

Kläranlage Vlotho



Studie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho

1. Ausfertigung
November 2016

PFI Planungsgemeinschaft GbR

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

Alte Bahnhofstr. 56
44892 Bochum

Tel.: 0234 / 9 20 03 -0
Fax: 0234 / 9 20 03 -45

info@pfi.de
www.pfi.de

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Veranlassung und Auftrag	1
2.	Stand der Technik	3
2.1	Technische Verfahrensvarianten	3
2.1.1	Einsatz von Pulveraktivkohle	3
2.1.2	Einsatz von granulierter Aktivkohle	10
2.1.3	Einsatz von Ozon.....	15
2.1.4	Sonstige Verfahrensvarianten	22
2.2	Wesentliche Stoffeigenschaften	25
3.	Grundlagenermittlung	29
3.1	Derzeitige Verfahrenstechnik auf der Kläranlage Vlotho	29
3.2	Zukünftiges Anlagenkonzept für die Kläranlage Vlotho	31
3.3	Alleinstellungsmerkmale der Kläranlage Vlotho	31
3.4	Klärwerksbelastung	32
3.5	Wassermengen	34
3.6	Ablaufwerte	35
3.7	Spurenstoffbelastung	36
3.7.1	Abwasseranteil im Vorfluter	37
3.7.2	Spurenstoffbelastung im Kläranlagenablauf	38
3.7.3	Spurenstoffbelastung im Vorfluter unterhalb und oberhalb der KA	43
4.	Neubau einer Belebungsanlage auf der Kläranlage Vlotho	46

5.	Variantenuntersuchung zur gezielten Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho	48
5.1	Variante 1: Pulveraktivkohledosierung in ein Kontaktbecken	48
5.1.1	Allgemeine Beschreibung	48
5.1.2	Dimensionierung.....	49
5.1.3	Einbindung in die Kläranlage Vlotho	50
5.1.4	Kostenaufstellung	51
5.2	Variante 2: Pulveraktivkohledosierung in den Zulauf zur Filtration.....	54
5.2.1	Allgemeine Beschreibung	54
5.2.2	Dimensionierung.....	54
5.2.3	Einbindung in die Kläranlage Vlotho	55
5.2.4	Kostenaufstellung	56
5.3	Variante 3: Filtration mit granulierter Aktivkohle	59
5.3.1	Allgemeine Beschreibung	59
5.3.2	Dimensionierung.....	59
5.3.3	Einbindung in die Kläranlage Vlotho	60
5.3.4	Kostenaufstellung	61
5.4	Variante 4: Ozondosierung nach der Nachklärung	64
5.4.1	Allgemeine Beschreibung	64
5.4.2	Dimensionierung.....	64
5.4.3	Einbindung in die Kläranlage Vlotho	65
5.4.4	Kostenaufstellung	67
5.5	Variante 5: Ozondosierung mit anschließender GAK-Filtration	70
5.5.1	Allgemeine Beschreibung	70
5.5.2	Dimensionierung.....	70
5.5.3	Einbindung in die Kläranlage Vlotho	71
5.5.4	Kostenaufstellung	72
6.	Variantenvergleich	76

6.1	Bewertungskriterien	76
6.2	Sensitivitätsanalysen	77
6.2.1	Betriebsmittelverbrauch	78
6.2.2	Betriebsmittelpreise	79
6.2.3	Strompreis	80
6.2.4	Zusammenfassung Sensitivitätsanalysen	81
6.3	Vergleich der Verfahrensvarianten und Vorzugsvariante.....	82
7.	Option 1: Kontinuierlich gespülte GAK-Filter	88
8.	Option 2: Kontinuierlich gespülte GAK-Filter und Teilabbruch des Filtrationsgebäudes	90
9.	Option 3: Höhenverstellbares Mittelbauwerk in den Nachklärbecken	93
10.	Zusammenfassung.....	95
11.	Literatur	98

ANHANG

Anhang 1 Bewertungsmatrix

1. Veranlassung und Auftrag

Die Vlothoer Wirtschaftsbetriebe betreiben die Kläranlage der Stadt Vlotho, die für die mechanisch-biologische Abwasserreinigung von 22.000 EW ausgelegt ist und eine Faulung zur Schlammbehandlung beinhaltet. Neben dem häuslichem Abwasser aus dem Stadtgebiet gelangt auch das Schmutzwasser mehrerer kleinerer Gewerbe zur Kläranlage.

Seit einigen Jahren werden die Auswirkungen von Mikroschadstoffen, wie beispielsweise Arzneimittelrückständen, in den Gewässern intensiv untersucht. Bei diesen Mikroverunreinigungen, die auch Spurenstoffe genannt werden, handelt es sich um Stoffe, die in sehr geringen Konzentrationen im Bereich von wenigen µg/l bis zu ng/l in den Gewässern vorliegen. Da Kläranlagen einen Haupteintragspfad für eine Reihe von Spurenstoffen darstellen können, rückt eine weitergehende Abwasserbehandlung immer mehr in den Fokus der Öffentlichkeit. Von staatlicher Seite resultiert dies in einer ausdrücklichen Empfehlung zum Ausbau kommunaler Kläranlagen zur Spurenstoffelimination. Der Bau einer Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination wird durch öffentliche Mittel gefördert, obwohl derzeit noch keine gesetzliche Grundlage für die Auslegung, den Betrieb oder die zu erzielende Reinigungsleistung besteht.

Da die Kläranlage bei Mischwasserzufluss zukünftig 35 % höhere Wassermengen aufnehmen muss und um den Energie- und Betriebsmittelverbrauch der Kläranlage langfristig zu senken, ist ab dem Jahr 2017 eine Ertüchtigung der Kläranlage Vlotho vorgesehen. Diese Ertüchtigung umfasst neben dem Neubau eines Faulbehälters und zahlreicher Reinvestitionsmaßnahmen auch den Neubau einer Belebungsanlage, die die bislang genutzte Biofiltration (Biofor-Anlage) zur biologischen Abwasserreinigung ersetzen soll. Im Rahmen des Gesamtkonzeptes zur Ertüchtigung der Kläranlage Vlotho ist auch die Elimination von anthropogenen Mikroverunreinigungen ein wichtiger Bestandteil der Planungen. Dabei ist zusätzlich zu der zu erwartenden Grundelimination von Mikroverunreinigungen in der neu zu errichtenden Belebungsanlage eine weitergehende Reinigungsstufe zur gezielten Spurenstoffelimination zu betrachten. Hierbei ist auch zu berücksichtigen, dass die Wasserrechtliche Erlaubnis für die Kläranlage in Kürze zur Novellierung ansteht.

Aus den genannten Gründen wurde die PFI Planungsgemeinschaft am 19.04.2016 mit der Erstellung einer Studie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho beauftragt. In der Studie sollen verschiedene Verfahrensvarianten zur weitergehenden Behandlung des kommunalen Abwassers gegenübergestellt und eine Vorzugsvariante herausgearbeitet werden. Dazu werden Varianten mit Aktivkohle- und Ozonbehandlung untersucht und hinsichtlich einer Reihe von Bewertungskriterien miteinander verglichen. Neben rein monetären Gesichtspunkten werden dabei auch qualitative Aspekte in die Bewertung einbezogen. Die derzeitige Situation der Kläranlage sowie die baulichen Gegebenheiten vor Ort werden bei der Entwicklung der Verfahrensvarianten und deren Beurteilung ebenfalls berücksichtigt.

Zur Schaffung einer einheitlichen Wissensbasis wird zu Beginn der Studie der derzeitige Stand des Wissens zusammengefasst. Dabei wird vor allem auf die unterschiedlichen Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination und die wesentlichen Stoffeigenschaften der Mikroverunreinigungen eingegangen.

Die Studie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho wird hiermit vorgelegt.

2. Stand der Technik

Organische Spurenstoffe werden auf unterschiedliche Wege in die Gewässer eingetragen. Einen wesentlichen Eintragspfad stellt der Ablauf einer Kläranlage dar. Zur Minimierung der Spurenstoffbelastung im Gewässer werden seit einigen Jahren verschiedene Technologien zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Abwasserreinigungsanlagen (ARA) großtechnisch getestet. [1]

2.1 Technische Verfahrensvarianten

2.1.1 Einsatz von Pulveraktivkohle

Durch den Einsatz von Aktivkohle in pulverisierter Form kann eine große Bandbreite von Mikroverunreinigungen adsorptiv aus dem Abwasser entfernt werden. Neben der in der Trinkwasseraufbereitung bereits seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzten Filtration mit granulierter Aktivkohle (GAK) ist in der Abwasserbehandlung zur Spurenstoffelimination auch die Verwendung von Pulveraktivkohle (PAK) von Bedeutung. [2]

Die Dosierung von PAK in einer kommunalen Kläranlage erfolgt entweder direkt in die biologische Stufe oder danach in das biologisch gereinigte Abwasser. Bei der Dosierung in die Biologie ist mit einem erhöhten PAK-Einsatz zu rechnen, da die organische Hintergrundbelastung, und somit die Konkurrenz der Spurenstoffe um die Sorptionsplätze der Aktivkohle, relativ hoch ist. Dennoch kann diese Verfahrensweise für kleine Anlagen interessant sein. Die Dosierung nach der biologischen Stufe stellt eine reduzierte organische Hintergrundbelastung und dadurch einen möglichst effizienten Einsatz der PAK sicher. Zur Abscheidung der PAK aus dem Abwasser stehen verschiedene Techniken zur Verfügung. Jedoch sollte eine Filtration des mit PAK versetzten Volumenstroms unabhängig von der vorhergehenden Abscheideeinheit unbedingt erfolgen, um die feindispersen PAK-Anteile aus dem gereinigten Abwasser zu entfernen. [2][3]

Die verfahrenstechnische Einbindung der PAK-Dosierung auf bestehenden Anlagen kann je nach vorhandener Bausubstanz und Verfahrenstechnik unterschiedlich geschehen. In jedem Fall ist ein Kontaktraum erforderlich, der die Adsorption der Spurenstoffe an die Pulveraktivkohle ermöglicht. Dies kann in einem separaten Kontaktbecken oder im Überstand einer evtl. vorhandenen Flockungsfiltration

geschehen. Bei Dosierung von PAK in ein separates Kontaktbecken kann im Ablauf des Kontaktbeckens eine Sedimentationseinheit angeordnet werden, bevor das gereinigte Abwasser filtriert wird. Die abgesetzte PAK wird dann in den Kontaktreaktor zurückgeführt und die Aufenthaltszeit der PAK dadurch erhöht. Die Überschuss-PAK (ÜPAK) wird in die Biologie gegeben um die noch freien Kapazitäten der PAK im Belebungsbecken zu nutzen und die PAK anschließend in der Nachklärung abzuscheiden. Alternativ kann auf die Sedimentationseinheit verzichtet und die PAK direkt im Flockungsfilter abgeschieden werden. Dies führt zu einer geringeren Aufenthaltszeit der PAK im System. Anstelle eines separaten Kontaktbeckens kann die PAK auch in den Zulauf zur Flockungsfiltration dosiert werden. Dadurch verkürzt sich die Kontaktzeit von PAK und Abwasser weiter. Das Rückspülwasser der Filtereinheit wird bei allen verfahrenstechnischen Varianten in den Zulauf zur Vorklärung oder zur Belebung gegeben und anschließend mit dem Primärschlamm (PS) oder Überschussschlamm (ÜS) abgeschieden. Eine Zugabe von Fällmittel und gegebenenfalls Flockungshilfsmittel ist zur vollständigen Abscheidung der PAK erforderlich. Bei einer vorherigen Simultanfällung zur Phosphorelimination ist eine entsprechende Reduzierung der Fällmittelmenge möglich. [3]

Die möglichen Verfahrensvarianten zur Umsetzung einer PAK-Dosierung auf kommunalen Kläranlagen sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

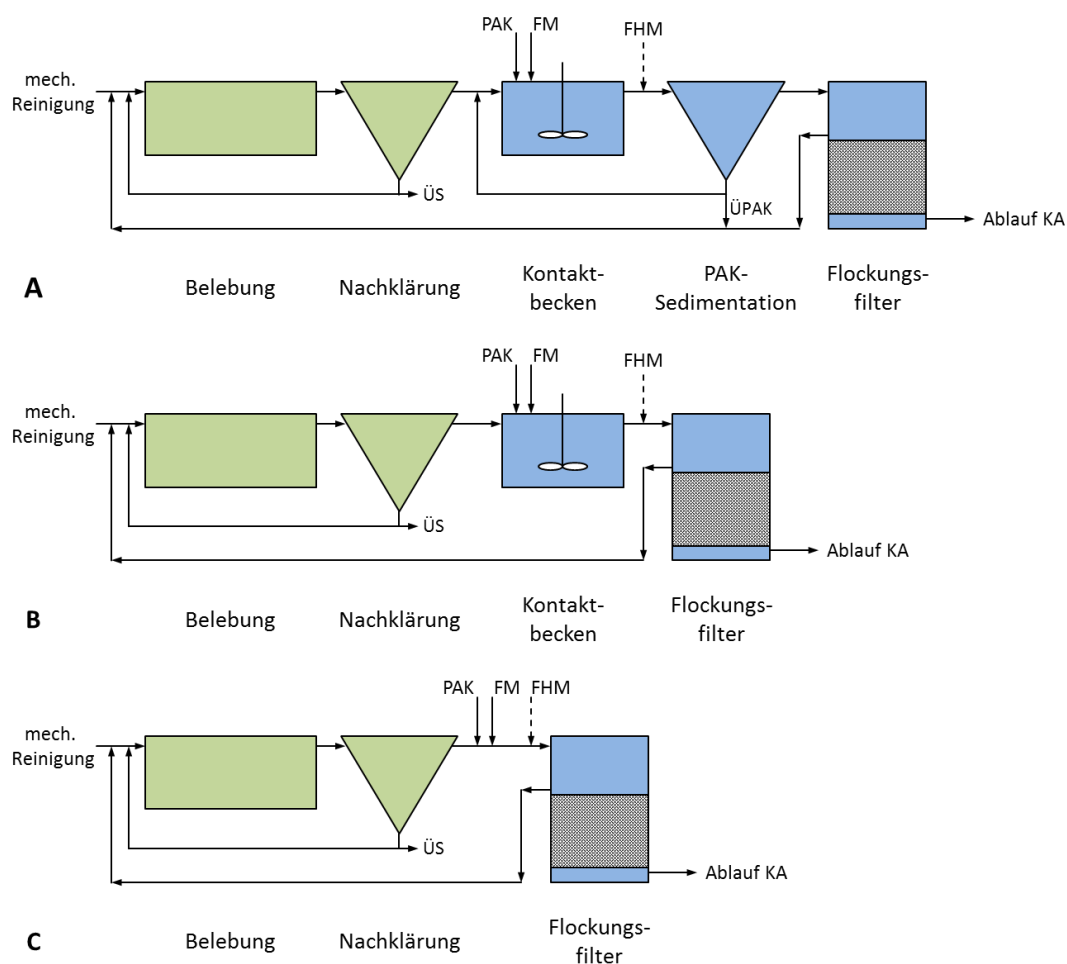


Abbildung 1: Verfahrenstechnische Varianten zur Einbindung einer PAK-Anlage (Kontaktbecken nach der Nachklärung A mit Sedimentationseinheit, B ohne Sedimentationseinheit und C PAK-Dosierung in den Zulauf zur Flockungsfiltration)

Eine Verfahrensstufe zur Pulveraktivkohledosierung besteht im Wesentlichen aus einem PAK-Silo, einer Dosiervorrichtung für die PAK, einem Kontaktbecken, einer Stufe zum Rückhalt der PAK und der erforderlichen Mess-, Steuer-, Regelungs- und Sicherheitstechnik. [3]

Die Lagerung der angelieferten PAK erfolgt in einem Silo. Dieses muss verhältnismäßig groß dimensioniert sein, um die Expansion der PAK bei der Befüllung zu berücksichtigen. Generell besteht beim Befüllen des Silos oder der Lagerung der PAK die Gefahr von Staubexplosionen. Für den direkten Umgang mit PAK wird außerdem ein Atemschutz empfohlen. Um die gelagerte Aktivkohle aufzulockern und Verblockungen im unteren Silobereich zu vermeiden, muss über entspre-

chende Vorrichtungen regelmäßig Stickstoff in das PAK-Silo eingeblasen oder dieses gerüttelt werden. Im PAK-Silo ist eine Temperaturmessung zu installieren, um Glimmbrände im Silo zu erkennen. Außerhalb des PAK-Silos ist aus Gründen des Arbeitsschutzes eine O₂- und CO-Messung erforderlich. Direkt unterhalb des Silos wird die Dosieranlage installiert, von wo aus die vorbereitete Aktivkohle in den Zulauf zum Kontaktbecken oder zur Flockungsfiltration gefördert wird. Die Dosierstation muss in Ex-Schutz-Ausführung installiert werden. [2][3]

Die PAK-Dosierung wird volumenproportional zum Zulauf ins Kontaktbecken vorgeschlagen. Als Dosiervorrichtung wird eine gravimetrische Dosierung empfohlen, da diese ausreichend genau ist, um sowohl Über- als auch Unterdosierungen zu vermeiden [3]. Die PAK wird nach dem Abwiegen mittels Wasserstrahlpumpe in einen Wasserstrahl eingemischt und ins Abwasser dosiert. Die Steuerung der dosierten PAK-Menge kann entweder schrittweise anhand der aktuellen, meist stark schwankenden Zulaufmengen oder anhand eines durchschnittlichen Tagesganges erfolgen. [2]

Die Auslegung des Kontaktbeckens für eine PAK-Anlage sollte mindestens auf den Trockenwetterzufluss als Bemessungsabfluss erfolgen [3]. In Anwendungen in der Schweiz haben sich 20 Minuten für den Kontakt zwischen Aktivkohle und Abwasser als ausreichend erwiesen, wenn ein minimales Schlammalter gewährleistet wird. Dieses liegt bei der Dosierung in die Flockungsfiltration bei ca. 12 Stunden und bei Rückführung der abgetrennten Aktivkohle in das Kontaktbecken bei 1 bis 2 Tagen [2]. Die „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW schlägt eine minimale hydraulische Aufenthaltszeit im Kontaktbecken von 30 Minuten vor. Im Falle einer Dosierung der PAK in den Zulauf zur Flockungsfiltration kann die minimale Kontaktzeit gegebenenfalls herabgesetzt werden. [3]

Wenn eine Sedimentationseinheit vorgesehen wird, wird für die Rückführung der abgetrennten Aktivkohle in den Kontaktreaktor ein Rückführverhältnis von 0,5 bis 1,0 vorgeschlagen. Dadurch erhöht sich die Aufenthaltszeit der PAK im System und ihre Adsorptionskapazität wird weitgehender ausgenutzt. Durch die Rückführung der Überschuss-PAK in die Belebung und den anschließenden gemeinsamen Abzug mit dem Überschussschlamm (ÜS) wird die PAK mit dem Belebtschlamm vermischt. Eine gemeinsame Schlammbehandlung ist nach heutigen Erkenntnissen möglich, da keine Desorption der Spurenstoffe von der PAK beo-

bachtet wurde. PAK-haltiger Faulschlamm darf jedoch nicht landwirtschaftlich verwertet werden, da so die adsorbierten Mikroverunreinigungen wieder in die Umwelt gelangen würden. Daher ist eine Schlammverbrennung erforderlich. Hier kann die PAK durch ihren hohen Heizwert positiv zu einer möglichen Energie-rückgewinnung (Wärme oder evtl. Strom) beitragen. Insgesamt erhöht sich die Schlammmenge durch die ÜPAK um etwa 5 bis 10 %, was zu erhöhten Kosten bei der Schlamm Entsorgung führt. [2][3]

Die Dosiermenge der PAK hängt unter anderem von der Kohleart, dem Dosierort und einer ggf. vorgesehenen Rezirkulation der PAK ab. Üblicherweise liegt die dosierte Aktivkohlemenge bei 10 bis 20 mgPAK/l Abwasser. [3]

Für den Einsatz von PAK auf bestehenden kommunalen Kläranlagen sind die abrasiven und korrosiven Eigenschaften der Aktivkohle zu berücksichtigen. Alle mit der Aktivkohle in Kontakt stehenden Anlagenkomponenten müssen aus entsprechend beständigem Material gefertigt oder entsprechend beschichtet werden. Bestehende Anlagenteile können entweder durch spezielle Beschichtungen verstärkt oder durch beständige Materialien wie V4A-Edelstahl, HDPE oder Beton ersetzt werden. [2]

Für einen effizienten Einsatz der PAK zur Spurenstoffelimination ist eine weitgehende Vorreinigung des zu behandelnden Abwassers erforderlich. Je größer die organische Hintergrundbelastung im Zulauf zur PAK-Anlage ist, desto mehr PAK ist erforderlich, um die gleiche Spurenstoffelimination zu erzielen. Daher sind eine weitgehende biologische Reinigung und eine zuverlässig funktionierende Nachklärung die Grundvoraussetzung für den effizienten Betrieb einer PAK-Anlage. [3]

Vorteile des PAK-Einsatzes

Ein Vorteil des Einsatzes von PAK zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen ist, dass durch PAK ein breites Spektrum an Mikroverunreinigungen sowie deren Effekte effizient aus dem Abwasser entfernt werden können. Dies führt zu einer signifikanten Verbesserung der Qualität des gereinigten Abwassers, was wiederum besonders bei Gewässern mit einem hohen Abwasseranteil zu einer deutlichen Verbesserung der Oberflächengewässerqualität führen kann. [2]

In der Regel ist ein Verfahren zur Spurenstoffelimination mit PAK gut in eine bestehende Kläranlage zu integrieren. Es fallen keine problematischen Produkte oder Abfälle an, deren Entsorgungsweg ungeklärt wäre, und die eliminierten Spu-

renstoffe werden nicht nur inaktiviert bzw. transformiert, sondern durch Sorption gebunden und dadurch vollständig entfernt. Neben der effektiven Entfernung von Spurenstoffen aus dem Abwasser wird auch der DOC reduziert, das Abwasser wird entfärbt und verlässt die Kläranlage praktisch geruchslos. [2]

Nachteile des PAK-Einsatzes

Nachteilig wirkt sich der um ca. 5 % erhöhte Energiebedarf der Kläranlage aus. Darüber hinaus ist der Primärenergiebedarf zur Herstellung der PAK sehr hoch. Des Weiteren erhöht sich der Schlammfall einer Kläranlage durch den Einsatz von PAK um rd. 5 bis 10 %, was wiederum die Kosten für die Schlamm Entsorgung erhöht. Hier ist zusätzlich zu beachten, dass PAK-haltiger Schlamm nicht landwirtschaftlich verwertet werden darf, da dadurch die adsorbierten Spurenstoffe nicht aus der Umwelt entfernt werden. Außerdem wirkt PAK abrasiv und korrosiv, was im Falle einer Rückführung des mit PAK versetzten Abwassers in bestehende Anlagenteile zu einem rascheren Verschleiß führen kann. [2]

In Tabelle 1 sind die Vor- und Nachteile des PAK-Einsatzes auf kommunalen Kläranlagen gegenübergestellt.

Tabelle 1: Übersicht der Vor- und Nachteile einer PAK-Anlage

Vorteile		Nachteile	
+	eliminiert ein breites Spektrum von Spurenstoffen	-	erhöhter Energieverbrauch der KA um etwa 5 %
+	gut in bestehende Anlagen integrierbar	-	hoher Primärenergiebedarf zur PAK-Produktion (CO ₂ -Bilanz rd. 3.400 t CO ₂ /a)
+	Sorption und dadurch vollständige Entfernung, statt Inaktivierung oder Transformation	-	rascher Verschleiß der Anlagenteile möglich durch abrasive und korrosive Eigenschaften der PAK
+	keine problematischen Produkte oder Abfälle	-	erhöhter Schlammfall um rd. 5-10 %
+	Entfernung von Farbstoffen und Geruch	-	erhöhte Kosten für die Schlamm Entsorgung durch mehr Schlamm
		-	landwirtschaftliche Verwertung des Schlammes nicht möglich

Pilot- und Versuchsanlagen mit PAK-Verfahren im In- und Ausland

Für den Einsatz von PAK auf kommunalen ARA liegen aus Baden-Württemberg

bereits mehr als 20 Jahre Betriebserfahrungen vor. Auf drei Kläranlagen in Albstadt-Ebingen, Albstadt-Lautlingen und Hechingen werden seit 1992 und 1999 großtechnische PAK-Anlagen zur Entfärbung von maximal 225 l/s bis 980 l/s Abwasser betrieben. Darüber hinaus wird seit Juli 2010 in Mannheim ein Volumenstrom von 300 l/s im Teilstromverfahren mit PAK zur Spurenstoffelimination behandelt. Diese Anlage soll um das Fünffache auf 1.500 l/s erweitert werden und befindet sich derzeit im Bau. Auf den Kläranlagen in Kressbronn, Stockacher Aach und Sindelfingen werden seit der 2. Jahreshälfte 2011 ebenfalls PAK-Anlagen für 250 l/s bzw. 1.000 l/s betrieben und im Oktober 2013 wurde auf der Kläranlage Langwiese in Ravensburg eine PAK-Anlage für 1.100 l/s in Betrieb genommen. Die PAK-Anlage in Steinheule kann bereits jetzt einen maximalen Volumenstrom von 1.600 l/s behandeln und wird bis zum Jahr 2020 mit einer zweiten Straße ausgestattet. [4]

In der Schweiz wurden seit Januar 2008 bis Juni 2010 Versuche zur PAK-Dosierung im halbtechnischen Maßstab gefahren. In der Pilotanlage der Eawag wurden in drei Versuchsphasen die maßgeblichen Einflussfaktoren zur PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken mit nachgeschaltetem Tuchfilter zur Abtrennung der PAK untersucht. Im Herbst 2008 und Sommer 2010 wurde auf der Schweizer Kläranlage Kloten/Opfikon über vier bzw. neun Wochen die PAK-Dosierung in den Zulauf zu einer bestehenden Flockungsfiltration getestet. Auf der Kläranlage Vidy in Lausanne wurde im Jahr 2009 für ein Jahr eine PAK-Stufe mit Dosierung in ein Kontaktbecken und Abscheidung der PAK durch Ultrafiltration betrieben. Von März 2011 bis November 2012 wurden auf der ARA Birsfelden Versuche zur PAK-Dosierung mit anschließender Abtrennung mittels Ultrafiltration gefahren. Seit März 2012 läuft auf der Kläranlage Flos in Wetzikon ein weiteres Projekt, dass die Dosierung von PAK direkt in ein Belebungsbecken untersucht. [5][6]

In Nordrhein-Westfalen wurde im Februar 2011 die erste PAK-Anlage auf dem Klärwerk Buchenhofen in Betrieb genommen und seit dem zu Forschungszwecken betrieben. Die PAK wird dabei in den Zulauf einer von insgesamt 28 Filterkammern dosiert und direkt im Filterbett abgeschieden. Zudem wurde über das Jahr 2013 auf einer halbtechnischen Versuchsanlage auf dem Klärwerk Düsseldorf Süd die PAK-Dosierung in die biologische Stufe erfolgreich untersucht. [7]

2.1.2 Einsatz von granulierter Aktivkohle

Durch den Einsatz von Aktivkohle in granulierter Form kann, ebenso wie durch den PAK-Einsatz, eine große Bandbreite von Mikroverunreinigungen adsorptiv aus dem Abwasser entfernt werden. In der Trinkwasseraufbereitung werden persistente Stoffe bereits seit Jahrzehnten erfolgreich durch GAK-Filtration entfernt. Auch in der Abwasserbehandlung sind GAK-Filter zur Spurenstoffelimination denkbar. [2]

GAK-Filter werden der biologischen Reinigungsstufe nachgeschaltet. Sie können verfahrenstechnisch an die Stelle einer Flockungsfiltration treten und gewährleisten dadurch nicht nur eine Spurenstoffelimination, sondern auch einen Suspensarückhalt. Alternativ kann ein GAK-Filter einer Filtrationsstufe nachgeschaltet werden. Dadurch wäre der Feststoffanteil im Zulauf zum GAK-Filter nahezu Null und die Konkurrenz der organischen Hintergrundmatrix um die Adsorptionskapazität der Aktivkohle wäre minimiert. [3]

Abbildung 2 stellt die Einbindungsmöglichkeiten eines GAK-Filters auf einer kommunalen Kläranlage schematisch dar.

