



Abschlussbericht

**Machbarkeitsstudie
zur Mikroschadstoffelimination
auf dem Klärwerk Krefeld**

Kurzfassung

Impressum

Auftraggeber: EGK Entsorgungsgesellschaft Krefeld GmbH & Co. KG

Auftragnehmer: **Sweco GmbH**

Postfach 30 01 06
50771 Köln

Graeffstraße 5
50823 Köln

Bearbeitung: Dr.-Ing. Ulf Schulze-Hennings
Angelika Bahles, M.Sc.
Dr.-Ing. Demet Antakyali
Sandra Ante

Bearbeitungszeitraum: Februar 2017 – Oktober 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Hintergründe der Mikroschadstoffelimination	1
2	Kurzbeschreibung des Einzugsgebietes und der Verfahrenstechnik des Klärwerks Krefeld	2
3	Abwasseranalyse und Auslegungswerte	3
3.1	Standardabwasserparameter und Mikroschadstoffe	3
3.2	Bromidkonzentrationen und Ozonzehrung	6
3.3	Auslegungswassermenge	7
3.4	Eliminationsraten	8
4	Ausarbeitung von technischen Anlagenkonzepten	9
4.1	Randbedingungen auf dem Klärwerk Krefeld	9
4.2	Variante 1: Ozonung mit Nachbehandlung in bestehender Filtration	11
4.3	Variante 2: PAK-Dosierung in den Filterüberstand	11
4.4	Variante 3: PAK-Dosierung in das Belebungsbecken	12
4.5	Variante 4: PAK-Dosierung in den Filter und Abtrennung mittels Membranen	13
4.6	Variante 5: PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken im Filter und Abtrennung in verbleibenden Filterkammern	14
4.7	Variante 6: GAK-Filtration in den bestehenden Filterbecken	15
4.8	Variante 7: Chlordioxidbehandlung und zusätzliche Behandlung im GAK-Filter	15
4.9	Kostenermittlung	16
5	Variantenbewertung	17
5.1	Vorgehensweise zur Verfahrensbewertung	17
5.2	Verfahrensbewertung	17
6	Fazit	19
6.1	Erfordernis zur Mikroschadstoffelimination	19
6.2	Verfahrensempfehlung	21
7	Literaturverzeichnis	22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Wassermengen $Q_{T,h}$ und Q_h im Zeitraum 01/2013-07/2016	7
Abbildung 3-2: Auslegungswassermenge und damit behandelbare Jahresabwassermenge	8
Abbildung 4-1: Potentielle Fläche zum Bau einer Stufe zur Mikroschadstoffelimination im Bereich der Filtration auf dem Klärwerk Krefeld (ELWAS-WEB, 2016)	10
Abbildung 4-2: Lageplan der Variante 1 auf dem Klärwerk Krefeld	11
Abbildung 4-3: Lageplan der Variante 2 auf dem Klärwerk Krefeld	12
Abbildung 4-4: Anordnungsskizze der Variante 3 auf dem Klärwerk Krefeld	13
Abbildung 4-5: Lageplan der Variante 4 auf dem Klärwerk Krefeld	14
Abbildung 4-6: Lageplan der Variante 5 auf dem Klärwerk Krefeld	14
Abbildung 4-7: Lageplan der Variante 6 auf dem Klärwerk Krefeld	15
Abbildung 4-8: Lageplan der Variante 7 auf dem Klärwerk Krefeld	16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Bewertungsmaßstab der Mikroschadstoffkonzentrationen im Oberflächengewässer im Ablauf des Klärwerks Krefeld	3
Tabelle 3-2: Konzentrationen der Arzneimittelwirkstoffe im Zu- und Ablauf des Klärwerks Krefeld	4
Tabelle 3-3: Konzentrationen der Östrogene im Zu- und Ablauf des Klärwerks Krefeld	4
Tabelle 3-4: Konzentrationen der Pestizide/PBSM im Zu- und Ablauf des Klärwerks Krefeld	4
Tabelle 3-5: Konzentrationen der Korrosionsschutzmittel, Moschusduftstoffe, perfluorierten Tenside und Süßstoffe im Zu- und Ablauf des Klärwerks Krefeld	5
Tabelle 3-6: Ergebnis des Monitorings zur Datenverdichtung, Konzentrationen in $\mu\text{g/L}$	5
Tabelle 3-7: Prozentuale Anteil der Frachten an der Gesamtfracht	6
Tabelle 3-8: Standortrelevante Substanzen und sensitive Leitparameter	8
Tabelle 4-1: Kostenvergleich der Varianten 1 bis 6	16
Tabelle 5-1: Bewertung der betrachteten Varianten	18
Tabelle 5-2: Ranking der Varianten	18
Tabelle 6-1: Überschreitungen der Bewertungskriterien beim erweiterten Monitoring des Ablaufs der Kläranlage	19
Tabelle 6-2: Überschreitungen der Bewertungskriterien beim Monitoring zur Datenverdichtung (Konzentrationen in $\mu\text{g/L}$)	20

1 Veranlassung und Hintergründe der Mikroschadstoffelimination

Der Begriff „Mikroschadstoffe“ ist in den vergangenen Jahren immer mehr in den Fokus der Wissenschaft sowie der Öffentlichkeit gerückt. Der Begriff 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. Beispielsweise sind pharmazeutische Wirkstoffe, Flammschutzmittel, Biozide und weitere Industriechemikalien in dieser Gruppe zu nennen. Mikroschadstoffe liegen in der Regel in sehr niedrigen Konzentrationen vor, dennoch konnte in den letzten Jahren 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).

Vor dem Hintergrund des demographischen Wandels und der industriellen Weiterentwicklung kann die Mikroschadstoffproblematik in Zukunft drastischer werden. Beispielsweise werden Humanpharmaka insbesondere durch die steigende individuelle Lebenserwartung und des damit verknüpften steigenden Arzneimittelkonsums künftig in noch größerer Anzahl und Menge über die kommunale Abwasserentsorgung in die Umwelt eingebracht. Aufgrund der Persistenz, des Bioakkumulationspotenzials und der Toxizität von Mikroschadstoffen, besteht zur langfristigen Sicherung einer hohen Wasserqualität grundsätzlich Handlungsbedarf zur Reduktion der Einträge von Mikroschadstoffen in Gewässer.

Die umweltschädlichen Stoffe sollen in der Regel möglichst an der Quelle minimiert und ggf. durch ungeschädliche 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 den 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 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 zurzeit als umsetzbare Techniken herauskristallisiert.

NRW setzt bei dem Thema der Mikroschadstoffelimination auf einen ganzheitlichen Ansatz auf unterschiedlichen Ebenen. Ein Ansatz ist es, Stoffe möglichst an der Quelle zu verhindern, z.B. durch die Substitution gefährlicher Stoffe durch ungefährlichere Alternativen. Einen ähnlichen Ansatz verfolgte das Projekt „Den Spurenstoffen auf der Spur“ des Landes Nordrhein-Westfalen, der Stadt Dülmen und des Lippeverbands (DSADS, 2016). Dieses hatte u.a. das Ziel, die Bevölkerung hinsichtlich eines bewussteren Umgangs mit Arzneimitteln aufzuklären bzw. zu sensibilisieren. Zudem sollen aber auch die Abwasserreinigungsanlagen ausgebaut und die Trinkwasseraufbereitungstechnik modernisiert werden. Das Umweltministerium des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW) fördert derzeit dazu durch das Investitionsprogramm „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW“ u. a. großtechnische Anlagen zur Mikroschadstoffelimination.

2 Kurzbeschreibung des Einzugsgebietes und der Verfahrenstechnik des Klärwerks Krefeld

Das Klärwerk Krefeld behandelt das gesamte Abwasser der Stadt Krefeld und zusätzlich das Abwasser des Ortsteils Moers-Vennikel. Dieses wird der Kläranlage über eine separate Druckleitung zugeleitet. Das Entwässerungssystem des Einzugsgebiets ist als Mischsystem ausgeführt.

Als Indirekteinleiter sind beispielsweise ein Edelstahlwerk, ein Saftproduzent und ein Produzent von Verzuckerungsprodukten an das Klärwerk angeschlossen. Zusätzlich wird Schlamm aus dem Chempark Krefeld-Uerdingen über eine separate Druckleitung zum Klärwerk gefördert.

Das im Klärwerk gereinigte Abwasser wird in den Rhein eingeleitet. Dieser gilt in Klärwerksnähe als erheblich verändertes Gewässer, wobei ca. 1,5 km flussabwärts der Chempark Krefeld-Uerdingen die gereinigten Abwässer und flussaufwärts die Abwässer von drei Kläranlagen der Städte Düsseldorf (Nord und Süd) und Neuss (Ost) dem Rhein zugeführt werden. Der ökologische Zustand wird als unbefriedigend und der chemische Zustand als nicht gut eingestuft. (ELWAS-WEB, 2016) Der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) des Rheins beträgt an der Einleitstelle 961 m³/s.

Das von der Entsorgungsgesellschaft Krefeld betriebene Klärwerk Krefeld wurde 1974 in Betrieb genommen. Ausgelegt ist das Klärwerk für 1,2 Mio. EW. Die derzeitige Auslastung liegt bei knapp 50 % bezogen auf den CSB mit einem spezifischen Anfall von 120 g/E*d. Nach der Abwasserverordnung (AbwV) ist das Klärwerk in die Größenklasse 5 einzuordnen. Der Trockenwetterzufluss laut Auslegung beträgt $Q_t = 10.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Der maximale Regenwetterzufluss beträgt $Q_m = 24.120 \text{ m}^3/\text{h}$. Abgeleitet werden dürfen laut wasserrechtlicher Erlaubnis 22.000 m³/h.

Das Abwasser des Einzugsgebietes wird im KW Krefeld zunächst in einer Rechenanlage und einem Sandfang mechanisch gereinigt und dann zweistufig biologisch behandelt. Diese zweistufige Behandlung besteht aus einer Hochlaststufe mit Zwischenklärung und einer Schwachlaststufe mit anschließender Nachklärung. Die Schwachlastbelebung ist als vorgeschaltete Denitrifikation ausgeführt. Zur Abscheidung noch vorhandener Feststoffe wird das Abwasser durch eine Filtrationsstufe geleitet. Die biologische Phosphorentfernung findet in einem anaeroben Becken statt. Zusätzlich wird auf dem KW Krefeld eine chemische Simultanfällung von Phosphor mit Eisensalzen im Ablauf der Zwischenklärung eingesetzt. Derzeit wird die Filtration nur teilweise genutzt.

