoffelimination	9
Abbildung 4.1:	Verfügbare Flächen und Ressourcen auf der Kläranlage Salierweg	10
Abbildung 4.2:	Relevante Wasserspiegellagen für die Einbindung der Ozonanlage in die bestehende Prozessabfolge (Angaben in m ü. NN)	11
Abbildung 4.3:	Lageplan der Variante 1	12
Abbildung 4.4:	Lageplan der Variante 2	13
Abbildung 4.5:	Schematische Darstellung der GAK-Filtration auf der Kläranlage Salierweg	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Bewertungsmaßstab der Mikroschadstoffkonzentrationen im Oberflächengewässer im Ablauf der Kläranlage Bonn Salierweg (ZW: Zielwert)	5
Tabelle 3.2:	Konzentrationen der analysierten Mikroschadstoffe im Ablauf der Kläranlage Bonn Salierweg	6
Tabelle 3.3:	Ergebnisse der ausgewählten Mikroschadstoffe im fünftägigen Monitoring	7
Tabelle 3.4:	Vergleich ausgewählter Mikroschadstoffe im Kläranlageablauf für Trockenwetter im Rahmen der Machbarkeitsstudien für die Kläranlagen Münster Geist, Wesseling, Hürth, Neuss Ost und Duisburg Vierlinden	7
Tabelle 3.5:	Ermittelte Konzentrationen von DOC, Bromid und Bromat des Ablaufs bzw. des Zulaufs zur Filtration der Kläranlage Bonn Salierweg mit verschiedenen Zugaben von Ozon und der ermittelten spezifischen Ozonzehrung	8
Tabelle 3-6:	Bewertung der Reinigungsleistung von Indikatorsubstanzen nach KOM-M.NRW, 2016	9
Tabelle 5.1:	Zusammenfassung der Ergebnisse der CO ₂ -Bilanzierung	16
Tabelle 6.1:	Bewertungsmatrix für die Varianten 1 bis 3	18
Tabelle 6.2:	Kosten für Variante 1 „Bau einer Ozonung auf der Freifläche und Nachbehandlung im bestehenden Filter“	19
Tabelle 7.1:	Zusammenfassung der Zielwert-Überschreitungen aus dem Monitoring	20
Tabelle 7.2:	Zusammenfassende Darstellung der betrachteten Varianten	21

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 Eintragungspfadern 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 Salierweg 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 Salierweg

Die Kläranlage Bonn Salierweg erhält das Abwasser aus zwei Teileinzugsgebieten, die zusammen eine Fläche von ca. 3.871 ha besitzen. Die Einzugsgebiete umfassen u. a. die Bonner Stadtteile Dottendorf, Kessenich, Ippendorf, Röttgen, Eendenich, Lessenich, Dransdorf, Lengsdorf, Buschdorf, Graurheindorf und Südstadt. Im Einzugsgebiet der Kläranlage sind hinsichtlich des Mikroschadstoffeintrags insbesondere die Uniklinik, das St. Marien-Hospital Bonn sowie verschiedene medizinische Kliniken als Indirekteinleiter zu nennen.

Das gereinigte Abwasser der Kläranlage Salierweg wird in den Rhein eingeleitet. Der Rhein ist in Klärwerksnähe als erheblich verändertes Gewässer klassifiziert, dessen ökologischer Zustand als „mäßig“ bewertet wird. Der chemische Zustand ist „nicht gut“, wobei der chemische Zustand ohne ubiquitäre Stoffe als „gut“ bewertet wird (ELWAS-WEB, 2016).

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

Die Kläranlage Bonn Salierweg ist die größte Bonner Kläranlage und wurde 1934 in Betrieb genommen. Die Ausbaugröße der biologischen Stufe der Kläranlage beläuft sich auf 285.000 Einwohnerwerte (EW) und die Kläranlage verfügt im Jahre 2014 über eine Anschlussgröße von 284.225 EW. Diese setzt sich aus 107.084 Einwohnergleichwerten (EGW) und 177.141 Einwohnern (E) zusammen. Die Jahresabwassermenge für 2014 beträgt 17.453.000 m³/a. Die mechanische Reinigungsstufe der Kläranlage Salierweg ist aufgrund ihrer zwei Einzugsgebiete zweistraßig (Mechanik Süd und Nord) aufgebaut, wobei die beiden Stufen konzeptionell gleich ausgeführt sind. Die mechanische Reinigungsstufe verfügt über eine Rechenanlage sowie einen anschließenden belüfteten Sand- und Fettfang. Von dort aus wird das Abwasser in die Vorklärbecken geleitet. Im Anschluss an die Vorklärbecken wird das Abwasser über ein Zwischenpumpwerk der biologischen Behandlungsstufe zugeführt. Abschließend wird das biologisch behandelte Abwasser über vier Schneckenpumpen zur Filtrationsanlage geführt, bevor die Einleitung des gereinigten Abwassers in den Rhein erfolgt.

Die Klärschlammbehandlung der Anlage Salierweg ist auf 505.000 EW ausgelegt und behandelt auch den Schlamm der Kläranlagen Bonn-Beuel sowie Bonn Bad Godesberg. In einem Voreindicker erfolgt die statische Entwässerung des Schlammes, bevor der Schlamm zwei Faultürmen zugeführt wird. Das bei der Klärschlammbehandlung anfallende Prozesswasser und das entstehende Trübwasser werden in den Zulauf der Mechanik Nord oder in einen Trübwasserspeicher gepumpt. Abschließend erfolgt die Förderung des entwässerten Schlammes über ein Förderband zur Klärschlammverbrennungsanlage.

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 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 vor. Darüber hinaus wurden im Rahmen des Mikroschadstoffscreenings die Konzentrationen für AFS und DOC ermittelt. Der gelöste Kohlenstoff wird für die spätere Anlagenauslegung zu 6 mg DOC/L abgeschätzt. Aus den zusätzlich analysierten und den vorliegenden Konzentrationen der verschiedenen 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 jedoch 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 Köln abgestimmt. Die Probenahme erfolgte als 24h-Mischprobe im Ablauf der Kläranlagen jeweils an zwei Trockenwettertagen sowie an zwei Regenwettertagen. Die ermittelten Konzentrationen der Mikroschadstoffe im Ablauf der Kläranlage sind den Orientierungswerten oder Vorschlägen für Umweltqualitätsnormen (UQN) zur Beurteilung des chemischen und biologischen Status der Oberflächengewässer nach Wasserrahmenrichtlinie gegenübergestellt worden. Es wurde der Bewertungsmaßstab aus Tabelle 3.1 verwendet.