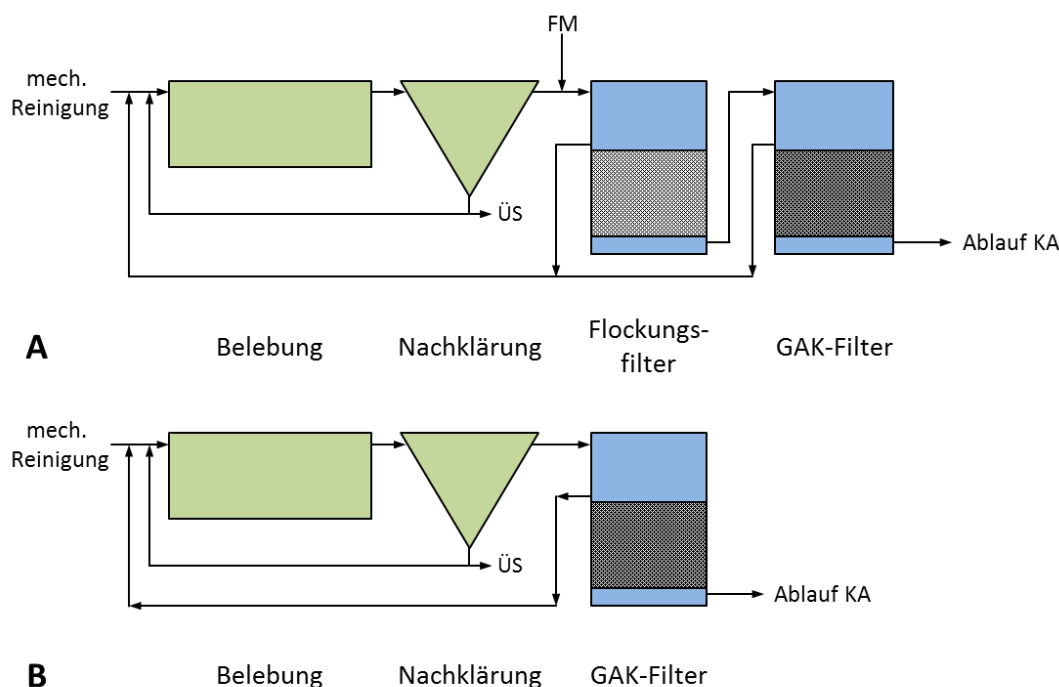


Abbildung 2: Verfahrenstechnische Varianten zur Einbindung einer GAK-Filtration (A mit Vorfiltration und B direkt im Ablauf der Nachklärung)

Eine GAK-Filtration besteht im Wesentlichen aus den parallel betriebenen GAK-Filtereinheiten sowie dem üblicherweise erforderlichen Hebewerk im Zulauf zur Filtration. Wenn eine Filtration dem GAK-Filter vorgeschaltet ist, macht dies gegebenenfalls eine erneute Hebung des Abwassers erforderlich. [3]

Ist eine Flockungsfiltration bereits vorhanden, so ist die Umrüstung einzelner Filterkammern zu GAK-Filtern i.d.R. ohne baulichen Aufwand möglich. Das vorhandene Filtermaterial wird ausgebaut und granuliert Aktivkohle eingebaut. Je nach Aktivkohleart ist der Rückspülvorgang anzupassen, um ein ausschwemmen der GAK zu verhindern. Da das Filtermaterial regelmäßig ausgetauscht werden muss, sollten die Filterkammern zugänglich sein. Der Austausch des Filtermaterials dauert je nach Größe der Filterkammer zwischen wenigen Stunden bei kleinen Filtern und 4 bis 6 Stunden bei Größeren. [2]

Die beladene, ausgebaute GAK kann mit geringen Verlusten von rd. 10 bis 15 % reaktiviert und anschließend wieder eingebaut werden. Die Reaktivierungsverluste müssen mit frischer GAK aufgefüllt werden [3]. Die Reaktivierung von GAK ist deutlich weniger energieaufwendig als die Herstellung frischer Aktivkohle. Jedoch

liegen weder für die Herstellung noch für die Regeneration von Aktivkohle gesicherte Werte für den Energieverbrauch vor. Daher ist die Aufstellung der gesamten Energiebilanz für Aktivkohle mit Unsicherheiten verbunden. [2]

Der Mehraufwand für die Steuerung bzw. Regelung einer GAK-Filtration im Vergleich zu einer Flockungsfiltration ist sehr gering. Lediglich die Überwachung der Eliminationsleistung erfordert zusätzliche Messtechnik, für die jedoch noch keine geeigneten Parameter oder Messverfahren gefunden wurden. Zur Ermittlung des Austauschintervalls sind daher derzeit noch Probenahmen zur Spurenstoffanalyse im Labor erforderlich. [2]

Eine GAK-Filtration wird auf eine Leerbettkontaktzeit von 5 bis 30 Minuten und eine Filtergeschwindigkeit von 5 bis 15 m/h bemessen. Die Wirtschaftlichkeit von GAK-Filtern hängt wesentlich von der behandelten Wassermenge vor dem Austausch des Filtermaterials ab. Ausgedrückt wird dies in erzielbaren bzw. durchgesetzten Bettvolumina (BV). Die Erfahrungen aus Pilotversuchen belegen, dass mit einer passend gewählten Aktivkohle im Minimum zwischen 3.000 und 7.500 BV behandelt werden können. Das stoffspezifische Maximum liegt zwischen 15.000 und 30.000 BV. [2][3]

Um derart hohe durchgesetzte Bettvolumina erreichen zu können, ist eine zuverlässig und gut funktionierende Nachklärung zwingend erforderlich. Auch die erforderliche Häufigkeit der Filterspülung hängt von der Funktion der Nachklärbecken ab. Je mehr AFS und damit auch CSB aus der Nachklärung abtreibt, desto häufiger muss der GAK-Filter gespült und das Filterbett ausgetauscht werden. Entsprechend steigen auch die Betriebskosten.

Vorteile des GAK-Einsatzes

Die Vorteile von GAK-Filtern zur Spurenstoffelimination auf kommunalen ARA sind weitgehend identisch mit den Vorteilen der PAK-Anwendungen, die auf den Eigenschaften der Aktivkohle beruhen. Im Gegensatz zu PAK kann GAK jedoch mit leichten Verlusten regeneriert werden. Für die Regeneration wird deutlich weniger Energie benötigt, als für die Herstellung frischer Aktivkohle. Dadurch sinken auch die Betriebskosten beim Einsatz von regenerierter GAK. [2]

Die Energiekosten für den Einsatz von GAK-Filtern liegen etwa auf dem Niveau einer herkömmlichen Sandfiltration. Bei bereits vorhandenen Filtrationsanlagen

sind sowohl der bauliche Aufwand zur Umrüstung auf GAK-Filter wie auch der Mehr-Energieverbrauch sehr gering. [2]

Nachteile des GAK-Einsatzes

Ein Nachteil beim Einsatz von GAK-Filtern zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen ist, dass der tatsächliche Energiebedarf zur Herstellung und Regenerierung der GAK mangels belastbarer Literaturwerte nicht sicher abgeschätzt werden kann. Auch die durchsetzbaren Bettvolumina und damit die Standzeit eines GAK-Filters konnte aufgrund der geringen Anzahl an Versuchsanlagen noch nicht allgemeingültig übertragbar festgestellt werden. [2]

In Tabelle 2 sind die Vor- und Nachteile des Einsatzes von GAK-Filtern auf kommunalen Kläranlagen gegenübergestellt.

Tabelle 2: Übersicht der Vor- und Nachteile von GAK-Filtern

Vorteile		Nachteile	
+	eliminiert ein breites Spektrum von Spurenstoffen	-	Energiebedarf für Herstellung und Regenerierung relativ unsicher
+	gut in bestehende Anlagen integrierbar	-	durchsetzbare Bettvolumina unsicher
+	Sorption und dadurch vollständige Entfernung, statt Inaktivierung oder Transformation		
+	keine problematischen Produkte oder Abfälle		
+	Entfernung von Farbstoffen und Geruch		
+	nach Regeneration mit leichten Verlusten wiederverwendbar		
+	bei bestehender Filtration baulicher Aufwand und Mehr-Energieverbrauch sehr gering		

Pilot- und Versuchsanlagen mit GAK-Verfahren im In- und Ausland

Halb- und großtechnische Untersuchungen zum Einsatz von GAK zur Spurenstoffelimination in der Abwasserbehandlung wurden vielfach in Deutschland durchgeführt. [5]

Seit Januar 2011 wird auf dem Klärwerk Obere Lutter der Trockenwetterzufluss von 1.125 m³/h in fünf umgerüsteten Kammern der vorhandenen Flockungsfiltration mit GAK behandelt. Mit einem mittleren CSB-Zulauf zur GAK-Filtration von rd. 48 mg/l konnte bei einer Filtergeschwindigkeit von 2 bis 8 m/h und einer Leerbettkontaktzeit von 75 bis 19 Minuten eine Standzeit des Filterbettes von rd. 9 Monaten erreicht werden. Dies entspricht bis zu 16.000 durchgesetzten Bettvolumina. [7][8][9]

Im Juni 2011 wurde ein GAK-Filter auf der Kläranlage Düren-Merken in Betrieb genommen. In drei Betriebsphasen wurden drei unterschiedliche Kohlearten bei einer Filtergeschwindigkeit von ca. 7 m/h und einer Leerbettkontaktzeit von rd. 11 bis 14 Minuten miteinander verglichen. Aufgrund des hohen Feststoffanteils von im Mittel rd. 20 bis 30 mgAFS/l im Zulauf zur Filtration konnten nur etwa 4.000 bis 7.000 Bettvolumina umgesetzt werden, bevor das GAK-Filterbett ausgetauscht werden musste. [7]

Auf der Zentralkläranlage Rietberg wurden ab Oktober 2012 bis April 2013 halbertechnische Versuche zum Betrieb einer GAK-Filtration mittels Dyna-Sand-Anlage durchgeführt. In drei Abschnitten wurden zunächst das hydraulische Verhalten der Filter und anschließend zwei unterschiedliche Aktivkohleprodukte auf ihre Eignung zur Spurenstoffelimination geprüft. Die CSB-Konzentration im Zulauf zu den Filtern betrug während der Versuche rd. 38 mg/l. Bei Filtergeschwindigkeiten von 3 bis 6 m/h und Leerbettkontaktzeiten von 0,6 bis 1,2 Stunden wurden während der Versuchsphasen 2 und 3 etwa 2.780 und 1.440 Bettvolumina behandelt. [7]

Im Januar 2013 wurden auf dem Klärwerk Gütersloh-Putzhagen zwei auf GAK umgerüstete Zellen einer Biofor-Filteranlage in Betrieb genommen. Bei einem mittleren CSB-Zulauf von rd. 37 mg/l, einer Filtergeschwindigkeit von 2 bis 10 m/h und einer Aufenthaltszeit von 11 bis 56 Minuten wurden die Filter zweimal pro Woche gespült. Es konnten 4.500 Bettvolumina durchgesetzt werden, bevor keine CSB-Elimination mehr stattfand. Insgesamt wurden 7.000 BV durchgesetzt. [7][10]

Darüber hinaus wurden im ersten Quartal 2013 auf dem Klärwerk Buchenhofen zwei GAK-Filterzellen in Betrieb genommen. Eine der beiden Filterzellen wird parallel zu den übrigen Flockungsfiltrationskammern (GAK) betrieben, die zweite wird als nachgeschaltete Filtration anteilmäßig mit dem Ablauf der Flockungsfiltration beschickt (nGAK). Die Standzeit der beiden Filterzellen belief sich auf 18.000 BV für die GAK Filterzelle und 21.000 BV für die nGAK Filterzelle. Die

Eliminationsraten dabei für etliche Stoffe noch über 60%. Nach Definition eines Abbruchkriteriums für eine mittlere 80%ige Eliminationsrate für 5 Leitparameter über den gesamten Klärprozess wurden für die GAK Filter 22.712 BV und für die nGAK Filter 31.247 BV bis zum Erreichen des Ziels ermittelt. [11]

Neben den bereits umgesetzten Projekten zur Spurenstoffelimination mittels GAK-Filtration sind für eine Reihe von Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen bereits Machbarkeitsstudien durchgeführt worden. Für die Kläranlagen Dülken und Bad Oeynhausen beispielsweise wurde die GAK-Filtration als Vorzugsvariante herausgearbeitet, deren Umsetzung sich derzeit in der Planungsphase befindet. [7]

Neben den Versuchsanlagen in NRW wird seit Anfang 2012 in Baden-Württemberg der GAK-Einsatz speziell für kleine Kläranlagen erforscht. Im Rahmen eines Pilotprojektes wurde auf der Kläranlage Emmingen-Liptingen einer von drei vorhandenen Dyna-Sand-Filtern zur GAK-Filtration von maximal 20 l/s entsprechend 72 m³/h umgerüstet. Darüber hinaus wurde für das Lehr- und Forschungsklärwerk der Universität Stuttgart bei Büsnau im August 2014 eine GAK-Stufe zur Behandlung von 20 l/s entsprechend 72 m³/h geplant. [4][12]

2.1.3 Einsatz von Ozon

Durch Zugabe von Ozon in das Abwasser kann eine große Bandbreite von Mikroverunreinigungen sowie deren Wirkungen aus dem Abwasser oxidativ entfernt werden. In der Trinkwasseraufbereitung wird die Ozonung seit Jahrzehnten eingesetzt, um das Wasser zu desinfizieren und von störenden Geruchs- und Geschmacksstoffen zu befreien. In der Abwassertechnik wurden in den vergangenen Jahren in der Schweiz und in Deutschland auf einer Reihe von kommunalen ARA halb- und großtechnische Versuche erfolgreich durchgeführt. [2]

Eine Ozonanlage zur Mikroschadstoffentfernung wird auf einer Kläranlage der biologischen Stufe nachgeschaltet. Vor der Ozonanlage kann gegebenenfalls eine Filtereinheit angeordnet sein. Im Ablauf der Ozonung ist nach heutigem Kenntnisstand eine Nachbehandlung des Abwassers in einer biologisch aktiven Stufe erforderlich, um die Reaktionsprodukte der Ozonung aus dem gereinigten Abwasser zu entfernen. [3]

Die verfahrenstechnische Einbindung einer Ozonanlage auf einer kommunalen Kläranlage hängt von den baulichen Gegebenheiten ab und kann dementspre-

chend auf unterschiedliche Weise erfolgen. Ist eine weitere, biologisch aktive Reinigungsstufe (z.B. Flockungsfiltration oder Schönungsteich) vorhanden, kann diese als Nachbehandlung für den mit Ozon behandelten Volumenstrom dienen. Entsprechend wird der Ozonreaktor zwischen der Nachklärung und der weiteren Reinigungsstufe im Voll- oder Teilstrom betrieben. Für eine möglichst geringe organische Hintergrundbelastung und dadurch einen geringen Ozonverbrauch kann der Ozonreaktor im Teilstromverfahren im Ablauf einer Flockungsfiltration angeordnet werden. Der mit Ozon behandelte Volumenstrom wird dabei in den Zulauf zur Flockungsfiltration zurückgegeben, um sowohl die Vorfiltration, wie auch die Nachreinigung über den Flockungsfilter zu gewährleisten. Ist weder ein Flockungsfilter noch ein Schönungsteich für die biologisch aktive Nachbehandlung vorhanden, so kann der mit Ozon behandelte Volumenstrom in die Biologie zurückgeführt werden. Da der zurückgeführte Volumenstrom Reste von Ozon enthalten kann, sollte bei vorgeschalteter Denitrifikation die Rückführung in die belüftete Zone erfolgen. Dies führt zu kaskadenähnlichen Verhältnissen im Belebungsbecken, die zu berücksichtigen sind. Die Wahl des Ozoneintragungssystems ist von der verfahrenstechnischen Einbindung auf der Kläranlage unabhängig. [2][3]

Abbildung 3 zeigt schematisch die Einbindungsmöglichkeiten einer Ozonanlage auf kommunalen Kläranlagen.

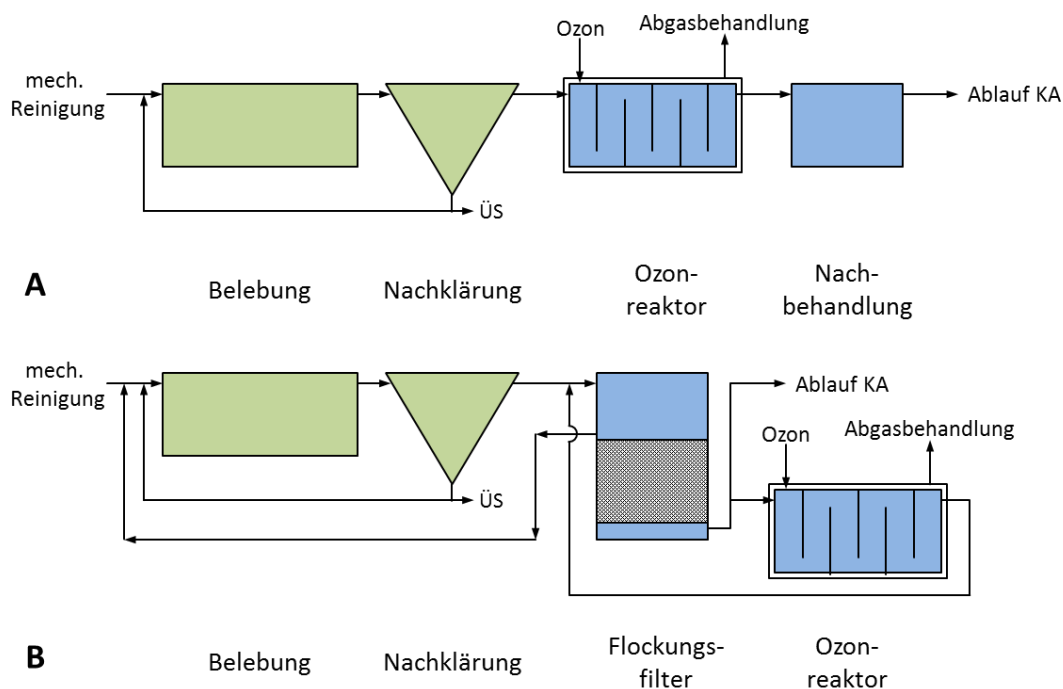


Abbildung 3: Verfahrenstechnische Varianten zur Einbindung einer Ozonanlage (Ozonreaktor A zwischen Nachklärung und biologisch aktiver Nachbehandlung und B im Teilstrom hinter der Flockungsfiltration mit Rückführung in die Filtration)

Die Ozonanlage besteht im Wesentlichen aus einem Flüssigsauerstofftank bzw. der Sauerstoffproduktion, der Ozonerzeugung, dem Ozonreaktor, einem Restozonvernichter, der Nachbehandlung und der erforderlichen Mess-, Steuer-, Regelungs- und Sicherheitstechnik. [2]

Ozon wird mit Hilfe von Ozongeneratoren auf der Kläranlage erzeugt. Als Trägergas dient flüssiger Sauerstoff (LOX, *Liquid Oxygen*), komprimierte, getrocknete Luft oder vor Ort aus der Umgebungsluft erzeugter Sauerstoff aus einer PSA-Anlage (*Pressure Swing Adsorption*). Auf größeren kommunalen ARA kommt aus Gründen der Einfachheit und Wirtschaftlichkeit i.d.R. nur LOX in Frage [3]. Bei größeren Anlagen mit einem konstanten Gasstrom kann in Einzelfällen auch die Sauerstoffproduktion vor Ort mit einer PSA-Anlage wirtschaftlich sein [2]. Im Ozongenerator werden rd. 10 M.-% des Sauerstoffes in Ozon umgewandelt. Über Diffusoren oder Injektionssysteme wird das ozonhaltige Gas in den Ozonreaktor eingebracht, wo es sich im Abwasser löst. Der Ozonreaktor muss luftdicht abgedeckt sein, um Ozonaustritte in die Umwelt zu verhindern. Der Gasraum über dem Ozonreaktor ist kontinuierlich abzusaugen und durch einen Restozonvernichter zu

leiten. Aus Sicherheitsgründen ist der Ozongehalt in geschlossenen Betriebsräumen der Ozonanlage kontinuierlich zu messen. Diese Ozonmessung muss sowohl mit der Ozonanlage, als auch mit einem Alarmsystem gekoppelt sein, um das Betriebspersonal zu schützen. [3]

Als Nachbehandlung zur Elimination der Reaktionsprodukte aus dem gereinigten Abwasser können beispielsweise bereits vorhandene Filteranlagen oder Schönungsteiche in Frage kommen. Auch GAK-Filter mit zusätzlich adsorptiver Wirkung oder Wirbel- und Festbettreaktoren sind möglich. [3]

Die Steuerung des Ozoneintrags kann auf unterschiedliche Weise realisiert werden. Als Steuer- bzw. Regelgrößen kommen die Zuflusswassermenge, die DOC-Fracht im Zulauf oder der Anteil gelösten Ozons im hinteren Reaktorteil in Frage. Außerdem ist die Abnahme der UV-Absorbanz (SAK) eine vielversprechende Regelungsgröße, für die bisher jedoch relativ wenige Erfahrungen vorliegen. [2]

Nachfolgend sind die Möglichkeiten der Steuerung/Regelung mit ihren Vor- und Nachteilen tabellarisch gegenüber gestellt.

Tabelle 3: Übersicht Steuer- und Regelungsgrößen für Ozonanlagen nach [2]

	Q	DOC	O₃	SAK
Steuerung oder Regelung	Steuerung	Steuerung	Regelung	Regelung
Messgeräte	Q (Zulauf)	Q, DOC (Zulauf), evtl. NO ₂ (zu)	(Q), O ₃ (hinterer Reaktorteil)	(Q), SAK (Zulauf und Ablauf)
Aufwand/Kosten	Gering	Kalibrierung aufwendig	Kalibrierung aufwendig	noch nicht bekannt
Kontrolle Elimination	Nein	i.d.R. gut	Gut	Gut
Vorteile	Einfach	Einfache Aussage über Effektivität	Dosierung angepasst an Bedarf	Aussage über Effektivität, Dosierung an Bedarf angepasst, Einfache Messung
Nachteile	Keine Aussage über Effektivität Gefahr von Über-/Unterdosierung	Bei häufigen Nitritspitzen nicht geeignet, Dosierung nicht unbedingt nach Bedarf, Zuverlässigkeit der Messung	Wahl des Messortes entscheidend, Überdosierung bei tiefem Durchfluss	Wenig/keine Erfahrungen, Vortests notwendig

Die Auslegung des Kontaktreaktors einer Ozonanlage sollte mindestens auf den Trockenwetterzufluss als Bemessungsabfluss erfolgen [3]. Die Erfahrungen mit Pilotanlagen in der Schweiz haben gezeigt, dass eine hydraulische Aufenthaltszeit von 20 Minuten bei Trockenwetter als Kontaktzeit für eine weitgehende Elimination von Spurenstoffen ausreicht. Bei Regenwetter sollte trotz einer verkürzten hydraulischen Aufenthaltszeit die Kontaktzeit noch etwa 5 bis 10 Minuten betragen [2]. Das Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW empfiehlt in seiner „Anleitung zur Auslegung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ eine Kontaktzeit von 15 bis 30 Minuten bei Trockenwetter [3].

Die benötigte Ozondosis für die Elimination von Mikroverunreinigungen aus dem biologisch vorgereinigten Abwasser ergibt sich aus der DOC- und Nitritkonzentration im Zulauf zur Ozonanlage sowie der jeweiligen spezifischen Ozonzehrung. Für DOC (z_{DOC}) liegt diese zwischen 0,6 und 0,8 $\text{mgO}_3/\text{mgDOC}$ und für Nitrit ($z_{\text{NO}_2\text{-N}}$) bei 3,43 $\text{mgO}_3/\text{mgNO}_2\text{-N}$. Über die Ozondosis kann mit dem Bemessungsabfluss die maximal erforderliche Kapazität der Ozonproduktion ermittelt werden. Analog wird über den minimalen Trockenwetterabfluss als 2h-Mittel die minimal notwendige Ozonerzeugung ermittelt. [3]

Die erforderliche Ozondosis hängt direkt von den Abwasserinhaltsstoffen und damit von der Reinigungsleistung der vorgeschalteten Stufen ab. Ein hoher Nitrit- oder DOC-Wert im Zulauf zur Ozonanlage erhöhen die erforderliche Ozondosis und damit die Kosten. Die Leistung der Belebung und der Nachklärung haben somit einen direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Ozonanlage. Daher ist eine weitgehende Nitrifikation im Belebungsbecken und eine zuverlässig funktionierende Nachklärung die Grundvoraussetzung für den effizienten Betrieb einer Ozonanlage. [3]

Vorteile der Ozonung

Ein Vorteil des Einsatzes von Ozon zur Spurenstoffelimination ist, dass dadurch ein breites Spektrum an Substanzen effektiv aus dem Abwasser entfernt werden kann. Dabei ist von besonderer Bedeutung, dass einige der durch Ozon gut entfernbaren Substanzen durch andere Verfahren, wie beispielsweise den Aktivkohleeinsatz, nur bedingt reduziert werden können. Als Beispiel dafür kann das Antibiotikum Sulfamethoxazol genannt werden, das gemäß Vorschlag des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW mit vier weiteren Spurenstoffen als Stellver-

tretersubstanz zur Überwachung der Eliminationsleistung herangezogen werden soll. [2]

Überdies ist eine Ozonanlage in der Regel gut in eine bestehende Abwasserreinigungsanlage integrierbar. Ihr Betrieb hat keine Auswirkungen auf die bestehenden Reinigungsstufen, sofern keine Rückführung von behandelten Volumenströmen vorgesehen wird. [2]

Darüber hinaus werden durch die desinfizierende Wirkung des Ozons pathogene Keime weitgehend eliminiert, wenn auch aufgrund der höheren Konzentrationen an Mikroorganismen und Feststoffen im Abwasser nicht so effektiv, wie in der Trinkwasseraufbereitung. [2]

Nachteile der Ozonung

Ein Nachteil des Einsatzes von Ozon auf Abwasserreinigungsanlagen ist die relativ energieintensive Ozonerzeugung. Diese muss vor Ort auf der Kläranlage geschehen, da Ozon aufgrund der Explosionsgefahr nicht in Druckflaschen abgefüllt werden kann. Das zur Ozonerzeugung notwendige Trägergas wird meist in Form von flüssigem Sauerstoff von externen Händlern auf die Kläranlage geliefert. Dies führt zu einer Abhängigkeit, die sich schlimmstenfalls negativ auf die Kosten oder die Betriebsbereitschaft der Ozonbehandlung auswirken kann. [2]

Außerdem muss das Betriebspersonal vor Ozonaustritten geschützt werden. Dies führt zu einer aufwendigen MSR- und Sicherheitstechnik, die eine Vielzahl von Sensoren sowohl im Abwasserstrom, wie auch in den Betriebsräumen der Ozonanlage erfassen muss. [2]

Darüber hinaus wirkt Ozon als starkes Oxidationsmittel und wandelt die Abwasserinhaltsstoffe um, ohne sie aus dem Abwasserstrom zu entfernen. Die Reaktionsprodukte der Ozonung sind i.d.R. weniger problematisch als die Ausgangssubstanzen, aber unbekannt und somit schwierig einzuschätzen. Eine Einschätzung der Toxizität wird auch dadurch erschwert, dass ihr Nachweis stark von der Sensitivität des verwendeten Testverfahrens abhängt. Um die Reaktionsprodukte wirkungsvoll aus dem Abwasserstrom zu entfernen, ist eine der Ozonung nachgeschaltete, biologisch aktive Reinigungsstufe erforderlich. [2]

Insgesamt erhöht sich der Energieverbrauch einer Kläranlage durch die Ozonung um 10 bis 30 %. Die Betriebskosten erhöhen sich dadurch auch insgesamt um etwa 10 bis 20 %. [2]

In Tabelle 4 sind die Vor- und Nachteile einer Ozonanlage auf kommunalen Kläranlagen zusammengefasst.

Tabelle 4: Übersicht der Vor- und Nachteile einer Ozonanlage

Vorteile		Nachteile	
+	eliminiert ein breites Spektrum von Spurenstoffen	-	erhöhter Energieverbrauch der KA um etwa 10-30 %
+	gut in bestehende Anlagen integrierbar	-	Ozonerzeugung erfordert evtl. erhöhte Anschlussleistung
+	keine Auswirkungen auf andere Reinigungsstufen	-	Zukauf von flüssigem Sauerstoff erforderlich
+	zusätzlich Desinfektion des Abwassers	-	umfangreiche MSR- und Sicherheitstechnik erforderlich
+	geringerer Platzbedarf im Vergleich zu PAK	-	Reaktionsprodukte sind i.d.R. unbekannt
+	bessere CO ₂ -Bilanz verglichen mit Aktivkohle	-	biologisch aktive Nachreinigung erforderlich

Pilot- und Versuchsanlagen zur Ozonung im In- und Ausland

In den vergangenen Jahren wurde die Spurenstoffentfernung mittels Ozon auf einer Reihe von Kläranlagen in Pilotversuchen großtechnisch erprobt.

In der Schweiz wurden auf den Kläranlagen in Regensdorf und Lausanne ab Mai 2007 bzw. April 2009 Ozonanlagen im Pilotversuch betrieben. Die Anlage in Regensdorf behandelte maximal 250 l/s (120 l/s bei Trockenwetter) über 18 Monate, während die Anlage in Lausanne einen Teilstrom von 60 l/s über 15 Monate reinigte. Durch den Betrieb dieser Anlagen konnten wertvolle Erkenntnisse über die Auslegung, den Betrieb und die Kosten von Ozonanlagen in der Abwassertechnik erlangt werden. [2][5]

In NRW wird seit Oktober 2009 auf der Kläranlage Bad Sassendorf eine Ozonanlage zur Behandlung von 300 bis 650 m³/h biologisch vorgereinigtem Abwasser betrieben. Eine Nachbehandlung erfolgt hier in vorhandenen Schönungsteichen. Seit Januar 2010 ist am Kreiskrankenhaus Waldbröl ein Membranbioreaktor mit nachgeschalteter Ozonanlage in Betrieb, die die Spurenstoffbelastung der Kran-

kenhausabwässer vor der Zuleitung zur Kläranlage Brenzingen verringern sollen. Hier können maximal 32 m³/h behandelt werden. Darüber hinaus wurde im Oktober 2010 auf der Kläranlage Schwerte eine Ozonanlage zu Behandlung von maximal 886 m³/h in insgesamt 192 m³ Reaktorvolumen in Betrieb genommen, die in Kombination mit einer PAK-Behandlung betrieben werden kann. Wahlweise kann das mit Ozon behandelte Abwasser zur Nachbehandlung zuerst in die PAK-Stufe geleitet oder direkt in die biologische Stufe rezirkuliert werden [7]. Im Juli 2011 wurde eine weitere Kläranlage für Krankenhausabwässer in NRW fertig gestellt. Die fast 200 m³/d des Marienhospitals in Gelsenkirchen werden seit dem durch eine Membranfiltration vorgereinigt, mittels Ozon die Spurenstoffe entfernt und in einer Aktivkohlefiltration nachbehandelt [13]. Seit Oktober 2011 wird auf der Kläranlage Duisburg-Vierlinden eine zweistraßige Ozonanlage zur Behandlung des Trockenwetterzuflusses von 400 m³/h betrieben. Die beiden Straßen wurden mit unterschiedlichen Systemen zum Ozoneintrag in den Reaktor ausgerüstet, um diese beiden Systeme zu vergleichen. Zur Nachbehandlung des ozonierten Abwassers wird ein Wirbelbettreaktor betrieben [7].

Ende 2012 wurde in St. Pourcain-sur-Sioule, Frankreich, eine Anlage zur Spurenstoffelimination in Betrieb genommen. In Frankreich existiert derzeit keine gesetzliche Grundlage zur Spurenstoffelimination. Da jedoch der Neubau der gesamten Kläranlage St. Pourcain-sur-Sioule erforderlich wurde, entschied sich der Betreiber zukunftsorientiert für die Ausrüstung der neuen Kläranlage mit einer Ozonanlage zur Spurenstoffelimination. [5]

Neben den bereits umgesetzten großtechnischen Anlagen in NRW werden auf der Zentralkläranlage Detmold und auf der Kläranlage Köln-Rodenkirchen derzeit weitere Anlagen zur Ozonung von biologisch vorgereinigtem Abwasser vorbereitet. Auch darüber hinaus liegen Studien für eine Reihe von Kläranlagen vor, in denen verschiedene Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination miteinander verglichen wurden. Für die Zentralkläranlage Espelkamp und die Kläranlage Warburg wurde z.B. als Vorzugsvariante eine Ozonung herausgearbeitet. Auf den Kläranlagen Harsewinkel und Löhne sind aus technischer und wirtschaftlicher Sicht sowohl eine Ozonanlage wie auch eine GAK-Filterstufe denkbar. [7]

2.1.4 Sonstige Verfahrensvarianten

Neben dem Einsatz von Aktivkohle und Ozon werden derzeit auch eine Reihe anderer Verfahrenstechniken auf ihre Eignung zur Spurenstoffelimination auf

kommunalen Kläranlagen im Labor- und halbtechnischen Maßstab getestet. Dazu gehören der Einsatz von dichten Membranen oder sogenannten *Advanced Oxidation Processes* (AOP). Darüber hinaus wird an weiteren physikalischen und oxidativen Verfahren zur Spurenstoffelimination geforscht.