3 Abwasseranalyse und Auslegungswerte

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 Daten für den gesamten organischen Kohlenstoff (TOC), Gesamtstickstoff (N_{ges}), Nitritstickstoff (NO₂-N), Nitratstickstoff (NO₃-N), Ammoniumstickstoff (NH₄-N), Phosphat-Phosphor (PO₄-P) und Gesamtphosphor (P_{ges}) vor. Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) wurde über Faktor aus dem TOC berechnet.

Aus den so gemessenen Konzentrationen der verschiedenen Parameter ergeben sich keine Einschränkungen für die spätere Verfahrenswahl für die Stufe zur Mikroschadstoffelimination. Im Fall einer großtechnischen Realisierung einer Stufe zur Mikroschadstoffelimination sollten die angenommenen Werte jedoch durch zusätzliche separate Messungen verifiziert werden.

Die zweite Gruppe beinhaltet eine Auswahl an sogenannten Mikroschadstoffen. Die ermittelten Konzentrationen der Mikroschadstoffe sind den Orientierungswerten oder Vorschlägen für Umweltqualitätsnormen (UQN) zur Beurteilung des chemischen und biologischen Status der Oberflächengewässernach Wasser-rahmenrichtlinie gegenübergestellt worden. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgte nach dem Schema in Tabelle 3-1.

Tabelle 3-1: Bewertungsmaßstab der Mikroschadstoffkonzentrationen im Oberflächengewässer im Ablauf des Klärwerks Krefeld

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

Die Bewertung der Mikroschadstoffkonzentrationen im Ablauf der Kläranlage Krefeld zeigt, dass die Konzentrationen von Clarithromycin, Erythromycin, Diclofenac, Sotalol und Sulfamethoxazol den jeweiligen UQN-Vorschlag zum Teil sehr deutlich überschreiten. Gleiches gilt auch für die Röntgenkontrastmittel Amidotrizoesäure, Iomeprol und Iopamidol. Allerdings handelt es sich bei dem Orientierungswert von um einen präventiven Vorsorgewert. Dieser Vorsorgewert beruht auf einer Konvention und ist fachlich nicht abgeleitet. Bei den Pestiziden wurde lediglich für den Stoff Terbutryn in einer Probe eine mäßige Überschreitung analysiert. Die weiteren Proben zeigten für die Pestizide keine Auffälligkeiten. In den nachfolgenden Tabellen sind die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 3-2: Konzentrationen der Arzneimittelwirkstoffe im Zu- und Ablauf des Klärwerks Krefeld

		Orientierungswerte und UON	Trockenwetter		Regenwetter		Ablauf 14.12.2016
			Zulauf 30.06.2016	Ablauf 30.06.2016	Zulauf 18.11.2016	Ablauf 18.11.2016	
Arzneimittelwirkstoffe							
4-Acetamidoantipyrin	ng/L		NB ³⁾	800	7.200	860	200
4-Formylaminoantipyrin	ng/L		NB ³⁾	340	1.800	1.400	530
Amidotrizoesäure	ng/L	100	NB ³⁾	1.200	1.100	1.400	2.100
Carbamazepin	ng/L	500	400	360	300	400	870
Cardensartancilexetil	ng/L		220	<20	< 250	< 250	
Ciprofloxacin	ng/L		-	-			
Clarithromycin	ng/L	20	470	60	< 50	1.600	70
Diclofenac	ng/L	100	670	320	300	500	1.000
Eprosartan	ng/L		120	<20	550	140	
Erythromycin	ng/L	20	180	80	1.400	190	530
Gabapentin	ng/L		NB ³⁾	3.400	5.300	900	670
Guanylharstoff	ng/L		<5000	<5000	< 5000	< 5000	
lomeprol	ng/L	100	3.400	2.900	570	1.000	1.200
Iopamidol	ng/L	100	1.500	1.100	3.800	3.600	2.700
Metformin	ng/L		1.600	1.800	7.000	800	1.000
Metoprolol	ng/L	7.300	1.600	290	1.600	1.100	780
Olmesartan	ng/L		230	230	300	300	
Sotalol	ng/L	100	NB ³⁾	170	230	230	450
Sulfamethoxazol	ng/L	150	NB ³⁾	220	370	160	840

Tabelle 3-3: Konzentrationen der Östrogene im Zu- und Ablauf des Klärwerks Krefeld

		Orientierungswerte und UON	Trockenwetter		Regenwetter		Ablauf 14.12.2016
			Zulauf 30.06.2016	Ablauf 30.06.2016	Zulauf 18.11.2016	Ablauf 18.11.2016	
Östrogene, östrogen wirksame Substanzen							
17a-Estradiol	ng/L		NB ³⁾	<20	< 20	< 20	
17b-Estradiol	ng/L	0,4	NB ³⁾	<20	< 20	< 20	
4-n-Octylphenol	ng/L	100	<300	<300	< 300	< 300	< 300
b-Estradiol - 3 - benzoat	ng/L		NB ³⁾	<20	< 20	< 20	
Bisphenol A	ng/L	100	<10.000	<10.000	< 10.000	< 10.000	
Estriol	ng/L		250	<20	< 20	< 20	
Estron	ng/L		NB ³⁾	<20	< 20	< 20	

Tabelle 3-4: Konzentrationen der Pestizide/PBSM im Zu- und Ablauf des Klärwerks Krefeld

		Orientierungswerte und UON	Trockenwetter		Regenwetter		Ablauf 14.12.2016
			Zulauf 30.06.2016	Ablauf 30.06.2016	Zulauf 18.11.2016	Ablauf 18.11.2016	
Pestizide /PBSM							
2,6-Mecoprop			< 50	70	< 50	< 50	< 50
Diuron	ng/L	200	<50	140	< 50	< 50	50
Flufenacet	ng/L	40	<50	<50	< 50	< 50	
Isoproturon	ng/L	300	<50	<50	< 50	< 50	< 100
Mecoprop	ng/L	100	<50	70	<50	50	
Propiconazol	ng/L	1.000	<50	<50	< 50	< 50	
Tebuconazol	ng/L	1.000	<50	<50	< 50	< 50	
Terbutryn	ng/L	65	<50	<50	< 50	70	

Tabelle 3-5: Konzentrationen der Korrosionsschutzmittel, Moschusduftstoffe, perfluorierten Tenside und Süßstoffe im Zu- und Ablauf des Klärwerks Krefeld

		Orientierungswerte und UQN	Trockenwetter		Regenwetter		Ablauf 14.12.2016
			Zulauf 30.06.2016	Ablauf 30.06.2016	Zulauf 18.11.2016	Ablauf 18.11.2016	
Korrosionsschutzmittel							
1H-Benzotriazol	ng/L	10.000	5.400	4.700	4.300	4.800	5.300
4-Methyl-1H-Benzotriazol	ng/L		670	1.100	1.200	1.500	1.700
5,6-Methyl-1H-Benzotriazol	ng/L		<10	<10	< 10	< 10	< 10
5-Methyl-1H-Benzotriazol	ng/L		430	400	280	440	360
Moschusduftstoffe							
Galaxolide (HHCB)	ng/L	7.000	-	-	-	-	
Perfluorierte Tenside							
Perfluorooctansulfonsäure	ng/L	100	<100	<100	< 100	< 100	< 100
Süßstoffe							
Acesulfam	ng/L		29.000	720			660

Zur Datenverdichtung wurden die Abläufe von fünf großen in Krefeld ansässigen Krankenhäusern untersucht sowie der Zu- und entsprechend der angenommenen Fließzeiten und der Verweilzeit in der Kläranlage der Ablauf.

In Tabelle 3-6 sind die gemessenen Konzentrationen der untersuchten Stoffe aufgeführt. Die grau hinterlegten Analysenwerte sind seitens des Labors unterhalb der Bestimmungsgrenze, der Orientierungswert bzw. die UQN liegt aber deutlich unterhalb der Bestimmungsgrenze bzw. im gleichen Bereich.

Tabelle 3-6: Ergebnis des Monitorings zur Datenverdichtung, Konzentrationen in µg/L

Parameter	Ablauf Krefelder Krankenhäuser					Kläranlage		Orientierungswerte und UQN
	KH1	KH2	KH3	KH4	KH5	Zulauf	Ablauf	
						24.06.2020	25.06.2020	
	23.06.2020							
Acesulfam-K	50	70	130	58	84	68	0,44	
1H-Benzotriazol	140	75	8,1	510	7,4	11	6	10
4-Methyl-1H-benzotriazol	< 0,05	< 0,05	0,92	34	0,22	3,3	1,4	
5-Methyl-1H-benzotriazol	< 0,05	< 0,05	1,4	41	0,25	1,7	0,5	
5,6-Dimethyl-1H-benzotriazol	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	10
Perfluorooctansulfonsäure	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1
4-Acetamidoantipyrin	130	110	120	120	55	170	0,4	
Amidotrizoesäure	55	< 0,05	1,8	0,5	3,9	1,4	2,8	0,1
Candesartan Cilexetil	< 0,50	< 0,25	< 1,0	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	
Carbamazepin	0,16	4,9	2	0,8	0,99	0,4	0,52	0,5
Clarithromycin	< 0,05	< 0,10	2,8	< 0,10	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,02
Diclofenac	0,24	0,47	0,21	0,16	9	0,5	0,25	0,1
1,1-Dimethylbiguanid	180	200	590	170	330	150	0,81	-
Erythromycin	0,68	< 0,02	< 0,02	3,5	0,14	0,7	0,02	0,02
4-Formylaminoantipyrin	58	35	38	86	15	6	0,69	
Gabapentin	5,5	8,7	0,5	20	1	6,3	0,7	
lomeprol	2,9	< 0,05	2,4	63	0,5	30	1,1	0,1
Iopamidol	< 0,50	< 0,50	< 0,50	9	< 0,50	< 0,50	< 0,50	0,1
Metoprolol	3,2	3,9	3,8	3,9	8,3	2,9	0,5	7,3
Olmesartan	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,43	0,22	0,44	
Sotalol	< 0,20	< 0,02	< 0,20	< 0,20	1	0,2	0,13	0,1
Sulfamethoxazol	0,09	< 0,05	40	2,3	1,5	0,3	0,3	0,15

Allgemein festhalten lässt sich auf Basis dieser Datenauswertung, dass die im erweiterten Monitoring auffälligen Substanzen auch in den beprobten Krankenhausabläufen in unterschiedlichen Konzentrationsbereichen zu finden sind. Mit Ausnahme der Parameter Clarithromycin und Iopamidol werden die Orientierungswerte bzw. UQN im Ablauf der Kläranlage mäßig bis sehr deutlich überschritten.

