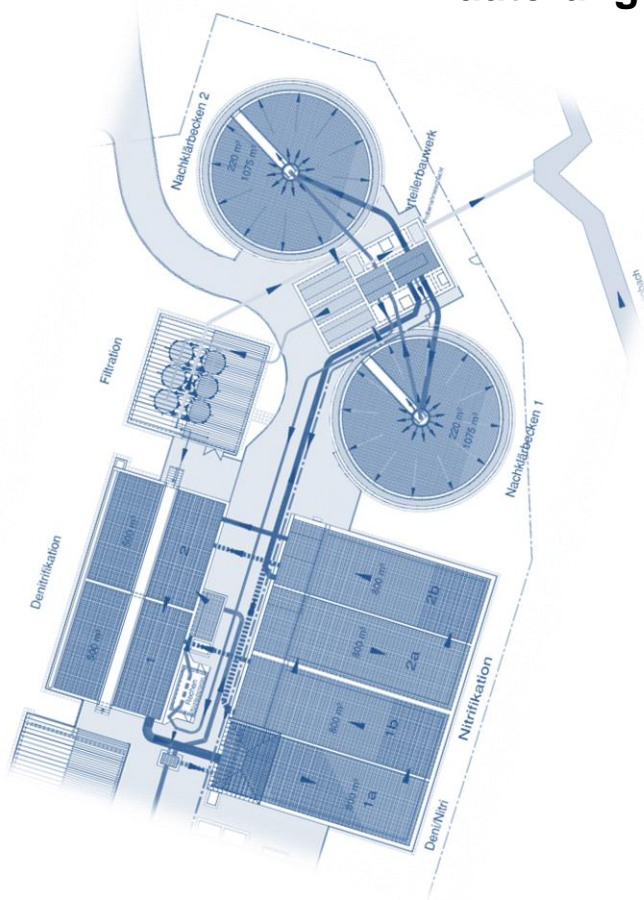


Abwasserwerk der Stadt Bad Honnef



Machbarkeitsstudie zur Mikroschadstoffelimination auf der Kläranlage Bad Honnef-Aegidienberg

- Erläuterungsbericht -



Aufgestellt:
Bad Honnef, im Dezember 2020
Ingenieurbüro für Bauwesen
Schmidt GmbH

. Ausfertigung

M.Sc., Matteo Granatiero
Dr. Markus Robeck

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
1.2	Hintergrund zur Mikroschadstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen	2
2	Rechtliche Grundlagen	3
2.1	Wasserrahmenrichtlinie.....	3
2.2	Bewertung des ökologischen und chemischen Zustands gemäß OGewV	4
2.3	Bewertung der Oberflächengewässer in Nordrhein-Westfalen	5
2.4	Mikroschadstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen	6
3	Stand der Forschung und Technik	7
3.1	Verfahrensübersicht	7
3.2	Oxidationsverfahren – Ozonung	8
3.3	Adsorptionsverfahren – Aktivkohle.....	10
3.3.1	PAK-Verfahren	11
3.3.2	GAK-Verfahren.....	13
3.4	Gegenüberstellung der Hauptverfahren.....	14
3.5	Verfahrenskombinationen	15
3.6	Großtechnische Umsetzungen.....	16
4	Kläranlage Aegidienberg	18
4.1	Örtliche Verhältnisse	18
4.2	Vorfluter.....	19
4.3	Anlagenbestand	20
4.3.1	Eckdaten, Einwohnerwerte und Zulaufmengen	22
4.3.2	Hydraulische Bemessungsparameter	23
4.3.3	Reinigungsanforderung und Ablaufparameter	23
4.4	Beschreibung der vorhandenen DynaSand®-Filtration.....	24
5	Mikroschadstoffanalyse	27
5.1	Allgemeines.....	27
5.2	Erweitertes Monitoring	28
5.3	Datenverdichtung mit reduziertem Stoffumfang und Basisparameter.....	31
5.4	Ozonzehrung und Bromatbildung	33
5.5	Eliminationsziel	35
6	Ausarbeitung von technischen Anlagenkonzepten	38
6.1	Verfahrensvorauswahl	38
6.2	Auslegungswassermenge	40
6.3	Variante 1: Ozonung	40
6.4	Variante 2: GAK-Filtration	45
7	Wirtschaftlichkeitsprüfung und Variantenvergleich	51
7.1	Kostenvergleichsrechnung	51
7.1.1	Investitionskosten.....	52
7.1.2	Laufende Kosten	52
7.1.3	Jahreskosten	54
7.1.4	Einfluss der Landesförderung auf die Jahreskosten	55
7.1.5	Sensitivitätsanalyse.....	57
7.2	Nutzwertanalyse.....	60

7.3	Gesamtgegenüberstellung	64
8	Zusammenfassung	66
9	Quellenverzeichnis	68
A	Anhang.....	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	a) Ökologischer Zustand (4. Zyklus 2015-2018) des Quirrenbachs und b) kumulierter Abwasseranteil am regionalisierten MNQ mit Standort der KA Aegidienberg im Süden der Kartenausschnitte (modifiziert nach ELWAS-WEB, 2020)	1
Abbildung 2:	Verfahrensübersicht zur Mikrostoffelimination mit zugehörigen Nachbehandlungsverfahren – in dunkelblau hervorgehoben stellen die bereits großtechnisch umgesetzten Hauptverfahren dar (KOM-M NRW, 2016)	7
Abbildung 3:	Schematische Einbindung einer Ozonanlage mit optional vorgeschalteter Filtration (verändert nach KOM-M NRW, 2016)	9
Abbildung 4:	Prinzipschema einer Ozonanlage mit Ozonherstellung aus Flüssigsauerstoff, Restozonabgasvernichtung und nachgeschalteter Sandfiltration (Hillenbrand, et al., 2015)	9
Abbildung 5:	Schematische Darstellung der physikalischen Adsorption (Physisorption) und Zuordnung der Begriffe (adaptiert nach Kienle, et al., 1980)	11
Abbildung 6:	Schematische Verfahrensvarianten der PAK-Dosierung; FM: Flockungsmittel (modifiziert nach KOM-M NRW, 2018a)	12
Abbildung 7:	Schematische Verfahrensvarianten der GAK-Filtration (GAC = GAK, zusammengestellt nach Hillenbrand, et al., 2015)	13
Abbildung 8:	Stand (05/2018) der Mikroschadstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen in NRW (modifiziert nach KOM-M NRW, 2018a)	17
Abbildung 9:	Stadtgebiet Bad Honnef mit den Standorten der Kläranlage Tallage und der Kläranlage Aegidienberg (modifiziert nach ELWAS-WEB, 2020)	18
Abbildung 10:	Oberirdisches Einzugsgebiet des Kochenbachs (gestrichelte schwarze Linie) (modifiziert nach ELWAS-WEB, 2020)	19
Abbildung 11:	Fließschema der KA Aegidienberg durch die einzelnen Verfahrensschritte (beginnend bei der Zulaufregelung)	20
Abbildung 12:	Luftbild der Kläranlage Aegidienberg mit Beschriftung des Anlagenbestands (Digitales Orthophoto nach ELWAS-WEB, 2020)	21
Abbildung 13:	Darstellung der DynaSand®-Filtration: a) Betonbauweise und b) Behälterbauweise mit Bezeichnungen (modifiziert nach Nordic Water, 2020)	25

Abbildung 14:	Statistische Auswertung der Ablaufkonzentrationen der 7 Indikatorsubstanzen auf kommunalen Kläranlagen in NRW – ca. 2000 Datensätze (modifiziert nach KOM-M NRW, 2017)	32
Abbildung 15:	Auswertung der Ozonzehrungsversuche mit Bestimmung der Bromatbildung.....	34
Abbildung 16:	Potenzielle Erweiterungsfläche (blau) und nutzbare Sandfiltration (gelb) – Kartenhintergründe nach ELWAS-WEB (2020).....	38
Abbildung 17:	Mögliche Einbindung der Ozonanlage (rot) in den Bestand der KA Aegidienberg.....	41
Abbildung 18:	Fließschema der zwischengeschalteten Ozonanlage (Variante 1) in den Bestand der KA Aegidienberg mit den notwendigen Systemkomponenten	42
Abbildung 19:	Fließschema der Variante 2: GAK-Filtration im Bestand der KA Aegidienberg.....	46
Abbildung 20:	Einbindung der Variante 2: GAK-Filtration in den Bestand der KA Aegidienberg.....	47
Abbildung 21:	Funktionen der Filtergeschwindigkeit v_F in Abhängigkeit der Leerbettkontaktzeit EBCT für die Filterhöhen 1,5 m bis 3 m (allgemeingültige Funktionen).....	48
Abbildung 22:	Funktionen der Filterstandzeit in Abhängigkeit des Bettvolumens (gültig für $V_F = 75 \text{ m}^3$ und $JAM = 950.000 \text{ m}^3/\text{a}$)	49
Abbildung 23:	Zusammenstellung der Jahreskosten und abwasserspezifischen Kosten.....	55
Abbildung 24:	Zusammenstellung der Jahreskosten und abwasserspezifischen Kosten unter Berücksichtigung einer Förderung von 70 % der erstmaligen Investitionskosten.....	57
Abbildung 25:	Unsicherheitsbereich der ermittelten Jahreskosten in Abhängigkeit der variierten Parameter	59
Abbildung 26:	Einfluss des Realzinssatzes auf die Jahreskosten und Kostenbarwerte.....	60
Abbildung 27:	Gegenüberstellung der gewichteten Punkte der einzelnen Hauptkriterien.....	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Wesentliche Vor- und Nachteile der Hauptverfahren (nach Hillenbrand, 2014).....	14
Tabelle 2:	Wirksamkeit der Hauptverfahren bezüglich der Elimination ausgewählter Mikroschadstoffe (modifiziert nach Bolle, et al., 2011).....	15
Tabelle 3:	Technische Umsetzungen und zukünftige Vorhaben zur Mikroschadstoffelimination in NRW (KOM-M NRW, 2018a) , BW (KOM-S BW, 2020) und CH (VSA, 2020)	16

Tabelle 4:	Verfahrensbestand auf der KA Aegidienberg	22
Tabelle 5	Kennwerte der KA Aegidienberg.....	23
Tabelle 6	Hydraulische Bemessungsparameter der KA Aegidienberg.....	23
Tabelle 7:	Zusammenstellung der Mindestanforderungen nach AbwV (Anhang 1), der festgelegten erhöhten Überwachungswerte sowie der durchschnittlich gemessenen Konzentrationswerte im Ablauf der KA Aegidienberg im Jahr 2019	24
Tabelle 8:	Eckdaten der vorhandenen DynaSand®-Filtrationsanlage.....	26
Tabelle 9:	Schaltpunkte der Filtergruppen in Abhängigkeit des Filterzuflusses	26
Tabelle 10:	Bewertungsschema von Oberflächengewässern nach UQN (BK: Bewertungskriterium; BG: Bestimmungsgrenze)	28
Tabelle 11:	Ergebnisse des erweiterten Monitorings der drei Trockenwetterproben (OGew: Oberflächengewässer, OH: Oberhalb, UH: Unterhalb)	29
Tabelle 12:	Arithmetische Mittelwerte der gemessenen Stoffkonzentrationen des erweiterten Monitorings aus drei Trockenwetterproben (OGew: Oberflächengewässer, OH: Oberhalb, UH: Unterhalb)	30
Tabelle 13:	Datenverdichtung der Indikatorsubstanzen aus fünf Trockenwetterproben (Ablauf KA nach Bewertungsschema)	31
Tabelle 14:	Statistische Kennwerte der Basisparameter aus 5 Trockenwettertagen	33
Tabelle 15:	Eliminierungsraten der Leitsubstanzen, die das BK überschreiten.....	36
Tabelle 16:	Zusammenstellung der Auslegungsparameter für Variante 1 – Ozonung	45
Tabelle 17:	Zusammenfassung der Auslegungsparameter für Variante 2 – GAK-Filter	50
Tabelle 18:	Gegenüberstellung der Erstinvestitionskosten.....	52
Tabelle 19:	Kostenannahmen zur Ermittlung der laufenden Kosten	53
Tabelle 20:	Gegenüberstellung der laufenden Kosten	53
Tabelle 21:	Zusammenstellung der Jahreskosten	54
Tabelle 22:	Zusammenstellung der spezifischen Jahreskosten	55
Tabelle 23:	Zusammenstellung der Jahreskosten unter Berücksichtigung einer 70 %-igen Förderung der Erstinvestitionen.....	56
Tabelle 24:	Zusammenstellung der spezifischen Jahreskosten unter Berücksichtigung einer 70 %-igen Förderung der Erstinvestitionen	56
Tabelle 25:	Parametervariation im Rahmen der Sensitivitätsanalyse	57
Tabelle 26:	Prozentuale Auswirkung der Parametervariation auf die Jahreskosten.....	58
Tabelle 27	Punkteverteilung für das Bewertungssystem der Nutzwertanalyse	60
Tabelle 28:	Bewertungsmatrix der Nutzwertanalyse in Anlehnung an Rödel (2013).....	61

Tabelle 29:	Erläuterungen zu den in Tabelle 28 vergebenen Punkte.....	63
Tabelle 30:	Zusammenfassende und Vergleichende Darstellung der untersuchten Varianten.....	64

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Vollständige Bezeichnung
Abw	mittlere absolute Abweichung vom arithmetischen Mittel
AbwAG	Abwasserabgabengesetz
A _{E,k}	kanalisierte Fläche eines Einzugsgebiets
A _{E,k,b}	kanalisierte, befestigte Fläche eines Einzugsgebiets
A _F	Filterbettfläche, gesamt
AFF	Adsorption-Flockung-Filtration
AFS	Abfiltrierbare Stoffe (Sink-, Schweb- und Schwimmstoffe)
AKFBB	Aktivkoks-Festbettbiologie
A _{O3}	Ozonreaktorgrundfläche
AOP	<i>engl. Advanced Oxidation Process</i> (fortschrittlicher Oxidationsprozess)
A-YES	<i>engl. Yeast Estrogen Screen</i> (Aquatrische Testsysteme)
BAK	Biologisch aktivierte Aktivkohlefiltration
BG	Bestimmungsgrenze
BK	Bewertungskriterium
B _{O3,max}	Benötigte maximale Ozonmenge
B _{O3,min}	Benötigte minimale Ozonmenge
BV	Bettvolumen – Einheit von BVT [$m^3_{\text{AWasser}}/m^3_{\text{GAK}}$]
BVT	<i>engl. Bed Volume Treated</i> (Durchsetzbares Bettvolumen)
C _{Au,i}	Konzentration im Ablauf der KA der Leitsubstanz i
C _{DOC}	DOC-Konzentration
CFD	<i>engl. Computational Fluid Dynamics</i>
C _{O3}	Ozon-Konzentration/Dosis
CSB	<i>engl. Chemical oxygen demand</i> (Chemischer Sauerstoffbedarf)
C _{Zu,i}	Konzentration im Zulauf der KA der Leitsubstanz i
DDT	Dichlordiphenyltrichlorethan
DOC	<i>engl. Dissolved organic carbon</i> (gelöster organischer Kohlenstoff)
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall

EAOP	Elektrochemisch erweitertes Oxidationsverfahren
EBTC	<i>engl. Empty Bed Contact Time</i> (Lehrbett-/Lehrrohrkontaktzeit)
ELWAS	Elektronisches Wasserwirtschaftliches Verbundsystem für die Wasserwirtschaftsverwaltung in NRW
EMSR	Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
EW	Einwohnerwert (Summe aus Einwohnerzahl und Einwohnergleichwert; Einheit ist Einwohner E)
GAK	Granulierte Aktivkohle
GrwV	Grundwasserverordnung
H4-PFOS	Fluortelomersulfonsäure
h_F	Filterbetthöhe
h_{O_3}	Wassertiefe im Ozonreaktor bis zum Eintragssystem
IUTA	Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.
JAM	Jahresabwassermenge
JSM	Jahresschmutzwassermenge
KA	Kläranlage
KFAKR	Kapitalwiedergewinnungsfaktors
KOM-M NRW	Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW
KVR	Kostenvergleichsrechnung
LOX	<i>engl. Liquid Oxygen</i> (Flüssigsauerstoff)
MBR	Membranbelebungsreaktor
MNQ	Mittlerer Niedrigwasserabfluss
N_{ges}	Gesamtstickstoff
NH_4-N	Ammonium-Stickstoff
NHN	Höhen über Normalhöhen-Null im Deutschen Haupthöhennetz 2016 (DHHN2016)
NO_2-N	Nitrit-Stickstoff
O_2	Sauerstoff
O_3	Ozon
OGew OH	Oberflächengewässer Oberhalb der KA-Einleitung
OGew UH	Oberflächengewässer Unterhalb der KA-Einleitung
OGewV	Oberflächengewässerverordnung
OW	Orientierungswert
PAK	Pulverisierte Aktivkohle (Hauptabkürzung)
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle

PFC	Per- und polyfluorierte Chemikalien
PFOA	Perfluorooctansäure
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure
P _{ges}	Gesamtphosphor
PNEC	<i>engl. Predicted no effect concentration</i> (vorausgesagte Konzentration eines in der Regel umweltgefährlichen Stoffes)
PV	Präventiver Vorsorgewert
Q _{F,d}	Täglicher Fremdwasserzufluss
Q _M	Maximaler Mischwasserdurchfluss
Q _{O₂/O₃,max}	Maximaler O ₂ /O ₃ -Gasvolumenstrom
Q _{O₂/O₃,min}	Minimaler O ₂ /O ₃ -Gasvolumenstrom
Q _{S,d}	Täglicher Schmutzwasserzufluss
Q _{T,2h,min}	Minimaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel
Q _{T,d}	Täglicher Trockenwetterzufluss
Q _{T,h,aM}	stündlicher Trockenwetterzufluss im Jahresmittel
Q _{T,h,max}	Maximaler stündlicher Trockenwetterzufluss
ResA II	Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II
SPE	<i>engl. Solid Phase Extraction</i> (Festphasenextraktion)
t _{Kontakt}	Kontaktzeit/Aufenthaltszeit im Ozonreaktor
TOC	<i>engl. Total Organic Carbon</i> (Gesamter organischer Kohlenstoff)
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
TS	Trockensubstanz
TV	<i>engl. Trigger-Value</i> (Auslösewert)
t _{Zehrung}	Dauer bis zur vollständigen Ozonzehrung
UQN	Umweltqualitätsnorm
V _F	Filterbettgeschwindigkeit
V _F	aktives Filtervolumen
V _{O₃}	Ozonreaktorvolumen
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
Z _{spez}	spezifische Ozonzehrung in Abhängigkeit von DOC
η _i	Eliminationsrate der Leitsubstanz i
ρ _{Sch}	Schüttdichte von granulierter Aktivkohle

1 Einführung

1.1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Das Ingenieurbüro für Bauwesen Schmidt GmbH wurde vom Abwasserwerk der Stadt Bad Honnef mit der Erstellung einer Machbarkeitsstudie zur Mikroschadstoffelimination auf der Kläranlage Bad Honnef-Aegidienberg beauftragt. Das Ziel der Machbarkeitsstudie besteht in der Überprüfung, welchen Einfluss die Kläranlage Aegidienberg auf die Mikroschadstoffkonzentration im anliegenden Vorfluter Kochenbach hat und welche technischen Verfahren für den Kläranlagenstandort geeignet sind, um die Gewässerbelastung durch Mikroschadstoffe ggfs. zu reduzieren. Die Untersuchung auf Mikroschadstoffe wurde veranlasst, da sich der Quirrenbach als nachfolgendes berichtspflichtiges Gewässer noch nicht in einem guten (ökologischen und chemischen) Zustand befindet und dort im Rahmen einer Stoffflussmodellierung eine Überschreitung von Arzneimittelwirkstoffen festgestellt wurde. Des Weiteren ist der Abwasseranteil der Kläranlage am mittleren regionalisierten Niedrigwasserabfluss (MNQ) des Kochenbachs mit etwa 996 % > 33 % verhältnismäßig hoch (LANUV, 2018), siehe nachfolgende Abbildung 1.

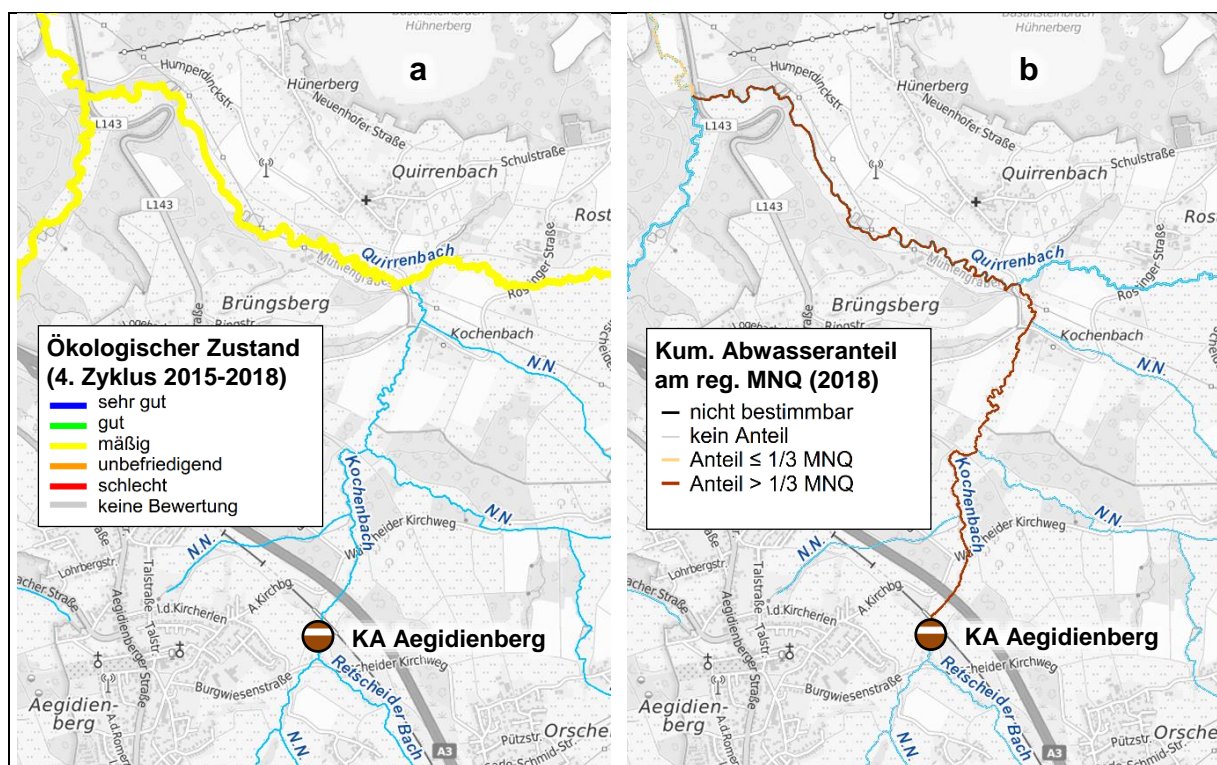


Abbildung 1: a) Ökologischer Zustand (4. Zyklus 2015-2018) des Quirrenbachs und b) kumulierter Abwasseranteil am regionalisierten MNQ mit Standort der KA Aegidienberg im Süden der Kartenausschnitte (modifiziert nach ELWAS-WEB, 2020)

Die im Rahmen der Machbarkeitsstudie ausgearbeiteten Verfahrensvarianten zur Mikroschadstoffelimination wurden unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Eliminationsleistung und weiteren nicht-monetären Aspekten bewertet. Die Machbarkeitsstudie dient somit dem Kläranlagenbetreiber auch als beratende Entscheidungshilfe, ob / welche Maßnahmen zur weitergehenden Mikroschadstoffelimination geeignet sind.

1.2 Hintergrund zur Mikroschadstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen

Unter dem Begriff Mikroschadstoffe – auch als Mikroverunreinigungen oder Spurenstoffe bezeichnet – sind anthropogene Substanzen zu verstehen, die z. B. aus Arzneimitteln, Haushalts-/Industriechemikalien, Pflanzenschutzmitteln, Körperpflege- und Kosmetikprodukte, etc. entspringen. Unter anderem gelangen diese Substanzen über die urbanen Abwässer und kommunalen Kläranlagen in die Gewässer und sind dann in der aquatischen Umwelt nachweislich zu finden. Dabei liegen sie in sehr niedrigen Konzentrationen vor – im Bereich von Nano- bis maximal wenigen Mikrogramm pro Liter (ng/L – µg/L). Trotz der geringen Konzentration kann das Schadenspotenzial hoch sein, welches von Mikroschadstoffen ausgeht. So wurden z. B. langfristige Schädigungen des Ökosystems durch hormonaktive Stoffe belegt, die zur Verweiblichung von männlichen Fischen führte. Die genauen Auswirkungen auf das Ökosystem sowie auf die Gesundheit der Menschen sind teilweise noch unbekannt. Auch wenn gegenwärtig von keiner akuten Gefahr für den Menschen ausgegangen wird, soll die weitergehende Reduktion von Mikroschadstoffen vorsorglich angestrebt werden (Gawel, et al., 2015).

Kommunale Kläranlagen umfassen nach dem heutigen Stand der Technik insgesamt drei Reinigungsstufen – mechanische, biologische und chemische bzw. weitergehende Abwasserreinigung. Mit diesen Reinigungsstufen sind die Anlagen nicht für die gezielte Elimination von Mikroschadstoffen ausgelegt. Eine Vielzahl von Mikroschadstoffen können mittels dieser konventionellen Anlagenkonzepte nicht oder nur zum Teil aus den Abwässern entfernt werden. Die Mikroschadstoffe durchwandern somit die einzelnen Reinigungsstufen ggfs. unbehandelt und gelangen über die punktuellen Abläufe der kommunalen Kläranlagen unverändert in den nächsten Vorfluter. Dabei ist die Einleitung von Mikroschadstoffen aus Kläranlagen in Gewässer derzeit gesetzlich noch nicht geregelt. Zukünftige gesetzliche Vorgaben sind jedoch zu erwarten (DWA, 2015).

Kläranlagen müssen nach § 57 Abs. 2 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) den Anforderungen des aktuellen Stands der Technik entsprechen. Hierunter fallen Verfahren, die bereits ausgereift sind und die praktische Eignung als gesichert erscheint (§ 3 Nr. 11, WHG). Verfahren zur Elimination von Mikroschadstoffen sind aktuell noch nicht ausreichend erprobt und verallgemeinert. Der heutige „Stand der Erkenntnisse“ basiert auf wenigen groß- und halbtechnisch umgesetzten Pilotprojekten.

Im Sinne des Schutzes des Gewässerökosystems und der Trinkwasserressourcen ist der Eintrag von anthropogenen Mikroschadstoffen grundsätzlich zu vermeiden. Die Bewirtschaftungsziele des WHG verpflichten dazu, dass ein guter ökologischer sowie ein guter chemischer Zustand von Oberflächengewässern (§ 27 WHG) und des Grundwassers (§ 47 WHG) zu erhalten bzw. zu erreichen ist, siehe auch rechtliche Grundlagen im nachfolgenden Kapitel 2. Der Eintrag von Mikroschadstoffen kann dazu führen, dass ein guter Zustand nach den Zielvorgaben der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) ggfs. nicht erreicht wird. Die Implementierung einer weiteren Reinigungsstufe zur gezielten Mikroschadstoffeliminierung in den Bestand von konventionellen Kläranlagen kann daher ggfs. sinnvoll sein und könnte zur langfristigen Reduzierung der Einträge von Mikroschadstoffen in die Gewässer führen und somit dazu beitragen, dass sich die Gewässerqualität nachhaltig verbessert (Gawel, et al., 2015).

2 Rechtliche Grundlagen

2.1 Wasserrahmenrichtlinie

Im Jahr 2000 trat die EG-Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG) zur „Schaffung eines Ordnungsrahmens für den Schutz der Binnenoberflächengewässer, der Übergangsgewässer, der Küstengewässer und des Grundwassers“ in Kraft. Die WRRL stellte damals einen neuen Leitsatz zur Bewertung und Bewirtschaftung der Gewässer dar, mit der die Qualität des Grundwassers und der Zustand aller Oberflächengewässer in der europäischen Gemeinschaft für kommende Generationen erhalten und verbessert werden soll. Als wesentliches Ziel wird dabei ein guter Zustand der Oberflächengewässer und des Grundwassers angestrebt. Dieser gute Zustand soll erhalten bleiben bzw. durch geeignete Maßnahmen bis zum Jahr 2015, spätestens jedoch bis zum Jahr 2027 erreicht werden. Das Erreichen dieser Ziele ist wiederum Aufgabe der jeweiligen EU-Mitgliedsstaaten, die hierfür entsprechende nationale Rechtsvorschriften (Gesetze, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften, etc.) erlassen, wobei die WRRL spätestens bis zum 22. Dezember 2003 in nationales Recht umgesetzt sein sollte. In Deutschland wurde die WRRL u. a. im Wasserhaushaltsgesetz (WHG), in der Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (OGewV) sowie in der Grundwasserverordnung (GrwV) verankert.

Bzgl. der Oberflächengewässer (Flüsse, Seen, Übergangsgewässer, Küstengewässer) ist der „Zustand eines Oberflächengewässers“ gemäß WRRL die allgemeine Bezeichnung für den Zustand eines Oberflächenwasserkörpers, der sich aus dem ökologischen Zustand und dem chemischen Zustand ergibt, wobei der jeweils schlechtere Wert für die Einstufung maßgebend ist. Der ökologische Zustand eines Oberflächenwasserkörpers wird dabei in 5 Klassen (sehr gut, gut, mäßig, unbefriedigend, schlecht) eingestuft, während der chemische Zustand entweder mit „gut“ oder mit „nicht gut“ bewertet wird. Der angestrebte gute Zustand eines Oberflächengewässers liegt somit vor, wenn der Oberflächenwasserkörper mindestens einen guten (oder sehr guten) ökologischen Zustand und einen guten chemischen Zustand aufweist. Ist der chemische Zustand bspw. nicht gut, liegt höchstens ein mäßiger Zustand des Oberflächenwasserkörpers vor. Des Weiteren gilt für Oberflächengewässer, die von den Mitgliedsstaaten als „erheblich verändert“ oder als „künstlich“ ausgewiesen werden, im Gegensatz zu den natürlichen Gewässern nicht der gute ökologische und gute chemische Zustand als Ziel, sondern das gute ökologische Potenzial und der gute chemische Zustand.

Ökologischer Zustand

Der ökologische Zustand eines Oberflächenwasserkörpers wird anhand der biologischen Qualitätskomponente, der hydromorphologischen Qualitätskomponente und der physikalisch-chemischen Qualitätskomponente bewertet. Die Qualität der biologischen Komponente wird dabei anhand der aquatischen Flora (z. B. bei Flüssen: „Phytoplankton“ sowie „Makrophyten und Phytobenthos“) und anhand der aquatischen Fauna (z. B. bei Flüssen: „benthische wirbellose Fauna“ und „Fischfauna“) beurteilt. Die Einstufung in eine Klasse erfolgt dabei prinzipiell anhand eines Vergleichs zwischen den im Wasser lebenden Organismen (Flora und Fauna) und einem angenommenen Referenzbestand, der natürlicherweise (ohne anthropogene Einflüsse) dort vorhanden sein sollte. Je weiter die Zusammensetzung der aquatischen Lebensgemeinschaft vom Referenzzustand abweicht, desto schlechter ist die Einstufung der biologischen Qualitätskomponente.

Neben der biologischen Qualitätskomponente wird unterstützend auch die hydromorphologische und physikalisch-chemische Qualitätskomponente beurteilt, wobei für die hydromorphologische Qualitätskomponente eine normative Beschreibung lediglich für den „sehr guten“ Zustand (Referenzzustand) existiert, während für die physikalisch-chemische Qualitätskomponente sowohl der „sehr gute“ Referenzzustand als auch der „gute“ Zustand normativ beschrieben sind. Die übrigen Klassen werden dagegen lediglich aus der biologischen Qualitätskomponente abgeleitet. Das bedeutet, dass bspw. ein guter hydromorphologischer Zustand anzunehmen ist, wenn die biologische Qualitätskomponente einen guten Zustand aufweist. Ein sehr guter ökologischer Zustand kann dagegen nur vorliegen, wenn sowohl die biologische als auch die hydromorphologische und physikalisch-chemische Qualitätskomponente einen sehr guten Zustand aufweisen.

Bei der physikalisch-chemischen Qualitätskomponente sind dabei allgemeine Bedingungen (Temperatur, pH-Wert, Sauerstoffgehalt, etc.) zu beurteilen sowie synthetische und nicht synthetische Schadstoffe, für die entsprechende Umweltqualitätsnormen (UQN) festgelegt wurden. Eine UQN ist dabei definiert als „die Konzentration eines bestimmten Schadstoffs oder einer bestimmten Schadstoffgruppe, die in Wasser, Schwebstoffen, Sedimenten oder Biota aus Gründen des Gesundheits- und Umweltschutzes nicht überschritten werden darf“. Dabei gilt das Prinzip, wenn nur eine UQN der festgelegten Schadstoffe überschritten ist, kann die physikalisch-chemische Qualitätskomponente nicht mit „gut“ und somit der ökologische Zustand maximal mit „mäßig“ bewertet werden, auch wenn die biologischen Qualitätskomponenten alle mit „gut“ oder besser bewertet werden können.

Chemischer Zustand

Um den allgemeinen Zustand eines Oberflächengewässers bewerten zu können, ist neben dem ökologischen Zustand auch der chemische Zustand zu beurteilen. Hierzu sind zusätzlich zu den synthetischen und nicht synthetischen Schadstoffen, die bereits zur Beurteilung des ökologischen Zustands bei der physikalisch-chemischen Qualitätskomponente festgelegt sind, weitere spezifische Schadstoffe im Oberflächenwasserkörper zu bewerten, für die ebenfalls Umweltqualitätsnormen festgelegt wurden. Der chemische Zustand ist entsprechend als gut zu beurteilen, wenn die Umweltqualitätsnormen dieser zusätzlichen Stoffe nicht überschritten werden. Auch hier gilt, wenn nur eine Umweltqualitätsnorm der festgelegten Schadstoffe überschritten ist, ist der chemische Zustand mit „nicht gut“ zu bewerten

2.2 Bewertung des ökologischen und chemischen Zustands gemäß OGewV

In Deutschland werden die Vorgaben der WRRL u. a. durch die Oberflächengewässerverordnung (OGewV) umgesetzt, siehe nachfolgende Auszüge aus §§ 5 und 6 OGewV.

§ 5 Einstufung des ökologischen Zustands und des ökologischen Potenzials

„Die Einstufung des ökologischen Zustands eines Oberflächenwasserkörpers richtet sich nach den in Anlage 3 aufgeführten Qualitätskomponenten. Die zuständige Behörde stuft den ökologischen Zustand eines Oberflächenwasserkörpers nach Maßgabe von Anlage 4 Tabellen 1 bis 5 in die Klassen sehr guter, guter, mäßiger, unbefriedigender oder schlechter Zustand ein“, siehe § 5 (1) OGewV. Bei den in Anlage 3 aufgeführten Qualitätskomponenten handelt es sich analog zur WRRL um die „biologische Qualitätskomponente“, um die „hydromorphologische Qualitätskomponente“ sowie um die „chemische und allgemeine physikalisch-chemische Qua-

litätskomponente“. Auch hier setzen sich die 3 Qualitätskomponenten wiederum aus zugehörigen einzelnen Komponenten zusammen, bspw. aus der Gewässerflora und Gewässerfauna bei der biologischen Qualitätskomponente.

„Maßgebend für die Einstufung des ökologischen Zustands [...] ist die jeweils schlechteste Bewertung einer der biologischen Qualitätskomponenten nach Anlage 3 Nummer 1 in Verbindung mit Anlage 4. Bei der Bewertung der biologischen Qualitätskomponenten sind die hydro-morphologischen Qualitätskomponenten nach Anlage 3 Nummer 2 sowie die entsprechenden allgemeinen physikalisch-chemischen Qualitätskomponenten nach Anlage 3 Nummer 3.2 in Verbindung mit Anlage 7 zur Einstufung unterstützend heranzuziehen“, siehe § 5 (4) OGewV.

„Wird eine Umweltqualitätsnorm oder werden mehrere Umweltqualitätsnormen nach Anlage 3 Nummer 3.1 in Verbindung mit Anlage 6 nicht eingehalten, ist der ökologische Zustand oder das ökologische Potenzial höchstens als mäßig einzustufen“, siehe § 5 (5) OGewV. Analog zur WRRL gilt auch hier, dass wenn nur eine Umweltqualitätsnorm der festgelegten Schadstoffe überschritten ist, die „chemische und allgemeine physikalisch-chemische Qualitätskomponente“ nicht mit „gut“ und somit der ökologische Zustand maximal mit „mäßig“ bewertet werden kann.

§ 6 Einstufung des chemischen Zustands

„Die Einstufung des chemischen Zustands eines Oberflächenwasserkörpers richtet sich nach den in Anlage 8 Tabelle 2 aufgeführten Umweltqualitätsnormen. Erfüllt der Oberflächenwasserkörper diese Umweltqualitätsnormen, stuft die zuständige Behörde den chemischen Zustand als gut ein. Andernfalls ist der chemische Zustand als nicht gut einzustufen“, siehe § 6 OGewV.

Die Einstufung des chemischen Zustands eines Oberflächenwasserkörpers in „gut“ oder „nicht gut“ richtet sich somit nach den UQN, die in der OGewV geregelt sind. UQN sind somit verbindlich einzuhaltende Konzentrationsgrenzwerte für gesetzlich bestimmte Schadstoffe oder Schadstoffgruppen. Dabei gilt wieder, dass der chemische Zustand eines Oberflächenwasserkörpers bereits als „nicht gut“ einzustufen ist, falls auch nur für einen dieser Stoffe oder Stoffgruppen die UQN überschritten wird.

Anmerkungen zum chemischen Zustand

Manche Schadstoffe sind so weit verbreitet, dass sie als "ubiquitär" (überall vorkommend) bezeichnet werden. In der Regel sind diese Stoffe persistent, also langsam bzw. gar nicht abbaubar. Da Wasserkörper von diesen Schadstoffen belastet sein können, ohne dass es konkrete Einleitungen gibt, müssten erforderliche Maßnahmen u. U. an ganz anderer Stelle ansetzen. Bei der Bewertung des chemischen Zustands gibt es daher noch die Unterscheidung zwischen dem chemischen Zustand ohne ubiquitäre Stoffe und dem chemischen Zustand gesamt (einschließlich ubiquitärer Stoffe).

2.3 Bewertung der Oberflächengewässer in Nordrhein-Westfalen

In Nordrhein-Westfalen (NRW) erfolgt die Gewässerüberwachung anhand eines vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen erstellten „Leitfaden Monitoring Oberflächengewässer“ (MKULNV,

2020). In diesem Leitfaden sind ebenfalls Vorgaben für biologische und chemische Parameter genannt, die zur Beurteilung der Gewässerkörper in NRW heranangezogen werden. Im Anhang D4 des Leitfadens sind einerseits die Umweltqualitätsnormen (UQN) für die gesetzlich verbindlich geregelten Stoffe enthalten sowie zusätzlich Orientierungs- und Präventivwerte für gesetzlich nicht verbindlich geregelte Stoffe. Bei einem Orientierungswert (OW) handelt es sich um einen fachlich abgeleiteten Konzentrationswert eines spezifischen Stoffes, der eine Beurteilung der Auswirkungen des spezifischen Stoffes auf die biologische Qualitätskomponente erlaubt. Bei einem präventiven Vorsorgewert (PV) handelt es sich dagegen lediglich um einen generellen, auf Konventionen beruhenden Konzentrationswert, der jedoch fachlich nicht abgeleitet wurde, da die Auswirkungen des spezifischen Schadstoffes auf die biologische Qualitätskomponente derzeit nicht abgeschätzt werden kann. So ist bspw. für biologisch aktive Substanzen (wie Pflanzenschutzmittel, Arzneimittel/Röntgenkontrastmittel und deren Metaboliten), für die bisher noch keine Umweltqualitätsnormen oder Orientierungswerte vorliegen, ein genereller präventiver Vorsorgewert von 100 ng/L festgelegt worden. Bei der Überschreitung des präventiven Vorsorgewerts muss jedoch nicht zwingend von einer negativen Auswirkung auf die aquatische Lebensgemeinschaft ausgegangen werden.

Insgesamt umfasst der Anhang D4 des „Leitfaden Monitoring Oberflächengewässer“ eine sehr umfangreiche Stoffliste, in der neben Metalle / Halbmetalle, PAK, PCB, PFC, etc. auch Pflanzenschutzmittelrückstände, Arzneistoffe sowie zahlreiche Komplexbildner und Kontrastmittel zur Beurteilung des Gewässerzustandes enthalten sind. Durch die Bewertung der Gewässerkörper (u. a. anhand der genannten Stoffliste) können Gewässer, die nicht den Anforderungen des guten Zustandes entsprechen, identifiziert und somit ggfs. Maßnahmen zur Verbesserung des Zustandes vorgesehen werden.

2.4 Mikroschadstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen

Derzeit existieren keine einzuhaltenden gesetzlichen Grenzwerte für Mikroschadstoffkonzentrationen für den Ablauf kommunaler Kläranlagen. Eine Beurteilung der im Kläranlagenablauf gemessenen Mikroschadstoffe sollte daher im Zusammenhang mit den im Gewässer gemessenen Schadstoffen anhand von Zielwerten erfolgen, die für Oberflächengewässer festgelegt wurden. Als Zielwerte können die im vorherigen Kapitel genannten rechtlich verbindlichen Umweltqualitätsnormen verwendet werden sowie die Orientierungswerte und präventiven Vorsorgewerte, die im Anhang D4 des „Leitfaden Monitoring Oberflächengewässer“ zusammengestellt sind.

Bei der immissionsorientierten Betrachtung ist dabei zu beachten, dass die Einleitung in einen hydraulisch schwachen Vorfluter aufgrund der geringeren Verdünnung zu einer stärkeren Beeinflussung des Ökosystems führen kann, als bei einem hydraulisch leistungsstarken Vorfluter mit einer entsprechend größeren Verdünnung. Solange jedoch die Umweltqualitätsnormen der gesetzlich geregelten Stoffe im Gewässer nicht überschritten werden und somit die Voraussetzungen für einen guten chemischen Zustand gegeben sind, besteht derzeit rechtlich gesehen keine Notwendigkeit zur Reduzierung der über Kläranlagenabläufe eingeleiteten Mikroschadstoffkonzentrationen. Auch wenn derzeit kein gesetzlich geregeltes emissionsbasiertes Reinigungsziel mit verbindlich festgeschriebenen Grenzwerten für Mikroschadstoffkonzentrationen in Kläranlagenabläufen existiert, existiert eine Empfehlung vom Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (KOM-M) für einen emissionsbasierten Ansatz mit einer Eliminationsrate von mindestens 80 % bezogen auf ausgewählte Indikatorsubstanzen (KOM-M NRW, 2016), siehe auch Kapitel 5.5.

3 Stand der Forschung und Technik

3.1 Verfahrensübersicht

Zur gezielten Mikroschadstoffelimination können kommunale Kläranlagen mit zusätzlichen Technologien erweitert werden. Derzeitig kommen Verfahren in Frage, die sich z. B. bei der Trinkwasseraufbereitung etabliert haben und für die somit schon entsprechende Erfahrungen vorliegen (DWA, 2015). Eine Übersicht dieser Verfahren mit ggfs. erforderlichen Nachbehandlungsverfahren ist in der nachfolgenden Abbildung 2 dargestellt.

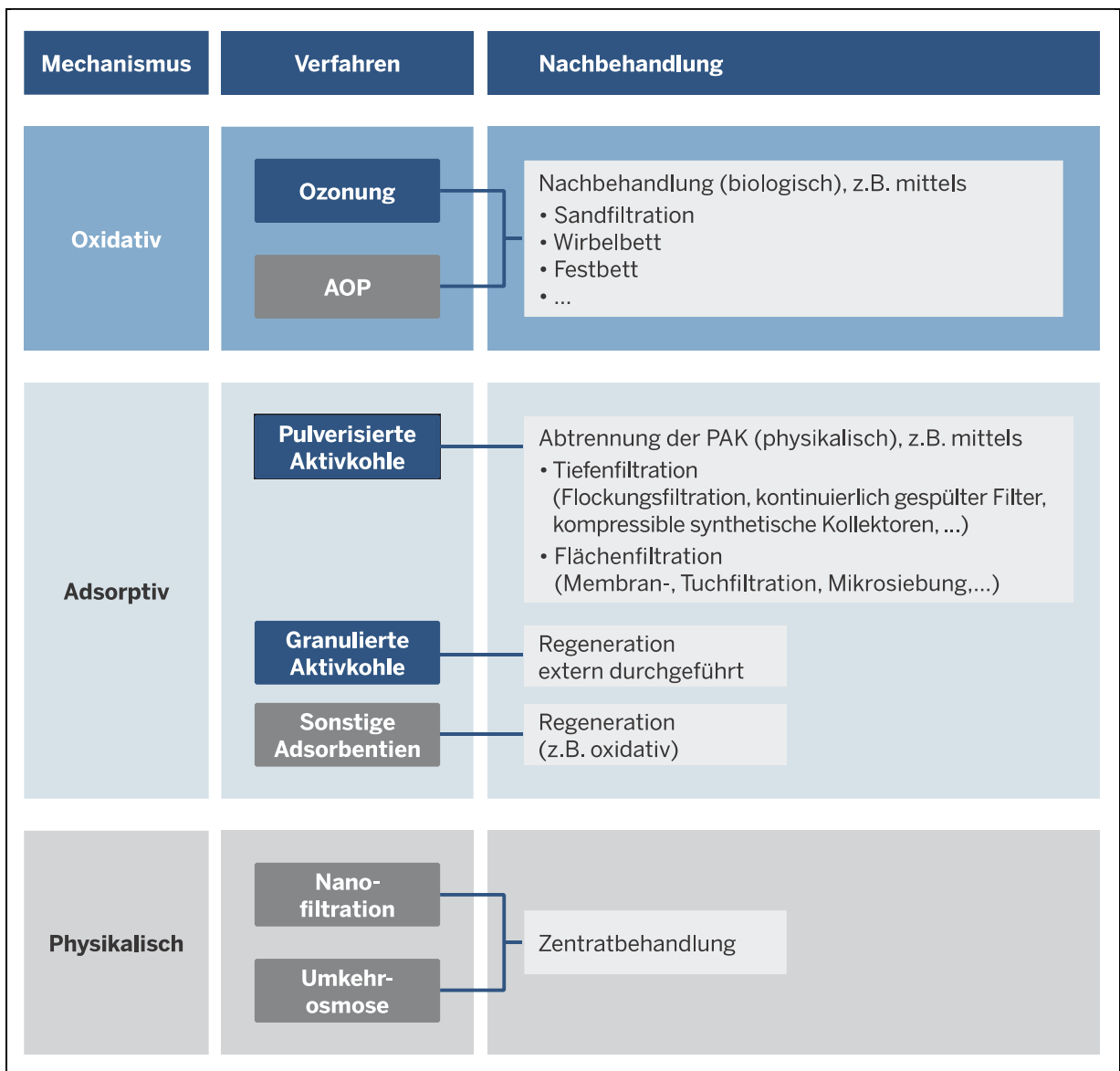


Abbildung 2: Verfahrensübersicht zur Mikrostoffelimination mit zugehörigen Nachbehandlungsverfahren – in dunkelblau hervorgehoben stellen die bereits großtechnisch umgesetzten Hauptverfahren dar (KOM-M NRW, 2016)

Für die in Abbildung 2 dargestellten Verfahren liegen im Bereich der Abwasserreinigung zum Teil noch recht wenige Betriebserfahrungen vor. Studien haben jedoch gezeigt, dass die Verfahren:

- chemische Oxidation mittels Ozon,
- Adsorption mittels pulverisierter Aktivkohle und
- Adsorption mittels granulierter Aktivkohle

ein breites Spektrum der persistenten – schwer abbaubaren – Mikroschadstoffe signifikant eliminieren können und zudem großtechnisch und wirtschaftlich umsetzbar sind (KOM-M NRW, 2016). Diese drei Verfahren stellen die Hauptverfahren dar, auf die in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen wird.