Tabelle 3.1: Bewertungsmaßstab der Mikroschadstoffkonzentrationen im Oberflächengewässer im Ablauf der Kläranlage Bonn Salierweg (ZW: Zielwert)

sehr gut	gut	mäßig	unbefriedigend	schlecht
< 1/2 ZW	1/2 ZW - ZW	ZW – 2 ZW	2 ZW – 4 ZW	> 4 ZW

Durch ein zweitägiges Screening auf Mikroschadstoffe vom 06./07.12.2015 und 07./08.12.2015 bei Trockenwetter (TW) und vom 11./12.12.2015 und 12./13.12.2015 bei Regenwetter (RW) im Ablauf der Kläranlage Bonn Salierweg 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. In der Spalte Zielwert ist der Vorschlag der D4-Liste als Jahresmittel aufgeführt, sofern dieser vorhanden ist. Die Parameter, für die eine Überschreitung der Zielwert-Vorschläge für Oberflächengewässer festgestellt wurde, sind in Tabelle 3.2 dargestellt.

Tabelle 3.2: Konzentrationen der analysierten Mikroschadstoffe im Ablauf der Kläranlage Bonn Salierweg

Substanz	Einheit	Zielwert	Ablauf 06./07.12.15 TW	Ablauf 07./08.12.15 TW	Ablauf 11./12.12.15 RW	Ablauf 12./13.12.15 RW
Climbazol	ng/L	100	89	100	35	48
Terbutryn*	ng/L	65	130	110	47	87
Bisoprolol	ng/L	100	420	410	230	190
Ciprofloxacin*	ng/L	36	100	130	110	63
Clarithromycin*	ng/L	100	110	130	300	91
Diclofenac*	ng/L	50	610	840	1.000	410
Erythromycin**	ng/L	20	260	240	140	130
Sotalol	ng/L	100	280	360	270	140
Sulfamethoxazol	ng/L	600	400	410	270	210
Amidotrizoensäure	ng/L	100	8.500	9.800	9.700	5.000
Iohexol	ng/L	100	< 90	< 90	280	180
Iomeprol	ng/L	100	14.000	12.000	24.000	13.000
Iopamidol	ng/L	100	8.700	10.000	13.000	7.600
Iopromide	ng/L	100	6.800	6.100	12.000	6.300
Ioversol	ng/L	100	< 50	< 50	150	150
Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)*	ng/L	0,65	13	15	12	< 10

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

** gemessen als Dehydrato-Erythromycin

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, die Antibiotika Clarithromycin, Erythromycin und den Betablocker Bisoprolol in den meisten Proben um mehr als das Vierfache über dem Zielwert-Vorschlag. Der Betablocker Sotalol und die Antibiotika Sulfamethoxazol und Ciprofloxacin liegen bei Konzentrationen im für Oberflächengewässer geltenden unbefriedigten (2 Zielwert – 4 Zielwert) Bereich. Für die analysierten Pestizide konnten nur leichte Überschreitungen der Zielwert-Vorschläge für Climbazol und Terbutryn nachgewiesen werden. 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. Auch für die perfluorierte Substanz PFOS ist eine Überschreitung festzustellen.

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, dem Analgetikum Diclofenac und Antiepileptikum Carbamazepin zu finden.

Tabelle 3.3: Ergebnisse der ausgewählten Mikroschadstoffe im fünftägigen Monitoring

Substanz		UQN	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	3.700	5.200	4.100	3.600	4.000
Carbamazepin*	ng/L	500	910	450	1.100	1.100	1.100
Clarithromycin*	ng/L	100	290	290	380	350	460
Diclofenac*	ng/L	50	1.100	1.500	1.400	1.400	1.700
Erythromycin**	ng/L	20	240	320	320	380	460
Metoprolol*	ng/L	7.300	650	890	740	620	720
Sulfamethoxazol	ng/L	600	260	280	310	310	340
Terbutryn*	ng/L	65	86	78	83	83	74

* 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 Salierweg 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. Vergleichsweise gering ist die Konzentration für Diclofenac.

Tabelle 3.4: Vergleich ausgewählter Mikroschadstoffe im Kläranlageablauf 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 Konzentrationen der Indikatorsubstanzen Diclofenac und Clarithromycin im Ablauf der Kläranlage Bonn Salierweg, 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 Maßnahmen 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 im Zulauf zur Filtration der Kläranlage ermittelt worden.

Zur Ermittlung des Ozonzehrungsverhaltens und des Bromatbildungspotenzials wurden mit zwei Proben aus dem Zulauf zur Filtration der Kläranlage bei Trockenwetter zusätzlich Versuche mit einer Zugabe von 5 bzw. 10 mg O₃/L durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Dosierung von 5 mg O₃/L nach ca. 5 Minuten kein gelöstes Ozon mehr in der Abwasserprobe detektiert werden kann. Bei einer Zugabe von 10 mg O₃/L kann erst nach einer Reaktionszeit von knapp 20 Minuten kein gelöstes Ozon mehr detektiert werden. Die Ausgangskonzentration des Bromids vor der Ozonzugabe und die Konzentration des gebildeten Bromates sind in Tabelle 3.5 zu finden. Da im Zulauf zur Filtration kein DOC bestimmt wurde, ist die spezifische Ozonzehrung mittels DOC des Ablaufs der Kläranlage abgeschätzt worden. Die hohen Konzentrationen an Bromid können durch die hohe spezifische Ozonzehrung von > 1 mg O₃/mg DOC erklärt werden, die eine Bromidbildung begünstigen. Bei üblichen Ozondosen von < 0,7 mg O₃/mg DOC ist in der Regel mit keiner deutlichen Bromidbildung zu rechnen, die den Grenzwert für Bromat im Trinkwasser von 10 µg/L überschreitet. Eine Ozonung ist mit den gemessenen Bromidwerten von max. 100 µg/L grundsätzlich möglich.

Tabelle 3.5: Ermittelte Konzentrationen von DOC, Bromid und Bromat des Ablaufs bzw. des Zulaufs zur Filtration der Kläranlage Bonn Salierweg 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 _{spez.} mg _{O₃} /mg _{DOC}
Ablauf Kläranlage 06.-07.12.2015	4,8				
Zulauf Filtration 06.-07.12.2015		-	90	< 2	
		5	85	5,7	1,0
		10	65	25	2,1
Ablauf Kläranlage 0.-08.12.2015	5,1				
Zulauf Filtration 07.-08.12.2015		-	100	< 1	
		5	95	2,8	1,0
		10	70	30	2,0

3.3 Auslegungswassermenge

Für die Ermittlung der Auslegungswassermenge werden die Daten von Dezember 2014 bis Dezember 2015 herangezogen. Die Ergebnisse der Auswertung implizieren, dass der tatsächliche Trockenwetterabfluss unter dem Trockenwetterabfluss des Genehmigungsbescheids in Höhe von 3.744 m³/h liegt. Eine Analyse der Trockenwetterabflüsse ergab den tatsächlichen Trockenwetterabfluss der Kläranlage zu 2.559 m³/h. Damit ist die Kläranlage Salierweg bei Trockenwetter hydraulisch zurzeit zu etwa 70 % ausgelastet. Unberücksichtigt sind hierbei die internen Kreisläufe. Durch das Spülwasser der Filtration ergibt sich für den Zulauf der Filteranlage ein um ca. 5 % höherer Durchfluss.