Für eine Abschätzung, inwieweit die Abläufe Krankenhäuser die Belastung der Kläranlage beeinflussen wird eine Frachtabschätzung vorgenommen. Die Frachteinträge werden ins Verhältnis zur Gesamtfracht im Zulauf der Kläranlage gesetzt (Tabelle 3-7).

Für die Parameter 1H-Benzotriazol, Amidotrizoesäure, Clarithromycin, Diclofenac, Erythromycin, Iomeprol, Sotalol und Sulfamethoxazol ergeben sich die in Tabelle 3-7 dargestellten Frachten:

Tabelle 3-7: Prozentuale Anteil der Frachten an der Gesamtfracht

Probestelle	Prozentualer Anteil der Abwasserströme am Gesamt-abwasserstrom	Prozentualer Anteil der Frachten an der Gesamtfracht im Zulauf zur Kläranlage							
		1H-Ben-zotriazol	Amidotri-zoesäure	Clarithromy-cin	Diclofenac	Erythromy-cin	Iomeprol	Sotalol	Sulfametho-xazol
KH 1	0,49%	6,3%	19,4%	0,5%*	0,2%	0,5%	0,05%	7,91%*	0,15%
KH 2	0,13%	0,9%	0,005%	0,27%*	0,13%	0,004%*	0,000%	2,62%*	0,02%
KH 3	0,15%	0,1%	0,2%	8,6%	0,06%	0,004%*	0,01%	2,93%*	20,58%
KH 4	0,09%	4,0%	0,03%	0,2%*	0,03%	0,4%	0,2%	3,88%*	0,66%
KH 5	0,04%	0,0%	0,1%	0,04%*	0,8%	0,01%	0,001%	0,11%	0,22%

* Fracht-Maximum, da Frachtberechnung anhand der Bestimmungsgrenze vorgenommen wurde

Die Tagesabwassermengen der Krankenhäuser mit im Mittel nur rd. 0,2 % machen nur einen sehr geringen Anteil an der Gesamtabwassermenge aus, die in die Kläranlage eingeleitet wird. Werden hingegen die Anteile der einzelnen Frachteinträge betrachtet wird deutlich, dass der prozentuale Beitrag der Krankenhäuser am Frachteintrag einzelner Substanzen durchaus bedeutend ist.

Anzumerken ist, dass an dieser Stelle nur eine grobe Abschätzung über den Einfluss der Krankenhäuser an der Belastungssituation der Kläranlage erfolgen kann, da nur eine Analyse je Krankenhaus und Substanz vorliegt. Für eine genaue Ermittlung ist hier ein umfangreiches Monitoring erforderlich, um bestimmte Substanzen, die die Kläranlage belasten, eindeutig den Krankenhäusern zuordnen zu können.

3.2 Bromidkonzentrationen und Ozonzehrung

In Ozonversuchen vor Durchführung dieser Studie wurden im Ablauf des Klärwerks erhöhte AOX-Konzentrationen gemessen. Im Rahmen dieser Studie werden diese Aspekte jedoch nicht weiter betrachtet. Es ist jedoch sinnvoll, beim Vorhaben einer großtechnischen Umsetzung eines Ozonverfahrens im Vorfeld Laboruntersuchungen hinsichtlich der Bromidkonzentration, des Bromatbildungspotentials und der Ozonzehrung durchzuführen.

3.3 Auslegungswassermenge

In Abbildung 3-1 ist die stündlichen Ablaufwassermengen des KW Krefeld im Zeitraum zwischen Januar 2013 und Juli 2016 abgebildet. Als horizontale rote Linie das Maximum der nach ATV-DVWK A 198 ermittelten $Q_{T,h,max,mM}$ über die Jahre 2013 bis 2015 von 6.114 m³/h eingezeichnet.

Auf Grundlage dieses Wertes wird die Auslegungswassermenge, mit der die nachfolgende Erarbeitung technischer Anlagenkonzepte durchgeführt wird, in Abstimmung mit der EGK Krefeld auf 8.000 m³/h festgelegt. In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass im Mischwasserfall auftretende Spitzenzuflüsse an der Filteranlage bzw. den nachgeschalteten Verfahren zur Mikroschadstoffelimination vorbeigeleitet werden.

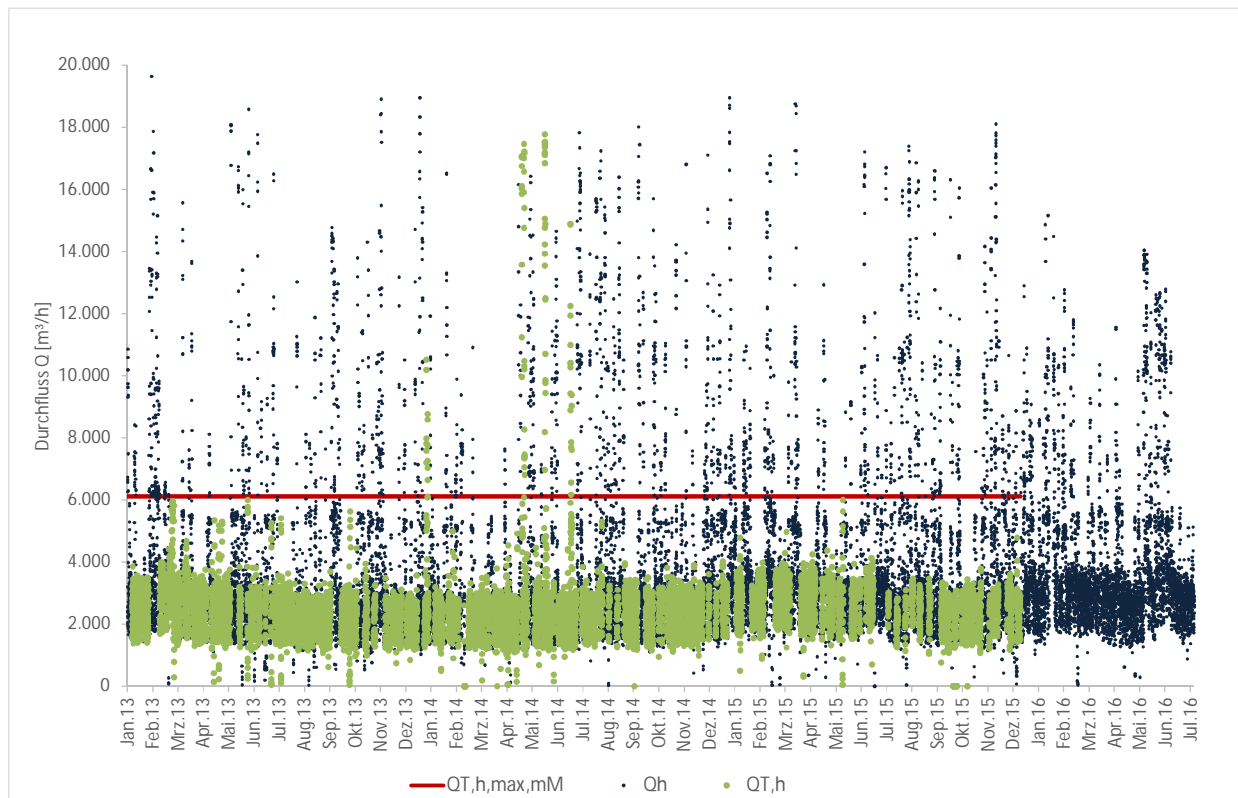


Abbildung 3-1: Wassermengen $Q_{T,h}$ und Q_h im Zeitraum 01/2013-07/2016

Aus Abbildung 3-2 geht hervor, dass mit der Auslegungswassermenge zwischen 93 und 96 % der Jahresabwassermenge behandelt werden können. Damit ist der geforderte Nachweis einer Behandlung von mindestens 70 % der Jahresabwassermenge erbracht (KOM-M.NRW, 2016).

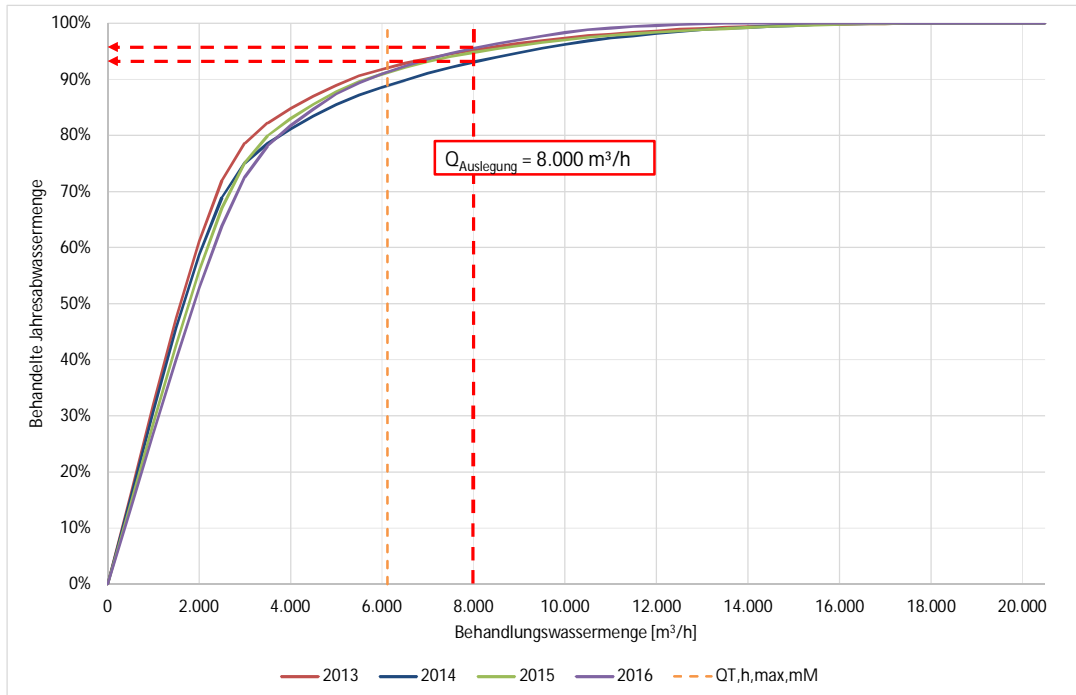


Abbildung 3-2: Auslegungswassermenge und damit behandelbare Jahresabwassermenge

Bei einer Jahresabwassermenge im Jahr 2013 in Höhe von 27.342.657 m³/a können in der Stufe zur Mikroschadstoffelimination jährlich 26.035.242 m³/a behandelt werden. Im Jahr 2014 können von der Jahresabwassermenge in Höhe von 27.955.532 m³/a 26.022.868 m³/a behandelt werden. Für das Jahr 2015 können von den 30.421.703 m³/a Jahresabwassermenge 28.834.505 m³/a behandelt werden.