Das erweiterte Oxidationsverfahren AOP (*engl. Advanced oxidation processes*) sowie die physikalischen Verfahren (Nanofiltration und Umkehrosmose) kommen derzeit aus Erfahrungsmangel sowie aus Kostengründen nicht in Frage (DWA, 2015). Auch Membrane-Belebungsanlagen erreichen laut DWA (2015) keine wesentlich höhere Mikroschadstoffelimination als konventionelle Belebungsanlagen mit vergleichbarem Schlammalter. Aus diesen Gründen wird auf die Erläuterung dieser Verfahren verzichtet.

3.2 Oxidationsverfahren – Ozonung

Allgemeines

Das aus drei Sauerstoffatomen aufgebaute Molekül Ozon (O_3) liegt gasförmig vor, ist instabil, in hoher Konzentration tiefblau, für Mensch und Tier giftig (u. a. Reizung der Atemwege), schwerer als Luft, kurzlebig, zerfällt spontan zu Sauerstoff (O_2) und weist einen „stechenden“ Geruch auf. Zudem ist es als starkes Oxidationsmittel brandfördernd und kann aufgrund der hohen Instabilität des Gases nicht transportiert werden, sondern muss direkt am Einsatzort erzeugt werden (DWA, 2015).

Wirkungsprinzip

Die Ozonung ist ein etabliertes Oxidationsverfahren, welches bereits aus der Trinkwasser-, Industrieabwasser- und kommunalen Abwasseraufbereitungen bekannt ist, so dass entsprechende Erfahrungswerte vorliegen (DWA, 2015). Durch das Zuführen von Ozon in den Abwasserstrom wird ein breites Spektrum der vorliegenden Mikroschadstoffe durch den Prozess der Oxidation chemisch umgewandelt, womit die zuvor biologisch schwer abbaubaren Stoffe leichter abbaubar werden (Abegglen, et al., 2012).

Aufgrund der sehr hohen Reaktivität des Ozons erfolgt die Oxidation der Wasserinhaltsstoffe auf zwei Arten – durch direkte Oxidation und durch indirekte Oxidation. Bei der direkten Oxidation erfolgt eine direkte Reaktion des Ozons (O_3) mit organischen und anorganischen Abwasserinhaltsstoffen. Diese Oxidation ist sehr selektiv und greift bevorzugt Kohlenstoffdoppel- und phenolische Verbindungen sowie Aminogruppen an. Daher werden einige Stoffe sehr rapide angegriffen, während andere Stoffe dem Ozon gegenüber persistent, also schwer abbaubar sind. Bei der indirekten Oxidation zerfällt ein Teil des Ozons im Abwasser durch die enthaltenden organischen Kohlenstoffverbindungen und Hydroxyd-Ionen zu Hydroxyl-Radikalen.

Diese reagieren sehr schnell und unspezifisch mit unterschiedlichen und teilweise „harmlosen“ Abwasserinhaltsstoffen, was die Effizienz bzgl. der zu entfernenden Mikroschadstoffe mindert (Abegglen, et al., 2012).

Im technischen Einsatz ist die Löslichkeit und Stabilität des ins Abwasser einzutragenden Ozons von verschiedenen Faktoren wesentlich abhängig. Hierzu gehören die eingetragene Ozondosis, die Wassertemperatur, der pH-Wert sowie die Konzentration an organischen Verbindungen (DOC) und Radikalfängern (DWA, 2015).

Verfahrenstechnik

Verfahrenstechnisch wird die Ozonung der biologischen Reinigungsstufe nachgeschaltet, siehe Abbildung 3. Damit die Ozonung möglichst effektiv wirken kann, wird eine möglichst niedrige organische Hintergrundbelastung (DOC) vorausgesetzt, die optional und bei Erfordernis mittels einer vorgeschalteten Filtration des Abwassers erreicht werden kann (KOM-M NRW, 2016).

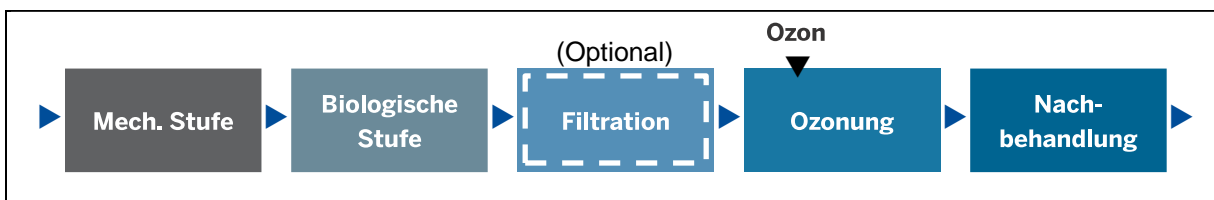


Abbildung 3: Schematische Einbindung einer Ozonanlage mit optional vorgeschalteter Filtration (verändert nach KOM-M NRW, 2016)

Eine schematische Darstellung einer Ozonanlage mit Ozonerzeuger und Abluftbehandlung ist in der nachfolgenden Abbildung 4 gezeigt. Der für die Ozonerzeugung benötigte Sauerstoff wird i.d.R. aus Flüssigsauerstoff hergestellt, der mithilfe eines Verdampfers in den gasförmigen Zustand überführt wird. Anschließend wird aus dem gasförmigen Sauerstoff im Ozongenerator mittels elektrischer Entladung etwa 10 M.-% Ozon erzeugt. Da der Prozess verhältnismäßig energieintensiv ist und bis zu 90 % der elektrischen Energie in Abwärme umgewandelt wird, ist eine Kühlung der Ozongeneratoren erforderlich (Abegglen, et al., 2012).

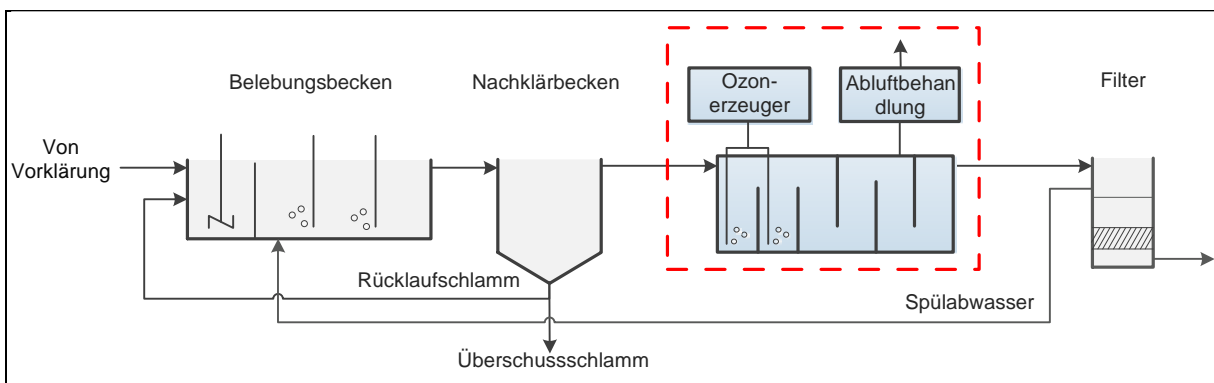


Abbildung 4: Prinzipschema einer Ozonanlage mit Ozonherstellung aus Flüssigsauerstoff, Restozonabgasvernichtung und nachgeschalteter Sandfiltration (Hillenbrand, et al., 2015)

Das erzeugte Ozon wird anschließend über Diffusoren oder mittels Pump-Injektoren-System (z. B. Venturi-Injektor) in den Ozonreaktor eingetragen. Diffusoren tragen das Ozon wie Blasenbelüfter ein, während Injektoren zuerst einen Teilstrom des Abwassers mit Ozon versetzen und diesen dann in den Ozonreaktor einleiten (KOM-M NRW, 2018d). Der Ozonreaktor kann mit Umlenk- und Trennwänden in Kaskaden eingeteilt werden. Dabei sind zur Erhöhung der Ozonexposition (Produkt aus Ozonkonzentration und verfügbarer Reaktionszeit) die Diffusoren im Gegenstromprinzip anzuordnen. Abschließend ist das anfallende Rest-Ozon einer Abgasbehandlung zuzuführen (Abegglen, et al., 2012).

Nachbehandlung / Abbau -und Transformationsprodukte

Bei der Ozonung der Mikroschadstoffe entstehen verschiedene Abbau- und Transformationsprodukte. Die Toxizität der Abbau- und Transformationsprodukte sowie mögliche Folgen für die Umwelt sind noch weitestgehend unbekannt. Entsprechend den Forschungsergebnissen von Bahr, et al. (2007), Abegglen, et al. (2009) und Kreuzinger, et al. (2015) konnten im Ablauf der Ozonanlagen allerdings keine ökologischen Gefährdungspotenziale nachgewiesen werden. Auch wenn in Bezug auf kommunale Abwässer bisher keine ökotoxikologisch relevanten Konzentrationen nachgewiesen wurden, wird derzeit (aus Vorsorgegründen) eine biologische Nachbehandlung als erforderlich angesehen, zumal die meisten gebildeten Abbau- und Transformationsprodukte biologisch gut abbaubar sind (DWA, 2014). Zur Nachbehandlung können Sandfilter, Wirbel- und Festbettreaktoren sowie eines der Hauptverfahren – granulierte Aktivkohle Filter – der Ozonung nachgeschaltet werden (KOM-M NRW, 2016).

3.3 Adsorptionsverfahren – Aktivkohle

Allgemeines

Unter dem Begriff der Adsorption ist in diesem Kontext im Wesentlichen der physikalische Prozess zu verstehen, welcher die Anlagerung eines Moleküls (Adsorptiv) aus einer flüssigen Lösung oder gasförmigen Phase an die Oberfläche eines festen Stoffes (Adsorbens) zur Folge hat (DWA, 2015).

Aktivkohle wird mittels thermischer Aktivierung aus kohlenstoffhaltigen Rohstoffen hergestellt. Für die Adsorptionsverfahren kommen fossile Rohstoffe aus Holz, Stein- und Braunkohle aber auch Kokosnussschalen in Frage. Zur Erzeugung von 1 kg Aktivkohle sind 2 bis 5 kg Rohkohle erforderlich. Aktivkohle zeichnet sich durch eine poröse Struktur mit Rissen und Spalten aus und eignet sich aufgrund der großen spezifischen Oberfläche für den Adsorptionsprozess für nicht-polare organische Stoffe. Laut Herstellern liegt die Oberfläche im Bereich von 500 bis 1.500 m²/g. Andere adsorptionsfähige Materialien, wie z. B. Aluminiumoxide, Bentonite, Zeolithe und auch anorganische Eisen- sowie Aluminiumhydroxide, die bei der Fällung durch Floccenbildung entstehen, haben keinen wesentlichen Effekt bei der Mikroschadstoffelimination (DWA, 2015).

Für die Adsorptionsverfahren auf kommunalen Kläranlagen werden zwei Grundformen von Aktivkohlen eingesetzt – pulverisierte Aktivkohle (PAK) und granulierte Aktivkohle (GAK). PAK liegt in Korngrößen zwischen 0,1 µm bis 200 µm vor, während GAK Korngrößen im Bereich zwischen 0,2 mm bis wenige Millimeter aufweist. Die Anwendung der zwei Grundformen unterscheidet sich wesentlich (KOM-M NRW, 2018b), siehe auch nachfolgende Kapitel 3.3.1 und 3.3.2, in denen die beiden Verfahren PAK und GAK näher erläutert sind.

Wirkungsprinzip

Bei den Adsorptionsverfahren lagern sich die aus dem Abwasser zu entfernenden Mikroschadstoffe an die Oberfläche der eingesetzten Aktivkohle an. Dabei ist die Adsorptionskapazität limitiert. Sobald die Kapazität erschöpft ist, muss die Aktivkohle ersetzt bzw. regeneriert werden. Die Entsorgung der mit Mikroschadstoffen beladenen Aktivkohle kann hinsichtlich der Gefährdung der Umwelt durch mögliche Wiederfreisetzung der Schadstoffe problematisch sein und sollte stets kritisch hinterfragt werden. Eine Regenerierung der eingesetzten Aktivkohle ist im Allgemeinen durch thermische Prozesse möglich, jedoch kann die Regenerierung aufwändig sein, was wiederum mit hohen Kosten verbunden ist (Hillenbrand, et al., 2015).

Der Prozess der physikalischen Adsorption (Physisorption) wird in kommunalen Kläranlagen hauptsächlich durch van-der-Waals-Kräfte (elektrostatische Wechselwirkungen) verursacht. Hierbei erfolgt keine chemische Veränderung der Stoffe, weshalb der Vorgang vollständig reversibel ist (Pöpel, et al., 1988). Der Adsorptionsprozess verläuft in vier Teilschritten, siehe auch nachfolgende Abbildung 5. Zunächst befinden sich die zu entfernenden Abwasserinhaltsstoffe (Adsorptive) in der freien turbulenten Strömung (Flüssigphase). Nach dem Übergang (Grenzfilm) aus den turbulenten Strömungsverhältnissen in die laminare Grenzschicht diffundieren die Adsorptive näher an das Adsorbens. Anschließend erfolgt durch Filmdiffusion der Transport an adsorptive Zentren (Kienle, et al., 1980).

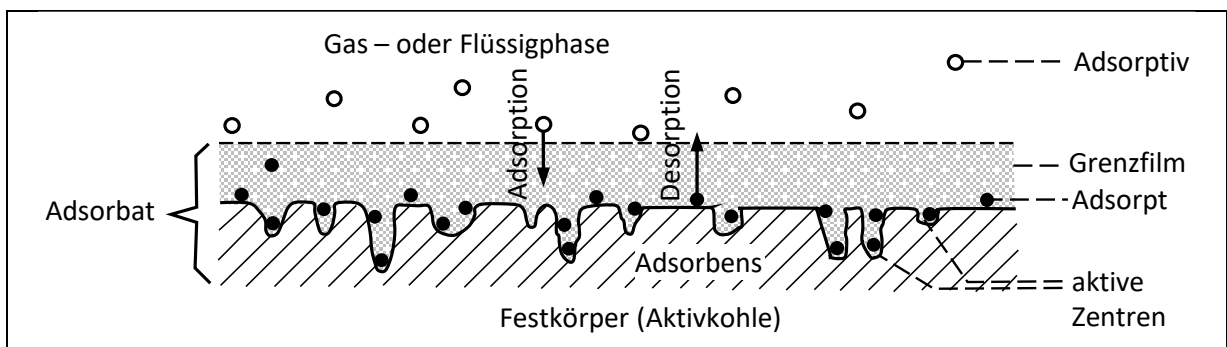


Abbildung 5: Schematische Darstellung der physikalischen Adsorption (Physisorption) und Zuordnung der Begriffe (adaptiert nach Kienle, et al., 1980)

Nach Pöpel et al. (1988) kann die Fähigkeit der Aktivkohleadsorption durch bestimmte Parameter beeinflusst werden. Hierzu gehören im Wesentlichen die Molekularstruktur, das Molekulargewicht, die Löslichkeit, die Polarität, die Ionisation, der pH-Wert und die Temperatur. Bei der Polarität ist anzumerken, dass aufgrund der unpolaren Oberflächeneigenschaften der Aktivkohle unpolare organische Abwasserinhaltsstoffe besser adsorbiert werden als polare Stoffe. Ebenso werden Moleküle mit geringem Molekulargewicht sowie schwer lösliche Stoffe gut adsorbiert. Polare Moleküle adsorbieren aufgrund ihrer guten Wasserlöslichkeit jedoch kaum. Bei der Betrachtung der Beladungsfähigkeit stehen verschiedene Stoffe in Konkurrenz um die aktiven Zentren, was zur Minderung der zu eliminierenden Mikroschadstoffe führt. Zudem können bereits adsorbierte Stoffe verdrängt werden (DWA, 2015).

3.3.1 PAK-Verfahren

In der nachfolgenden Abbildung 6 sind vier unterschiedliche Verfahrensvarianten der PAK-Dosierung schematisch dargestellt, die sich derzeit großtechnisch durchgesetzt haben.

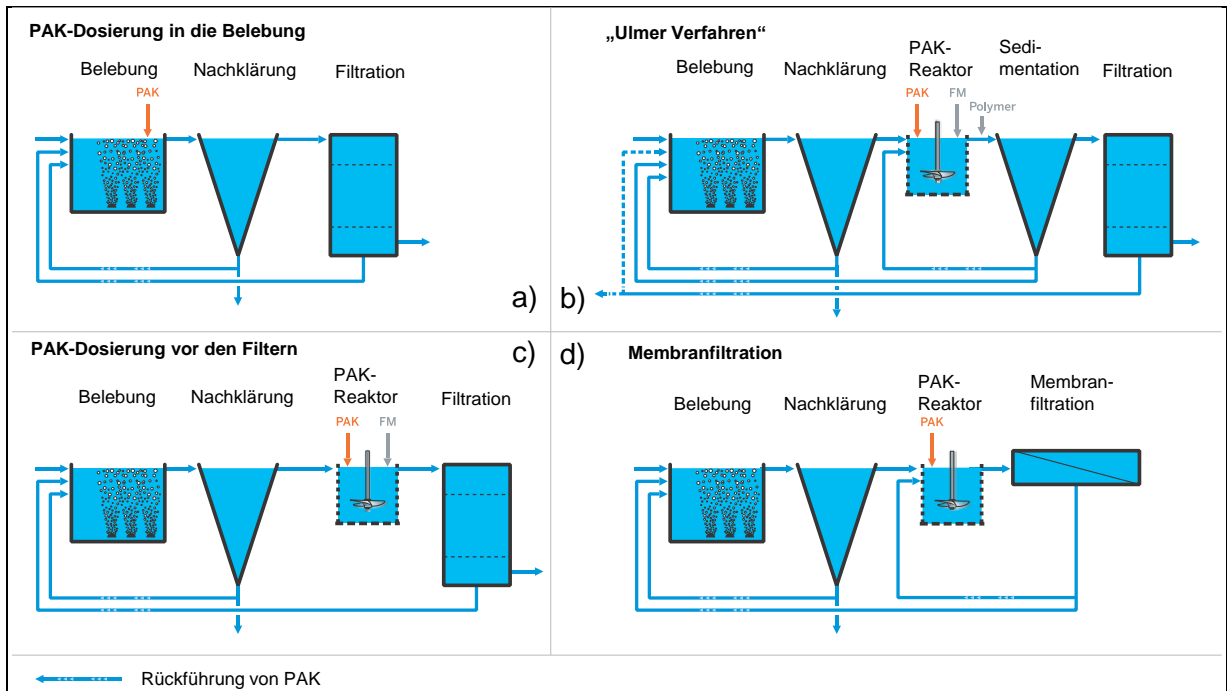


Abbildung 6: Schematische Verfahrensvarianten der PAK-Dosierung; FM: Flockungsmittel (modifiziert nach KOM-M NRW, 2018a)

Die PAK-Dosierung kann dabei direkt in die Belebungsbecken erfolgen (siehe Abbildung 6a), wobei diese Verfahrensvariante eine verhältnismäßig geringe Effektivität aufweist, da eine hohe Konzentration an gelöstem Kohlenstoff eine schnelle Beladung der PAK zur Folge hat. Mikroschadstoffe werden somit nur in vermindertem Maße adsorbiert (Benstöm, et al., 2012).

In der Regel erfolgt die PAK-Dosierung daher nach der biologischen Stufe, da bei diesen Verfahren das Wasser aus der Nachklärung eine geringe organische Hintergrundbelastung aufweist, siehe Abbildung 6b bis d. Dabei wird die PAK in einem Kontaktreaktor als Suspension mit Rührer eingebracht. Anschließend muss die mit Mikroschadstoffen beladene PAK mittels Trennverfahren (i.d.R. Filtrationsverfahren) wieder aus dem Wasser entfernt werden, damit die PAK mit den adsorbierten Mikroschadstoffen nicht ins Gewässer gelangt und eine potenzielle Gefährdung der Ökologie ausgeschlossen wird (KOM-M NRW, 2018b). In Abhängigkeit der nachgeschalteten Filtrationsanlage können ggfs. Flockungshilfsmittel (FM) für eine bessere Abtrennung eingesetzt werden.

Beim „Ulmer Verfahren“ ist ein zusätzliches Sedimentationsbecken zwischen dem Kontaktbecken und der Filtrationsanlage zwischengeschaltet, siehe Abbildung 6b. Durch eine Dosierung von Flockungshilfsmitteln (FM) im PAK-Reaktor wird die anschließende Sedimentation der PAK-/Fällprodukte im Sedimentationsbecken verbessert. Zusätzlich wird der sedimentierte Schlamm in das Kontaktbecken rezirkuliert (Rückführung von PAK), um eine Mehrfachbeladung zu erreichen und die Kontaktzeit mit dem Abwasser zu verlängern. Anschließend ist wiederum eine Filtration erforderlich, um ein möglichst partikelfreies, gereinigtes Abwasser in den Vorfluter einleiten zu können (KOM-M NRW, 2018b).

Der Austrittspfad der PAK ist bei den o.g. Verfahren i.d.R. der Abzug des Überschussschlammes aus der Nachklärung, womit die PAK den Aufbereitungsprozess verlässt und idealerweise der bestehenden anaeroben Schlammbehandlung hinzugeführt wird. Bisher konnte

an dieser Stelle keine Beeinträchtigung der Methanbildung festgestellt werden. Durch die PAK-Nachbehandlung erhöht sich der Schlammfall um ca. 5 bis 10 % (DWA, 2015). Abschließend müssen die Schlämme – und damit auch die Mikroschadstoffe – verbrannt werden. Der Schlamm darf keineswegs landwirtschaftlich genutzt werden, da mit einer Freisetzung der adsorbierten Mikroschadstoffe zu rechnen ist (KOM-M NRW, 2018b).

3.3.2 GAK-Verfahren

Die GAK-Filtration ist verfahrenstechnisch der biologischen Stufe bzw. der Nachklärung nachgeschaltet. Die GAK-Filtration kann sowohl im Auf- als auch im Abstrom erfolgen. Außerdem ist eine Ausführung in Druckkesselfiltern, in drucklosen offenen Betonfiltern und in kontinuierlich gespülten Filtern möglich (KOM-M NRW, 2016). Im Gegensatz zum PAK-Verfahren kommt es beim GAK-Verfahren zu keiner direkten Vermischung der Aktivkohle mit dem Klärschlamm (Hillenbrand, et al., 2015).

Bestehende Filteranlagen können ggfs. umgerüstet werden. Bei der Umrüstung einer bestehenden Filteranlage (i. d. R. eine Sandfiltration) wird das ursprüngliche Filtermaterial durch GAK ersetzt. Dies stellt bspw. eine Option für Kläranlagen dar, die über kein erweiterbares Baufeld verfügen. Alternativ sind neue eigenständige Filtrationsanlagen zu errichten. Generell kann einer GAK-Filtrationsanlage eine zusätzliche Filtrationsanlage vorgeschaltet werden, um die Partikelbelastung in der GAK-Filtration zu minimieren, siehe nachfolgende Abbildung 7. Dies führt dazu, dass entsprechend längere Einsatzzeiten (Betriebs- bzw. Standzeit) erzielt werden können (Hillenbrand, et al., 2015).

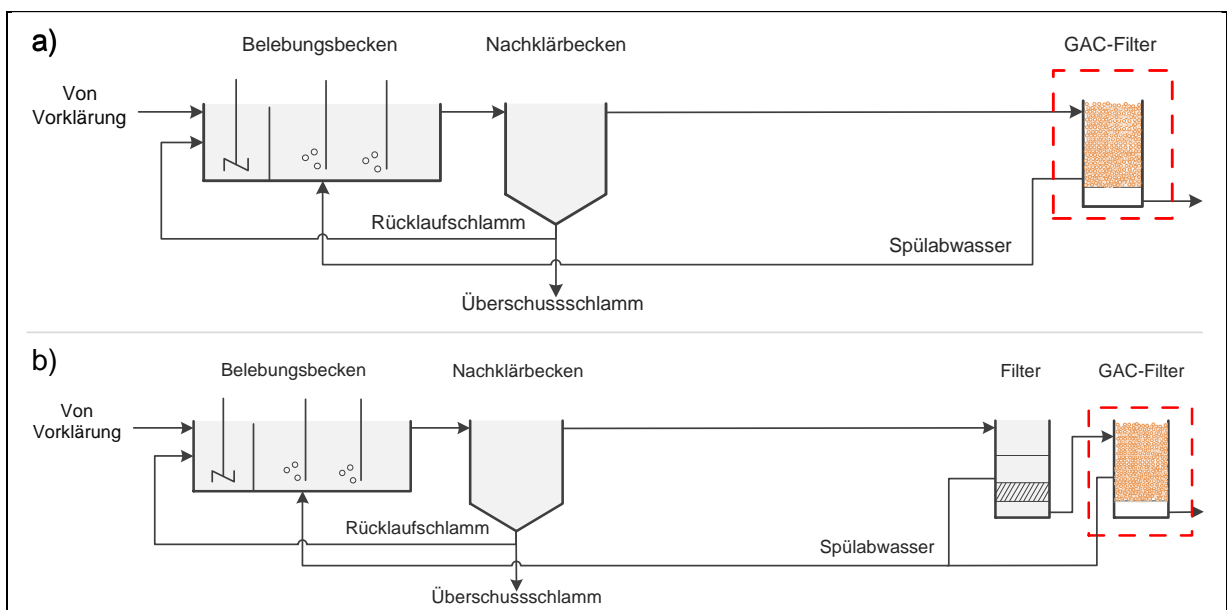


Abbildung 7: Schematische Verfahrensvarianten der GAK-Filtration (GAC = GAK, zusammengestellt nach Hillenbrand, et al., 2015)

Wenn nach längerem Einsatz die Eliminationsleistung der GAK-Filtration nicht mehr ausreicht und die GAK nahezu vollständig mit Mikroschadstoffen und DOC beladen ist, ist die GAK auszutauschen bzw. thermisch zu reaktivieren. Als Bezugsgröße für die Beurteilung der Standzeit

wird die Anzahl der durchflossenen GAK-Volumina (Bettvolumina in $\text{m}^3_{\text{Abwasser}} / \text{m}^3_{\text{GAK}}$) verwendet. Ein Austausch der GAK ist im Durchschnitt nach ca. 10 bis 24 Monaten notwendig. Bei der Reaktivierung der GAK im Ofen werden die Mikroschadstoffe thermisch zerstört, was gleichzeitig auch der Nachbehandlung des GAK-Verfahrens entspricht. Die thermische Reaktivierung wird von externen Dienstleistern erbracht (KOM-M NRW, 2016).

3.4 Gegenüberstellung der Hauptverfahren

Nach dem heutigen Wissensstand sind die vorgestellten Hauptverfahren – Ozon, PAK und GAK – zur Mikroschadstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen realisierbar und geeignet. Außerdem lassen sich diese Reinigungsverfahren gut in den Kläranlagenbestand integrieren. Dabei benötigt jedes Verfahren unterschiedliche Bauwerke zum Ausbau dieser weiteren Reinigungsstufe. Sowohl bei der PAK-Dosierung als auch bei der Ozonung sind Dosierungseinrichtungen und Kontaktbecken erforderlich. Lediglich beim Einbringen von PAK direkt ins Belebungsbecken kann von einem separaten Kontaktbecken abgesehen werden. Bei der Ozonung ist zur weitergehenden Elimination der Abbau- und Transformationsprodukte i.d.R. zusätzlich eine Nachbehandlung mittels biologisch aktiver Filteranlagen erforderlich. Bei der Anwendung von PAK ist zur Rückhaltung der mit Mikroschadstoffen beladenen PAK ebenfalls eine Nachbehandlung mittels Filteranlagen erforderlich, damit diese nicht ins Gewässer gelangen. Das GAK-Verfahren hat dagegen den Vorteil, dass keine weitere Nachbehandlung notwendig ist und dass bereits bestehende Filterstufen ggfs. auf eine Befüllung mit GAK umgerüstet werden können, so dass keine weiteren Bauwerke notwendig sind (Hillenbrand, et al., 2015). Weitere wesentliche Vor- und Nachteile der drei Hauptverfahren sind in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Wesentliche Vor- und Nachteile der Hauptverfahren (nach Hillenbrand, 2014)

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Ozon	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einfache und flexible Dosierung des Ozons ▪ Keine Entstehung von zusätzlichen Feststoffen ▪ Verbesserung der Hygieneparameter im Kläranlagenablauf 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bildung von ggf. toxischen Transformationsprodukten ▪ Aufgrund des hohen Energiebedarfs für die Herstellung des Ozon, Erhöhung des Energieverbrauchs der Kläranlage ▪ Hohe Sicherheitsanforderungen bezüglich Arbeitsschutz
PAK	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einfache und flexible Dosierung der Pulveraktivkohle ▪ Zusätzliche Verringerung der CSB-Ablaufwerte ▪ Verringerung der P_{ges}-Ablaufwerte aufgrund der verfahrensbedingten zusätzlichen Zugabe von Fällmittel ▪ Erhöhter Heizwert des Klärschlamm aufgrund der beinhalteten Pulveraktivkohle 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erhöhung des Klärschlammfalls ▪ Entsorgungsproblematik des mit Aktivkohle vermischten Klärschlammes aufgrund der enthaltenen Spurenstoffe ▪ Einmalige Verwendung der Aktivkohle aufgrund unwirtschaftlicher Regenerierung ▪ Mögliche Verlagerung der Umweltverschmutzung ins Ausland
GAK	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Möglichkeit zur Regenerierung der ausgeschöpften Aktivkohle, damit mehrfache Verwendung der Aktivkohle möglich ▪ Zusätzliche Verringerung der CSB-Ablaufwerte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Konzentrationsanstieg bei Erreichung der Adsorptionskapazität ▪ arbeitsintensiver Austausch des Filterbetts ▪ Mögliche Verlagerung der Umweltverschmutzung ins Ausland

Bezüglich der Wirksamkeit der Mikroschadstoffeliminierung kann Tabelle 2 herangezogen werden. Hier ist die geschätzte Eliminationsleistung der jeweiligen Verfahren nach Bolle, et al. (2011) zusammengetragen. Die Tabelle stellt einen reduzierten Auszug dar.

Tabelle 2: Wirksamkeit der Hauptverfahren bezüglich der Elimination ausgewählter Mikroschadstoffe (modifiziert nach Bolle, et al., 2011)

Stoff	Ozonung	GAK-Filtration	PAK in ein Kontaktbecken	PAK in einen Flockungsraum	
Benzotriazol	+	N/A	+ bis ++	0 bis +	
Carbamazepin	++	+ bis ++	+ bis ++	0 bis +	
Diclofenac	++	++	+ bis ++	0 bis +	
Metoprolol	+ bis ++	N/A	++	N/A	
Sulfamethoxazol	++	0	0 bis +	- bis 0	
Generalisierte Eliminationsleistung:		[-]: < 10 %	[0]: 10 - 50 %	[+]: 50 - 90 %	[++]: > 90 %

3.5 Verfahrenskombinationen

Bei bestimmten Mikroschadstoffen kann mittels Adsorptions- oder Oxidationsverfahren eine Elimination von z. T. über 90 % erzielt werden. Andere Mikroschadstoffe wiederum lassen sich mit diesen Verfahren nicht oder nur zu einem unwesentlichen Teil eliminieren. Durch eine Kombination der genannten Verfahren, ggfs. auch unter der Einbeziehung von naturnahen Prozessen (z. B. Bodenfilter) oder weiterer Verfahren, kann die Eliminationsrate dagegen nochmals gesteigert werden (DWA, 2015).

Mögliche Verfahrenskombinationen können nach KOM-M NRW (2016) folgende sein, die der biologischen Stufe nachgeschaltet sind:

- Ozonung mit nachgeschalteter, biologisch aktivierter Aktivkohle (BAK). Ein neuer Ansatz in der kommunalen Abwasserbeseitigung und aktueller Forschungsgegenstand.
- Ozonung mit anschließender Dosierung von PAK, was zur gleichzeitigen Nachbehandlung dient und die Konzentration an Transformationsprodukten reduziert.
- Erweiterte Oxidationsverfahren (AOP) mit paralleler UV-Behandlung oder UV-Behandlung mit und ohne Zugabe von Wasserstoffperoxid oder Ozonung mit Zugabe von Wasserstoffperoxid.
- Aktivkoks-Festbettbiologie (AKFBB) mit nachgeschalteter UV-Behandlung, welche die Mikroschadstoffeliminierung durch adsorptiv-biologischen Abbau unterstützt.
- Kombination aus Adsorption und Elektrooxidation (EAOP), mit der laut Hersteller eine Eliminationsrate von über 80 % bei Diclofenac und Carbamazepin erreicht werden kann. Ein neues Verfahren aus Großbritannien, welches sich in der Pilotphase befindet.
- Kombination aus PAK-Dosierung und nachfolgendem Membranbioreaktor (MBR) mit eingetauchter Mikro- oder Ultrafiltration (UF) zur Ausschließung des Eintrags von mit Mikroschadstoff beladener Aktivkohle ins Gewässer, zur weiteren Reduzierung von

CSB und Phosphor sowie zur Erhöhung der adsorptiven Aufnahme von Mikroschadstoffen durch längere Verweildauer im Kontaktbecken. Vorteilhaft, wenn ein MBR bereits im Kläranlagenbestand vorhanden ist (KOM-M NRW, 2018c).

3.6 Großtechnische Umsetzungen

Die zuvor erläuterten Verfahren und Technologien zur Mikroschadstoffeliminierung wurden u. a. in Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg sowie in der Schweiz bereits großtechnisch untersucht bzw. umgesetzt. Nach dem Stand von Mai 2018 wurden in NRW insgesamt 17 großtechnische Untersuchungen durchgeführt. 11 Anlagen sind in Betrieb gegangen, 19 weitere Anlagen befinden sich in der Planungs- oder Bauphase. In Baden-Württemberg (Stand: Juni 2020) sind 16 Anlagen in Betrieb und 18 Anlagen in Planung/Bau. In der Schweiz sind (Stand Februar 2020) 10 Anlagen in Betrieb und 29 Anlagen in Planung/Bau, siehe nachfolgende Tabelle 3 sowie zusätzlich Abbildung 8 für NRW.

Tabelle 3: Technische Umsetzungen und zukünftige Vorhaben zur Mikroschadstoffelimination in NRW (KOM-M NRW, 2018a) , BW (KOM-S BW, 2020) und CH (VSA, 2020)

	Nordrhein-Westfalen Stand: Mai 2018		Baden-Württemberg Stand: Juni 2020		Schweiz Stand: Februar 2020	
	Betrieb	Planung/Bau	Betrieb	Planung/Bau	Betrieb	Planung/Bau
Anzahl	11	19	16	18	10	29
Ozon	5	N/A	1	4	4	9
PAK	2	N/A	13	8	4	10
GAK	4	N/A	2	6	1	9
Verfahrens- kombinationen	0	N/A	0	0	1	1
Summe	30		34		39	

Bei der Betrachtung von Tabelle 3 hinsichtlich der Verteilung der umgesetzten, geplanten bzw. in der Bauphase befindlichen Verfahren kann festgestellt werden, dass in Baden-Württemberg gegenwärtig das PAK-Verfahren mit einem Anteil von rund 62 % deutlich überwiegt. In der Schweiz fällt die Verteilung der Hauptverfahren mit 1/3 Ozon, 36 % PAK, 26 % GAK recht ausgewogen aus. In NRW dominieren bei den bereits gebauten Anlagen die beiden Verfahren Ozonung und GAK. Bei den geplanten bzw. im Bau befindlichen Anlagen waren die einzelnen Hauptverfahren nicht eindeutig auszumachen, da entsprechende Informationen nicht vollständig vorlagen (N/A). In der nachfolgenden Abbildung 8 sind Kläranlagenstandorte in NRW aufgeführt, die (Stand 05/2018) bereits eine Machbarkeitsstudie oder großtechnische Untersuchungen durchgeführt haben bzw. auf denen bereits eine 4 Reinigungsstufe zur Mikroschadstoffeliminierung gebaut wurde oder derzeit in Planung/Bau ist (KOM-M NRW, 2018a).

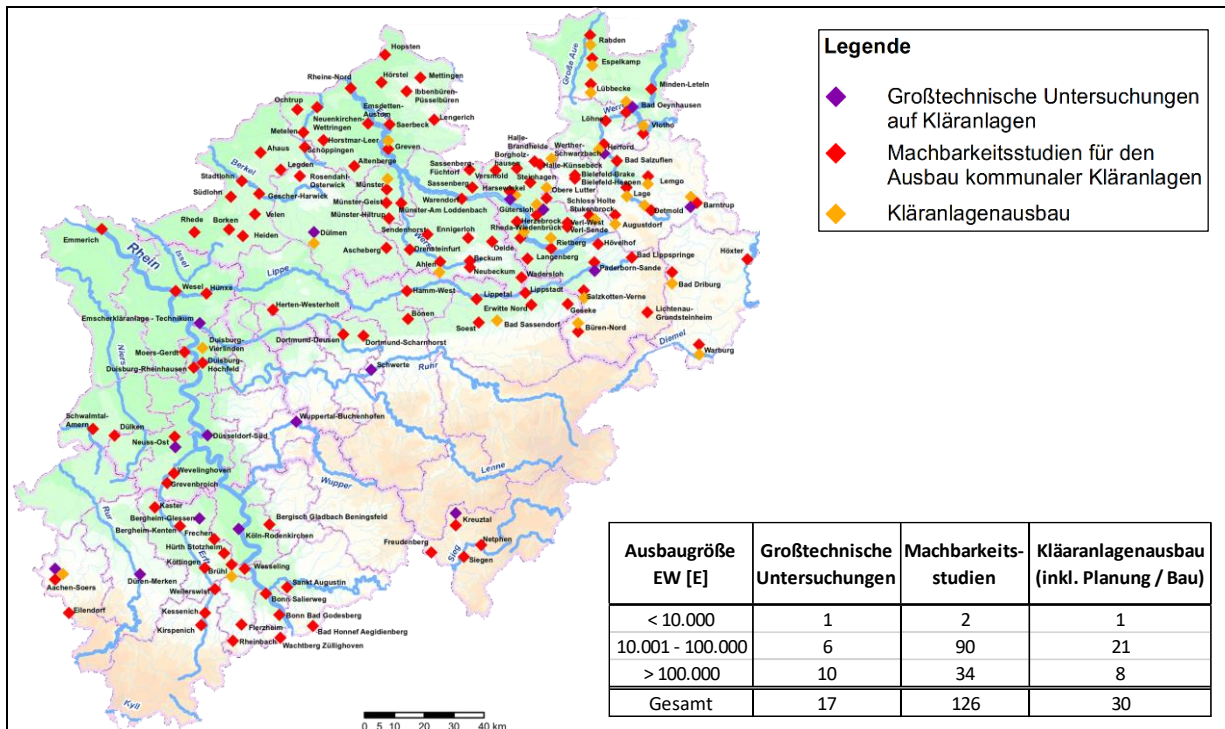


Abbildung 8: Stand (05/2018) der Mikroschadstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen in NRW (modifiziert nach KOM-M NRW, 2018a)

Abgesehen von den drei vorgestellten Hauptverfahren werden derzeit verschiedene Verfahrenskombinationen untersucht, von denen einige nachfolgend aufgeführt sind (KOM-M NRW, 2018a):

- Auf der Kläranlage Bergheim-Glessen wird der Einsatz von GAK in einem bestehenden MBR untersucht.
- Die Ausnutzung eines bestehenden MBR, allerdings unter dem Einsatz von PAK, wird in der Kläranlage Kreuztal untersucht.
- In der Versuchsanlage der Emscher Kläranlage „Technikum“ finden mehrere Untersuchungen statt: die Kombination von PAK und UF-Membran, der Vergleich von PAK in die Biologie und dem Adsorption-Flockung-Filtrations-Verfahren (AFF) sowie die Kombination von Ozonung mit nachgeschalteter GAK-Filtration.
- Ein Versuch der Verwendung von reaktiverer PAK für den Einsatz in kommunalen Kläranlagen wird vom Stadtentwässerungsbetrieb Düsseldorf analysiert – die PAK werden dabei aus Aktivkohleschlämmen von Trinkwasserwerken reaktiviert.
- Vom Stadtentwässerungsbetrieb Köln wird die Umrüstung der bestehenden BIOFOR®-Filtrationsanlage in Köln-Rodenkirchen mittels GAK und Ozon untersucht.
- Auf dem Gruppenklärwerk Paderborn-Sande wird dem BAK-Verfahren zur Mikroschadstoffelimination nachgegangen.

4 Kläranlage Aegidienberg

4.1 Örtliche Verhältnisse

Die Stadt Bad Honnef befindet sich im Rhein-Sieg-Kreis, im Süden von Nordrhein-Westfalen, an der Landesgrenze zu Rheinland-Pfalz. Die am rechten Rheinufer gelegene Stadt umfasst eine Fläche von ca. 48,2 km². Mit einer Einwohnerzahl von 25.812 Einwohnern beträgt die mittlere Einwohnerdichte, bezogen auf die Fläche des gesamten Stadtgebiets, rd. 536 Einwohner pro km² (IT.NRW, 2019).

Zur Reinigung der im Stadtgebiet anfallenden Abwässer betreibt das Abwasserwerk der Stadt Bad Honnef die im Rheintal gelegene Kläranlage Bad Honnef-Tallage sowie die in Höhenlage gelegene Kläranlage Bad Honnef-Aegidienberg. Das Einzugsgebiet der Kläranlage Bad Honnef-Tallage erstreckt sich dabei entlang des Rheins und den ansteigenden Hängen des Siebengebirges. Das Einzugsgebiet der Kläranlage Bad Honnef-Aegidienberg liegt dagegen im Siebengebirge und ist vom Einzugsgebiet der Kläranlage Bad Honnef-Tallage durch das Waldgebiet des Naturparks Siebengebirge getrennt. Aufgrund der Entfernung und des Höhenunterschieds der beiden Einzugsgebiete erfolgt die Entwässerung unabhängig voneinander. Eine Abwasserübergabe oder -übernahme zwischen den beiden kanalisierten Einzugsgebieten findet nicht statt. Verkehrstechnisch sind das Siebengebirge und das Rheintal durch die Schmelzthalstraße (L144) miteinander verbunden, siehe Abbildung 9.

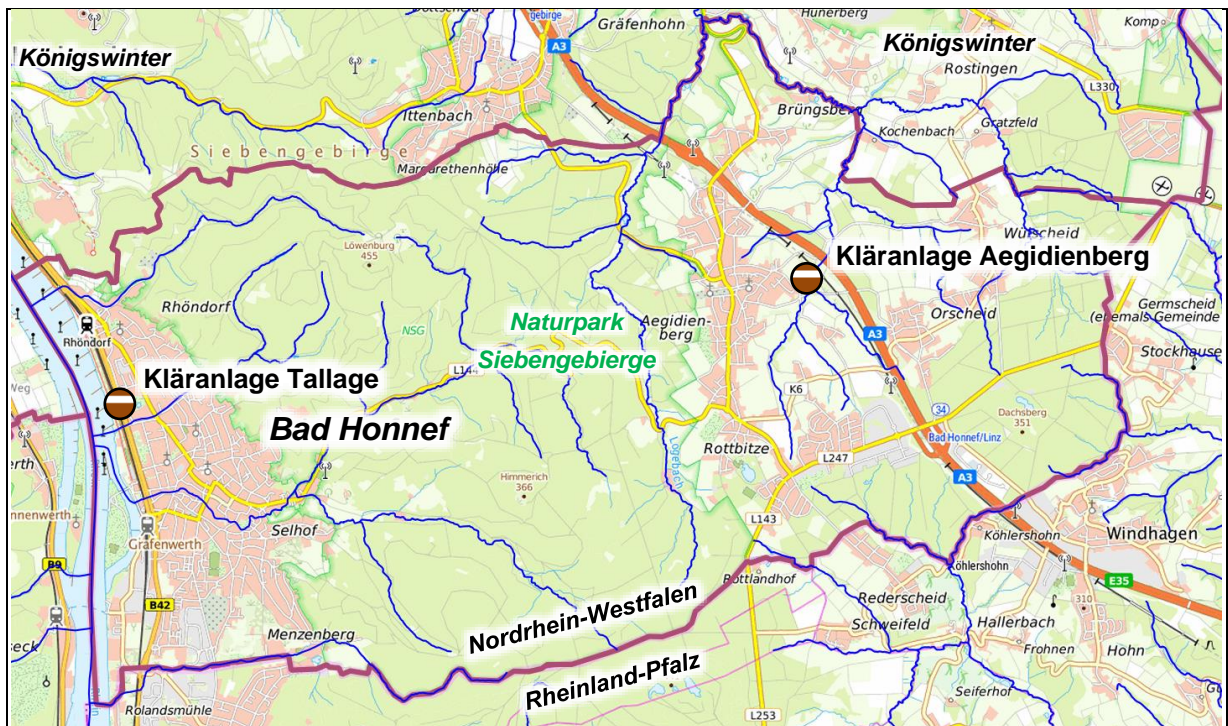


Abbildung 9: Stadtgebiet Bad Honnef mit den Standorten der Kläranlage Tallage und der Kläranlage Aegidienberg (modifiziert nach ELWAS-WEB, 2020)

4.2 Vorfluter

Der Ablauf der Kläranlage Aegidienberg wird in den Mittelgebirgsbach „Kochenbach“ eingeleitet, siehe nachfolgende Abbildung 10. Der Kochenbach entspringt etwa 2,2 km oberhalb der Kläranlageneinleitung im Süden von Bad Honnef-Aegidienberg in der Ortslage Rottbitze auf einer Höhe von ca. 305 m NHN. Nach einem überwiegend nördlichen Fließweg von 4,65 km mündet der Kochenbach auf einer Höhe von rd. 184 m NHN als linker Zulauf in den Quirrenbach, der nach rd. 2,77 km an der nördlichen Stadtgrenze von Bad Honnef / Königswinter als rechter Zulauf in den Pleisbach mündet, der wiederum bei St. Augustin in die Sieg mündet, die bei Troisdorf-Bergheim in den Rhein mündet.

Das oberirdische Einzugsgebiet des Kochenbachs ist somit ein Teileinzugsgebiet des Quirrenbachs, der wiederum zum Teileinzugsgebiet des Pleisbachs gehört. Mit einem oberirdischen Einzugsgebiet von 8,02 km² (< 10 km²) ist der Kochenbach kein berichtspflichtiges Gewässer, jedoch der Hauptvorfluter für das Siedlungsgebiet Bad Honnef-Aegidienberg, da hier die meisten Einleitungsstellen anliegen, einschließlich der Kläranlage als zentrale Abwasserreinigungsanlage. Relevante Indirekteinleiter sowie Krankenhäuser liegen im Einzugsgebiet nicht vor (ELWAS-WEB, 2020). Ein Übersichtsplan der kanalisierten Einzugsgebiete ist in Anhang A1 auf Seite 72 hinterlegt.