Dichte Membranen

Zu den dichten Membranverfahren zählen die Nanofiltration und die Umkehrosmose. Bei beiden Verfahren wird das zu reinigende Abwasser unter hohem Druck (> 2 bar) durch die jeweilige Membran gepresst, wobei gelöste und ungelöste Stoffe zurückgehalten werden. Die Abscheidung erfolgt bei der Nanofiltration durch Größenausschluss und bei der Umkehrosmose durch Ladungseffekte. Daher wird letzteres Verfahren vorwiegend in der Meerwasserentsalzung und der Produktion von Reinstwasser eingesetzt, während beide Verfahren zur Behandlung von industriellen Prozessströmen und in der Trinkwasseraufbereitung verwendet werden. Eine sehr gute Vorreinigung des zu behandelnden Abwassers ist beim Einsatz von dichten Membranen unabdingbar, um die Membranen vor Belagbildung und Verstopfung zu schützen. [2]

Dichte Membranen können sowohl ein breites Spektrum von Spurenstoffen sowie Keime fast vollständig zurückhalten. Allerdings fallen bis zu 25 % des behandelten Volumenstroms als Konzentrat bzw. Retentat an, für dessen Weiterbehandlung oder Entsorgung es derzeit noch keine wirtschaftlichen Lösungen gibt. Außerdem sind der Energiebedarf und damit die Kosten verglichen mit einer Aktivkohle- oder Ozonbehandlung deutlich erhöht. Daher kommen diese Verfahren derzeit für den Einsatz auf kommunalen Kläranlagen nicht oder nur in Einzelfällen in Frage. [2]

Advanced Oxidation Processes (AOP)

Unter AOP versteht man Verfahren, bei denen durch OH-Radikale organische Inhaltsstoffe oxidiert werden. OH-Radikale sind hoch reaktiv und reagieren daher mit fast allen Abwasserinhaltsstoffen. Doch wie beim Einsatz von Ozon werden die Spurenstoffe nicht aus dem Abwasser entfernt, sondern in oft unbekannte Reaktionsprodukte umgewandelt. Da OH-Radikale nicht gelagert werden können, müssen sie direkt im zu behandelnden Abwasser erzeugt werden. Dies kann zum Beispiel durch die UV-Bestrahlung von mit Wasserstoffperoxid (H_2O_2) oder Titan-dioxid (TiO_2) versetztem Abwasser erfolgen. H_2O_2 kann auch durch Zugabe von Ozon oder Eisen-II zur OH-Radikalbildung animiert werden. Durch die unspezifische Reaktion der OH-Radikale mit allen Abwasserinhaltsstoffen ist für eine effizien-

ente Spurenstoffelimination eine sehr gute Vorreinigung des Abwassers erforderlich. [2]

Trotz der unspezifischen Reaktion der OH-Radikale mit allen Abwasserinhaltsstoffen können in gut vorgereinigtem Abwasser viele Spurenstoffe weitgehend eliminiert werden. Jedoch liegen bisher nur wenige Untersuchungen zur (Öko)Toxizität des behandelten Abwassers vor. Außerdem sind der Energiebedarf und damit auch die Kosten für AOP deutlich höher als z.B. bei einer Ozonung. Daher kommen AOP für kommunales Abwasser kaum in Frage. Für industrielles Abwasser kann allenfalls eine Kombination von Ozon und H_2O_2 durch die verstärkte OH-Radikalbildung in Frage kommen, um besonders persistente Abwasserinhaltsstoffe zu eliminieren. [2]

Weitere Verfahren

Zur Spurenstoffelimination wurden auch nachgeschaltete biologische Verfahren sowie die Fällung/Flockung untersucht. Beide Verfahren werden jedoch bereits auf den meisten kommunalen ARA eingesetzt und bewirken erfahrungsgemäß keine ausreichende Spurenstoffelimination. Dagegen entfernen diverse untersuchte Adsorptionsmittel ebenso wie die UV-Bestrahlung einige Spurenstoffe sehr gut aus dem Abwasser. Hier fehlt jedoch die erforderliche Breitbandwirkung für einen effektiven Einsatz auf kommunalen Kläranlagen. Die Nanotechnologie und die Behandlung mit Ultraschall sind derzeit im Interesse der Forschung, jedoch fehlen hier noch Erfahrungen, die eine Aussage über das Potential dieser Verfahren ermöglichen. Zuletzt besteht neben Ozon und OH-Radikalen auch die Möglichkeit der Oxidation mit Chlor bzw. Chlordioxid oder Ferrat. Chlor hat sich jedoch als ungeeignet für den Einsatz auf kommunalen ARA herausgestellt, da es keine Breitbandwirkung hat und durch die große erforderliche Menge eine relativ große Menge an problematischen Nebenprodukten erzeugt. Ferrat wurde dagegen erst vor kurzem für die Behandlung von Abwasser entdeckt. Das sechswertige Eisen reagiert ähnlich wie Ozon, aber weniger stark, mit bestimmten funktionellen Gruppen und wirkt desinfizierend, ebenfalls wie Ozon. Bei der Reaktion zerfällt Ferrat in dreiwertiges Eisen, dass auf vielen kommunalen Kläranlagen als Mittel für die chemische Phosphorfällung ins Abwasser dosiert wird. Dieses Verfahren ist sehr vielversprechend, jedoch wurde es erst im Labormaßstab getestet, sodass Aussagen über Effektivität oder Wirtschaftlichkeit noch nicht getroffen werden können. [2]

Im Folgenden werden aus Gründen der Wirtschaftlichkeit fast ausschließlich die verfahrenstechnischen Varianten mit PAK, GAK und Ozon näher betrachtet. Alle weiteren Verfahrensvarianten (z.B. dichte Membranen, AOP, etc.) sowie Verfahrenskombinationen von Ozon und Aktivkohle, so vielversprechend sie auch hinsichtlich ihrer Eliminationsleistungen sein mögen, binden entweder deutlich mehr Kapital oder bedürfen weiterer Forschungen, bevor sie großtechnisch für den Dauerbetrieb in Betracht kommen. Für einen weitgehenden Vergleich wird neben den einzelnen Verfahren mit PAK, GAK und Ozon lediglich die Verfahrenskombination von Ozon und GAK als zusätzliche Variante betrachtet.

2.2 Wesentliche Stoffeigenschaften

Die Vielfalt der organischen Verbindungen im Kläranlagenablauf und im Gewässer erfordert eine Auswahl von zu betrachtenden Stoffen. Diese muss vor dem Hintergrund der zu erwartenden Spurenstoffe aus dem speziellen Einzugsgebiet erfolgen. Im Falle der Kläranlage Vlotho wurden die in Tabelle 5 aufgeführten Spurenstoffe in zwei unabhängig voneinander durchgeführten Spurenstoffanalysen in Anlehnung an in NRW etablierte Messreihen betrachtet.

Die Eliminationsleistungen mit den einzelnen Verfahren sind substanzspezifisch. Die Eigenschaften der Substanzen lassen Rückschlüsse auf das Verhalten des spezifischen Stoffes in den verschiedenen Verfahrensstufen zu. Für den biologischen Abbau ist vorrangig die biologische Verfügbarkeit von Bedeutung, d.h. die Verwendung des Stoffes als Substrat. Sie bestimmt maßgeblich die Eliminationsleistung kommunaler Kläranlagen, die beispielsweise für Ibuprofen und Koffein in nitrifizierenden Systemen sehr gut ist, während z.B. Carbamazepin in herkömmlichen mechanisch-biologischen Kläranlagen kaum eliminiert wird. Ein weiterer Weg einige Spurenstoffe in kommunalen Kläranlagen zu eliminieren, ist durch Sorption an belebten Schlamm. Für die Eliminationsleistung von Aktivkohle ist vor allem die Adsorptionsneigung der einzelnen Spurenstoffe maßgebend. Die Sorptionseigenschaften führen dazu, dass beispielsweise Carbamazepin und Benzotriazol sehr gut in Aktivkohleanlagen entfernt werden können, während EDTA nicht adsorbiert und somit in der Konzentration kaum verringert wird. Für die Ozonung ist vor allem die Struktur der einzelnen Stoffe von Bedeutung, da Ozon bevorzugt Kohlenstoffdoppelbindungen, phenolische Verbindungen und Aminogruppen angreift [2]. Daher wird Carbamazepin auch von Ozon gut eliminiert, während Benzotriazol nur mäßig gut und Diuron kaum eliminiert wird. [14]

Die Eliminationsleistungen unterschiedlicher Verfahren für bestimmte Stoffe sind ausschlaggebend dafür, welche Spurenstoffe über den Kläranlagenablauf in die aquatische Umwelt gelangen. Bei der Auswahl eines weitergehenden Reinigungsverfahrens sollte daher eine gute, an den Einzelfall angepasste Elimination für eine möglichst große Anzahl an Spurenstoffen angestrebt werden.

Tabelle 5 fasst die im Ablauf der Kläranlage Vlotho untersuchten Spurenstoffe zusammen und stellt die entsprechenden Eliminationsleistungen der einzelnen Verfahren dar, soweit diese den Verfassern aus der Fachliteratur bekannt sind. Dabei bezieht sich die Einordnung der Eliminationsleistungen in die Kategorien „gut“, „mittel“ und „schlecht“ nicht direkt auf beobachtete Eliminationsraten der einzelnen Spurenstoffe in den Verfahrensstufen. Es soll lediglich ein Eindruck vermittelt und eine grobe Abschätzung der Leistungen der einzelnen Eliminationsverfahren ermöglicht werden.

Tabelle 5: Auswahl an untersuchten Spurenstoffen im Ablauf der Kläranlage Vlotho und ihr Eliminationspotential in verschiedenen Verfahrensstufen [14][15][16][17]

	Stoffname	CAS-Nr.	Elimination in biol. Stufe in KA	Adsorbierbarkeit an Aktivkohle	Eliminierbarkeit durch Ozon
Pharmaka	Bezafibrat	41859-67-0	mittel	mittel ***	mittel
	Diclofenac	15307-86-5	schlecht *	gut	gut
	Naproxen	22204-53-1	mittel *	mittel ***	gut ***
	Phenazon	60-80-0			
	Carbamazepin	298-46-4	schlecht	gut	gut
	Atenolol	29122-68-7	mittel *	mittel ***	mittel
	Bisoprolol	66722-44-9			
	Metoprolol	37350-58-6	schlecht *	mittel **	mittel
	Sotalol	3930-20-9		mittel ***	mittel
	Clarithromycin	81103-11-9		gut ***	gut
	Sulfamethoxazol	723-46-6	mittel	schlecht	gut
	Oxazepam	604-75-1		mittel ***	schlecht ***
Ritalinsäure	19395-41-6				
Diagnostika	Amidotrizoesäure	117-96-4		schlecht	schlecht
	Gadolinium	7440-54-2		schlecht	schlecht
	Iomeprol	78649-41-9		schlecht	schlecht
	Iopamidol	60166-93-0	schlecht **	schlecht	schlecht
	Iopromid	73334-07-3		schlecht	schlecht
Pestizide	Diuron	330-54-1	mittel *	mittel ***	schlecht
	Isoproturon	34123-59-6	schlecht **	schlecht **	mittel
	Terbutryn	886-50-0		gut **	mittel ***
	Benzotriazol	95-14-7	mittel	gut	mittel
EDCs	17- α -Ethinylestradiol	57-63-6	gut *	gut **	gut
	17- β -Estradiol	50-28-2	gut *	gut **	gut
	Estron	53-16-7	gut *	gut ***	gut
	Bromid				

Eliminationsleistungen, soweit nicht anders angegeben, aus RiSKWa-Leitfaden "Indikatorsubstanzen" (2013)

* Quelle: Luo et al. 2014

** Quelle: Türk et al. 2013

*** Quelle: Margot et al. 2013

Grundsätzlich ist festzustellen, dass einige Spurenstoffe von beiden Verfahren (Aktivkohle und Ozon) etwa in gleichem Maße eliminiert werden, während beispielsweise das Antibiotikum Sulfamethoxazol von Aktivkohle schlecht, aber von

Ozon gut eliminiert wird. Für Benzotriazol und Terbutryn dagegen verhält es sich anders herum. Röntgenkontrastmittel wie Amidotrizoesäure oder Iopamidol werden durch keines der beschriebenen Verfahren gut eliminiert, da sie für ihren Anwendungsbereich als weitgehend inert konzipiert wurden. Gleichzeitig werden sie von den Patienten in hohen Dosen (mg/l) eingenommen, ohne dass für sie dadurch eine Gesundheitsgefährdung bekannt ist. Diese Eigenschaften machen die Gruppe der Röntgenkontrastmittel zwar schwer aus dem Abwasser zu eliminieren, doch sie lassen auch vermuten, dass ihr negativer Einfluss auf die aquatische Umwelt begrenzt ist [14][16]. Der Anteil der gut eliminierbaren Spurenstoffe an der in Tabelle 5 aufgelisteten Spurenstoffe liegt sowohl für Aktivkohle als auch für Ozon bei rd. 40 %. In Bezug auf die mittelmäßig eliminierbaren Spurenstoffe weisen Ozon und Aktivkohle beide einen Anteil von rd. 31 % auf. Gewichtet man die Anteile der gut, mittel und schlecht eliminierbaren Spurenstoffe für das jeweilige Verfahren, so wird deutlich, dass Aktivkohle und Ozon für die Elimination der hier betrachteten Spurenstoffe etwa in gleichem Maße geeignet sind.

Für die Auswahl des geeignetsten Verfahrens zur Erweiterung einer kommunalen ARA zur Spurenstoffelimination ist daher eine Einzelfallentscheidung erforderlich. In Abhängigkeit von der Belastungssituation im Ablauf der Kläranlage muss das Verfahren so ausgewählt werden, dass für die betrachtete Anlage die relevanten Spurenstoffe in ausreichendem Maße eliminiert werden.

3. Grundlagenermittlung

3.1 Derzeitige Verfahrenstechnik auf der Kläranlage Vlotho

Die Kläranlage Vlotho ist als Anlage zur mechanisch-biologischen Reinigung für insgesamt 22.000 Einwohnerwerte ausgelegt. Die laut aktueller Genehmigung maximal zu übernehmende Wassermenge Q_{\max} beträgt $504 \text{ m}^3/\text{h}$ (140 l/s).

Die mechanische Reinigungsstufe besteht aus einer 1-straßigen Rechenanlage mit Notumlaufgerinne, Rechengutwaschpresse und Containerverladung. Im Anschluss durchfließt das Abwasser einen 2-straßigen Sand- und Fettfang.

In das Verbindungsgerinne zwischen Ablauf Sandfang und Zulauf Vorklärung kann die Zuleitung der Fällmittel (FeCl_3) zur Phosphatfällung erfolgen (Vorfällung).

Das rechteckige Vorklärbecken ($V = 650 \text{ m}^3$) ist mit 2 Schlammtreibern und einem Brückenräumer mit Schildräumer ausgestattet. In der Vorklärung wird sowohl der Primärschlamm (PS) als auch der Überschussschlamm (ÜS) aus der biologischen Stufe aus dem Abwasserstrom abgeschieden.

Die biologische Abwasserreinigung erfolgt auf der Kläranlage Vlotho mit einer Biofiltrationsanlage (Biofor-Anlage). Der Biofor-Anlage ist zur Pufferung von Belastungsspitzen ein Speicherbecken vorgeschaltet. Dabei werden die zur biologischen Abwasserreinigung erforderlichen Mikroorganismen in insgesamt vier im Aufwärtsstrom durchflossenen Straßen mit je zwei mit Granulat gefüllten Filterbecken gehalten, wovon jeweils ein Filterbecken als Deni-Filter und ein Becken als druckbelüfteter Nitri-Filter funktioniert. Ein Teil des Ablaufs aus den Nitri-Filtern wird als Rezirkulationswasser zur vorgeschalteten Denitrifikation zurückgepumpt. Die Spülung der Biofor-Filter erfolgt als eine kombinierte Wasser-Luft-Spülung. Das Spülabwasser wird in einem Spülabwasserbecken gesammelt und von dort in den Zulauf der Kläranlage zurückgegeben.

Die Biofor-Anlage besteht im Zulaufbereich aus einem vorgeschalteten Feinrechen, einem Beschickungspumpwerk und einer hochliegenden Flockungskammer. Hier werden einerseits Methanol zur Denitrifikation und andererseits Eisen III-Chlorid zur Phosphatfällung (Simultanfällung) dosiert.

Das gereinigte Abwasser aus der Biofor-Anlage wird im Klarwasserbecken – welches auch als Vorlagebecken zur Filterspülung dient – gesammelt und fließt von dort über einen Ablaufkanal der Weser zu. Bei Weser-Hochwasser ist zur Ableitung des Abwassers der Betrieb eines Hochwasserpumpwerks mit drei Rohrschachtpumpen notwendig.

Im Zuge der Abwasserreinigung fallen auf der Kläranlage verschiedene Klärschlämme an. Der in der Biofiltration entstehende Überschussschlamm wird mit dem Rückspülwasser in den Zulauf der Rechenanlage geleitet.

Zwischen Betriebsgebäude und Biofiltration ist weiterhin eine Fäkalannahmestation in „Containerform“ aufgestellt. Die angelieferten Fäkalien werden hier angenommen, mengenmäßig erfasst und ebenfalls zur späteren Ausfäulung in den Rohschlamm-schacht gegeben.

Das Schlammgemisch aus dem Rohschlamm-schacht wird zur Ausfäulung in den Heizschlammkreislauf des Faulturms eingespeist. Der nach dem Verdrängungsprinzip verdrängte ausgefäulte Schlamm fließt durch die Schlammablaufleitung in den Nacheindicker 1. Das Trübwasser wird dem Schlammwasserspeicher zugeführt.

Der teileingedickte Schlamm wird in einen weiteren Nacheindicker (Nacheindicker 2) gepumpt, aus dem nochmals Trübwasser abgezogen wird. Bei Vollfüllung des Nacheindickers 2 wird der Faulschlamm mittels Rührwerk homogenisiert und dann chargenweise mit einer Entwässerungszentrifuge entwässert. Die Abfuhr des entwässerten Schlammes erfolgt mit Abrollcontainern, welche vom Schlamm-sorgungsbetrieb gestellt werden.

Das abgetrennte Zentrat aus der Schlamm-entwässerung gelangt im Freigefälle in den Schlammwasserspeicher. Von dort wird es zusammen mit den Trübwässern aus den beiden Nacheindickern in den Zulauf der Rechenanlage dosiert.

Das bei der Schlammfäulung entstehende Klärgas wird grob gereinigt und zu den Verbrauchern geleitet. Ein Gasbehälter, mit der Funktion des Mengenausgleichs zwischen Klärgaserzeugung und den Klärgasverbrauchern, sorgt für einen konstanten Gasdruck im System. Das gesammelte Klärgas wird in einem Blockheizkraftwerk elektrisch-thermisch verwertet. Zusätzlich ist eine Notfackel vorhanden.

3.2 Zukünftiges Anlagenkonzept für die Kläranlage Vlotho

Im Rahmen der Ertüchtigung der Kläranlage Vlotho befindet sich die Umrüstung der biologischen Reinigungsstufe der Kläranlage Vlotho zu einer herkömmlichen einstufigen Belebungsanlage nach Belebtschlammverfahren aktuell in der Entwurfsplanung. Die zukünftig ungenutzten Beckenkapazitäten der vorhandenen Biofor-Anlage können somit zukünftig für die weitere gezielte Spurenstoffelimination umgerüstet werden. Durch das zukünftige Anlagenkonzept einer Belebungsanlage mit Nachklärung wird die Hintergrundbelastung für die weitere Spurenstoffelimination minimiert, was einen effizienten Betrieb der 4. Reinigungsstufe gewährleistet. Die Rohrleitungsanbindung erfolgt an den Ablauf der Nachklärung. Weiterhin ermöglicht die Bauweise der neuen Belebungsanlage eine Beschickung der 4. Reinigungsstufe gegebenenfalls im Freigefälle und macht das Betreiben von Beschickungspumpen und des Hochwasserpumpwerks für einige Varianten überflüssig.

3.3 Alleinstellungsmerkmale der Kläranlage Vlotho

Bei der Entscheidung für oder gegen eine weitergehende Reinigungsstufe bzw. für das anzuwendende Verfahren spielen die Gegebenheiten vor Ort eine besondere Rolle. Für die Kläranlage Vlotho ist folgendes herauszustellen:

- Die biologische Reinigung auf der Kläranlage Vlotho erfolgt derzeit mittels Festbettverfahren in einer Biofor-Anlage. Für 2019 ist die Inbetriebnahme einer herkömmlichen einstufigen Belebungsanlage nach Belebtschlammverfahren geplant. Nach Inbetriebnahme der neuen Biologie steht die Biofor-Anlage als freie Kapazität zur Verfügung und könnte zu einer nachgeschalteten Filtration umgerüstet werden.
- Ein Schönungsteich o.ä. ist nicht vorhanden.
- Auf der Kläranlage stehen nach der Errichtung der neuen Biologie keine Flächen für einen Neubau vollständiger Verfahrensstufen zur Verfügung. Für die Umsetzung einer Spurenstoffelimination müsste daher vorhandene Bausubstanz umgenutzt werden.
- Die vorhandene Schlammfäulung wird erneuert und wird mit ausreichenden Reserven ausgelegt. Ein erhöhter Schlammanfall von rd. 5 – 10 % bedingt

durch eine PAK-Dosierung würde für die Schlammfäulung daher voraussichtlich kein Problem darstellen.

- Derzeit wird der ausgefäulte und entwässerte Schlamm der Kläranlage Vlotho teilweise landwirtschaftlich und teilweise thermisch entsorgt. Durch die Umsetzung einer Pulveraktivkohlestufe auf der Kläranlage Vlotho müsste der gesamte anfallende Klärschlamm thermisch entsorgt werden. Weiterhin würde sich der Schlammanfall zur Entsorgung erhöhen. Durch die PAK würden sich die thermischen Eigenschaften des Schlammes jedoch verbessern.

3.4 Klärwerksbelastung

Im Einzugsgebiet der Kläranlage Vlotho ist vorrangig eine Mischkanalisation vorhanden. Die Stadt Vlotho hat derzeit rd. 18.800 Einwohner.

Im Zuge der Ertüchtigung der Kläranlage Vlotho wurden die Betriebsdaten aus den Jahren 2015-2016 herangezogen und ausgewertet. Diese Daten sind auch Grundlage für die Studie zur Spurenstoffelimination.

Zur Ermittlung der Belastungen im Zulauf zur Kläranlage und im Ablauf der Vorklärung wurden die Frachten mit den üblichen in der Literatur angegebenen spezifischen Kennwerten zu Belastungen umgerechnet.

Tabelle 6: Spezifische Kennwerte zur Belastungsermittlung [g/(EW*d)]

	CSB	BSB₅	P_{ges}	NH₄-N	N_{ges}
Zulauf	120	60	1,8	7	11
Ablauf VK	80	40	1,6	7	10

Die Belastung aus der CSB-Fracht entspricht im Mittel etwa einem Anschlusswert von rd. 16.000 EW. Die Nährstoffparameter N_{ges} (TNb) und P_{ges} (PO_4-P_{ges}) sind erhöht gegenüber der CSB-Belastung. Abbildung 4 stellt die mittlere Belastung der Kläranlage dar.

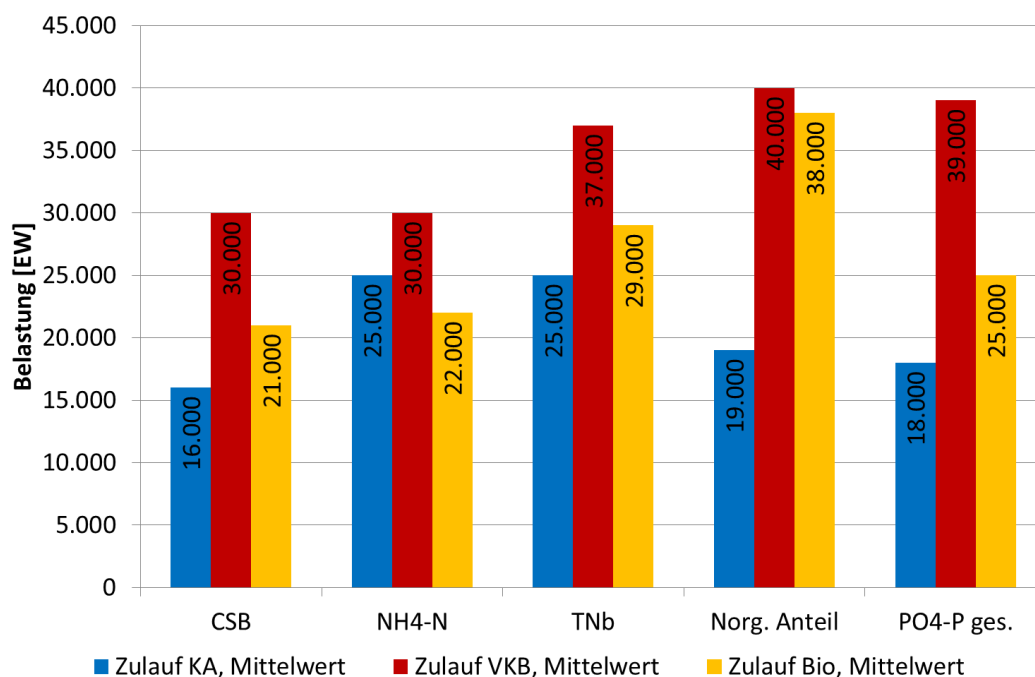


Abbildung 4: Mittlere Belastungen Zulauf und Ablauf Vorklämung Kläranlage Vlotho (2015-2016)

Eine Gegenüberstellung der aus den Betriebsdaten ermittelten Schlammfrachten erfolgt anhand der Schlammbelastungen, die mit folgenden Kennwerten aus den Schlammfrachten berechnet werden:

Tabelle 7: spezifische Schlammfrachten in g/(EW·d), Faulgas in l/(EW·d)

RS	FS _{dünn}	FS _{eingedickt}	FS _{entwässert}	FS _{Abfuhr}	Faulgas
70	44	44	44	44	22

Es ergibt sich folgende Schlammbilanz.

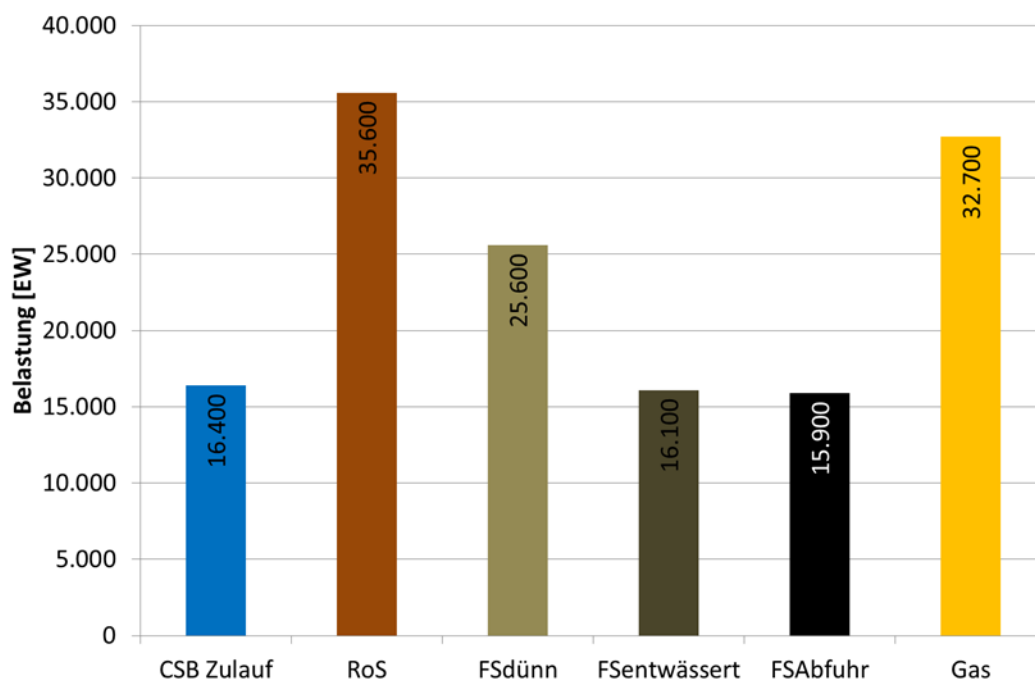


Abbildung 5: Schlamm Bilanz Kläranlage Vlotho

Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der ermittelten Zulaufbelastung und den anfallenden Schlammfrachten auf der Kläranlage Vlotho. Der hohe Klärgasanfall liegt in der für den Betrieb der Biofor-Anlage erforderlichen Dosierung externer C-Quellen begründet, zusätzlich ist ein erhöhter Abbau durch den sehr großen Faulbehälter gegeben.

Auf Grundlage der Betriebsdaten von 2015 bis 2016 konnten die Belastungen der Kläranlage Vlotho im Zulauf, im Ablauf der Vorklärung und durch den Schlammfall ermittelt werden. Die ermittelten Belastungen sind in sich schlüssig, sodass auf dieser Grundlage die maßgebende Belastung der Kläranlage Vlotho ermittelt werden kann.

Für kommunales Abwasser liegt die CSB Belastung im Zulauf auf einem relativ niedrigen Niveau, wohingegen die Stickstoffparameter mit knapp 25.000 EW verhältnismäßig hoch liegen. Daher wird die relevante Bemessungsgröße auf den Mittelwert der beiden Belastungen zu rd. **20.000 EW** gelegt.