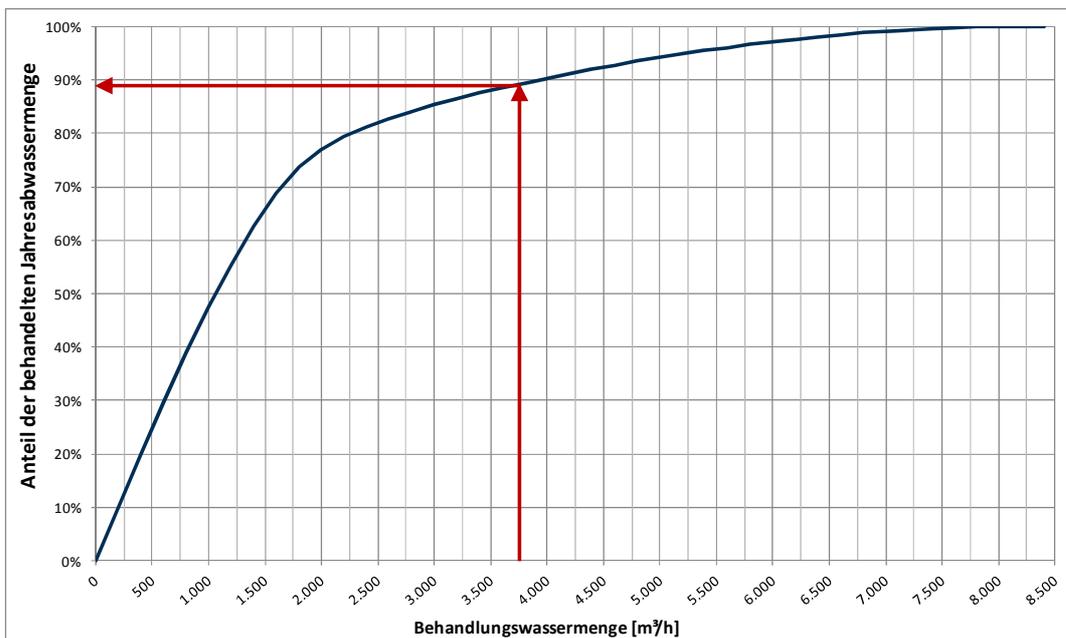


Abbildung 3.1: Anteil der behandelbaren Jahresabwassermenge mit der Behandlungswassermenge der Stufe zur Mikroschadstoffelimination

Bei einer Behandlungswassermenge in Höhe des Trockenwetterabflusses von 3.744 m³/h können entsprechend der Abbildung 3.1 etwa 90 % der Jahresabwassermenge in der vierten Reinigungsstufe behandelt werden. Da die Behandlung des maximalen stündlichen Trockenwetterabflusses ausreicht, um die angestrebten 85% der Jahresabwassermenge zu behandeln, wird dieser Wert für die nachfolgende Erarbeitung technischer Anlagenkonzepte herangezogen. Bei einer Jahresabwassermenge in Höhe von 17.453.005 m³/a können in der vierten Reinigungsstufe so jährlich 15.707.705 m³/a 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 Reinigungsziels 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 in Kapitel 4 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

Für die Auswahl der zu betrachtenden Varianten sind verschiedene Randbedingungen zu berücksichtigen. Hierzu zählen zum einen strukturelle Randbedingungen wie die Nutzung vorhandener Ressourcen, die Flächenverfügbarkeit oder die hydraulischen Rahmenbedingungen auf der Kläranlage Bonn Salierweg sowie zum anderen verschiedene Abwassereigenschaften.



Abbildung 4.1: Verfügbare Flächen und Ressourcen auf der Kläranlage Salierweg

Die Kläranlage Salierweg weist mehrere kleine Freiflächen im Umfeld der bestehenden Filteranlage am nordwestlichen Rand des Kläranlagengeländes auf. Diese stehen für die Errichtung einer Anlage zur Mikroschadstoffelimination zur Verfügung. Zudem ist die bestehende Filteranlage für die Mikroschadstoffelimination verwendbar.

Mögliche Verfahrensvarianten, die auf der Kläranlage Salierweg anwendbar sind, sind:

- Bau einer Ozonung auf der Freifläche und Nachbehandlung im bestehenden Filter
- PAK-Dosierung in den Filterüberstand und anschließende Raumfiltration (Nutzung der Filteranlage)
- PAK-Dosierung in den Zufluss zu einer Membrananlage (Nutzung der Filteranlage)
- GAK-Filtration durch Austausch des Filtermaterials gegen GAK

Alle möglichen Varianten zeichnen sich demnach durch eine günstige Einbindung der vorhandenen Filtrationsanlage aus. Aufgrund des geringen Sanierungsbedarfs der Filteranlage, wird die Variante „PAK-Dosierung in den Zufluss zu einer Membrananlage“, die eine vollständiges Entkernen der Filteranlage und den Einbau einer Membrananlage beinhalten würde, nicht weiter verfolgt, da die größtenteils sanierte Filteranlage hierbei nicht weiter genutzt werden kann. Zudem ist das Einsparpotenzial durch eine verbesserte Reinigungsleistung gering.

Die für die Kläranlage Salierweg ausgearbeiteten technischen Anlagenkonzepte sind demnach:

- Variante 1:** Bau einer Ozonung auf der Freifläche und Nachbehandlung im bestehenden Filter
- Variante 2:** PAK-Dosierung in den Filterüberstand und anschließende Raumfiltration (Nutzung der Filteranlage)
- Variante 3:** GAK-Filtration durch Austausch des Filtermaterials gegen GAK

4.2 Variante 1: Bau einer Ozonung auf der Freifläche und Nachbehandlung im bestehenden Filter

Die Ozonung wird auf der Freifläche westlich der Filteranlage errichtet und in der bestehenden Prozessabfolge der Nachklärung nachgeschaltet. Hierzu wird in der bestehenden Leitung vom Nachklärbecken zur Filteranlage, auf Höhe der nordwestlichen Ecke der Filteranlage ein Trennbauwerk errichtet, von dem aus das zu behandelnde Wasser über eine neu anzulegende Rohrleitung zur Ozonanlage geleitet wird. Nach der oxidativen Behandlung gelangt das Wasser über die bestehende Rohrleitung zur Filteranlage, in der die biologische Nachbehandlung erfolgt. Der Filteranlage vorgelagert ist ein Schneckenpumpwerk, das das zulaufende Wasser von 49,60 m ü. NN auf 56,45 m ü. NN hebt (siehe Abbildung 4.2). Von der Filteranlage aus gelangt das Abwasser über die bereits bestehende Ablaufleitung der Kläranlage und ein Auslaufbauwerk in den Rhein.