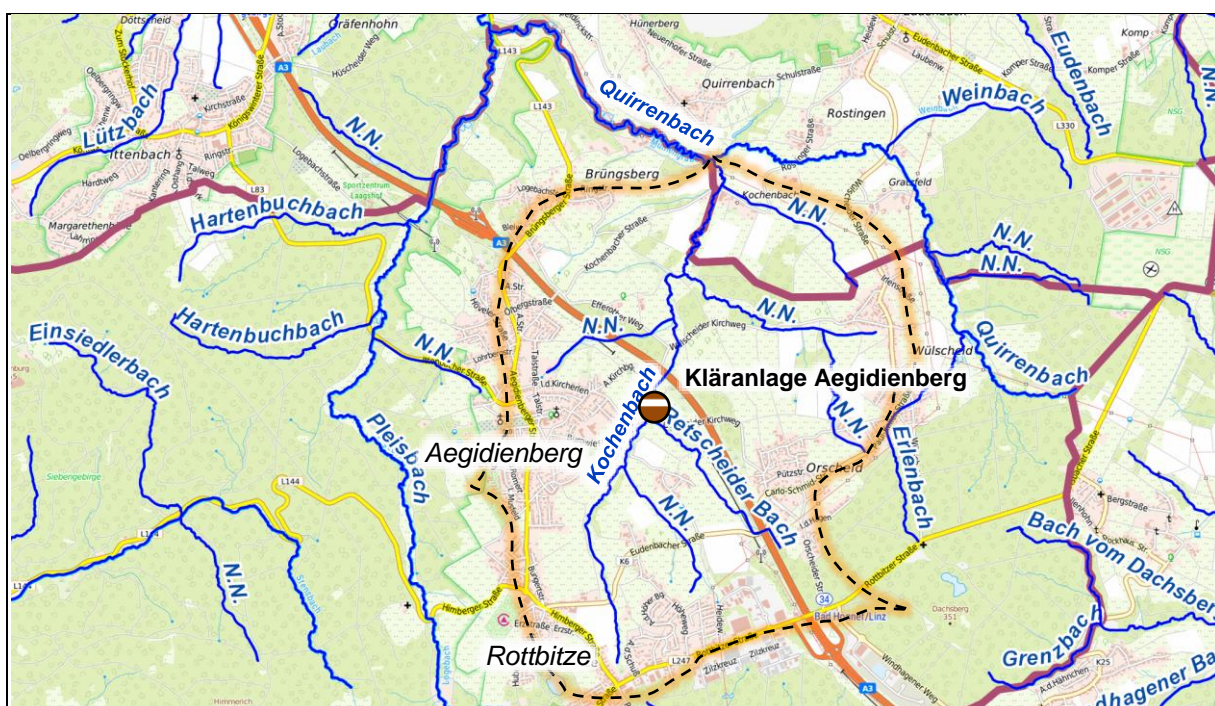


Abbildung 10: Oberirdisches Einzugsgebiet des Kochenbachs (gestrichelte schwarze Linie) (modifiziert nach ELWAS-WEB, 2020)

Aus den Niederschlagsaufzeichnungen der in Bad Honnef-Brüingsberg gelegenen Regenstation ergibt sich eine mittlere jährliche Niederschlagshöhe von 858 mm. Dies entspricht in etwa der durchschnittlichen Niederschlagshöhe Nordrhein-Westfalens (ELWAS-WEB, 2020).

4.3 Anlagenbestand

Die KA Aegidienberg ist ursprünglich 1978 in Betrieb gegangen und wurde in den Jahren 1995 bis 1997 für den Anschluss von 10.000 Einwohnerwerten (EW) erweitert, wobei die Erweiterung weitestgehend einem Neubau entsprach. Das Einzugsgebiet der Kläranlage Bad Honnef-Aegidienberg ist in 28 Teileinzugsgebiete unterteilt mit einer kanalisierten Einzugsgebietsfläche von insgesamt $A_{E,k} = \text{rd. } 344 \text{ ha}$ und einer kanalisierten befestigten Fläche im Endausbau von $A_{E,k,b} = \text{rd. } 176 \text{ ha}$. Davon wird etwa $2/3$ im Mischsystem und $1/3$ im Trennsystem entwässert. Der maximale Mischwasserzulauf wurde auf $Q_M = 432 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. 120 l/s bemessen. Die Zulaufbegrenzung erfolgt unmittelbar vor dem Rechengebäude durch eine MID-gesteuerte Drosselstrecke. Darüber hinausgehende Mischwasserzuflüsse werden im rd. 2.200 m^3 großen Regenüberlaufbecken vor der Kläranlage zwischengespeichert bzw. nach Vollfüllung etwa 370 m oberhalb des Kläranlagenablaufs in den Kochenbach entlastet.

Die KA Aegidienberg besteht gewissermaßen bereits aus vier Reinigungsstufen, 1. mechanisch, 2. biologisch, 3. chemisch sowie einer weitergehenden Reinigungsstufe in Form einer nachgeschalteten Sandfiltrationsanlage. Die nachfolgende Abbildung 11 zeigt das entsprechende Fließschema des Reinigungsprozesses auf der KA Aegidienberg mit den einzelnen Verfahrensschritten (ohne Darstellung der 3. chemischen Reinigungsstufe, die als Phosphorelimination simultan in der biologischen Reinigung erfolgt). In der anschließenden Abbildung 12 ist der wesentliche Anlagenbestand der KA Aegidienberg im Luftbild dargestellt.

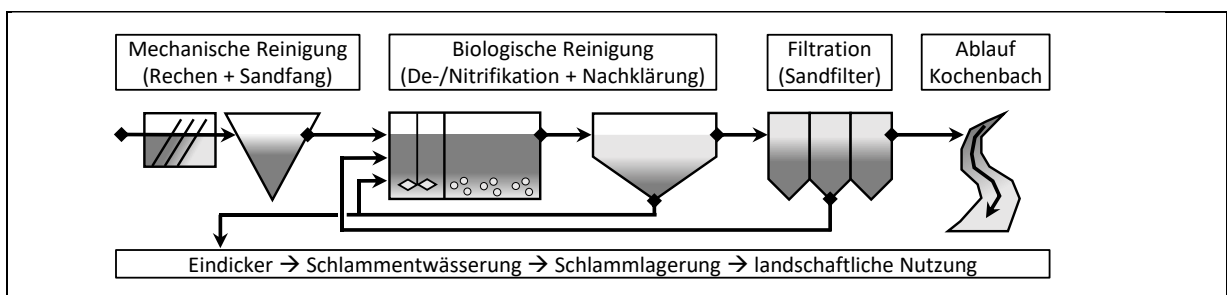


Abbildung 11: Fließschema der KA Aegidienberg durch die einzelnen Verfahrensschritte (beginnend bei der Zulaufregelung)



Abbildung 12: Luftbild der Kläranlage Aegidienberg mit Beschriftung des Anlagenbestands (Digitales Orthophoto nach ELWAS-WEB, 2020)

Nach der Zulaufregelung durchläuft das Abwasser zunächst die 1. mechanische Reinigungsstufe, die zweistraßig mit zwei Feinstrechen sowie belüfteten Sand-/Fettfängen ausgeführt ist. Nach dieser groben Reinigung folgt die 2. biologische Stufe mit vorgeschalteter Denitrifikation, anschließender Nitrifikation mit Plattenbelüfter und der abschließenden Sedimentation in zwei Nachklärbecken. Die Phosphorelimination erfolgt als 3. chemische Reinigungsstufe mittels chemischer Simultanfällung in den Belebungsbecken. Als Fällmittel wird dabei eine 40 %-ige Eisen-III-Chloridlösung eingesetzt. Nach dem Durchlaufen der 3 Reinigungsstufen wird das Klarwasser aus den Nachklärbecken zu einem Verteilerbauwerk abgeleitet und von dort zur nachgeschalteten Filtrationsanlage gepumpt. Die nachgeschaltete Sandfiltration wurde als zusätzliche Reinigungsstufe errichtet, um die erhöhten Anforderungen bzgl. der Ablaufwerte sicher einzuhalten, die aufgrund des sehr leistungsschwachen und schützenswerten Kochenbachs im Juni 1991 durch die Obere Wasserbehörde festgelegt wurden. Die nachgeschaltete Sandfiltration besteht dabei aus sechs DynaSand®-Filtern, die kontinuierlich ohne Rückspülunterbrechungen betrieben werden, wobei das kontinuierlich abgezogene Spülwasser zurück in die Belebungsbecken abgeleitet wird, siehe auch Detailinformationen in Kapitel 4.4. Nach der Sandfiltration wird das geklärte Abwasser über das Ablaufbauwerk (Probenahmenschacht) in den Kochenbach eingeleitet.

Der in den Nachklärbecken abgesetzte Schlamm wird zum Teil als Rücklaufschlamm in die Denitrifikation zurückgeführt sowie als Überschussschlamm zur statischen Eindickung abgezogen. Anschließend wird der eingedickte Überschussschlamm mittels Zentrifuge auf Trockensubstanzgehalte (TS) zwischen 35 - 37 % entwässert und nachfolgend durch Zugabe von gelöschtem Kalk stabilisiert. Bis zur landschaftlichen Verwertung wird der entwässerte und mit Kalk konditionierte Klärschlamm im überdachten Schlamm lagerbecken zwischengelagert.

Zur kontinuierlichen Erfassung und Überwachung von Messgrößen ist die KA Aegidienberg mit einem Prozessleitsystem ausgestattet. Notwendige Einstellungen für die Reinigungsprozesse, wie z. B. Schieber, Pumpen, Gebläse, etc. können hiermit angepasst werden. Störungen werden über ein Signalhorn akustisch signalisiert und bei nicht Besetzung der Anlage telefonisch weitergeleitet.

Des Weiteren bestehen im vorhandenen Verteilerbauwerk alle Voraussetzungen zur Installation von zwei Festbettreaktoren mit einem Gesamtvolumen von rd. 75 m³, die für den Fall der Überschreitung des geforderten Ammonium-Stickstoffgehalts (NH₄-N) vorbereitet wurden. Die mögliche Verfahrensnachrüstung einer Klarwassernitrifikation (Restnitrifikationsstufe) mittels Festbettreaktoren wurde 1998 angedacht, bisher jedoch noch nicht umgesetzt, da die Ablaufwerte bzgl. Ammonium-Stickstoffgehalt (NH₄-N) sehr sicher eingehalten werden, siehe auch Kapitel 4.3.3.

In der nachfolgenden Tabelle 4 ist der oben beschriebene Anlagenbestand der KA Aegidienberg mit den einzelnen Verfahrensstufen inkl. verfahrensspezifischer Angaben nochmals zusammengefasst.

Tabelle 4: Verfahrensbestand auf der KA Aegidienberg

Verfahrensstufe	Eigenschaften
Mechanische Reinigung	zweistufig, Huber-ROTAMAT®-Feinstrechen, 5 mm Spaltweite, belüftete Sand-/Fettfänge
Biologisch Reinigung	Nitrifikation, vorgeschaltete Denitrifikation, Plattenbelüfter, insgesamt 4.200 m ³ Belebungsvolumen, 28 Tage Schlammalter, Schlammbelastung ≈ 0,02 kg BSB ₅ / (kg TS · d)
Chemisch Reinigung	Simultanfällung in der Belebung, Fällmittel: Eisen-III-Chlorid
Weitergehende Reinigung	Sandfiltration: 6 DynaSand® Sandfilter, 30 m ² Filterfläche
Klärschlammbehandlung	Entwässerung mittels Zentrifuge, Klärschlamm Lagerung im Schlammsilo (200 m ³), 7 Tage Speicherzeit, Hygienisierung durch Zugabe von gelöschtem Kalk (Calciumhydroxid)

4.3.1 Eckdaten, Einwohnerwerte und Zulaufmengen

Laut dem letzten Erhebungsjahr (2019) war an die Kläranlage Aegidienberg ein Einwohnerwert (EW) von 7.581 E angeschlossen (ELWAS-WEB, 2020). Damit bietet die Anlage noch rd. 24 % Reserven für die zukünftige Entwicklung der angeschlossenen Ortschaften. Zudem ist seit 2017 (9.625 E) ein starker Abwärtstrend der angeschlossenen EW zu beobachten.

Zwischen den Jahren 2015 bis 2019 betrug die durchschnittliche Jahresabwassermenge (JAM) 941.634 m³/a. Die mediane JAM lag mit 949.800 m³/a etwas höher. Die letzte Aufzeichnung im Jahr 2019 wies eine JAM von 985.337 m³/a vor (ELWAS-WEB, 2020).

In der nachfolgenden Tabelle 5 sind die wesentlichen Kennwerte der KA Aegidienberg bzgl. Baujahr, Ausbaugröße, angeschlossene Einwohnerwerte und Zulaufmengen zusammengestellt. Die statistische Auswertung der Jahre 2015 bis 2019 basiert auf einer Datenerhebung nach ELWAS-WEB (2020).

Tabelle 5 Kennwerte der KA Aegidienberg

Eckdaten	Wert	Einheit
Ursprüngliches Baujahr	1978	-
Baujahre der Erweiterung / Neubau	1995 – 1997	-
Ausbaugröße	10.000	E
Größenklasse	3	-
Statistische Auswertung der Jahre 2015-2019	Wert	Einheit
Mittlerer Einwohnerwert EW	8.400	E
Medianer Einwohnerwert EW	8.190	E
Einwohnerwert EW im Jahr 2019	7.581	E
Mittlere Jahresschmutzwassermenge JSM	475.800	m ³ /a
Mediane Jahresschmutzwassermenge JSM	478.912	m ³ /a
Jahresschmutzwassermenge JSM im Jahr 2019	478.912	m ³ /a
Mittlere Jahresabwassermenge JAM	941.634	m ³ /a
Mediane Jahresabwassermenge JAM	949.800	m ³ /a
Jahresabwassermenge JAM im Jahr 2019	985.337	m ³ /a

4.3.2 Hydraulische Bemessungsparameter

In der nachfolgenden Tabelle 6 sind die hydraulischen Bemessungsparameter der KA Aegidienberg aufgezeigt, die auf der Planungsgrundlage der Erweiterungsjahre basieren.

Tabelle 6 Hydraulische Bemessungsparameter der KA Aegidienberg

Bemessungsparameter	Wert	Einheit
Täglicher Schmutzwasserzufluss $Q_{S,d}$	1.650	m ³ /d
Täglicher Fremdwasserzufluss $Q_{F,d}$	350	m ³ /d
Täglicher Trockenwetterzufluss $Q_{T,d}$	2.000	m ³ /d
Stündlicher Trockenwetterzufluss im Jahresmittel $Q_{T,h,aM}$	83,3	m ³ /h
Max. stündlicher Trockenwetterzufluss $Q_{T,h,max}$	216	m ³ /h
Maximaler Mischwasserzufluss Q_M	432	m ³ /h

4.3.3 Reinigungsanforderung und Ablaufparameter

Aufgrund des sehr leistungsschwachen und schützenswerten Kochenbachs wurden von der Oberen Wasserbehörde im Juni 1991 erhöhte Anforderungen an die Reinigungsleistung der Kläranlage Aegidienberg gestellt, so dass die einzuhaltenden Grenzwerte für CSB, BSB₅ und NH₄-N geringer sind als die Vorgaben der Abwasserverordnung (AbwV) für die entsprechende Größenklasse 3. Des Weiteren wurden für die KA Aegidienberg auch Grenzwerte für N_{ges} und P_{ges} festgelegt, siehe nachfolgenden Tabelle 7.

Tabelle 7: Zusammenstellung der Mindestanforderungen nach AbwV (Anhang 1), der festgelegten erhöhten Überwachungswerte sowie der durchschnittlich gemessenen Konzentrationswerte im Ablauf der KA Aegidienberg im Jahr 2019

Parameter	Mindestanforderung (GK 3) [mg/L]	Festgelegte Überwachungswerte [mg/L]	2019 [mg/L]	Beschreibung / Hinweis
CSB	90	40	13,1	Chemischer Sauerstoffbedarf
BSB ₅	20	10	3,90	Biochemischer Sauerstoffbedarf (binnen 5 d)
NH ₄ -N	10	2	0,03	Ammonium-Stickstoff
N _{ges}	-	18	8,36	Gesamtstickstoff (NH ₄ -N + NO ₃ -N + NO ₂ -N)
P _{ges}	-	1	0,30	Gesamtphosphor
NO ₂ -N	-	-	0,02	Nitrit-Stickstoff
AFS	-	-	< 0,01	Abfiltrierbare Stoffe

Mit der vorhandenen Kläranlagentechnik werden die erhöhten Anforderungen an die Ablaufwerte sehr sicher eingehalten.

4.4 Beschreibung der vorhandenen DynaSand®-Filtration

Nachfolgend ist die vorhandene Sandfiltrationsanlage detaillierter beschrieben, da prinzipiell eine Integrierung in die Verfahren zur Mikroschadstoffeliminierung möglich ist, die im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie untersucht wurden, siehe Kapitel 6.

Verfahrensprinzip der DynaSand®-Filtration

Das zu filtrierende Abwasser gelangt über eine Zulaufleitung in den Zulaufverteiler und wird dort im unteren Bereich des Filterbetts verteilt. Beim anschließenden Durchströmen des Filterbetts von unten nach oben werden vorhandene Feststoffe im Filterbett zurückgehalten und gelöste Stoffe biologisch weitergehend abgebaut. Der biologische Abbau erfolgt dabei durch Mikroorganismen, die sich als Biofilm auf dem Sandmaterial ansiedeln können. Nach dem Durchströmen wird das gefilterte Wasser über ein Überfallwehr abgeleitet und verlässt den Sandfilter über die Filtratablaufleitung, siehe nachfolgende Abbildung 13.

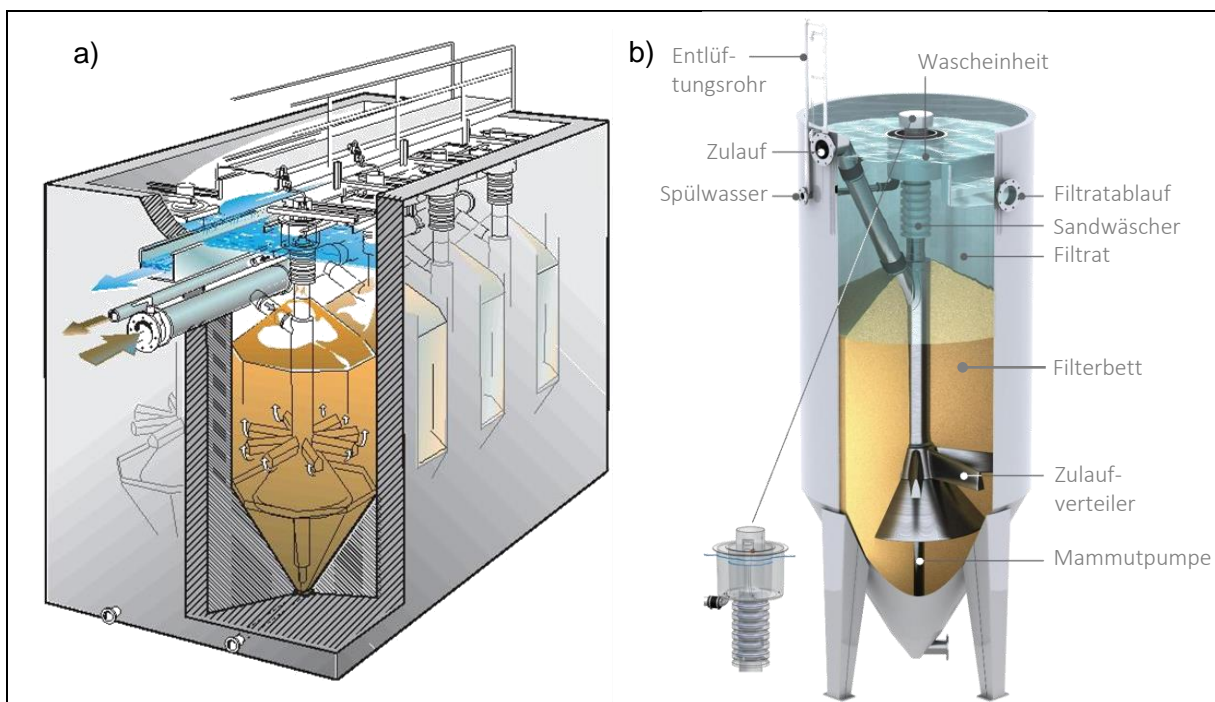


Abbildung 13: Darstellung der DynaSand®-Filtration: a) Betonbauweise und b) Behälterbauweise mit Bezeichnungen (modifiziert nach Nordic Water, 2020)

Beim Durchströmen durch das Filterbett werden vorhandene Schmutzpartikel vorwiegend im unteren Bereich des Filterbetts zurückgehalten, so dass die Beladung des Filters prinzipiell von unten nach oben abnimmt. Damit dieser Zustand dauerhaft erhalten bleibt und die Filterbeladung im oberen Bereich nicht sukzessive zunimmt, wird das Filtermaterial vom Boden des Filters kontinuierlich abgezogen und mittels Mammutpumpe in den Gegenstromsandwäscher gefördert. In der Wascheinheit fällt der beladene Sand nach unten, während gleichzeitig das Filtrat als Washwasser nach oben strömt. Hierdurch werden die abfiltrierbaren Stoffe vom Sand gelöst, mit dem nach oben strömenden Washwasser ausgetragen und über die Spülleitung abgeleitet. Das saubere Filtermedium (gereinigter Sand) fällt von oben auf das Filterbett zurück und wandert anschließend durch das kontinuierliche Sandabziehen im Bodenbereich wieder sukzessive nach unten.

Vorhandene DynaSand®-Filtration

Auf der Kläranlage Aegidienberg ist das kontinuierliche rückspülbare Sandfiltersystem seit Juli 1996 in Betrieb. Es besteht aus sechs DynaSand®-Filtern in zylindrischer Behälterbauweise des Herstellers „Nordic Water GmbH“. Die Filtrationsanlage wurde der Nachklärung zur weitgehenden Reduzierung und Abbau von CSB und P_{ges} nachgeschaltet. Prinzipiell kann die Anlage auch als Flockungsfiltration betrieben werden, indem Eisen-III-Chlorid zugegeben wird. Aktuell wird diese Betriebsweise jedoch nicht geführt, da die Phosphorelimination innerhalb der Belebung ausreicht und der festgelegte Überwachungswert sicher eingehalten wird. Die Anlage reduziert außerdem den Gehalt an AFS und weist eine entsprechende biologische Aktivität vor, welche durch die Vorbelüftung des Ablaufs aus der Nachklärung unterstützt wird.

Die wesentlichen Eckdaten der DynaSand®-Filtrationsanlage sind in der nachfolgenden Tabelle 8 zusammengestellt.

Tabelle 8: Eckdaten der vorhandenen DynaSand®-Filtrationsanlage

Parameter / Komponente	Eigenschaft
Filtertypbezeichnung:	DST 50 D
Behältermaterial:	Edelstahl (V2A / Werkstoffnr.: 1.4201)
Anzahl der Filter:	6
Gesamte Filterfläche:	30 m ² (6 · 5 m ²)
Filterbetthöhe:	2,0 m
Filtermaterial und Körnung:	Sand, 1 – 2 mm
Sandmenge:	140 t
Durchsatz bei Regenwetter:	432 m ³ /h
Filterbettgeschwindigkeit bei Regenwetter:	14,4 m/h
Spülwassermenge:	ca. 10% des Zuflusses

Die Anzahl der aktiven Filter ist vom Kläranlagenzufluss abhängig, wobei jeweils zwei Filter parallel betrieben werden und eine Filtergruppe bilden. In Abhängigkeit des Filterzuflusses sind die Schaltpunkte nach Tabelle 9 festgelegt.

Tabelle 9: Schaltpunkte der Filtergruppen in Abhängigkeit des Filterzuflusses

Zufluss zum Filter	Filtergruppe	Flächenbelastung
10 - 100 m ³ /h	1. Filtergruppe	1 - 10 m/h
100 - 200 m ³ /h	Zuschalten der 2. Filtergruppe	5 - 10 m/h
200 - 432 m ³ /h	Zuschalten der 3. Filtergruppe	6,6 - 14,4 m/h

Bei Trockenwetterzufluss werden die drei Filtergruppen in Wechselschaltung gefahren. Der Zufluss zum Filter erfolgt über zwei frequenzgeregelte Tauchmotorpumpen. Eine weitere Pumpe wurde als Reservepumpe vorgesehen. Der Ablauf aus dem Filter erfolgt im Freispiegelabfluss in den Vorschacht der Messstrecke des Kläranlagenablaufs. Das kontinuierlich anfallende Spülwasser wird in das anliegende Denitrifikationsbecken zurückgeführt.

5 Mikroschadstoffanalyse

5.1 Allgemeines

Im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie wurde das Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) mit der Entnahme und Analyse von Proben aus dem Zu- und Ablauf der Kläranlage sowie aus dem Kochenbach ober- und unterhalb der Kläranlageneinleitung beauftragt. Da gegenwärtig über hunderttausend synthetische organische Chemikalien in der Europäischen Union registriert sind und nicht alle Mikroschadstoffe aus Kostengründen untersucht werden können (DWA, 2015), wurden die Empfehlungen des *Kompetenzzentrums für Mikroschadstoffe NRW* berücksichtigt und der Untersuchungsumfang im Vorfeld mit der Oberen Wasserbehörde (Bezirksregierung Köln) abgestimmt.

Im Rahmen eines sogenannten „erweiterten Monitorings“ wurden zuerst Untersuchungen für eine erweiterte Stoffliste mit insgesamt 24 Mikroschadstoffen aus den Bereichen Arzneimittelwirkstoffe, Östrogene, Pestizide, Korrosionsschutzmittel, Moschusduftstoffe, Per- und Polyfluorierte Stoffe sowie Süßstoffe durchgeführt. Bei den 24 Mikroschadstoffen handelt es sich um sog. Leitsubstanzen, deren Untersuchung vom Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW empfohlen wird (KOM-M NRW, 2016). Zusätzlich wurden die Basisparameter DOC und Bromid untersucht sowie Ozonzehrungsversuche mit Untersuchungen zur Bromatbildung durchgeführt. Die Probenahmen für das erweiterte Monitoring sollten urspr. an 2 Trockenwettertagen und an 2 Regenwettertagen durchgeführt werden. Aufgrund des sommerlich langanhaltenden Trockenwetters wurde in Abstimmung mit der Bezirksregierung Köln anstatt der beiden Regenwetterproben eine zusätzliche Trockenwetterprobe entnommen, so dass insgesamt 3 Beprobungen an Trockenwettertagen durchgeführt wurden. Auf der Kläranlage wurden die Proben im Zulauf zur Belebung und im Kläranlagenablauf (nach der Sandfiltration) als 24-h Mischproben zeitproportional durch automatische Probenehmer entnommen. Im Gewässer (ober- und unterhalb der Kläranlageneinleitung) wurden die Proben durch qualifiziertes Personal der IUTA als qualifizierte Stichproben entnommen.

Im Anschluss an das erweiterte Monitoring wurde zur Datenverdichtung ein zusätzliches fünftägiges Monitoring des Kläranlagenzulaufs und Kläranlagenablaufs mit einem reduzierten Stoffspektrum von lediglich 7 Mikroschadstoffen durchgeführt. Bei den 7 Mikroschadstoffen handelt es sich um die Substanzen 1H-Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol, Clarithromycin, Sulfamethoxazol und Terbutryn. Diese Substanzen werden vom Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW als Mindestumfang für ein Monitoring zur Datenverdichtung empfohlen und werden als sog. Indikatorsubstanzen bezeichnet, da anhand dieser Stoffe i. d. R. die Reinigungsleistung der angewandten Verfahren zur Mikroschadstoffelimination beurteilt wird (KOM-M NRW, 2016). Des Weiteren wurden auch die beiden Standardparameter DOC und Bromid untersucht. Die Probenahme erfolgte wiederum als 24-h Mischprobe zeitproportional mittels automatischer Probenehmer.

In den beiden nachfolgenden Kapiteln 5.2 und 5.3 sind die Ergebnisse des erweiterten Monitorings sowie des anschließenden fünftägigen Monitorings zur Datenverdichtung zusammengefasst. Weitergehende Informationen sind im IUTA – Analysebericht in Anlage A7 enthalten. Um nachfolgend die im Gewässer (ober- und unterhalb der Kläranlageneinleitung) gemessenen Schadstoffe beurteilen zu können, wurde die jeweils gemessene Schadstoffkonzentration ins Verhältnis zu einem Bewertungskriterium (BK) gesetzt. Das BK entspricht dabei der Umweltqualitätsnorm (UQN), dem Orientierungswert (OW) oder dem präventiven Vorsorgewert

(PV), der für die gemessene Substanz im Anhang D4 des „Leitfaden Monitoring Oberflächengewässer“ (MKULNV, 2014) festgelegt ist. In Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen gemessener Schadstoffkonzentration und zugrunde liegendem Bewertungskriterium (UQN, OW oder PV) erfolgt die Bewertung des Messergebnisses anhand des nachfolgenden 5-stufigen Bewertungsschemas, siehe Tabelle 10.

Tabelle 10: Bewertungsschema von Oberflächengewässern nach UQN (BK: Bewertungskriterium; BG: Bestimmungsgrenze)

sehr gut	gut	mäßig	unbefriedigend	schlecht	nicht bewertbar
< ½ BK	½ BK - 1 BK	1 BK – 2 BK	2 BK – 4 BK	> 4 BK	BK < BG

Somit werden gemessene Schadstoffkonzentrationen, die unterhalb des BK liegen, entweder mit „sehr gut“ oder „gut“ bewertet. Übersteigt die gemessene Schadstoffkonzentration das BK um den Faktor 1 bis 4, so gelten die Konzentrationen als „mäßig“ oder „unbefriedigend“. Ab einer 4-fachen Überschreitung des BK ist die gemessene Schadstoffkonzentration als „schlecht“ einzustufen, was dem ungünstigsten Zustand des Bewertungsschemas entspricht. Die Bestimmungsgrenze (BG) bezieht sich auf die aktuell technisch mögliche Messbarkeit der jeweiligen Stoffkonzentrationen. Befindet sich ein festgelegtes BK unterhalb der BG, so ist die Messung nicht bewertbar.

5.2 Erweitertes Monitoring

Für das erweiterte Monitoring wurden vom 6. - 7. April und vom 7. - 8. April 2020 im Zu- und Ablauf der Kläranlage 24-h Mischproben unter Trockenwetterbedingungen entnommen. Die qualifizierten Stichproben im Gewässer wurden jeweils am späten Vormittag ober- und unterhalb der Kläranlageneinleitung entnommen. Die zusätzliche Trockenwetterbeprobung fand am 21.07.2020 statt. Die im Rahmen des erweiterten Monitorings gemessenen Stoffe sind in der nachfolgenden Tabelle 12 zusammengestellt. Die im Gewässer gemessenen Schadstoffkonzentration wurden dabei anhand des oben genannten Bewertungsschemas bewertet. Die vollständigen Ergebnisse des erweiterten Monitorings sind für jeden Trockenwettertag im Anhang A1 auf Seite 72 ff. enthalten.

Tabelle 11: Ergebnisse des erweiterten Monitorings der drei Trockenwetterproben (OGew: Oberflächengewässer, OH: Oberhalb, UH: Unterhalb)

Erweitertes Monitoring	Datum Uhrzeit Art der Probenahme Probenahmestelle Einheit	BK	BG	06. - 07.04.2020		06.04.2020		07. - 08.04.2020		07.04.2020		21. - 22.07.2020		21.07.2020		
				keine Angabe		11:15 - 11:23 11:40 - 11:48		keine Angabe		11:05 - 11:13 11:42 - 11:50		keine Angabe		11:26 - 11:34 12:00 - 12:08		
				Zu Bio	Ab KA	OGew OH	OGew UH	Zu Bio	Ab KA	OGew OH	OGew UH	Zu Bio	Ab KA	OGew OH	OGew UH	
Vor Ort Parameter	Lufttemperatur	°C	-		20,0	20,0			14,4	15,3			19,1	17,2		
	Wassertemp.	°C	-		10,4	11,4			10,4	11,5			13,1	17,9		
	pH	-	-		7,8	7,7			8,0	7,9			7,8	7,6		
	Leitfähigkeit	µS/cm	-		376	791			383	817			411	799		
	O ₂ -konzentration	mg/L	-		11,2	10,9			11,5	10,8			4,9	9,0		
Basis- parameter	DOC	mg/L	-	65	7,2	2,3	5,5	80	6,2	2,4	5,3	57	5,6	2,9	5,5	
	Bromid	µg/L	-	120	92	48	56	110	86	53	72	190	99	68	93	
Arzneimittel- wirkstoffe und Metabolite	Candesartan	ng/L	100	30	3.900	2.100	< 30	1.200	8.300	4.400	< 30	1.100	5.000	2.800	54	3.300
	Carbamazepin	ng/L	500	30	350	470	< 30	260	150	420	< 30	270	330	490	< 30	540
	Ciprofloxacin	ng/L	36	10	3.200	150	< 10	51	72	29	< 30	< 30	800	16	< 10	11
	Clarithromycin	ng/L	100	30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	32	< 30	44	92
	Diclofenac	ng/L	50	15	2.000	880	< 30	520	1.800	860	23	490	4.800	550	< 10	990
	Gabapentin	ng/L	100	30	8.700	1.700	< 30	1.300	29.000	2.200	< 30	1.100	29.000	170	< 30	430
	Ibuprofen	ng/L	10	10	17.000	< 10	< 10	< 10	790	< 10	< 10	< 10	25.000	< 10	< 10	< 10
	Losartan	ng/L	100	30	290	< 30	< 30	< 30	410	< 30	< 30	< 30	880	< 30	< 30	51
	Metoprolol	ng/L	7.300	30	2.500	310	< 30	260	2.100	360	< 30	270	4.400	150	< 30	240
	Sulfamethoxazol	ng/L	600	30	70	91	< 30	47	79	110	< 30	41	140	42	< 30	< 30
Valsartan	ng/L	100	30	11.000	150	< 30	130	24.000	130	< 30	130	11.000	45	120	370	
Östrogene Aktivität	A-YES	ng _{EEQ} /L	0,40	0,03	32	0,13	0,016	0,042	31	0,031	0,032	0,028	18	0,054	0,074	0,071
	Flufenacet	ng/L	40	10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Pestizide	Isoproturon	ng/L	300	30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Mecoprop	ng/L	100	30	< 30	< 30	40	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	31	35
	Propiconazol	ng/L	1.000	30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Tebuconazol	ng/L	1.000	30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Terbutryn	ng/L	65	20	39	< 20	< 20	< 20	88	< 20	< 20	< 20	100	< 20	< 20	< 20
Korrosions- schutzmittel	1H-Benzotriazol	ng/L	10.000	30	22.000	2.300	< 30	1.800	27.000	2.600	< 30	1.600	15.000	720	57	920
Moschus- duftstoffe	Galaxolid	ng/L	7.000	30	5.800	1.300	< 30	930	5.200	630	36	730	3.700	140	< 30	290
PFCs	PFOA	ng/L	100	30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	PFOS	ng/L	0,65	10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Süßstoffe	H4-PFOS	ng/L	100	10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
	Acesulfam	ng/L	10.000	30	58.000	610	< 30	380	52.000	520	< 30	390	73.000	170	< 30	< 30

Aufgrund des großen Umfangs an Messergebnissen wurden die Messergebnisse der drei Trockenwettertage zur Übersichtlichkeit in der nachfolgenden Tabelle 12 als arithmetische Mittelwerte angegeben. Zusätzlich ist hier die jeweilige Eliminationsrate der einzelnen Substanzen zwischen dem Zulauf zur biologischen Stufe und dem Ablauf der Kläranlage angegeben, die jeweils als arithmetisches Mittel aus den zugehörigen Eliminationsraten der 3 Trockenwettertage ermittelt wurden. Des Weiteren ist in der nachfolgenden Tabelle 12 angegeben, ob es sich bei den Bewertungskriterium (BK) der jeweiligen Stoffe um eine Umweltqualitätsnorm (UQN), einen Orientierungswert (OW) oder um einen präventiven Vorsorgewert (PV) handelt.

Tabelle 12: Arithmetische Mittelwerte der gemessenen Stoffkonzentrationen des erweiterten Monitorings aus drei Trockenwetterproben (OGew: Oberflächengewässer, OH: Oberhalb, UH: Unterhalb)

Erweitertes Monitoring		Einheit	BK	BG	Probenahmestelle			OGew OH	OGew UH
Arithm. Mittel aus 3 Trockenwettertagen					Zulauf Biologie	Ablauf KA	Eliminierung		
Basis-parameter	DOC	mg/L		-	67	6	90%	3	5
	Bromid	µg/L		-	140	92	31%	56	74
Arzneimittel- wirkstoffe und Metabolite	Candesartan	ng/L	100 (PV)	30	5733	3100	46%	54	1867
	Carbamazepin	ng/L	500 (OW)	30	277	460	-88%	< 30	357
	Ciprofloxacin	ng/L	36 (PNEC)	10	1357	65	84%	< 10	31
	Clarithromycin	ng/L	100 (OW)	30	< 30	< 30	< BG	< 30	< 30
	Diclofenac	ng/L	50 (OW)	15	2867	763	66%	25	667
	Gabapentin	ng/L	100 (PV)	30	22233	1357	91%	< 30	943
	Ibuprofen	ng/L	10 (OW)	10	21000	< 10	≈ 100%	< 10	< 10
	Losartan	ng/L	100 (PV)	30	527	< 30	> 93%	< 30	< 30
	Metoprolol	ng/L	7.300 (OW)	30	3000	273	89%	< 30	257
Sulfamethoxazol	ng/L	600 (OW)	30	96	81	0%	< 30	44	
Valsartan	ng/L	100 (PV)	30	15333	108	99%	< 30	210	
Östrogene Aktivität	A-YES	ng _{EEQ} /L	0,40 (TV)	0,03	27	0,072	≈ 100%	0,041	0,047
Pestizide	Flufenacet	ng/L	40 (UQN)	10	< 10	< 10	< BG	< 10	< 10
	Isoproturon	ng/L	300 (UQN)	30	< 30	< 30	< BG	< 30	< 30
	Mecoprop	ng/L	100 (UQN)	30	< 30	< 30	< BG	36	< 30
	Propiconazol	ng/L	1.000 (UQN)	30	< 30	< 30	< BG	< 30	< 30
	Tebuconazol	ng/L	1.000 (OW)	30	< 30	< 30	< BG	< 30	< 30
Terbutryn	ng/L	65 (UQN)	20	76	< 20	> 69%	< 20	< 20	
Korrosions- schutzmittel	1H-Benzotriazol	ng/L	10.000 (PV)	30	21333	1873	92%	< 30	1440
Moschus- duftstoffe	Galaxolid	ng/L	7.000 (OW)	30	4900	690	87%	< 30	650
Per- und poly- fluorierte	PFOA	ng/L	100 (PV)	30	< 30	< 30	< BG	< 30	< 30
	PFOA	ng/L	0,65 (UQN)	10	< 10	< 10	< BG	< 10	< 10
Chemikalien	H4-PFOA	ng/L	100 (PV)	10	< 10	< 10	< BG	< 10	< 10
Süßstoffe	Acesulfam	ng/L	10.000 (PV)	30	61000	433	99%	< 30	267

UQN: Umweltqualitätsnorm | PV: Präventiver Vorsorgewert | OW: Orientierungswert | PNEC: Predicted No Effect Concentration | TV: Trigger-Value nach Kienle

In Tabelle 12 lässt sich durch das farbliche Bewertungsschema gut erkennen, dass im Kochenbach sowohl ober- als auch unterhalb der Kläranlageneinleitung überwiegend Stoffkonzentrationen gemessen wurden, die deutlich unterhalb des zugehörigen Bewertungskriteriums liegen und somit als „sehr gut“ bzw. als „gut“ bewertet werden können. Dabei lag bei vielen dieser Stoffe die Konzentration sogar unterhalb der Bestimmungsgrenze, so dass ein Vorhandensein dieser Substanzen nicht nachgewiesen werden konnte. Dies trifft teilweise auch schon auf den Kläranlagenzulauf zu. So lagen bspw. die Konzentrationen der untersuchten Pestizide (abgesehen von Terbutryn) und PFCs im Kläranlagenzulauf sämtlich unterhalb der Bestimmungsgrenze. Im Kläranlagenablauf und im Gewässer lagen alle untersuchten Pestizide (einschl. Terbutryn) und PFCs unterhalb der Bestimmungsgrenze. Dabei sind (von den 24 untersuchten Mikroschadstoffen) lediglich in der Gruppe der Pestizide und PFCs zugehörige Umweltqualitätsnormen festgelegt, so dass alle untersuchten UQN im Gewässer eingehalten werden bzw. anhand der Bewertungsskala sogar mit sehr gut bewertet werden können.

Des Weiteren weist die vorhandene Kläranlagentechnik bei der Mehrzahl der Stoffe, deren Konzentration oberhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenze (BG) lag, bereits gute Eliminationsraten auf. So wird durch die vorhandene Kläranlagentechnik bei etwa 2/3 der nachgewiesenen Substanzen eine Eliminationsrate von über 80 % erreicht.

Von den 24 untersuchten Mikroschadstoffen gibt es lediglich 4 Stoffe (Candesartan, Diclofenac, Gabapentin und Valsartan) im Bereich der Arzneimittel, die unterhalb des Kläranlagenablaufs im Gewässer das jeweilige BK überschreiten und somit zu einer „unbefriedigenden“ bis „schlechten“ Bewertung führen. Dabei ist zu beachten, dass derzeit lediglich für Diclofenac ein Orientierungswert vorliegt, während für die 3 anderen Stoffe lediglich präventive Vorsorgewerte existieren. Sollten für diese 3 Stoffe zukünftig fachlich abgeleitete OW bzw. UQN festgelegt werden, besteht (abhängig vom Einfluss der Stoffe auf die biologische Komponente) somit prinzipiell die Möglichkeit, dass der Grenzwert ggfs. höher oder auch niedriger als der PV (100 ng/L) festgelegt wird, was zu einer neuen Bewertung dieser Stoffe führen würde. Bei den 4 Arzneimittelwirkstoffen, die das zugehörige Bewertungskriterium überschreiten, handelt es sich um Medikamente, welche gegen Schmerzen und Entzündungen sowie Herz-Kreislaufkrankungen eingenommen werden. Dementsprechend gelangen diese Wirkstoffe durch Ausscheidungen der Verbraucher, Abwaschen von Salben, unsachgemäßer Entsorgung, etc. auch ins Abwasser.

Bei 4 weiteren Substanzen aus der Arzneimittelgruppe (Carbamazepin, Ciprofloxacin, Metoprolol und Sulfamethoxazol) ist zwar eine Erhöhung im Gewässer durch die Kläranlageneinleitung zuerkennen, allerdings liegen die gemessenen Stoffkonzentrationen alle unterhalb des zugehörigen BK, so dass für diese 4 Stoffe eine „sehr gute“ bzw. „gute“ Bewertung vorliegt, siehe obige Tabelle 12.

5.3 Datenverdichtung mit reduziertem Stoffumfang und Basisparameter

Vom 4. - 9. Mai fand das 5-tägige Monitoring bei Trockenwetterbedingungen zur Datenverdichtung für den reduzierten Stoffumfang der Indikatorsubstanzen statt. Die Probenahmen erfolgten wiederum im Zu- und Ablauf der Kläranlage als 24-h Mischproben. Qualifizierte Stichproben im Gewässer wurden nicht genommen.

Die im Rahmen des 5-tägigen Monitorings gemessenen 7 Indikatorstoffe sind mit den zugehörigen Messwerten in der nachfolgenden Tabelle 13 zusammengestellt, wobei für jede Substanz lediglich die minimalen und maximalen Konzentrationswerte sowie das arithmetische Mittel aus den 5 Trockenwettermessungen angegeben sind. Die vollständigen Messergebnisse der Datenverdichtung sind im Anhang A3 auf Seite 76 hinterlegt.

Tabelle 13: Datenverdichtung der Indikatorsubstanzen aus fünf Trockenwetterproben (Ablauf KA nach Bewertungsschema)

Substanzgruppe	Indikatorsubstanzen	Minimum [ng/L]		Mittel [ng/L]		Maximum [ng/L]		BK [ng/L]
		Zu Bio	Ab KA	Zu Bio	Ab KA	Zu Bio	Ab KA	
Korrosionsschutzmittel	1H-Benzotriazol	19000	850	29400	1290	39000	1900	10000
Arzneimittelwirkstoffe	Carbamazepin	190	360	320	414	440	450	500
	Clarithromycin	33	39	33	39	33	39	100
	Diclofenac	2100	380	3620	808	5200	1200	50
	Metoprolol	2300	190	2680	226	2800	270	7300
	Sulfamethoxazol	250	120	548	156	1000	210	600
Pestizid	Terbutryn	32	20	127	26	390	33	65

In der obigen Tabelle 13 wurden die im Kläranlagenablauf gemessenen Konzentrationen der 7 Indikatorsubstanzen mit dem gleichen Bewertungsschema beurteilt, welches im vorherigen Kapitel zur Bewertung der Schadstoffkonzentrationen in Oberflächengewässern (für den Kochenbach) verwendet wurde. Anhand des farblichen Bewertungsschemas lässt sich wiederum gut erkennen, dass bereits im Kläranlagenablauf – also vor der Verdünnung mit dem Vorfluter – 6 Indikatorsubstanzen eine Konzentration aufweisen, die mit „gut“ bzw. „sehr gut“ bewertet werden können und dementsprechend in Konzentrationen vorliegen, die für den Vorfluter (Kochenbach) unkritisch sind. Lediglich der Wirkstoff Diclofenac überschreitet im Ablauf der Kläranlage den für Oberflächengewässer festgelegten Orientierungswert um mehr als das 4-fache, was bei einer entsprechenden Konzentration in einem Oberflächengewässer mit „schlecht“ bewertet werden würde.

Beim Vergleich mit gemessenen Ablaufkonzentrationen von kommunalen Kläranlagen in NRW wird allerdings auch deutlich, dass die im Kläranlagenablauf von Aegidienberg gemessene Diclofenac-Konzentration deutlich niedriger ist als auf den meisten Kläranlagen in NRW (für die entsprechende Messdaten ausgewertet werden konnten), siehe statistische Auswertung in nachfolgender Abbildung 14. So liegt die Ablaufkonzentration von Diclofenac auf der Kläranlage Aegidienberg deutlich unterhalb des unteren Quartils der statistischen Auswertung. Dabei wurde auf der KA Aegidienberg im Rahmen der Datenverdichtung für Diclofenac eine durchschnittliche Abbaurrate von rd. 78 % ermittelt. Somit wird bereits mit der vorhandenen Kläranlagentechnik bei Diclofenac eine Abbaurrate erreicht, die nahe am allg. Eliminationsziel für Mikroschadstoffe in Höhe von 80 % liegt.