3.5 Wassermengen

Die Wassermengen, die der Kläranlage Vlotho täglich zur Behandlung zufließen, schwanken aufgrund der angeschlossenen Mischkanalisationen sehr stark (siehe

Abbildung 6). Die gemessene Zulaufmenge liegt für die Jahre 2012 bis 2015 zwischen 3.200 m³/d und 13.500 m³/d. Die mittlere Zulaufmenge liegt bei rd. 5.400 m³/d. Der mittlere Trockenwetterzufluss Q_T liegt im Mittel bei rd. 4.100 m³/d (rd. 47 l/s). Die laut aktueller Genehmigung maximal zu übernehmende Wassermenge Q_{max} beträgt rd. 504 m³/h (140 l/s). Zukünftig erhöht sich die zu übernehmende Wassermenge Q_{max} um 50 l/s auf 190 l/s entsprechend rd. 684 m³/h. Der maximale Trockenwetterzufluss $Q_{T,max}$ nach ATV-DVWK-A 198 ist relevant für die Auslegung der Anlage und errechnet sich zu rd. **271 m³/h** entsprechend rd. 75 l/s [20].

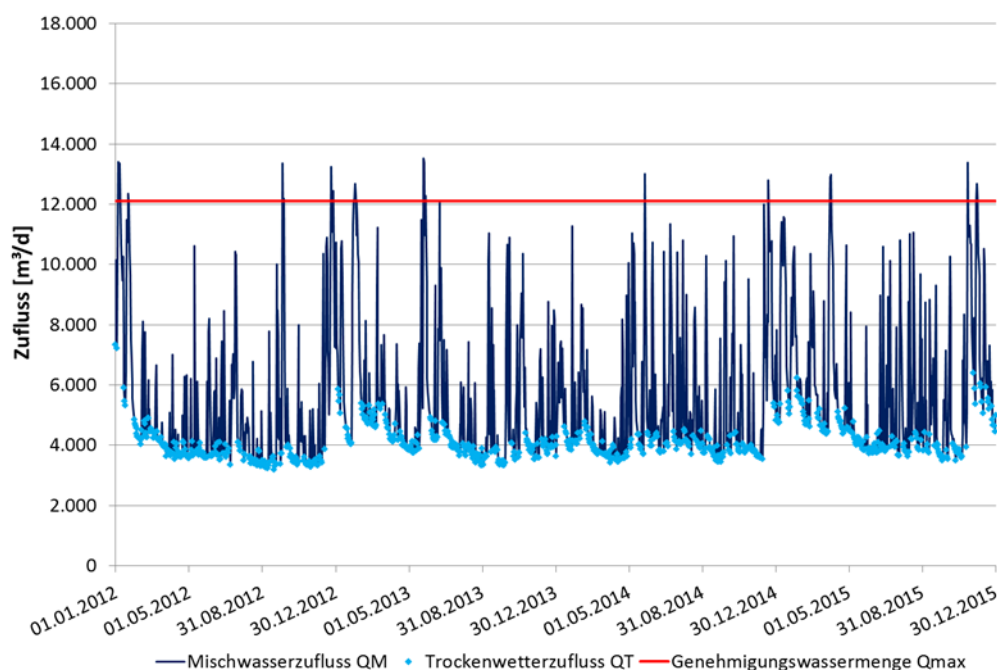


Abbildung 6: Misch- und Trockenwetterzufluss Kläranlage Vlotho (2012-2015)

3.6 Ablaufwerte

Für die Bewertung der Umsetzbarkeit einer weitergehenden Spurenstoffelimination ist die Abwasserbeschaffenheit im Zulauf zur Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination relevant, also in diesem Fall der Ablauf der neu zu errichtenden Nachklärung. Von besonderer Bedeutung sind dabei die CSB- bzw. DOC- und die NO₂-N-Konzentrationen. Durch das geplante Reinigungskonzept ändern sich die Ablaufwerte allerdings nachhaltig, weshalb die aktuellen Daten nur als Richtwerte angesehen werden können. Die CSB-Konzentration wird sich verringern, da der Abbau zukünftig in der Belebungsanlage statt in der Biofiltration erfolgt. Weiterhin

wird durch ausreichende O₂-Versorgung in der Belebungsanlage eine niedrige NO₂-Konzentration sichergestellt. Da keine DOC-Messwerte der KA Vlotho vorliegen, wird für die folgende Auslegung der verschiedenen Verfahrensvarianten die DOC-Belastung aus der CSB-Belastung abgeschätzt.

Abbildung 7 illustriert, dass sowohl die CSB- wie auch die NO₂-N-Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage seit Anfang 2015 auf einem konstanten Niveau liegen. Die CSB-Konzentrationen lagen in 2015 im 85 %-Perzentil bei rd. 35,5 mg/l und die NO₂-N-Konzentrationen unterschritten an 85 % der beprobten Tage einen Wert von 0,07 mg/l.

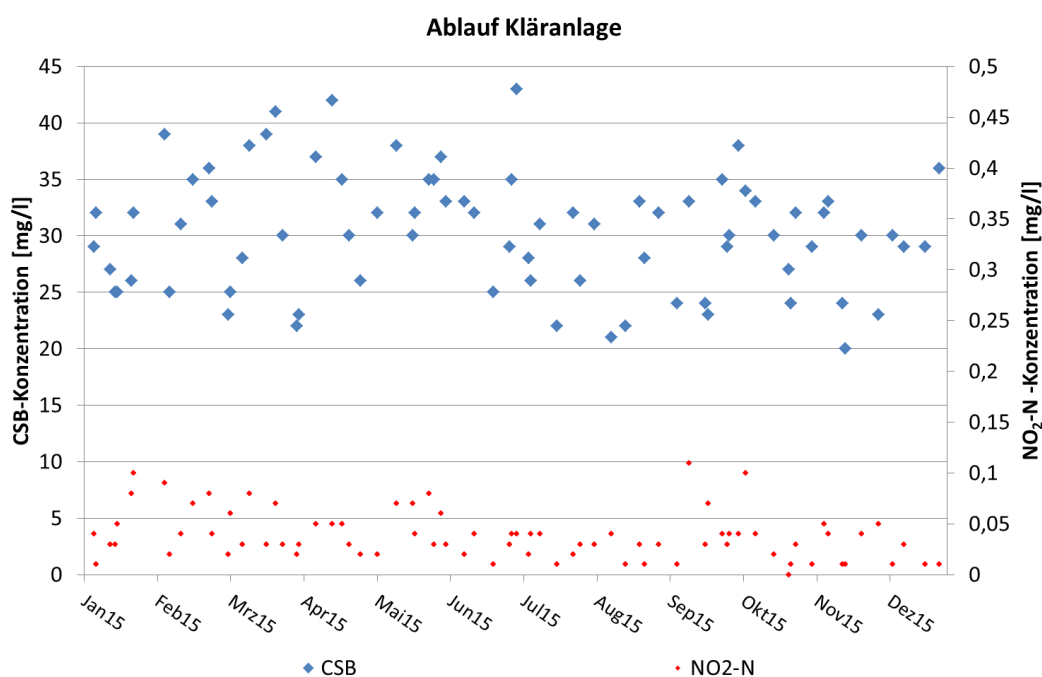


Abbildung 7: CSB- und NO₂-N-Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage

Grundsätzlich wird für die nachfolgende Auslegung der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination vorausgesetzt, dass die Biologie und die Nachklärung ausreichend dimensioniert sind. Für diesen Fall ist die organische Hintergrundbelastung erfahrungsgemäß ausreichend gering, um eine nachgeschaltete vierte Reinigungsstufe effizient betreiben zu können.

3.7 Spurenstoffbelastung

Die Spurenstoffbelastung im Ablauf des Klärwerks wurde zunächst über eine Stichprobe von April 2011 und eine volumenproportionale 48-h-Mischprobe von

Anfang Mai 2012 ermittelt. Durch die OWL Umweltanalytik GmbH wurden diverse Spurenstoffe sowie die zugehörige Durchflussmenge während der Probenahme messtechnisch erfasst. Die analysierten Spurenstoffe entstammen den Bereichen der Pharmaka, Diagnostika, Industriechemikalien und Lebensmittelindustrien.

Im Juni 2016 wurde eine weitere Messreihe von OWL Umweltanalytik GmbH durchgeführt, bei der eine 48-h-Mischprobe und zwei aufeinander folgende 24-h-Mischproben aus dem Ablauf der Kläranlage und jeweils eine Stichprobe aus dem Vorfluter oberhalb und unterhalb der Kläranlageneinleitung analysiert wurden. In allen fünf Proben wurden 23 Spurenstoffe analysiert (Pharmaka, Diagnostika, Pestizide, Industriechemikalien und endokrin wirksame Substanzen (EDCs)) und im Ablauf der Kläranlage zusätzlich Bromid. Die im Juni 2016 analysierten Proben entsprechen den empfohlenen Substanzen für das Monitoring der Bezirksregierung Detmold. Vergleiche mit den Proben aus 2011 und 2012 wiesen auf eine gleichmäßige Belastung an Spurenstoffen der Kläranlage Vlotho hin.

Weiter wurden zur Ermittlung der Gewässerbelastung Abflussdaten des Pegels Vlotho von 2012 bis 2016 ausgewertet.

3.7.1 Abwasseranteil im Vorfluter

Bei der Ermittlung der Gewässerbelastung durch eine Abwasserreinigungsanlage ist der Abwasseranteil im Gewässer ein wichtiger Indikator. In NRW wird ein Abwasseranteil von mehr als einem Drittel des Niedrigwasserabflusses als kritisch erachtet [1]. Der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) im Vorfluter der Kläranlage Vlotho am Pegel oberhalb der Klärwerkseinleitung (Pegel Vlotho) beträgt rd. $60,4 \text{ m}^3/\text{s}$ entsprechend rd. $5.218.000 \text{ m}^3/\text{d}$. Die Kläranlage Vlotho leitet bei Trockenwetter im Mittel rd. $4.064 \text{ m}^3/\text{d}$ ein. Daraus lässt sich der Spitzenabfluss bei Trockenwetter zu rd. $271 \text{ m}^3/\text{h}$ entsprechend rd. $6.500 \text{ m}^3/\text{d}$ ermitteln. Aus dem Spitzentrockenwetterabfluss resultiert ein gemittelter Abwasseranteil von 0,124% im Gewässer bei mittlerem Niedrigwasserabfluss.

Betrachtet man die täglichen Abflüsse der Kläranlage Vlotho sowie den täglichen Abfluss im Vorfluter am Pegel Vlotho, so ergibt sich für die Jahre 2012 bis 2015 – wie in Abbildung 8 dargestellt – ein mittlerer Abwasseranteil im Gewässer von rd. 0,056 %. Sowohl der Abwasseranteil bei Trockenwetter, wie auch der mittlere Abwasseranteil der Kläranlage Vlotho im Gewässer in den letzten vier Jahren liegen deutlich unter dem für das Gewässer als kritisch erachteten Wert. Somit

sind der Abwasseranteil der Kläranlage Vlotho und die darauf bezogene Spurenstoffemission in die Weser äußerst gering. Der gesamte Abwasseranteil in der Weser auf Höhe des Pegels Vlotho kann aus Mangel an Information über die Oberlieger jedoch weder ermittelt noch abgeschätzt werden. Insgesamt wäre die Aufrüstung der Kläranlage Vlotho um eine Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination zwar ein erster Schritt zur nachhaltigen Verbesserung der Gewässergüte in der Weser, allerdings nicht ausschlaggebend dafür.

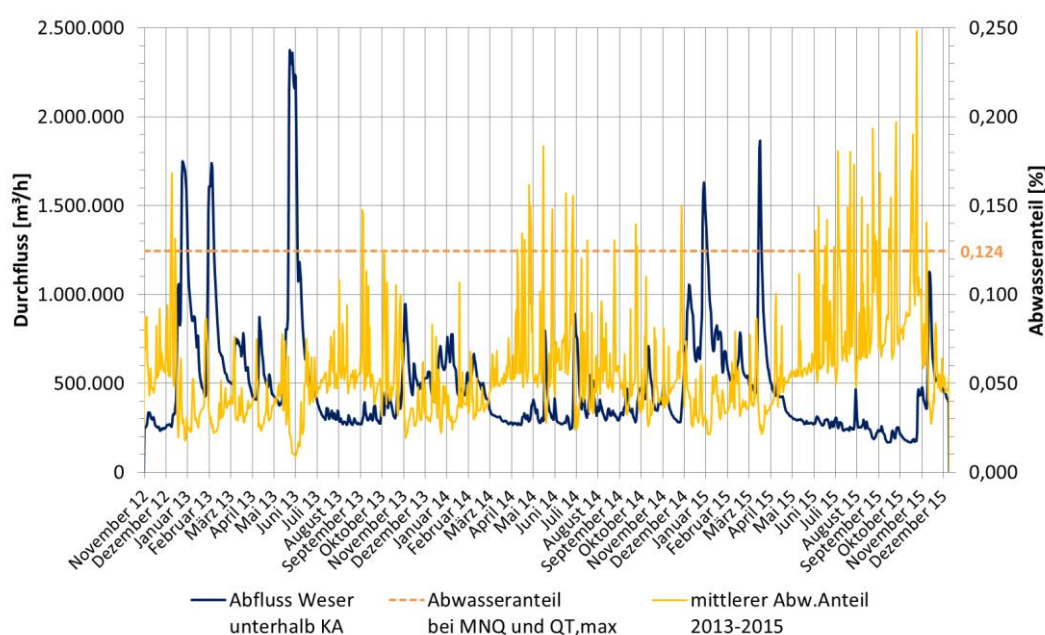


Abbildung 8: Abwasseranteil im Vorfluter Weser am Pegel Vlotho (2012-2015)

3.7.2 Spurenstoffbelastung im Kläranlagenablauf

Die Ergebnisse der Spurenstoffanalysen im Ablauf der Kläranlage Vlotho sind in Abbildung 9, Abbildung 10 und Abbildung 11 im Vergleich zu den Belastungswerten anderer Kläranlagenabläufe in NRW und der Schweiz dargestellt. Durch die Bandbreite der vorhandenen Spurenstoffe und unterschiedliche Messziele der drei Analysen wurden in den Messreihen jeweils unterschiedliche Spurenstoffe analysiert.

Die drei Vergleiche zeigen, dass sowohl im April 2011, im Mai 2012 wie auch im Juni 2016 die Ablaufkonzentrationen der Kläranlage Vlotho für die jeweils analysierten Spurenstoffe sehr gut mit den Ablaufkonzentrationen anderer Kläranlagen in NRW und der Schweiz vergleichbar sind. Lediglich die Konzentrationen des Beta-Blockers Sotalol liegen in allen Proben über den Vergleichswerten, während

Benzotriazol nur in 2012 die Vergleichswerte überschritt. Der Betablocker Metoprolol liegt in allen Proben am oberen Rand. Die endokrin wirksamen Stoffe lagen in allen Proben unterhalb der Bestimmungsgrenze, welche z.T. auch die obere Grenze der Vergleichswerte darstellt.

Insgesamt scheint die Belastung des Kläranlagenablaufes durch Spurenstoffe in Vlotho in einem für NRW und der Schweiz üblichen Rahmen zu liegen.

Besondere Beachtung ist, im Hinblick auf eine mögliche Ozonbehandlung des Kläranlagenablaufes, der Bromidkonzentration zu widmen. Durch die Ozonung kann Bromid zu kanzerogenem Bromat oxidiert werden. Im Ablauf der Kläranlage Vlotho wurden zwischen 100 µg/l und 230 µg/l Bromid festgestellt. Untersuchungen stellten fest, dass bei den vorliegenden Bromid-Konzentrationen problematische Bromat-Konzentrationen auftreten können [25]. Zwar ist eine Ozonanlage auf der Kläranlage Vlotho nicht von vorn herein auszuschließen, jedoch sollte vor Errichtung einer Ozonanlage – auch mit Blick auf die im weiteren Verlauf der Weser liegende Trinkwassergewinnungsanlage – eine gesonderte Analyse der Bromatbildung erfolgen.

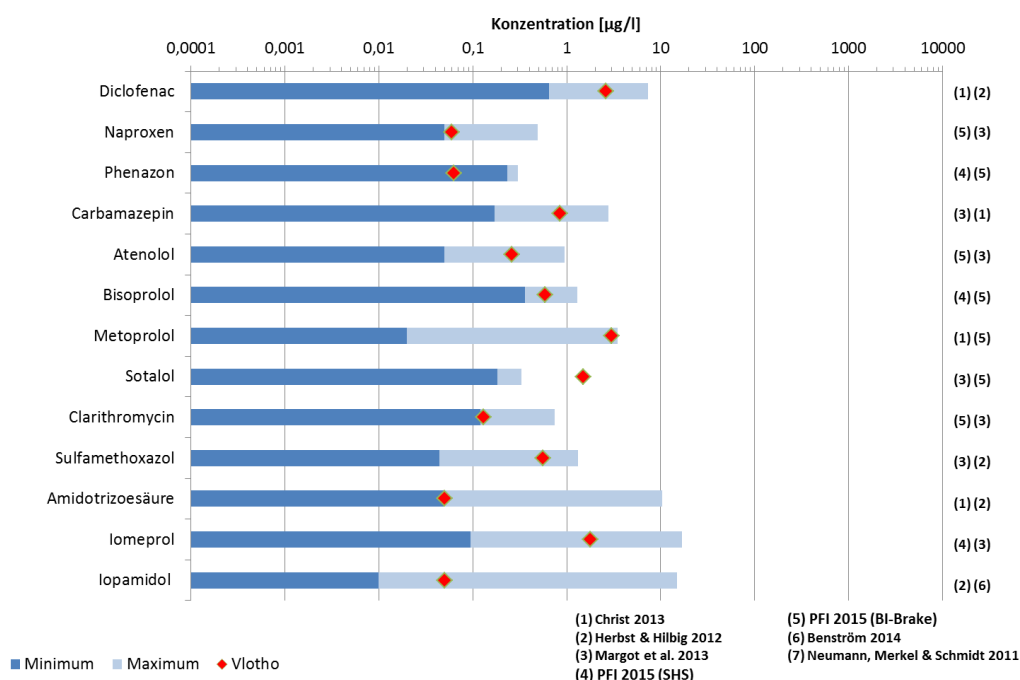


Abbildung 9: Auswahl der Spurenstoffe im Ablauf der Kläranlage Vlotho April 2011 (Stichprobe) im Vergleich zu anderen Anlagen in NRW und der Schweiz [21][17][22][23][24]

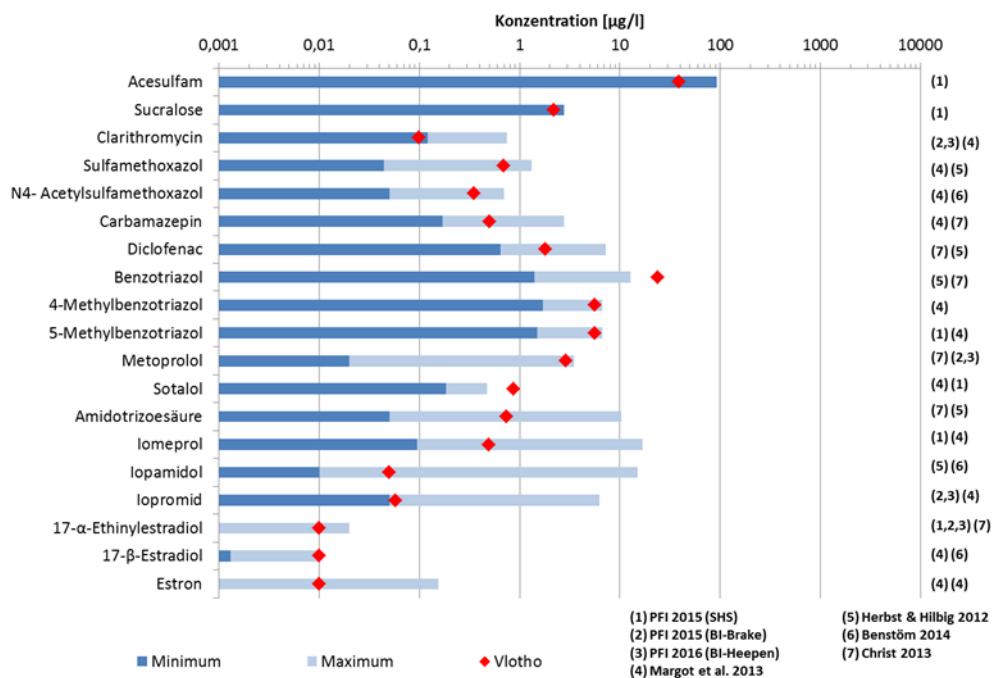


Abbildung 10: Spurenstoffe im Ablauf der Kläranlage Vlotho im Mai 2012 (Mehr tägige Mischprobe) im Vergleich zu anderen Anlagen in NRW und der Schweiz [24][22][17][21][23][25]

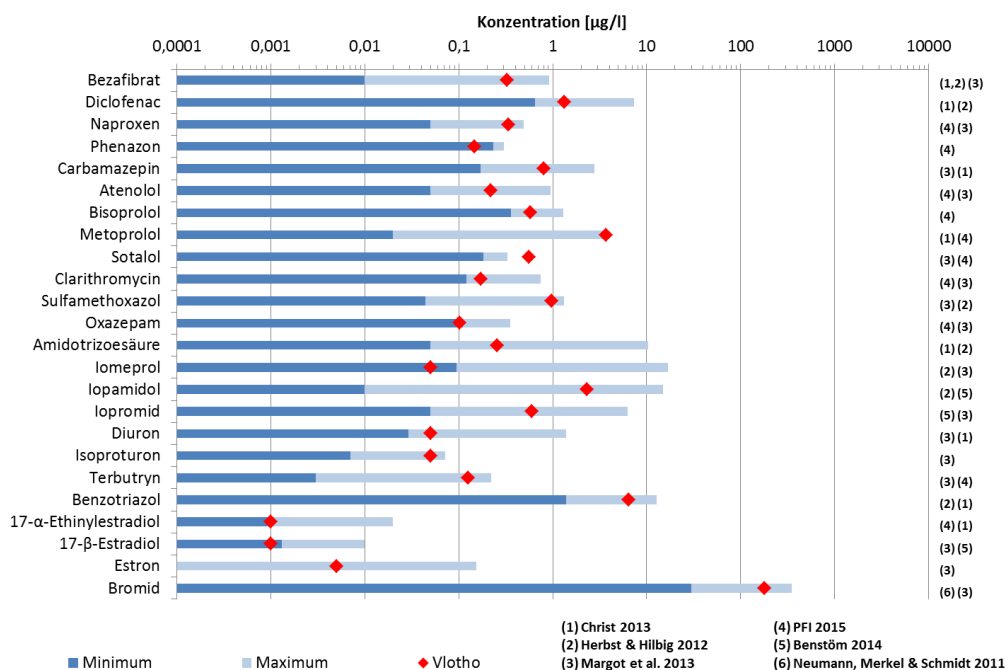


Abbildung 11: Spurenstoffe im Ablauf der Kläranlage Vlotho im Juni 2016 (Mittelwert aus einer 48-h-Mischprobe und zwei 24-h-Mischproben) im

**Vergleich zu anderen Kläranlagen in NRW und der Schweiz
[24][22][17][21][23][25]**

Die ermittelten Konzentrationen der meisten Spurenstoffe in den insgesamt fünf Einzelproben sind untereinander gut vergleichbar, jedoch wurden in jedem Jahr mitunter unterschiedliche Parameter analysiert. Nur die Konzentrationen der Diagnostika variieren stark. Dies liegt daran, dass Röntgenkontrastmittel nur sehr punktuell verwendet und innerhalb weniger Stunden nach der Einnahme vom Patienten zum größten Teil wieder ausgeschieden werden. Dadurch resultieren zwangsläufig starke Konzentrationsschwankungen im Ablauf von Kläranlagen. Die folgenden Untersuchungen wurden mit gemittelten Spurenstoffkonzentrationen durchgeführt.

Die im Ablauf der Kläranlage Vlotho gemittelten Spurenstoffkonzentrationen und die nur aus der Klärwerkseinleitung resultierenden mittleren Spurenstoffkonzentrationen im Gewässer zu den Zeitpunkten der Probenahmen sind in Tabelle 8 dargestellt. Weiter sind vorhandene Umweltqualitätsnormen (UQN), Vorschläge für UQN, die derzeit in der Fachwelt für Spurenstoffe diskutiert werden, und der allgemeine Vorsorgewert dargestellt [26][27][28].

Die aus dem Ablauf der Kläranlage Vlotho eingeleiteten resultierenden Konzentrationen führten zu den jeweiligen Zeitpunkten der Probenahmen erwartungsgemäß zu keinen Überschreitungen der allgemeinen Vorsorgewerte und der UQN, da die Verdünnung im sehr großen Vorfluter Weser enorm ist. Allerdings sind für einige Stoffe wie z.B. die Östrogene bereits bei sehr geringen Konzentrationen – zum Teil geringer als die Bestimmungsgrenze – negative Auswirkungen auf die aquatische Umwelt nachgewiesen, sodass jegliche Reduzierung der Einträge einen Beitrag im Sinne des vorsorgenden Gewässerschutzes darstellt.

Tabelle 8: Gemittelte Spurenstoffkonzentrationen im Ablauf der Kläranlage Vlotho und daraus resultierende Belastungen im Gewässer für 2016 verglichen mit UQN, Vorschlägen für UQN und dem allgemeinen Vorsorgewert [26][27][28]. Überschreitungen im Gewässer sind farblich markiert.

Stoffbezeichnung	Einheit	Konzentration im Ablauf	resultierende Konzentration im Gewässer	UQN nach		UQN nach		allg. Vorsorge-
				JD-UQN	ZHK-UQN	JD-UQN	ZHK-UQN	
Bezafibrat	µg/l	0,327	0,0036			0,46	76	0,1
Diclofenac	µg/l	1,333	0,0139			0,05		0,1
Naproxen	µg/l	0,337	0,0035			1,7	370	0,1
Phenazon	µg/l	0,147	0,0015					0,1
Carbamazepin	µg/l	0,800	0,0084			0,5	2550	0,1
Atenolol	µg/l	0,220	0,0023			150	330	0,1
Bisoprolol	µg/l	0,580	0,0061					0,1
Metoprolol	µg/l	3,700	0,0387					0,1
Sotalol	µg/l	0,557	0,0058					0,1
Clarithromycin	µg/l	0,173	0,0018			0,06	0,11	0,1
Sulfamethoxazol	µg/l	0,980	0,0102			0,6	2,7	0,1
Oxazepam	µg/l	0,102	0,0011					0,1
Amidotrizoensäure	µg/l	0,255	0,0027					0,1
lomeprol	µg/l	<0,05	0,0005					0,1
lopamidol	µg/l	2,327	0,0243					0,1
lopromid	µg/l	0,595	0,0062					0,1
Diuron	µg/l	<0,05	0,0005	0,2	1,8	0,02	0,06	0,1
Isoproturon	µg/l	<0,05	0,0005	0,3	1	0,32	1,2	0,1
Terbutryn	µg/l	0,127	0,0013			0,065	0,34	0,1
Benzotriazol	µg/l	6,467	0,0676			30	120	0,1
17-α-Ethinylestradiol	ng/l	<1	0,01			0,037		100
17-β-Estradiol	ng/l	<1	0,01			0,4		100
Estron	ng/l	<5	0,05			3,6		100
Bromid	mg/l	0,18	0,002					0,01

Die resultierenden Konzentrationen im Gewässer dürfen keinesfalls als die Belastungssituation des Vorfluters verstanden werden. Sie stellen vielmehr dar, inwiefern die Kläranlageneinleitung die Konzentrationen der bereits im Gewässer vorhandenen Spurenstoffe verändert.

Sollte es in Zukunft eine gesetzliche Regelung zu Spurenstoffgrenzwerten geben, so kann diese auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Es können emissionsorientierte Grenzwerte für die Kläranlagenabläufe festgeschrieben werden – wie sie für die Standard-Parameter CSB, BSB₅, N_{ges} und P_{ges} existieren – , immissionsorientierte Gewässergrenzwerte eingeführt oder Eliminationsraten für einzelne Spurenstoffe oder deren Summe festgeschrieben werden. Im ersten Fall lägen klare Ablaufgrenzwerte vor, deren Einhaltung im Ablauf der Kläranlage überprüft werden müsste. Ähnliches würde im Falle von festen Eliminationsraten gelten. Im

zweiten Fall wären die Ablaufgrenzwerte jeder Kläranlage individuell aus den Gewässergrenzwerten und den Abwasseranteilen im Gewässer zu ermitteln. Dies könnte für einen Bemessungslastfall wie beispielsweise den in NRW derzeit für die kritische Abwasserbelastung herangezogenen mittleren Niedrigwasserabfluss erfolgen oder stufenweise für mehrere Bemessungspunkte.

Das Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW hat am 20.03.2015 eine „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ veröffentlicht. Als sensitive Leitparameter für eine Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination werden darin Metoprolol, Carbamazepin, Diclofenac, Sulfamethoxazol, 1H-Benzotriazol und Terbutryn vorgeschlagen, da sie aussagekräftig und analytisch ausreichend genau quantifizierbar sind. Sollte sich der allgemeine Vorsorgewert von 0,1 µg/l als Ablaufgrenzwert durchsetzen, so würden bei mittlerem Niedrigwasserabfluss derzeit alle sechs Überwachungsparameter durch den Ablauf der Kläranlage Vlotho überschritten werden. Würden die vom Oekotoxzentrum vorgeschlagenen UQN als Ablaufgrenzwerte festgelegt, so würden diese immer noch von vier Stoffen überschritten, während für Benzotriazol der Grenzwert weit unterschritten werden würde.

3.7.3 Spurenstoffbelastung im Vorfluter unterhalb und oberhalb der KA

Die tatsächliche Belastungssituation im Gewässer im Bereich der Kläranlage Vlotho wurde von der OWL Umweltanalytik GmbH in Stichproben vor bzw. nach der Einleitungsstelle gemessen und analysiert. Die Entnahme erfolgte kurz vor Beendigung der 48-h-Mischprobe am 10.06.2016. Die Analyse erfolgte auf die gleichen 23 Spurenstoffe, wie in den in 2016 aus dem KA-Ablauf entnommenen Mischproben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 graphisch dargestellt.

Insgesamt lagen 16 der 23 analysierten Spurenstoffe weder oberhalb noch unterhalb der Kläranlageneinleitung oberhalb ihrer Bestimmungsgrenze in der Weser vor. Von den sieben mengenmäßig erfassbaren Spurenstoffen, liegen vier bereits vor der KA-Einleitung oberhalb des allgemeinen Vorsorgewertes vor. Fünf der im Oberlauf quantifizierbaren Spurenstoffe werden durch die KA-Einleitung noch erhöht. Keine der quantifizierbaren Spurenstoffkonzentrationen überschreitet die jeweilige UQN bzw. die vorgeschlagenen UQN gemäß Oekotoxzentrum. Zu insgesamt fünf Spurenstoffen, die nicht oberhalb ihrer Bestimmungsgrenze vorlagen (Diclofenac, Diuron und Östrogene), ist eine Aussage zu Überschreitungen nicht

möglich, da die vorgeschlagenen UQN geringer ausfallen, als die Bestimmungsgrenze der Messverfahren.