Im Falle einer konkreten Planung ist die Auslegungswassermenge der Anlage zur Mikroschadstoffelimination in Absprache mit den Genehmigungsbehörden festzulegen.

3.4 Eliminationsraten

Die Auslegung der Stufe zur Mikroschadstoffelimination erfolgt derart, dass eine Elimination der standortrelevanten Substanzen und der sensitiven Leitparameter zu 80 % sichergestellt wird (Tabelle 3-8). Die Elimination wird bestimmt durch Messungen im Zulauf zur biologischen Stufe und dem Ablauf der Stufe zur Mikroschadstoffelimination und bezieht sich auf die Summe der standortrelevanten Substanzen und der sensitiven Leitparameter (KOM-M.NRW, 2016).

Tabelle 3-8: Standortrelevante Substanzen und sensitive Leitparameter

Standortrelevante Substanzen	Sensitive Leitparameter (KOM-M.NRW, 2016)
<i>Iomeprol, Iopamidol, Amidotrizesäure, Erythromycin</i>	1H-Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol, Clarithromycin, Sulfamethoxacol

4 Ausarbeitung von technischen Anlagenkonzepten

4.1 Randbedingungen auf dem Klärwerk Krefeld

Mögliche strukturelle Randbedingungen, die bei der Vorauswahl der zu betrachtenden Varianten zu berücksichtigen sind, sind die Nutzbarkeit vorhandener Bausubstanz, die Flächenverfügbarkeit für Neubauten und die Hydraulik der bestehenden Anlage.

Auf dem Klärwerk Krefeld kommt die vorhandene Filtration zur Einbindung als Stufe zur Mikroschadstoffelimination in Betracht. Diese kann genutzt werden, um Pulveraktivkohle in das Abwasser zu dosieren, oder es kann eine Umrüstung zu einem GAK-Filter oder zu einer Membranstufe erfolgen. Auch als Nachbehandlung für eine Ozonung oder zur Abscheidung von Pulveraktivkohle, die z. B. in einem vorgeschalteten Kontaktbecken zudosiert wurde, lässt sich die vorhandene Filtration nutzen. Neben der Filtration steht ansonsten keine nutzbare Bausubstanz für die Errichtung einer Stufe zur Mikroschadstoffelimination zur Verfügung.

Ergänzend zu der bestehenden Struktur sind zur Vorauswahl der zu betrachtenden Varianten zudem Freiflächen und mögliche weitere unnutzbare Flächen von Interesse, auf denen ein Neubau der Anlage zur Mikroschadstoffelimination möglich ist. Da auf dem Klärwerk Krefeld die bestehende Filtration in die Stufe zur Mikroschadstoffelimination eingebunden werden soll, wurden Flächen im Bereich der Filtration identifiziert, die genutzt werden können. Eine Veranschaulichung dieser möglichen Flächen ist Abbildung 4-1 zu entnehmen. Es stehen dort lediglich relativ kleine Flächen zur Nutzung bzw. Umnutzung zur Verfügung.

Als drittes Kriterium bei der Auswahl möglicher Varianten ist die Hydraulik der bestehenden Anlage heranzuziehen. Für die Einbindung der Stufe zur Mikroschadstoffelimination ergibt sich lediglich eine nutzbare Wasserspiegeldifferenz von ca. 0,65 m (WSp. Nachklärung 29,55 m ü. NN abzüglich WSp. Pumpenvorlage vor Filtration 28,9 m ü. NN). Dies reicht in der Regel für die Durchfahrung z. B. einer Ozonanlage nicht aus. Daher wäre eine zusätzliche Anhebung des Wassers notwendig. Für die Varianten, die in der bestehenden Filtration umgesetzt werden, ist eine zusätzliche Anhebung des Wassers nicht notwendig.

Für die Auswahl der umsetzbaren Verfahrensvarianten sind neben den strukturellen Randbedingungen ebenfalls die Randbedingungen, die aus den Abwassereigenschaften resultieren, relevant. Diese können Aufschluss darüber geben, ob eine Verfahrensvariante grundsätzlich in Frage kommt oder aufgrund der Abwassereigenschaften auszuschließen ist. Dies betrifft insbesondere die Ozonung, bei der die im Abwasser vorliegende Konzentration von Bromid ein wichtiges Entscheidungskriterium ist, da daraus bei der Ozonung potenziell kanzerogenes Bromat gebildet werden kann. Für die vorliegende Studie stehen keine Daten zur Bromidkonzentration zur Verfügung, daher kann keine Einschätzung über die Disposition zur Bromatbildung im Rahmen z.B. einer Ozonung erfolgen. Nach Angaben des Betreibers der MKVA Krefeld arbeitet die Rauchgaswäsche abwasserfrei. Lediglich die Absalzung der Kessel (Abschlammwasser) werden über den Schlackebunker dem Klärwerk zugeführt. Bromidkonzentrationen im Ablauf, wie sie im Abwasser von Müllverbrennungsanlagen in der Regel vorliegen, sind hier nicht nachweisbar.

Die Konzentration des DOC von 9 mg_{DOC}/L (aus dem 85-Percentil des TOC berechnet), liegt im für Anlagen zur Mikroschadstoffelimination unbedenklichen Bereich, so dass sich keine Einschränkungen hinsichtlich der Auswahl der zu betrachtenden Varianten ergeben. Im Fall einer großtechnischen Realisierung einer Stufe zur Mikroschadstoffelimination sollten die angenommenen bzw. vorliegenden Werte jedoch durch Messungen verifiziert werden.

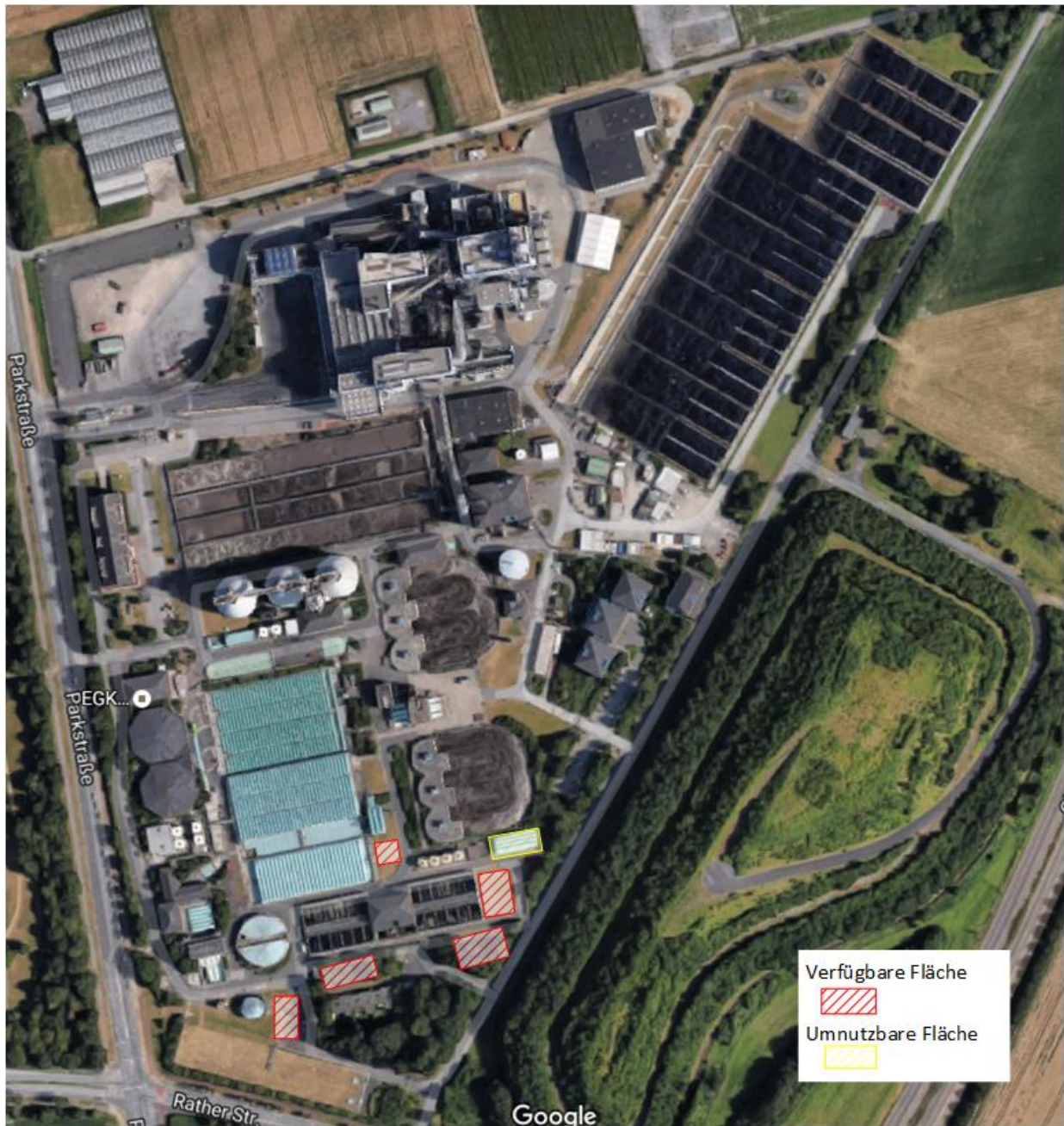


Abbildung 4-1: Potentielle Fläche zum Bau einer Stufe zur Mikroschadstoffelimination im Bereich der Filtration auf dem Klärwerk Krefeld (ELWAS-WEB, 2016)

Für das Klärwerk Krefeld werden somit folgende Anlagenkonzepte detailliert ausgearbeitet:

- Variante 1: Ozonung und Nachbehandlung in bestehender Filtration
- Variante 2: PAK-Dosierung in den Filterüberstand
- Variante 3: PAK-Dosierung in das Belebungsbecken
- Variante 4: PAK-Dosierung in die bestehenden Filterkammern und Abtrennung mittels Membranen
- Variante 5: PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken im Filter und Abtrennung in bestehender Filtration

Variante 6: GAK-Filtration in den bestehenden Filterkammern

Variante 7: Chlordioxidbehandlung und zusätzliche Behandlung im GAK-Filter (rein konzeptionelle Betrachtung)

4.2 Variante 1: Ozonung mit Nachbehandlung in bestehender Filtration

Bei der Variante 1 handelt es sich um die Ozonung des Ablaufs der Nachklärung in einem Teil der bestehenden Filterkammern. Die biologische Nachbehandlung wird in den verbleibenden Filterkammern der Filtration realisiert. Das Wasser wird über die vorhandenen vier Pumpen in die Filtration gehoben.