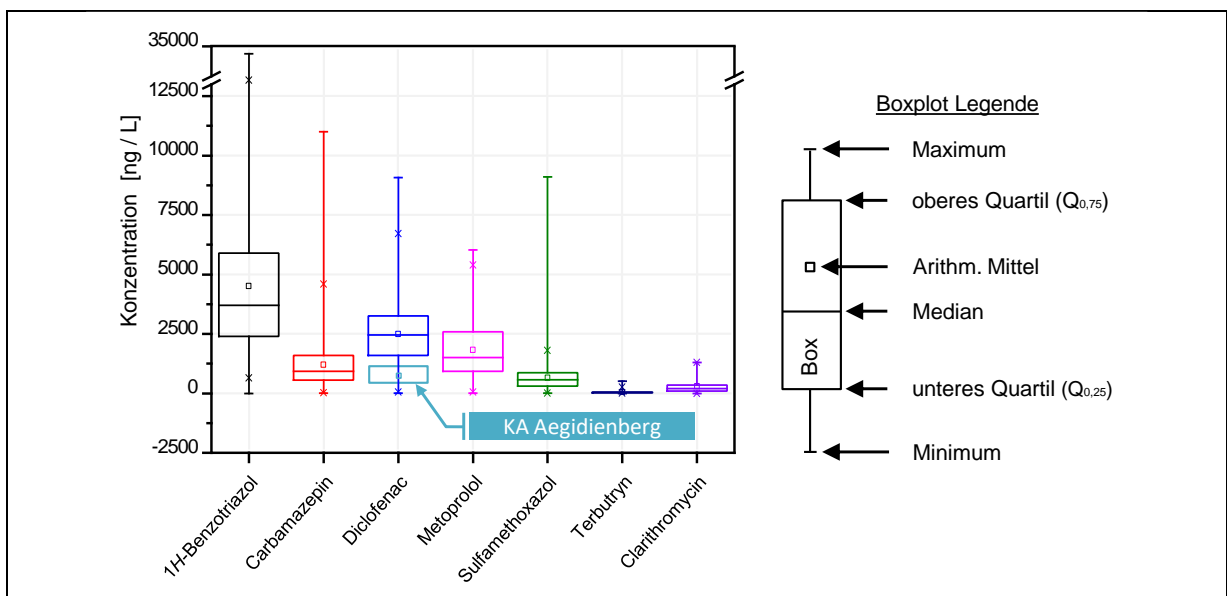


Abbildung 14: Statistische Auswertung der Ablaufkonzentrationen der 7 Indikatorsubstanzen auf kommunalen Kläranlagen in NRW – ca. 2000 Datensätze (modifiziert nach KOM-M NRW, 2017)

Neben den 7 Indikatorsubstanzen wurden im Rahmen der Datenverdichtung auch die Basisparameter in Form von DOC, Bromid, pH und Leitfähigkeit aufgenommen, siehe nachfolgende Tabelle 14. Die Analyse des DOC erfolgte dabei in Fremdvergabe durch ein akkreditiertes Labor nach DIN EN 1484. Diese Parameter sind für die spätere Auslegung der in Betracht gezogenen Varianten zur Mikroschadstoffelimination erforderlich, siehe auch nachfolgendes Kapitel 5.4 sowie Kapitel 6.

Tabelle 14: Statistische Kennwerte der Basisparameter aus 5 Trockenwettertagen

Basisparameter	Minimum		Mittel		Maximum		Einheit
	Zulauf Biologie	Ablauf KA	Zulauf Biologie	Ablauf KA	Zulauf Biologie	Ablauf KA	
DOC	72	4	88	6	105	8	mg/L
Bromid	140	70	158	78	180	97	µg/L
pH-Wert	7,4	7,1	7,7	7,7	8,0	8,0	-
Leitfähigkeit	1383	680	1522	808	1629	921	µS/cm

5.4 Ozonzehrung und Bromatbildung

Im Rahmen des erweiterten Monitorings wurden auch Untersuchungen zum Ozonzehrungsverhalten und zur Bromatbildung anhand der Proben durchgeführt, die aus dem Kläranlagenablauf als 24-h Mischproben an den beiden Trockenwettertagen im April entnommen wurden. Diese Beurteilungen sind für eine mögliche Einbindung eines Ozonverfahrens in den Kläranlagenprozess relevant. Dabei dienen die Ergebnisse der Ozonzehrungsversuche u.a. zur Festlegung der erforderlichen Aufenthaltszeit in einem Ozonreaktor, die wiederum einen direkten Einfluss auf die erforderliche Größe des Ozonreaktors hat, siehe auch nachfolgendes Kapitel 6.3. Des Weiteren kann anhand der Ozonzehrungsversuche das Bromatbildungspotenzial abgeschätzt werden, das aus nachfolgenden Gründen zu berücksichtigen ist.

Bei einer Ozonung von Abwasser wird die überwiegende Anzahl der enthaltenen Mikroschadstoffe in sog. Transformationsprodukte umgewandelt, von denen die meisten biologisch gut abbaubar sind. Es gibt jedoch auch Transformationsprodukte, die weniger gut abbaubar sind oder ggfs. ein größeres Schadenspotenzial auf die aquatische Umwelt haben als die Ausgangssubstanzen. Bromat ist ein solches Transformationsprodukt, das bei der Umwandlung aus Bromid entstehen kann und derzeit als einziges Transformationsprodukt sogar gesetzlicher Regulierungen unterliegt, da es als potenziell kanzerogen gilt. Bromat kann sich bei der Ozonung von bromidhaltigen Abwässern bilden und ist sehr persistent im Wasser. Es kann nur unter anaeroben Bedingungen biologisch reduziert werden. Nach Anlage 2 zu § 6 Abs. 2 der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) liegt der Trinkwassergrenzwert für Bromat bei 10 µg/L. Das Oekotoxzentrum der Schweiz hat dagegen einen Bromatgrenzwert von 50 µg/L abgeleitet, welches für die Auslegung von Anlagen zur Mikroschadstoffeliminierung herangezogen werden kann, wenn keine direkte Entnahme aus der fließenden Welle für den Trinkwasserbezug erfolgt (KOM-M NRW, 2018e).

Zur Ermittlung der erforderlichen Grundlagen für die Bemessung eines Ozonreaktors und des Bromatbildungspotenzials wurden die Ozonzehrungsversuche als Batchversuche durchgeführt. Hierzu wurden zuerst die Konzentrationen von Bromid, Bromat und DOC in den Ausgangsproben ermittelt, die als 24-h als Mischproben aus dem Kläranlagenablauf entnommen wurden. Nach einer anschließenden Zugabe von Ozonstarkwasser in Konzentrationen von 5 mg_{O₃}/L sowie von 10 mg_{O₃}/L wurde in den jeweiligen Proben die Ozonkonzentration über einen Zeitraum von 10 Minuten (mittels Indigofarbstoff) analysiert. Im Anschluss daran wurden erneut die Konzentrationen von Bromid, Bromat und DOC ermittelt. Die Versuche wurden als Doppelbestimmung durchgeführt, wobei die Ergebnisse des 1. Versuchs mit den Ergebnissen des 2. Versuchs jeweils gut übereinstimmten, siehe nachfolgende Abbildung 15 sowie Anhang A7.

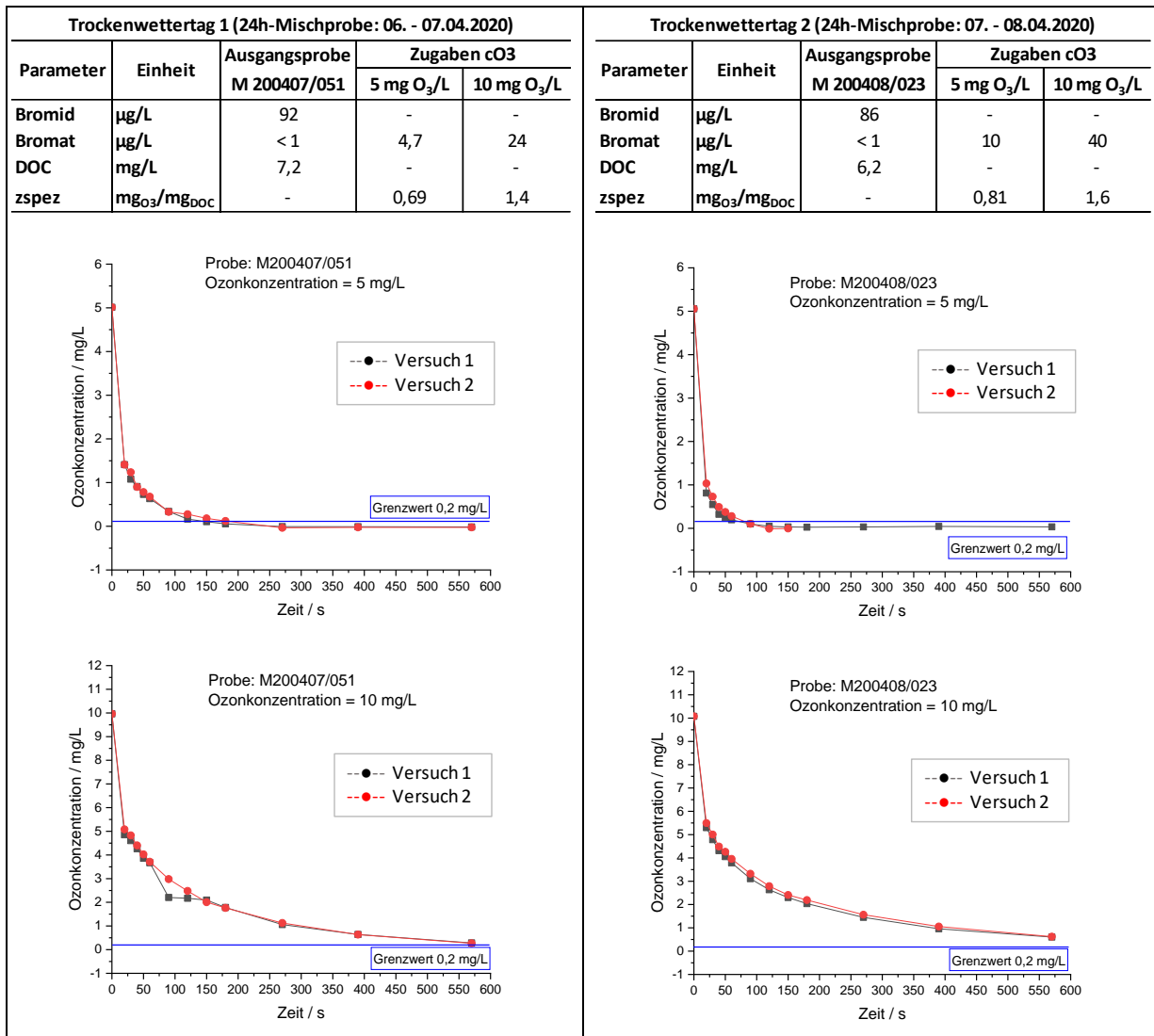


Abbildung 15: Auswertung der Ozonzehrungsversuche mit Bestimmung der Bromatbildung

Die Ozonzehrungen konnten in den entsprechenden Proben gut beobachtet werden. Bei den mit 5 mg_{O₃}/L versetzten Proben lag die Ozonkonzentration in der jeweiligen Probe bereits nach max. 3 Minuten unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,2 mg_{O₃}/L, so dass das eingebrachte Ozon zügig und vollständig mit den im Abwasser enthaltenen Substanzen ausreagiert hat.

Bei den mit 10 mg_{O₃}/L versetzten Proben lag die Ozonkonzentration dagegen nach 10 Minuten noch (knapp) über der Bestimmungsgrenze, so dass das Ozon innerhalb der betrachteten Zeitspanne lediglich nahezu vollständig verbraucht wurde. Das lag an der verhältnismäßig hohen Ozondosis von 10 mg_{O₃}/L bei einem entsprechend niedrigen DOC-Gehalt im Kläranlagenablauf von 7,2 mg_{DOC}/L (Probe 1) bzw. 6,2 mg_{DOC}/L (Probe 2), aus denen eine relativ hohe spezifische Ozondosis von 1,4 mg_{O₃}/mg_{DOC} bzw. 1,6 mg_{O₃}/mg_{DOC} resultiert. Bemessen werden Ozonungsanlagen dagegen (anhand der DOC-Konzentration im Zulauf zur Ozonbehandlung) üblicherweise für eine spezifische Ozondosis zwischen 0,6 - 0,9 mg_{O₃}/mg_{DOC} (KOM-M NRW, 2016).

Sollte auf der KA Aegidienberg eine Ozonbehandlung vorgesehen werden, wären gemäß den durchgeführten Ozonzehrungsversuchen daher Ozonkonzentrationen von etwa 5 mg_{O₃}/L voraussichtlich ausreichend, da sich hieraus eine spezifische Ozondosis von rd. 0,7 - 0,8 mg_{O₃}/mg_{DOC} ergibt. Bei dieser spezifischen Dosis kommt es auch zu keiner signifikanten Bromatbildung, da hier die gebildete Bromatkonzentration den Grenzwert der TrinkwV von 10 µg/L nicht überschreitet. Selbst bei der doppelt so hohen spezifischen Ozondosis bleibt die gemessene Bromatkonzentration mit 40 mg/L noch unterhalb des vom Oekotoxzentrum der Schweiz abgeleiteten Grenzwertes von 50 µg/L bleibt, siehe obige Abbildung 15.

Die Errichtung einer Ozonungsanlage auf der KA Aegidienberg ist somit bzgl. der Bromatbildung als unkritisch anzusehen. Bei der Auslegung einer Ozonanlage ist jedoch zu beachten, dass die Ozonzehrungsversuche mit Proben aus dem Ablauf der Kläranlage Aegidienberg – also nach der Sandfiltration – durchgeführt wurden und in der Sandfiltration ggfs. eine weitere Reduzierung sowohl von Mikroschadstoffen als auch von DOC stattgefunden hat. Da ein möglicher Ozonreaktor auf der KA Aegidienberg jedoch voraussichtlich vor der Sandfiltration angeordnet und somit mit dem Klarwasser aus der Nachklärung beschickt wird, liegt hier ggfs. eine höhere Konzentration an Mikroschadstoffen und DOC vor, so dass ggfs. auch eine höhere Ozondosis erforderlich ist. Sollte auf der KA Aegidienberg ein Ozonreaktor errichtet werden, ist dies entsprechend zu berücksichtigen. Es wird daher auch im Falle einer weitergehenden Planung empfohlen, im Vorfeld zusätzliche Analysen über einen längeren Zeitraum durchzuführen.

5.5 Eliminationsziel

Wie bereits bei den rechtlichen Grundlagen in Kapitel 2 beschrieben, existieren in Deutschland derzeit keine gesetzlich festgelegten Grenzwerte für Mikroschadstoffkonzentrationen in kommunalen Kläranlagenabläufen, so dass auch keine verbindlich festgelegten Regelungen für ein Eliminationsziel von Mikroschadstoffen vorliegen. Nach KOM-M NRW (2016) werden jedoch prinzipiell zwei Ansätze für ein Eliminationsziel empfohlen – ein emissionsbasierter Ansatz und ein immissionsbasierter Ansatz.

Nach dem emissionsbasierten Ansatz wird als Eliminationsziel empfohlen, dass eine Eliminationsrate von 80 % für die 6 Indikatorsubstanzen (1H-Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol, Clarithromycin und Sulfamethoxazol) erreicht werden soll. Die Eliminationsrate bezieht sich dabei auf das Verhältnis zwischen Zulauf zur biologischen Stufe und Ablauf der Kläranlage und ist als Jahresmittel für die o.g. 6 Indikatorsubstanzen zu erreichen. Die Indikatorsubstanzen gelten dabei mit den Hauptverfahren als gut bis mittelmäßig entfernbar.

Beim immissionsbasierten Ansatz sind die Grenzwertvorgaben für die gewässerspezifischen Einzelparameter in Einzelfallprüfung mit der zuständigen Behörde individuell abzustimmen. Dieser Ansatz wird empfohlen, wenn durch analytische Befunde festgestellt wird, dass das Gewässer unterhalb der Kläranlage:

- besonders sensible Nutzungseigenschaften vorweist,
- im Verhältnis zur Einleitungsmenge der Kläranlage wenig Wasser führt,
- überdurchschnittlich mit Mikroschadstoffen belastet wird,
- der oberflächenwassergestützten Trinkwassergewinnung dient oder

- eine Beeinträchtigung der biologischen Qualitätskomponente nach WRRL aufweist.

Dies kann erfordern, dass die geplante Reinigungsstufe zur Mikroschadstoffelimination auf eine Vollstrombehandlung der gesamten JAM ausgelegt werden muss, anstatt auf eine wirtschaftlichere Teilstrombehandlung. Eine Eliminationsrate, die das Eliminationsziel definiert, kann hierbei ebenfalls individuell festgelegt werden.

Eliminationsziel für die KA Aegidienberg

Da bereits im Ablauf der Kläranlage Aegidienberg – also vor der Verdünnung mit dem Gewässer – 5 von 6 Indikatorstoffen eine so geringe Konzentration aufweisen, die in einem Gewässer eine „gute“ bzw. sogar „sehr gute“ Bewertung zur Folge hätte, ist der emissionsbasierte Ansatz mit einem Eliminationsziel von 80 % bezogen auf die 6 Indikatorsubstanzen nicht zielführend. Da im Gewässer unterhalb der Kläranlage insgesamt lediglich 4 Substanzen aus dem Bereich der Arzneimittel Konzentrationen aufweisen, die über dem zugehörigen Bewertungskriterium liegen, ist eher eine immissionsorientierte Beurteilung dieser Stoffe sinnvoll.

Um auch die vorhandene Eliminationsfähigkeit bzgl. dieser Stoffe abschätzen zu können, die bereits mit der vorhandenen Kläranlagentechnik erreicht wird, sind die Eliminationsraten dieser 4 Substanzen nochmals in der nachfolgenden Tabelle 15 zusammengestellt. Übersichtshalber wurden dabei Eliminierungsraten > 80 % in Grün, zwischen 50 % und 80% in Blau und < 50 % in Rot dargestellt. Die 80 % Grenze wurde in Anlehnung an die empfohlene Mindest-Eliminationsrate des emissionsbasierten Ansatzes gewählt, so dass hier bereits eine hohe Eliminationsrate vorliegt.

Tabelle 15: Eliminierungsraten der Leitsubstanzen, die das BK überschreiten

Leitsubstanz	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 4	Tag 5	Mittel	Abw.
Candesartan ^b	46%	47%	44%			46%	1%
Diclofenac ^a	73%	78%	77%	82%	82%	78%	3%
Diclofenac ^b	56%	52%	89%			66%	15%
Gabapentin ^b	80%	92%	99%			91%	7%
Valsartan ^b	99%	99%	100%			99%	0%
Mittelwert	71%	74%	82%			76%	4%

Datengrundlage IUTA(2020): ^a Datenverdichtung (5 Tage), ^b: erweitertes Monitoring (3 Tage)

Die Eliminierungsrate η_i , der jeweils betrachteten Leitsubstanz errechnet sich dabei nach der nachstehenden Formel aus der Zulaufkonzentration der Biologie/Belebung ($c_{Zu,i}$) und der Ablaufkonzentration der Kläranlage ($c_{Ab,i}$):

$$\eta_i = 1 - \frac{c_{Ab,i}}{c_{Zu,i}}$$

Aus Tabelle 15 wird deutlich, dass für die Leitsubstanzen Valsartan und Gabapentin im Mittel eine Elimination von über 90 % erreicht wird. Die durchschnittliche Eliminationsrate des Wirkstoffs Diclofenac (aus Datenverdichtung und erweitertem Monitoring) kann zu rd. 74 % abgeschätzt werden. Candesartan wird dagegen zu lediglich rd. 46 % eliminiert. Insgesamt werden die 4 Substanzen, deren Bewertungskriterium im Gewässer überschritten wird, bereits mit dem

vorhandenen Anlagenbestand zu rd. 76 % aus dem Abwasser entfernt, was nahe am Eliminationsziel von 80 % (für die 6 Indikatorsubstanzen des emissionsbasierten Ansatzes) liegt.

Die in Tabelle 15 angegebene Abweichung (Abw.) erlaubt eine Aussage, wie weit die Eliminationsraten der einzelnen Tage vom Mittelwert abweichen. Die größten Schwankungen weist dabei Diclofenac aus den Messungen des erweiterten Monitorings mit rd. 15 % auf, während die Abweichung beim 5-tägigen Monitoring zur Datenverdichtung bei lediglich 3 % liegt.

6 Ausarbeitung von technischen Anlagenkonzepten

6.1 Verfahrensvorauswahl

Für die Vorauswahl von geeigneten Verfahrensvarianten zur Mikroschadstoffelimination sind die vorliegenden örtlichen Randbedingungen auf der KA Aegidienberg zu berücksichtigen, welche einen direkten Einfluss auf die Kosten des Vorhabens haben. Von Relevanz sind bspw. die vorhandenen und evtl. nutzbaren Bauwerkstrukturen (Leitungen, Pumpwerke, Becken, Verfahrensstufen, etc.) sowie die zur Verfügung stehende Baufläche, die Baugrundbeschaffenheit, die Abwassermatrix, der Transport des Abwassers (Pumpen oder Freigefälle) und die Anlagenauslegung als Voll- oder Teilstrom (KOM-M NRW, 2016).

Nach Angaben des Kläranlagenbetreibers befindet sich dabei ein potenzielles Baufeld für eine mögliche Anlagenerweiterung nördlich der vorhandenen Anlage unmittelbar nördlich des Nachklärbeckens, siehe nachfolgende Abbildung 16. Die rd. 600 m² große Fläche gehört zum Grundstück der Kläranlage und ist prinzipiell bereits als Erweiterungsfläche vorgesehen, so dass hier ausreichend Platz zur Errichtung einer weitergehenden Reinigungsstufe zur Verfügung steht. Die potenzielle Baufläche ist aktuell mit Laubwald besetzt und befindet sich größtenteils außerhalb des umzäunten Anlagenbereichs, so dass die Fällung einiger Bäume sowie die Anpassung der Zaunanlage bei Inanspruchnahme dieses Areals erforderlich ist. Das Gelände der potenziellen Baufläche liegt in etwa auf einer Höhe zwischen 218 - 219 m NHN und befindet sich somit auf dem Höhengniveau des anliegenden Bestands. Andere freie Zonen sind topografisch, räumlich sowie verfahrenstechnisch eher ungünstig.



Abbildung 16: Potenzielle Erweiterungsfläche (blau) und nutzbare Sandfiltration (gelb) – Kartenhintergründe nach ELWAS-WEB (2020)

Beim Einsatz von PAK Verfahren kann der anfallende Klärschlamm nicht mehr landwirtschaftlich verwertet werden, da von einer Wiederfreisetzung der Mikroschadstoffe auszugehen und die landschaftliche Klärschlammverwertung entsprechend verboten ist, vgl. Kapitel 3.3.1. Eine thermische Verwertung der Klärschlämme ist zwar prinzipiell möglich, führt im Falle der KA Aegidienberg jedoch zu deutlich höheren Entsorgungskosten und somit zu einer Unwirtschaftlichkeit im Vergleich zu den Verfahren, bei denen die landwirtschaftliche Verwertung weiterhin möglich ist. Da auch vom Kläranlagenbetreiber die landschaftliche Klärschlammverwertung weiterhin beabsichtigt wird, wurden Verfahren in Verbindung mit PAK nicht weiter untersucht. Bei der Verfahrensauswahl kamen daher lediglich Ozonungs- und GAK-Verfahren mit den ggfs. erforderlichen Vor- oder Nachbehandlungsmaßnahmen in Betracht.

Bei der Errichtung einer Ozonanlage kann dabei die vorhandene Sandfiltration als Nachbehandlung der Ozonung verwendet werden. Prinzipiell könnte die vorhandene Sandfiltration auch als vorgeschalteter Filter verwendet, um den Ozonreaktor mit einer möglichst geringen Schadstoffbelastung zu beschicken. Da hierfür jedoch eine zusätzliche Nachbehandlung (z.B. nachgeschaltete Filtration) mit entsprechend hohen Investitions- und laufenden Betriebskosten erforderlich wird, wurde diese Verfahrenskombination aus wirtschaftlichen Gründen nicht weiter betrachtet, sondern lediglich das übliche Verfahren der Ozonung mit nachgeschalteter Sandfiltration.

Im Falle von GAK-Verfahren wurden vorhandene Sandfilter teilweise schon auf GAK umgerüstet. Bei der bestehenden DynaSand®-Filtrationsanlage der KA Aegidienberg besteht diese Möglichkeit leider nicht, da das verwendete Material der Filterbehälter nicht korrosionsbeständig gegenüber GAK ist, so dass die Errichtung einer separaten neuen GAK-Filtrationsanlage erforderlich ist. Die neue GAK-Filtrationsanlage kann dabei als zusätzlicher Filter der vorhandenen Sandfiltration nachgeschaltet werden. Dies ist u.a. von Vorteil, da der Ablauf aus der vorhandenen Sandfiltration eine sehr niedrige AFS-Konzentration aufweist (im Jahresmittel 2019 weniger als 0,01 mg/L) und somit einen effektiven und wirtschaftlichen Einsatz der nachgeschalteten GAK-Filtration ermöglicht (gemäß KOM-M NRW (2016) wird ein AFS-Gehalt von im Mittel möglichst unter 15 mg/L für den Einsatz von GAK empfohlen).

Generell ist auch eine Kombination der beiden Hauptverfahren Ozonung mit nachgeschalteter GAK möglich. Da auf der KA Aegidienberg jedoch eine Sandfiltration vorhanden ist und in die beiden Hauptverfahren eingebunden werden kann, wurde diese Verfahrenskombination aus wirtschaftlichen Gründen ebenfalls nicht weiter betrachtet.

Infolge der dargelegten Randbedingungen und Ausschlusskriterien wurden im Rahmen der Machbarkeitsstudie daher die nachstehenden beiden Verfahrensvarianten weitergehend untersucht:

- Variante 1: Ozonung (der vorh. DynaSand®-Filtration vorgeschaltet)
- Variante 2: GAK-Filtration (der vorh. DynaSand®-Filtration nachgeschaltet)

Die Konzeptionierung und Auslegung der einzelnen Varianten erfolgte nach der „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ (KOM-M NRW, 2016).

6.2 Auslegungswassermenge

Auf der sicheren Seite liegend wurden die beiden Verfahren für eine Vollstrombehandlung ausgelegt. Sollte eine zusätzliche Verfahrensstufe zur weitergehenden Mikroschadstoffelimination in Betracht gezogen werden, kann geprüft bzw. mit der zuständigen Behörde abgestimmt werden, ob eine Teilstrombehandlung ggfs. ausreichend bzw. wirtschaftlicher ist.

Im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie wurden die Anlagen der beiden Verfahren somit konservativ auf die Jahresabwassermenge (JAM) ausgelegt. Als JAM wurde der aufgerundete Median der letzten 5 Jahre (2015 bis 2019) angesetzt. Die Dimensionierung der Varianten erfolgte daher auf Basis der maximalen Mischwassermenge bei Regenwetter (Q_M) mit:

$$JAM = 950.000 \text{ m}^3/\text{a} \quad Q_M = 432 \text{ m}^3/\text{h} = 120 \text{ l/s}$$

6.3 Variante 1: Ozonung

Für das Ozonverfahren mit nachgeschalteter Sandfiltration sind die nachfolgenden Anlagenteile erforderlich:

- Sauerstofftank
- Betriebsgebäude mit Ozongenerator und Restozonvernichter
- Ozonreaktor
- Nachgeschaltete Sandfiltration (vorhanden)

Das für den Ozonreaktor benötigte Ozon wird aus Flüssigsauerstoff hergestellt, der in einem Flüssigsauerstofftank gelagert wird. Der Flüssigsauerstoff wird zuerst in einem Verdampfer in den gasförmigen Aggregatzustand überführt und anschließend dem Ozonerzeuger zugeführt. Im Ozongenerator wird durch stille elektrische Entladung aus Sauerstoff (O_2) das benötigte Ozon (O_3) erzeugt. Für die Erzeugung von 1 kg O_3 werden dabei 10 kg O_2 benötigt. Anschließend wird das O_2/O_3 -Gemisch dem Ozonreaktor zugeführt. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Ozongeneratoren nach den Vorgaben der Anlagenhersteller zu kühlen sind. Die Kühlung kann mittels Luft- oder Wasserkühlung (z. B. Plattenwärmetauscher) erfolgen. Die Kühlsysteme müssen dabei vor Feststoffen und Biomasse geschützt werden. Für die Kläranlage Aegidienberg wurde ein Ozongenerator mit integrierter Wasserkühlung berücksichtigt, für den das benötigte Kühlwasser direkt aus dem Kläranlagenablauf entnommen werden kann.

Beim Ozonreaktor ist im Allgemeinen die Reaktorgeometrie entscheidend für die Aufenthaltszeit des Wassers, wobei folgende Bauweisen möglich sind: kaskadiertes Beckenvolumen, Schlaufenreaktor mit Leitwänden und Rohrreaktor (Pfropfen-Strömung). Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde ein Schlaufenreaktor mit Leitwänden vorgesehen, womit sich der Ozonreaktor in zwei Kammern unterteilen lässt. In der ersten Kammer erfolgt der Ozoneintrag, während die zweite Kammer das Ausgasen und Absaugen des Restozons ermöglicht, welches anschließend im Restozon-Vernichter katalytisch zu behandeln ist.

Der Ozoneintrag kann dabei mittels Pumpe-Injektor-System oder Diffusor-System erfolgen. Da die Eliminationsleistung beider Verfahren ähnlich ist, wurden in der vorliegenden Studie betriebliche und wirtschaftliche Aspekte bei der Auswahl herangezogen. Beide Eintragungssysteme kamen bereits auf der Kläranlage Duisburg-Vierlinden zum Einsatz. Aufgrund der dort erlangten Erkenntnisse wurde für die KA Aegidienberg der Eintrag mittels keramischer Diffusoren bevorzugt, da dieses System nach mehrjähriger Betriebserfahrung einen etwas geringeren Stromverbrauch vorweist (Bolle, et al., 2015).

Der Ozonreaktor ist als kompaktes Betonbecken in zweistraßiger Ausführung vorgesehen, um eine Straße bei geringen Nachtminima-Abflüssen außer Betrieb nehmen zu können und in Anlehnung an die „n-1 Regelung“ stets eine betriebsfähige Straße zu gewährleisten (Redundanz/Betriebssicherheit). Jede Straße ist durch eine unterströmbare Trennwand in die beiden o.g. Kammern aufgeteilt. In der ersten Kammer sind die keramischen Diffusoren am Boden des Beckens installiert, so dass das Nachklärwasser den Reaktor in der ersten Kammer im Gegenstrom zum eingebrachten Ozon von oben nach unten durchströmt. In der zweiten Kammer erfolgt die möglichst vollständige Zehrung des Ozons bei einer Strömung von unten nach oben und anschließender Ableitung zur Sandfiltration. Zur Sicherstellung des Arbeits- und Umweltschutzes ist der Ozonreaktor gasdicht abzudecken und mit leichtem Unterdruck zu betreiben. Das aus dem Ozonreaktor abgesaugte Gas wird dem Restozonvernichter zugeführt, der zusammen mit dem Ozongenerator im Betriebsgebäude angeordnet ist.

Einbindung der Ozonung

Eine Einbindung der neuen Anlagenteile ist auf der KA Aegidienberg gemäß nachfolgender Abbildung 17 möglich. Der Ozonreaktor und das Betriebsgebäude befinden sich dabei im Bereich der Erweiterungsfläche nördlich des zweiten Nachklärbeckens. Der Sauerstofftank mit Verdampfer kann auf der gegenüberliegenden Seite angeordnet werden.

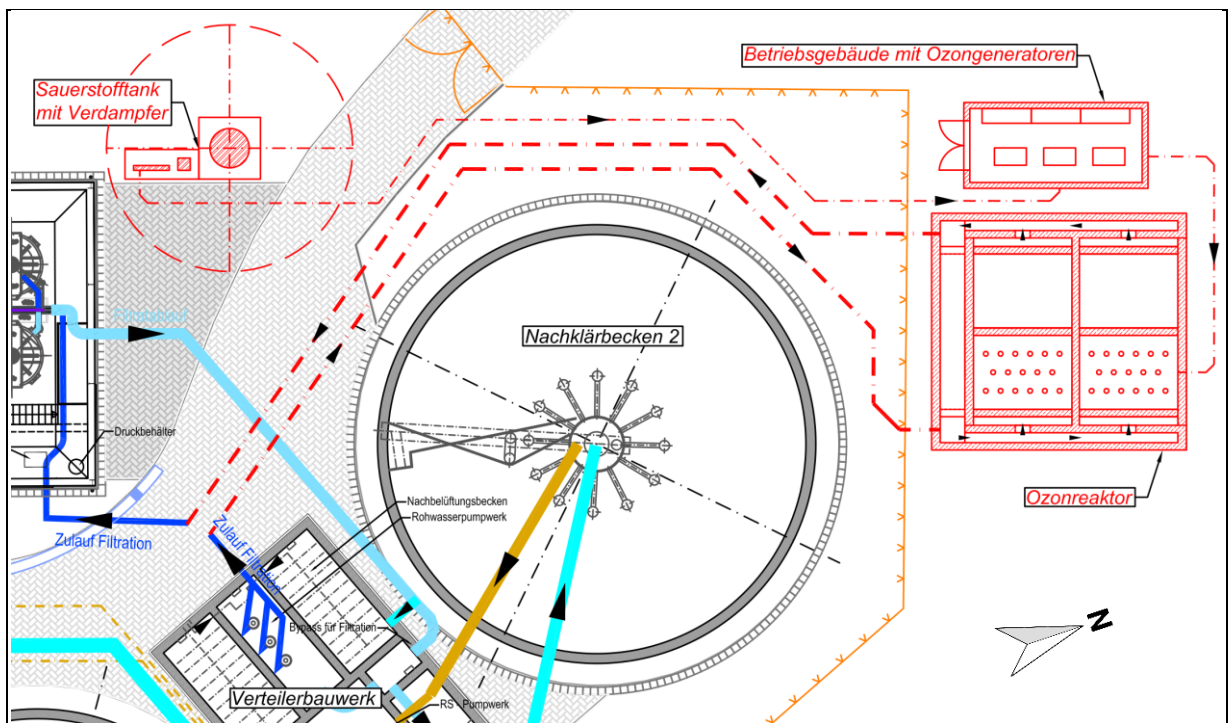


Abbildung 17: Mögliche Einbindung der Ozonanlage (rot) in den Bestand der KA Aegidienberg

Das zugehörige Fließschema mit den dazugehörigen Systemkomponenten Sauerstofftank, Verdampfer, Ozonerzeuger und Restozon-Vernichter ist in der nachfolgenden Abbildung 18 dargestellt.

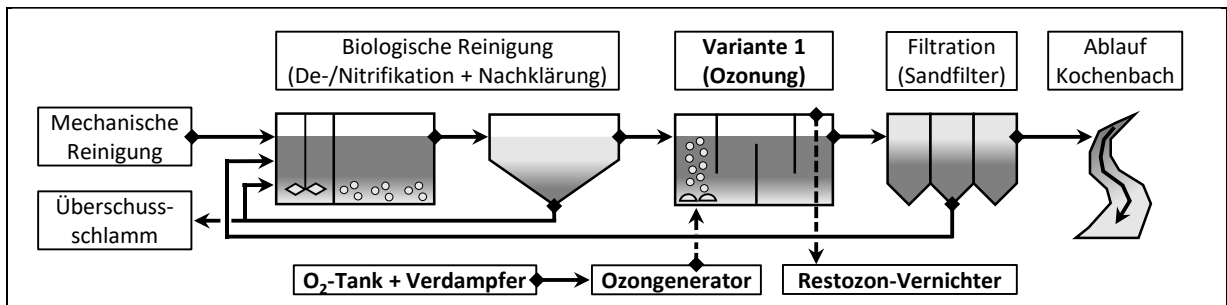


Abbildung 18: Fließschema der zwischengeschalteten Ozonanlage (Variante 1) in den Bestand der KA Aegidienberg mit den notwendigen Systemkomponenten

Der Ozonreaktor ist wie erwähnt der biologischen Reinigungsstufe nachgeschaltet und wird mit dem Ablauf der Nachklärbecken beschickt. Die Beschickung kann über die bereits vorhandenen Tauchmotorpumpen erfolgen, welche im Verteilerbauwerk installiert sind und aktuell zur Beschickung der Sandfiltration dienen. Nach der Ozonung wird das behandelte Abwasser zur Sandfiltration geschickt. Dies kann ggfs. im Freispiegelabfluss geschehen, falls die Wasserspiegellage am Ablauf des Ozonreaktors auf eine Höhe > ca. 223,5 m NHN festgelegt werden kann (4,7 m über Geländehöhe). Somit könnten Pumpen zur Beschickung der Sandfiltration ggfs. entfallen. In der Sandfiltration erfolgt die biologisch aktive Nachbehandlung zur Elimination von möglicherweise bildenden Abbau- und Transformationsprodukten. Eine biologische Aktivität konnte der Sandfiltration aufgrund Vorhandenseins eines Biofilmes nachgewiesen werden. Nach der Sandfiltration wird das Abwasser zum vorh. Probennahmenschacht im Verteilerbauwerk abgeleitet und anschließend in den Vorfluter eingeleitet.

Die Dimensionen der oben skizzierten Anlagenkomponenten basieren auf den nachfolgenden Vorbemessungen. Für die Anlage ist Flächenbedarf von insgesamt rd. 150 m² erforderlich.

Ermittlung der Bemessungsgrundlagen

Zur Vordimensionierung der Anlagenteile sind u.a. die benötigten Ozonmengen abzuschätzen. Gemäß KOM-M NRW (2016) kann die relevante Ozondosis C_{O_3} in Abhängigkeit der im Zulauf der Ozonung vorhandenen DOC-Konzentration ermittelt werden, wobei für eine ausreichende Eliminierung der meisten Mikroschadstoffe eine spezifische Ozondosierung z_{spez} von 0,6 - 0,9 mg_{O₃}/mg_{DOC} angesetzt werden kann, siehe auch vorheriges Kap. 5.4.

Da für den Ablauf aus der Nachklärung keine entsprechenden Daten vorliegen, wurden für eine erste Abschätzung die Werte verwendet, die im Rahmen der Datenverdichtung für den Kläranlagenablauf (nach der Sandfiltration) ermittelt wurden. Hier lag die ermittelte DOC-Konzentration im Bereich zwischen ca. 4 - 8 mg_{DOC}/L bei einer aus 5 Tagen gemittelten Konzentration von $C_{DOC} = 6,2$ mg_{DOC}/L, siehe Tabelle 14 in Kapitel 5.3. Mit einer gewählten spezifischen Ozonzehrung von $z_{spez} = 0,7$ mg_{O₃}/mg_{DOC} und einer mittleren Konzentration des gelösten Kohlenstoffs von $C_{DOC} = 6,2$ mg_{DOC}/L ergibt sich eine erforderliche Ozondosis C_{O_3} von:

$$C_{O_3} = z_{spez} \cdot C_{DOC} = 4,34 \frac{mg O_3}{L}$$

Da Nitrit-Stickstoff (NO₂-N) sehr schnell mit Ozon reagiert und dabei Nitrat gebildet wird, sollte generell eine zusätzliche Ozonzehrung durch Nitrit mit einer spezifischen Zehrung von 3,43 mg_{O₃}/mg_{NO₂-N} (stöchiometrisch) berücksichtigt werden, da ansonsten nicht genügend Ozon zur Mikroschadstoffelimination zur Verfügung steht.

Aufgrund der sehr geringen NO₂-N-Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage von im Mittel lediglich 0,02 mg/L (2019) ist der zusätzliche Ozonbedarf jedoch marginal. Der Ablauf aus der Nachklärung kann jedoch ggfs. höhere NO₂-N-Konzentrationen aufweisen. Genauere Daten hierzu liegen jedoch nicht vor, so dass ein entsprechender Ansatz im Rahmen der Vorbemessung nicht berücksichtigt wurde, zumal die monetären Auswirkungen einer höheren oder auch niedrigeren Ozondosis im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse erfasst wurden, siehe Kapitel 7.1.5.

Ozonerzeugung / -generatoren

Anhand der ermittelten Ozondosis von C_{O₃} = 4,34 mg/L und der anfallenden Abwassermenge lässt sich die benötigte Ozonmenge ermitteln, die vom Ozongenerator erzeugt werden muss. Der Ozongenerator wird dabei auf die maximal benötigte Menge ausgelegt, die voraussichtlich bei maximalem Kläranlagenzulauf bereitzustellen ist. Mit einem maximalen Zufluss von Q_M = 120 l/s = 432 m³/h ergibt sich eine maximal benötigte Ozonfracht von:

$$B_{O_3,max} = Q_M \cdot C_{O_3} = 1,87 \frac{kg O_3}{h}$$

Der für die Ozonerzeugung notwendige Sauerstoff soll als Flüssigsauerstoff (LOX) generiert werden, wobei für 1 kg O₃ etwa 10 kg O₂ benötigt werden. Mit der angesetzten Jahresabwassermenge von JAM = rd. 950.000 m³/a und der ermittelten Ozondosis von C_{O₃} = 4,34 mg/L berechnet sich der durchschnittliche Jahresbedarf an LOX entsprechend zu:

$$Jahresbedarf LOX = \frac{C_{O_3} \cdot JAM}{10 M. -\%} = 41,2 Mg/a$$

Bei einem benötigten Jahresbedarf an LOX von rd. 41 Mg/a ist für den Standort der Kläranlage die Aufstellung einer Sauerstofftankanlage mit einem Fassungsvermögen von rd. 7 Mg am wirtschaftlichsten. Hierbei wird von maximal 12 Lieferungen pro Jahr ausgegangen, wenn eine Lieferung ab einem Restfüllstand von etwa 30 – 50 % veranlasst wird. Die Anlieferung kann dabei vollautomatisch durch einen LOX-Anbieter durchgeführt werden, der den Füllstand des Sauerstofftanks in Echtzeit überwacht und bei Erfordernis eine entsprechende Lieferung veranlasst. Generell sind die geltenden technischen Regeln zur Aufstellung von Gastankanlagen nach TRB 610 zu beachten.

Ozoneintrag

Für das Eintragsverfahren mit Diffusoren ist die Spannweite zwischen maximaler und minimaler Gasvolumenströme Q_{O₂/O₃} zu ermitteln. In Abhängigkeit einer maximalen Produktgaskonzentration von C_{O₃,Produktgas} = 148 g_{O₃}/Nm³ (Nm³: Normvolumen/-kubikmeter) errechnen sich die Volumenströme zu:

$$Q_{O_2/O_3,max} = B_{O_3,max} / C_{O_3,Produktgas} = 12,7 Nm^3/h$$

$$Q_{O_2/O_3,min} = B_{O_3,min} / C_{O_3,Produktgas} = 0,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Um im Fall des Schwachlastbetriebes $Q_{O_2/O_3,min}$ einzuhalten, sollte bei genauerer Planung die temporäre Ausschaltung einzelner Diffusoren geprüft werden. Hierbei ist es entscheidend, dass kein Abwasser und Feststoffe ins Diffusor-System eindringt. Alternativ kann auf Kosten des erhöhten Sauerstoffbedarfs auch die Ozonkonzentration im Produktgas reduziert werden oder die Schließung von einer parallellaufenden Ozonstraße eingeleitet werden.

Ozonreaktor

Die Aufenthaltszeit im Ozonreaktor muss eine weitestgehende Zehrung des Ozons ermöglichen. Gemäß (KOM-M NRW, 2016) können Ozonreaktoren für eine mittlere Aufenthaltszeit zwischen 15 - 30 Minuten ausgelegt werden. Alternativ ist eine Ermittlung der Kontakt-/Aufenthaltszeit anhand von Ozonzehrungsversuchen möglich, wobei aufgrund einer möglicherweise ungleichmäßigen Strömung ein Sicherheitsfaktor von 3,0 zu berücksichtigen ist. Gemäß den durchgeführten Ozonzehrungsversuchen (Kapitel 5, S. 27) lag die Dauer bis zur nahezu vollständigen Zehrung (bei der relativ hohen Ozondosis von 10 mg_{O₃}/L) bei maximal rd. 10 Minuten ($t_{\text{Zehrung}} \approx 10 \text{ min}$). Daraus ergibt sich eine Kontaktzeit von:

$$t_{\text{Kontakt}} = t_{\text{Zehrung}} \cdot 3,0 = 30 \text{ min} = 0,5 \text{ h}$$

Die gewählte Kontaktzeit von 30 Minuten entspricht auch der oben empfohlenen maximalen Aufenthaltszeit und liegt somit auf der sicheren Seite.

Die Ermittlung des erforderlichen Reaktorvolumens ergibt sich aus der Bemessungswassermenge von $Q_M = 120 \text{ l/s} = 432 \text{ m}^3/\text{h}$ und der gewählten Kontaktzeit von $t_{\text{Kontakt}} = 0,5 \text{ h}$ entsprechend zu:

$$V_{O_3} = Q_M \cdot t_{\text{Kontakt}} = 216 \text{ m}^3$$

Für den gewählten Beckentyp sollte beim Einsatz von Diffusoren für den Ozoneintrag eine Beckentiefe von 6 m nicht unterschritten werden. Mit einer gewählten Wassertiefe von $h_{O_3} = 6 \text{ m}$ und einem gewählten Reaktorvolumen von $V_{O_3} = 216 \text{ m}^3$ ergibt sich eine Reaktorgrundfläche A_{O_3} von:

$$A_{O_3} = V_{O_3} / h_{O_3} = 36 \text{ m}^2$$

Generell wird zur Optimierung der Reaktorgeometrie eine dreidimensionale-numerische Strömungssimulation (CFD-Simulation) empfohlen, falls ein Ozonreaktor errichtet werden sollte.

EMSR-Technik und Betrieb

Der Ozongenerator mit integrierter Wasserkühlung und EMSR-Technik (Elektro-, Mess-, Steuerungs-, Regelungstechnik) kann innerhalb eines soliden Betriebsgebäudes oder in einem speziellen Anlagen-/Technikcontainer installiert werden, welche den geforderten Arbeitssicherheits- und Brandschutzanforderungen genügen. Hierunter fällt insbesondere eine Ozon- und Sauerstoffmessung mit gekoppelter Alarmanlage. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde ein kompakter Anlagen-/Technikcontainer berücksichtigt.

Für kleine Anlage mit weniger als 100.000 EW und geringen Schwankungen des DOC kann die Regelung des Ozoneintrags proportional zur Zulaufmenge erfolgen. Alternativ kann die Dosierung über Onlinemessungen von DOC und Nitrit (NO₂-N) geregelt werden. Über eine zusätzliche Messung im Abgas der Ozonung kann dabei sichergestellt werden, dass eine Überdosierung vermieden wird. Bezüglich der Sauerstoffanlage sind die technischen Regeln für Gefahrenstoffe (TRG) und die Unfallverhütungsvorschrift (HVBG, insbesondere BGV A1) zu berücksichtigen.

Zusammenfassung der Vordimensionierung und Auslegung

In der nachfolgenden Tabelle 16 sind nochmals die wesentlichen Auslegungsparameter der vordimensionierten Anlage zur Variante 1 (Ozonung) zusammengestellt.