Die Erhöhung der Konzentrationen der anthropogenen Spurenstoffe in der Weser durch die Kläranlage Vlotho sowie die vom Oekotoxzentrum vorgeschlagenen UQN werden in Abbildung 12 dargestellt.

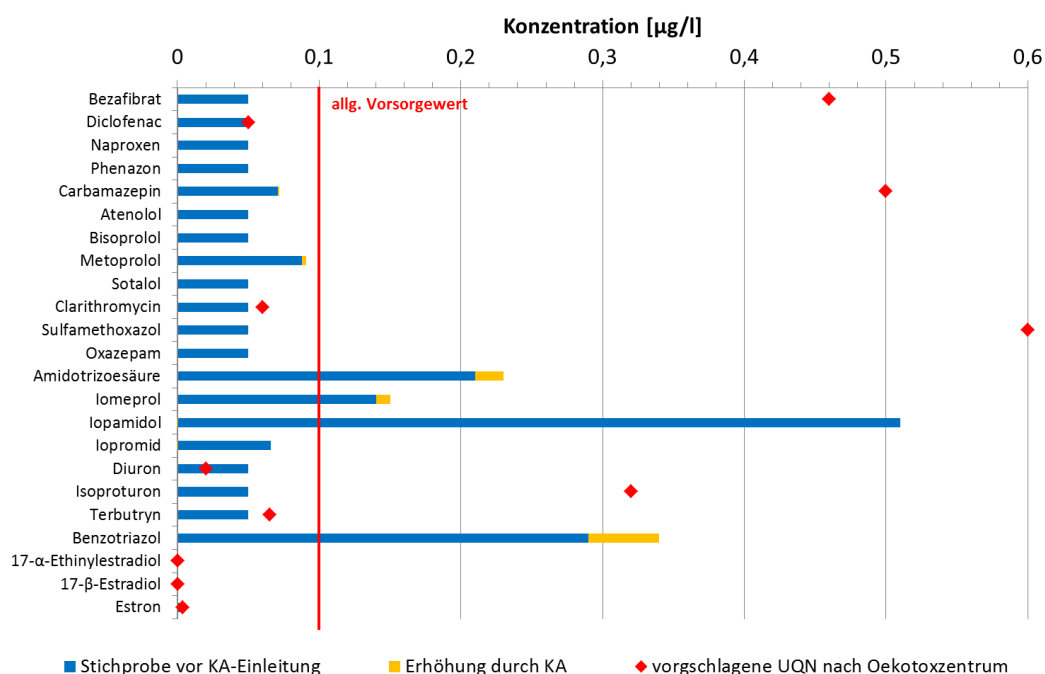


Abbildung 12: Erhöhung der Spurenstoffkonzentrationen im Vorfluter durch die Kläranlage Vlotho (Juni 2016)

Zwar ist zu erkennen, dass die Belastung durch Spurenstoffe in der Weser verglichen mit dem allgemeinen Vorsorgewert in vielen Fällen geringer ausfällt, die Überschreitungen der messbaren Substanzen dafür umso stärker ausgeprägt sind. Auch Metoprolol (Betablocker), Cabramazepin (Antibiotikum) und Benzotriazol (Antikorrosionsschutzmittel z.B. in Spülmitteln), welche vom Kompetenzzentrum für Mikroschadstoffe.NRW als Leitsubstanzen angegeben werden, liegen nur leicht unter bzw. deutlich über dem Vorsorgewert.

Weiterhin bietet der allgemeine Vorsorgewert keine fundierte Grundlage für die Ableitung möglicher zukünftiger Auflagen zur Spurenstoffelimination, da er sich nicht aus stoffspezifischen Wirkschwellen ableitet. Und auch unabhängig davon ist aufgrund von sich ständig verbessernder Analysetechnik und immer neuen Erkenntnissen die Diskussion um die Relevanz einzelner Stoffe und der passenden

Grenzwerte noch nicht an ihr Ende gelangt. Fest steht allerdings, dass die Umsetzung einer Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination die Spurenstoffeinleitung durch die Kläranlage Vlotho nachhaltig reduzieren und – mit Blick auf zukünftige gesetzliche Regelungen – Sicherheit zur Einhaltung möglicher Auflagen geben würde.

4. **Neubau einer Belebungsanlage auf der Kläranlage Vlotho**

Im Rahmen der Ertüchtigung der Kläranlage Vlotho wird als Grundlage für eine effiziente Spurenstoffelimination derzeit die Errichtung einer neuen biologischen Reinigungsstufe nach dem Belebtschlammverfahren und die anschließende Außerbetriebnahme der Biofor-Anlage geplant.

Die neue Belebungsanlage wird aufgrund der ungünstigen Untergrund- und Grundwasserverhältnisse auf dem Gelände der Kläranlage Vlotho nur etwa 1,50 m unter der aktuellen Geländeoberkante gegründet. Sie wird mit rd. 7,00 m Wassertiefe als 2er-Kaskade mit jeweils vorgeschalteter Denitrifikationszone ausgebildet. Die Abscheidung des Belebtschlammes aus dem Abwasserstrom erfolgt in zwei runden Nachklärbecken. Der Rücklaufschlamm wird durch jeweils eine Schneckenrotpumpe aus den Nachklärbecken abgezogen und zurück in den Zulauf zur Kaskade 1 gefördert. Baulich dem Rücklaufschlammhebewerk angegliedert ist ein Schwimmschlamm-schacht, ein Sammelschacht für den Ablauf der NKB sowie ein Messraum zur Unterbringung des Ablaufprobenehmers und der Mengennmessungen „Ablauf KA“, „RLS 1“ und „RLS 2“ (Rücklaufschlammabzug aus den beiden NKB). Zwischen dem Belebungsbecken und den beiden Nachklärbecken wird ein neues Maschinengebäude errichtet. Folgende Anlagenbereiche werden in diesem Maschinengebäude untergebracht:

- Zwischenhebewerk zur Förderung des Abwassers vom Ablauf der Vorklä- rung in die Belebung inkl. Pumpenvorlage (Kellergeschoss)
- Überschussschlamm-pumpe zum Abzug des Überschussschlammes (ÜS) direkt aus dem RLS (Kellergeschoss)
- Fällmitteldosierstation (Kellergeschoss)
- Verdichterstation zur Belüftung der Belebungsbecken (Erdgeschoss)
- Schaltanlage zur Energieversorgung, Steuerung und Regelung der gesam- ten biologischen Reinigungsstufe (Obergeschoss)

Der aus dem Rücklaufschlamm abgezogene Überschussschlamm wird direkt zur Überschussschlamm-eindickung (ÜSE) gefördert, die in der Stahlhalle der ehema- ligen Fäkalannahmestation errichtet wird. Der Neubau einer Überschussschlamm-eindickung wird erforderlich, da beim Betrieb der Belebungsanlage Überschuss- schlamm anfallen wird, der im Gegensatz zum ÜS einer Biofor-Anlage einer ma-

schinellen Eindickung bedarf, bevor er wirtschaftlich im Faulbehälter ausgefault werden kann.

Im Rahmen der Planungen zum Neubau der Belebungsanlage wird auch Anbindung und Betrieb einer weitergehenden Reinigungsstufe zur gezielten Spurenstoffelimination bereits mit berücksichtigt und in das Gesamtkonzept integriert. So werden die Zu- und Ablaufleitung der sogenannten 4. Reinigungsstufe bei der Planung der Leitungsanbindungen und Leitungsführung im Untergrund mit berücksichtigt und der Messraum am RLS-Pumpwerk wird so gestaltet, dass eine Durchflussmengenmessung für den Zulauf zur 4. Reinigungsstufe inkl. entsprechender Messstrecke problemlos integriert werden kann. Darüber hinaus wird der Sammelschacht im Ablauf der Nachklärung so gestaltet, dass eine Überfallkante mit höhenverstellbarem Wehr installiert werden kann. Dadurch kann – in Kombination mit der erwähnten Durchflussmengenmessung – eine gezielte Beschickung der Anlage zur Spurenstoffelimination mit dem maximalen Trockenwetterzufluss gewährleistet werden. Bei Mischwasseranfall wird ein Teil der Abwassermenge abgeschlagen und an der Anlage zur gezielten Spurenstoffelimination vorbei direkt in den Ablauf der Kläranlage geleitet. Auf diese Weise wird rd. 90 % der Jahresabwassermenge auf der Kläranlage Vlotho in der Anlage zur gezielten Spurenstoffelimination behandelt.

Durch den Neubau der Belebungsanlage ergibt sich eine Reihe von Vorteilen für die weitergehende Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho. Zum einen wird die Biofor-Anlage nach Inbetriebnahme der neuen Belebungsanlage frei und kann für die gezielte Spurenstoffelimination umgenutzt werden. Weiter ermöglicht die hohe Leistungsfähigkeit der Belebungsanlage in Kombination mit optimal gestalteten Nachklärbecken die Minimierung der Betriebskosten einer 4. Reinigungsstufe. Und schließlich kann durch die hohe Gründung der Belebungsanlage – je nach Verfahrensvariante – die Anlage zur weiteren gezielten Spurenstoffelimination ohne zusätzliches Pumpwerk betrieben werden. Dadurch werden durch den Bau der neuen Belebungsanlage in Summe erhebliche Kosten für den Betrieb einer 4. Reinigungsstufe eingespart.

Die Kosten für den Neubau der Belebungsanlage wurden einschließlich Zwischenhebewerk, Belebungsbecken, Maschinengebäude, Schaltanlagen, Nachklärbecken, Rücklaufschlammumpwerk und Überschussschlammeindickung im Rahmen der Vorplanung mit 7.644.500 € brutto inkl. Baunebenkosten ermittelt.

5. Variantenuntersuchung zur gezielten Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho

Für die gezielte Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho werden fünf verfahrenstechnische Varianten herausgearbeitet. Vier davon betrachten einzelne Verfahrenstechniken, während die fünfte Variante die Kombination von Ozon und GAK betrachtet.

5.1 Variante 1: Pulveraktivkohledosierung in ein Kontaktbecken

5.1.1 Allgemeine Beschreibung

Auf der Kläranlage Vlotho kann eine Spurenstoffelimination durch Pulveraktivkohle (PAK) erfolgen. Diese kann in einem Kontaktbecken mit dem mechanisch-biologisch vorgereinigten Abwasser aus der neuen Belebungsanlage in Kontakt gebracht werden. Zur Abscheidung der feindispersen PAK-Anteile ist eine Filtration erforderlich. Hierzu kann der vorhandene Festbettfilter umgenutzt werden, sodass kein zusätzliches Gebäude errichtet werden müsste.

Eine PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken im Ablauf der Nachklärung und die dafür erforderliche Flockungsfiltration hätten einige direkten und indirekten Auswirkungen auf den Betrieb der anderen Verfahrensstufen auf der Kläranlage Vlotho. Beim PAK-Einsatz ist ein um rd. 5 – 10 % erhöhter Schlammfall zu beachten, der sowohl von den Schlammumpfen, wie auch von der Schlammbehandlung bewältigt werden muss. Im Falle der Schlammbehandlung, die im Zuge der Ertüchtigung der Kläranlage Vlotho zum Neubau aussteht, kann die höhere Schlammmenge problemlos bewältigt werden. Eine erhöhte Schlammbelastung durch PAK könnte entsprechend berücksichtigt werden, sodass auch hier weder Einschränkungen noch Mehraufwand für eine PAK-Anlage erwartet werden. Darüber hinaus würde die Rückführung des bei der Filterspülung anfallenden Schlammwassers in den Zulauf zur Biologie eine kurzzeitig erhöhte hydraulische Belastung für die Belebungsbecken und die Nachklärung bedeuten. Auch hier würde die Einbindung einer 4. Reinigungsstufe und die anfallende Spülwassermenge in der Planung der neu zu errichtenden biologischen Reinigungsstufe mit berücksichtigt, sodass die hydraulische Mehrbelastung kein Problem darstellt.

5.1.2 Dimensionierung

Ein Kontaktbecken für die PAK-Behandlung des mechanisch-biologisch vorgereinigten Abwassers sollte auf den Trockenwetterzufluss im Spitzenlastfall von rd. 271 m³/h und eine Kontaktzeit von mindestens 30 Minuten ausgelegt werden. Auf der Kläranlage Vlotho soll das Kontaktbecken für die PAK-Behandlung auf den Trockenwetterzufluss im Spitzenlastfall ausgelegt werden. Die Beckenabmessungen werden durch die in Zukunft ungenutzten Deni-Filterkammern der Biofor-Anlage vorgegeben. Jedes der vier vorhandenen Becken hat ein Volumen von rd. 110 m³. Für den Bemessungsfall sind 135 m³ Beckenvolumen erforderlich. Es werden zwei Kontaktbecken mit insgesamt rd. 220 m³ Volumen gewählt. Daraus resultiert eine ausreichende Kontaktzeit von rd. 49 Minuten bei Spitzentrockenwetterzufluss. Damit die PAK im Kontaktbecken nicht auf den Beckenboden absinkt werden Rührwerke im Kontaktbecken vorgesehen.

Auf jeden Fall ist eine Filtration nach dem Kontaktbecken anzuordnen, um die PAK vollständig aus dem Abwasserstrom zu entfernen. Hierfür wird eine Flockungs-Raumfiltration gemäß des Arbeitsblattes ATV-DVWK-A 203 vorgesehen [29]. Zur Filtration des mit PAK behandelten Abwassers im Trockenwetterlastfall sind mind. 54 m² Filterfläche erforderlich. Bei Umrüstung der vorhandenen Biofor-Festbettfilter sind 3 Filtereinheiten (jeweils 7,0 m x 4,0 m = 28 m²) mit einer Gesamtfilterfläche von 84 m² ausreichend. Für den Betrieb der Flockungsfiltration sind zusätzlich ein Spülwasserspeicher ($V = 173 \text{ m}^3$) sowie ein Schlammwasserspeicher ($V = 193 \text{ m}^3$) erforderlich. Die vorhandene Bausubstanz der Biofor-Anlage bietet ein Klarwasserbecken von rd. 220 m³ Volumen und einen Schlammwasserspeicher von rd. 200 m³ Volumen und ist daher für die Bemessung ausreichend groß. Die Filterspülung wird alle 24 h vorgesehen oder wenn ein bestimmter Filtervordruck unterschritten wird. Das Spülabwasser würde in das Verteilerbauwerk zwischen Vorklärung und Belebung gegeben, um die abfiltrierten Feststoffe in den NKB mit dem Überschussschlamm abzuziehen.

Das PAK-Silo wird, unter Berücksichtigung der Expansion der PAK beim Befüllen des Silos, so ausgelegt, dass eine LKW-Ladung PAK eingelagert werden kann. Diese Vorgehensweise hat sich aufgrund der i.d.R. langen Lieferwege von PAK als zielführend erwiesen. Daraus resultiert eine Standard-Silogröße von 70 m³ Nutzraum. Das Silo muss in Ex-Schutz ausgeführt werden, da die Gefahr von Staubexplosionen besteht.

Die Dosierung der PAK sollte über eine gravimetrische Dosieranlage volumenproportional zum Zufluss des Kontaktbeckens erfolgen. In Abhängigkeit des aktuellen Zuflusses ist schrittweise eine dosierte PAK-Menge einzustellen.

5.1.3 Einbindung in die Kläranlage Vlotho

Auf der Kläranlage Vlotho werden durch den Neubau der biologischen Reinigung freie Beckenkapazitäten in der Biofor-Anlage vorhanden sein. Daher ist für die Integration der PAK Anlage nur eine Umrüstung der vorhandenen Bausubstanz erforderlich. Es müssen zwei der vier Deni-Becken zu Kontaktbecken und drei der Nitri-Becken zu einer Sandfiltration umgerüstet werden. Dafür werden in allen vorgesehenen Becken die vorhandenen Düsenböden abgebrochen und der Beton saniert. Zusätzlich werden in den zukünftigen Filterbecken neue Düsenböden aufgeständert auf 3,00 m über Beckensohle angeordnet, um die Spülkosten gering zu halten.

Damit die Kontaktbecken im Freigefälle durchflossen werden können, ist nach hydraulischer Berechnung eine Absenkung der Beckenkrone – und damit des Zulaufs – um rd. 0,35 m erforderlich. Die Filtration wird von einem aufwärts durchströmten Filter in einen abwärts durchströmten Filter umgebaut. Hierzu ist eine Anpassung und teilweise Erneuerung der Rohrleitungen sowie zugehöriger Armaturen erforderlich. Im Filtrationsgebäude werden ebenfalls der Schaltraum und die Niederspannungsunterverteilung (NSUV) erneuert.

Das erforderliche PAK-Silo mit der gravimetrischen Dosierstation kann auf der Freifläche an der Südwand des Filtrationsgebäudes errichtet werden. Dieser Standort ist für die PAK-Lieferung mit einem LKW gut zugänglich. Darüber hinaus ermöglicht die Nähe zum geplanten Standort des Kontaktbeckens eine kurze Rohrleitungsführung.

Die Dosierung der PAK sollte direkt in den Zulauf zum Kontaktbecken erfolgen.

Die Umsetzung der Variante 1 ist in Abbildung 13 und Abbildung 14 schematisch dargestellt.

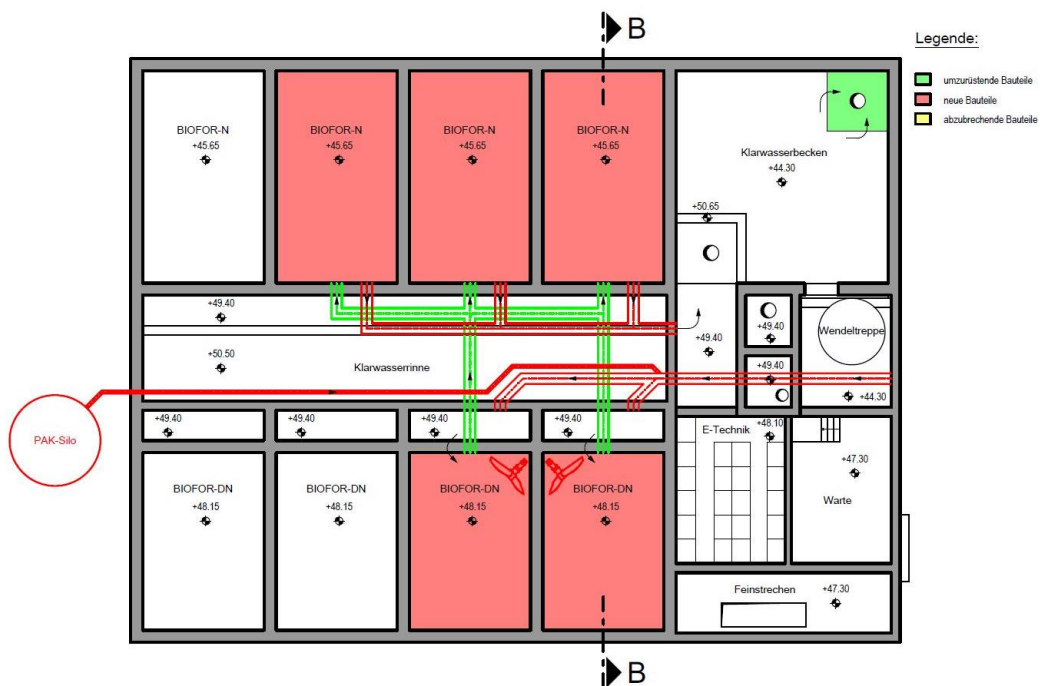


Abbildung 13: Umsetzung der Variante 1 auf der Kläranlage Vlotho – Grundriss

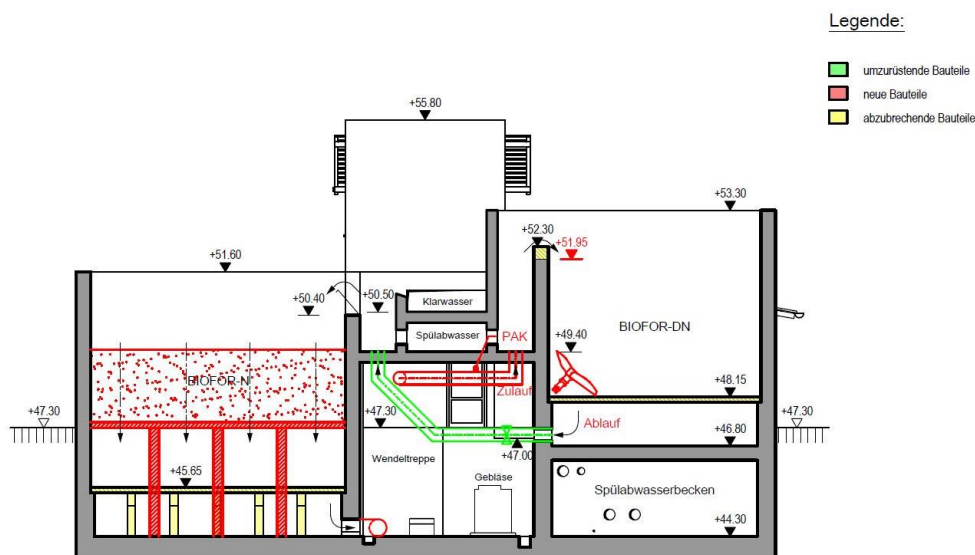


Abbildung 14: Umsetzung der Variante 1 auf der Kläranlage Vlotho – Schnitt

5.1.4 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante 1 (PAK-Dosierung in Kontaktbecken) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho wurden auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen Angebotspreisen,

vorliegenden Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Umrüstung von zwei Denitrifikationsfiltern der Biofor-Anlage zu Kontaktbecken
- Umrüstung von drei Nitrifikationsfiltern der Biofor-Anlage zu einer abwärts durchströmten Sandfiltration
- Betonsanierung der bestehenden umzurüstenden Filterbecken
- Anpassung der Rohrleitungsführung und Erneuerung der Armaturen innerhalb der Biofor-Anlage
- Erneuerung der Spülluftgebläse und der Spülwasserpumpen
- Neue erdverlegte Zu- und Ablaufleitungen von den Nachklärbecken bis zur Biofor-Anlage
- PAK-Silo einschl. Dosierstation und Schaltanlage
- Installation einer Dosierleitung vom PAK-Silo zum Kontaktbecken innerhalb der Biofor-Anlage
- Errichtung einer neuen Niederspannungsunterverteilung (NSUV)
- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS

Bei den Betriebskosten wurden die anfallenden Kosten für Energie, Betriebsmittel, Schlamm Entsorgung, Spurenstoffanalyse, Wartung und Personal mit berücksichtigt. Darüber hinaus wurden zu erwartende Einsparungen durch verringerte CSB- und P_{ges} -Ablaufwerte, sowie die Einsparungen durch die öffentlichen Fördergelder in Höhe von 70 % der Herstellungskosten in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes (PKBW) und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung von 2,0 % angesetzt. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit ungeklärten Zukunft bezüglich der Gesetzeslage wird ein Abschreibungs-

zeitraum von 15 Jahren gewählt. Anschließend wird im Zuge des Variantenvergleichs zusätzlich eine Betrachtung über 35 Jahre angestellt. Als Preis für die benötigte Energie wird ein Strompreis von 0,21 €/kWh angesetzt [18].

In Tabelle 9 sind der Projektkostenbarwert und die zugehörigen Jahreskosten für eine Aktivkohledosierung in ein Kontaktbecken nach der Nachklärung dargestellt.

Tabelle 9: Zusammenstellung des Projektkostenbarwert für Variante 1: PAK in Kontaktbecken

		Variante 1: PAK in Kontaktbecken
Investitionskosten, netto	€	1.710.000
Bautechnik		423.000
Maschinentechnik		727.000
E-MSR		252.000
Herstellkosten, brutto	€	2.035.000 €
Barwert Energiekosten		204.000 €
Grundkosten Filterspülung	€/a	3.400
Betriebsmittelerzeugung/-Dosierung	€/a	9.200
Barwert Betriebskosten		2.204.000 €
Betriebsmittel	€/a	31.400
Schlammmentsorgung	€/a	38.400
Spurenstoffanalyse	€/a	9.800
Wartung	€/a	33.600
Personal	€/a	45.500
Barwert Einsparungen		1.972.000 €
Förderung NRW	€	1.425.000
Abwasserabgabe	€/a	39.400
Projektkostenbarwert PKBW, brutto		2.471.000 €
mittlere Jahreskosten JK, brutto		207.000 €/a
spezifische Kosten:	€/m ³	0,117
	€/(EW*a)	10,35

Durch den Einsatz von Pulveraktivkohle wäre eine landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes nicht mehr zulässig. Derzeit werden 50 % des Klärschlammes aus der Kläranlage Vlotho landwirtschaftlich verwertet. Die Mehrkosten aus der thermischen Schlammmentsorgung, sowie die Kosten für die mehr anfallende Schlammmenge von rd. 10% aus PAK-Einsatz werden unter dem Titel „Schlammmentsorgung“ zusammengefasst. Sollte sich in Zukunft die Gesetzeslage bezüglich der Klärschlammmentsorgung dahingehend ändern, dass eine landwirtschaftli-

che Verwertung generell ausgeschlossen wird, so wären die Mehrkosten für die thermische Schlamm Entsorgung kostenneutral für diese Verfahrensvariante, da sie generell für das Klärwerk anfallen würden.

Der Projektkostenbarwert für Variante 1 über 15 Jahre und die dazugehörigen Jahreskosten sowie die Spezifischen Kosten sind in Tabelle 9 dargestellt. Für einen Zeitraum von 35 Jahren beträgt der PKBW für Variante 1 rd. 5,57 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von rd. 259.000 €/a. Die Spezifischen Kosten ergeben sich umgerechnet auf die mittlere jährliche Abwassermenge von rd. 1,973 Mio. m³/a und einer mittleren Belastung von ca. 20.000 EW. Dies entspricht spezifischen Kosten für 35 Jahre von rd. 0,146 €/m³ oder 12,95 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen sind in diesen Kosten enthalten.

5.2 Variante 2: Pulveraktivkohledosierung in den Zulauf zur Filtration

5.2.1 Allgemeine Beschreibung

Da für den PAK-Einsatz auf der Kläranlage Vlotho in jedem Fall eine Filtration erforderlich wird, kann die PAK-Dosierung zur Spurenstoffelimination direkt in den Zulauf zur vorgesehenen Flockungsfiltration erfolgen. Eine konventionelle Flockungsfiltration wird anderen Filtern vorgezogen, da sie zusätzlich die Verringerung der P_{ges} -Ablaufkonzentration ermöglicht.

Eine PAK-Dosierung in den Zulauf zur Flockungsfiltration würde den Betrieb eines zusätzlichen Kontaktbeckens erübrigen. Allerdings würden sich die Kontaktzeiten zwischen PAK und Abwasser sowie die Verweilzeit der PAK im System verringern. Auswirkungen hätte diese Betriebsweise auf die geplante Flockungsfiltration selbst und durch den in Summe um 5 bis 10 % erhöhten Schlammanfall auf die Schlammbehandlung. Wie für Variante 1 bereits beschrieben werden durch den erhöhten Schlammanfall und das anfallende Spülabwasser jedoch keine Probleme erwartet.

5.2.2 Dimensionierung

Durch die erforderliche Kontaktzeit von mindestens 20 bis 30 Minuten ergibt sich in Abhängigkeit vom Volumen des Filterüberstaus die Anzahl der erforderlichen Filtereinheiten. Im Spitzenlastfall bei Trockenwetter (271 m³/h) würden 3 Filterkammern mit jeweils 28 m² Oberfläche und 2,50 m Filterüberstau eine

ausreichende Kontaktzeit von rd. 47 Minuten gewährleisten. Für das PAK-Silo wird, wie in Variante 1 beschrieben, ein Silo von 70 m³ Nutzraum vorgesehen. Auch die PAK-Dosierung wird, wie in Variante 1, volumenproportional zum Zulaufvolumenstrom mit einer gravimetrischen Dosiervorrichtung vorgesehen.

5.2.3 Einbindung in die Kläranlage Vlotho

Die Anordnung der einzelnen Bauwerke für diese Verfahrensvariante wird so vorgesehen, wie in Variante 1 beschrieben. Das Kontaktbecken ist jedoch nicht erforderlich.

Der erforderliche Kontaktraum wird hier innerhalb der Filterkammer überhalb des Filterbettes vorgehalten. In den Kontaktraum müssen weiterhin Rührwerke installiert werden, um ein Absinken der PAK zu verhindern.

Ebenfalls wie bei Variante 1 sollte die Dosierung der PAK in den Zulauf zu den Filterkammern erfolgen.

Das Spülintervall sollte bei einer PAK-Dosierung in den Zulauf zur Flockungsfiltration grundsätzlich dem Spülintervall einer konventionell betriebenen Flockungsfiltration angeglichen werden. Daher werden die Bedingungen für den Start einer Filterspülung so gewählt, wie in Variante 1 beschrieben. Durch das Spülintervall von i.d.R. 24 h ergäbe sich eine ausreichende mittlere Verweilzeit der PAK von rd. 12 h. Die Zugabe des Schlammwassers in das Verteilerbauwerk zur Biologie erfolgt ebenfalls wie in Variante 1 beschrieben.

Die Umsetzung der Variante 2 ist in Abbildung 15 und Abbildung 16 schematisch dargestellt.