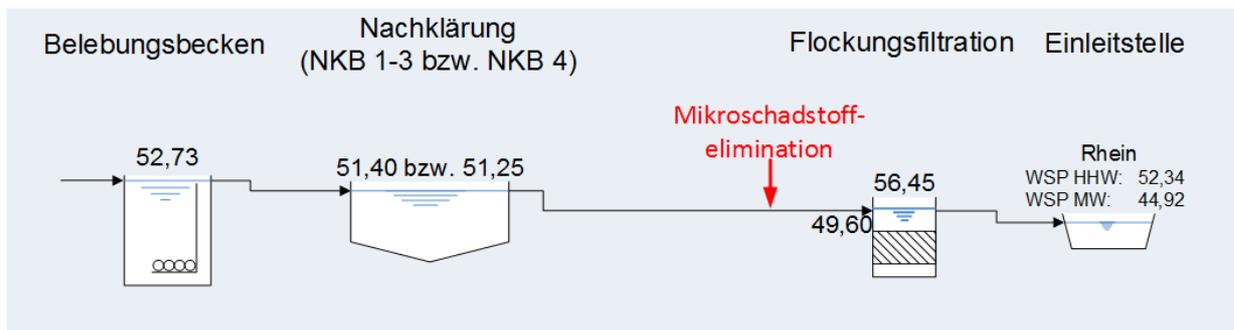


Abbildung 4.2: Relevante Wasserspiegellagen für die Einbindung der Ozonanlage in die bestehende Prozessabfolge (Angaben in m ü. NN)

Die Konzeption der Ozonanlage erfolgt demnach als Neubau, während für die Nachbehandlung die bestehende Filteranlage genutzt wird. Zu berücksichtigen ist zudem die Lage der Kläranlage Salierweg im Überschwemmungsgebiet des Rheins bei Hochwasser. Die Freifläche, auf der die Ozonanlage errichtet werden soll, liegt dabei im nicht geschützten Bereich vor dem Deich, der die Kläranlage Salierweg umgibt. Daher ist im Fall der Umsetzung der Variante 1 der Hochwasserschutz für die Ozonanlage zu berücksichtigen. Gemäß Abbildung 4.3 kann der Hochwasserschutz durch den Anschluss des Ozonbeckens an den bestehenden Deich und die Ausstattung des Ozonbeckens mit hohen Wänden gewährleistet werden. Das Betriebsgebäude soll zudem auf dem Dach des Ozonbeckens errichtet werden und liegt damit außerhalb des hochwassergefährdeten Bereichs. Der Sauerstofftank wird hinter dem Deich

aufgestellt. Für das Aufstellen des Tanks sind entsprechende Fundamente vorzusehen und der Bereich ist zu befestigen.

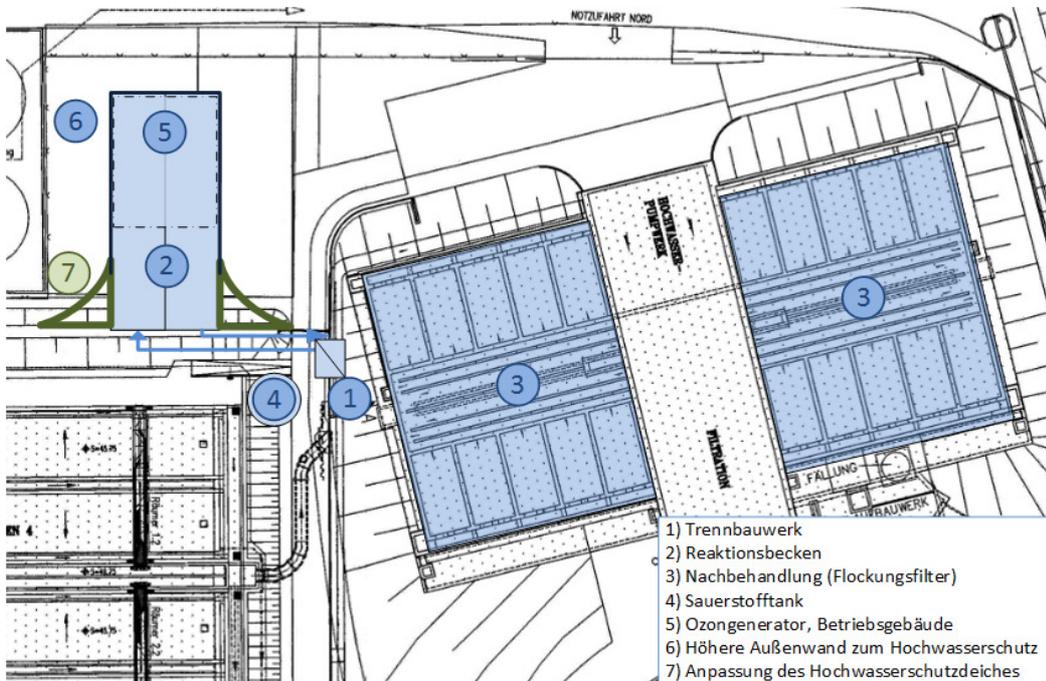


Abbildung 4.3: Lageplan der Variante 1

Um das Wasser aller Nachklärbecken zu behandeln, ist das zu errichtende Trennbauwerk für die Beschickung der Ozonanlage in dem Leitungsabschnitt zwischen Ablaufschacht des Nachklärbeckens 4 und dem Schneckenpumpwerk zur Filteranlage anzuordnen. Das in Frage kommende Leitungsstück hat eine Länge von 30 m bei einem Gefälle von 2 ‰. Im Rahmen der Studie wird davon ausgegangen, dass die Ozonanlage im Freigefälle beschickt werden kann. Der Bau eines zusätzlichen Pumpwerks wird daher nicht betrachtet.

Die Ozonerzeugung erfolgt aus Reinsauerstoff, der in flüssiger Form mit speziellen Tankwagen zur Kläranlage Salierweg angeliefert wird. Für die Bevorratung des Sauerstoffs erfolgt auf der Kläranlage die Anordnung eines LOX-Sauerstofftanks. Durch die Anlieferung des Flüssigsauerstoffs kommt es zu einem zusätzlichen LKW-Verkehrsaufkommen, welches im Rahmen der Studie ebenfalls abgeschätzt wurde. Für den Ozoneintrag wird das Diffusorsystem gewählt, welches im Gegensatz zum Injektorsystem keine zusätzliche Energie benötigt. Der Eintrag über Diffusoren erfordert eine Beckentiefe von ca. 5 m, die an dem vorgesehenen Standort aufgrund des Neubaus der Anlage realisierbar ist. Das Kontaktbecken wird zweistraßig ausgebildet, wodurch das erforderliche Beckenvolumen in zwei getrennte Beckenstraßen aufgeteilt wird. Die Nachbehandlung erfolgt in der bestehenden Filteranlage der Kläranlage Bonn Salierweg.