Tabelle 16: Zusammenstellung der Auslegungsparameter für Variante 1 – Ozonung

Auslegungsparameter	Symbol	Wert	Einheit
maximaler Mischwasserzufluss	Q _M	432	m ³ /h
Jahresabwassermenge	JAM	950.000	m ³ /a
Spezifische Dosierung	Z _{spez}	0,7	mg _{O₃} /mg _{DOC}
DOC im Zulauf der Ozonanlage	C _{DOC}	6,2	mg _{DOC} /L
Ozondosierung	C _{O₃}	4,34	mg _{O₃} /h
Bereich der benötigte Ozonmenge	B _{O₃}	0,07 – 1,87	kg _{O₃} /h
Bereich des Gasvolumenstroms	Q _{O₂/O₃}	0,5 – 12,7	Nm ³ /h
Ozon-Eintragssystem	-	Diffusor-System	-
Reaktorbeckengeometrie	-	Schlaufenreaktor	-
Aufenthaltszeit im Ozonreaktor	t _{Kontakt}	30	min
Reaktorbeckenvolumen	V _{O₃}	216	m ³
Reaktortiefe	h _{O₃}	6	m
Reaktorgrundfläche	A _{O₃}	36	m ²
Jahresbedarf an LOX	-	41,2	Mg/a
Gesamter Flächenbedarf	-	150	m ²

Wie bereits erwähnt, sind bei einer Umsetzung dieser Variante im Vorfeld genauere Untersuchungen zur Wasserqualität aus dem Ablauf der Nachklärung durchzuführen, um eine ausreichende Dimensionierung der Anlage sicherzustellen.

6.4 Variante 2: GAK-Filtration

Für das GAK-Verfahren mit vorgeschalteter Sandfiltration sind die nachfolgenden Anlagenteile erforderlich:

- GAK-Filtration
- Vorgeschaltete Sandfiltration (vorhanden)

Die GAK-Filtrationsanlage wurde als aufwärts, kontinuierlich durchströmter Raumfilter in Behälterbauweise vorgesehen. Als Hauptanlagentechnik wurden DynaSand®-Carbon-Filter des

Herstellers NordicWater GmbH gewählt. Dabei ist eine Einhausung vorgesehen, um die Anlagentechnik (Steuerung-/Regeltechnik und Druckluftanlage) sicher unterzubringen sowie die Behälter vor Witterung zu schützen. Die gewählte Filteranlage ähnelt den im Bestand vorliegenden DynaSand®-Filter, abgesehen von wenigen Modifikationen wie Mammutpumpe, Sandwäscherteile, Rotameter und Sandwäscher-Abdeckung (NordicWater, 2020). Damit gleicht die Verfahrensweise und Technik der DynaSand®-Filtration, welche in Kapitel 4.4 beschrieben ist. Die GAK-Filteranlagen können somit auf die gleiche Weise betrieben werden wie die Sandfilter, so dass im Vergleich zur Variante 1 (Ozonanlage) kaum zusätzliche Anforderungen an das bestehende Betriebspersonal gestellt werden.

Einbindung der GAK-Filtration

Die GAK-Filtration wird der vorhandenen Sandfiltrationsanlage nachgeschaltet, siehe Fließschema in nachfolgender Abbildung 19. Die Beschickung kann dabei nach erster Einschätzung im Freispiegelabfluss erfolgen, sodass keine Pumpen erforderlich werden. Hierzu muss der maßgebende Wasserspiegel der GAK-Filteranlage ca. rd. 2 m tiefer liegen als der Ablauf der Sandfiltration. Nach der GAK-Filtration wird das Abwasser zum vorh. Probenahmenschacht im Verteilerbauwerk abgeleitet und anschließend in den Vorfluter (Kochenbach) eingeleitet. Eine weitergehende Nachbehandlung nach der GAK-Filtration ist grundsätzlich nicht erforderlich.

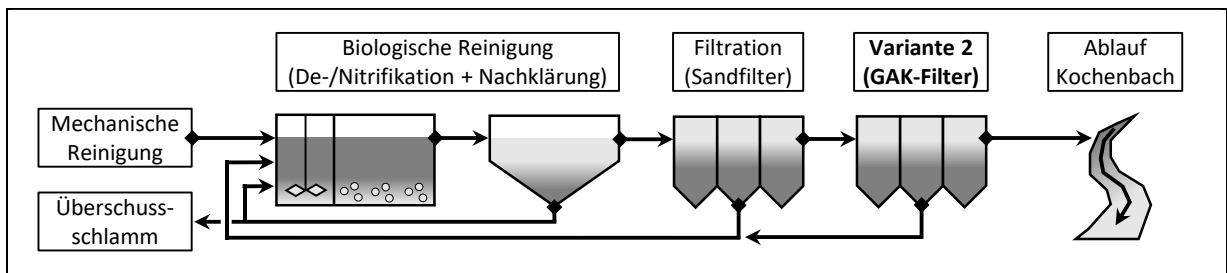


Abbildung 19: Fließschema der Variante 2: GAK-Filtration im Bestand der KA Aegidienberg

Die GAK-Filtrationsanlage kann wie der Ozonreaktor nördlich des zweiten Nachklärbeckens angeordnet werden, siehe nachfolgende Abbildung 20.

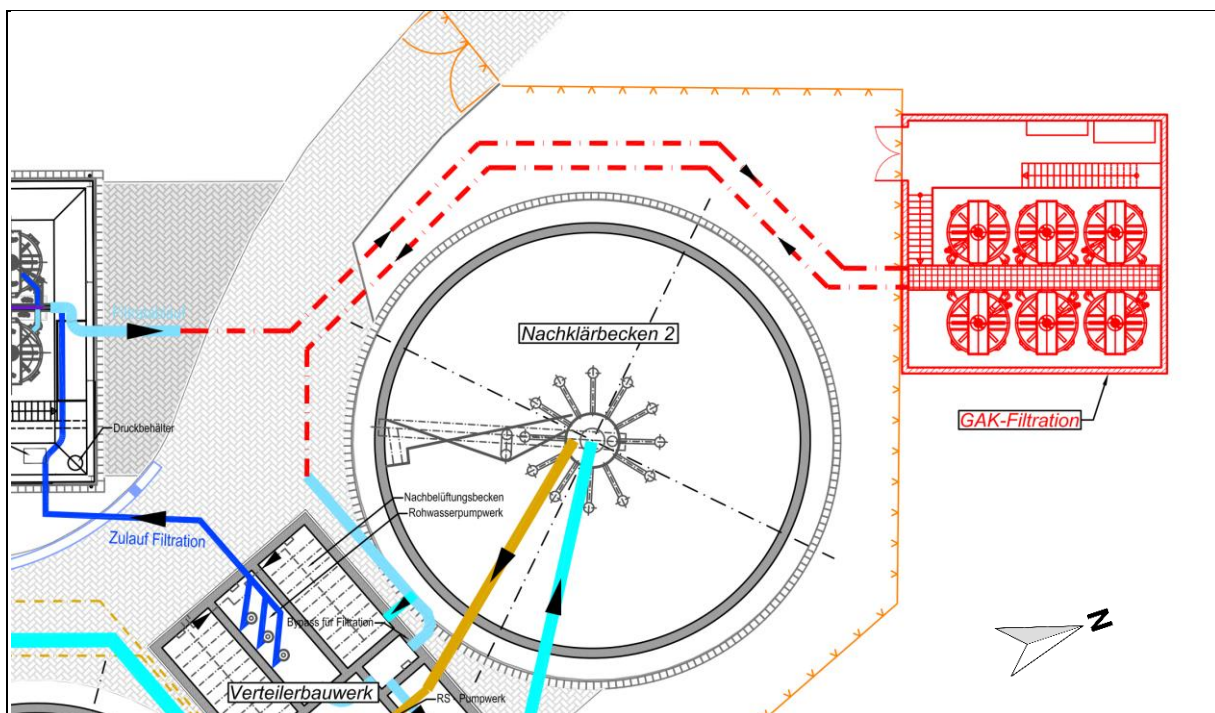


Abbildung 20: Einbindung der Variante 2: GAK-Filtration in den Bestand der KA Aegidienberg

Die Dimensionen der oben skizzierten Anlagenkomponenten basieren auf den nachfolgenden Vorbemessungen. Für die Anlage ist Gesamtflächenbedarf von rd. 115 m² erforderlich.

Allgemeine Auslegung von GAK-Filtern

Der Betrieb von GAK-Filtern sollte unter Berücksichtigung der nachfolgenden Parameter erfolgen, die nach KOM-M NRW (2018) in den unten aufgeführten Größenbereichen zusammengestellt sind:

- Filterbetthöhe (h_F): 1,5 – 3 m
- Leerbettkontaktzeit (EBCT): 5 – 30 Minuten
- Filterbettgeschwindigkeit (v_F): 5 – 15 m/h (bei Suspensarückhalt 2 – 8 m/h)
- Durchsetzbares Bettvolumen (BVT): 500 – 31.400 BV (Median \approx 14.000 BV)

Die Spannweite der Angaben resultiert u. a. aus einer Auswertung der bisher großtechnisch umgesetzten GAK-Anlagen, die mit teils unterschiedlichen Parametergrößen das jeweils geforderte Eliminierungsziel erreichen konnten. Unter Berücksichtigung der o.g. Anlagenparameter wurde die nachstehende Filtergeometrie und Filteranzahl gewählt:

- Anzahl Filterzellen: 6 Filter à 5 m²
- Gesamte Filterfläche: $A_F = 30 \text{ m}^2$
- Filterbetthöhe: $h_F = 2,5 \text{ m}$
- Aktives Filtervolumen: $V_F = 75 \text{ m}^3$

Die für den gewählten GAK-Filter nachfolgend geführten Nachweise basieren dabei auf dem Arbeitsblatt „DWA-A 203 – Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung“ und „DVGW-W-239 – Entfernung organischer Stoffe bei der Trinkwasseraufbereitung durch Adsorption an Aktivkohle“.

Leerbettkontaktzeit und Filterbettgeschwindigkeit

Die sogenannte Leerbettkontaktzeit EBCT (*engl. Empty Bed Contact Time*) ist bei der Auslegung von Aktivkohlefiltern besonders entscheidend. Die EBCT ist die Aufenthaltszeit, die benötigt wird, um das leere GAK-Bettvolumen zu durchströmen. EBCT ist damit von der Filterbetthöhe h_F und der Filtergeschwindigkeit v_F abhängig, siehe Abbildung 21.

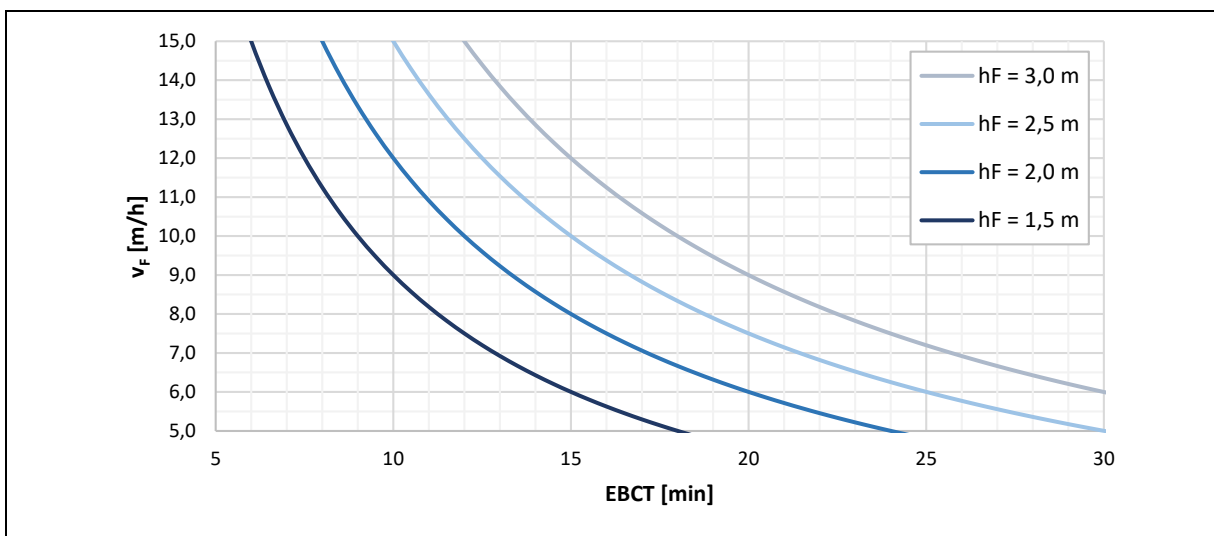


Abbildung 21: Funktionen der Filtergeschwindigkeit v_F in Abhängigkeit der Leerbettkontaktzeit EBCT für die Filterhöhen 1,5 m bis 3 m (allgemeingültige Funktionen)

Nach KOM-M NRW (2018) liegt die Filtergeschwindigkeit dabei in einem Bereich zwischen 5 – 15 m/h. Die Filterfläche ist entsprechend so zu dimensionieren ist, dass beim Bemessungszufluss (max. Zufluss bei Regenwetter) die o.g. Filtergeschwindigkeit eingehalten wird. Mit einem maximalen Zufluss von $Q_M = 432$ m³/h und einer gewählten Gesamfilterfläche von $A_F = 30$ m² berechnet sich die entsprechende Filtergeschwindigkeit $v_{F,max}$ zu:

$$v_{F,max} = Q_M / A_F = 14,4 \text{ m/h} \begin{cases} \geq 5 \text{ m/h} \\ \leq 15 \text{ m/h} \end{cases}$$

Mit einer Filtergeschwindigkeit $v_{F,max} = 14,4$ m/h bei maximalem Zufluss liegt die Filtergeschwindigkeit noch im empfohlenen Bereich von v_F von 5 – 15 m/h. Bei der Filtergeschwindigkeit von $v_{F,max} = 14,4$ m/h und der gewählten Filterbetthöhe von $h_F = 2,5$ m ergibt sich ein EBCT von:

$$EBCT = h_F / v_{F,max} = 10,4 \text{ min} \begin{cases} \geq 5 \text{ min} \\ \leq 30 \text{ min} \end{cases}$$

Beide Parameter (EBCT, $v_{F,max}$) befinden sich somit innerhalb der angegebenden Spannweite nach KOM-M NRW (2018).

Bettvolumen und Filterstandzeit (Nutzungsdauer der GAK)

Das behandelte Bettvolumen (kurz BVT; engl. *Bed Volume Treated*) ist eine normierte Größe mit der Einheit $\text{m}^3_{\text{Abwasser}}/\text{m}^3_{\text{GAK}}$, welche auch mit BV (Bettvolumina) abgekürzt wird. Das behandelte Bettvolumen BVT gibt somit an, wieviel m^3 Abwasser pro m^3 GAK behandelt werden kann, bis die GAK beladen und somit auszutauschen ist. Da der Beladungsvorgang u.a. stark vom zu behandelnden Abwasser und der eingesetzten GAK abhängig ist, sollte das BVT in Labortests- oder im halbtechnischen Maßstab ermittelt bzw. verifiziert werden. Ein entsprechend hoher Wert ist rechnerisch mit einer hohen Filterstandzeit verbunden, was somit einen Einfluss auf die GAK-Austauschrate hat.

Bei dem gewählten Filtervolumen von $V_F = 75 \text{ m}^3$ und der Jahresabwassermenge von $JAM = 950.000 \text{ m}^3/\text{a}$ ergibt sich ein rechnerischer BVT_r -Wert von:

$$BVT_r = \frac{JAM}{V_F} = 12.667 \text{ BV}$$

Der rechnerische BVT_r -Wert von 12.667 BV liegt dabei im Bereich des nach KOM-M NRW (2018) angegebenen Medians von rd. 14.000 BV, welches von Anlagen erreicht wird, so dass bei der im nachfolgenden Kapitel 7 durchgeführten Ermittlung der laufenden Kosten eine Standzeit von rd. 1 Jahr angesetzt wurde. Wie erwähnt, hängt die tatsächlich erreichbare Standzeit vom BVT ab, was wiederum vom zu behandelnden Abwasser und der eingesetzten GAK abhängig ist und anhand von Versuchen ermittelt werden sollte. Bei einem anderen BVT_r -Wert kann die Standzeit für den gewählten Filter anhand der nachfolgenden Abbildung 22 abgelesen werden.

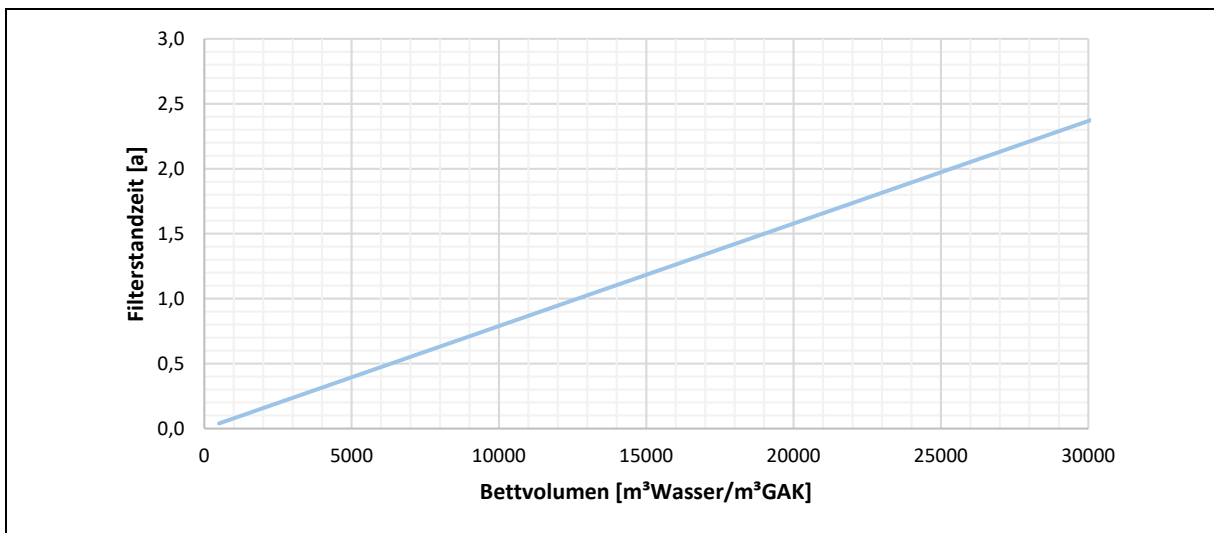


Abbildung 22: Funktionen der Filterstandzeit in Abhängigkeit des Bettvolumens (gültig für $V_F = 75 \text{ m}^3$ und $JAM = 950.000 \text{ m}^3/\text{a}$)

Die Filterstandzeit in obiger Abbildung 22 kann dabei auch anhand der nachfolgenden Formel berechnet werden:

$$\text{Filterstandzeit} = \frac{V_F \cdot BVT}{JAM}$$

Entspricht der anhand von Versuchen ermittelte BVT-Wert dem rechnerischen BVT-Wert, der sich aus der Jahresabwassermenge ergibt, liegt die Filterstandzeit wie erwähnt bei einem Jahr.

Da nachfolgend von einer Filterstandzeit von einem Jahr ausgegangen wird, ergibt sich mit einer Schüttdichte von $\rho_{Sch} = 0,45 \text{ Mg/m}^3$ (Körnung 0,6 – 2,4 mm) und einem erforderlichen Materialvolumen von $V_M = (A_F \cdot (h_F + 0,5 \text{ m})) = 90 \text{ m}^3$ der Jahresbedarf an GAK zu:

$$\text{Jahresbedarf GAK} = \frac{\rho_{Sch} \cdot A_F \cdot (h_F + 0,5 \text{ m})}{\text{Filterstandzeit}} = 40,5 \text{ Mg/a}$$

Zusammenfassung der Vordimensionierung und Auslegung

Bei Umsetzung dieser Variante sollten im Vorfeld genauere Untersuchungen bzgl. des durchsetzbaren Bettvolumens und der Aktivkohleart durchgeführt werden.

In der nachstehenden Tabelle 16 sind nochmals die wesentlichen Auslegungsparameter der vordimensionierten GAK-Filtration zusammengestellt.

Tabelle 17: Zusammenfassung der Auslegungsparameter für Variante 2 – GAK-Filter

Auslegungsparameter	Symbol	Wert	Einheit
maximaler Mischwasserzufluss	Q_M	432	m ³ /h
Jahresabwassermenge	JAM	950.000	m ³ /a
Anzahl der Filterzellen	-	6	-
Gesamte Filterfläche	A_F	30	m ²
gewählte Filterbetthöhe	h_F	2,5	m
max. Filterbettgeschwindigkeit	$v_{F,max}$	14,4	m/h
minimale Leerbettkontaktzeit	EBCT	10,4	min
angenommenes Bettvolumen	BVT	12.667	BV
Filterstandzeit	-	1,0	a
Jahresbedarf GAK (0,6 – 2,4 mm)	-	40,5	Mg/a
Gesamter Flächenbedarf	-	115	m ²

7 Wirtschaftlichkeitsprüfung und Variantenvergleich

Um die beiden untersuchten Varianten (Ozon, GAK) vergleichen zu können, wurden beide Verfahren monetär und qualitativ bewertet. Die monetäre Bewertung im nachfolgenden Kapitel 7.1 basiert dabei auf einer Kostenvergleichsrechnung, in der für beide Verfahren jeweils die Gesamtkosten ermittelt und über die voraussichtliche Nutzungsdauer als Jahreskosten gegenübergestellt wurden. Die anschließende qualitative Bewertung in Kapitel 7.2 beruht auf einer Nutzwertanalyse, in der die beiden Verfahren anhand einer Bewertungsmatrix mit verschiedenen Kriterien verglichen wurden. Im darauffolgenden 7.3 sind die Ergebnisse des Variantenvergleichs mit einer Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile nochmals zusammengefasst.

7.1 Kostenvergleichsrechnung

Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit ist ein wesentlicher Bestandteil der vorliegenden Machbarkeitsstudie. Dabei wurden die Varianten nach dem Sparsamkeitsprinzip verglichen, um die Zielerfüllung mit dem geringstmöglichen Mitteleinsatz zu erreichen (DWA, 2012).

Da neben den einmaligen Investitionskosten insbesondere auch laufende Betriebskosten sowie ggfs. auch Reinvestitionskosten für den Anlagenbetreiber von Interesse sind, wurde zur monetären Bewertung der beiden Verfahren eine Kostenvergleichsrechnung nach den „*Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien)*“ durchgeführt (DWA, 2012). Hierfür wurden in den beiden nachfolgenden Kapiteln die Investitions-/ Reinvestitionskosten und die laufenden Kosten auf Basis einer Kostenschätzung ermittelt. Die Reinvestitionskosten sind dabei für Anlagenteile zu berücksichtigen, die eine kürzere Nutzungsdauer als die Gesamtanlage aufweisen (z.B. maschinelle oder elektrotechnische Ausrüstung). Zur Ermittlung der Kosten könnten zwar grundsätzlich auch Kostenfunktionen genutzt werden, jedoch sind diese aufgrund der noch geringen Datengrundlage nicht so aussagekräftig wie eine anlagenspezifische Kostenschätzung unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen.

Im Zuge des Kostenvergleichs wurden die ermittelten Kosten anschließend finanzmathematisch aufbereitet und in Jahreskosten umgerechnet, wobei auch der Einfluss möglicher Fördermittel berücksichtigt wurde, siehe Kapitel 7.1.4. Des Weiteren wurde in Kapitel 7.1.5 eine Sensitivitätsanalyse / Empfindlichkeitsprüfung durchgeführt, um den Einfluss bzgl. der getroffenen Kostenannahmen, der abgeschätzten Betriebsmittelmengen, zukünftiger Preisentwicklungen, etc. abschätzen zu können. Zudem wurde geprüft, ob sich die wirtschaftlichen Verhältnisse bei Preisverschiebungen oder geänderten Zinssätzen umkehren können, sodass eine der beiden Varianten ggfs. vorteilhafter ausfällt als zuvor.

Nachfolgend sind lediglich die Ergebnisse der Kostenschätzungen zusammengestellt. Sämtliche Angaben beziehen sich dabei auf Nettokosten (exklusive Mehrwertsteuer). Die detaillierten Kostenrechnungen nach den KVR-Leitlinien sind im Anhang A4 bis A6 enthalten.

7.1.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten beschreiben die einmaligen Anschaffungs- und Herstellungskosten. Hierunter fallen Baukosten, Maschinenkosten, Kosten für EMSR-Technik sowie Nebenkosten. Die ermittelten Investitionskosten setzen sich dabei aus aktuellen Richtpreisangeboten und Ausschreibungen vergleichbarer Projekte zusammen. Die Nebenkosten beinhalten u. a. Kosten für Honorare, Gutachten, Unvorhergesehenes und Sonstiges.

In der nachfolgenden Tabelle 18 sind die ermittelten Kosten der Erstinvestitionen zusammengestellt. Bei beiden Verfahren kann von ähnlich hohen Investitionskosten zwischen netto rd. 1,0 – 1,1 Mio. € ausgegangen werden. Gemäß der aufgestellten Kostenschätzung weist die Variante 1 (Ozonung) dabei einen geringfügig höheren Investitionsbedarf von rd. 6 % bzw. rd. 60 T€ als die Variante 2 (GAK-Filtration) auf.

Tabelle 18: Gegenüberstellung der Erstinvestitionskosten

Pos.-Nr.	Variante	[i]	[1] Ozonung	[2] GAK-Filtration
10	Bautechnik	[€]	413.953	463.495
20	Maschinenteknik	[€]	449.450	348.850
30	E-/MSR-Technik	[€]	45.000	45.000
40	Nebenkosten	[€]	181.681	171.469
Investitionskosten, gesamt		[€]	1.090.084	1.028.813
Anteil			106%	100%

Eine detaillierte Aufstellung der Erstinvestitionskosten ist für Variante 1 im Anhang A4 und für Variante 2 im Anhang A5 enthalten.

7.1.2 Laufende Kosten

In verschiedenen Regelwerken wird der Begriff „Betriebskosten“ als Synonym für „laufende Kosten“ verwendet und unterscheidet sich z. T. in der engeren Definition. Um Missverständnissen vorzubeugen, wird der Begriff „Betriebskosten“ in den KVR-Leitlinien vermieden und stattdessen der Begriff „laufende Kosten“ verwendet.

Die laufenden Kosten beinhalten alle regelmäßig und unregelmäßig wiederkehrenden Aufwendungen, die für Betrieb, Wartung, Unterhaltung sowie Überwachung voraussichtlich anfallen. Die Ermittlung der laufenden Kosten beruht auf den in der nachfolgenden Tabelle 19 getroffenen Annahmen.

Tabelle 19: Kostenannahmen zur Ermittlung der laufenden Kosten

Aufwendungen	Annahmen (Netto)
Personal (Fachkraft für Abwassertechnik)	60.000,- €/ (Pers.: a)
Elektrische Energie (Stand: September 2020)	0,19 €/kWh
Spez. Energiebedarf für die Ozonung (0,04 – 0,17 kWh/m ³) ^(1, 4)	0,07 kWh/m ³
Spez. Ozonmenge je kg Sauerstoff ⁽¹⁾	0,10 kg O ₃ / kg O ₂
Sauerstoff – LOX (inkl. Klimaschutzzulage) ⁽³⁾	0,21 €/m ³ O ₂
Spez. Energiebedarf für die GAK-Filtration (0,02 – 0,06 kWh/m ³) ^(1, 3)	0,02 kWh/m ³
Kosten GAK bei Erstbefüllung (1.200 – 1.700 €/Mg) ^(2, 3)	1.600,- €/Mg
Kosten GAK bei Reaktivierung (900 – 1.170 €/Mg) ^(2, 3)	1.170,- €/Mg
Verluste bei Reaktivierung der GAK-Masse (10 – 20 %) ^(1, 2)	15,0 %
Wartung und Instandhaltung:	
Bautechnik ⁽²⁾	1,0 % vom Invest
E-/MSR-Technik ⁽²⁾	2,0 % vom Invest
Maschinenteknik ⁽²⁾	4,0 % vom Invest

^{(1):} KOM-M NRW (2016) | ^{(2):} Türk, et al. (2013) | ^{(3):} Hersteller/Zulieferer (pers. Kom., 2020) | ^{(4):} Bolle, et al. (2015)

Einsparungen der Abwasserabgaben können bei der Kostenschätzung gemäß Abwasserabgabengesetz (AbwAG, § 4 Abs. 5) berücksichtigt werden, indem sie mit den laufenden Kosten verrechnet werden. Solche Einsparungen können beantragt werden, wenn eine sichere Minderung um mindestens 20 % der abwasserabgaberelevanten Überwachungswerte, wie z. B. CSB, N_{ges} oder P_{ges}, von den Kläranlagenverantwortlichen nachgewiesen wird. Dabei haben GAK-Verfahren im Vergleich zur Ozonung den Vorteil, dass sie laut Untersuchungen eine signifikante Reduzierung von bis zu 45 % des Parameters CSB erzielen können (Gawel, et al., 2015). Bei Annahme, dass der Überwachungswert von derzeit 40 mg_{CSB}/L auf 32 mg_{CSB}/L gemindert wird, könnten schätzungsweise Ersparnisse von rd. 1.500 €/a berücksichtigt werden. Im Rahmen der aufgestellten KVR wurde diese potenzielle Einsparung jedoch vernachlässigt, da sie nur einen geringen Einfluss hat.

In der nachfolgenden Tabelle 20 sind die laufenden Kosten der beiden Verfahren zusammengestellt, die bei der Variante 1 (GAK-Filtration) rd. 10 % höher sind als bei Variante 1 (Ozonung).

Tabelle 20: Gegenüberstellung der laufenden Kosten

Variante	[i]	[1] Ozonung	[2] GAK-Filtration
Elektrische Energie	[€/a]	12.879	3.680
Personal	[€/a]	30.000	15.000
Wartung / Instandhaltung	[€/a]	23.018	19.489
Betriebsmittel (O ₂ / GAK)	[€/a]	8.700	49.997
Transport, Einsparungen und Sonstiges	[€/a]	5.640	120
Laufende Kosten, gesamt	[€/a]	80.236	88.286
Anteil		100%	110%

Bei den Personalkosten wurde dabei eine halbe Stelle für das Betreiben der Ozonung bzw. eine viertel Stelle für das Betreiben der GAK-Filtration angesetzt. Im Vergleich zur Ozonung

entsteht bei der GAK-Filtration ein wesentlich höherer Betriebsmittelkostenaufwand aufgrund der regelmäßigen Reaktivierung der GAK. Dagegen fällt die Position „Transport, Einsparungen und Sonstiges“ bei der Ozonung höher aus, da von 12 Lieferungen pro Jahr für den Flüssigsauerstoff ausgegangen wurde, während schätzungsweise maximal eine Lieferung pro Jahr bei der GAK-Filtration erforderlich ist. In dieser Position sind bei der Ozonung außerdem die Mietkosten für die Sauerstofftankanlage inkl. Verdampfer enthalten.

7.1.3 Jahreskosten

Die ermittelten Jahreskosten dienen im Rahmen der durchgeführten KVR als abschließende Vergleichsgrößen zur wirtschaftlichen Betrachtung. Um einmalige Investitions- und Reinvestitionskosten in Jahreskosten umrechnen zu können, müssen diese Kosten finanzmathematisch aufbereitet werden. Hierzu sind unter anderem Nutzungsdauer und Zinssatz festzulegen. Die nachfolgenden Annahmen basieren dabei auf der Empfehlung des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW (KOM-M NRW, 2015) und sollen bei Machbarkeitsstudien für Anlagen zur Mikroschadstoffelimination verwendet werden:

- Bezugsjahr: 2020
- Zinssatz: 3 % p. a. (inflationsbereinigter Realzinssatz)
- Bautechnik: 30 Jahre (inkl. Nebenkosten)
- Maschinenteknik: 15 Jahre (1x Reinvestitionskosten berücksichtig)
- EMSR-Technik: 10 Jahre (2x Reinvestitionskosten berücksichtig)

Mit den oben getroffenen Annahmen und den in Tabelle 18 angegebenen Investitionskosten lässt sich unter Berücksichtigung der erforderlichen Reinvestitionskosten für jede Variante der insgesamt erforderliche Investitionskostenbarwert ermitteln, der anschließend mittels eines Kapitalwiedergewinnungsfaktors (KFAKR) in einen investiven Anteil der Jahreskosten umgerechnet werden kann. Die gesamten Jahreskosten ergeben sich dann aus der Summe der investiven Jahreskosten und der laufenden Jahreskosten, die in obiger Tabelle 20 zusammengestellt sind, siehe auch Anhang A6.

Das entsprechende Ergebnis der KVR ist in der nachstehenden Tabelle 21 für beide Varianten zusammengestellt. Dabei liegen die ermittelten Jahreskosten bei beiden Varianten im Bereich von rd. 150 T€, wobei die Jahreskosten der GAK-Filtration mit rd. 1 % marginal höher sind als bei der Ozonung.

Tabelle 21: Zusammenstellung der Jahreskosten

Variante	[i]	[1] Ozonung	[2] GAK-Filtration
Investiver Anteil der Jahreskosten, gesamt	[€/a]	73.313	66.893
Laufende Kosten, gesamt	[€/a]	80.236	88.286
Jahreskosten, gesamt	[€/a]	153.549	155.179
Anteil		100%	101%

In der nachfolgenden Tabelle 22 wurden die ermittelten Jahreskosten auf die Abwassermenge, auf die Jahresschmutzwassermenge (JSM) und auf den angeschlossenen Einwohnerwert bezogen. Die Abwassermenge entspricht dabei der ausgelegten JAM von 950.000 m³/a. Der Ermittlung der schmutzwasserspezifischen Jahreskosten liegt eine mediane JSM von rd. 480.000 m³/a zugrunde. Die einwohnerspezifischen Jahreskosten basieren auf einem angeschlossenen Einwohnerwert von 8.190 E.

Tabelle 22: Zusammenstellung der spezifischen Jahreskosten

Variante	[i]	[1] Ozonung	[2] GAK-Filtration
abwasserspezifische Jahreskosten	[€/m ³]	0,16	0,16
schmutzwasserspezifische Jahreskosten	[€/m ³]	0,32	0,32
einwohnerspezifische Jahreskosten	[€/(E·a)]	18,75	18,95
Anteil		100%	101%

In der nachstehenden Abbildung 23 sind die ermittelten Jahreskosten in einem gestapelten Säulendiagramm gegenübergestellt, wobei die Ordinatenachse sowohl die Jahreskosten [€/a] als auch die abwasserspezifischen Kosten [€/m³] zeigt. Anhand des Säulendiagramms lassen sich die anteiligen Kostenverhältnisse gut erkennen. Wie bereits erwähnt, ähneln sich bei beiden Varianten sowohl der investive Anteil der Jahreskosten als auch die laufenden Kosten. Bei der GAK-Filtration haben insbesondere die Betriebsmittelstoffe einen entsprechend hohen Anteil an den laufenden Jahreskosten.

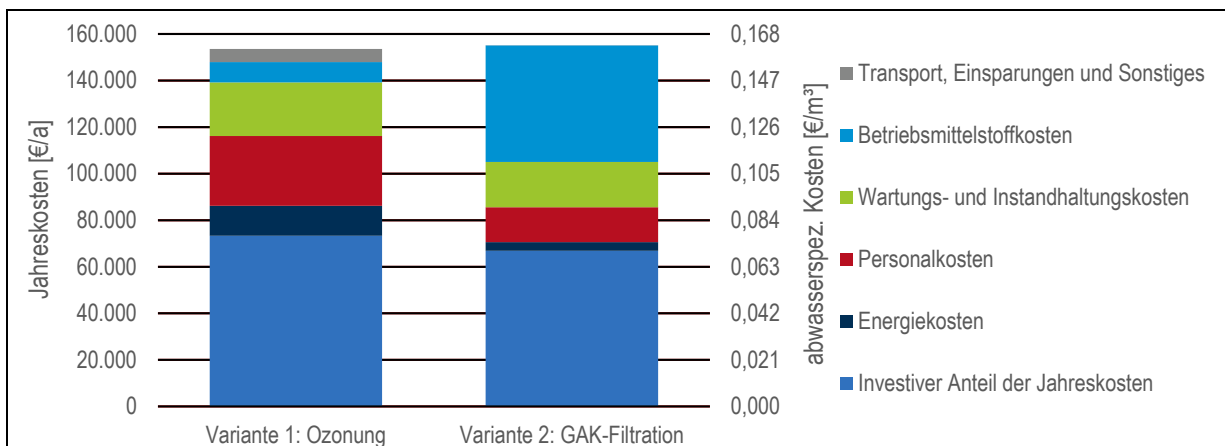


Abbildung 23: Zusammenstellung der Jahreskosten und abwasserspezifischen Kosten

Insgesamt können beide Verfahren bzgl. der Wirtschaftlichkeit als gleichwertig angesehen werden, da der Unterschied bei den ermittelten Jahreskosten marginal ist. Unter Berücksichtigung der getroffenen Kostenannahmen schneidet die Ozonung lediglich rd. 1 % besser ab als die GAK-Filtration.

7.1.4 Einfluss der Landesförderung auf die Jahreskosten

Bei Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen fördert die NRW.BANK mit ihrem Förderprogramm *Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II* (ResA II) bis zu 70 % der Investitionskosten.

ten. Dies kann für die Kläranlagenbetreiber von Interesse sein, da ein Betreiber mit einer solchen Förderung bei den erstmaligen Investitionskosten deutlich entlastet wird. Unter Berücksichtigung einer 70%-igen Förderung der in Tabelle 18 ermittelten Erstinvestitionskosten ergeben sich für die Ozonung (Variante 1) und die GAK (Variante 2) die nachfolgenden Jahreskosten, siehe Tabelle 23.

Tabelle 23: Zusammenstellung der Jahreskosten unter Berücksichtigung einer 70 %-igen Förderung der Erstinvestitionen

Variante	[i]	[1] Ozonung	[2] GAK-Filtration
Investiver Anteil der Jahreskosten, gesamt	[€/a]	21.994	20.068
Laufende Kosten, gesamt	[€/a]	80.236	88.286
Jahreskosten, gesamt	[€/a]	102.230	108.354
Anteil		100%	106%

Unter Berücksichtigung einer maximal möglichen Förderung von 70 % ergeben sich bei der GAK-Filtration etwa 6 % höhere Jahreskosten als bei der Ozonung. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass bei der Ozonung (ohne Förderung) der investive Anteil höher und die laufenden Kosten niedriger waren als bei der GAK-Filtration. Durch eine Förderung der erstmaligen Investitionskosten hat der investive Anteil somit einen entsprechend geringeren Anteil an den Jahreskosten, so dass sich die laufenden Kosten bei der GAK entsprechend stärker auswirken. Insgesamt können die Jahreskosten durch eine 70%-ige Förderung der Erstinvestitionen um rd. 1/3 reduziert werden. Der Fördereinfluss auf die spezifischen Jahreskosten ist in der nachfolgenden Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: Zusammenstellung der spezifischen Jahreskosten unter Berücksichtigung einer 70 %-igen Förderung der Erstinvestitionen

Variante	[i]	[1] Ozonung	[2] GAK-Filtration
abwasserspezifische Jahreskosten	[€/m³]	0,11	0,11
schmutzwasserspezifische Jahreskosten	[€/m³]	0,21	0,23
einwohnerspezifische Jahreskosten	[€/(E·a)]	12,48	13,23
Anteil		100%	106%

In der nachstehenden Abbildung 24 sind die ermittelten Jahreskosten unter Berücksichtigung der Fördermittel nochmals in einem gestapelten Säulendiagramm dargestellt.

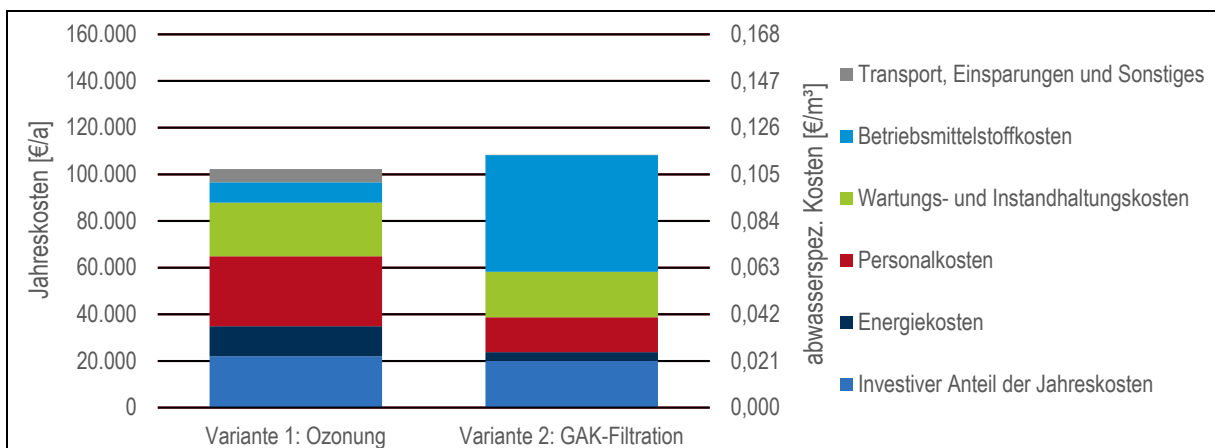


Abbildung 24: Zusammenstellung der Jahreskosten und abwasserspezifischen Kosten unter Berücksichtigung einer Förderung von 70 % der erstmaligen Investitionskosten

7.1.5 Sensitivitätsanalyse

Mit der durchgeführten Sensitivitätsanalyse wurde ein möglicher Einfluss auf die laufenden Kosten bzw. auf die Jahreskosten untersucht, der sich bei einer Variation der nachfolgenden Parameter ergibt. Bei den ausgewählten Parametern handelt es sich im Wesentlichen um die Hauptbetriebsmittel, die bei beiden Verfahren verwendet werden und deren zugehörigen Bezugspreise, siehe nachfolgende Tabelle 25.

Tabelle 25: Parametervariation im Rahmen der Sensitivitätsanalyse

Parameter	Variation	Min	Ist	Max	Einheit
Variation des Bezugspreises für Energie und Betriebsmittel					
Elektrische Energie	0 % bis 20 %	0,19	0,19	0,23	€/kWh
Sauerstoff (LOX)	0 % bis 20 %	0,21	0,21	0,25	€/kg _{O2}
GAK (15 % frisch)	-10 % bis 10 %	1.440	1.600	1.760	€/Mg _{GAK}
GAK (85 % reaktiviert)		1.053	1.170	1.287	
Variation der Menge der benötigten Betriebsmittel					
LOX-Jahresbedarf*	-50 % bis 60 %	20,6	41,2	66,0	Mg _{O2} /a
GAK-Jahresbedarf**	-50 % bis 25 %	20,3	40,5	50,6	Mg _{GAK} /a
*bei Ozondosis von	-50 % bis 60 %	2,17	4,34	6,94	mg _{O3} /L
**bei Filterstandzeiten von	-20 % bis 100 %	0,80	1,00	2,00	Jahre

Anhand der Sensitivitätsanalyse kann die Sensitivität der o.g. Eingangsparameter mit den daraus resultierenden Kostenschwankungen beurteilt werden. Die entsprechenden Schwankungen können auftreten, falls sich im tatsächlichen Verfahrensbetrieb andere Werte für die o.g. Parameter ergeben, als im Rahmen der Bemessung / Dimensionierung bzw. im Rahmen der Kostenermittlung angenommen wurde. So kann bei der Errichtung einer Ozonanlage bspw. eine höhere / geringere Ozondosis erforderlich sein, als bei der Bemessung mit 4,34 mg_{O3}/L angesetzt wurde, was einen entsprechenden Einfluss auf den LOX-Jahresbedarf hat. Gegebenenfalls kann aber auch der erforderliche Sauerstoff zu einem anderen Preis bezogen werden, als zum angenommenen Preis von 21 Cent/kg_{O2}. Beim GAK-Verfahren kann dagegen in

Abhängigkeit der tatsächlichen Filterstandzeit ein höherer / niedriger Jahresbedarf an GAK bestehen, wobei die GAK ggfs. auch zu anderen Preisen bezogen werden kann, als in der KVR angesetzt wurde, siehe Tabelle 19 bzw. auch obige Tabelle 25 (beim Regenerationsprozess wurde von 15 % GAK-Verlust ausgegangen, die durch neue GAK ersetzt werden muss, so dass unterschiedliche Preise von 1.600 €/Mg für frische GAK bzw. 1.170 €/Mg angesetzt wurden).

Bei der Sensitivitätsanalyse wurden somit im Wesentlichen die Parameter berücksichtigt, die einen Einfluss auf die laufenden Kosten im Falle abweichender Betriebsführungen haben, wodurch letztlich auch die ermittelten Jahreskosten beeinflusst werden. Die Variation erfolgte dabei für die benötigte Menge der Hauptbetriebsmittel (Sauerstoff bzw. GAK) sowie für deren Bezugspreis. Des Weiteren wurde ein ggfs. höherer Bezugspreis für Energie berücksichtigt.

Die Auswirkungen der Parametervariation auf die Jahreskosten sind dabei in der nachfolgenden Tabelle 26 zusammengestellt. Hierbei basieren die ermittelten Jahreskosten auf den zuvor festgelegten Nutzungsdauern, Annuitäten und einem Realzinssatz von 3 % p. a. Die farbliche Zuordnung der prozentualen Abweichungen soll die Sensitivität der Parameter hervorheben. Dabei deutet „grün“ eine geringe Sensitivität an, „gelb“ und „orange“ entsprechen einer mittleren bis hohen Sensitivität, während „rot“ für einen deutlich sensitiven Parameter steht.

Tabelle 26: Prozentuale Auswirkung der Parametervariation auf die Jahreskosten

Parameter	Variation der Parameter um	Änderung Jahreskosten Variante 1: Ozonung		Änderung Jahreskosten Variante 2: GAK-Filtration	
		Min	Max	Min	Max
Preis elektrische Energie	0 % bis 20 %	0 %	+1,7 %	0 %	+0,5 %
Preis Sauerstoff (LOX)	0 % bis 20 %	0 %	+1,1 %		
Preis GAK	-10 % bis 10 %			-3,2 %	+3,2 %
LOX-Jahresbedarf	-50 % bis 60 %	-2,8 %	+3,4 %		
GAK-Jahresbedarf	-50 % bis 25 %			-16,0 %	+8,0 %

Die Variation der Bezugskosten für **elektrische Energie** zeigt bei der Ozonung eine mittlere Sensitivität auf, während dieser Parameter auf die GAK-Filtration lediglich einen marginalen Einfluss hat. Dies liegt am entsprechend höheren Energiebedarf der Ozonung im Vergleich zum GAK-Verfahren.

Bei einer Variation der Menge bzw. Bezugspreise der **Betriebsmittelstoffe (LOX und GAK)** ist zu erkennen, dass bei der GAK-Filtration diese Parameter sensitiver bzgl. der Jahreskosten sind als bei der Ozonung. Dies liegt daran, dass beim GAK-Verfahren das Betriebsmittel GAK einen entsprechend hohen Anteil an den laufenden Kosten und somit auch an den Jahreskosten aufwies, siehe Abbildung 23 in Kapitel 7.1.3. Dass sich dabei die Betriebsmittelmenge prozentual deutlich stärker auf die Jahreskosten auswirkt als der Bezugspreis, liegt im Wesentlichen daran, dass dieser Parameter mit einer Spannweite von -50 % bis +25 % wesentlich stärker variiert wurde als der Bezugspreis mit einer Variation von lediglich ±10 %.