Abbildung 4-2 zeigt den Lageplan der Variante 1 auf dem KW Krefeld. Hier dargestellt sind die Ozonbecken und die Filterkammern zur Nachbehandlung sowie der Sauerstofftank und das Betriebsgebäude inkl. Ozongeneratoren.

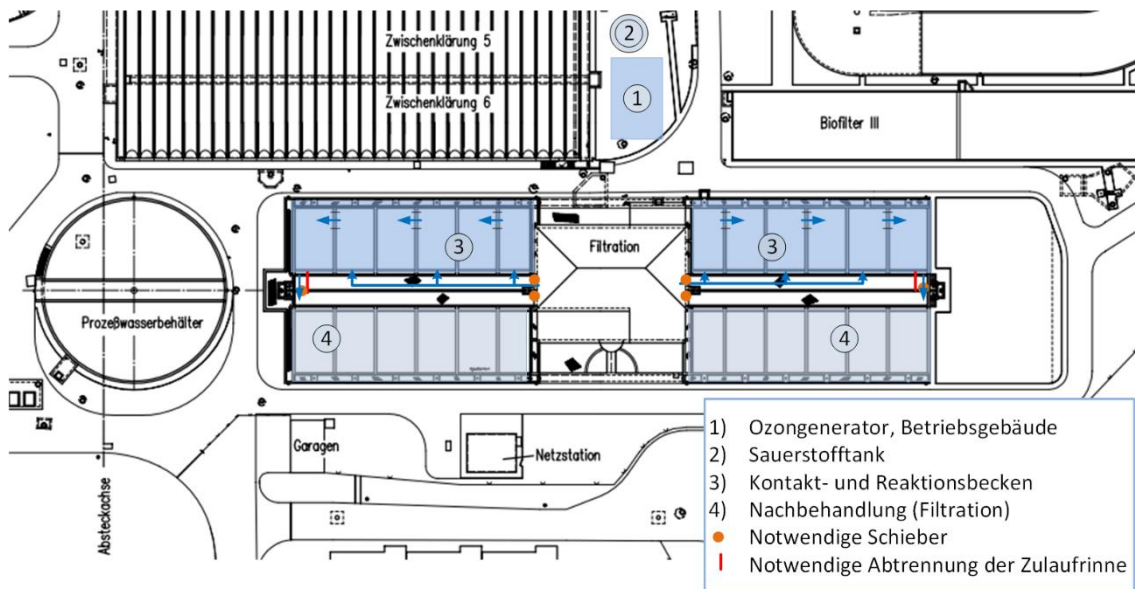


Abbildung 4-2: Lageplan der Variante 1 auf dem Klärwerk Krefeld

Für die Ozonung wird jeweils eine Seite pro Straße umgebaut bzw. umgerüstet. Von den Becken wird jedes zweite mit Wasser beaufschlagt und dort über Diffusoren mit Ozon begast. Die jeweils daran anschließenden Becken, zu denen ein Durchlass installiert wird, dienen als Reaktionsbecken. Das mit Ozon behandelte Abwasser wird im Anschluss in der bestehenden Filtration biologisch nachbehandelt.

4.3 Variante 2: PAK-Dosierung in den Filterüberstand

Die Variante 2 beinhaltet die PAK-Dosierung in den Filterüberstand der bestehenden Filtrationsbecken. Die Filtration ist dabei sowohl Kontaktreaktor als auch Abtrennungseinheit für die Pulveraktivkohle. Dosierte wird die PAK in den Zulauf zu den Filterbecken und die Abtrennung erfolgt direkt im Anschluss in der Zweischichtfiltration. Bei dieser Variante sind keine Änderungen der Prozessabfolge oder Änderung der Hydraulik notwendig. Über das Rückspülwasser der Filtration wird die PAK zurück in die biologische Stufe geführt, wo sie weiter beladen wird. Für diese Variante sind ein PAK-Silo und eine PAK-Dosiervorrichtung neu vorzusehen. Es wurde dafür eine Fläche gewählt, die möglichst nah am Zulaufbereich der Filtration liegt (Abbildung 4-3).

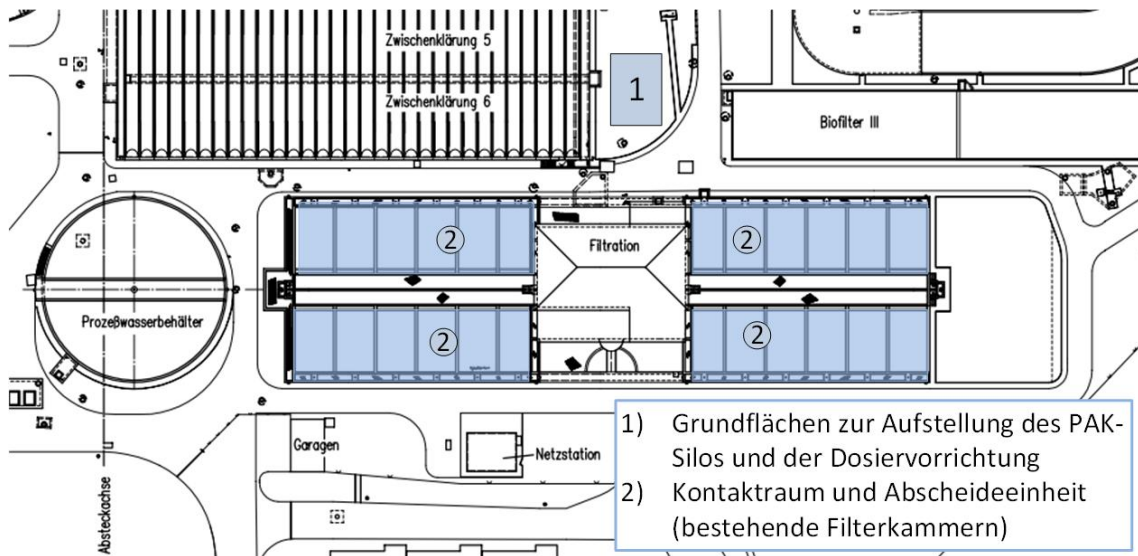


Abbildung 4-3: Lageplan der Variante 2 auf dem Klärwerk Krefeld

4.4 Variante 3: PAK-Dosierung in das Belebungsbecken

Die dritte Variante ist die simultane PAK-Dosierung in die Belebungsbecken. Dabei sind keine Änderungen der Prozessfolge und keine Änderungen der Hydraulik notwendig. Zur Abtrennung der PAK sind keine zusätzlichen Abtrennungseinheiten vorzusehen, da der PAK-Schlamm gemeinsam mit dem Belebtschlamm in der Nachklärung und anschließend in der Filtration abgetrennt wird. Die PAK wird gemeinsam mit dem Rücklaufschlamm aus der Nachklärung dem Zulauf der biologischen Stufe zugeführt. Baulich sind als Neuerung die Silos zur Lagerung der PAK und Dosiereinrichtungen für den Eintrag der PAK in das Belebungsbecken vorzusehen (Abbildung 4-4).

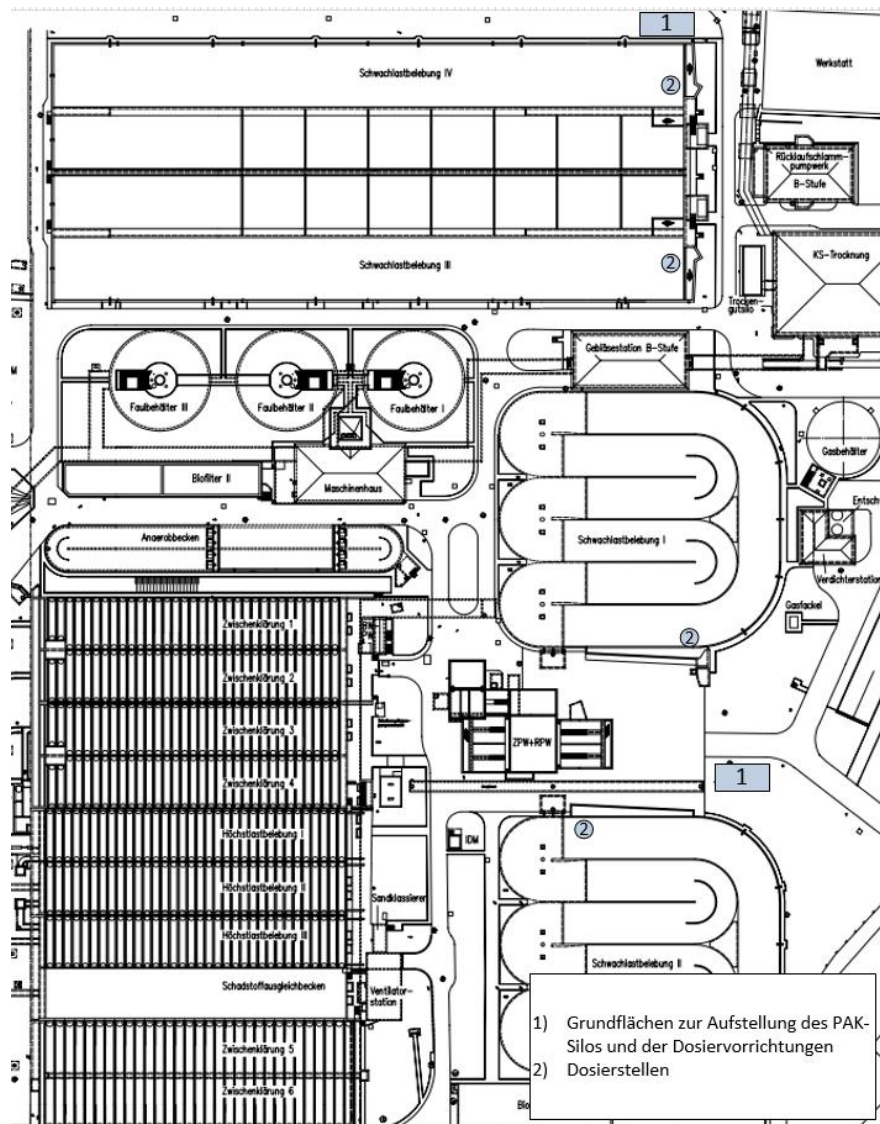


Abbildung 4-4: Anordnungsskizze der Variante 3 auf dem Klärwerk Krefeld

4.5 Variante 4: PAK-Dosierung in den Filter und Abtrennung mittels Membranen

Bei der Variante 4 wird PAK in die Filterkammern dosiert, die zu Kontaktbecken umgerüstet werden. Die Abtrennung der PAK erfolgt durch in die umgerüsteten Filterkammern installierte Membranen. Eine Änderung der Prozessfolge auf der Kläranlage ist nicht erforderlich. Aus Abbildung 4-5 ist der Lageplan der Variante 4 ersichtlich.