4.3 Variante 2: PAK-Dosierung in den Filterüberstand und anschließende Raumfiltration (Nutzung der Filteranlage)

Variante 2 beschreibt die Pulveraktivkohledosierung in den Filterüberstand. Die Filterstufe stellt dabei sowohl das Kontaktbecken als auch die Abscheideeinheit dar. Die Dosierung erfolgt in den Zulauf zur Filteranlage und zur Abscheidung der beladenen Aktivkohle dient das Filtermaterial des Raumfilters.

Änderungen der Prozessabfolge auf der Kläranlage sowie Anpassungen der Hydraulik sind bei dieser Variante nicht erforderlich, da zusätzlich zu den bisherigen Abläufen lediglich Pulveraktivkohle in den Zulauf zur Flockungsfiltration dosiert werden muss. Die Beschickung der Filterstufe erfolgt wie bisher aus dem Ablauf der Nachklärbecken unter Nutzung der bestehenden Leitungen und des Schneckenpumpwerks. Bei dieser Verfahrensvariante wird die Pulveraktivkohle über das Rückspülwasser in die biologische Stufe geführt, um die Verweilzeit der Aktivkohle im Reinigungsprozess zu erhöhen und die Beladung der Aktivkohle zu optimieren.

Der Eintrag der Aktivkohle in den Behandlungswasserstrom erfolgt unter Rückgriff auf die bestehende Dosieranlage für die Fällmittel. Baulich sind dadurch als Neuerung lediglich die Errichtung einer Lager- vorrichtung für die Pulveraktivkohle und eine Dosiervorrichtung für den Eintrag der Pulveraktivkohle in den zu behandelnden Volumenstrom vorzusehen (vgl. Abbildung 4.4). Für das Aufstellen des Silos sind entsprechende Fundamente vorzusehen und der Bereich, der in der Nähe der bestehenden Filtration vorzusehen ist, ist zu befestigen.

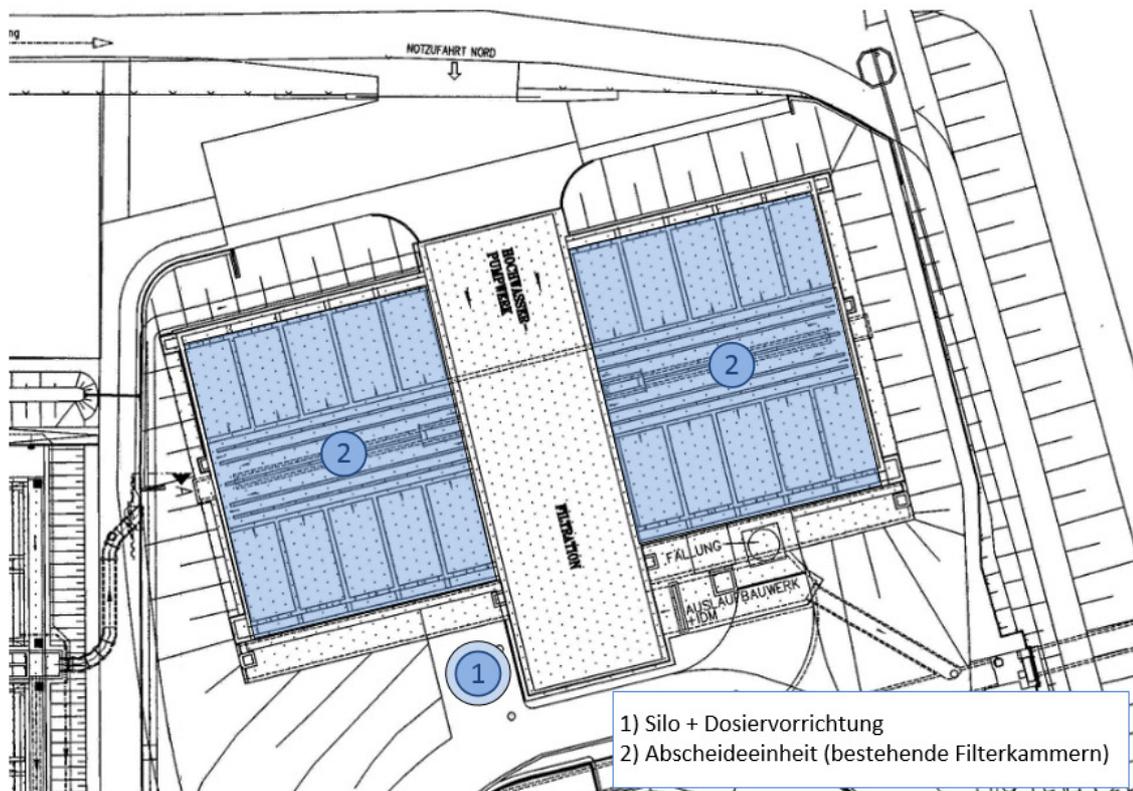


Abbildung 4.4: Lageplan der Variante 2

Die Dosierung erfolgt im Bereich des Schneckenpumpwerks in den Zulauf zur Filtration. Das gesamte Wasservolumen von der Dosierstelle bis zur Abscheideeinheit stellt anschließend den Kontaktraum für die Pulveraktivkohle dar. Die Vorrichtungen für die Lagerung und Dosierung der Pulveraktivkohle werden nahe der Dosierstelle für die Pulveraktivkohle neben der Filteranlage errichtet. Die Dosierung der Aktivkohle erfolgt volumenstromabhängig. Für die geplante Variante 2 wird eine Pulveraktivkohledosierung in Höhe von 20 mg_{PAK}/L angenommen wird. Im Falle einer großtechnischen Umsetzung der Variante 2 ist diese Annahme auf Grundlage der lokalen Abwassermatrix zuvor mit Hilfe von Laborversuchen zu überprüfen. Die Anlieferung der Pulveraktivkohle zur Kläranlage wird mithilfe von Silotransportfahrzeugen durchgeführt.

4.4 Variante 3: GAK-Filtration durch Austausch des Filtermaterials gegen GAK

Variante 3 beschreibt den Umbau der bestehenden Filteranlage, indem das vorhandene Filtermaterial gegen GAK ausgetauscht wird. Änderungen der Prozessabfolge auf der Kläranlage sowie Anpassungen der Hydraulik sind bei dieser Variante nicht erforderlich.

Die Beschickung der Filterstufe erfolgt wie bisher über das Schneckenpumpwerk mit dem ablaufenden Wasser der Nachklärbecken. Der Ablauf der Filterstufe wird wie bisher im freien Gefälle in den Rhein eingeleitet. Eine Nachbehandlung ist zusätzlich zur GAK-Filtration nicht erforderlich. Vor der Umsetzung einer Mikroschadstoffelimination mittels GAK, sollten Vorversuche mit dem Abwasser der Kläranlage Salierweg durchgeführt werden, um zu untersuchen, ob die vorhandene Abwassermatrix zur Mikroschadstoffelimination mittels GAK geeignet ist. Zur Errichtung einer GAK-Filtration auf der Kläranlage Salierweg ist die bestehende Flockungsfiltration umzubauen, indem das Filtermaterial ausgetauscht wird.