Die Menge der Betriebsmittelstoffe wurde bei beiden Verfahren stärker als der Bezugspreis variiert, da hier größere Schwankungsbreiten auftreten können als bei den ermittelten Bezugspreisen, siehe Anmerkungen zur durchgeführten Mikroschadstoffanalyse in Kapitel 5 sowie zur Bemessung / Dimensionierung der beiden Anlagen in Kapitel 6. So hängt der eingesetzte

Betriebsmittelbedarf u.a. von den Inhaltsstoffen des Abwassers und vom Reinigungsziel ab. Somit könnte eine höhere Ozondosis (als angenommen) erforderlich sein, da der DOC-Gehalt, der NO₂-N-Gehalt sowie die Mikroschadstoffe nur im Ablauf der Kläranlage gemessen wurden, nicht jedoch im Ablauf der Nachklärung, mit dem die Ozonanlage beschickt wird. Bei der GAK-Filtration sind dagegen durchaus höhere Filterstandzeiten als ein Jahr möglich, da eine Sandfiltration vorgeschaltet ist, deren Ablauf bereits eine sehr hohe Abwasserqualität mit einem sehr geringen AFS-Gehalt aufweist.

Die nachfolgende Abbildung 25 zeigt daher nochmals den Schwankungsbereich der resultierenden Jahreskosten bei der entsprechenden Variation der in Tabelle 25 aufgeführten Parameter. Die minimalen und maximalen Jahreskosten ergeben sich, wenn bei den einzelnen Parametern jeweils die Min- und Max-Werte angesetzt sind.

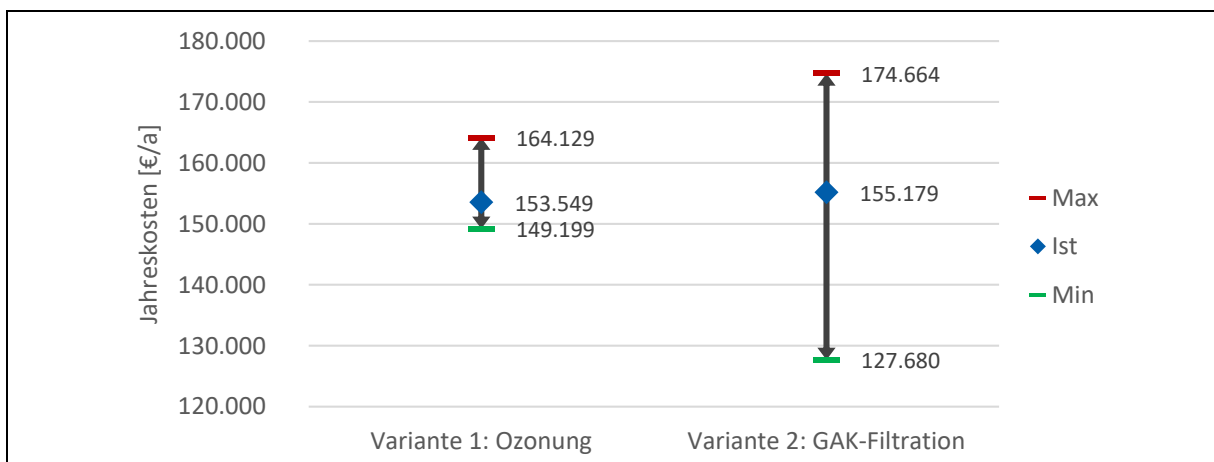


Abbildung 25: Unsicherheitsbereich der ermittelten Jahreskosten in Abhängigkeit der variierten Parameter

Anhand der obigen Abbildung 25 ist ebenfalls zu erkennen, dass bei Variante 2 (GAK-Filtration) die Spannweite der Jahreskosten am größten ist, da die Betriebsmittelkosten einen entsprechend hohen Anteil an den Jahreskosten aufweisen. Unter Berücksichtigung der oben dargestellten Schwankungsbreiten wird daher empfohlen, im Vorfeld einer Anlagenplanung nochmals detailliertere Untersuchungen durchzuführen, um die benötigten Betriebsmittel besser abschätzen zu können. Dies betrifft u.a. Analysen des Nachklärwassers im Falle einer Ozonung bzw. die Ermittlung der erreichbaren Bettvolumen im Falle einer GAK-Filtration.

Abschließend sollen noch die Auswirkungen eines veränderlichen Realzinssatzes betrachtet werden. Der Zinssatz wurde dabei nach DWA (2012) von 2 % bis 5 % variiert. Gemäß der nachfolgenden Abbildung 26 ist festzustellen, dass mit höherem Zinssatz die Jahreskosten beider Varianten mit einer ähnlichen Steigerung anwachsen. Eine Umkehrung der wirtschaftlichen Verhältnisse findet hierbei jedoch nicht statt.

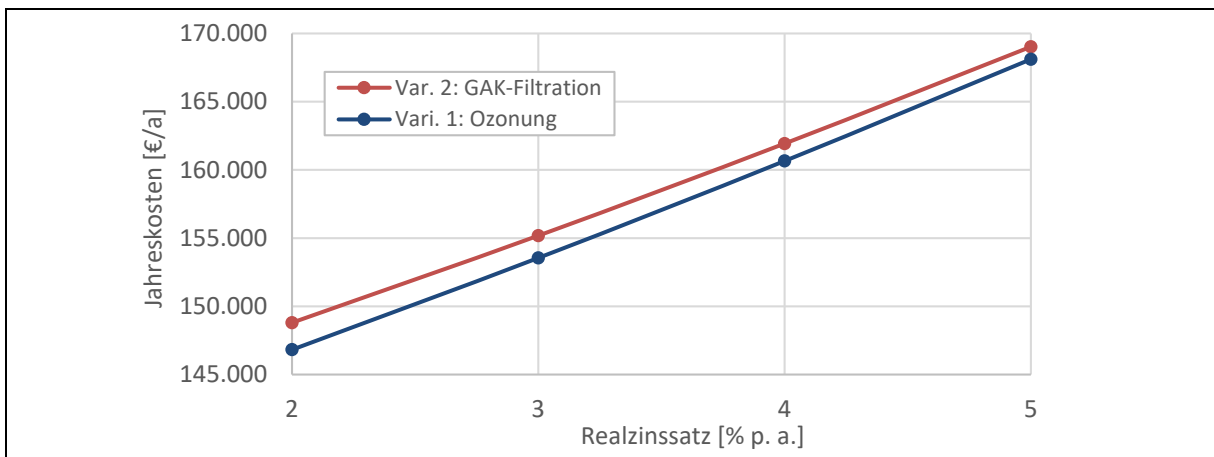


Abbildung 26: Einfluss des Realzinssatzes auf die Jahreskosten und Kostenbarwerte

7.2 Nutzwertanalyse

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde eine qualitative Nutzwertanalyse zur Entscheidungsunterstützung ausgearbeitet, um zusätzlich zur monetären Bewertung auch nicht-monetäre Aspekte zu berücksichtigen. Unter Einbeziehung dieser Aspekte ergibt sich abschließend eine Verfahrensempfehlung. Eine quantitative Bewertung ist aufgrund noch weitestgehend unklaren Kosten-Nutzen-Verhältnis nicht möglich (DWA, 2015).

Bewertungssystem

Die Nutzwertanalyse wurde in Anlehnung an die Bewertungsmatrix nach Rödel (2013) und unter Berücksichtigung der wesentlichen Bewertungsfaktoren nach KOM-M NRW (2015) durchgeführt. Die aufgestellte Bewertungsmatrix berücksichtigt dabei insgesamt fünf Hauptkriterien: Ökonomie, Aufwand (Technik und Betrieb), Ökologie, Ressourcenverbrauch und arbeitstechnische Aspekte. Jedes dieser Hauptkriterien beinhaltet dabei vier Einzelkriterien, welche mit einer Punktzahl qualitativ zu bewerten sind, wobei das Bewertungssystem auf der nachfolgenden Punkteverteilung basiert, siehe Tabelle 27.

Tabelle 27 Punkteverteilung für das Bewertungssystem der Nutzwertanalyse

Punkte	1	2	3	4	5
Bewertung	"schlecht"	"ausreichend"	"befriedigend"	"gut"	"sehr gut"

Die qualitative Punktevergabe beruht dabei auf einer subjektiven Bewertung des jeweiligen Kriteriums unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen sowie auf allgemeinen Erkenntnissen / Einschätzungen aus der Literatur, wie z. B. Bolle, et al. (2011), Rödel (2013), DWA (2015), Gawel, et al. (2015) und KOM-M NRW (2016).

Nach der Punkteverteilung für jedes Einzelkriterium wurden für jedes Hauptkriterium die vergebenen Punkte aufsummiert und in Abhängigkeit des Hauptkriteriums unterschiedlich stark gewichtet. Die erzielbare Gesamtpunktzahl ergibt sich dabei aus der Summe der (gewichteten) Punktzahl der Hauptkriterien. Dabei sind die beiden Hauptkriterien „Ökonomie“ und „Ökologie“ mit je 30 % gleichwertig sowie am höchsten gewichtet, so dass auch der

Einfluss dieser beiden Kriterien am größten ist. Die beiden Hauptkriterien „Aufwand“ und „Ressourcenverbrauch“ sind zu je 15 % gewichtet und das Hauptkriterium „arbeitstechnische Aspekte“ zu 10 %, so dass sich die Summe der Gewichtungen zu 100 % ergibt. Die Verfahrensvariante, die die höchste gewichtete Gesamtpunktzahl erzielt, gilt dabei als empfehlenswert.

Ergebnisse der Bewertungsmatrix

In der nachfolgenden Tabelle 28 ist das Ergebnis der oben beschriebenen Nutzwertanalyse mit der entsprechenden Bewertungsmatrix dargestellt. Dabei konnte die Variante 2 (GAK-Filtration) eine entsprechend höhere Bewertung erzielen als die Variante 1 (Ozonung). In der darauffolgenden Abbildung 27 ist die Punkteverteilung der beiden Verfahren in einem gestapelten Balkendiagramm visualisiert, so dass gut zuerkennen ist, dass die GAK-Filtration in nahezu allen Hauptkriterien (abgesehen vom Hauptkriterium „Ökonomie“) die meisten Nutzwertpunkte erzielt.

Tabelle 28: Bewertungsmatrix der Nutzwertanalyse in Anlehnung an Rödel (2013)

Nr.	Nutzwertanalyse - Bewertungsmatrix	Variante 1 Ozonung		Variante 2 GAK-Filtration	
		Pkt.	Σ Pkt.	Pkt.	Σ Pkt.
1.	Bewertungskriterium: Ökonomie [Wichtung: 30 %]				
1.1.	Investitionskosten	3		4	
1.2.	Laufende Kosten	4	16	2	13
1.3.	Jahreskosten	4		4	
1.4.	Sensitivitätsanalyse	5		3	
2.	Bewertungskriterium: Aufwand – Technik und Betrieb [Wichtung: 15 %]				
2.1.	Neubau oder Nutzung von vorh. Kapazitäten	4		4	
2.2.	Betriebs- und Wartungsaufwand	2	13	4	18
2.3.	Aufwand für Steuerung – Regelung – Messung – Überwachung	2		5	
2.4.	Redundanzen, Betriebssicherheit	5		5	
3.	Bewertungskriterien: Ökologie [Wichtung: 30 %]				
3.1.	Eliminationsleistung gegenüber ausgewählten Leitsubstanzen	5		4	
3.2.	Verbesserung der Reinigungsleistung (z. B. CSB, AFS, P _{ges} , Desinfektion)	2	14	4	17
3.3.	Auswirkung auf die Luftemissionen (CO ₂ -Bilanz / LKW-Aufkommen)	4		4	
3.4.	Auswirkung auf die Gewässer – Transformationsprodukte (Risiko, Bromat)	3		5	
4.	Bewertungskriterien: Ressourcenverbrauch [Wichtung: 15 %]				
4.1.	Energiebedarf	2		4	
4.2.	Flächenbedarf	2	12	4	15
4.3.	Roh- und Trinkwasserbedarf für die technischen Anlagen	3		4	
4.4.	Ressourcenverbrauch für Betriebsmittelherstellung (PAK, GAK und O ₂)	5		3	
5.	Bewertungskriterien: arbeitstechnische Aspekte [Wichtung: 10 %]				
5.1.	Bedienungskomfort	2		5	
5.2.	Eigenverantwortung – Sicherheitsanforderungen	2	11	5	18
5.3.	Systemumstellung – Systemeingriff	3		5	
5.4.	Stand der Erkenntnisse (Referenzlage/Erfahrungen im Abwasserbereich)	4		3	
6.	Bewertung der Varianten				
6.1.	Gesamtpunkte (nicht gewichtet)	66 / 100		81 / 100	
6.2.	Gewichtete Gesamtpunkt	14 / 20		16 / 20	
6.3.	Rangbewertung	Rang 2		Rang 1	

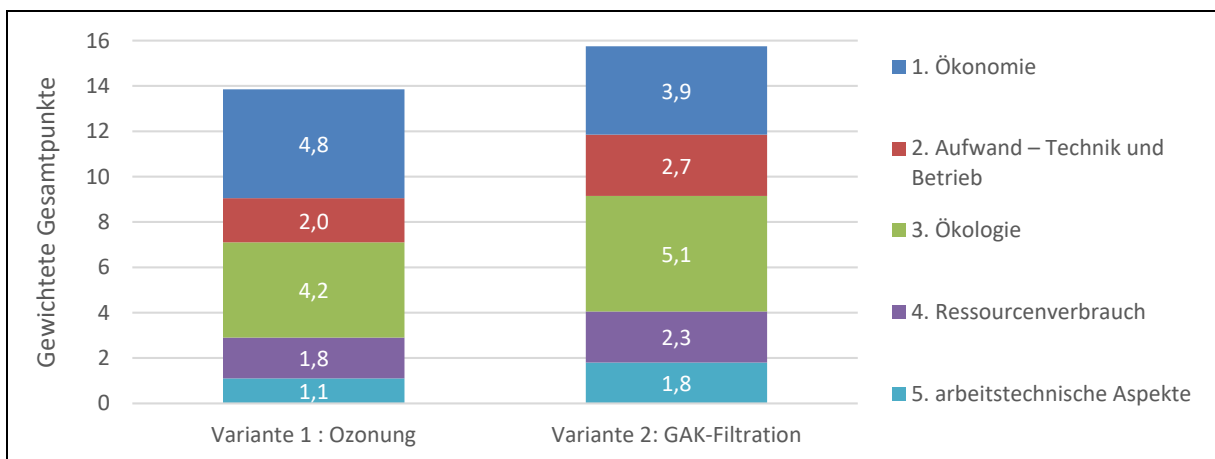


Abbildung 27: Gegenüberstellung der gewichteten Punkte der einzelnen Hauptkriterien

Zur Nachvollziehbarkeit der vergebenen Punkte für die nicht-monetären Bewertungskriterien (Nr. 2 bis 5) sind in der nachfolgenden Tabelle 29 entsprechende Erläuterungen enthalten.

Tabelle 29: Erläuterungen zu den in Tabelle 28 vergebenen Punkte

Nr.	Erläuterung der Punktevergabe
2.	Bewertungskriterium: Aufwand – Technik und Betrieb
2.1.	Die Ozonung profitiert von der <i>vorh. Sandfiltration</i> als Nachbehandlung (Transformationsprodukte). Die GAK-Filtration profitiert von der <i>vorh. Sandfiltration</i> als Vorbehandlung, was zur Erhöhung der Filterstandzeit und zur effizienten Mikroschadstoffeliminierung führt.
2.2.	Der <i>Betriebs- und Wartungsaufwand</i> ist bei der Ozonung aufwändiger als bei der GAK-Filtration, da zum Teil Fachfirmen einbezogen werden müssen. Die GAK-Filtration kann überwiegend vom <i>vorh. Personal</i> gewartet werden und der <i>allg. Betriebsaufwand</i> ist gering.
2.3.	Der <i>Aufwand für Steuerung, Regelung, Messung und Überwachung</i> ist für die GAK-Filtration wesentlich geringer als für die Ozonung, da er dem Aufwand der <i>vorh. Sandfiltration</i> gleicht.
2.4.	Beide Varianten verfügen über genügend <i>Redundanzen</i> und bieten hohe <i>Betriebssicherheit</i> .
3.	Bewertungskriterium: Aufwand – Technik und Betrieb
3.1.	Die <i>Eliminationsleistung</i> bzgl. der Leitsubstanzen (Candesartan, Diclofenac, Gabapentin und Valsartan) ist für beide Varianten vergleichbar gut. Die individuelle Ozon-Dosierung ist jedoch ein Vorteil beim Anpassen der Eliminationsrate.
3.2.	GAK verringert u. a. den Parameter <i>CSB</i> signifikant um bis zu 45 % nach Gawel, et al. (2015). Ozonung kann Krankheitserreger eliminieren (<i>Desinfektionsfähigkeit</i>).
3.3.	Die <i>CO₂-Bilanz</i> gilt bei der Ozonung i. A. als gut. Die GAK-Filtration kann eine bessere Bilanz vorweisen, wenn GAK aus Kokosnussschalen verwendet wird, ansonsten gilt die Bilanz i. A. als schlechter. Die Ozonung führt zu einem erhöhten <i>LKW-Aufkommen</i> mit bis zu 12 LKW/a. GAK-Filtration führt voraussichtlich zu einem LKW-Aufkommen von lediglich 0,5 - 2 LKW/a.
3.4.	Bei der Ozonung besteht das Risiko der Bildung von toxischen <i>Transformationsprodukten</i> .
4.	Bewertungskriterien: Ressourcenverbrauch
4.1.	Die Ozonung hat einen ca. 3-fach höheren <i>Energieverbrauch</i> als die GAK-Filtration.
4.2.	Der <i>Flächenbedarf</i> ist bei der Ozonung um ca. 30 % (35 m ²) höher als bei der GAK-Filtration.
4.3.	Die Ozonung benötigt kontinuierlich <i>Rohwasser</i> für die Wasserkühlung. Die GAK-Filtration benötigt Rohwasser nur diskontinuierlich als Spülwasser.
4.4.	Die Ozonung benötigt als <i>Betriebsmittel</i> lediglich Flüssigsauerstoff. Die GAK kann thermisch reaktiviert werden, jedoch müssen aufgrund Reaktivierungsverluste bis zu 10 – 20 % Frischkohle beim Filteraustausch nachgefüllt werden.
5.	Bewertungskriterien: arbeitstechnischen Aspekten
5.1.	Der <i>Bedienungskomfort</i> entspricht bei der GAK-Filtration der <i>vorh. Sandfiltration</i> und ist damit komfortabler zu bedienen, da bereits bekannt. Die Bedienung der Ozonung erfordert eine zusätzliche Schulung.
5.2.	Die <i>Eigenverantwortung und Sicherheitsanforderungen</i> sind bei der Ozonung wesentlich höher (Gefahrenstoffe) als bei der GAK-Filtration.
5.3.	Die GAK-Filtration weist im Vergleich zur Ozonung einen geringeren <i>Systemeingriff</i> vor, da sie im Systemausgang angeordnet wird.
5.4.	Beide Varianten sind bereits aus der Trinkwasseraufbereitung bekannt und etabliert. Der <i>Erkenntnisstand</i> in der Abwasserbehandlung ist bei der Ozonung aktuell höher als bei der GAK-Filtration, jedoch wachsen die Erfahrungen auch hier stetig und besonders für kleine Kläranlagen scheint diese Variante in den Focus zu treten.

7.3 Gesamtgegenüberstellung

In der nachfolgenden Tabelle 30 sind die wesentlichen Grunddaten und Ergebnisse der beiden untersuchten Verfahrensvarianten einschließlich Vor- und Nachteile nochmals zusammengefasst.

Tabelle 30: Zusammenfassende und Vergleichende Darstellung der untersuchten Varianten

	Variante 1: Ozonung	Variante 2: GAK-Filtration
Schema		
Auslegung / Planung	<p><u>Diffusor-Eintragungssystem</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ $Z_{spez} = 0,7 \text{ mgO}_3/\text{mgDOC}$ ▪ $C_{O_3} = 4,34 \text{ mgO}_3/\text{h}$ ▪ $B_{O_3} = 0,07 - 1,87 \text{ kgO}_3/\text{h}$ <p><u>Schlaufenreaktor</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ $t_{Kontakt} = 30 \text{ min}$ ▪ $V_{O_3} = 216 \text{ m}^3$ ▪ $h_{O_3} = 6 \text{ m}$ ▪ $A_{O_3} = 36 \text{ m}^2$ <p><u>Ressourcen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarf LOX = 41,2 Mg/a ▪ Materiallieferung = 12 LKW/a ▪ Flächenbedarf = 128 m² 	<p><u>Kontinuierlich aufwärtsdurchströmte Raumfilter (DynaSand®-Carbon)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Filteranzahl = 6 ▪ $A_{F,gesamt} = 30 \text{ m}^2$ ▪ $h_F = 2,5 \text{ m}$ ▪ $V_{F,max} = 14,4 \text{ m}^3/\text{h}$ ▪ $EBCT_{min} = 10,4 \text{ min}$ ▪ BVT = 12.667 BV ▪ Filterstandzeit = 1 a <p><u>Ressourcen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarf GAK = 40,5 Mg/a ▪ Materiallieferung = 0,5 bis 2 LKW/a ▪ Flächenbedarf = 115 m²
Kosten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Investitionskosten = 1.090.084,- € ▪ Laufende Kosten = 80.236,- €/a ▪ Jahreskosten = 153.549,- €/a 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Investitionskosten = 1.028.813,- € ▪ Laufende Kosten = 88.286,- €/a ▪ Jahreskosten = 155.179,- €/a
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desinfektionswirkung ▪ Viele großtechnische Erfahrungen im Bereich der Abwasserreinigung ▪ Gute CO₂-Bilanz ▪ Keine Verminderung der Reinigungsleistung in Abhängigkeit der Zeit ▪ Landwirtsch. Verwertung weiter möglich ▪ Nachbehandlung durch vorh. Sandfiltration 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abwasserabgaben-Minderung möglich ▪ CSB Reduzierung + Suspensarückhalt ▪ Geringer Personalaufwand und bekannte Technik (DynaSand®-Filter) ▪ geringer elektrischer Energieverbrauch ▪ Landwirtsch. Verwertung weiter möglich ▪ Vorreinigung durch vorh. Sandfiltration (hohe Filterstandzeit)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geringe Erhöhung von BSB₅ im Ablauf ▪ Hohe Sicherheitsanforderungen – Schulung des Personals erforderlich ▪ Hoher elektrischer Energieverbrauch ▪ Höherer Personalaufwand ▪ Höherer Regelungsaufwand (Dosierung, Kontrolle) ▪ Transformationsprodukte – biologisch aktive Nachbehandlung notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausspülung von einigen Mikroschadstoffen bei zu hohen Filterbettgeschwindigkeiten und durch Desorption möglich ▪ Regelmäßiger GAK-Austausch ▪ Schlechte CO₂-Bilanz, wenn keine Aktivkohle aus Kokosnussschalen genutzt wird ▪ Verminderung der Reinigungsleistung in Abhängigkeit der GAK-Beladung
Rang	<p>14 von 20 Nutzwertpunkten → Rang 2</p>	<p>16 von 20 Nutzwertpunkten → Rang 1</p>
	<p>$Q_M = 432 \text{ m}^3/\text{h}$ $JAM_{Median(2015-2019)} = 950.000 \text{ m}^3/\text{a}$</p>	<p>Behandlung = 100 % JAM</p>

Unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen sowie der durchgeführten KVR und Nutzwertanalyse ist für die KA Aegidienberg die Variante 2 (GAK-Filtration) die empfehlenswerte Variante, falls eine weitergehende Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffelimination vorgesehen werden sollte. Wie erwähnt, sollten jedoch im Falle eines beabsichtigten Anlagenbaus weitergehende Untersuchungen zur Absicherung der getroffenen Annahmen durchgeführt werden, siehe Anmerkungen in den vorherigen Kapiteln.

8 Zusammenfassung

Anhand der vorliegenden Machbarkeitsstudie wurde der Einfluss der Kläranlage Aegidienberg auf die Mikroschadstoffkonzentration im anliegenden Vorfluter Kochenbach beurteilt sowie die Eignung von technischen Verfahren für den Kläranlagenstandort geprüft, um die Gewässerbelastung durch Mikroschadstoffe ggfs. reduzieren zu können. Hierfür wurde das Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) mit der Entnahme und Analyse von Proben aus dem Zu- und Ablauf der Kläranlage sowie aus dem Kochenbach ober- und unterhalb der Kläranlageneinleitung beauftragt. Da gegenwärtig über hunderttausend synthetische organische Chemikalien in der Europäischen Union registriert sind, wurde der Untersuchungsumfang unter Berücksichtigung der Empfehlungen des *Kompetenzzentrums für Mikroschadstoffe NRW* im Vorfeld mit der Oberen Wasserbehörde (Bezirksregierung Köln) abgestimmt.

Anhand eines insgesamt dreitägigen „erweiterten Monitorings“ wurden entsprechende Analysen für eine erweiterte Stoffliste von insgesamt 24 Mikroschadstoffen aus den Bereichen Arzneimittelwirkstoffe, Östrogene, Pestizide, Korrosionsschutzmittel, Moschusduftstoffe, Per- und Polyfluorierte Stoffe sowie Süßstoffe durchgeführt. Zusätzlich wurden die Basisparameter DOC und Bromid untersucht sowie Ozonzehrungsversuche mit Untersuchungen zur Bromatbildung durchgeführt. Anschließend wurde zur Datenverdichtung ein zusätzliches fünftägiges Monitoring des Kläranlagenzulaufs und Kläranlagenablaufs mit einem reduzierten Stoffspektrum von 7 Mikroschadstoffen durchgeführt. Zur Beurteilung der im Gewässer nachgewiesenen Mikroschadstoffe wurde die gemessene Konzentration der einzelnen Schadstoffe mit einem Bewertungskriterium (BK) verglichen, das als Umweltqualitätsnorm (UQN), als Orientierungswert (OW) oder lediglich als präventiver Vorsorgewert (PV) definiert sein kann. Eine UQN ist dabei ein gesetzlich verbindlicher Grenzwert für die Konzentration eines Schadstoffs, der gemäß OGewV nicht überschritten werden darf. OW und PV sind dagegen Konzentrationsgrenzwerte ohne gesetzlich verbindliche Regelung, siehe Kapitel 2.

Etwa die Hälfte der 24 untersuchten Mikroschadstoffe konnten im Gewässer unterhalb der Kläranlageneinleitung nicht nachgewiesen werden, da die Stoffkonzentrationen so gering waren, dass sie unterhalb der Bestimmungsgrenzen lagen. Die Schadstoffkonzentrationen der übrigen Substanzen lagen (abgesehen von 4 Substanzen) in so niedrigen Bereichen vor, dass diese Stoffe mit „sehr gut“ bzw. mit „gut“ bewertet werden können. Von den insgesamt 24 untersuchten Mikroschadstoffen wurde somit bei lediglich 4 Substanzen aus dem Arzneimittelbereich im Gewässer unterhalb der Kläranlage das zugehörige Bewertungskriterium überschritten, wobei für Diclofenac lediglich ein OW und für die 3 anderen Substanzen (Candesartan, Gabapentin und Valsartan) bisher nur PV vorliegen. Bei diesen 4 Stoffen wird durch die vorhandene Kläranlagentechnik allerdings bereits eine Eliminationsrate von im Mittel rd. 76 % erreicht, die nahe am empfohlenen Eliminationsziel von 80 % liegt, siehe Kapitel 5. Auch wenn im Gewässer keine Überschreitungen von gesetzlich verbindlichen UQN festgestellt werden konnten, wurden unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen die beiden nachfolgenden Verfahren zur weitergehenden Mikroschadstoffelimination in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und weiteren nicht-monetären Aspekten untersucht, siehe Kapitel 6 und 7.

- Variante 1: zusätzliche Ozonung mit nachgeschalteter vorhandener Sandfiltration
- Variante 2: zusätzliche GAK-Filtration mit vorgeschalteter vorhandener Sandfiltration

Für beide Verfahren wurden die wesentlichen Anlagenkomponenten vorbemessen und darauf basierend die einmaligen Investitionskosten sowie die laufenden Kosten ermittelt. Die aufgestellten Kostenschätzungen basieren dabei auf Richtpreisangeboten und Ausschreibungen

vergleichbarer Projekte sowie auf Hersteller-, Lieferanten- und Literaturangaben. Die Investitions- und laufenden Kosten wurden dabei lediglich für die neuen Anlagenkomponenten ermittelt, also ohne Berücksichtigung der bereits vorhandenen Sandfiltration mit den hieraus resultierenden laufenden Kosten. Bei den beiden Verfahren ist dabei von ähnlich hohen Investitionskosten zwischen netto rd. 1,0 – 1,1 Mio. € auszugehen, wobei für die Ozonung ein geringfügig höherer Investitionsbedarf als für die GAK-Filtration ermittelt wurde. Mit den getroffenen Annahmen liegen die laufenden Kosten der beiden Verfahren zwischen netto rd. 80 – 90 T€/a, wobei für die GAK-Filtration geringfügig höhere laufende Kosten als für die Ozonung ermittelt wurden. Die ermittelten Kosten wurden anschließend im Rahmen einer dynamischen Kostenvergleichsrechnung (KVR) in Jahreskosten umgerechnet, so dass die Wirtschaftlichkeit der beiden Verfahren innerhalb des 30-jährigen Betrachtungszeitraums beurteilt werden konnte. Hierbei wurde auch als zusätzliches Szenario eine 70 %-ige Landesförderung der einmaligen Investitionskosten berücksichtigt.

Aus der durchgeführten KVR ergibt sich, dass die beiden Verfahren aus wirtschaftlicher Sicht als gleichwertig angesehen werden können und voraussichtlich zusätzliche Jahreskosten in Höhe von netto rd. 150 T€ verursachen. Unter Berücksichtigung einer möglichen 70%-igen Landesförderung der einmaligen Investitionskosten ist eine Reduzierung der Jahreskosten um etwa 1/3 möglich.

Da insbesondere die voraussichtlich erforderlichen Betriebsmittel derzeit lediglich abgeschätzt werden können, wurde im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss abweichender Betriebsführungen (als in der KVR angenommen) auf die laufenden Kosten beurteilen zu können. Die Variation erfolgte dabei im Wesentlichen für die benötigte Menge der Hauptbetriebsmittel (Sauerstoff bzw. GAK) sowie für deren Bezugspreis und für den Bezugspreis von elektrischer Energie. Aus der Sensitivitätsanalyse wird dabei deutlich, dass bei einer Variation der Eingangsparameter die ermittelten Jahreskosten beim GAK-Verfahren einen größeren Schwankungsbereich als bei der Ozonung aufweisen, da der Betriebsmittelbedarf beim GAK-Verfahren einen höheren Anteil an den Jahreskosten hatte als beim Ozon-Verfahren. Es wird daher empfohlen, im Vorfeld einer möglichen Anlagenplanung nochmals genauere Untersuchungen durchzuführen, um die benötigten Betriebsmittel besser abschätzen zu können. Dies betrifft u.a. Analysen des Nachklärwassers im Falle einer Ozonung bzw. die Ermittlung der Bettvolumen im Falle einer GAK-Filtration.

Zusätzlich zur rein wirtschaftlichen Bewertung, bei der beide Verfahren als gleichwertig angesehen werden können, wurden beide Varianten anhand einer Nutzwertanalyse gegenübergestellt, in der qualitativ auch nicht-monetäre Kriterien bewertet wurden. Nach dieser Bewertungsmethode schneidet die GAK-Filtration etwas besser als das Ozon-Verfahren ab, da u.a. der technische / betriebliche Aufwand sowie arbeitsspezifische Aspekte als vorteilhafter bewertet wurden, da bereits eine vergleichbare Sandfiltrationsanlage betrieben wird.

Abschließend ist anzumerken, dass der Ausbau von kommunalen Kläranlagen um eine weitere Reinigungsstufe zur gezielten Mikroschadstoffelimination derzeit in Deutschland gesetzlich nicht geregelt ist, da noch keine verbindlich einzuhaltenden Grenzwerte für Mikroschadstoffkonzentrationen in Kläranlagenabläufen festgelegt wurden. Lediglich für Schadstoffe in Gewässern existieren derzeit gesetzlich verbindliche UQN, wobei im Rahmen der durchgeführten Mikroschadstoffanalyse keine UQN im Gewässer überschritten wurde. Im Kochenbach wurde lediglich bei 4 Substanzen der zugehörige OW bzw. PV überschritten, wobei durch die vorhandene Kläranlagentechnik bei diesen 4 Substanzen bereits eine Eliminationsrate von im Mittel rd. 76 % erreicht wird. Über die weitere Vorgehensweise bzgl. einer zusätzlichen Mikroschadstoffelimination ist daher mit den Verantwortlichen zu beraten.

9 Quellenverzeichnis

- Abegglen, C. und Siegrist, H. 2012.** *Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen.* Bern : Bundesamt für Umwelt, 2012. Umwelt-Wissen Nr. 1214: 210 S.
- Abegglen, C., et al. 2009.** *Ozonung von gereinigtem Abwasser - Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf.* Dübendorf : Eawag, 2009.
- Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 198. 2004.** *Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen.* Hennef : DWA, 2004. ISBN 978-3-924063-48-1.
- Arbeitsblatt DWA-A 131. 2016.** *Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen.* Hennef : DWA, 2016. ISBN 978-3-88721-331-2.
- Bahr, C., et al. 2007.** *Band 5 - PILOTOX - Pilotuntersuchungen zur kombinierten oxidativ biologischen Behandlung von Klärwerksabläufen für die Entfernung von organischen Spuren- und Wirkstoffen und zur Desinfektion.* Berlin : Kompetenzzentrum Wasser Berlin, 2007.
- Benstöm, F. und Pinnekamp, J. 2012.** *Übersicht über die verfahrenstechnischen Möglichkeiten der Anwendung von Aktivkohle auf kommunalen Kläranlagen.* Aachen : Aachener Schriften zur Stadtentwässerung, Band 16, 2012. ISBN: 978-3-938996-09-6.
- Bolle, F.-W. und Pinnekamp, J. 2011.** *Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I.* Aachen : MKULNV NRW, 2011. AZ: IV-7-042 600 003 J.
- . **2015.** *Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase II.* Aachen : MKULNV NRW, 2015. Aktenzeichen IV-7-042 600 003 J.
- DWA. 2015.** *DWA-Themen T3/2015 - Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen.* Hennef : Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 2015. ISBN: 978-3-88721-210-0.
- . **2014.** *DWA-Themen T4/2014 - Bedeutung von Transformationsprodukten für den Wasserkreislauf.* Hennef : Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 2014. ISBN: 978-3-944328-76-8.
- . **2012.** *Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien) 8. überarbeitete Auflage.* Hennef : Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 2012. ISBN: 978-3-941897-55-7.
- ELWAS-WEB. 2020.** Elektronisches wasserwirtschaftliches Verbundsystem für die Wasserwirtschaftsverwaltung in NRW. *Version: 3.4.0.* [Online] Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW), 15. Juli 2020. <https://www.elwasweb.nrw.de>.
- Gawel, E., et al. 2015.** *Mikroverunreinigungen und Abwasserabgabe.* Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, 2015. ISSN: 1862-4804.
- Hillenbrand, T. und Tettenborn, F. 2016.** *Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer – Phase 2.* Dessau-Roßlau : Umweltbundesamtes, 2016. ISSN 1862-4804.
- Hillenbrand, T., et al. 2015.** *Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer.* Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, 2015. ISSN: 1862-4804.
- IT.NRW. 2019.** Landesbetrieb IT.NRW - Statistik und IT-Dienstleistungen. *Bevölkerung in Nordrhein-Westfalen.* [Online] Information und Technik Nordrhein-Westfalen, 31. Dezember

2019. [Zitat vom: 24. August 2020.] <https://www.it.nrw/statistik/eckdaten/bevoelkerung-nach-gemeinden-93051>.

IUTA. 2020. *Probenahme und Analytik zur Machbarkeitsstudie 4. Reinigungsstufe auf der Kläranlage Aegidienberg.* Duisburg : Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., 2020. Analysenbericht Nr. F 20/530.

Kienle, H. und Bäder, E. 1980. *Aktivkohle und ihre industrielle Anwendung.* Stuttgart : Ferdinand Enke Verlag, 1980. ISBN: 3-432-90881.

KOM-M NRW. 2016. *Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination (2. Auflage).* Köln : ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016.

— **2018a.** ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW GbR. *Mikroschadstoffelimination in kommunalen Kläranlagen in NRW (Stand 05/2018).* [Online] 2018a. [Zitat vom: 9. September 2020.] https://nrw-mikro.amit-services.de/fileadmin/user_upload/Tatenbank/Projektsteckbriefe_PDF/180528_Karte_inklListe_Webseite.pdf.

— **2018b.** *Einsatz von Aktivkohle zur Wasser-/ Abwasserbehandlung - Übersicht der Aktivkohlehersteller und -lieferanten sowie Anlagenbauer von Dosiertechniken.* Köln : ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2018b.

— **2018c.** *Einsatz von Membranverfahren zur Wasser-/ Abwasserbehandlung - Übersicht der Hersteller von Membranmodulen und -anlagen.* Köln : ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2018c.

— **2018d.** *Einsatz von Ozon zur Wasser -/ Abwasserbehandlung - Übersicht über die Hersteller von Anlagen.* Köln : ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2018d.

— **2018e.** *Fachbrief Bromat: Bromat als Nebenprodukt der Ozonung bei der Abwasserreinigung – Was bei der Auslegung von Aufbereitungsprozessen und deren betrieb zu beachten ist.* Köln : ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2018e. https://nrw-mikro.amit-services.de/fileadmin/user_upload/Downloads/181001_Fachbrief_Bromat_KOM-M_FINAL.pdf.

— **2017.** *Machbarkeitsstudien - Eine Hilfestellung für Betreiber und Ingenieurbüros.* Friedrichshafen : ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2017.

— **2015.** *Mikroschadstoffentfernung machbar? - Wesentliche Inhalte einer Machbarkeitsstudie für Anlagen zur Mikroschadstoffelimination mit aktualisierter Stoffliste vom 01.09.2016.* Köln : ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2015.

KOM-S BW. 2020. Kompetenzzentrum Spurenstoffe (KomS) Baden-Württemberg. *Kläranlagenkarte zur Spurenstoffelimination.* [Online] 2020. [Zitat vom: 9. September 2020.] <https://koms-bw.de/klaeranlagen/uebersichtskarte/>.

Kreuzinger, N., et al. 2015. *KOMOZAK-Projekt: Weitergehende Reinigung kommunaler Abwässer mit Ozon sowie Aktivkohle für die Entfernung organischer Spurenstoffe.* Wien : Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2015.

LANUV. 2018. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. *Entwicklung und Stand der Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen (18. Auflage).* [Online] 2018. [Zitat vom: 30. August 2020.] <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/abwasser/lagebericht>.

MKULNV. 2020. *Leitfaden Monitoring Oberflächengewässer - Integriertes Monitoring ab dem 4. Monitoringzyklus für den dritten Bewirtschaftungsplan, einschließlich landesspezifischer,*

nationaler und internationaler Messprogramme. NRW : Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2020. <https://www.flussgebiete.nrw.de/monitoringleitfaden-oberflaechengewaesser-7423>.

NordicWater. 2020. Produktblätter und Broschüren. *DynaSand: Kontinuierliche Filter - eine bewährte Technologie auf dem neuesten Stand der Technik.* [Online] 2020. [Zitat vom: 22. September 2020.] <https://www.nordicwater.com/wp-content/uploads/2016/07/S1501-DynaSand-brochure-DE.pdf>.

Pöpel, H. J., Schmidt-Bregas, M. und Wagner, M. 1988. *Aktivkohleanwendung in der Abwasserreinigung - Teil 1.* s.l. : Korrespondenz Abwasser, 1988. 35. Jg., Nr. 3, S. 247-255.

Rödel, S. 2013. *Abschlussbericht - Bewertung vorhandener Technologien für die Elimination anthropogener Spurenstoffe auf kommunalen Kläranlagen.* München : Universität der Bundeswehr München - Institut für Wasserwesen Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, 2013.

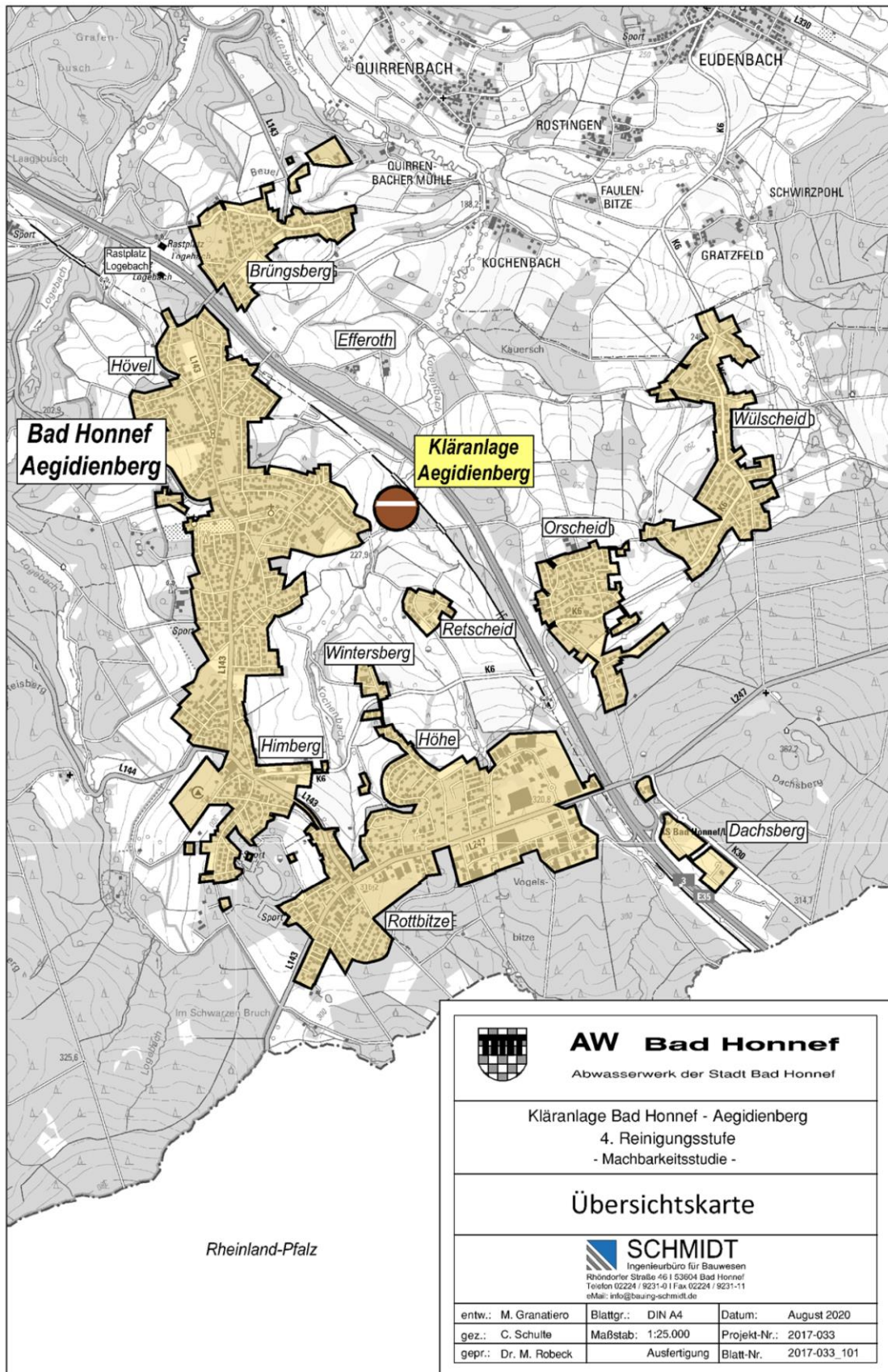
Türk, J., et al. 2013. *Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Volkswirtschaftlicher Nutzen der Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen zur Elimination von organischen Spurenstoffen, Arzneimitteln, Industriechemikalien, bakteriologisch relevanten Keimen und Viren (TP 9)“.* Duisburg : Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV), 2013. AZ IV-7-042 600 001I.

VSA. 2020. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute - Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen". *Übersichtskarte Spurenstoffelimination auf ARA.* [Online] 2020. [Zitat vom: 9. September 2020.] <https://www.micropoll.ch/anlagenprojekte/uebersichtskarte/>.

A Anhang

A1	Übersichtskarte – kanalisierte Einzugsgebiete.....	72
A2	Mikroschadstoffanalyse – erweitertes Monitoring.....	73
A3	Mikroschadstoffanalyse – Datenverdichtung.....	76
A4	Erstinvestitionskosten: Variante 1 – Ozonung.....	77
A5	Erstinvestitionskosten: Variante 2 – GAK-Filtration.....	85
A6	Kostenrechnung nach KVR-Leitlinien.....	93
A7	IUTA – Analysenbericht Nr. F 20/530.....	95

A1 **Übersichtskarte – kanalisierte Einzugsgebiete**



 AW Bad Honnef Abwasserwerk der Stadt Bad Honnef		
Kläranlage Bad Honnef - Aegidienberg 4. Reinigungsstufe - Machbarkeitsstudie -		
<h2>Übersichtskarte</h2>		
 SCHMIDT Ingenieurbüro für Bauwesen Rhöndorfer Straße 46 53604 Bad Honnef Telefon 02224 / 9231-0 Fax 02224 / 9231-11 eMail: info@bauing-schmidt.de		
entw.: M. Granatiero	Blattgr.: DIN A4	Datum: August 2020
gez.: C. Schulte	Maßstab: 1:25.000	Projekt-Nr.: 2017-033
gepr.: Dr. M. Robeck	Ausfertigung	Blatt-Nr. 2017-033_101

A2 Mikroschadstoffanalyse – erweitertes Monitoring

Erweitertes Monitoring					Trockenwetter Tag 1			
					06.04. - 07.04.2020		06.04.2020	
Datum					06.04. - 07.04.2020		06.04.2020	
Uhrzeit					keine Angabe		11:15 - 11:23 11:40 - 11:48	
Art der Probenahme					24-h Mischprobe		qualifizierte Stichprobe	
Probenahme durch					Kläranlage		Georg Reinders	
Bezeichnung IUTA					M 200407/053	M 200407/051	M 200406/014	M 200406/015
Probenahmestelle					Zulauf Biologie	Ablauf KA	OGew OH	OGew UH
Einheit								
BK								
min. BG								
Vor Ort Parameter	Lufttemperatur	°C	-				20,0	20,0
	Wassertemperatur	°C	-				10,4	11,4
	pH	*	-	-			7,8	7,7
	Leitfähigkeit	*	µS/cm	-			376	791
	Sauerstoffkonzentration		mg/L	-			11,2	10,9
Basis- parameter	DOC	^b	mg/L	-	65	7,2	2,3	5,5
	Bromid		µg/L	-	120	92	48	56
Arzneimittel- wirkstoffe und Metabolite	Candesartan	*	ng/L	100 30	3.900	2.100	< 30	1.200
	Carbamazepin	*	ng/L	500 30	350	470	< 30	260
	Ciprofloxacin	*	ng/L	36 10	3.200	150	< 10	51
	Clarithromycin	*	ng/L	100 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Diclofenac	*	ng/L	50 15	2.000	880	27	520
	Gabapentin	*	ng/L	100 30	8.700	1.700	< 30	1.300
	Ibuprofen	*	ng/L	10 10	17.000	< 10 ^a	< 10 ^a	< 10 ^a
	Losartan	*	ng/L	100 30	290	< 30	< 30	< 30
	Metoprolol	*	ng/L	7.300 30	2.500	310	< 30	260
	Sulfamethoxazol	*	ng/L	600 30	70	91	< 30	47
Valsartan	*	ng/L	100 30	11.000	150	< 30	130	
Östrogene Aktivität	A-YES	*	ng _{EEQ} /L	0,40 0,03	32	0,13	0,016	0,042
Pestizide	Flufenacet	*	ng/L	40 10	< 10	< 10	< 10	< 10
	Isoproturon	*	ng/L	300 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Mecoprop		ng/L	100 30	< 30	< 30	40	< 30
	Propiconazol	*	ng/L	1.000 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Tebuconazol	*	ng/L	1.000 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Terbutryn	*	ng/L	65 20	39	< 20	< 20	< 20
Korrosions- schutzmittel	1H-Benzotriazol	*	ng/L	10.000 30	22.000	2.300	< 30	1.800
Moschus- duftstoffe	Galaxolid		ng/L	7.000 30	5.800	1.300	< 30	930
PFCs	PFOA		ng/L	100 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	PFOS		ng/L	0,65 10	< 10	< 10	< 10	< 10
	H4-PFOS		ng/L	100 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Süßstoffe	Acesulfam		ng/L	10.000 30	58.000	610	< 30	380

sehr gut	gut	mäßig	unbefriedigend	schlecht	nicht bewertbar
< ½ BK	½ BK - 1 BK	1 BK – 2 BK	2 BK – 4 BK	> 4 BK	BK < BG

BK = Bewertungskriterium BG = Bestimmungsgrenze

Bewertungskriterien orientieren sich an Umweltqualitätsnormen und Präventivwerten für Oberflächengewässer. Beispiele für diese Werte sind in der D4-Liste des Landes NRW zu finden. Diese Liste wird fortlaufend aktualisiert: <https://www.flussgebiete.nrw.de/monitoringleitfaden-oberflaechengewaesser-anlage-d4-7724>

Die mit * gekennzeichneten Parameter sind durch die DAkKS (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage D-PL-19759-01-00 festgelegten Umfang.