Abbildung 15: Umsetzung der Variante 2 auf der Kläranlage Vlotho – Grundriss

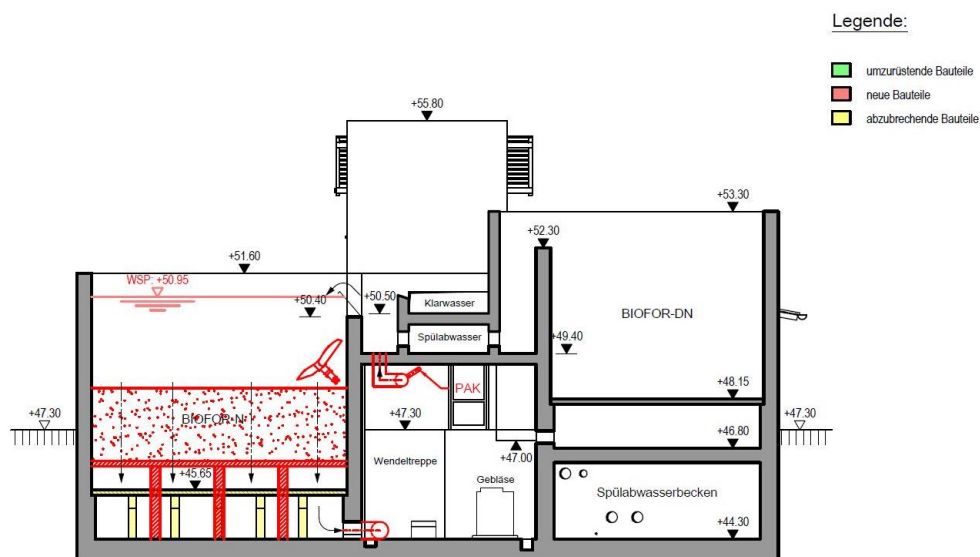


Abbildung 16: Umsetzung der Variante 2 auf der Kläranlage Vlotho – Schnitt

5.2.4 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante 2 (PAK-Dosierung in den Zulauf zur Flockungsfiltration) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho wurden auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen

Angebotspreisen, vorliegenden Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Umrüstung von drei Nitrifikationsfiltern der Biofor-Anlage zu einer abwärts durchströmten Sandfiltration
- Betonsanierung der bestehenden umzurüstenden Filterbecken
- Anpassung der Rohrleitungsführung und Erneuerung der Armaturen innerhalb der Biofor-Anlage
- Erneuerung der Spülluftgebläse und der Spülwasserpumpen
- Neue erdverlegte Zu- und Ablaufleitungen von den Nachklärbecken bis zur Biofor-Anlage
- PAK-Silo einschl. Dosierstation und Schaltanlage
- Installation einer Dosierleitung vom PAK-Silo zum Zulauf zur Filtration innerhalb der Biofor-Anlage
- Errichtung einer neuen Niederspannungsunterverteilung (NSUV)
- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS

Bei den Betriebskosten wurden die anfallenden Kosten für Energie, Betriebsmittel, Schlammentsorgung, Spurenstoffanalyse, Wartung und Personal mit berücksichtigt. Darüber hinaus wurden zu erwartende Einsparungen durch verringerte CSB- und P_{ges} -Ablaufwerte, sowie die Einsparungen durch die öffentlichen Fördergelder in Höhe von 70 % der Herstellungskosten in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung von 2,0 % angesetzt. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit ungeklärten Zukunft bezüglich der Gesetzeslage wird auch hier ein Abschreibungszeitraum von 15 Jahren gewählt. Anschließend wird im Zuge des Variantenvergleichs zu-

sätzlich eine Betrachtung über 35 Jahre angestellt. Als Preis für die benötigte Energie wird ein Strompreis von 0,21 €/kWh angesetzt [18].

In Tabelle 10 sind der Projektkostenbarwert und die zugehörigen Jahreskosten für eine Aktivkohledosierung in den Zulauf zur Flockungsfiltration dargestellt.

Tabelle 10: Zusammenstellung des Projektkostenbarwert für Variante 2: PAK in Zulauf Flockungsfiltration

		Variante 2: PAK in Filterüberstau
Investitionskosten, netto	€	1.609.000
Bautechnik		348.000
Maschinentechnik		724.000
E-MSR		247.000
Herstellkosten, brutto	€	1.915.000 €
Barwert Energiekosten		234.000 €
Grundkosten Filterspülung	€/a	3.400
Betriebsmittelerzeugung/-Dosierung	€/a	11.000
Barwert Betriebskosten		2.190.000 €
Betriebsmittel	€/a	31.400
Schlamm Entsorgung	€/a	38.400
Spurenstoffanalyse	€/a	9.800
Wartung	€/a	32.600
Personal	€/a	45.500
Barwert Einsparungen		1.888.000 €
Förderung NRW	€	1.341.000
Abwasserabgabe	€/a	39.400
Projektkostenbarwert PKBW, brutto		2.451.000 €
mittlere Jahreskosten JK, brutto		205.000 €/a
spezifische Kosten:	€/m ³	0,116
	€/(EW*a)	10,25

Durch den Einsatz von Pulveraktivkohle wäre eine landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes nicht mehr zulässig. Derzeit werden 50 % des Klärschlammes aus der Kläranlage Vlotho landwirtschaftlich verwertet. Die Mehrkosten aus der thermischen Schlamm Entsorgung, sowie die Kosten für die mehr anfallende Schlammmenge von rd. 10% aus PAK-Einsatz werden unter Schlamm Entsorgung zusammengefasst. Sollte sich in Zukunft die Gesetzeslage bezüglich der Klärschlamm Entsorgung dahingehend ändern, dass eine landwirtschaftliche Verwertung generell ausgeschlossen wird, so wären die Mehrkosten für die thermische

Schlammensorgung kostenneutral für diese Verfahrensvariante, da sie generell für das Klärwerk anfallen würden.

Der Projektkostenbarwert für Variante 2 über 15 Jahre und die dazugehörigen Jahreskosten sowie die Spezifischen Kosten sind in Tabelle 9 dargestellt. Für einen Zeitraum von 35 Jahren beträgt der PKBW für Variante 2 rd. 5,57 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von rd. 259.000 €/a. Die Spezifischen Kosten ergeben sich umgerechnet auf die mittlere jährliche Abwassermenge von rd. 1,973 Mio. m³/a und einer mittleren Belastung von ca. 20.000 EW. Dies entspricht spezifischen Kosten für 35 Jahre von rd. 0,146 €/m³ oder 12,95 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen sind in diesen Kosten enthalten.

5.3 Variante 3: Filtration mit granulierter Aktivkohle

5.3.1 Allgemeine Beschreibung

Auf der Kläranlage Vlotho kommt grundsätzlich auch die Abwasserfiltration mit granulierter Aktivkohle in Frage. Dazu müssten einzelne Kammern der bestehenden Biofor-Anlage umgerüstet werden. Im Zuge der Umrüstung ist auch eine Sanierung der Bausubstanz und eine weitest gehende Erneuerung der maschinen- und elektrotechnischen Ausrüstung erforderlich.

5.3.2 Dimensionierung

Für die GAK-Filtration wird der Spitzenzufluss bei Trockenwetter von rd. 271 m³/h als Bemessungszufluss angesetzt. Weiter wird eine Filtergeschwindigkeit bei Trockenwetter von maximal 5 m/h vorausgesetzt. Berücksichtigt man diese Vorgaben und beachtet weiterhin die Bemessungsgrundlagen für Raumfilter nach ATV-DVWK-A 203 [29] so ergibt sich bei einer gewählten Fläche je Filtereinheit von 28 m² (7,0 m x 4,0 m) eine erforderliche Anzahl von 3 Filterkammern. Diese Anzahl an Filterkammern würde selbst bei Spülung einer einzelnen Einheit für die Behandlung des Trockenwetterspitzenzuflusses eine ausreichende Leerbettkontaktzeit von 47 Minuten bei einer Filtergeschwindigkeit von rd. 4,8 m/h gewährleisten.

Das Filterbett der GAK-Filter sollte gemäß den Empfehlungen aus der Schweiz mit einer Schichtstärke von 2 m angesetzt werden. Der Filterüberstau wird auf 2,5 m festgesetzt, was für Raumfilter nach ATV-DVWK-A 203 ausreichend ist [29].

Für die erforderlichen 3 Filtereinheiten ergäbe sich dadurch ein erforderliches Aktivkohlevolumen von $211 \text{ m}^3_{\text{GAK}}$. Es werden 10.000 durchsetzbare Bettvolumina bis zum Austausch der GAK angenommen, was für den Spitzenzufluss bei Trockenwetter einer Filterstandzeit von gut 14 Monaten entspricht. Als Grundlage für die Ableitung von 10.000 BV dienen die Betriebserfahrungen der Kläranlagen Obere Lutter (rd. 15.000 BV), Buchenhofen ($> 15.000 \text{ BV}$) und Düren-Merken (rd. 9.000 BV bei im Mittel 20 bis $30 \text{ mg}_{\text{AFS}}/\text{l}$ im Filterzulauf). Bei 3 Filterkammern wäre 2,5-mal im Jahr der Austausch des jeweils am stärksten beladenen Filterbettes erforderlich. In Summe würden so rd. $177 \text{ m}^3_{\text{GAK}}/\text{a}$ benötigt

5.3.3 Einbindung in die Kläranlage Vlotho

Für die Einbindung einer GAK-Filtration in die Kläranlage Vlotho wäre die Umrüstung der vorhandenen Nitrifikationsfilter in der Biofor-Anlage zu GAK-Filtern notwendig. Hierbei wird der vorhandene Düsenboden abgebrochen und durch einen neuen Düsenboden ersetzt, welcher aufgeständert auf 3,00 m über Beckensohle angeordnet wird. Dadurch reduziert sich der Spülaufwand. Der bauliche Unterschied zu herkömmlichen Flockungsfiltrationen mit Sandbett besteht lediglich in einer Vorrichtung zum Ausbau der Aktivkohle mittels Saugwagen aus den einzelnen Kammern sowie einer weiteren Vorrichtung zur Befüllung jeder einzelnen Filterkammer mit frischer Aktivkohle. Das anfallende Spülabwasser ist bereits in der Dimensionierung der neuen biologischen Reinigungsstufe berücksichtigt, sodass dieses problemlos mitbehandelt werden kann.

Die Umsetzung der Variante 3 ist in Abbildung 17 und Abbildung 18 schematisch dargestellt.

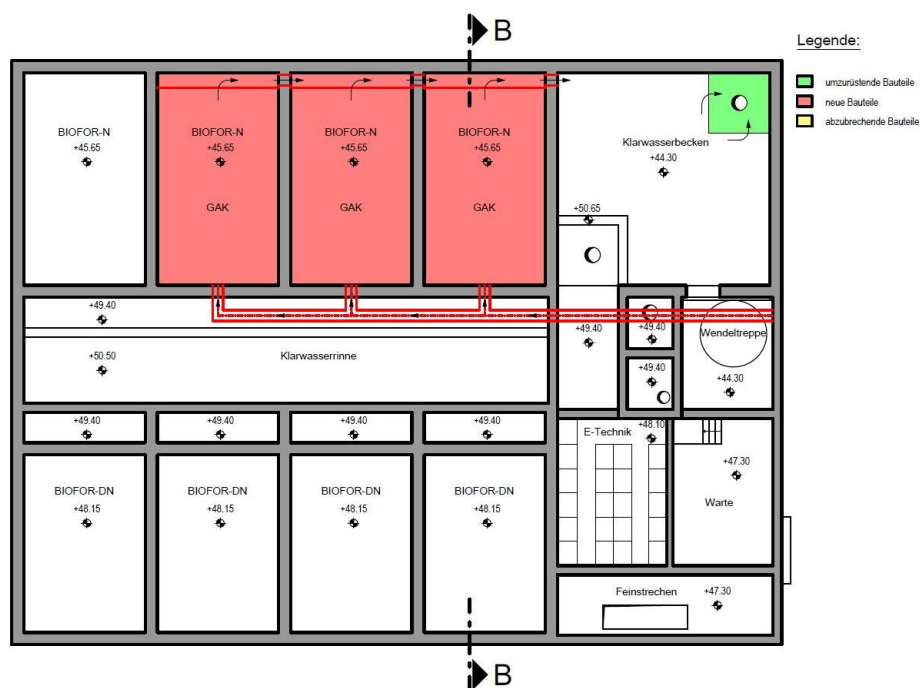


Abbildung 17: Umsetzung der Variante 3 auf der Kläranlage Vlotho – Grundriss

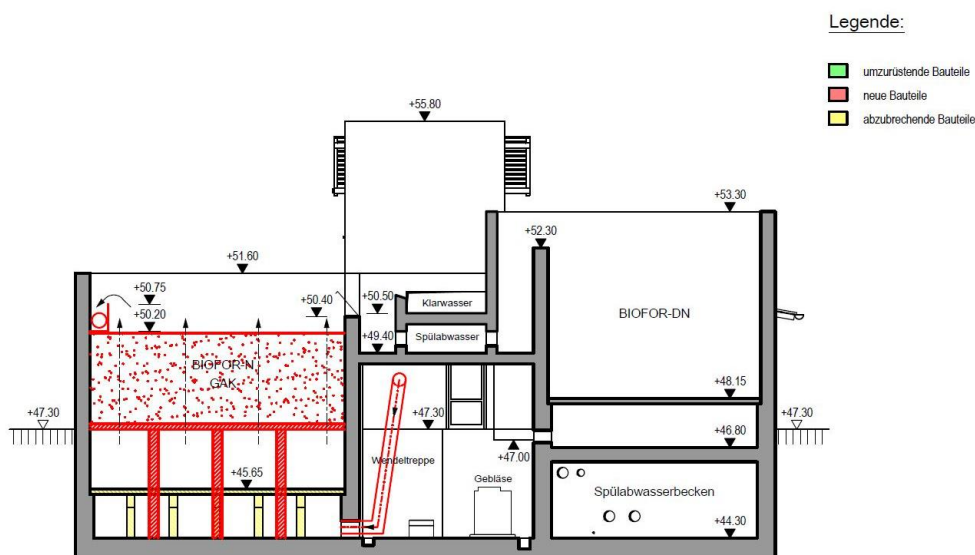


Abbildung 18: Umsetzung der Variante 3 auf der Kläranlage Vlotho – Schnitt

5.3.4 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante 3 (GAK-Filtration) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho wurden ebenfalls auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen Angebotspreisen, vor-

liegenden Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Umrüstung von drei Nitrifikationsfiltern der Biofor-Anlage zu einer GAK-Filtration aufwärts durchströmt
- Betonsanierung der bestehenden umzurüstenden Filterbecken
- Anpassung der Rohrleitungsführung und Erneuerung der Armaturen innerhalb der Biofor-Anlage
- Erneuerung der Spülluftgebläse und der Spülwasserpumpen
- Neue erdverlegte Zu- und Ablaufleitungen von den Nachklärbecken bis zur Biofor-Anlage
- Erstellung einer Vorrichtung zum Absaugen und Einbringen der GAK in die Filterkammer
- Errichtung einer neuen Niederspannungsunterverteilung (NSUV)
- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS

Bei den Betriebskosten wurden ebenfalls die anfallenden Kosten für Energie, Betriebsmittel, Schlammentsorgung, Spurenstoffanalyse, Wartung und Personal mit berücksichtigt. Darüber hinaus wurden zu erwartende Einsparungen durch verringerte CSB- und P_{ges} -Ablaufwerte, sowie die Einsparungen durch die öffentlichen Fördergelder in Höhe von 70 % der Herstellungskosten in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung von 2,0 % angesetzt. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit nicht verbindlichen Gesetzeslage wird ein Abschreibungszeitraum von 15 Jahren gewählt. Anschließend wird im Zuge des Variantenvergleichs zusätzlich eine Betrachtung über 35 Jahre angestellt. Als Preis für die benötigte Energie wird ein Strompreis von 0,21 €/kWh angesetzt [18].

In Tabelle 11 sind der Projektkostenbarwert und die zugehörigen Jahreskosten für eine GAK-Filtration dargestellt.

Tabelle 11: Zusammenstellung des Projektkostenbarwert für Variante 3: GAK-Filtration

Variantenvergleich über 15 Jahre		Variante 3: GAK
Investitionskosten, netto	€	1.045.000
Bautechnik		433.000
Maschinentechnik		383.000
E-MSR		229.000
Herstellkosten, brutto	€	1.517.000 €
Barwert Energiekosten		55.000 €
Grundkosten Filterspülung	€/a	3.400
Betriebsmittelerzeugung/-Dosierung	€/a	0
Barwert Betriebskosten		1.836.000 €
Betriebsmittel	€/a	66.400
Schlamm Entsorgung	€/a	0
Spurenstoffanalyse	€/a	9.800
Wartung	€/a	22.700
Personal	€/a	33.300
Barwert Einsparungen		1.609.000 €
Förderung NRW	€	1.062.000
Abwasserabgabe	€/a	39.400
Projektkostenbarwert PKBW, brutto		1.799.000 €
mittlere Jahreskosten JK, brutto		151.000 €/a
Rang nach KBW		1
spezifische Kosten:	€/m ³	0,085
	€/(EW*a)	7,55

Der Projektkostenbarwert für Variante 3 über 15 Jahre und die dazugehörigen Jahreskosten sowie die Spezifischen Kosten sind in Tabelle 9 dargestellt. Für einen Zeitraum von 35 Jahren beträgt der PKBW für Variante 3 rd. 3,9 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von rd. 182.000 €/a. Die Spezifischen Kosten ergeben sich umgerechnet auf die mittlere jährliche Abwassermenge von rd. 1,973 Mio. m³/a und einer mittleren Belastung von ca. 20.000 EW. Dies entspricht spezifischen Kosten für 35 Jahre von rd. 0,103 €/m³ oder 9,10 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen sind in diesen Kosten enthalten.

5.4 Variante 4: Ozondosierung nach der Nachklärung

5.4.1 Allgemeine Beschreibung

Auf der Kläranlage Vlotho ist auch der Einsatz von Ozon zur Spurenstoffelimination denkbar. Der Ozonreaktor könnte durch den Umbau der vorhandenen Deni-Filterbecken realisiert werden. Die erforderliche biologische Nachbehandlung des mit Ozon behandelten Abwassers würde durch Umrüsten der vorhandenen Nitrifikationsfilter zu Sandfiltern sichergestellt werden. Durch die Ozonbehandlung würde neben der Spurenstoffelimination auch eine Desinfektion des gereinigten Abwassers erfolgen.

Der Betrieb einer Ozonanlage in der vorhandenen Biofor-Anlage hätte keine Auswirkungen auf den Betrieb der vorhergehenden Reinigungsstufen und der Schlammbehandlung der Kläranlage Vlotho.

5.4.2 Dimensionierung

Für die Berechnung des erforderlichen Volumens des Ozonreaktors ($V_{\text{Ozonreaktor}}$) wird eine Bemessungswassermenge (Q_{Bem}) entsprechend dem Spitzenzufluss bei Trockenwetter von rd. 271 m³/h und einer Kontaktzeit (t_{Kontakt}) von 30 Minuten angesetzt. Dadurch ergibt sich, bei Einbeziehung eines Faktors zur Berücksichtigung der ungleichmäßigen Durchströmung, ein erforderliches Reaktorvolumen von rd. 135 m³ [3].

$$V_{\text{Ozonreaktor}} = Q_{\text{Bem}} \cdot t_{\text{Kontakt}} = 271 \cdot \frac{30}{60} = 135 \text{ m}^3 \quad (\text{Gl. 1})$$

Es ist eine Wassertiefe von 5,15 m vorhanden, welche den effizienten Ozoneintrag über am Reaktorboden installierte Diffusoren ermöglicht.

Die erforderliche Ozondosis (C_{O_3}) liegt für eine abgeschätzte DOC-Konzentration (C_{DOC}) von rd. 12 mg/l im Zulauf zur Flockungsfiltration und einer Nitrit-Konzentration ($C_{\text{NO}_2\text{-N}}$) von rd. 0,04 mg/l bei rd. 8,5 mgO₃/l Abwasser.

$$C_{\text{O}_3} = z_{\text{DOC}} \cdot C_{\text{DOC}} + z_{\text{NO}_2\text{-N}} \cdot C_{\text{NO}_2\text{-N}} = 0,7 \cdot 12 + 3,43 \cdot 0,04 = 8,5 \frac{\text{mgO}_3}{\text{l}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Für die Bemessungswassermenge resultiert eine maximal erforderliche Ozonproduktionskapazität von rd. 2.300 gO₃/h. Da die Ozonreaktoren auch eine untere Grenze der Produktionskapazität haben, muss bei einem minimalen Trockenwet-

terzufluss von rd. 133 m³/h eine minimale Ozonproduktionskapazität von rd. 1.130 gO₃/h sichergestellt werden.

$$B_{O_3,max} = Q_{Bem} \cdot C_{O_3} = 271 \cdot 8,2 = rd. 2.300 \frac{gO_3}{h} \quad (Gl. 3)$$

$$B_{O_3,min} = Q_{T,2h,min} \cdot C_{O_3} = 133 \cdot 8,2 = rd. 1.130 \frac{gO_3}{h} \quad (Gl. 4)$$

5.4.3 Einbindung in die Kläranlage Vlotho

Auf der Kläranlage Vlotho sind ungenutzte Beckenkapazitäten in der Biofor-Anlage vorhanden.

Für den Ozonreaktor werden zwei der vier Denitrifikationfilter umgerüstet und mit einer gasdichten Abdeckung versehen. Die Reaktorabmessungen betragen je Kammer ca. 4,00 m Breite, 5,86 m Länge bei einer Wassertiefe von 5,15 m. Am Boden der ersten Reaktorkammer werden zum Ozoneintrag Keramik-Tellerbelüfter ausgelegt, die Kammer wird im Gegenstromprinzip abwärts durchströmt und mit einer Strömungsleitwand eine Propfenströmung angestrebt. Die zweite Kammer dient als weiterer Reaktionsraum für das eingetragene Ozon. Auch hier wird durch eine Strömungsleitwand eine Propfenströmung angestrebt. Zu erwähnen ist hierbei, dass die Reaktorgeometrie nicht optimal für eine Abwasserbehandlung mit Ozon geeignet ist.

Für die biologische Nachbehandlung des ozonierten Abwassers ist eine Sandfiltration erforderlich. Die biologische Nachbehandlung des ozonierten Abwassers ist grundsätzlich auch in einem Schönungsteich möglich. Allerdings stehen hierfür auf der Kläranlage Vlotho keine ausreichenden Flächen zur Verfügung. Für die Errichtung einer Sandfiltration werden daher bei drei der vorhandenen Nitrifikationsfilter die Düsenböden abgebrochen und durch neue, in 3,00 m Höhe über dem Beckenboden aufgeständerte Düsenböden, ersetzt. Weiterhin ist auch hier eine Betonsanierung aller ungenutzten Becken vorgesehen.

Die Aufstellung des Ozongenerators sowie aller zusätzlich benötigter Anlagenkomponenten wie Kühler und Schaltanlage ist im vorhandenen Maschinenraum der Biofor-Anlage vorgesehen. Der benötigte Flüssigsauerstofftank kann wie das PAK-Silo in Varianten 1 und 2 auf der Freifläche angrenzend der Südwand des Filtrationsgebäudes aufgestellt werden. Es ist lediglich ein Sicherheitsabstand von 5 m um den Sauerstofftank zu beachten. Durch die Positionierung des Sauer-

stofftanks direkt neben dem Filtrationsgebäude und der Ozonerzeugung werden kurze Wege für die erforderlichen Rohrleitungen ermöglicht.

Für die elektrotechnische Einbindung einer Ozonanlage wird eine neue Niederspannungsunterverteilung vorgesehen.

Die Umsetzung der Variante 4 ist in Abbildung 19, Abbildung 20 und Abbildung 21 schematisch dargestellt.

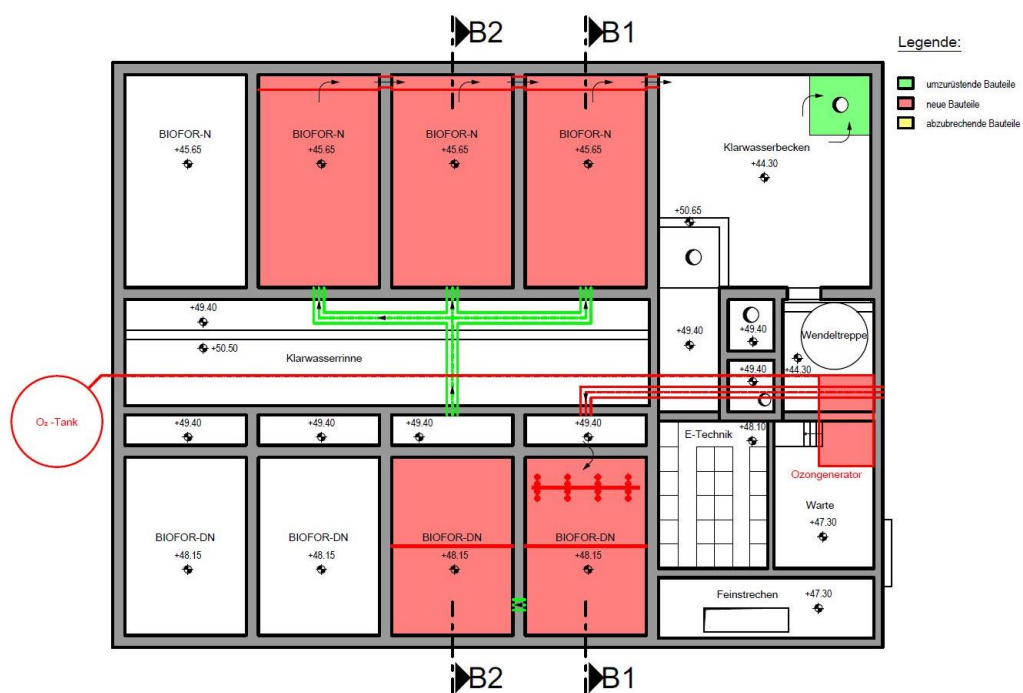


Abbildung 19: Umsetzung der Variante 4 auf der Kläranlage Vlotho – Grundriss

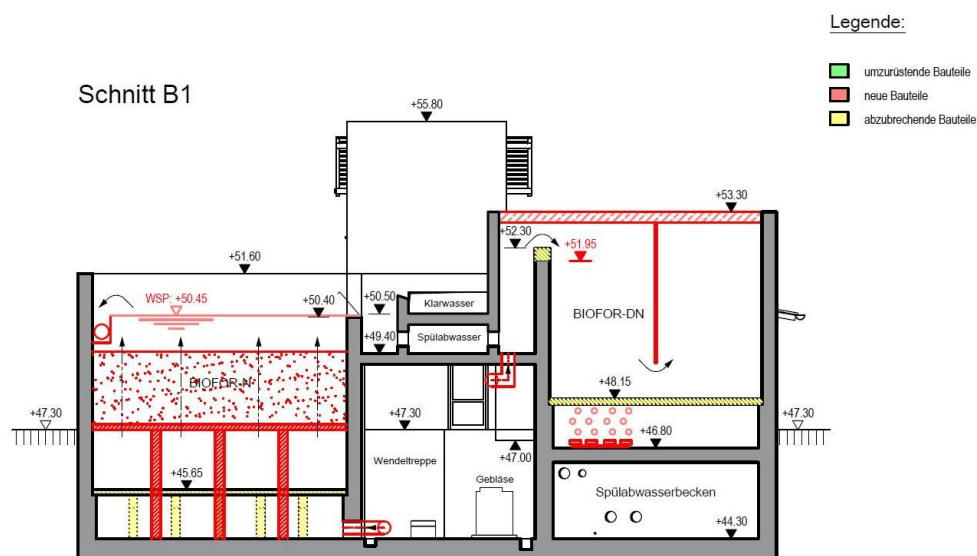


Abbildung 20: Umsetzung der Variante 4 auf der Kläranlage Vlotho – Schnitt 1

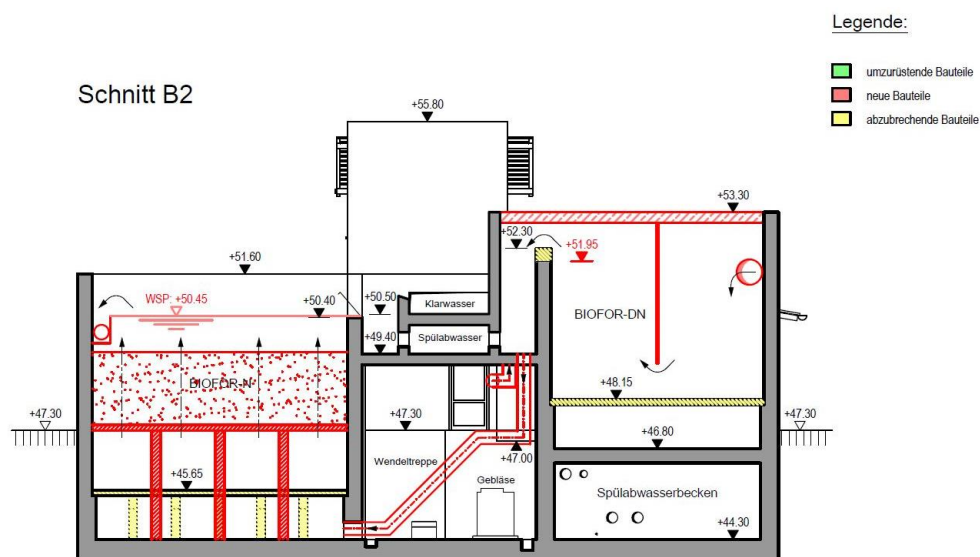


Abbildung 21: Umsetzung der Variante 4 auf der Kläranlage Vlotho – Schnitt 2

5.4.4 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante 4 (Ozonung nach der Nachklärung) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho wurden ebenfalls auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen Angebotspreisen, vorliegenden Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Umrüstung zweier Denitrifikationsfilter zu einem Gasdichten Reaktorbecken
- Betonsanierung der bestehenden umzurüstenden Filterbecken
- Anpassung der Rohrleitungsführung und Erneuerung der Armaturen innerhalb der Biofor-Anlage
- Neue erdverlegte Ablaufleitungen von den Nachklärbecken und Anschluss an das Filtrationsgebäude
- Errichtung eines Flüssigsauerstofftanks auf der Freifläche neben dem Filtrationsgebäude einschl. Dosierleitung zum Ozongenerator
- Ozongenerator einschl. Dosiervorrichtung
- Installation einer Dosierleitung vom Ozongenerator zum Ozonreaktor
- Installation einer Kühlwasserleitung vom vorhandenen Klarwasserbecken zum Ozongenerator
- Errichtung einer neuen Niederspannungsunterverteilung (NSUV)
- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS

Bei den Betriebskosten wurden auch hier die anfallenden Kosten für Energie, Betriebsmittel, Schlammentsorgung, Spurenstoffanalyse, Wartung und Personal mit berücksichtigt. Darüber hinaus wurden, ebenfalls wie bei den vorher beschriebenen Varianten, die zu erwartende Einsparung durch verringerte CSB-Ablaufwerte, sowie die Einsparungen durch die öffentlichen Fördergelder in Höhe von 70 % der Herstellungskosten in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung von 2,0 % berücksichtigt. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit ungeklärten Gesetzeslage wird ein Abschreibungszeitraum von lediglich 15 Jahren gewählt. Anschließend wird im Zuge des Variantenvergleichs zusätzlich eine Betrachtung über 35 Jahre angestellt. Als Preis für die benötigte Energie wird der ein Strompreis von 0,21 €/kWh angesetzt [18].