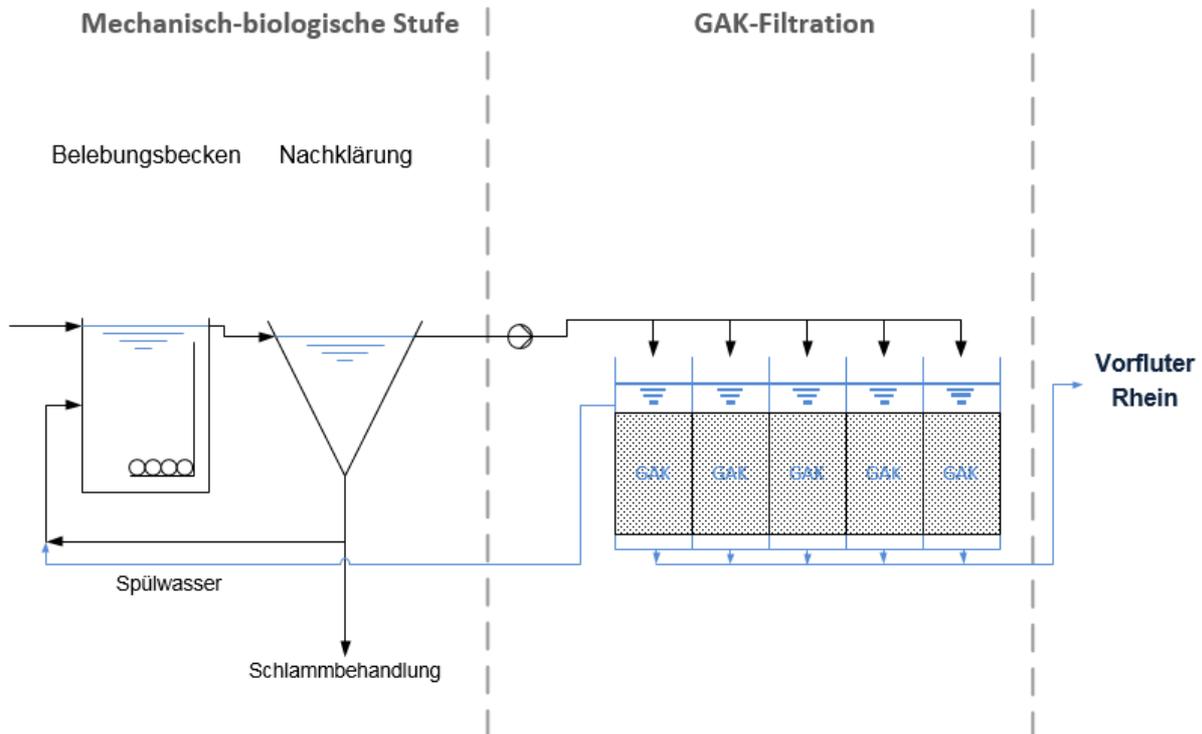


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der GAK-Filtration auf der Kläranlage Salierweg

4.5 Auswirkungen der Varianten auf die Klärschlammbehandlung

Während die Ozonung und die GAK-Filtration keine Auswirkungen auf die Prozesse der Klärschlammbehandlung haben, da sowohl das Ozon als auch die granuliert Aktivkohle nicht in den Schlammkreislauf gelangen oder zu einem Mehranfall an Schlamm führen, hat die Behandlung des Abwassers mit Pulveraktivkohle und die Abscheidung dieser in der Filteranlage einen Einfluss auf die Klärschlammbehandlung. Bei der Variante 2 wird 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 die zu behandelnde Schlammmenge auf der Kläranlage Salierweg. Im Fall der Umsetzung der Variante 2 ist mit einer zusätzlichen Trockensubstanz aus der Aktivkohledosierung und Fällschlamm von 1,34 t TS/d bzw. 492 t TS/a zu rechnen. Durch eine PAK-Dosierung von 20 mg/L gemäß Variante 2 würde die zu behandelnde Trockensubstanz um ca. 4 % 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 bzw. GAK-Standzeit von der zu behandelnden Abwassermatrix und der zu erzielenden Eliminationsleistung abhängig.

Die Energiekosten beeinflussen im Wesentlichen die Wirtschaftlichkeit der Ozonung. Zu erkennen ist, 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 O₂ konservativ angenommen. Bei aktuellen Ausschreibung wurden Preise von bis zu 0,10 €/kg O₂ erzielt, sodass kurzfristig die Wirtschaftlichkeit der Ozonung eher besser ist. Bei einem Preisanstieg auf 0,18 €/kg O₂ ist die Variante 1 immer noch das wirtschaftlichste Verfahren.

Die spezifische Ozondosierung wurde mit 0,7 g O₃/g DOC ebenfalls konservativ angesetzt. Nach heutigen Erkenntnissen kann nach einer Optimierungsphase die Ozondosierung auf bis ca. 0,4 g O₃/g DOC verringert werden. Dies würde bei einem DOC von 6 mg/L einer Ozondosierung von 2,4 g O₃/L entsprechen.

Die Dosierrate der PAK ist stark von der eingesetzten Kohle, der Aufenthaltszeit der Kohle und der Abwassermatrix abhängig. Die Variante 2 wäre bei einer PAK-Dosierung von 10 bzw. 15 g/m³ das wirtschaftlichste Verfahren. Nach bisherigem Kenntnisstand ist diese geringe PAK-Dosierrate jedoch nur mit einer separaten Adsorptionsstufe erzielbar.

Die Standzeit eines GAK-Filters bis zum Austausch der Kohle kann ohne Vorversuche nur relativ unsicher angegeben werden. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass auch bei einer Standzeit von 2,5 Jahren und Regenerierung der GAK, die Variante 3 nicht die wirtschaftlichste Lösung darstellen würde.

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

5 CO₂-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 erstellen lassen, in dessen Rahmen auch eine CO₂-Bilanz sämtlicher Verfahrensstufen der Abwasserbehandlung inklusive Schlammbehandlung, Klärgasnutzung und Schlamm Entsorgung angefertigt wurde. Dazu wurde für die verschiedenen

Varianten der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffelimination eine CO₂-Bilanz erstellt, um die Einordnung dieser in die Gesamtbilanz der Kläranlage Salierweg für die Stadt Bonn zu ermöglichen.