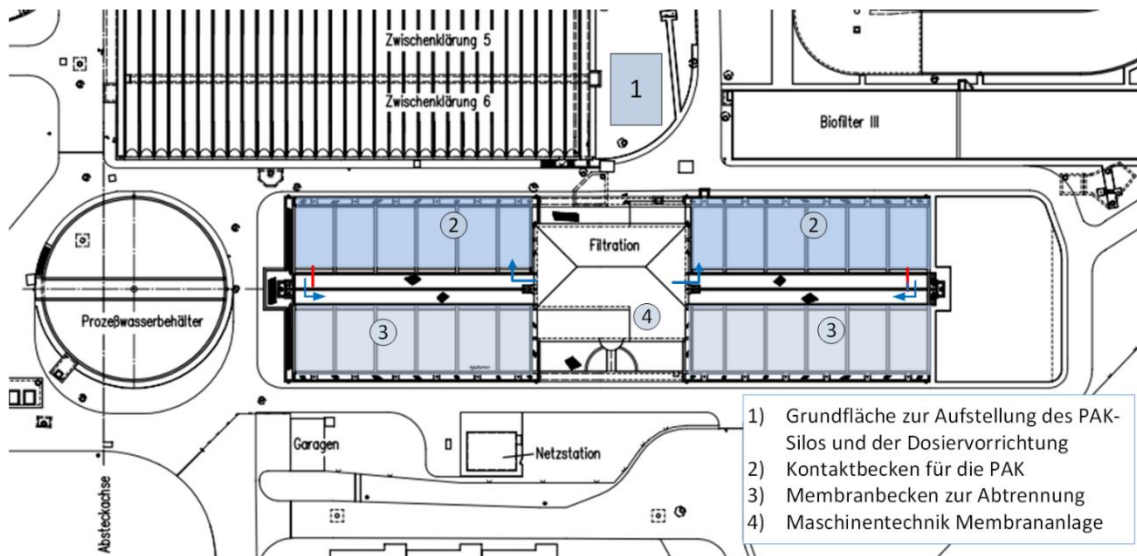


Abbildung 4-5: Lageplan der Variante 4 auf dem Klärwerk Krefeld

4.6 Variante 5: PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken im Filter und Abtrennung in verbleibenden Filterkammern

Die Variante 5 beruht auf der PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken im bestehenden Filter und der Abtrennung der PAK vom Abwasser in den verbleibenden Filterkammern. Für diese Variante ist die bestehende Filtration so umzurüsten, dass genügend Kontaktvolumen bzw. eine ausreichende Kontaktzeit für die PAK zur Verfügung steht. Eine zusätzliche Nachbehandlung ist nicht erforderlich, da die PAK vom Zweischichtfilter ausreichend zurückgehalten werden kann. Die PAK wird zusammen mit dem Rückspülwasser in die biologische Stufe zurückgeführt. In Abbildung 4-6 ist die Anordnung dieser Variante auf dem Klärwerk Krefeld dargestellt.

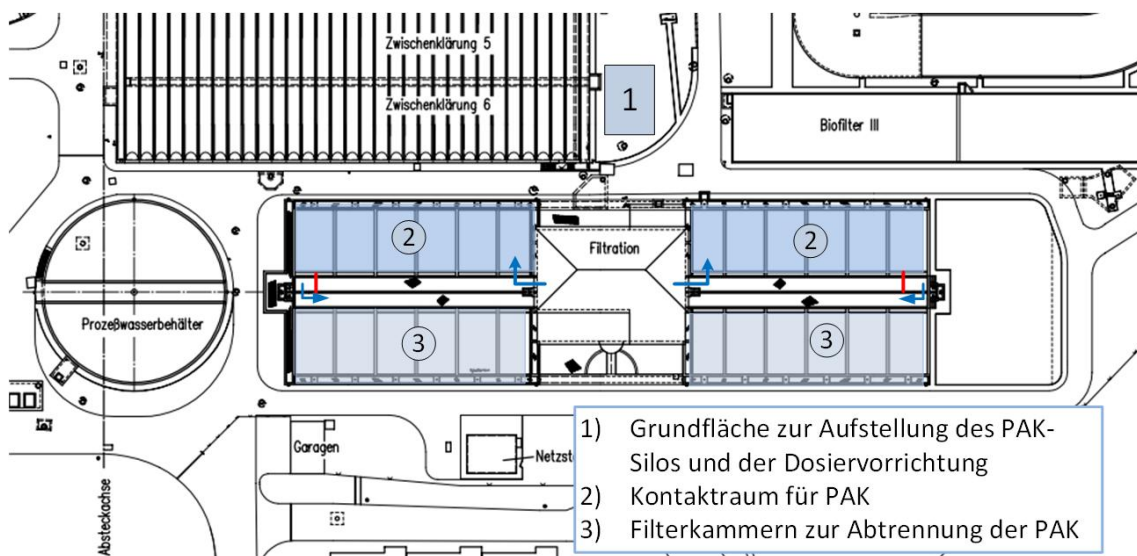


Abbildung 4-6: Lageplan der Variante 5 auf dem Klärwerk Krefeld

4.7 Variante 6: GAK-Filtration in den bestehenden Filterbecken

Die Variante 6 stellt die GAK-Filtration des Abwassers in der bestehenden Filteranlage dar. Dazu ist das derzeit in der Filtration eingebaute Filtermaterial durch granuliertes Aktivkohle zu ersetzen. Änderungen der Prozessfolge auf dem Klärwerk Krefeld sowie eine Änderung der Hydraulik der Anlage sind nicht erforderlich, da die Filter wie auch bisher parallel betrieben werden. Abbildung 4-7 zeigt die Einbindung der Variante 6 in den Klärprozess auf dem Klärwerk Krefeld. Eine weitere Nachbehandlung des in der GAK-Filtration behandelten Abwassers ist nicht nötig.

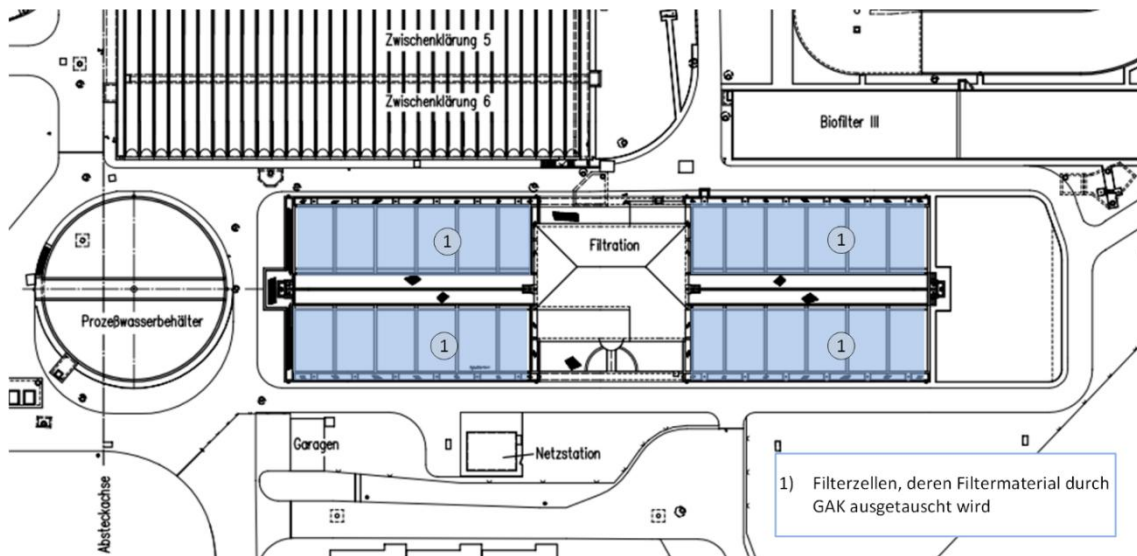


Abbildung 4-7: Lageplan der Variante 6 auf dem Klärwerk Krefeld

4.8 Variante 7: Chlordioxidbehandlung und zusätzliche Behandlung im GAK-Filter

Bei Variante 7 wird das Abwasser aus dem Ablauf der Nachklärung mit Chlordioxid behandelt. Hierzu ist ein Reaktionsbecken nötig, in welches das Chlordioxid eingetragen wird. Dazu wird geplant, einen Teil der vorhandenen Filterkammern auf dem Klärwerk Krefeld zu Reaktionsbecken für die Behandlung mit Chlordioxid umzubauen. Die Nachbehandlung erfolgt mittels mit granulierter Aktivkohle, um ggf. durch die Behandlung entstehende Transformationsprodukte zurückzuhalten. Die Integration dieser Variante in die bestehende Anlagenstruktur ist in Abbildung 4-8 dargestellt.