In Tabelle 12 sind der Projektkostenbarwert und die dazugehörigen Jahreskosten für eine Ozonung nach der Nachklärung dargestellt.

Tabelle 12: Zusammenstellung des Projektkostenbarwert für Variante 4: Ozonung nach der Nachklärung

		Variante 4: Ozonung
Investitionskosten, netto	€	1.747.000
Bautechnik		371.000
Maschinentechnik		755.000
E-MSR		306.000
Herstellkosten, brutto	€	2.079.000 €
Barwert Energiekosten		753.000 €
Grundkosten Filterspülung	€/a	3.400
Betriebsmittelerzeugung/-Dosierung	€/a	43.000
Barwert Betriebskosten		1.959.000 €
Betriebsmittel	€/a	30.800
Schlammentsorgung	€/a	0
Spurenstoffanalyse	€/a	9.800
Wartung	€/a	35.500
Personal	€/a	65.000
Barwert Einsparungen		2.002.000 €
Förderung NRW	€	1.455.000
Abwasserabgabe	€/a	39.400
Projektkostenbarwert PKBW, brutto		2.789.000 €
mittlere Jahreskosten JK, brutto		234.000 €/a
spezifische Kosten:	€/m ³	0,132
	€/(EW*a)	11,70

Der Projektkostenbarwert für Variante 4 über 15 Jahre und die dazugehörigen Jahreskosten sowie die Spezifischen Kosten sind in Tabelle 9 dargestellt. Für einen Zeitraum von 35 Jahren beträgt der PKBW für Variante 3 rd. 6,55 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von rd. 305.000 €/a. Die Spezifischen Kosten ergeben sich umgerechnet auf die mittlere jährliche Abwassermenge von rd. 1,973 Mio. m³/a und einer mittleren Belastung von ca. 20.000 EW. Dies entspricht spezifischen Kosten für 35 Jahre von rd. 0,172 €/m³ oder 15,25 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen sind in diesen Kosten enthalten.

5.5 Variante 5: Ozondosierung mit anschließender GAK-Filtration

5.5.1 Allgemeine Beschreibung

Neben den bereits beschriebenen verfahrenstechnischen Varianten ist grundsätzlich die Kombination von Ozon und Aktivkohle denkbar. Daher wird hier als ein mögliches Verfahren die Ozonung mit anschließender GAK-Filtration betrachtet. Dabei wirkt die GAK-Filtration als biologisch aktive Nachbehandlung für die Ozonung mit zusätzlich adsorptiver Wirkung. Dadurch kann eine effektive Spurenstoffelimination im Ozonreaktor und eine anschließende Entfernung von Reaktionsprodukten und weiteren Spurenstoffen in der GAK-Filtration erreicht werden. Zusätzlich werden die positiven Nebeneffekte der Ozonung (Desinfektion) und der Aktivkohle (Entfärbung) gemeinsam ausgenutzt.

Der Betrieb einer kombinierten Stufe zur Spurenstoffelimination hätte durch das anfallende Spülwasser die in Variante 3 beschriebenen Auswirkungen auf den Betrieb der bestehenden Reinigungsstufen der Kläranlage Vlotho.

5.5.2 Dimensionierung

Die Dimensionierung der einzelnen Bauwerke erfolgt für die Ozonung analog zu Variante 4 und für die GAK-Filtration wie in Variante 3 beschrieben. Der Ozonreaktor bedarf dementsprechend bei einer Aufenthaltszeit von 30 Minuten eines Volumens von rd. 135 m³ zwei Reaktorkammern und die Filtration zur Aufnahme der granulierten Aktivkohle erfordert insgesamt 3 Filterkammern mit jeweils 28 m² Filterfläche.

Es wird davon ausgegangen, dass sich die erforderliche Ozondosis im Vergleich zu Variante 4 nicht ändert. Die Standzeit der Aktivkohlefilter wird mit 30.000 BV jedoch deutlich länger angesetzt, da zum einen die Spurenstoffbelastung im Zulauf zur GAK-Filtration verringert ist und zum anderen eine biologische Wirkung nur bei längeren Standzeiten erreicht wird. Dies bedeutet bei maximalem Trockenwetterzufluss eine Standzeit von über 3,5 Jahren und eine erforderliche Anzahl von Filteraustauschen von 0,85 Mal pro Jahr. Dadurch wird pro Jahr nur der Austausch von im Mittel rd. 59 m³ GAK erforderlich.

5.5.3 Einbindung in die Kläranlage Vlotho

Die Einbindung der Verfahrenskombination von Ozonung und GAK-Filtration kann ähnlich erfolgen, wie in den Varianten 3 und 4 beschrieben. Auch die Voraussetzungen für die Positionierung der einzelnen Komponenten entsprechen den in Varianten 3 und 4 beschriebenen Bedingungen.

Die Umsetzung der Variante 5 ist in Abbildung 22, Abbildung 23 und Abbildung 24 schematisch dargestellt.

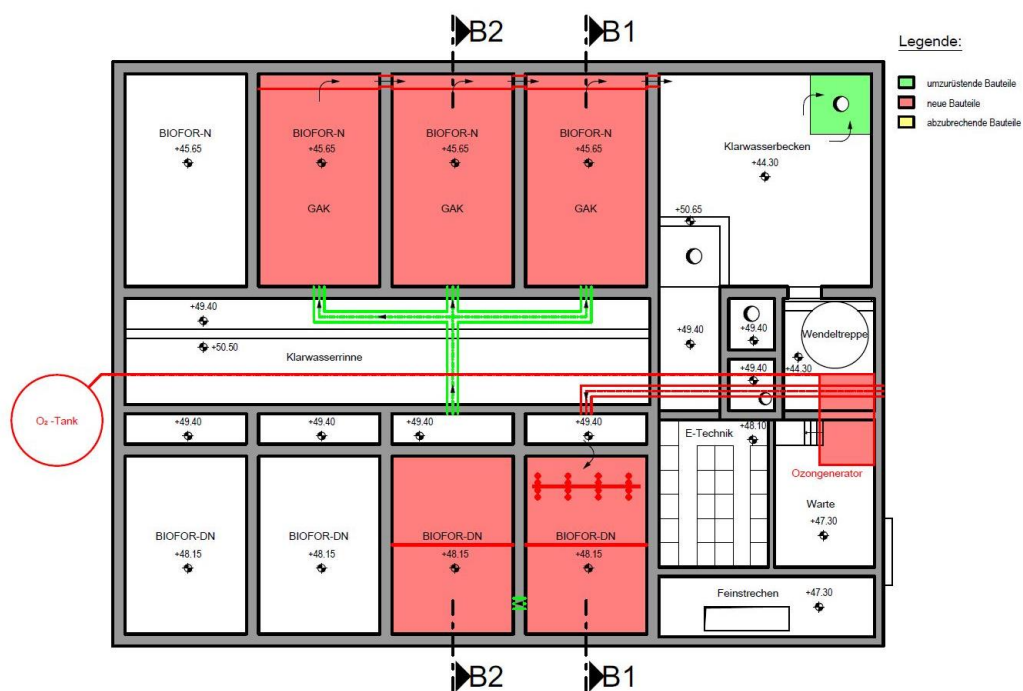


Abbildung 22: Umsetzung der Variante 5 auf der Kläranlage Vlotho – Grundriss

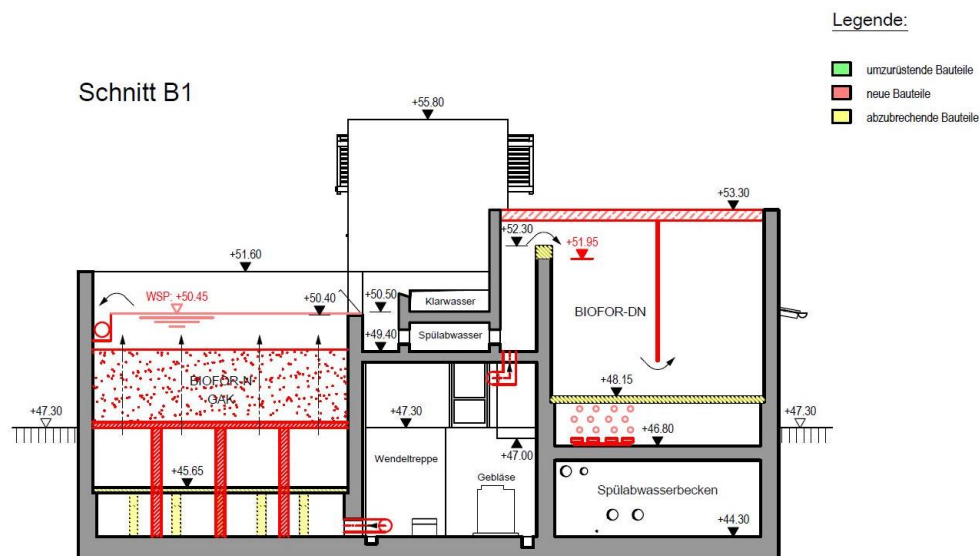


Abbildung 23: Umsetzung der Variante 5 auf der Kläranlage Vlotho – Schnitt 1

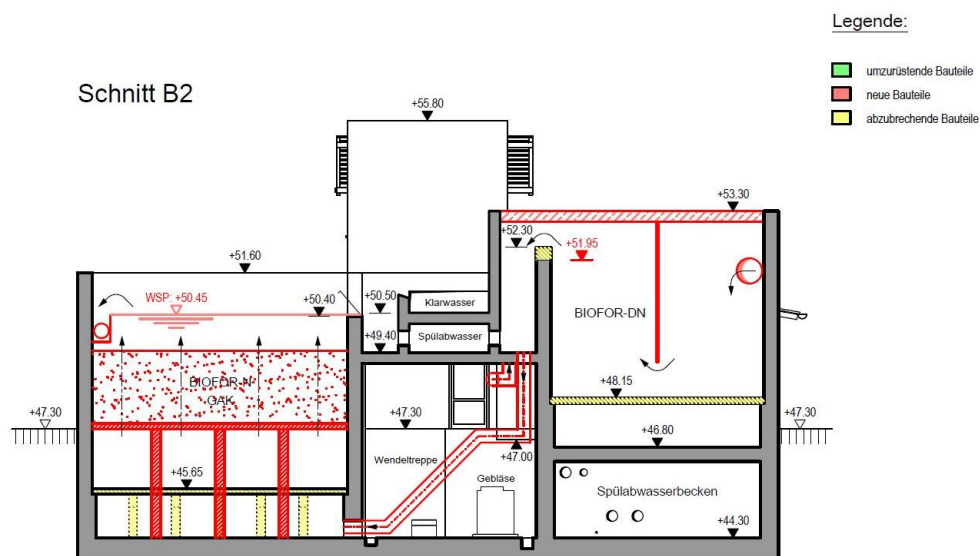


Abbildung 24: Umsetzung der Variante 5 auf der Kläranlage Vlotho – Schnitt 2

5.5.4 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante 5 (Ozonung mit anschließender GAK-Filtration) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho wurden, wie die zuvor beschriebenen Varianten, auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen Angebotspreisen, vorliegenden Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Umrüstung zweier Denitrifikationsfilters zu einem Gasdichten Reaktorbecken
- Umrüstung von drei Nitrifikationsfiltern der Biofor-Anlage zu einer GAK-Filtration aufwärts durchströmt
- Betonsanierung der bestehenden umzurüstenden Filterbecken
- Anpassung der Rohrleitungsführung und Erneuerung der Armaturen innerhalb der Biofor-Anlage
- Neue erdverlegte Ablaufleitungen von den Nachklärbecken und Anschluss an das Filtrationsgebäude
- Erstellung einer Vorrichtung zum Absaugen und Einbringen der GAK in die Filterkammer
- Errichtung eines Flüssigsauerstofftanks auf der Freifläche neben dem Filtrationsgebäude einschl. Dosierleitung zum Ozongenerator
- Ozongenerator einschl. Dosiervorrichtung
- Installation einer Dosierleitung vom Ozongenerator zum Ozonreaktor
- Installation einer Kühlwasserleitung vom vorhandenen Klarwasserbecken zum Ozongenerator
- Errichtung einer neuen Niederspannungsunterverteilung (NSUV)
- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS

Bei den Betriebskosten wurden auch hier die anfallenden Kosten für Energie, Betriebsmittel, Schlammentsorgung, Spurenstoffanalyse, Wartung und Personal mit berücksichtigt. Darüber hinaus wurden, ebenfalls wie bei den vorher beschriebenen Varianten, die zu erwartende Einsparung durch verringerte CSB-Ablaufwerte, sowie die Einsparungen durch die öffentlichen Fördergelder in Höhe von 70 % der Netto-Herstellungskosten in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung von 2,0 % berücksichtigt. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechni-

sche Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit ungeklärten Gesetzeslage wird zunächst ein Abschreibungszeitraum von lediglich 15 Jahren gewählt. Anschließend wird im Zuge des Variantenvergleichs zusätzlich eine Betrachtung über 35 Jahre angestellt. Als Preis für die benötigte Energie wird ein Strompreis von 0,21 €/kWh angesetzt [18].

In Tabelle 13 sind der Projektkostenbarwert und die zugehörigen Jahreskosten für eine Ozonung mit anschließender GAK-Filtration dargestellt.

Tabelle 13: Zusammenstellung des Projektkostenbarwerts für Variante 5: Ozonung und GAK-Filtration

Variantenvergleich über 15 Jahre		Variante 5: Ozonung mit GAK Filter
Investitionskosten, netto	€	1.583.000
Bautechnik		511.000
Maschinentechnik		766.000
E-MSR		306.000
Herstellkosten, brutto	€	2.298.000 €
Barwert Energiekosten		753.000 €
Grundkosten Filterspülung	€/a	3.400
Betriebsmittelerzeugung/-Dosierung	€/a	43.000
Barwert Betriebskosten		2.295.000 €
Betriebsmittel	€/a	52.900
Schlamm Entsorgung	€/a	0
Spurenstoffanalyse	€/a	9.800
Wartung	€/a	37.300
Personal	€/a	65.300
Barwert Einsparungen		2.156.000 €
Förderung NRW	€	1.609.000
Abwasserabgabe	€/a	39.400
Projektkostenbarwert PKBW, brutto		3.190.000 €
mittlere Jahreskosten JK, brutto		267.000 €/a
Rang nach KBW		5
spezifische Kosten:	€/m ³	0,151
	€/(EW*a)	13,35

Der Projektkostenbarwert für Variante 5 über 15 Jahre und die dazugehörigen Jahreskosten sowie die Spezifischen Kosten sind in Tabelle 9 dargestellt. Für einen Zeitraum von 35 Jahren beträgt der PKBW für Variante 3 rd. 7,34 Mio. € mit

den entsprechenden Jahreskosten von rd. 342.000 €/a. Die Spezifischen Kosten ergeben sich umgerechnet auf die mittlere jährliche Abwassermenge von rd. 1,973 Mio. m³/a und einer mittleren Belastung von ca. 20.000 EW. Dies entspricht spezifischen Kosten für 35 Jahre von rd. 0,193 €/m³ oder 17,10 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen sind in diesen Kosten enthalten.

6. Variantenvergleich

6.1 Bewertungskriterien

Bei der Bewertung der vorgestellten Verfahrensvarianten zur Umsetzung einer Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho kommt eine Reihe von Kriterien zum Tragen. Dazu zählen nicht nur ökonomische Gesichtspunkte, sondern auch Aspekte der Ökologie, des Ressourcenverbrauchs, des Arbeitsaufwandes und der Arbeitssicherheit. Die Auswahl der Kriterien für die Bewertung der einzelnen Verfahrensvarianten wurde auf der Grundlage des RiS-KWa-Leitfadens „Begriffe und Definitionen zu ausgewählten Technologien zur Elimination von Spurenstoffen und Krankheitserregern aus Abwasser“ getroffen. [30] Die vom RiSKWa-Leitfaden vorgeschlagene Liste von Kriterien wurde angepasst. Die Bewertungskriterien sind in Hauptpunkten zusammengefasst, deren Gewichtung sich aus der Summe der Gewichtungen der einzelnen Kriterien ergibt. Die Gewichtungen verteilen sich wie folgt:

1. Bewertungskriterien zur Ökonomie: 50 %
2. Bewertungskriterien zu betrieblichen Aspekten: 30 %
3. Bewertungskriterien zur Ökologie: 20 %

Tabelle 14 zeigt die gewählten Bewertungskriterien und ihre detaillierte Gewichtung.

Tabelle 14: Liste der gewählten Bewertungskriterien und Gewichtungen

Bewertungsmatrix	Gewichtung
1. Ökonomie	50,00%
Projektkostenbarwert	35,00%
Investitionskosten	10,00%
Kostensicherheit / Sensitivitäten	5,00%
2. Betriebliche Aspekte	30,00%
Betriebs- und Wartungsaufwand	20,00%
Arbeitssicherheit	10,00%
3. Ökologie	20,00%
Elimination von Verunreinigungen	10,00%
CO ₂ -Belastung	5,00%
Reststoffanfall	5,00%
Summe gewichteter Anteile	100,00%

Eine Reihe der gewählten Kriterien kann durch errechnete Zahlenwerte (z.B. Kosten, Energieverbräuche, Betriebsmittelverbräuche) ausgedrückt und entsprechend bewertet werden. Die Variante, die das Kriterium am besten erfüllt, erhält die gesamte dem Kriterium zugeschriebene prozentuale Gewichtung. Die Variante mit der schlechtesten Kriterienerfüllung erhält 0 %. Die übrigen Varianten erhalten entsprechend ihrer Rangfolge und ihrem Abstand zum Optimum Anteile an der prozentualen Gewichtung des Kriteriums. Für die Kriterien, die nicht in Zahlenwerten ausgedrückt werden können, wird manuell eine Abwägung und Gewichtung vorgenommen. Die Variante, die in der Summe über alle Kriterien die höchste prozentuale Gewichtung erreicht, ist die vorzuziehende Variante.

6.2 Sensitivitätsanalysen

Die Kosten für Betriebsmittel (PAK, GAK oder LOX) und Energie sind abhängig von dem aktuellen Betriebsmittelverbrauch und den jeweiligen Bezugspreisen. Um die Auswirkungen von abweichenden Mengen oder Preisen auf die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Varianten abschätzen zu können, wurden für den Betriebsmittelverbrauch, die Betriebsmittelpreise und den Strompreis Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

6.2.1 Betriebsmittelverbrauch

Für den Betriebsmittelverbrauch wurden entsprechend der Fachliteratur Annahmen getroffen. Es wurde in der Sensitivitätsanalyse eine PAK-Dosis zwischen 10 g/m^3 und 20 g/m^3 betrachtet. Die Bemessung der Verfahrensvarianten erfolgte mit 10 gPAK/m^3 für Variante 1 und 2. Für die GAK-Filtration (Variante 3) wurden 10.000 BV für die Bemessung angenommen. Die Sensitivitätsanalyse erfolgte für 3.000 BV bis 30.000 BV. Der Ozonverbrauch wurde für die Sensitivitätsanalyse zwischen $4,9 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ und $16,7 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ (entsprechend 20 bis 70 mgCSB/l im Zulauf zum Ozonreaktor) variiert. Die Bemessung erfolgte für $8,5 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ entsprechend 35 mgCSB/l. Für Variante 5 wurden sowohl der Ozonverbrauch als auch die behandelten Bettvolumina in den bereits genannten Grenzen betrachtet. Die Auslegung erfolgte bezüglich des Ozonverbrauches analog zu Variante 4, während die Bemessung der Variante 5 mit 30.000 durchgesetzten Bettvolumina erfolgte.

Bezüglich des Betriebsmitteleinsatzes zeigt sich, dass die GAK-Varianten (Variante 3 und 5) am sensibelsten auf Abweichungen von den getroffenen Annahmen reagieren (siehe Abbildung 25). Die Differenz der Jahreskosten für die Ozon-Variante 4 beträgt rd. 117.000 €/a (etwa von - 16 % bis + 35 % der angesetzten Kosten). Für Variante 5 (Ozon und GAK-Filtration) belaufen sich die Änderungen der Jahreskosten auf bis zu 349.000 €/a (etwa von - 13% bis + 118 % der angesetzten Kosten). Für die PAK-Varianten 1 und 2 beträgt die Kostendifferenz rd. 36.000 €/a (etwa von - 7 % bis + 10 % für V1 und V2) und für die GAK-Filtration können die Kosten je nach durchgesetzten Bettvolumina über 232.000 €/a variieren (etwa von - 35 % bis + 122 % der angesetzten Kosten). Anhand der vorliegenden Erfahrungen aus früheren und aktuell laufenden großtechnischen Versuchen zur GAK-Filtration besteht Grund zu der Annahme, dass mit einer gut funktionierenden Nachklärung die Annahme von 10.000 BV für die GAK-Filtration (Variante 3) mindestens realistisch, wenn nicht sogar als pessimistisch einzuordnen ist.

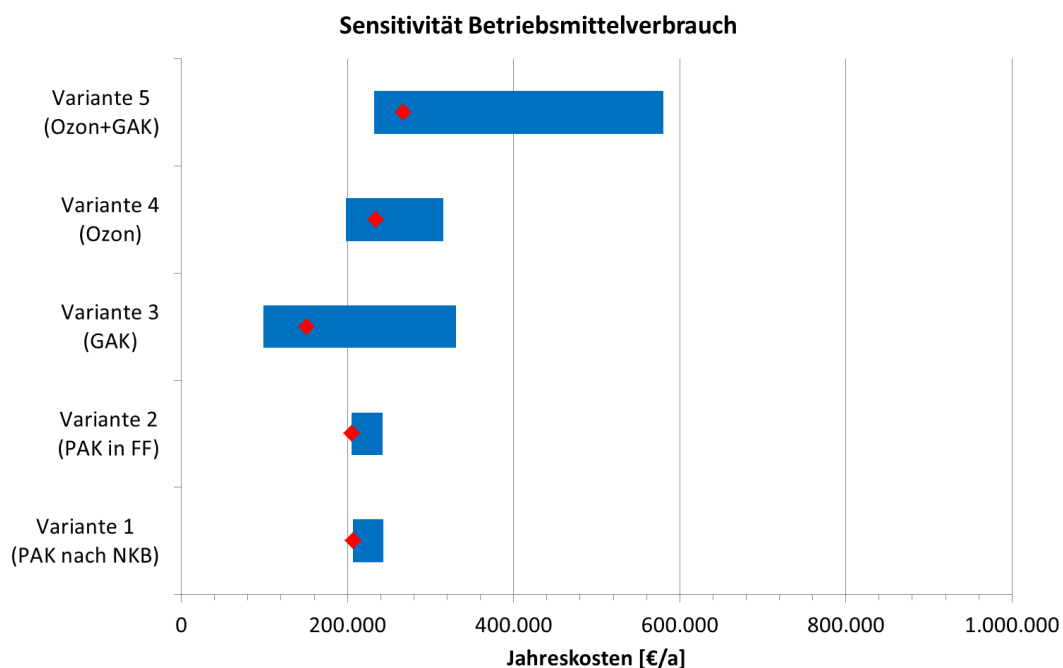


Abbildung 25: Sensitivität Betriebsmittelverbrauch Kläranlage Vlotho (Jahreskostenbereich der jeweiligen Variante als blauer Balken, die Auslegung als rote Raute)

6.2.2 Betriebsmittelpreise

Die Preise für die Betriebsmittel entstammen für PAK und GAK ebenfalls der Fachliteratur. Der angesetzte LOX-Preis entspricht einer Herstellerangabe von Mai 2016. Für den Bezug von PAK wurde ein Preis von 1,50 €/kg_{PAK} angesetzt. Für GAK wurden 1,10 €/kg_{GAK} zugrunde gelegt und flüssiger Sauerstoff wurde mit 0,12 €/l_{LOX} angesetzt. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurden die angesetzten Preise für die Betriebsmittel jeweils um 10 % nach oben und unten variiert.

Bezüglich der Bezugspreise für die Betriebsmittel zeigt sich, dass die GAK-Varianten (Variante 3 und 5) am sensibelsten auf Abweichungen von den getroffenen Annahmen reagiert (siehe Abbildung 26). Die Jahreskosten für die GAK-Filtration können je nach durchgesetzten Bettvolumina über 13.000 €/a variieren (etwa von – 5 % bis + 5 % der angesetzten Kosten). Für Variante 5 (Ozon und GAK-Filtration) belaufen sich die Änderungen der Jahreskosten auf bis zu 9.000 €/a (etwa von – 1,9% bis + 1,5 % der angesetzten Kosten). Für die PAK-Varianten 1 und 2 beträgt die Kostendifferenz rd. 7.000 €/a (etwa von - 1,5 % bis + 2 % und für die Ozon-Variante 4 rd. 5.000 €/a (etwa von – 1,3 % bis + 0,8 % der angesetzten Kosten).

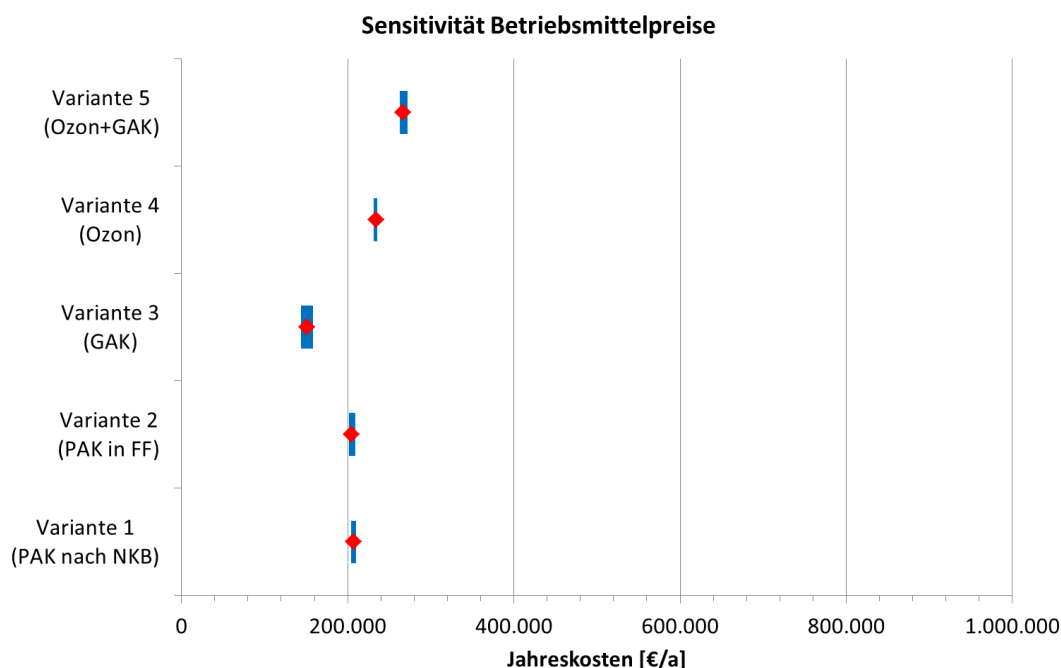


Abbildung 26: Sensitivität Betriebsmittelpreise Kläranlage Vlotho (Jahreskostenbereich der jeweiligen Variante als blauer Balken, die Auslegung als rote Raute)

6.2.3 Strompreis

Der für die Berechnung gewählte Strompreis entspricht dem in der Energetischen Feinanalyse aus dem Jahr 2016 zugrunde gelegten Strompreis von 0,21 €/kWh [18]. Auf Änderungen des Strompreises um $\pm 10\%$ reagieren erwartungsgemäß die Ozonvarianten (Variante 4 und 5) sensibler, als die Aktivkohle-Varianten (Varianten 1 bis 3). Die Jahreskosten für die Varianten 1 und 2 verändern sich nur um rd. 4.000 €/a (etwa $\pm 1,1\%$ für Variante 1 und 2 der jeweils angesetzten Kosten) entsprechend dem Energiebedarf der Rührwerke und für die PAK-Dosierung. Die Ozon-Variante 4 dagegen benötigt relativ viel Energie für die Ozongeneration und die entsprechende Sicherheitstechnik. Eine Strompreisänderung bewirkt auch hier eine Kostenänderung von rd. 13.000 €/a (etwa $\pm 3,0\%$). Bei Variante 5 ändern sich die Energiekosten durch eine Strompreisänderung um rd. 13.000 €/a (etwa $-2,6\%$ bis $+2,2\%$ der jeweils angesetzten Kosten) was der Kostenänderung der Ozon-Anlage entspricht. Die GAK-Variante 3 ist hierbei nahezu kostenneutral, da keine zusätzlichen Verbraucher für den Betrieb der Variante 3 erforderlich sind. Filterspülungen sind für alle Varianten erforderlich, somit fallen die Energiekosten hierfür aus dem Sensitivitätsvergleich raus.

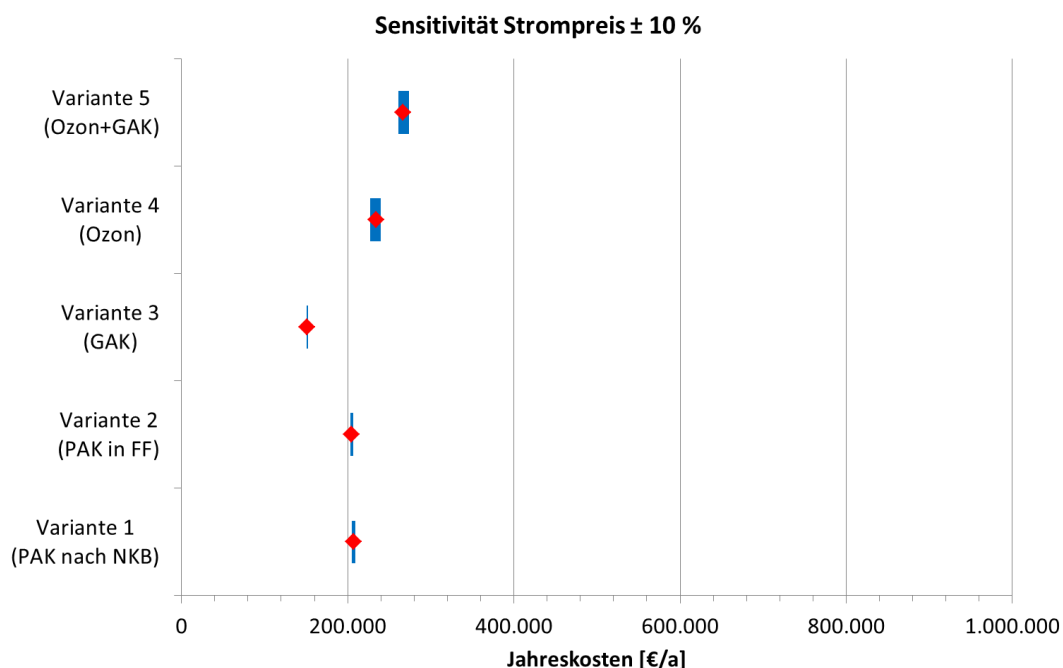


Abbildung 27: Sensitivität Strompreis $\pm 10\%$ Kläranlage Vlotho (Jahreskostenbereich der jeweiligen Variante als blauer Balken, die Auslegung als rote Raute)

6.2.4 Zusammenfassung Sensitivitätsanalysen

In Tabelle 15 werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen zusammengefasst. Ähnlich wie in der Bewertungsmatrix beim Variantenvergleich wurde ein Punktesystem zur Bewertung genutzt. Ein Punkt steht für keine bis kaum Sensitivität und fünf Punkte stehen für eine sehr starke Sensitivität. Die Gewichtungen für die drei unterschiedlichen Sensitivitätsanalysen sind angegeben. Die gewichtete Bewertung zeigt auf, dass Variante 5 (Ozon + GAK) insgesamt am sensibelsten auf Abweichungen von den getroffenen Annahmen und errechneten Werten reagiert. Variante 3 (GAK-Filtration) reagiert geringfügig weniger empfindlich auf Abweichungen. Dies liegt vor Allem in der großen Sensitivität der GAK-Varianten bezüglich ihres Betriebsmittelverbrauches begründet. Variante 4 (Ozonung) reagiert ebenfalls relativ sensibel auf Änderungen des Betriebsmittelverbrauches und ist daher insgesamt ebenfalls sensibler als die PAK-Varianten.