Tabelle 5.1: Zusammenfassung der Ergebnisse der CO₂-Bilanzierung

	Ozon [Mg CO _{2,Äq} /a]	PAK [Mg CO _{2,Äq} /a]	GAK [Mg CO _{2,Äq} /a]
Herstellung	172,02	-	-
Transport der Rohstoffe	4,42	-	-
Produktion	402,23	6.857,03	10.832,49
		293,19	
Distribution	-	2,21	19,24
		2,73	
Nutzung	51,41	3,43	-
		3,43	
		-633,56	
Nachnutzung	-		-
Entsorgung	21,41	922,34	-
Summe	651	7.451	10.852

Es zeigt sich, dass die Variante 3 mit Abstand die höchsten CO₂-Emissionen, die Variante 2 die zweithöchsten und Variante 1 mit 651 Mg CO_{2,Äq} im Jahr die geringsten Emissionen aufweist. Die hohen Emissionen der dritten Variante sind vor allem auf die eingesetzten Betriebsmittel zurückzuführen und auf die hohen Emissionen, die bei der Herstellung der granulierten Aktivkohle anfallen. Die niedrigen CO₂-Emissionen der Variante 1 resultieren dagegen aus den relativ geringen CO₂-Emissionen, die bei der Sauerstoff- und Ozonerzeugung anfallen.

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 Jahreskosten 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_{ges})
- 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, CO₂-Bilanz
- der Flächenbedarf der Varianten auf der Kläranlage Bonn-Salierweg

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-Salierweg 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 auf der Freifläche und Nachbehandlung im bestehenden Filter“ mit 12,2 Punkten die höchste Bewertung und stellt unter den gegebenen Bedingungen die Vorzugsvariante für den Bau einer möglichen Stufe zur Mikroschadstoffelimination auf der Kläranlage Bonn-Salierweg 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 liegen die Varianten 2 vor den Varianten 3 und 1. Die Variante 1 punktet gegenüber den adsorptiven Verfahren insbesondere durch ihre gute CO₂-Bilanz, den geringen LKW-Aufkommen (gegenüber der GAK Filtration) und den geringen Betrieb- und Wartungsaufwand. Am niedrigsten wird Variante 1 in Hinblick auf Risiken aus möglichen Transformationsprodukten und der Verbesserung der Reinigungsleistung bewertet. Die Ozonung ist auf einen Trockenwetterabflusses von 3.744 m³/h ausgelegt und ermöglicht die Behandlung von 90 % der Jahresabwassermenge in der vierten Reinigungsstufe. Die Aktivkohlevarianten werden im Vollstrom durchflossen, wobei aufgrund der kürzeren Aufenthaltszeiten die Eliminationsleistung gegenüber Trockenwetterbedingungen eingeschränkt ist.

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 Filtration			Ablauf Nachklärung - GAK-Filtration		
		Punkte	Wertung	Punkte	Wertung	Punkte	Wertung			
Investitionskosten (netto)		4.403.000 €			1.049.000 €			2.352.000 €		
Jahreskosten (netto)	50%	603.306 €/a	15,0	7,5	764.318 €/a	11,8	5,9	1.390.749 €/a	6,5	3,3
Wertungspunkte Monetär (gerundet)	50%		7,5			5,9			3,3	
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	mittel	7,5	1,1	mittel	7,5	1,1
Betriebs- und Wartungsaufwand	5%	gering	12,5	0,6	hoch	7,5	0,4	mäßig	10,0	0,5
Stand der Technik - Wissenschaft	5%	einige Anlagen in Betrieb	15,0	0,8	größtechnische Erfahrung	12,5	0,6	Standzeit GAK unsicher	10,0	0,5
LKW-Aufkommen	1%	gering	15,0	0,2	gering	15,0	0,2	mittel	7,5	0,1
CO ₂ -Bilanz	5%	sehr niedrig	15,0	0,8	hoch	2,5	0,1	sehr hoch	0,0	0,0
Flächenbedarf	10%	mittel	7,5	0,8	gering	12,5	1,3	sehr gering	15,0	1,5
Wertungspunkte Technik (gerundet)	50%		4,7			4,9			4,9	
Gesamtpunkte (gerundet)	100%	12,2 Punkte			10,8 Punkte			8,2 Punkte		

6.2 Kosten der Vorzugsvariante

Die Kosten für Variante 1 „Neubau einer Ozonung und Nachbehandlung im bestehenden Filter“ sind der Tabelle 6.2 zu entnehmen. Die Investitionskosten der Variante betragen ca. 4.403.000 € und die Betriebskosten belaufen sich auf 314.537 €. Hieraus resultieren Jahreskosten in Höhe von ca. 603.306 €/a. Die spezifischen Jahreskosten betragen, bezogen auf die in der vierten Reinigungsstufe behandelten Abwassermenge 0,04 €/m³.

Wesentlicher Kostenfaktor der Ozonungsvariante sind die Betriebskosten für die Ozonerzeugung, die sich aus den Kosten für das Betriebsmittel Sauerstoff sowie den Energiekosten der Ozonerzeugung zusammensetzen. 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 O₂ berechnet.

Tabelle 6.2: Kosten für Variante 1 „Bau einer Ozonung auf der Freifläche und Nachbehandlung im bestehenden Filter“

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 mit NB im Filter												
Zu/Ablaufanbindung			Jahre			Jahren			Jahren			
Rohrleitungen/Betonarbeiten	KG 300	110.000 €	30	BT	30	3,0%	0,051	0			5.612 €/a	
Bypass (Wehr)	KG 400	70.000 €	30	MT	15	3,0%	0,051	15	0,642		5.864 €/a	
Ozonung												
Bauwerk Reaktor (Bruttorauminhalt = 1950 m ³)	KG 300	1.073.000 €	30	BT	30	3,0%	0,051	0			54.744 €/a	
Bauwerk Betriebsgebäude (BRI = 800 m ³)	KG 300	320.000 €	30	BT	30	3,0%	0,051	0			16.326 €/a	
Technische Anlagen Ozonung (O ₃ -Generator, Restozonvernichtung, Raumluftüberwachung, Diffusorsystem, Kühlung etc.)	KG 400	1.300.000 €	30	MT	15	3,0%	0,051	15	0,642		108.897 €/a	
Rohrleitungen/Armaturen/O ₂ -Versorgung	KG 400	80.000 €	30	MT	15	3,0%	0,051	15	0,642		6.701 €/a	
Messgeräte	KG 400	104.000 €	30	MT	15	3,0%	0,051	15	0,642		8.712 €/a	
Gründung LOX-Tank	KG 300	15.000 €	30	BT	30	3,0%	0,051	0			765 €/a	
Hochwasserschutz/Verlegung Deich	KG 300	150.000 €	30	BT	30	3,0%	0,051	0			7.653 €/a	
Wegeanbindung/Zufahrt/ Außenanlagen etc.	KG 500	100.000 €	30	BT	30	3,0%	0,051	0			5.102 €/a	
E/ MSR-Technik	KG 400	200.000 €	30	ET	10	3,0%	0,051	10	0,744	20	23.446 €/a	
Baunebenkosten	KG 700	881.000 €	30	BT	30	3,0%	0,051	0			44.948 €/a	
Summe		4.403.000 €										288.769 €/a