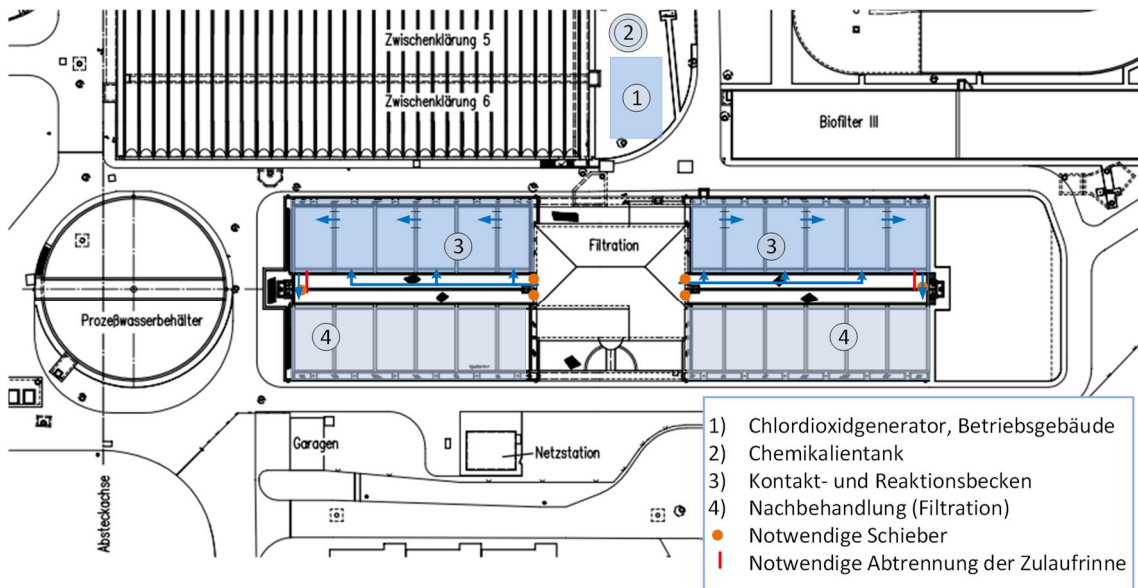


Abbildung 4-8: Lageplan der Variante 7 auf dem Klärwerk Krefeld

4.9 Kostenermittlung

Nachfolgend werden die Kosten der betrachteten Varianten vergleichend dargestellt. Die Zusammenstellung ist Tabelle 4-1 zu entnehmen. Aufgrund der Tatsache, dass Variante 7 bisher ausschließlich im Labor- und Pilotmaßstab getestet wurde, ist eine fundierte und seriöse Kostenbetrachtung derzeit noch nicht möglich. Die Kostenbetrachtung entfällt daher für diese Variante.

Der Vergleich zeigt, dass die Variante 2 die niedrigsten Investitionskosten aufweist. Die Betriebskosten sind bei Variante 1 am niedrigsten. Grund hierfür sind die günstigen Stromkosten, da diese bei der Ozonung den Hauptteil der Betriebskosten ausmachen. Aufgrund der niedrigen Stromkosten ist die Variante 1 auch bzgl. der Jahreskosten die günstigste Variante.

Tabelle 4-1: Kostenvergleich der Varianten 1 bis 6

Varianten	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5	V 6
	Ozonung und Nachbehandlung in bestehender Filtration	PAK-Dosierung in den Filterüberstand	PAK-Dosierung in das Belebungsbecken	PAK-Dosierung in die bestehenden Filterkammern und Abtrennung mittels Membranen	PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken im Filter und Abtrennung in bestehender Filtration	GAK-Filtration in den bestehenden Filterkammern
Kostenpositionen <small>(Alle Angaben sind netto-Angaben)</small>						
Investitionskosten Variante	4.120.664 €	816.000 €	1.480.000 €	27.060.000 €	1.917.000 €	7.919.000 €
Investiver Anteil der Jahreskosten Variante	291.736 €/a	67.224 €/a	131.275 €/a	2.881.115 €/a	129.274 €/a	443.166 €/a
Betriebskosten Variante	488.042 €/a	1.281.540 €/a	1.297.485 €/a	1.745.720 €/a	671.189 €/a	1.713.850 €/a
Jahreskosten Variante	779.777 €/a	1.348.764 €/a	1.428.760 €/a	4.626.835 €/a	800.463 €/a	2.157.016 €/a
Bezugwassermenge	26.248.951 m³/a	26.248.951 m³/a	26.248.951 m³/a	26.248.951 m³/a	26.248.951 m³/a	26.248.951 m³/a
Spezifische Jahreskosten Variante	0,03 €/m³	0,05 €/m³	0,05 €/m³	0,18 €/m³	0,03 €/m³	0,08 €/m³

5 Variantenbewertung

5.1 Vorgehensweise zur Verfahrensbewertung

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 Phosphor-Konzentration 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
- die Bildung von Transformationsprodukten
- die Desinfektionswirkung
- der Stand der Technik – Wissenschaft (Umsetzung vergleichbarer Referenzlage bzw. Erfahrungen in unterschiedlichen Pilotprojekten oder Forschungsanlagen mit den vorgestellten Techniken) sowie
- der Flächenbedarf der Varianten auf dem Klärwerk Krefeld

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. Die eigentliche Bewertung der verschiedenen 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.

5.2 Verfahrensbewertung

Tabelle 5-1 zeigt das Ergebnis der Verfahrensbewertung. Die höchste Punktzahl entspricht der besten Variante und umgekehrt.

Bei dem Aspekt Eliminationsleistung Mikroschadstoffe werden für die Varianten mit Ozon und Aktivkohle jeweils die gleichen Punkte vergeben, da angenommen wird, dass keins der Verfahren hinsichtlich der Eliminierbarkeit der Indikatorsubstanzen und der standortrelevanten Substanzen einen Vorteil aufweist.

Tabelle 5-1: Bewertung der betrachteten Varianten

Variante	Wichtung [%]	Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4		Variante 5		Variante 6		Variante 7	
		Ozongung und Nachbehandlung in bestehender Filtration		PAK-Dosierung in den Filterüberstand		PAK-Dosierung in das Belebungsbecken		PAK-Dosierung in die bestehenden Filterkammern und Abtrennung mittels Membranen		PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken im Filter und Abtrennung in bestehender Filtration		GAK-Filtration in den bestehenden Filterkammern		Chlordioxidbehandlung und Nachbehandlung im GAK-Filter	
		Punkte	Wertung	Punkte	Wertung	Punkte	Wertung	Punkte	Wertung	Punkte	Wertung	Punkte	Wertung	Punkte	Wertung
Investitionskosten (netto)		4.120.664 €		816.000 €		1.480.000 €		27.060.000 €		1.917.000 €		7.919.000 €		-	-
Investiver Anteil der Jahreskosten, ausgedrückt als spezifische Kosten je m ³ behandeltes Wasser (netto)	20%	0,01 €/m ³	3,5 0,7	0,00 €/m ³	15 3,0	0,01 €/m ³	7,7 1,5	0,11 €/m ³	0,3 0,1	0,00 €/m ³	7,8 1,6	0,02 €/m ³	2,3 0,5	-	-
Betriebskosten, ausgedrückt als spezifische Kosten je m ³ behandeltes Wasser (netto)	30%	0,02 €/m ³	15,0 4,5	0,05 €/m ³	5,7 1,7	0,05 €/m ³	5,6 1,7	0,07 €/m ³	4,2 1,3	0,03 €/m ³	10,9 3,3	0,07 €/m ³	4,3 1,3	-	-
Wertungspunkte Monetär (gerundet)	50%		5,2		4,7		3,2		1,3		4,8		1,7		-
Eliminationsleistung Mikroschadstoffe	10%	hoch	15,0 1,5	hoch	15,0 1,5	hoch	15,0 1,5	hoch	15,0 1,5	hoch	15,0 1,5	hoch	15,0 1,5	niedrig	5,0 0,5
Bildung Transformationsprodukte	15%	ja	5,0 0,8	nein	15,0 2,3	nein	15,0 2,3	nein	15,0 2,3	nein	15,0 2,3	nein	15,0 2,3	ja	5,0 0,8
Desinfektionswirkung	5%	mittel	10,0 0,5	niedrig	5,0 0,3	niedrig	5,0 0,3	hoch	15,0 0,8	niedrig	5,0 0,3	niedrig	5,0 0,3	hoch	15,0 0,8
Stand der Technik - Wissenschaft	5%	bereits Anlagen in Betrieb	15,0 0,8	bereits Anlagen in Betrieb	15,0 0,8	geringe großtechnische Erfahrung	10,0 0,5	geringe großtechnische Erfahrung	10,0 0,5	geringe großtechnische Erfahrung	10,0 0,5	bereits Anlagen in Betrieb	15,0 0,8	keine großtechnische Erfahrung	5,0 0,3
Flächenbedarf	15%	hoch	5,0 0,8	mittel	10,0 1,5	niedrig	15,0 2,3	mittel	10,0 1,5	mittel	10,0 1,5	niedrig	15,0 2,3	hoch	5,0 0,8
Wertungspunkte Technik (gerundet)	50%		4,3		6,3		6,8		6,5		6,0		7,0		3,0
Gesamtpunkte (gerundet)	100%		9,4 Punkte		11,0 Punkte		10,0 Punkte		7,8 Punkte		10,8 Punkte		8,7 Punkte		3,0 Punkte

Für die aktivkohlebasierten Verfahren wird angenommen, dass keine Nebenproduktbildung stattfindet, wohingegen für die Ozongung und die Chlordioxid-Variante angenommen wird, dass eine Bildung von Nebenprodukten stattfindet. Die Variante 1 und Variante 7 erhalten daher bei diesem Aspekt 5 Punkte. Zu beachten ist, dass die Nebenproduktbildung durch die biologische Nachbehandlung reduziert wird. Variante 1 und Variante 7 haben im Vergleich den größten Flächenbedarf und erhalten je 5 Punkte bei diesem Kriterium. Den niedrigsten Flächenbedarf haben Variante 3 und Variante 6.

Es zeigt sich, dass hinsichtlich der monetären Bewertung die Variante 1 die höchste Punktzahl aufweist. Sie erreicht dabei vor allem bei den Betriebskosten die höchste Punktzahl. Bei den nicht monetären Bewertungsaspekten erreicht die Variante 6 die höchste Punktzahl. **Insgesamt erreicht Variante 2 die höchste Gesamtpunktzahl.** Es ergibt sich die folgende Rangfolge der Varianten.