** erhöhte BG aufgrund von Matrixstörungen

^a nach SPE

^b Die Analysen wurden in Fremdvergabe durchgeführt.

Fortsetzung: erweitertes Monitoring (Trockenwetter Tag 2)

					Trockenwetter Tag 2			
					07.04. - 08.04.2020		07.04.2020	
Erweitertes Monitoring					keine Angabe		11:05 - 11:13 11:42 - 11:50	
					24-h Mischprobe		qualifizierte Stichprobe	
Probenahme durch Kläranlage					Matin Funck			
Bezeichnung IUTA					M 200408/024	M 200408/023	M 200407/052	M 200407/054
Probenahmestelle					Zulauf Biologie	Ablauf KA	OGew OH	OGew UH
Einheit BK min. BG								
Vor Ort Parameter	Lufttemperatur	°C	-				14,4	15,3
	Wassertemperatur	°C	-				10,4	11,5
	pH	*	-	-			8,0	7,9
	Leitfähigkeit	*	µS/cm	-			383	817
	Sauerstoffkonzentration		mg/L	-			11,5	10,8
Basisparameter	DOC	^b	mg/L	-	80	6,2	2,4	5,3
	Bromid		µg/L	-	110	86	53	72
Arzneimittel- wirkstoffe und Metabolite	Candesartan	*	ng/L	100 30	8.300	4.400	< 30	1.100
	Carbamazepin	*	ng/L	500 30	150	420	< 30	270
	Ciprofloxacin	*	ng/L	36 10	72	29	< 30 **	< 30 **
	Clarithromycin	*	ng/L	100 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Diclofenac	*	ng/L	50 15	1.800	860	23	490
	Gabapentin	*	ng/L	100 30	29.000	2.200	< 30	1.100
	Ibuprofen	*	ng/L	10 10	790 ^a	< 10 ^a	< 10 ^a	< 10 ^a
	Losartan	*	ng/L	100 30	410	< 30	< 30	< 30
	Metoprolol	*	ng/L	7.300 30	2.100	360	< 30	270
	Sulfamethoxazol	*	ng/L	600 30	79	110	< 30	41
Valsartan	*	ng/L	100 30	24.000	130	< 30	130	
Östrogene Aktivität	A-YES	*	ng _{EEQ} /L	0,40 0,03	31	0,031	0,032	0,028
Pestizide	Flufenacet	*	ng/L	40 10	< 10	< 10	< 10	< 10
	Isoproturon	*	ng/L	300 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Mecoprop		ng/L	100 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Propiconazol	*	ng/L	1.000 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Tebuconazol	*	ng/L	1.000 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Terbutryn	*	ng/L	65 20	88	< 20	< 20	< 20
Korrosions- schutzmittel	1H-Benzotriazol	*	ng/L	10.000 30	27.000	2.600	< 30	1.600
Moschus- duftstoffe	Galaxolid		ng/L	7.000 30	5.200	630	36	730
PFCs	PFOA		ng/L	100 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	PFOS		ng/L	0,65 10	< 10	< 10	< 10	< 10
	H4-PFOS		ng/L	100 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Süßstoffe	Acesulfam		ng/L	10.000 30	52.000	520	< 30	390

sehr gut	gut	mäßig	unbefriedigend	schlecht	nicht bewertbar
< ½ BK	½ BK - 1 BK	1 BK – 2 BK	2 BK – 4 BK	> 4 BK	BK < BG

BK = Bewertungskriterium BG = Bestimmungsgrenze

Bewertungskriterien orientieren sich an Umweltqualitätsnormen und Präventivwerten für Oberflächengewässer. Beispiele für diese Werte sind in der D4-Liste des Landes NRW zu finden. Diese Liste wird fortlaufend aktualisiert: <https://www.flussgebiete.nrw.de/monitoringleitfaden-oberflaechengewaesser-anlage-d4-7724>

Die mit * gekennzeichneten Parameter sind durch die DAkKS (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage D-PL-19759-01-00 festgelegten Umfang.

** erhöhte BG aufgrund von Matrixstörungen

^a nach SPE

^b Die Analysen wurden in Fremdvergabe durchgeführt.

Fortsetzung: erweitertes Monitoring (Trockenwetter Tag 3)

Erweitertes Monitoring					Trockenwetter Tag 3			
					21.7. - 22.07.2020		21.07.2020	
Datum					21.7. - 22.07.2020		21.07.2020	
Uhrzeit					keine Angabe		11:26 - 11:34 12:00 - 12:08	
Art der Probenahme					24-h Mischprobe		qualifizierte Stichprobe	
Probenahme durch					Kläranlage		Matin Funck	
Bezeichnung IUTA					M 200723/049	M 200723/050	M 200721/153	M 200721/152
Probenahmestelle					Zulauf Biologie	Ablauf KA	OGew OH	OGew UH
Einheit								
BK								
min. BG								
Vor Ort Parameter	Lufttemperatur	°C	-				19,1	17,2
	Wassertemperatur	°C	-				13,1	17,9
	pH	*	-	-			7,8	7,6
	Leitfähigkeit	*	µS/cm	-			411	799
	Sauerstoffkonzentration		mg/L	-			4,9	9,0
Basis- parameter	DOC	^b	mg/L	-	57	5,6	2,9	5,5
	Bromid		µg/L	-	190	99	68	93
Arzneimittel- wirkstoffe und Metabolite	Candesartan	*	ng/L	100 30	5.000	2.800	54	3.300
	Carbamazepin	*	ng/L	500 30	330	490	< 30	540
	Ciprofloxacin	*	ng/L	36 10	800	16	< 10	11
	Clarithromycin	*	ng/L	100 30	32	< 30	44	92
	Diclofenac	*	ng/L	50 15	4.800	550	< 10	990
	Gabapentin	*	ng/L	100 30	29.000	170	< 30	430
	Ibuprofen	*	ng/L	10 10	25.000	< 10 ^a	< 10 ^a	< 10 ^a
	Losartan	*	ng/L	100 30	880	< 30	< 30	51
	Metoprolol	*	ng/L	7.300 30	4.400	150	< 30	240
	Sulfamethoxazol	*	ng/L	600 30	140	42	< 30	< 30
Valsartan	*	ng/L	100 30	11.000	45	120	370	
Östrogene Aktivität	A-YES	*	ng _{EEQ} /L	0,40 0,03	18	0,054	0,074	0,071
Pestizide	Flufenacet	*	ng/L	40 10	< 10	< 10	< 10	< 10
	Isoproturon	*	ng/L	300 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Mecoprop		ng/L	100 30	< 30	< 30	31	35
	Propiconazol	*	ng/L	1.000 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Tebuconazol	*	ng/L	1.000 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	Terbutryn	*	ng/L	65 20	100	< 20	< 20	< 20
Korrosions- schutzmittel	1H-Benzotriazol	*	ng/L	10.000 30	15.000	720	57	920
Moschus- duftstoffe	Galaxolid		ng/L	7.000 30	3.700	140	< 30	290
PFCs	PFOA		ng/L	100 30	< 30	< 30	< 30	< 30
	PFOS		ng/L	0,65 10	< 10	< 10	< 10	< 10
	H4-PFOS		ng/L	100 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Süßstoffe	Acesulfam		ng/L	10.000 30	73.000	170	< 30	< 30

sehr gut	gut	mäßig	unbefriedigend	schlecht	nicht bewertbar
< ½ BK	½ BK - 1 BK	1 BK – 2 BK	2 BK – 4 BK	> 4 BK	BK < BG
BK = Bewertungskriterium			BG = Bestimmungsgrenze		

Bewertungskriterien orientieren sich an Umweltqualitätsnormen und Präventivwerten für Oberflächengewässer. Beispiele für diese Werte sind in der D4-Liste des Landes NRW zu finden. Diese Liste wird fortlaufend aktualisiert: <https://www.flussgebiete.nrw.de/monitoringleitfaden-oberflaechengewaesser-anlage-d4-7724>

Die mit * gekennzeichneten Parameter sind durch die DAkKS (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage D-PL-19759-01-00 festgelegten Umfang.

** erhöhte BG aufgrund von Matrixstörungen

^a nach SPE

^b Die Analysen wurden in Fremdvergabe durchgeführt.

A3 Mikroschadstoffanalyse – Datenverdichtung

Datenverdichtung					Zulauf 4.5.-5.5. M 200507/025	Ablauf 4.5.-5.5. M 200507/026	Zulauf 5.5.-6.5. M 200507/027	Ablauf 5.5.-6.5. M 200507/028
					Trockenwetter Tag 1		Trockenwetter Tag 2	
					Zulauf Biologie	Ablauf KA	Zulauf Biologie	Ablauf KA
	Einheit	BK	min BG					
Korrosions- schutzmittel	1H-Benzotriazol *	ng/L	10.000	30	19.000	1.900	26.000	1.200
Arzneimittel- wirkstoffe	Carbamazepin *	ng/L	500	30	340	360	370	400
	Clarithromycin *	ng/L	100	30	< 30	39	< 30	< 30
	Diclofenac *	ng/L	50	15	3.700	1.000	4.600	1.000
	Metoprolol *	ng/L	7.300	30	2.800	270	2.800	190
	Sulfamethoxazol *	ng/L	600	30	1.000	210	700	170
Pestizid	Terbutryn *	ng/L	65	20	72	33	390	20
Basis- parameter	DOC ^b	mg/L			72	6,0	85	5,9
	Bromid	µg/L			160	73	160	70
	pH *				7,8	8,0	7,7	7,8
	Leitfähigkeit *	µS/cm			1629	819	1563	743

Datenverdichtung					Zulauf 6.5.-7.5. M 200507/029	Ablauf 6.5.-7.5. M 200507/030	Zulauf 07.05.2020 M 200512/013	Ablauf 07.05.2020 M 200512/014
					Trockenwetter Tag 3		Trockenwetter Tag 4	
					Zulauf Biologie	Ablauf KA	Zulauf Biologie	Ablauf KA
	Einheit	BK	min BG					
Korrosions- schutzmittel	1H-Benzotriazol *	ng/L	10.000	30	24.000	1.300	39.000	850
Arzneimittel- wirkstoffe	Carbamazepin *	ng/L	500	30	440	440	260	420
	Clarithromycin *	ng/L	100	30	33	< 30	< 10	< 10
	Diclofenac *	ng/L	50	15	5.200	1.200	2.100	380
	Metoprolol *	ng/L	7.300	30	2.800	210	2.700	200
	Sulfamethoxazol *	ng/L	600	30	510	150	280	130
Pestizid	Terbutryn *	ng/L	65	20	95	28	47	27
Basis- parameter	DOC ^b	mg/L			97	4,1	105	6,9
	Bromid	µg/L			150	76	180	75
	pH *				7,6	7,8	8,0	7,1
	Leitfähigkeit *	µS/cm			1383	680	1600	877

Datenverdichtung					Zulauf 08.05.2020 M 200512/015	Ablauf 08.05.2020 M 200512/016
					Trockenwetter Tag 5	
					Zulauf Biologie	Ablauf KA
	Einheit	BK	min BG			
Korrosions- schutzmittel	1H-Benzotriazol *	ng/L	10.000	30	39.000	1.200
Arzneimittel- wirkstoffe	Carbamazepin *	ng/L	500	30	190	450
	Clarithromycin *	ng/L	100	30	< 10	< 10
	Diclofenac *	ng/L	50	15	2.500	460
	Metoprolol *	ng/L	7.300	30	2.300	260
	Sulfamethoxazol *	ng/L	600	30	250	120
Pestizid	Terbutryn *	ng/L	65	20	32	21
Basis- parameter	DOC ^b	mg/L			83	8,0
	Bromid	µg/L			140	97
	pH *				7,4	7,9
	Leitfähigkeit *	µS/cm			1437	921

Die mit * gekennzeichneten Parameter sind durch die DAkKS (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage D-PL-19759-01-00 festgelegten Umfang.
** erhöhte BG aufgrund von Matrixstörungen.
^a nach SPE (Festphasenextraktion)
^b Die Analysen wurden in Fremdvergabe durchgeführt.

A4 Erstinvestitionskosten: Variante 1 – Ozonung

Variante 1 - Ozonanlage

Gewerk: Tief- und Betonbauarbeiten mit Verfahrenstechnik

Titel 1 - Baustelleneinrichtung

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
1,01	1,00	Psch	Einrichten, Vorhalten und Räumen der Baustelle	80.000,00	80.000,00
1,02	2,00	Stk	Stahlplatten-Überfahrten bis 2,00 m	60,00	120,00
1,03	2,00	Stk	Stahlplatten-Überfahrten umsetzen	25,00	50,00
1,04	50,00	m	Schutzzaun 2,0 m hoch	8,00	400,00
1,05	25,00	m	Schutzgeländer	15,00	375,00
1,06	2,00	Psch	Fahrbares Arbeits- u. Schutzgerüst	400,00	800,00
1,07	50,00	Stk	Beweissicherung (Digitalfoto)	2,00	100,00
1,08	5,00	Stk	Schutzvorrichtung für Einzelbaum	70,00	350,00
1,09	5,00	Stk	Messpunkte / Grenzsteine sichern	15,00	75,00
1,10	1,00	Stk	Bodenuntersuchung LAGA	400,00	400,00
1,11	1,00	Stk	Proctorversuch	150,00	150,00
1,12	70,00	m	Dichtigkeitsprüfung der Kanäle bis DN 300	7,00	490,00
1,13	2,00	Stk	Lastplattendruckversuch	150,00	300,00
1,14	2,00	Stk	Dynamischer Lastplattendruckversuch	70,00	140,00
Summe Titel 1 - Baustelleneinrichtung					83.750,00

Titel 2 - Baufeld freimachen, Abbruch und Demontage

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
2,01	40,00	m	vorh. Maschendrahtzaun, h = 2,00 m aufnehmen, seithl. Lagern	15,00	600,00
2,02	40,00	m	vorh. zwischengelagerten Maschendrahtzaun wieder montieren	20,00	800,00
2,03	40,00	m	Maschendrahtzaun liefern und montieren	45,00	1.800,00
2,04	1,00	m³	Mauerwerk von Hand abbrechen	200,00	200,00
2,05	1,00	m³	Beton von Hand abbrechen	350,00	350,00
2,06	1,00	m³	Stahlbeton von Hand abbrechen	550,00	550,00
2,07	3,00	m³	Abbruchmaterial Mauerwerk und Beton aufnehmen, entsorgen	25,00	75,00
2,08	2,00	Stk	Mastfundament L = 1,0 m für Straßenlampe herstellen	150,00	300,00
2,09	2,00	Stk	Straßenlampe aufstellen	100,00	200,00
2,10	4,00	Stk	Baum, D=10-30 cm, fällen, entsorgen	50,00	200,00
2,11	1,00	Stk	Baum, D=31-50 cm, fällen, entsorgen	120,00	120,00

2,12	4,00	Stk	Wurzelstock, D = 10-30 cm, entsorgen	65,00	260,00
2,13	1,00	Stk	Wurzelstock, D = 31-50 cm, entsorgen	75,00	75,00
2,14	200,00	m ²	Strauchwerk aufnehmen, entsorgen	6,00	1.200,00
Summe Titel 2 - Baufeld freimachen, Abbruch und Demontage					6.730,00

Titel 3 - Detektionsbohrungen für Kampfmitteluntersuchungen

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
3,01	1,00	m ³	Suchschachtung, Handarbeit	70,00	70,00
3,02	2,00	m ³	Suchschachtung, maschinenunterstützte Handarbeit	60,00	120,00
3,03	1,00	Psch	Baustelleneinrichtung Sondierbohrungen	700,00	700,00
3,04	20,00	Stk	Bohransatzpunkte einmessen	10,00	200,00
3,05	50,00	m	Sondierbohrungen d = 120 mm, Vollbohrschnecke, Tiefen bis 8 m	10,00	500,00
3,06	20,00	m	Sondierbohrungen d = 180 mm, Hohlbohrschnecke, als Zulage	8,00	160,00
3,07	2,00	h	Stillstand der Bohrkolonne	150,00	300,00
Summe Titel 3 - Detektionsbohrungen für Kampfmitteluntersuchungen					2.050,00

Titel 4 - Erdarbeiten und Verbau

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
4,01	200,00	m ²	Oberboden abtragen, entsorgen	2,00	400,00
4,02	150,00	m ²	Oberboden abtragen, lagern, auftragen	5,00	750,00
4,03	600,00	m ³	Bodenaushub Baugrube	20,00	12.000,00
4,04	80,00	m ³	Bodenaushub Einzelgraben bis 2,0 m	15,00	1.200,00
4,05	100,00	m ³	Zulage Bodenklasse 2	8,00	800,00
4,06	100,00	t	Zulage Mischboden	15,00	1.500,00
4,07	10,00	m ³	Zulage Bodenaushub in reiner Handarbeit	100,00	1.000,00
4,08	10,00	m ³	Zulage Bodenaushub in maschinenunterstützter Handarbeit	60,00	600,00
4,09	680,00	m ³	Boden LAGA Z0 laden, abfahren, verwerten / entsorgen	11,00	7.480,00
4,10	100,00	t	Zulage Boden LAGA Z1.1 laden, abfahren, verwerten / entsorgen	20,00	2.000,00
4,11	50,00	t	Zulage Boden LAGA Z2 laden, abfahren, entsorgen	35,00	1.750,00
4,12	10,00	m ³	Suchschachtung, Handarbeit	70,00	700,00
4,13	10,00	m ³	Suchschachtung, maschinenunterstützte Handarbeit	60,00	600,00
4,14	5,00	Stk	Zulage Kreuzungen des Rohrgrabens, Kabel	40,00	200,00
4,15	2,00	Stk	Zulage Kreuzungen des Rohrgrabens, Gas- und Wasserleitungen	70,00	140,00
4,16	20,00	m	Zulage längslaufende Kabel sichern	8,00	160,00
4,17	20,00	m	Zulage längslaufende Gas- und Wasserleitungen	15,00	300,00
4,18	80,00	m	Kabelgraben herstellen	80,00	6.400,00
4,19	50,00	m ²	Zwischenplanum herstellen	1,50	75,00
4,20	100,00	m	Bauseits geliefertes Kabel verlegen	2,00	200,00

4,21	200,00	m	Trassenwarnband	0,50	100,00
4,22	150,00	m	Kabelschutzrohre 110 x 6,3 mm liefern und verlegen	15,00	2.250,00
4,23	8,00	Stk	Kabelschutzrohr-Bauwerkseinführung, PE da 110 x 6,3, wasser- dicht	40,00	320,00
4,24	100,00	m²	Verbau - Einzelgraben, Tiefe bis 3,00 m	10,00	1.000,00
4,25	220,00	m²	Spundwandverbau mit Schwingungsmessung - Einzelbaugrube	67,00	14.740,00
4,26	60,00	Stk	Rückverankerung als Zulage	150,00	9.000,00
4,27	220,00	m²	Vorbohren, Auflockern für Spundwand	20,00	4.400,00
4,28	6,00	Stk	Zulage Aussparungen / Durchführungen bis D = 1,0 m	70,00	420,00
4,29	35,00	m³	Kies/Sand 0/16 für die Leitungszone	35,00	1.225,00
4,30	50,00	m³	Hauptgrabenverfüllung Füllkies 0/45	25,00	1.250,00
4,31	200,00	m³	Baugrubenverfüllung Füllkies 0/45	28,00	5.600,00
4,32	50,00	m³	Aushubboden wieder verfüllen	15,00	750,00
4,33	50,00	m³	Schotterunterbau 0/32 liefern und einbauen	30,00	1.500,00
4,34	5,00	m³	Zulage Stütz- und Füllbeton	80,00	400,00
4,35	5,00	m²	Schalung des Stütz- und Füllbetons	30,00	150,00
4,36	50,00	m²	Mutterboden liefern u. einbauen	8,00	400,00
4,37	200,00	m²	Vegetationsfläche fräsen	1,50	300,00
4,38	200,00	m²	Feinplanum, Einsaat	1,00	200,00
Summe Titel 4 - Erdarbeiten und Verbau					82.260,00

Titel 5 - Beton- und Mauerarbeiten

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
5,01	120,00	m²	Unterbeton C 12/15 X0 als Sauberkeitsschicht, D= 10 cm	15,00	1.800,00
5,02	50,00	m³	Stahlbeton C 35/45 wu - Bodenplatten	130,00	6.500,00
5,03	150,00	m³	Stahlbeton C 35/45 wu - Wände	170,00	25.500,00
5,04	30,00	m³	Stahlbeton C 35/45 wu - Decken	165,00	4.950,00
5,05	5,00	m³	Stahlbeton C 35/45 wu - Kleinbauteile	190,00	950,00
5,06	20,00	m²	Schalung - Bodenplatten	55,00	1.100,00
5,07	720,00	m²	Schalung für Wände, zweihäufig	70,00	50.400,00
5,08	110,00	m²	Schalung - Decke	120,00	13.200,00
5,09	15,00	m²	Schalung für Kleinbauteile	100,00	1.500,00
5,10	2,00	Stk	Zulage für Pumpensäpfe in der Bodenplatte	100,00	200,00
5,11	2,00	Stk	Zulage Schalung im Bereich des Rohres DN 300	250,00	500,00
5,12	8,00	Stk	Zulage Faserzementrohr-Kreisschalung DN 125	80,00	640,00
5,13	5,00	Stk	Zulage Faserzementrohr-Kreisschalung DN 150	100,00	500,00
5,14	5,00	Stk	Zulage Faserzementrohr-Kreisschalung DN 250	180,00	900,00
5,15	2,00	Stk	Zulage Faserzementrohr-Kreisschalung DN 300	220,00	440,00
5,16	30,00	t	Betonstahl B 500B - S	1.200,00	36.000,00
5,17	5,00	t	Betonstahl B 500B - M	1.100,00	5.500,00
5,18	2,00	t	Betonstahl für Kleinbauteile	1.800,00	3.600,00

5,19	5,00	m ³	Gerinnebeton C25/30 wu liefern und einbauen	200,00	1.000,00
5,20	10,00	m ²	Schalung für den Gerinnebeton	80,00	800,00
5,21	85,00	m	Fugenblech	15,00	1.275,00
5,22	80,00	m	Edelstahl-Erdungsband	15,00	1.200,00
5,23	10,00	Stk	Anschlussstück für Erdungsband	55,00	550,00
5,24	5,00	Stk	Kernbohrungen bis DN 100 in Stahlbetonwände d = 25 cm	80,00	400,00
5,25	2,00	Stk	Kernbohrungen bis DN 125 in Stahlbetonwände d = 30 cm	120,00	240,00
5,26	2,00	Stk	Kernbohrungen bis DN 250 in Stahlbetonwände d = 30 cm	170,00	340,00
5,27	2,00	Stk	Kernbohrungen bis DN 500 in Stahlbetonwände d = 30 cm	300,00	600,00
5,28	20,00	cm ²	Bewehrungsstahl durchtrennen	2,50	50,00
Summe Titel 5 - Beton- und Mauerarbeiten					160.635,00

Titel 6 - Rohre und Schächte

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
6,01	20,00	m	Hochlastkanalrohr DN 160 PP SN 10	50,00	1.000,00
6,02	15,00	Stk	Zulage Bogen DN 160, PP SN 10, 15° / 30° / 45°	20,00	300,00
6,03	2,00	Stk	Zulage Überschiebmuffe DN 160, PP SN 10	40,00	80,00
6,04	2,00	Stk	Zulage Einfachabzweig 45° DN 160 / 160, PP SN 10	30,00	60,00
6,05	1,00	Stk	Verschlusssteller für Hochlastkanalrohr DN 160 PP SN 10	15,00	15,00
6,06	100,00	m	Edelstahlrohr DN 150	180,00	18.000,00
6,07	10,00	Stk	Edelstahl-Rohrbogen DN 150, 45°-90°	180,00	1.800,00
6,08	15,00	Stk	Edelstahl-Vorschweißbördel DN 150 mit Losflansch PN10	110,00	1.650,00
6,09	10,00	Stk	Manschettendichtung DN 150 liefern und einbauen	70,00	700,00
6,10	2,00	Stk	PP-Fertigteilschacht, T = bis 2,00 m, DN 300 PP / DN 300 PP	1.500,00	3.000,00
Summe Titel 6 - Rohre und Schächte					26.605,00

Titel 7 - Ozonanlage / Einbauteile

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
7,01	1,00	Psch	Ozonanlage	400.000,00	400.000,00
7,02	1,00	Psch	Druckluftanlage	3.000,00	3.000,00
7,03	1,00	Stk	Adsorptionstrockner	1.500,00	1.500,00
7,04	1,00	Psch	Treppenanlage zum Ozonreaktor	5.000,00	5.000,00
7,05	6,00	Psch	Edelstahldeckel	4.500,00	27.000,00
7,06	70,00	m	Edelstahlgeländer W.-St. 1.4571	185,00	12.950,00
Summe Titel 7 - Ozonanlage / Einbauteile					449.450,00

Titel 8 - Betriebsraum

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
8,01	1,00	Psch	Fertigarage als Betriebsraum	18.000,00	18.000,00
Summe Titel 8 - Betriebsraum					18.000,00

Titel 9 - Pflasterarbeiten

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
9,01	25,00	m ²	Betonsteinpflaster aufnehmen, abfahren	12,00	300,00
9,02	25,00	m ²	Betonsteinpflaster aufnehmen, seitlich lagern	10,00	250,00
9,03	25,00	m ²	Betonsteinpflaster wieder verlegen	25,00	625,00
9,04	200,00	m ²	Erdplanum herstellen - 45 MN/m ²	1,20	240,00
9,05	80,00	m ³	Frostschutz - und Schottertragschicht 0/45 - 150 MN/m ²	45,00	3.600,00
9,06	200,00	m ²	Planum herstellen - 150 MN/m ²	1,50	300,00
9,07	150,00	m ²	Rechteckpflaster 10/20/8 liefern, verlegen	32,00	4.800,00
9,08	100,00	m	Pflaster schneiden	15,00	1.500,00
9,09	10,00	m	Bordsteine (Hochbord, Tiefbord) aufnehmen, entsorgen	10,00	100,00
9,10	10,00	m	Pflasterrinne, 1-zeilig, aufnehmen, entsorgen	8,00	80,00
9,11	80,00	m	Rundbordstein RB 150 x 220, r = 5 cm, liefern, versetzen	30,00	2.400,00
9,12	5,00	m	Bordsteine in Bögen als Zulage.	20,00	100,00
9,13	10,00	m	Zulage Bordsteine, L <= 50 cm, versetzen	15,00	150,00
9,14	5,00	Stk	Übergangsteine als Zulage.	25,00	125,00
9,15	25,00	m	Tiefbordstein TB 100 x 250 liefern, versetzen	22,00	550,00
9,16	5,00	Stk	Bordsteine, Pass- / Gehrungsschnitt	10,00	50,00
9,17	35,00	m	Pflasterrinne 16/16/12, 1-zeilig, liefern, versetzen	20,00	700,00
9,18	5,00	Stk	Pflasterrinne, Pass- / Gehrungsschnitt	10,00	50,00
9,19	2,00	m ²	Natursteinkleinpflaster	150,00	300,00
9,20	5,00	m ²	Mörtelbettung und Mörtelverfugung, als Zulage	20,00	100,00
Summe Titel 9 - Pflasterarbeiten					16.320,00

Titel 10 - Straßenbauarbeiten

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
10,01	50,00	m ³	Boden- und Straßenunterbau außerhalb der Kanalgräben ausheben	15,00	750,00
10,02	50,00	m ³	Boden LAGA Z0 laden, abfahren, verwerten / entsorgen	12,00	600,00
10,03	10,00	t	Zulage Boden LAGA Z1.1 laden, abfahren, verwerten / entsorgen	20,00	200,00
10,04	100,00	m ²	Erdplanum herstellen - 45 MN/m ²	1,20	120,00
10,05	25,00	m ³	Frostschutz - und Schottertragschicht 0/45 - 150 MN/m ²	45,00	1.125,00
10,06	100,00	m ²	Planum herstellen - 150 MN/m ²	1,50	150,00
10,07	2,00	Stk	Straßenablauf 500/500 - D 400, ohne Geruchsverschluss	600,00	1.200,00
Summe Titel 10 - Straßenbauarbeiten					4.145,00

Titel 11 - Wasserhaltung

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
11,01	1,00	Psch	Pumpenanlage Q = 20 l/s	800,00	800,00
11,02	3,00	Stk	Umsetzen der Pumpenanlage	50,00	150,00
11,03	3,00	Stk	Pumpensümpfe	80,00	240,00
11,04	10,00	m	Kanalrohr PVC-KG DN 150	30,00	300,00
11,05	10,00	Stk	Zulage Formteil PVC-KG DN 150	17,00	170,00
11,06	2,00	Stk	Anschluss DN 300 PVC an vorh. Kanal	350,00	700,00
11,07	1,00	m³	Ziegelmauerwerk wasserundurchlässig herstellen	1.000,00	1.000,00
11,08	1,00	Stk	prov. Absperrung Kanalrohr DN 500 - Kanalblase	220,00	220,00
Summe Titel 11 - Wasserhaltung					3.580,00

Titel 12 - Arbeiten auf Nachweis

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
12,01	10,00	h	Vorarbeiter, Polier, Schachtmeister	50,00	500,00
12,02	30,00	h	Facharbeiter (Schlosser, Maurer, etc.)	45,00	1.350,00
12,03	10,00	h	Helfer	35,00	350,00
12,04	5,00	h	Kompressor	50,00	250,00
12,05	5,00	h	Lkw/Allrad-Kipper 15 t	65,00	325,00
12,06	5,00	h	Radlader	64,00	320,00
12,07	5,00	h	Mobilbagger 1,0 m³	95,00	475,00
Summe Titel 12 - Arbeiten auf Nachweis					3.570,00

Zusammenstellung

Summe Titel 1 - Baustelleneinrichtung	83.750,00
Summe Titel 2 - Baufeld freimachen, Abbruch und Demontage	6.730,00
Summe Titel 3 - Detektionsbohrungen für Kampfmittelunters.	2.050,00
Summe Titel 4 - Erdarbeiten und Verbau	82.260,00
Summe Titel 5 - Beton- und Mauerarbeiten	160.635,00
Summe Titel 6 - Rohre und Schächte	26.605,00
Summe Titel 7 - Ozonanlage / Einbauteile	449.450,00
Summe Titel 8 - Betriebsraum	18.000,00
Summe Titel 9 - Pflasterarbeiten	16.320,00
Summe Titel 10 - Straßenbauarbeiten	4.145,00
Summe Titel 11 - Wasserhaltung	3.580,00
Summe Titel 12 - Arbeiten auf Nachweis	3.570,00
Summe Gewerk: Tief- und Betonbauarbeiten mit Verfahrenstechnik, netto	857.095,00
+ 19 % MwSt	162.848,05
Summe Gewerk: Tief- und Betonbauarbeiten mit Verfahrenstechnik, brutto	1.019.943,05

Gewerk: Be- und Entlüftung

Titel 13 - Be- und Entlüftung

Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
13,01	1,00	Psch Baustelleneinrichtung	1.000,00	1.000,00
13,02	1,00	Psch Be- und Entlüftung Betriebsraum	5.000,00	5.000,00
Summe Titel 13 - Be- und Entlüftung				6.000,00

Zusammenstellung, Gewerk: Be- und Entlüftung

Summe Titel 13 - Be- und Entlüftung	6.000,00
Summe Summe Titel 13 - Be- und Entlüftung, netto	6.000,00
+ 19 % MwSt	1.140,00
Summe Titel 13 - Be- und Entlüftung, brutto	7.140,00

Gewerk: Sauerstofftank

Titel 14 - Sauerstofftank

Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
14,01	1,00	Psch Sauerstofftank aufstellen	5.000,00	5.000,00
14,02	1,00	Psch Verrohrung, Tank / Verdampfer	3.000,00	3.000,00
14,03	1,00	Psch Prüfung des Sauerstofftanks und Statik	2.000,00	2.000,00
Summe Titel 14 - Sauerstofftank				10.000,00

Zusammenstellung, Gewerk: Sauerstofftank

Summe Titel 14 - Sauerstofftank	10.000,00
Summe Gewerk: Sauerstofftank, netto	10.000,00
+ 19 % MwSt	1.900,00
Summe Gewerk: Sauerstofftank, brutto	11.900,00

Gewerk: Elektrotechnische Ausrüstung

Titel 15 - Elektrotechnische Ausrüstung

Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
15,01	1,00	Psch Anpassung EMSR-Ausrüstung für Ozonanlage	10.000,00	10.000,00
15,02	1,00	Psch EMSR-Ausrüstung für Ozonanlage	10.000,00	10.000,00
15,03	1,00	Psch EMSR-Ausrüstung für Außenanlage	5.000,00	5.000,00
15,04	1,00	Psch Einbindung in das Prozessleitsystem der KA, Hardware	10.000,00	10.000,00
15,05	1,00	Psch Einbindung in das Prozessleitsystem der KA, Software	10.000,00	10.000,00
Summe Gewerk: Elektrotechnische Ausrüstung, netto				45.000,00
+ 19 % MwSt				8.550,00
Summe Gewerk: Elektrotechnische Ausrüstung, brutto				53.550,00

Zusammenstellung der Baukosten

Summe Gewerk: Tief- und Betonbau mit Verfahrenstechnik, netto	857.095,00
Summe Gewerk: Sauerstofftank, netto	6.000,00
Summe Gewerk: Elektrotechnische Ausrüstung, netto	45.000,00
Rundung	308,36
Baukosten gesamt, netto	908.403,36
zzgl. 19 % MwSt.	172.596,64
Baukosten gesamt, brutto	1.081.000,00

Differenzierung der Erstinvestitionskosten für die Kostenrechnung nach KVR-Leitlinien

Bautechnik, netto (entspr. Baukosten abzgl. Maschinen- und EMSR-Technik)	413.953,36
Maschinenteknik, netto (entspr. Teil 7 - Ozonanlage / Einbauteile)	449.450,00
EMSR-Technik, netto (entspr. Teil 15 - Elektronische Ausrüstung)	45.000,00
Nebenkosten, netto (Honorare, Prüfgebühren, etc. / ca. 20% der Baukosten)	181.680,67
Erstinvestitionskosten gesamt, netto	1.090.084,03
zzgl. 19 % MwSt.	207.115,97
Erstinvestitionskosten gesamt, brutto	1.297.200,00

A5 Erstinvestitionskosten: Variante 2 – GAK-Filtration

Variante 2 - GAK-Filtration

Gewerk: Tief- und Betonbauarbeiten mit Verfahrenstechnik

Titel 1 - Baustelleneinrichtung

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
1,01	1,00	Psch	Einrichten, Vorhalten und Räumen der Baustelle	80.000,00	80.000,00
1,02	2,00	Stk	Stahlplatten-Überfahrten bis 2,00 m	60,00	120,00
1,03	2,00	Stk	Stahlplatten-Überfahrten umsetzen	25,00	50,00
1,04	50,00	m	Schutzzaun 2,0 m hoch	8,00	400,00
1,05	25,00	m	Schutzgeländer	15,00	375,00
1,06	2,00	Psch	Fahrbares Arbeits- u. Schutzgerüst	400,00	800,00
1,07	50,00	Stk	Beweissicherung (Digitalfoto)	2,00	100,00
1,08	5,00	Stk	Schutzvorrichtung für Einzelbaum	70,00	350,00
1,09	5,00	Stk	Messpunkte / Grenzsteine sichern	15,00	75,00
1,10	1,00	Stk	Bodenuntersuchung LAGA	400,00	400,00
1,11	1,00	Stk	Proctorversuch	150,00	150,00
1,12	70,00	m	Dichtigkeitsprüfung der Kanäle bis DN 300	7,00	490,00
1,13	2,00	Stk	Lastplattendruckversuch	150,00	300,00
1,14	2,00	Stk	Dynamischer Lastplattendruckversuch	70,00	140,00
Summe Titel 1 - Baustelleneinrichtung					83.750,00

Titel 2 - Baufeld freimachen, Abbruch und Demontage

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
2,01	40,00	m	vorh. Maschendrahtzaun, h = 2,00 m aufnehmen, seith. Lagern	15,00	600,00
2,02	40,00	m	vorh. zwischengelagerten Maschendrahtzaun wieder montieren	20,00	800,00
2,03	40,00	m	Maschendrahtzaun liefern und montieren	45,00	1.800,00
2,04	1,00	m³	Mauerwerk von Hand abbrechen	200,00	200,00
2,05	1,00	m³	Beton von Hand abbrechen	350,00	350,00
2,06	1,00	m³	Stahlbeton von Hand abbrechen	550,00	550,00
2,07	3,00	m³	Abbruchmaterial Mauerwerk und Beton aufnehmen, entsorgen	25,00	75,00
2,08	2,00	Stk	Mastfundament L = 1,0 m für Straßenlampe herstellen	150,00	300,00
2,09	2,00	Stk	Straßenlampe aufstellen	100,00	200,00
2,10	4,00	Stk	Baum, D=10-30 cm, fällen, entsorgen	50,00	200,00
2,11	1,00	Stk	Baum, D=31-50 cm, fällen, entsorgen	120,00	120,00
2,12	4,00	Stk	Wurzelstock, D = 10-30 cm, entsorgen	65,00	260,00
2,13	1,00	Stk	Wurzelstock, D = 31-50 cm, entsorgen	75,00	75,00
2,14	200,00	m²	Strauchwerk aufnehmen, entsorgen	6,00	1.200,00
Summe Titel 2 - Baufeld freimachen, Abbruch und Demont.					6.730,00

Titel 3 - Detektionsbohrungen f. Kampfmitteluntersuchungen

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
3,01	1,00	m ³	Suchschachtung, Handarbeit	70,00	70,00
3,02	2,00	m ³	Suchschachtung, maschinenunterstützte Handarbeit	60,00	120,00
3,03	1,00	Psch	Baustelleneinrichtung Sondierbohrungen	700,00	700,00
3,04	20,00	Stk	Bohransatzpunkte einmessen	10,00	200,00
3,05	50,00	m	Sondierbohrungen d = 120 mm, Vollbohrschnecke, Tiefen bis 8 m	10,00	500,00
3,06	20,00	m	Sondierbohrungen d = 180 mm, Hohlbohrschnecke, als Zulage	8,00	160,00
3,07	2,00	h	Stillstand der Bohrkolonne	150,00	300,00
Summe Titel 3 - Detektionsbohrungen f. Kampfmittelunters.					2.050,00

Titel 4 - Erdarbeiten und Verbau

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
4,01	200,00	m ²	Oberboden abtragen, entsorgen	2,00	400,00
4,02	150,00	m ²	Oberboden abtragen, lagern, aufräumen	5,00	750,00
4,03	800,00	m ³	Bodenaushub Baugrube	20,00	16.000,00
4,04	100,00	m ³	Bodenaushub Einzelgraben bis 2,0 m	15,00	1.500,00
4,05	100,00	m ³	Zulage Bodenklasse 2	8,00	800,00
4,06	100,00	t	Zulage Mischboden	15,00	1.500,00
4,07	10,00	m ³	Zulage Bodenaushub in reiner Handarbeit	100,00	1.000,00
4,08	10,00	m ³	Zulage Bodenaushub in maschinenunterstützter Handarbeit	60,00	600,00
4,09	900,00	m ³	Boden LAGA Z0 laden, abfahren, verwerten / entsorgen	11,00	9.900,00
4,10	100,00	t	Zulage Boden LAGA Z1.1 laden, abfahren, verwerten / entsorgen	20,00	2.000,00
4,11	50,00	t	Zulage Boden LAGA Z2 laden, abfahren, entsorgen	35,00	1.750,00
4,12	10,00	m ³	Suchschachtung, Handarbeit	70,00	700,00
4,13	10,00	m ³	Suchschachtung, maschinenunterstützte Handarbeit	60,00	600,00
4,14	5,00	Stk	Zulage Kreuzungen des Rohrgrabens, Kabel	40,00	200,00
4,15	2,00	Stk	Zulage Kreuzungen des Rohrgrabens, Gas- und Wasserleitungen	70,00	140,00
4,16	20,00	m	Zulage längslaufende Kabel sichern	8,00	160,00
4,17	20,00	m	Zulage längslaufende Gas- und Wasserleitungen	15,00	300,00
4,18	80,00	m	Kabelgraben herstellen	80,00	6.400,00
4,19	50,00	m ²	Zwischenplanum herstellen	1,50	75,00
4,20	100,00	m	Bauseits geliefertes Kabel verlegen	2,00	200,00
4,21	200,00	m	Trassenwarnband	0,50	100,00
4,22	150,00	m	Kabelschutzrohre 110 x 6,3 mm liefern und verlegen	15,00	2.250,00
4,23	8,00	Stk	Kabelschutzrohr-Bauwerkseinführung, PE da 110 x 6,3, wasser-dicht	40,00	320,00
4,24	200,00	m ²	Verbau - Einzelgraben, Tiefe bis 3,00 m	10,00	2.000,00
4,25	300,00	m ²	Spundwandverbau mit Schwingungsmessung - Einzelbaugrube	67,00	20.100,00
4,26	75,00	Stk	Rückverankerung als Zulage	150,00	11.250,00
4,27	300,00	m ²	Vorbohren, Auflockern für Spundwand	20,00	6.000,00

4,28	6,00	Stk	Zulage Aussparungen / Durchführungen bis D = 1,0 m	70,00	420,00
4,29	50,00	m ³	Kies/Sand 0/16 für die Leitungszone	35,00	1.750,00
4,30	65,00	m ³	Hauptgrabenverfüllung Füllkies 0/45	25,00	1.625,00
4,31	1.200,00	m ³	Baugrubenverfüllung Füllkies 0/45	28,00	33.600,00
4,32	200,00	m ³	Aushubboden wieder verfüllen	15,00	3.000,00
4,33	50,00	m ³	Schotterunterbau 0/32 liefern und einbauen	30,00	1.500,00
4,34	5,00	m ³	Zulage Stütz- und Füllbeton	80,00	400,00
4,35	5,00	m ²	Schalung des Stütz- und Füllbetons	30,00	150,00
4,36	50,00	m ²	Mutterboden liefern u. einbauen	8,00	400,00
4,37	200,00	m ²	Vegetationsfläche fräsen	1,50	300,00
4,38	200,00	m ²	Feinplanum, Einsaat	1,00	200,00
Summe Titel 4 - Erdarbeiten und Verbau					130.340,00

Titel 5 - Beton- und Mauerarbeiten

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
5,01	120,00	m ²	Unterbeton C 12/15 X0 als Sauberkeitsschicht, D= 10 cm	15,00	1.800,00
5,02	60,00	m ³	Stahlbeton C 35/45 wu - Bodenplatten	130,00	7.800,00
5,03	80,00	m ³	Stahlbeton C 35/45 wu - Wände	170,00	13.600,00
5,04	10,00	m ³	Stahlbeton C 35/45 wu - Decken	165,00	1.650,00
5,05	5,00	m ³	Stahlbeton C 35/45 wu - Kleinbauteile	190,00	950,00
5,06	25,00	m ²	Schalung - Bodenplatten	55,00	1.375,00
5,07	400,00	m ²	Schalung für Wände, zweihäufig	70,00	28.000,00
5,08	40,00	m ²	Schalung - Decke	120,00	4.800,00
5,09	10,00	m ²	Schalung für Kleinbauteile	100,00	1.000,00
5,10	2,00	Stk	Zulage für Pumpensümpfe in der Bodenplatte	100,00	200,00
5,11	2,00	Stk	Zulage Schalung im Bereich des Rohres DN 300	250,00	500,00
5,12	8,00	Stk	Zulage Faserzementrohr-Kreisschalung DN 125	80,00	640,00
5,13	5,00	Stk	Zulage Faserzementrohr-Kreisschalung DN 150	100,00	500,00
5,14	5,00	Stk	Zulage Faserzementrohr-Kreisschalung DN 250	180,00	900,00
5,15	2,00	Stk	Zulage Faserzementrohr-Kreisschalung DN 300	220,00	440,00
5,16	25,00	t	Betonstahl B 500B - S	1.200,00	30.000,00
5,17	5,00	t	Betonstahl B 500B - M	1.100,00	5.500,00
5,18	2,00	t	Betonstahl für Kleinbauteile	1.800,00	3.600,00
5,19	5,00	m ³	Gerinnebeton C25/30 wu liefern und einbauen	200,00	1.000,00
5,20	10,00	m ²	Schalung für den Gerinnebeton	80,00	800,00
5,21	45,00	m	Fugenblech	15,00	675,00
5,22	80,00	m	Edelstahl-Erdungsband	15,00	1.200,00
5,23	10,00	Stk	Anschlusssteil für Erdungsband	55,00	550,00
5,24	5,00	Stk	Kernbohrungen bis DN 100 in Stahlbetonwände d = 25 cm	80,00	400,00
5,25	2,00	Stk	Kernbohrungen bis DN 125 in Stahlbetonwände d = 30 cm	120,00	240,00

5,26	2,00	Stk	Kernbohrungen bis DN 250 in Stahlbetonwände d = 30 cm	170,00	340,00
5,27	2,00	Stk	Kernbohrungen bis DN 500 in Stahlbetonwände d = 30 cm	300,00	600,00
5,28	20,00	cm ²	Bewehrungsstahl durchtrennen	2,50	50,00
Summe Titel 5 - Beton- und Mauerarbeiten					109.110,00