laufende Kosten	Kennwerte	Betriebsmittelbedarf bei				spezifische Kosten	Kosten pro Tag	Betriebskosten 15.707.705 m ³ /a
		Wassermenge pro Stunde	pro TW-Tag 24 h/d	mit Lastfaktor pro Tag				
Sauerstoff (z=0,7; DOC = 6 g/m ³ , Ozon 10%wt)	42 g/m ³	157,2 kg/h	3.774,0 kg/d	50%	1.887,0	0,14 €/kg	264 €	96.424 €/a
Miete Sauerstofftank								6.000 €/a
Energie Ozonerzeugung (z=0,7; DOC = 6 g/m ³)	10 kWh/kg _{O₃}	157,2 kWh/h	3.774,0 kWh/d	50%	1.887,0	0,16 €/kWh	302 €	110.199 €/a
Energie Kühlwasserpumpe, sonstige ET	15 kWh	15,0 kWh	360,0 kWh/d	67%	241,2	0,16 €/kWh	39 €	14.086 €/a
Energie Restozonvernichtung	0,4 kWh / kg O ₃	6,3 kWh	151,0 kWh/d	67%	101,1	0,16 €/kWh	16 €	5.907 €/a
Instandhaltung (1,25 % BT, 3% MT/ET)								74.720 €/a
Personalkosten	15 h/Monat					40 €/h	29 €	7.200 €/a
Summe							650 €	314.537 €/a

Jahreskosten (netto)								
Variante 1	15.707.705 m ³ /a	behandelte Wassermenge	0,04 € pro m ³					603.306 €/a

7 Empfehlung

7.1 Erfordernis zur Mikroschadstoffelimination

Anhaltspunkte für das Erfordernis zum Ausbau der Kläranlage Bonn-Salierweg 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 Zielwerte der D4-Liste des MKULNV zur Bewertung der Oberflächengewässer nach dem Monitoringprogramm gemäß EG-WRRL im Ablauf der Kläranlage Bonn-Salierweg festgestellt. Die entsprechenden Parameter aus dem Monitoring und die Höhe der Überschreitung sind der Tabelle 7.1 zu entnehmen. Überschreitungen der Zielwerte sind vor allem bei den Antibiotika Clarithromycin und Erythromycin und 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 Salierweg 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				
			08.-09.03. 2016	09.-10.03. 2016	10.-11.03. 2016	11.-12.03. 2016	12.-13.03. 2016
Carbamazepin	ng/L	500	910	450	1.100	1.100	1.100
Clarithromycin	ng/L	100	290	290	380	350	460
Diclofenac	ng/L	50	1.100	1.500	1.400	1.400	1.700
Erythromycin	ng/L	20	240	320	320	380	460
Terbutryn	ng/L	65	86	78	83	83	74

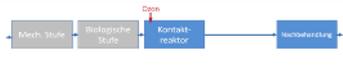
Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Ausbau einer Kläranlage um eine Stufe zur Mikroschadstoffelimination zurzeit noch nicht gesetzlich klar geregelt ist und auf freiwilliger Basis erfolgt. Eine gesetzliche Pflicht zum Ausbau kann für die Zukunft nicht ausgeschlossen werden.

7.2 Verfahrensempfehlung

Auf Grundlage der monetären und nicht monetären Bewertung empfehlen wir für den Bau einer Reinigungsstufe zur Mikroschadstoffelimination auf der Kläranlage Bonn-Salierweg die Umsetzung der Variante 1. Zwar sind die Investitionskosten der Variante 1 höher als die Investitionskosten der Varianten 2 und 3, jedoch liegen die laufenden Kosten der Anlage unter denen der Varianten 2 und 3.

Tabelle 7.2 fasst abschließend alle technischen Aspekte sowie die Kosten der empfohlenen Variante 1 „Bau einer Ozonung auf der Freifläche und Nachbehandlung im bestehenden Filter“ und vergleichend hierzu die Varianten 2 und 3 tabellarisch zusammen.

Tabelle 7.2: Zusammenfassende Darstellung der betrachteten Varianten

Variante	Variante 1 Ozonung mit biologischer Nachbehandlung im bestehenden Filter	Variante 2 PAK-Dosierung in den Filterüberstand	Variante 3 GAK-Filtration
Schema			
Verfahrens-konfigurationen	<p>$Q = 3.744 \text{ m}^3/\text{h}$ <u>Dosierung</u> $Z_{\text{spez}} = 0,7 \text{ mg O}_3 / \text{mg DOC}$ $B_{\text{O}_3} = 16 \text{ kg O}_3 / \text{h}$ <u>Kontaktbecken</u> $t_{\text{Kontakt}} = 20 \text{ min}$ $V_{\text{Kontakt}} = 1250 \text{ m}^3$ $H = 6 \text{ m}$ $A = 208 \text{ m}^2$ <u>LKW-Aufkommen</u> 34 LKW/a</p>	<p>$Q = 3.744 \text{ m}^3/\text{h}$ <u>Kontaktbereich</u> $V_{\text{vorh}} = 2.090 \text{ m}^3$ $t_{\text{Kontakt}} = 33 \text{ min}$ <u>PAK-Dosierung</u> $20 \text{ g PAK} / \text{m}^3$ <u>FM-Bedarf</u> $0,20 \text{ mg Fe} / \text{mg PAK}$ <u>LKW-Aufkommen</u> $17 + 21 = 38 \text{ LKW/a}$</p>	<p>$Q = 3.744 \text{ m}^3/\text{h}$ <u>Filterbormessung</u> $t_{\text{Kontakt}} = 27 \text{ min}$ $v_F = 3,95 \text{ m/h}$ $h_F = 1,80 \text{ m}$ <u>Standzeit und GAK-Bedarf</u> Standzeit = 0,82 Jahre GAK-Bedarf 1.098 Mg GAK/a <u>LKW-Aufkommen</u> 74 LKW/a</p>
Vorteile	Geringe Jahreskosten, kein zusätzlicher Schlamm	Kaum bauliche Änderungen, geringer Flächenbedarf (vorh. Infrastruktur), geringe Investitionskosten	geringe bauliche Änderungen, sehr geringer Flächenbedarf (vorh. Infrastruktur), kein zusätzlicher Schlamm
Nachteile	Flächenbedarf, höherer Bauaufwand	PAK als Betriebsmittel teuer, zusätzlich anfallendes Schlammvolumen	GAK als Betriebsmittel teuer, Vorversuche zwingend erforderlich, Eliminationsleistung nicht regelbar
Bewertung	12,2 Punkte	10,8 Punkte	8,2 Punkte

Literaturverzeichnis

DSADS (2015): „DSADS-Den Spurenstoffen auf der Spur“. Projekt des Landes Nordrhein-Westfalen, der Stadt Dülmen und des LIPPEVERBANDS. 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 [Letzter Zugriff: 12.01.2016].

EUWID (2010): Europäischer Wirtschaftsdienst "Wasser und Abwasser". Nr. 45, 9.11.2010 (2010).

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)

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