Tabelle 5-2: Ranking der Varianten

Ranking	Variante
1. Empfehlung	Variante 2 „PAK-Dosierung in den Filterüberstand“
2.	Variante 5 „PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken im Filter und Abtrennung in bestehender Filtration“
3.	Variante 3 „PAK-Dosierung in das Belebungsbecken“

6 Fazit

6.1 Erfordernis zur Mikroschadstoffelimination

Um die Belastung des Kläranlagenablaufs mit Mikroschadstoffen einschätzen zu können, wurden im Rahmen der vorliegenden Studie Analysen des Abflaufs auf unterschiedliche Mikroschadstoffe durchgeführt. Im Rahmen des dazu durchgeführten erweiterten Monitorings und des Monitorings zur Datenverdichtung wurden Überschreitungen der Bewertungskriterien festgestellt. Die dabei festgestellten Überschreitungen sind zusammenfassend in Tabelle 6-1 dargestellt.

Tabelle 6-1: Überschreitungen der Bewertungskriterien beim erweiterten Monitoring des Abflaufs der Kläranlage

		Orientierungswerte und UQN	Trockenwetter		Regenwetter		Abfluss 14.12.2016
			Zulauf 30.06.2016	Abfluss 30.06.2016	Zulauf 18.11.2016	Abfluss 18.11.2016	
Arzneimittelwirkstoffe							
4-Acetamidoantipyrin	ng/L	100*	NB ³⁾	800	7.200	860	200
4-Formylaminoantipyrin	ng/L	100*	NB ³⁾	340	1.800	1.400	530
Amidotrizoesäure	ng/L	100	NB ³⁾	1.200	1.100	1.400	2.100
Carbamazepin	ng/L	500	400	360	300	400	870
Cardensartancilexetil	ng/L	100*	220	<20	< 250	< 250	
Clarithromycin	ng/L	20	470	60	< 50	1.600	70
Diclofenac	ng/L	100	670	320	300	500	1.000
Eprosartan	ng/L	100*	120	<20	550	140	
Erythromycin	ng/L	20	180	80	1.400	190	530
Gabapentin	ng/L	100*	NB ³⁾	3.400	5.300	900	670
Guanylhamstoff	ng/L	100*	<5000	<5000	< 5000	< 5000	
lomeprol	ng/L	100	3.400	2.900	570	1.000	1.200
lopamidol	ng/L	100	1.500	1.100	3.800	3.600	2.700
Metformin	ng/L	100*	1.600	1.800	7.000	800	1.000
Olmesartan	ng/L	100*	230	230	300	300	
Sotalol	ng/L	100	NB ³⁾	170	230	230	450
Sulfamethoxazol	ng/L	150	NB ³⁾	220	370	160	840
Korrosionsschutzmittel							
4-Methyl-1H-Benzotriazol	ng/L	100*	670	1.100	1.200	1.500	1.700
5-Methyl-1H-Benzotriazol	ng/L	100*	430	400	280	440	360
Süßstoffe							
Acesulfam	ng/L	100*	29.000	720			660

³⁾ aufgrund zu starker Matrixstörung kann kein Messwert ausgegeben werden

*) Vorsorgewert

Der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) des Rheins beträgt an der Einleitstelle 961 m³/s. Bezogen auf die Wasserführung des Rheins macht der Anteil der eingeleiteten Abwassermenge rd. 0,6 % aus. Ein eindeutiger kausaler Zusammenhang zwischen dem ökologischen Zustand und den ermittelten Ablaufkonzentrationen der Kläranlage kann aus den Ergebnissen nicht zweifelsfrei hergeleitet werden. Es ist davon auszugehen, dass die Errichtung einer Stufe zur Mikroschadstoffelimination die Ablaufqualität des Klärwerks Krefeld verbessert, dies aber als freiwillige Maßnahme anzusehen wäre, da der ein gesetzlich geregelter Ausbau um eine Stufe zur Mikroschadstoffelimination nicht existiert.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Mikroschadstoffbelastung ist die Teilstrombehandlung, d. h. die dezentrale Mikroschadstoffelimination am Anfallort (z. B. Industriebetriebe, Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen). Hier wurden zur Datenverdichtung die Abläufe von fünf großen in Krefeld ansässigen Krankenhäusern untersucht, sowie der Zu- und entsprechend der angenommenen Fließzeiten und der Verweilzeit in der Kläranlage der Ablauf. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-2 dargestellt

Tabelle 6-2: Überschreitungen der Bewertungskriterien beim Monitoring zur Datenverdichtung (Konzentrationen in µg/L)

Parameter	Ablauf Krefelder Krankenhäuser					Kläranlage		Orientierungswerte und UQN
	KH1	KH2	KH3	KH4	KH5	Zulauf	Ablauf	
						24.06.2020	25.06.2020	
	23.06.2020							
Acesulfam-K	50	70	130	58	84	68	0,44	
1H-Benzotriazol	140	75	8,1	510	7,4	11	6	10
4-Methyl-1H-benzotriazol	< 0,05	< 0,05	0,92	34	0,22	3,3	1,4	
5-Methyl-1H-benzotriazol	< 0,05	< 0,05	1,4	41	0,25	1,7	0,5	
5,6-Dimethyl-1H-benzotriazol	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	10
Perfluoroctansulfonsäure	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1
4-Acetamidoantipyrin	130	110	120	120	55	170	0,4	
Amidotrizoesäure	55	< 0,05	1,8	0,5	3,9	1,4	2,8	0,1
Candesartan Cilexetil	< 0,50	< 0,25	< 1,0	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	
Carbamazepin	0,16	4,9	2	0,8	0,99	0,4	0,52	0,5
Clarithromycin	< 0,05	< 0,10	2,8	< 0,10	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,02
Diclofenac	0,24	0,47	0,21	0,16	9	0,5	0,25	0,1
1,1-Dimethylbiguanid	180	200	590	170	330	150	0,81	-
Erythromycin	0,68	< 0,02	< 0,02	3,5	0,14	0,7	0,02	0,02
4-Formylaminoantipyrin	58	35	38	86	15	6	0,69	
Gabapentin	5,5	8,7	0,5	20	1	6,3	0,7	
lomeprol	2,9	< 0,05	2,4	63	0,5	30	1,1	0,1
lopamidol	< 0,50	< 0,50	< 0,50	9	< 0,50	< 0,50	< 0,50	0,1
Metoprolol	3,2	3,9	3,8	3,9	8,3	2,9	0,5	7,3
Olmesartan	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,43	0,22	0,44	
Sotalol	< 0,20	< 0,02	< 0,20	< 0,20	1	0,2	0,13	0,1
Sulfamethoxazol	0,09	< 0,05	40	2,3	1,5	0,3	0,3	0,15

Aufgrund der sehr geringen Datenmenge konnte nur eine Momentaufnahme erfolgen. Trotzdem wird deutlich, obwohl die Tagesabwassermengen der Krankenhäuser mit im Mittel nur rd. 0,2 % einen sehr geringen Anteil an der Gesamtabwassermenge ausmachen, die in die Kläranlage eingeleitet werden, ist in Bezug auf die Anteile der einzelnen Frachteinträge der prozentuale Beitrag Eintrag einzelner Substanzen durchaus bedeutend. Es handelt sich also um eine grobe Abschätzung des Einflusses der Krankenhäuser an der Belastungssituation der Kläranlage, da nur eine Analyse je Krankenhaus und Substanz vorliegt.

6.2 Verfahrensempfehlung

Die Empfehlung der Vorzugsvariante zur Mikroschadstoffelimination wird auf Grundlage der in Kapitel 5 aufgezeigten Verfahrensbewertung ausgesprochen. Diese beruht auf dem Vergleich der Varianten hinsichtlich der monetären und nicht monetären Bewertungsaspekte.

Auf Grundlage dieser Bewertung wird zur Umsetzung als Stufe zur Mikroschadstoffelimination die Variante 2 „PAK-Dosierung in den Filterüberstand“ empfohlen.

Die Variante 2 hat bei dieser Bewertung insgesamt die höchste Gesamtpunktzahl erhalten. Sie weist dabei bei den Investitionskosten bzw. dem investiven Anteil der Jahreskosten relativ niedrige Kosten auf. Somit kann mit relativ geringem Aufwand eine Stufe zur Mikroschadstoffelimination errichtet werden.

Nachteilig bei Variante 2 sind die relativ hohen Betriebskosten, die auf einer angenommenen Dosierung von 20 mg/L beruht. Stellt sich die tatsächlich benötigte Dosierung als niedriger heraus, hat dieses einen positiven Effekt auf die Kosten. Können die Betriebskosten nicht durch eine angepasste PAK-Dosierung gesenkt werden, bietet sich der Ausbau der Variante 2 zu Variante 5 an. Hierbei wird ein Teil der Filter zu einem Kontaktbecken mit ausreichender Verweilzeit umgebaut. Die Betriebskosten sinken hierdurch, da eine niedrigere PAK-Dosierung zur Mikroschadstoffelimination angesetzt werden kann.

Zu prüfen ist, inwiefern bei einer eventuellen Verschärfung des Überwachungswertes für Phosphor die Filtration zu betreiben ist bzw. ob die Reduzierung der Filterfläche zukünftig tragbar ist. Vor der Umsetzung eines großtechnischen Ausbaus um eine Stufe zur Mikroschadstoffelimination ist daher die zukünftige Notwendigkeit einer weiteren Absenkung des Parameters P_{ges} mit der zuständigen Behörde abzuklären.

Vor der Umsetzung der Variante 2 „PAK-Dosierung in den Filterüberstand“ wird empfohlen, die folgenden Voruntersuchungen durchzuführen:

- Adsorptionsschüttelversuche mit unterschiedlichen Pulveraktivkohlen zur Auswahl der leistungsfähigsten Kohle für die vorliegende Abwassermatrix
- Großtechnische Untersuchung einer Aktivkohledosierung in eine der Filterkammern, um die notwendigen Kontaktzeit zur Erreichung der gewünschten Elimination und die notwendige Dosierkonzentration zu ermitteln

Mittels der vorgenannten Voruntersuchungen kann zudem auch die Durchführbarkeit der Variante 5 bzw. der dort berücksichtigte Filterumbau überprüft werden, indem der Filterkammer ein Kontaktbecken vgeschaltet wird.

Bei der weiteren Vorgehensweise sollte berücksichtigt werden, dass derzeit eine Förderung über „ResA II – Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II“ in einer Höhe von bis zu 50 % von der Erstinvestition möglich ist.

7 Literaturverzeichnis

DSADS (2016): „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: 17.12.2015].

KOM-M.NRW (2016): “Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“

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