Titel 6 - Rohre und Schächte

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
6,01	20,00	m	Hochlastkanalrohr DN 160 PP SN 10	50,00	1.000,00
6,02	15,00	Stk	Zulage Bogen DN 160, PP SN 10, 15° / 30° / 45°	20,00	300,00
6,03	2,00	Stk	Zulage Überschiebmuffe DN 160, PP SN 10	40,00	80,00
6,04	2,00	Stk	Zulage Einfachabzweig 45° DN 160 / 160, PP SN 10	30,00	60,00
6,05	1,00	Stk	Verschlusssteller für Hochlastkanalrohr DN 160 PP SN 10	15,00	15,00
6,06	70,00	m	Hochlastkanalrohr DN 300, PP SN 10	40,00	2.800,00
6,07	8,00	Stk	Zulage Bogen DN 300, PP SN 10, 15° / 30° / 45°	220,00	1.760,00
6,08	1,00	Stk	Zulage Einfachabzweig 45° DN 300 / 160, PP SN 10	85,00	85,00
6,09	2,00	Stk	Anschluss DN 300 PP an vorh. Rohr	200,00	400,00
6,10	4,00	Stk	PP-Fertigteilschacht, T = bis 2,00 m, DN 300 PP / DN 300 PP	1.500,00	6.000,00
Summe Titel 6 - Rohre und Schächte					12.500,00

Titel 7 - Filteranlage / Einbauteile

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
7,01	1,00	Psch	DynaSand Carbon Filteranlage mit 6 Filtern	235.000,00	235.000,00
7,02	1,00	Psch	Druckluftanlage für die DynaSand Carbon Filteranlage	15.000,00	15.000,00
7,03	1,00	Stk	Adsorptionstrockner	2.000,00	2.000,00
7,04	1,00	Stk	Siebarmatur am Filterzulauf	2.000,00	2.000,00
7,05	1,00	Psch	Treppenanlage zur Filterbühne	11.000,00	11.000,00
7,06	1,00	Psch	Filterbühne	3.000,00	3.000,00
7,07	40,00	t	Erstbefüllung der Sandfiltration mit Granulat	1.600,00	64.000,00
7,08	10,00	m	Edelstahlgeländer W.-St. 1.4571	185,00	1.850,00
7,09	1,00	Psch	Treppenanlage zum Filterkeller	15.000,00	15.000,00
Summe Titel 7 - Filteranlage / Einbauteile					348.850,00

Titel 8 - Stahlhalle

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
8,01	1,00	Psch	Stahlhalle für die Filteranlage	80.000,00	80.000,00
Summe Titel 8 - Stahlhalle					80.000,00

Titel 9 - Pflasterarbeiten

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
9,01	25,00	m ²	Betonsteinpflaster aufnehmen, abfahren	12,00	300,00
9,02	25,00	m ²	Betonsteinpflaster aufnehmen, seitlich lagern	10,00	250,00
9,03	25,00	m ²	Betonsteinpflaster wieder verlegen	25,00	625,00
9,04	200,00	m ²	Erdplanum herstellen - 45 MN/m ²	1,20	240,00
9,05	80,00	m ³	Frostschutz - und Schottertragschicht 0/45 - 150 MN/m ²	45,00	3.600,00
9,06	200,00	m ²	Planum herstellen - 150 MN/m ²	1,50	300,00
9,07	150,00	m ²	Rechteckpflaster 10/20/8 liefern, verlegen	32,00	4.800,00
9,08	100,00	m	Pflaster schneiden	15,00	1.500,00
9,09	10,00	m	Bordsteine (Hochbord, Tiefbord) aufnehmen, entsorgen	10,00	100,00
9,10	10,00	m	Pflasterrinne, 1-zeilig, aufnehmen, entsorgen	8,00	80,00
9,11	80,00	m	Rundbordstein RB 150 x 220, r = 5 cm, liefern, versetzen	30,00	2.400,00
9,12	5,00	m	Bordsteine in Bögen als Zulage.	20,00	100,00
9,13	10,00	m	Zulage Bordsteine, L <= 50 cm, versetzen	15,00	150,00
9,14	5,00	Stk	Übergangsteine als Zulage.	25,00	125,00
9,15	25,00	m	Tiefbordstein TB 100 x 250 liefern, versetzen	22,00	550,00
9,16	5,00	Stk	Bordsteine, Pass- / Gehrungsschnitt	10,00	50,00
9,17	35,00	m	Pflasterrinne 16/16/12, 1-zeilig, liefern, versetzen	20,00	700,00
9,18	5,00	Stk	Pflasterrinne, Pass- / Gehrungsschnitt	10,00	50,00
9,19	2,00	m ²	Natursteinkleinpflaster	150,00	300,00
9,20	5,00	m ²	Mörtelbettung und Mörtelverfugung, als Zulage	20,00	100,00
Summe Titel 9 - Pflasterarbeiten				16.320,00	

Titel 10 - Straßenbauarbeiten

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
10,01	50,00	m ³	Boden- und Straßenunterbau außerhalb der Kanalgräben ausheben	15,00	750,00
10,02	50,00	m ³	Boden LAGA Z0 laden, abfahren, verwerten / entsorgen	12,00	600,00
10,03	10,00	t	Zulage Boden LAGA Z1.1 laden, abfahren, verwerten / entsorgen	20,00	200,00
10,04	100,00	m ²	Erdplanum herstellen - 45 MN/m ²	1,20	120,00
10,05	25,00	m ³	Frostschutz - und Schottertragschicht 0/45 - 150 MN/m ²	45,00	1.125,00
10,06	100,00	m ²	Planum herstellen - 150 MN/m ²	1,50	150,00
10,07	2,00	Stk	Straßenablauf 500/500 - D 400, ohne Geruchsverschluss	600,00	1.200,00
Summe Titel 10 - Straßenbauarbeiten				4.145,00	

Titel 11 - Wasserhaltung

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
11,01	1,00	Psch	Pumpenanlage Q = 20 l/s	800,00	800,00
11,02	3,00	Stk	Umsetzen der Pumpenanlage	50,00	150,00

11,03	3,00	Stk	Pumpensümpfe	80,00	240,00
11,04	10,00	m	Kanalrohr PVC-KG DN 150	30,00	300,00
11,05	10,00	Stk	Zulage Formteil PVC-KG DN 150	17,00	170,00
11,06	2,00	Stk	Anschluss DN 300 PVC an vorh. Kanal	350,00	700,00
11,07	1,00	m³	Ziegelmauerwerk wasserundurchlässig herstellen	1.000,00	1.000,00
11,08	1,00	Stk	prov. Absperrung Kanalrohr DN 500 - Kanalblase	220,00	220,00
Summe Titel 11 - Wasserhaltung					3.580,00

Titel 12 - Arbeiten auf Nachweis

	Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
12,01	10,00	h	Vorarbeiter, Polier, Schachtmeister	50,00	500,00
12,02	30,00	h	Facharbeiter (Schlosser, Maurer, etc.)	45,00	1.350,00
12,03	10,00	h	Helfer	35,00	350,00
12,04	5,00	h	Kompressor	50,00	250,00
12,05	5,00	h	Lkw/Allrad-Kipper 15 t	65,00	325,00
12,06	5,00	h	Radlader	64,00	320,00
12,07	5,00	h	Mobilbagger 1,0 m³	95,00	475,00
Summe Titel 12 - Arbeiten auf Nachweis					3.570,00

Zusammenstellung

Summe Titel 1 - Baustelleneinrichtung	83.750,00
Summe Titel 2 - Baufeld freimachen, Abbruch und Demontage	6.730,00
Summe Titel 3 - Detektionsbohrungen für Kampfmitteluntersuchungen	2.050,00
Summe Titel 4 - Erdarbeiten und Verbau	130.340,00
Summe Titel 5 - Beton- und Mauerarbeiten	109.110,00
Summe Titel 6 - Rohre und Schächte	12.500,00
Summe Titel 7 - Filteranlage / Einbauteile	348.850,00
Summe Titel 8 - Stahlhalle	80.000,00
Summe Titel 9 - Pflasterarbeiten	16.320,00
Summe Titel 10 - Straßenbauarbeiten	4.145,00
Summe Titel 11 - Wasserhaltung	3.580,00
Summe Titel 12 - Arbeiten auf Nachweis	3.570,00
Summe Gewerk: Tief- und Betonbau mit Verfahrenstechnik, netto	800.945,00
+ 19 % MwSt	152.179,55
Summe Gewerk: Tief- und Betonbauarbeiten mit Verfahrenstechnik, brutto	953.124,55

Gewerk: Be- und Entlüftung

Titel 13 - Be- und Entlüftung

Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
13,01	1,00	Psch Baustelleneinrichtung	1.000,00	1.000,00
13,02	1,00	Psch Be- und Entlüftung Maschinenraum	10.000,00	10.000,00
Summe Titel 13 - Be- und Entlüftung				11.000,00

Zusammenstellung, Gewerk: Be- und Entlüftung

Summe Titel 13 - Be- und Entlüftung	11.000,00
Summe Gewerk: Be- und Entlüftung, netto	11.000,00
+ 19 % MwSt	2.090,00
Summe Gewerk: Be- und Entlüftung, brutto	13.090,00

Gewerk: Elektrotechnische Ausrüstung

Titel 14 - Elektrotechnische Ausrüstung

Menge	Einh.	Kurztext	EP [€]	GP [€]
14,01	1,00	Psch Anpassung EMSR-Ausrüstung für Filtration	10.000,00	10.000,00
14,02	1,00	Psch EMSR-Ausrüstung für Filtergebäude	10.000,00	10.000,00
14,03	1,00	Psch EMSR-Ausrüstung für Außenanlage	5.000,00	5.000,00
14,04	1,00	Psch Einbindung in das Prozessleitsystem der KA, Hardware	10.000,00	10.000,00
14,05	1,00	Psch Einbindung in das Prozessleitsystem der KA, Software	10.000,00	10.000,00
Summe Gewerk: Elektrotechnische Ausrüstung, netto				45.000,00
+ 19 % MwSt				8.550,00
Summe Gewerk: Elektrotechnische Ausrüstung, brutto				53.550,00

Zusammenstellung der Baukosten

Summe Gewerk: Tief- und Betonbau mit Verfahrenstechnik, netto	800.945,00
Summe Gewerk: Be- und Entlüftung, netto	11.000,00
Summe Gewerk: Elektrotechnische Ausrüstung, netto	45.000,00
Rundung	399,54
Baukosten gesamt, netto	857.344,54
zzgl. 19 % MwSt.	162.895,46
Baukosten gesamt, brutto	1.020.240,00

Differenzierung der Erstinvestitionskosten für die Kostenrechnung nach KVR-Leitlinien	
Bautechnik, netto (entspr. Baukosten abzgl. Maschinen- und EMSR-Technik)	463.494,54
Maschinenteknik, netto (entspr. Teil 7 - Filteranlage / Einbauteile)	348.850,00
EMSR-Technik, netto (entspr. Teil 15 - Elektronische Ausrüstung)	45.000,00
Nebenkosten, netto (Honorare, Prüfgebühren, etc. / ca. 20% der Baukosten)	171.468,91
Erstinvestitionskosten gesamt, netto	1.028.813,45
zzgl. 19 % MwSt.	195.474,56
Erstinvestitionskosten gesamt, brutto	1.224.288,01

A6 Kostenrechnung nach KVR-Leitlinien

Betriebs- und Anlagendaten		Var. 1 - Ozonung	Var. 2 - GAK-Filtration
Anlageninformationen		Kläranlage Bad Honnef-Aegidienberg	
Einwohnerwert Ausbaugröße	[E]	10.000	10.000
Einwohnerwert Anschlussgröße	[E]	8.190	8.190
Jahresabwassermenge (JAM) der Kläranlage	[m³/a]	950.000	950.000
Behandelte JAM der Stufe zur Mikroschadstoffelimination	[m³/a]	950.000	950.000
Behandelte Anteil der JAM der Stufe zur Mikroschadstoffelimination	[%]	100%	100%
Auslegungswassermenge der Stufe zur Mikroschadstoffelimination	[m³/h]	432	432
Jahresschmutzwassermenge (JSM)	[m³/a]	480.000	480.000

Annahmen zur Kostenermittlung (netto)		Var. 1 - Ozonung	Var. 2 - GAK-Filtration
Nebenkosten			
Elektrische Energie	[€/kWh]	0,19	0,19
mittlerer spezifischer Energiebedarf	[kWh/m³]	0,07	0,02
Personal	[€/(P·a)]	60000	60000
Wartung/Instandhaltung	[%] Bautech.	1,00	1,00
(%-Anteil an Investitionskosten für Bau-, Maschinen- und EMSR-Technik)	[%] Masch.	4,00	4,00
	[%] EMSR	2,00	2,00
Sauerstoff	[€/kg _{O2}]	0,21	-
mittlerer Jahresbedarf (Sauerstoff / GAK)	[Mg/a]	41,2	40,5
GAK - Frische Kohle	[€/Mg _{GAK}]	-	1600
GAK - Reaktivierte Kohle	[€/Mg _{GAK}]	-	1170
GAK - Reaktivierungsverluste (10 bis 20 %)	[%]	-	0,15
Schlamm Entsorgung	[€/Mg]	-	-

Erstinvestitionskosten und laufende Kosten		Var. 1 - Ozonung	Var. 2 - GAK-Filtration
Erstinvestitionskosten (netto)			
Bezugsjahr der Kosten		2020	2020
Bautechnik	[€]	413.953	463.495
Maschinentechnik	[€]	449.450	348.850
EMSR-Technik	[€]	45.000	45.000
Nebenkosten	[€]	181.681	171.469
Gesamtkosten	[€]	1.090.084	1.028.813
Bemerkung	[-]		
Laufende Kosten (netto)			
Energie	[€/a]	12.879	3680
Personal	[€/a]	30.000	15000
Wartung / Instandhaltung	[€/a]	23.018	19489
Sauerstoff	[€/a]	8.700	-
GAK	[€/a]	-	49997
Transport / Logistik	[€/a]	1440	120
Schlamm Entsorgung (FM, FHM, PAK)	[€/a]	-	-
Einsparungen bei Abwasserabgabe	[€/a]	-	-
Sonstiges	[€/a]	4200	-
Gesamtkosten	[€/a]	80.236	88.286
Bemerkung	[-]	Transport: 12 Lieferungen pro Jahr Sonstiges: Miete der Sauerstoffanlage inkl. Verdampfer	Einsparungen der Abwasserabgaben mit ca. 1.450,- €/a wurden nicht berücksichtigt

Ermittlung der Jahreskosten und spez. Jahreskosten			Var. 1 - Ozonung	Var. 2 - GAK-Filtration
Annahmen zur Berechnung der Jahreskosten				
Bezugsjahr			2020	2020
Zinsen	[%]	3	-	-
Nutzungsdauer Bautechnik , Nebenkosten	[a]	30	-	-
Nutzungsdauer Maschinentechnik	[a]	15	-	-
Nutzungsdauer EMSR-Technik	[a]	10	-	-
Diskontierungsfaktor DFAKE (zur Ermittlung der Reinvestitionskostenbarwerte)	[-] n=	20 a	0,5537	0,5537
	[-] n=	15 a	0,6419	0,6419
	[-] n=	10 a	0,7441	0,7441
Kapitalwiedergewinnungsfaktor KFAKR (zur Umrechnung des Investitionskostenbarwertes in eine gleichförmige Kostenreihe)	[-] n=	30 a	0,0510	0,0510

Erstinvestitionskosten				
Bautechnik + Nebenkosten	[€]		595.634	634.963
Maschinentechnik	[€]		449.450	348.850
EMSR Technik	[€]		45.000	45.000
Gesamt Erstinvestitionen	[€]		1.090.084	1.028.813

Laufende Kosten				
Energie	[€/a]		12.879	3.680
Personal	[€/a]		30.000	15.000
Wartung / Instandhaltung	[€/a]		23.018	19.489
Sauerstoff	[€/a]		8.700	-
GAK	[€/a]		-	49.997
Transport / Logistik	[€/a]		1.440	120
Schlammentsorgung (FM, FHM, PAK)	[€/a]		-	-
Einsparungen bei Abwasserabgabe	[€/a]		-	-
Sonstiges	[€/a]		4.200	-
Gesamt Laufende Kosten	[€/a]		80.236	88.286

Investitionskostenbarwerte				
Bautechnik + Nebenkosten	[€]		595.634	634.963
Maschinentechnik (Reinvest nach 15 Jahren)	[€]		737.935	572.764
EMSR-Technik (Reinvest nach 10 und nach 20 Jahren)	[€]		103.400	103.400
Gesamt Investitionskostenbarwert	[€]		1.436.969	1.311.127

Investiver Anteil der Jahreskosten				
Bautechnik + Nebenkosten	[€/a]		30.389	32.395
Maschinentechnik	[€/a]		37.649	29.222
EMSR-Technik	[€/a]		5.275	5.275
Gesamt investiver Anteil der Jahreskosten	[€/a]		73.313	66.893

Jahreskosten				
Jahreskosten gesamt	[€/a]		153.549	155.179
Spez. Jahreskosten je m³ Abwasser (JAM)	[€/m³]		0,16	0,16
Spez. Jahreskosten je m³ Schmutzwasser (JSM)	[€/m³]		0,32	0,32
Spez. Jahreskosten je Einwohner (EW)	[€/(E·a)]		18,75	18,95

A7 IUTA – Analysenbericht Nr. F 20/530

Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.

IUTA · Bliersheimer Straße 58-60 · 47229 Duisburg

Ingenieurbüro für Bauwesen Schmidt GmbH
Herr Dr.-Ing. Robeck
Rhöndorfer Straße 46,
53604 Bad Honnef



Vorstand
Prof. Dr.-Ing. Dieter Bathen
Wissenschaftlicher Leiter
Vertretungsberechtigt gemäß § 26 BGB:
Dr.-Ing. Stefan Haep
Vorstandsvorsitzender
und Geschäftsführer
Dipl.-Ing. Jochen Schiemann
Stellvertr. Vorstandsvorsitzender
und Geschäftsführer
Telefon: 02065/418-0
Telefax: 02065/418-211
Email: info@iuta.de
Internet: <http://www.iuta.de>
Datum: 11.12.2020

IUTA – Analysenbericht Nr.

F 20/530 B

(Dieser Bericht ersetzt den Analysenbericht F 20/530 vom 21.09.2020)

Probenahme und Analytik zur Machbarkeitsstudie 4. Reinigungsstufe auf der Kläranlage Aegidienberg

Analysenbericht Nr. F 20/530 B

Analysenlabor	Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) Bereich Forschungsanalytik / Umwelthygiene & Spurenstoffe Bliersheimer Straße 58-60 47229 Duisburg	
Ansprechpartner	Frau Andrea Börgers Herr Dr. Jochen Türk E-Mail: analysis@iuta.de	(Tel.: 02065 / 418 - 157) (Tel.: 02065 / 418 - 179)
Probenart	Abwasser und Oberflächengewasser	
Parameter	Mikroschadstoffe und Basisparameter	
Probenahme	24 h-Mischprobe (Probenahme durch Personal der Kläranlage) und qualifizierte Stichprobe	
Probenehmer	Herr Reinders	
Probenahmeort	Kläranlage Aegidienberg Kläranlagenzulauf und -Ablauf, und korrespondierendes Oberflächengewässer vor und nach der Einleitung der Kläranlage	
Probenahmedatum	15.06.2020 bis 22.07.2020	
Probeneingang	15.06.2020 bis 23.07.2020	
Probenmenge	12 x erweitertes Monitoring und 10 x Datenverdichtung	
Bearbeitungszeitraum	15.06.2020 bis 02.09.2020	

1. Experimentelles

Im Rahmen der Analytik zur Machbarkeitsstudie 4. Reinigungsstufe auf der Kläranlage Aegidienberg wurde zunächst ein erweitertes Monitoring in Kläranlagenzu- und ablauf und im korrespondierenden Gewässer oberhalb und unterhalb der Einleitung der Kläranlage in das Gewässer durchgeführt. Dies sollte zweimalig bei Trockenwetter und zweimalig bei Regenwetter nur auf der Kläranlage durchgeführt werden. Aufgrund des anhaltenden Trockenwetters wurden die Regenwetterproben in Abstimmung mit der Bezirksregierung Köln in eine weitere Serie bei Trockenwetter umgewandelt. Darüber hinaus wurde zur Datenverdichtung ein fünftägiges Monitoring des Kläranlagenzu- und ablaufs auf ein reduziertes Stoffspektrum durchgeführt. Die durchgeführten Analysen richteten sich nach den Empfehlungen des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe NRW (Broschüren: Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination, 2. Überarbeitete und erweiterte Auflage, Stand 09/2016 und Mikroschadstoffentfernung machbar? Wesentliche Inhalte einer Machbarkeitsstudie für Anlagen zur Mikroschadstoffelimination mit aktualisierter Stoffliste von 09/2016).

Die Probenahme der 24-h Mischproben erfolgte durch das Personal der Kläranlage. Die Proben wurden mittels automatischer Probenehmer zeitproportional entnommen.

Die Probenahme der qualifizierten Stichproben erfolgte nach SAA 1.1.2 (Probenahme aus Fließgewässern, Januar 2019) nach DIN EN ISO 5667-6. Die Bestimmung der Vor-Ort-Parameter erfolgte nach folgenden SAAs: 1.3.1 (Bestimmung der Temperatur, Januar 2019, nach DIN EN ISO 10532), 1.3.2 (Bestimmung des pH-Wertes, April 2019, nach DIN EN ISO 20523), 1.3.3 (Bestimmung der Leitfähigkeit, Januar 2019, nach DIN EN ISO 27888) und 1.3.4 (Bestimmung des gelösten Sauerstoffs, Januar 2020, nach DIN EN ISO 5814).

Die Analyse der Arzneimittelwirkstoffe, Pestizide und Korrosionsschutzmittel 1H-Benzotriazol, Candesartan, Carbamazepin, Ciprofloxacin, Clarithromycin, Diclofenac, Flufenacet, Gabapentin, Ibuprofen (in Zuläufen), Isoproturon, Losartan, Metoprolol, Propiconazol, Sulfamethoxazol, Tebuconazol, Terbutryn und Valsartan erfolgte nach SAA 1.9.5 (Bestimmung von Pharmaka, Pestiziden und Industriechemikalien in Wasserproben mittels LC-MS/MS nach Direktinjektion, April 2019, nach DIN 38407-47 und ISO 21676).

Die Analyse von Ibuprofen in Kläranlagenabläufen und in Gewässerproben wurde nach SAA 1.9.4 (Bestimmung von Pharmaka, Pestiziden und Industriechemikalien in Wasserproben mittels LC-MS/MS und Festphasenextraktion, April 2019) durchgeführt.

Die Bestimmung von PFOA, PFOS und H4-PFOS erfolgte nach SAA 1.9.1 (Bestimmung von Per- und Polyfluorierten Kohlenwasserstoffen in Wasserproben mittels HPLC-MS/MS nach DIN 38407-42, Mai 2019, nach DIN 38407-42).

Die Bestimmung der östrogenen Aktivität erfolgte nach SAA 1.10.1 (Bestimmung der östrogenen Aktivität in Wasserproben mittels A-YES Assay, April 2019, nach ISO 19040-2).

Die Analyse von Acesulfam und Mecoprop erfolgte mittels LC-MS/MS.

Die Analyse von Galaxolid erfolgte mittels GC-MS/MS.

Die Analyse von Bromid und Bromat erfolgte mittels IC-ICP-MS.

Die Analyse des DOC erfolgte in Fremdvergabe durch ein akkreditiertes Labor nach DIN EN 1484.

Die Ozonzehrungsversuche wurden als Batchversuche bei einer Zugabe von 5 und 10 mgO₃/L mit den 24-h Mischproben des Ablaufs der Kläranlage vom 06.-07.04.2020 und vom 07.-08.04.2020 durchgeführt. Zur Herstellung des Ozongases aus Sauerstoff wurde ein Anseros COM - AD - 01 Ozongenerator (Anseros Klaus Nonnenmacher GmbH, Deutschland) verwendet.

Die Bewertung der Messwerte orientiert sich an Umweltqualitätsnormen und Präventivwerten für Oberflächengewässer. Beispiele für diese Werte sind in der D4-Liste des Landes NRW zu finden (<https://www.flussgebiete.nrw.de/monitoringleitfaden-oberflaechengewaesser-anlage-d4-7724>). Diese Liste wird fortlaufend aktualisiert. Das Bewertungsschema ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Schema zur Bewertung der chemischen Qualität der Oberflächengewässer vor und nach der Einleitung der Kläranlage.

sehr gut	gut	mäßig	unbefriedigend	schlecht	nicht bewertbar
< ½ BK	½ BK - 1 BK	1 BK – 2 BK	2 BK – 4 BK	> 4 BK	BK < BG

BK = Bewertungskriterium
BG = Bestimmungsgrenze

2. Analyseergebnisse

Tabelle 2a: Ergebnisse des erweiterten Monitorings des ersten Trockenwettertages (Teil 1).

		Zulauf Biologie	Ablauf KA	OGew OH	OGew UH
		06.04. - 07.04.2020 keine Angabe 24-h Mischprobe Kläranlage	06.04.2020	11:15 - 11:23	11:40 - 11:48
		M 200407/053	M 200407/051	M 200406/014	M 200406/015
Probenahmestelle	Datum	Uhrzeit	Art der Probenahme	Probenahme durch	Bezeichnung IUTA
		Einheit	BK	min. BG	
Vor Ort	Lufttemperatur	°C	-	-	20,0
Parameter	Wassertemperatur	°C	-	-	10,4
	pH	-	-	-	7,8
	Leitfähigkeit	µS/cm	-	-	376
	Sauerstoffkonzentration	mg/L	-	-	11,2
Basisparameter	DOC	mg/L	65	7,2	2,3
	Bromid	µg/L	120	92	48
Arzneimittel- wirkstoffe und Metabolite	Candesartan	ng/L	100	2.100	< 30
	Carbamazepin	ng/L	500	470	< 30
	Ciprofloxacin	ng/L	36	150	< 10
	Clarithromycin	ng/L	100	< 30	< 30
	Diclofenac	ng/L	50	880	27
	Gabapentin	ng/L	100	1.700	< 30
	Ibuprofen	ng/L	10	< 10 ^a	< 10 ^a
	Losartan	ng/L	100	< 30	< 30
	Metoprolol	ng/L	7.300	310	< 30
	Sulfamethoxazol	ng/L	600	91	< 30
	Valsartan	ng/L	100	150	< 30
Östrogene Aktivität	A-YES	ng _{EEO} /L	0,40	0,13	0,016
			32		0,042

Die mit * gekennzeichneten Parameter sind durch die DAkkS (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage D-PL-19759-01-00 festgelegten Umfang.

^a nach SPE

^b Die Analysen wurden in Fremdvergabe durchgeführt.

Tabelle 2b: Ergebnisse des erweiterten Monitorings des ersten Trockenwettertages (Teil 2).

Probenahmestelle		Zulauf Biologie	Ablauf KA	OGew OH	OGew UH
Datum		06.04. - 07.04.2020		06.04.2020	
Uhrzeit		keine Angabe		11:15 - 11:23	11:40 - 11:48
Art der Probenahme		24-h Mischprobe		qualifizierte Stichprobe	
Probenahme durch		Kläranlage		Georg Reinders	
Bezeichnung IUTA		M 200407/053	M 200407/051	M 200406/014	M 200406/015
	Einheit	BK	min. BG		
Pestizide					
Flufenacet	* ng/L	40	10	< 10	< 10
Isoproturon	* ng/L	300	30	< 30	< 30
Mecoprop	ng/L	100	30	< 30	40
Propiconazol	* ng/L	1.000	30	< 30	< 30
Tebuconazol	* ng/L	1.000	30	< 30	< 30
Terbutryn	* ng/L	65	20	39	< 20
Korrosions- schutzmittel					
1H-Benzotriazol	* ng/L	10.000	30	22.000	< 30
Moschus- duftstoffe					
Galaxolid	ng/L	7.000	30	5.800	< 30
PFCs					
PFOA	ng/L	100	30	< 30	< 30
PFOS	ng/L	0,65	10	< 10	< 10
H4-PFOS	ng/L	100	10	< 10	< 10
Süßstoffe					
Acesulfam	ng/L	10.000	30	58.000	< 30
					1.800
					930
					< 30
					< 10
					< 10
					< 30

Die mit * gekennzeichneten Parameter sind durch die DAkKS (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage D-PL-19759-01-00 festgelegten Umfang.



Tabelle 4b: Ergebnisse des erweiterten Monitorings des dritten Trockenwettertages (Teil 2).

Probenahmestelle	Zulauf Biologie	Ablauf KA	OGew OH	OGew UH
Datum	21.07. - 22.07.2020	21.07.2020	11:26 - 11:34	12:00 - 12:08
Uhrzeit	keine Angabe	keine Angabe	qualifizierte Stichprobe	qualifizierte Stichprobe
Art der Probenahme	24-h Mischprobe	24-h Mischprobe	Matin Funck	Matin Funck
Probenahme durch	Kläranlage	Kläranlage	M 200721/153	M 200721/152
Bezeichnung IUTA	M 200723/049	M 200723/050		
	Einheit	BK	min. BG	
Pestizide				
Flufenacet	* ng/L	40	10	< 10
Isoproturon	* ng/L	300	30	< 30
Mecoprop	ng/L	100	30	< 30
Propiconazol	* ng/L	1.000	30	< 30
Tebuconazol	* ng/L	1.000	30	< 30
Terbutryn	* ng/L	65	20	100
Korrosions- schutzmittel				
1H-Benzotriazol	* ng/L	10.000	30	15.000
Moschus- duftstoffe				
Galaxolid	ng/L	7.000	30	3.700
PFCs				
PFOA	ng/L	100	30	< 30
PFOS	ng/L	0,65	10	< 10
H4-PFOS	ng/L	100	10	< 10
Süßstoffe				
Acesulfam	ng/L	10.000	30	73.000

Die mit * gekennzeichneten Parameter sind durch die DAkKS (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage D-PL-19759-01-00 festgelegten Umfang.

Da im Rahmen der Trockenwetteruntersuchungen keinerlei Auffälligkeiten hinsichtlich besonderer Mikroschadstoffeinträge in das Gewässer durch den Kläranlagenablauf festgestellt werden konnten, wurde das Spektrum für die Datenverdichtung mit den vom KOM-M.NRW empfohlenen Parametern durchgeführt.

Tabelle 5a: Ergebnisse der Datenverdichtung (Teil 1).

Probenahmestelle Datum Art der Probenahme Probenahme durch Bezeichnung IUTA	Zulauf Biologie		Ablauf Kläranlage		Zulauf Biologie		Ablauf Kläranlage	
	M 200507/025	M 200507/026	M 200507/025	M 200507/026	M 200507/027	M 200507/028	M 200507/027	M 200507/028
	Einheit	BK	min. BG					
pH	*		-	7,8	8,0	7,7	7,8	7,8
Leitfähigkeit	*		-	1629	819	1563	743	743
DOC	^b		-	72	6,0	85	5,9	5,9
Bromid			-	160	73	160	70	70
Carbamazepin	*	500	30	340	360	370	400	400
Clarithromycin	*	100	30	< 30	39	< 30	< 30	< 30
Diclofenac	*	50	15	3.700	1.000	4.600	1.000	1.000
Metoprolol	*	7.300	30	2.800	270	2.800	190	190
Sulfamethoxazol	*	600	30	1.000	210	700	170	170
Pestizide	*		20	72	33	390	20	20
Korrosions- schutzmittel	*	10.000	30	19.000	1.900	26.000	1.200	1.200

Die mit * gekennzeichneten Parameter sind durch die DAkkS (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage D-PL-19759-01-00 festgelegten Umfang.

^b Die Analysen wurden in Fremdvergabe durchgeführt.

Tabelle 5b: Ergebnisse der Datenverdringung (Teil 2).

Probenahmestelle	Zulauf Biologie		Ablauf Kläranlage		Zulauf Biologie		Ablauf Kläranlage	
	06.-07.05.2020		07.-08.05.2020		24-h Mischprobe		24-h Mischprobe	
Datum	M 200507/029		M 200507/030		M 200512/013		M 200512/014	
Art der Probenahme	24-h Mischprobe		24-h Mischprobe		24-h Mischprobe		24-h Mischprobe	
Probenahme durch	Kläranlage		Kläranlage		Kläranlage		Kläranlage	
Bezeichnung IUTA	M 200507/029		M 200507/030		M 200512/013		M 200512/014	
	Einheit	BK	min.	BG				
pH	*		-		7,6	7,8	8,0	7,1
Leitfähigkeit	*	µS/cm	-		1383	680	1600	877
DOC	^b	mg/L	-		97	4,1	105	6,9
Bromid		µg/L	-		150	76	180	75
Carbamazepin	*	ng/L	30		440	440	260	420
Clarithromycin	*	ng/L	30		33	< 30	< 10	< 10
Diclofenac	*	ng/L	15		5.200	1.200	2.100	380
Metoprolol	*	ng/L	30		2.800	210	2.700	200
Sulfamethoxazol	*	ng/L	30		510	150	280	130
Terbutryn	*	ng/L	20		95	28	47	27
Korrosions- schutzmittel	*	ng/L	30		24.000	1.300	39.000	850

Die mit * gekennzeichneten Parameter sind durch die DAkkS (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage D-PL-19759-01-00 festgelegten Umfang.

^b Die Analysen wurden in Fremdvergabe durchgeführt.

Tabelle 5c: Ergebnisse der Datenverdichtung (Teil 3).

Probenahmestelle		Zulauf Biologie	Ablauf Kläranlage
Datum		08.-09.05.2020	
Art der Probenahme		24-h Mischprobe	
Probenahme durch		Kläranlage	
Bezeichnung IUTA		M 200512/015	M 200512/016
	Einheit	BK	min. BG
pH	*		
		7,4	7,9
Basis- parameter	*		
Leitfähigkeit	*	1437	921
DOC	^b	83	8,0
Bromid		140	97
Carbamazepin	*	500	450
Clarithromycin	*	100	< 10
Diclofenac	*	50	2.500
Metoprolol	*	7.300	260
Sulfamethoxazol	*	600	120
Pestizide	*		
Terbutryn		65	20
Korrosions- schutzmittel	*		
1H-Benzotriazol		10.000	30
		39.000	1.200

Die mit * gekennzeichneten Parameter sind durch die DAkkS (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage D-PL-19759-01-00 festgelegten Umfang.

^b Die Analysen wurden in Fremdvergabe durchgeführt.

3. Ergebnisse der Ozonzehrungsversuche

Nach der Zugabe des Ozonstarkwassers in den Konzentrationen 5 bzw. 10 mg_{O₃}/L wurde die Ozonkonzentration in der Probe über einen Zeitraum von 10 Minuten analysiert. Die Ozonkonzentration wurde dabei mittels Indigofarbstoff bestimmt. In beiden Proben wurde die Bromatbildung bei der jeweiligen spezifischen zudosierten Ozondosis bestimmt. Tabellen 6 und 7 zeigen die spezifische Ozondosis und das gebildete Bromat als Einzelbestimmung. Die Versuche wurden als Doppelbestimmung durchgeführt. Die Bestimmungsgrenze für gelöstes Ozon in der Probe lag bei 0,2 mg/L. Die Profile der Ozonzehrung sind in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt.

Tabelle 6: Spezifische Ozondosis (z_{spez}) und Bromatbildung der Ablaufprobe vom 06.-07.04.2020.

Parameter	Einheit	Ausgangsprobe M 200407/051	1. Trockenwettertag	
			Zugabe 5 mg O ₃	Zugabe 10 mg O ₃
Bromid	µg/L	92	-	-
Bromat	µg/L	< 1	4,7	24
DOC	mg/L	7,2	-	-
z_{spez}	mg _{O₃} /mg _{DOC}	-	0,69	1,4

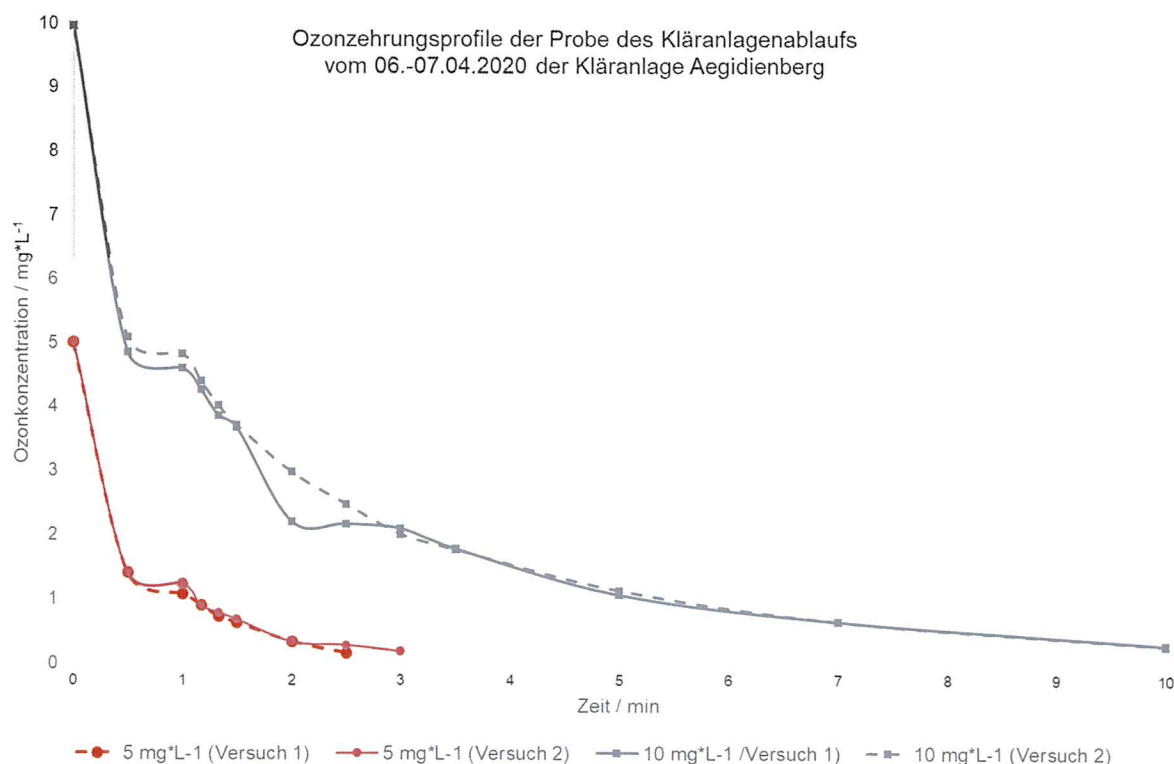


Abbildung 1: Ozonzehrungsprofile der 24h-Mischprobe des Abflufs der Kläranlage Aegidienberg des ersten Trockenwettertags nach Zugabe von 5 und 10 mg_{O₃}/L als Doppelbestimmung.

Die Ozonzehrung der Abwasserprobe konnte gut beobachtet werden. Nach einer Reaktionszeit von 10 Minuten lag die Ozonkonzentration noch knapp über der Bestimmungsgrenze von 0,2 mg_{O₃}/L. Die spezifische Ozondosis lag mit einem Wert von 1,4 mg_{O₃}/mg_{DOC} deutlich über der im Regelfall notwendigen spezifischen Ozondosis einer erweiterten Abwasserbehandlung zur Reduzierung von Mikroschadstoffen von 0,4 bis 0,7 mg_{O₃}/mg_{DOC}. Bei einem z_{spez} von 0,69 mg_{O₃}/mg_{DOC} konnte keine signifikante Bromatbildung beobachtet werden (Trinkwassergrenzwert für Bromat in Deutschland = 10 µg/L; Vorschlag für eine Umweltqualitätsnorm von 50 µg/L Bromat).

Ein ähnliches Bild konnte bei der Ablaufprobe des zweiten Trockenwettertages beobachtet werden. Durch den leicht niedrigeren DOC lagen die spezifischen Ozondosen bei 0,81 und 1,6 mg_{O₃}/mg_{DOC}. Die Bromatbildung erreichte bereits bei einer Zugabe von 5 mg_{O₃}/L den Trinkwassergrenzwert von 10 µg/L. Aufgrund des hohen Z_{spez} von 0,81 mg_{O₃}/mg_{DOC} kann die Bromatbildung jedoch auch bei diesem Versuch als nicht relevant eingeordnet werden.

Tabelle 7: Spezifische Ozondosis (Z_{spez}) und Bromatbildung der Ablaufprobe vom 07.-08.04.2020.

Parameter	Einheit	2. Trockenwettertag		
		Ausgangsprobe M 200408/023	Zugabe 5 mg O ₃	Zugabe 10 mg O ₃
Bromid	µg/L	86	-	-
Bromat	µg/L	< 1	10	40
DOC	mg/L	6,2	-	-
Z_{spez}	mg _{O₃} /mg _{DOC}	-	0,81	1,6

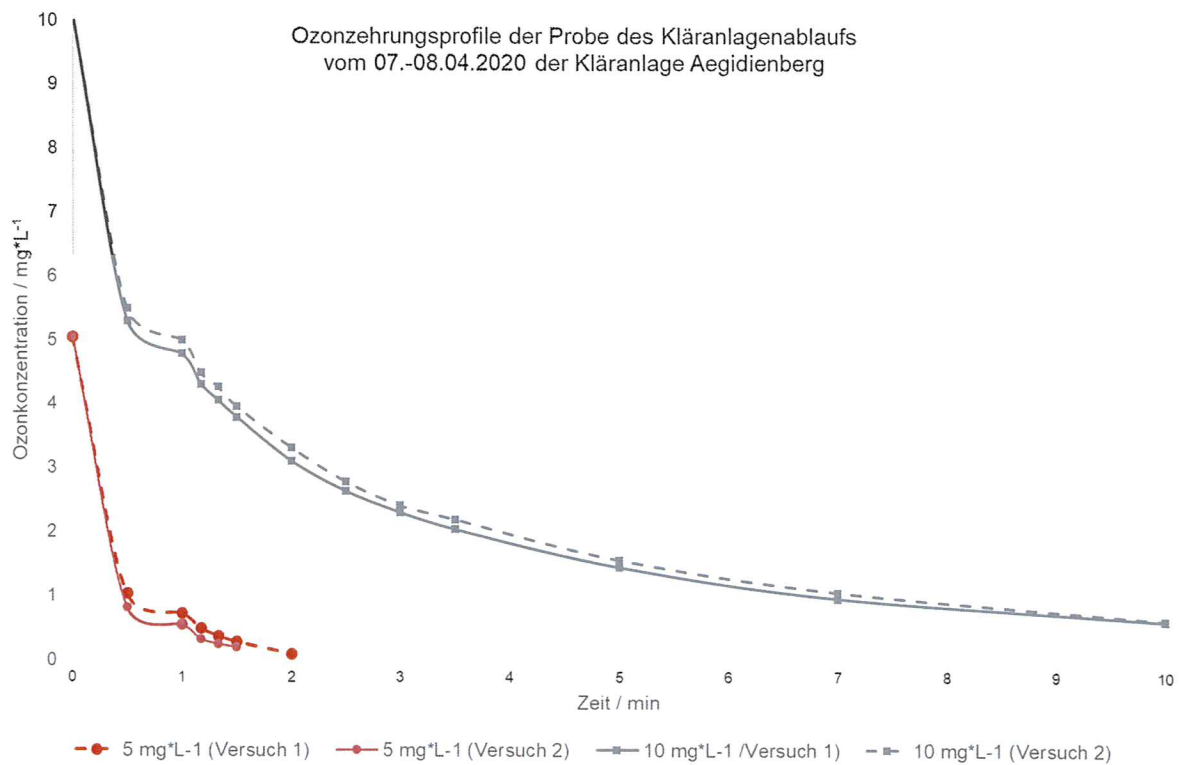


Abbildung 2: Ozonzehrungsprofile der 24h-Mischprobe des Ablaufs der Kläranlage Aegidienberg des zweiten Trockenwettertags nach Zugabe von 5 und 10 mg_{O₃}/L als Doppelbestimmung.

4. Messunsicherheiten

Die erweiterten Messunsicherheiten U (inkl. der Probenahme) der akkreditierten Parameter sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Die Ermittlung der erweiterten Messunsicherheit erfolgt gemäß DIN ISO 11352:2013 mit einem Konfidenzintervall von 95% und dem Erweiterungsfaktor $k = 2,0$.

Tabelle 3: Erweiterte Messunsicherheit mit einem Faktor $k = 2$ (95%igen Vertrauensbereich) der analysierten Parameter.

Substanzgruppe	Parameter	Erweiterte Messunsicherheit U / %	Norm/SAA
Arzneimittelwirkstoffe und Metabolite	Candesartan	47	DIN 38407-47
	Carbamazepin	40	DIN 38407-47
	Ciprofloxacin	34	DIN 38407-47
	Clarithromycin	58	DIN 38407-47
	Diclofenac	93	DIN 38407-47
	Gabapentin	38	DIN 38407-47
	Ibuprofen	44 (45)	DIN 38407-47 (SAA 1.9.6)
	Losartan	39	DIN 38407-47
	Metoprolol	45	DIN 38407-47
	Sulfamethoxazol	48	DIN 38407-47
Östrogene Aktivität	Valsartan	39	DIN 38407-47
	A-YES	59	ISO 19040-2
Pestizide	Flufenacet	36	DIN 38407-47
	Isoproturon	59	DIN 38407-47
	Propiconazol	41	DIN 38407-47
	Tebuconazol	51	DIN 38407-47
	Terbutryn	41	DIN 38407-47
Korrosionsschutzmittel	1H-Benzotriazol	42	DIN 38407-47

5. Anmerkungen

Die Konzentrationen der Mikroschadstoffe im Gewässer wurden, wie erwartet, durch den Eintrag der Kläranlage signifikant erhöht. Insbesondere die Konzentrationen der Arzneimittelwirkstoffe Candesartan (Antihypertonikum), Diclofenac (Analgetikum) und Gabapentin (Antikonvulsivum) liegen deutlich über der vierfachen vorgeschlagenen Umweltqualitätsnorm (UQN). Die UQN für Candesartan und Gabapentin beziehen sich allerdings auf Präventivwerte. Die restlichen untersuchten Stoffgruppen (Pestizide, Korrosionsschutzmittel, Moschusduftstoffe, perfluorierte Chemikalien und Süßstoffe) liegen in Konzentrationen deutlich unterhalb der UQN Vorschläge vor. Die Konzentrationen der perfluorierten Chemikalie PFOS können aufgrund der derzeit erreichbaren Bestimmungsgrenzen und der sehr niedrigen UQN nicht bewertet werden. Für die östrogene Aktivität einer Wasserprobe wurde ein Schwellenwert von 0,4 ng/L vorgeschlagen. Die Untersuchungen mittels A-YES Assay zeigen in den analysierten Gewässerproben keinerlei signifikante Konzentrationen auf.

Die durchgeführten Untersuchungen zu Ozonzehrung und Bromatbildung führten zu keiner signifikanten Bromatbildung bei der Dosierung von Ozon in den für die erweiterte Abwasserbehandlung typischen Mengen. Bei hohen Ozondosen ist die Bromatbildung allerdings zu beachten.

Im Korrekturbericht wurden Übertragungsfehler (min. BG östrogene Aktivität und Tabelle 4b Werte Zulauf Biologie und Ablauf Kläranlage für Terbutryn, 1H-Benzotriazol, Galaxolid und Acesulfam) korrigiert.

Institut für Energie-
und Umwelttechnik e.V.



Dr.-Ing. St. Haep
(Geschäftsführer)



Dr. rer. nat. J. Türk
(Bereichsleitung)

Hinweise gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 (allgemeine Kriterien zum Betreiben von Prüflaboratorien)

1. Die Analysenergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die in diesem Analysenbericht aufgeführten Proben.
2. Dieser Analysenbericht darf ohne unsere schriftliche Genehmigung nicht auszugsweise vervielfältigt werden.
3. Das Probenmaterial wird drei Monate als Rückstellprobe verwahrt.