Tabelle 15: Zusammenfassung Sensibilitätsanalysen

	Betriebsmittel- einsatz		Betriebsmittel- kosten		Strompreis		Bewertung
Gewichtung	60,00%		25,00%		15,00%		
Variante 1: PAK	wenig sensibel	2	wenig sensibel	2	wenig sensibel	2	2,0
Variante 2: PAK in FF	wenig sensibel	2	wenig sensibel	2	wenig sensibel	2	2,0
Variante 3: GAK	stark sensibel	4	sehr stark sensibel	5	nicht sensibel	1	3,8
Variante 4: Ozon	mäßig sensibel	3	wenig sensibel	2	stark sensibel	4	2,9
Variante 5: Ozon mit GAK	sehr stark sensibel	5	stark sensibel	5	stark sensibel	4	4,9

6.3 Vergleich der Verfahrensvarianten und Vorzugsvariante

Vergleicht man die vorgestellten Verfahrensvarianten vor einem rein monetären Hintergrund (Projektkostenbarwert bzw. Jahreskosten), ergibt sich das in Tabelle 16 dargestellte Bild. Variante 3 (GAK) steht damit auf Platz 1. Der Projektkostenbarwert (PKBW) liegt rd. 650.000 € (entsprechend Jahreskosten von 54.000 €/a) niedriger als der PKBW der zweitplatzierten Variante 2 (PAK in Filterüberstau).

Durch eine Änderung der Vorschriften zur Klärschlammmentsorgung, durch die rd. 380.000 € nicht mehr den PAK-Varianten (Varianten 1 und 2) angerechnet werden könnten, würde sich die Rangfolge der Verfahrensvarianten nach monetärer Betrachtung nicht ändern. Variante 3 (GAK) läge weiterhin auf Rang 1, wäre beim PKBW immer noch rd. 270.000 € günstiger als Variante 2 (PAK in Filterüberstau nach der Nachklärung).

Die Änderungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen im genannten Punkt sind derzeit jedoch nicht konkret absehbar. Daher werden die Kosten für die Klärschlammmentsorgung im folgenden Variantenvergleich vollständig den jeweiligen Varianten zugerechnet.

Durch das hohe hydraulische Gefälle zwischen dem Ablauf der neu zu errichtenden Nachklärung und dem Kläranlagenablauf kann die gesamte Verfahrensstufe im Freigefälle durchfließen werden. Für die Varianten 3, 4 und 5 kann außerdem das Hochwasserpumpwerk am Kläranlagenablauf außer Betrieb genommen werden, was weitere Einsparungen im Bereich Energiekosten und der zukünftigen

Sanierungsmaßnahmen mit sich bringt. Da für die Varianten 1 und 2 die Filterkammern von oben nach unten durchflossen werden müssten, sind die hydraulischen Verluste so hoch, dass bei Weserhochwasser das Hochwasserpumpwerk weiterhin betrieben werden müsste.

Tabelle 16: Kostenvergleich der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho über 15 Jahre

Variantenvergleich über 15 Jahre		Variante 1: PAK in Kontaktbecken	Variante 2: PAK in Filterüberstau	Variante 3: GAK	Variante 4: Ozonung	Variante 5: Ozonung mit GAK Filter
Investitionskosten, netto	€	1.402.000	1.319.000	1.045.000	1.432.000	1.583.000
Bautechnik		423.000	348.000	433.000	371.000	511.000
Maschinentechnik		727.000	724.000	383.000	755.000	766.000
E-MSR		252.000	247.000	229.000	306.000	306.000
Herstellkosten, brutto	€	2.035.000 €	1.915.000 €	1.517.000 €	2.079.000 €	2.298.000 €
Barwert Energiekosten		204.000 €	234.000 €	55.000 €	753.000 €	753.000 €
Grundkosten Filterspülung	€/a	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400
Betriebsmittelerzeugung/-Dosierung	€/a	9.200	11.000	0	43.000	43.000
Barwert Betriebskosten		2.204.000 €	2.190.000 €	1.836.000 €	1.959.000 €	2.295.000 €
Betriebsmittel	€/a	31.400	31.400	66.400	30.800	52.900
Schlamm Entsorgung	€/a	38.400	38.400	0	0	0
Spurenstoffanalyse	€/a	9.800	9.800	9.800	9.800	9.800
Wartung	€/a	33.600	32.600	22.700	35.500	37.300
Personal	€/a	45.500	45.500	33.300	65.000	65.300
Barwert Einsparungen		1.972.000 €	1.888.000 €	1.609.000 €	2.002.000 €	2.156.000 €
Förderung NRW	€	1.425.000	1.341.000	1.062.000	1.455.000	1.609.000
Abwasserabgabe	€/a	39.400	39.400	39.400	39.400	39.400
Projektkostenbarwert PKBW, brutto		2.471.000 €	2.451.000 €	1.799.000 €	2.789.000 €	3.190.000 €
mittlere Jahreskosten JK, brutto		207.000 €/a	205.000 €/a	151.000 €/a	234.000 €/a	267.000 €/a
Rang nach KBW		3	2	1	4	5
spezifische Kosten:	€/m ³	0,117	0,116	0,085	0,132	0,151
	€/(EW*a)	10,35	10,25	7,55	11,70	13,35

In diesen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sind aufgrund der neuen Verfahrenstechniken die Projektkostenbarwerte aller Varianten vollständig mit einer Nutzungsdauer von 15 Jahren berechnet worden. Während die Nutzungsdauer für maschinen- und elektrotechnische Ausrüstung etwa 15 Jahre beträgt, kann für die bautechnischen Anlagenteile erfahrungsgemäß eine Nutzungsdauer von 35 Jahren angesetzt werden. Würde man den PKBW über 35 Jahre berechnen und die entsprechenden Reinvestitionskosten nach 15 Jahren für Maschinen- und E-MSR-Technik berücksichtigen, so würde sich an der Rangfolge der Varianten nichts ändern. Variante 3 bleibt die wirtschaftlichste Verfahrensvariante (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17: Kostenvergleich der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho über 35 Jahre

Variantenvergleich über 35 Jahre		Variante 1: PAK in Kontaktbecken	Variante 2: PAK in Filterüberstau	Variante 3: GAK	Variante 4: Ozonung	Variante 5: Ozonung mit GAK Filter
Investitionskosten, netto	€	1.710.000	1.609.000	1.275.000	1.747.000	1.931.000
Bautechnik		423.000	348.000	433.000	371.000	511.000
Maschinenteknik		727.000	724.000	383.000	755.000	766.000
E-MSR		252.000	247.000	229.000	306.000	306.000
Herstellkosten, brutto		2.035.000 €	1.915.000 €	1.517.000 €	2.079.000 €	2.298.000 €
Reinvestitionen, brutto inkl. BNK		912.000 €	905.000 €	570.000 €	989.000 €	999.000 €
Reinvest BT nach 15 Jahren, netto	€	0	0	0	0	0
Reinvest MT nach 15 Jahren, netto	€	727.000	724.000	383.000	755.000	766.000
Reinvest EMSR nach 15 Jahren, netto	€	252.000	247.000	229.000	306.000	306.000
Energiekosten		527.000 €	603.000 €	142.000 €	1.942.000 €	1.942.000 €
Grundkosten Filterspülung	€/a	3.400	3.400	3.400	3.400	3.400
Betriebsmittelerzeugung/-Dosierung	€/a	9.200	11.000	0	43.000	43.000
Betriebskosten		4.683.000 €	4.653.000 €	3.901.000 €	4.163.000 €	4.877.000 €
Betriebsmittel	€/a	31.400	31.400	66.400	30.800	52.900
Schlammensorgung	€/a	38.400	38.400	0	0	0
Spurenstoffanalyse	€/a	9.800	9.800	9.800	9.800	9.800
Wartung	€/a	33.600	32.600	22.700	35.500	37.300
Personal	€/a	45.500	45.500	33.300	65.000	65.300
Einsparungen		2.588.000 €	2.504.000 €	2.225.000 €	2.618.000 €	2.772.000 €
Förderung NRW	€	1.425.000	1.341.000	1.062.000	1.455.000	1.609.000
Abwasserabgabe	€/a	39.400	39.400	39.400	39.400	39.400
Projektkostenbarwert PKBW, brutto		5.569.000 €	5.572.000 €	3.905.000 €	6.555.000 €	7.344.000 €
mittlere Jahreskosten JK, brutto		259.000 €/a	259.000 €/a	182.000 €/a	305.000 €/a	342.000 €/a
Rang nach KBW		2	3	1	4	5
spezifische Kosten:	€/m ³	0,146	0,146	0,103	0,172	0,193
	€/(EW*a)	12,95	12,95	9,10	15,25	17,10

In den oben dargestellten Kosten ist eine Förderung der brutto-Herstellungskosten um 70 % durch das Land NRW berücksichtigt. Lässt man diese Förderung unberücksichtigt, verändert sich die Rangfolge der Varianten nicht. Jede einzelne Variante wird zwischen rd. 1 Mio. € und rd. 1,5 Mio. € teurer. Die Kosten ohne die Berücksichtigung der NRW-Förderung sind in Tabelle 18 für einen Zeitraum von 15 Jahren und in Tabelle 19 über 35 Jahre dargestellt.

Tabelle 18: Kostenvergleich der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho über 15 Jahre ohne Berücksichtigung der NRW-Förderung

Kostenvergleich (15 Jahre) ohne Förderung		Variante 1: PAK	Variante 2: PAK in FF	Variante 3: GAK	Variante 4: Ozon	Variante 5: Ozon+GAK
Förderung NRW	€	1.425.000	1.341.000	1.062.000	1.455.000	1.609.000
PKBW ohne Förderung	€	3.896.000	3.792.000	2.861.000	4.244.000	4.799.000
Jahreskosten ohne Förderung	€/a	326.000	318.000	240.000	356.000	402.000
Rang nach KBW		3	2	1	4	5
spezifische Kosten	€/m ³	0,165	0,161	0,122	0,180	0,204
	€/(EW*a)	16,30	15,90	12,00	17,80	20,10

Tabelle 19: Kostenvergleich der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho über 35 Jahre ohne Berücksichtigung der NRW-Förderung

Kostenvergleich (35 Jahre) ohne Förderung		Variante 1: PAK	Variante 2: PAK in FF	Variante 3: GAK	Variante 4: Ozon	Variante 5: Ozon+GAK
Förderung NRW	€	1.425.000	1.341.000	1.062.000	1.455.000	1.609.000
PKBW ohne Förderung	€	6.994.000	6.913.000	4.967.000	8.010.000	8.953.000
Jahreskosten ohne Förderung	€/a	326.000 €/a	322.000 €/a	231.000 €/a	373.000 €/a	417.000 €/a
	Rang nach KBW	3	2	1	4	5
spezifische Kosten	€/m ³	0,165	0,163	0,117	0,189	0,211
	€/(EW*a)	16,30	16,10	11,55	18,65	20,85

Würde man den Zeitraum für die Förderung des Landes NRW verstreichen lassen und in Zukunft gesetzlich dazu verpflichtet einen 4. Reinigungsstufe zu realisieren, würden sich die Projektkostenbarwerte der Vorzugsvariante 3 - GAK über 15 und 35 Jahre um je rd. 1.062.000 € erhöhen. Über 15 Jahre gesehen würde dies eine Steigerung der Jahreskosten um rd. 89.000 €/a, über 35 Jahre gesehen eine Steigerung um 235.000 €/a bedeuten.

Der Vergleich der spezifischen Kosten aller Verfahrensvarianten zu anderen Projekten in NRW und der Schweiz ist in Abbildung 28 dargestellt. Der Vergleich beinhaltet alle Kosten mit Ausnahme der Spurenstoffanalytik, da diese in den unterschiedlichen Projekten zum Teil sehr stark variiert. Einsparungen aus Abgabenbefreiung oder NRW-Förderung wurden für den Vergleich ebenfalls nicht berücksichtigt. Die abgeschätzten spezifischen Kosten liegen für die Ozonvariante 4 über der Kostenfunktion aus der Schweiz. Im Vergleich zu Projekten in NRW sind die Kosten für eine Ozonanlage auf der Kläranlage Vlotho im oberen Bereich einzuordnen. Die abgeschätzten spez. Kosten für die PAK-Varianten 1 und 2 liegen leicht über der Kostenfunktion aus Baden-Württemberg (BW) und der Schweiz. Im Vergleich zu PAK-Projekten in NRW sind die abgeschätzten spez. Kosten für eine PAK-Behandlung auf der Kläranlage Vlotho im mittleren Bereich. Für GAK-Anlagen liegt noch keine Kostenfunktion vor. Die für Vlotho abgeschätzten spez. Kosten für eine GAK-Filtration liegen im Vergleich zu anderen Anlagen in NRW relativ niedrig. Dies könnte an der bereits vorhandenen Flockungsfiltration und den damit geringeren Investitionskosten liegen. Die Kombination von Ozon und GAK auf der Kläranlage Vlotho liegt erwartungsgemäß oberhalb der spezifischen Kosten für die einzelnen Verfahren. Vergleichswerte aus NRW, BW oder der Schweiz liegen derzeit für diese Verfahrenskombination nicht vor.

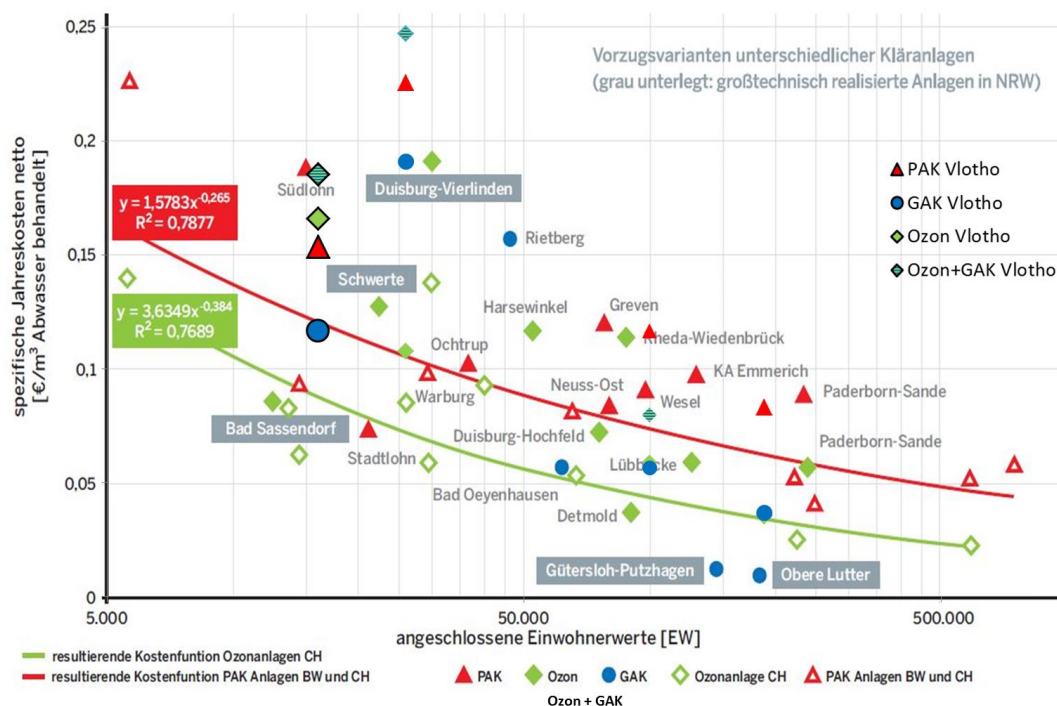


Abbildung 28: Vergleich der spezifischen Kosten zu Projekten in NRW, Baden-Württemberg und der Schweiz (Verfahrensvarianten für Vlotho schwarz umrandet dargestellt). Abbildung aus [3]

Werden nicht-monetäre Kriterien wie z.B. Ökologie, Ressourcenverbrauch, Kostenrisiken, Arbeitsaufwand und Arbeitssicherheit in den Variantenvergleich mit einbezogen, so ergibt sich das in Tabelle 20 zusammengefasste Ergebnis. Die detaillierte Bewertungsmatrix ist in Anhang 1 beigefügt.

Tabelle 20: Zusammenfassung der Bewertungsmatrix für die Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho

Bewertungsmatrix	Gewichtung	V1: PAK in Becken	V2: PAK in Zulauf FF	V3: GAK	V4: Ozon	V5: Ozon und GAK
1. Ökonomie	50,00%	26,45%	28,50%	46,84%	16,29%	0,00%
Projektkostenbarwert	35,00%	18,14%	18,65%	35,00%	10,13%	0,00%
Investitionskosten	10,00%	3,31%	4,86%	10,00%	2,74%	0,00%
Kostensicherheit / Sensitivitäten	5,00%	5,00%	5,00%	1,84%	3,42%	0,00%
2. Betriebliche Aspekte	30,00%	7,00%	7,00%	10,00%	0,00%	0,00%
Betriebs- und Wartungsaufwand	20,00%	4,00%	4,00%	5,00%	0,00%	0,00%
Arbeitssicherheit	10,00%	3,00%	3,00%	5,00%	0,00%	0,00%
3. Ökologie	20,00%	12,50%	12,30%	15,84%	15,51%	14,00%
Elimination von Verunreinigungen	10,00%	7,50%	7,50%	7,50%	7,50%	9,00%
CO ₂ -Belastung	5,00%	5,00%	4,80%	2,34%	3,01%	0,00%
Reststoffanfall	5,00%	0,00%	0,00%	6,00%	5,00%	5,00%
Summe gewichteter Anteile	100,00%	45,95%	47,80%	72,68%	31,80%	14,00%
Rangfolge	0,00%	3	2	1	4	5

Die Bewertung der unterschiedlichen Kriterien über Gewichtungen führt dazu, dass die Variante 3 (GAK) mit rd. 25 %-Punkten Vorsprung auf Rang 1 steht. Rang 2 erhält Variante 2 (PAK in Zulauf FF) mit rd. 2 %-Punkten Abstand zu Rang 3 (Variante 1: PAK in Kontaktbecken). Mit Blick auf die derzeit unsichere Gesetzeslage bezüglich der Spurenstoffelimination bestünden aufgrund der geringsten Herstellungskosten bei der Umsetzung der Variante 3 (GAK) die geringsten Risiken. Durch die unterschiedlichen Vor- und Nachteile von Aktivkohle und Ozon bzw. durch die hohen Investitionskosten der Verfahrenskombination erzielt keine der fünf Varianten eine vollständige Kriterienerfüllung (maximal 72,68 % für Variante 3).

7. Option 1: Kontinuierlich gespülte GAK-Filter

Als Option zu Variante 3 (GAK-Filter) besteht der Einsatz von kontinuierlich gespülten GAK Filtern des Typs DynaSand® Carbon der Firma Nordic Water oder vergleichbarer Anlagen anderer Hersteller. Hierbei werden 2 Nitrifikationsfilterkammern mit Filterzelleneinsätzen, bestehend aus je 6 DynaSand® Carbon Filtereinheiten, ausgestattet. Die Höhe der Filterzellen ist angepasst an die Bauwerksgegebenheiten, es wird eine begehbare Abdeckung installiert.

Im Vergleich zu herkömmlichen, diskontinuierlich gespülten GAK-Filter-Anlagen bieten die kontinuierlich gespülten Filter mehrere Vorteile. Zum einen ist die Beschickung der Filter auch während der Filterspülung möglich, wodurch sich die erforderliche Filterfläche von 3 Nitri-Kammern für die herkömmliche GAK-Filtration auf 2 Nitri-Kammern für die kontinuierlich gespülten GAK-Filter reduziert. Darüber hinaus muss die Kläranlage durch die kontinuierliche Spülung keine hydraulischen Stoßbelastungen durch Spülwasser aufnehmen. Weiterhin werden keine Spülwasserpumpen und Spülluftgebläse benötigt. Stattdessen bedienen sich die DynaSand®-Filter einer integrierten Mammutpumpe zur Spülung des Filtermaterials. Durch die kontinuierliche Laufzeit sind auch keine Spitzen beim Strombedarf zu erwarten. Durch die erhöhte Spüldauer ist aber ein leichter Anstieg der Energiekosten im Vergleich zum herkömmlichen GAK-Filter zu erwarten. Diese werden allerdings durch den geringeren Personalaufwand und reduzierte Wartungskosten ausgeglichen. Weiterhin sind für eine kontinuierlich gespülte GAK-Filter-Anlage wesentlich weniger Antriebe und Messinstrumente nötig, was den Betriebs- und Instandhaltungsaufwand erheblich verringert. Die benötigten Antriebe und Messstellen sind in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Antriebe und Messstellen der Varianten im Vergleich zu Option 1: Kontinuierlich gespülte GAK-Filter

	Variante 1: PAK	Variante 2: PAK in FF	Variante 3: GAK	Option 1	Variante 4: Ozon	Variante 5: Ozon + GAK
Antriebe	26	33	22	8	27	27
Messstellen	12	12	7	3	16	16
Summe	38	45	29	11	43	43

Die Herstellkosten für Option 1 liegen bei rd. 1.480.000 € brutto und sind somit annähernd gleich zu denen des herkömmlichen GAK-Filters gemäß Variante 3 (rd. 1.520.000 €). Durch geringeren Betriebs- und Wartungsaufwand errechnet sich

der Projektkostenbarwert über 15 Jahre gesehen zu rd. 1.622.000 €, entsprechend 136.000 €/a Jahreskosten, und ist somit rd. 15.000 €/a günstiger als Variante 3.

Nach der gemeinsamen Besichtigung der DynaSand® Carbon Anlage auf der Kläranlage Rietberg wurde eine kontinuierlich gespülte GAK-Filtration für die bevorzugte Variante zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho befunden.

8. Option 2: Kontinuierlich gespülte GAK-Filter und Teilabbruch des Filtrationsgebäudes

Weiterführend zu „Option 1: Kontinuierlich gespülte GAK-Filter“ besteht die Möglichkeit eines Teilabrisses des Filtrationsgebäudes. Hier bleiben nur die zwei für die Filtereinsätze benötigten Filterkammern und das Klarwasserbecken bestehen.

Die ungenutzten Gebäudeteile werden bis ca. 50 cm unter Geländeoberkante abgebrochen und entsorgt, auf ein Planum aufgefüllt und teilweise mit einer Pflasterfläche überdeckt. Dadurch reduzieren sich der Erhaltungsaufwand und somit die Personal- und Instandhaltungskosten für den ungenutzten Gebäudeteil. Die zurückgewonnene Fläche steht zur weiteren Nutzung frei.

Analog zu Option 1 werden die kontinuierlich gespülten GAK-Filter, z.B. des Typs DynaSand® Carbon der Firma Nordic Water, in die zwei bestehend bleibenden Kammern eingebaut. Die Fläche wird mit einer GFK-Abdeckung versehen und über eine Treppe zur Begehung zugänglich gemacht. Ringsherum wird eine Absturzsicherung verbaut. Die erforderliche Schaltanlage sowie die Kompressorstation zur Druckluftherzeugung für die Filterspülung können im neuen Maschinengebäude der Belebung untergebracht werden.

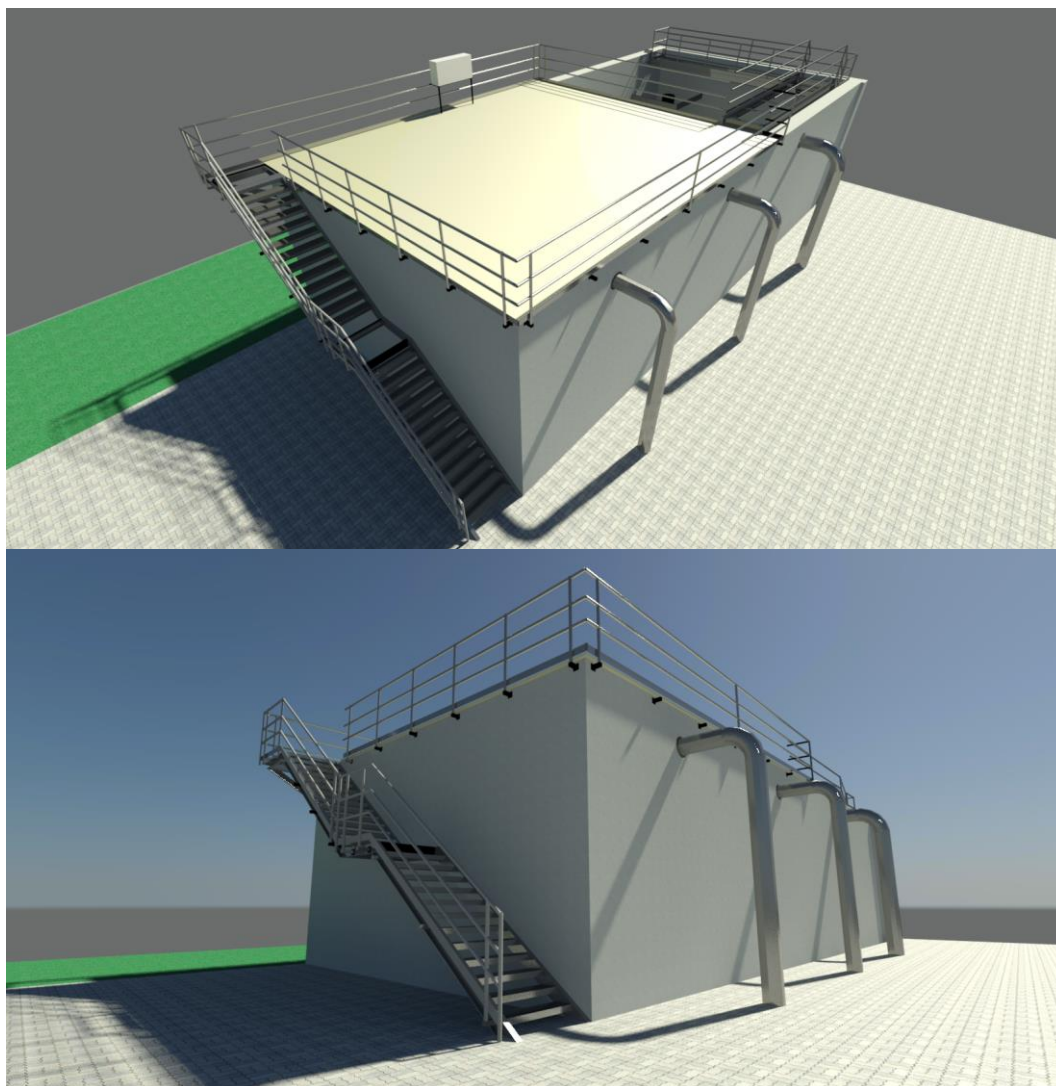


Abbildung 29: Filtrationsgebäude nach Abbruch- und Anpassungsarbeiten

Die Herstellkosten für Option: 2 belaufen sich auf ca. 1.771.000 € brutto, inkl. Baunebenkosten, wovon ca. 180.000 € brutto den Abbruch- und die Verfüllungsarbeiten zuzuordnen sind. Option: 2 liegt somit rd. 250.000 € über den Herstellkosten für Variante 3. Durch den reduzierten Betriebs- und Wartungsaufwand beläuft sich der Projektkostenbarwert über 15 Jahre auf rd. 1.827.000 € und liegt somit rd. 28.000 € über dem PKBW der Variante 3. Die Jahreskosten belaufen sich auf rd. 153.000 €/a und liegen um rd. 2.000 €/a über den Jahreskosten der Variante 3. Die spezifischen Kosten berechnen sich zu 0,087 €/m³ gemäß der Jahreswassermenge, bzw. 7,65 €/(EW·a) gemäß der mittleren CSB-Belastung im Zulauf. Im Vergleich zu Option 1 liegen die Herstellkosten der Option 2 um rd.

294.000 € brutto höher. Dies resultiert aus den Kosten für den Teilabbruch des Filtrationsgebäudes und der Wiederherstellung der Flächen, sowie der Ausstattung zur Begehbarkeit des Gebäudes.

Außerdem könnte die gewonnene Fläche bei den ohnehin schon knappen Platzverhältnissen auf der Kläranlage Vlotho weitergenutzt werden.

9. Option 3: Höhenverstellbares Mittelbauwerk in den Nachklärbecken

Als weitere Option in Kombination mit Variante 3: Filtration mit granulierter Aktivkohle ist die Integration eines höhenverstellbaren Mittelbauwerks in den Nachklärbecken in der Ausführung „hydrograv adapt“ der Firma Hydrograv GmbH denkbar.

Durch die Funktionsweise des höhenverstellbaren Mittelbauwerks kann die AFS-Ablaufkraft aus der Nachklärung reduziert und dadurch der Betriebsmittelverbrauch der Spurenstoffelimination deutlich gesenkt werden. Das variable Einlaufbauwerk aktiviert die in der Nachklärung meist ungenutzte „Flockenfilterwirkung“, durch welche ähnliche Filterleistungen erzielt werden können wie durch nachgeschaltete technische Filtrationsanlagen bei deutlich reduziertem Energieverbrauch und dadurch geringeren CO₂-Emissionen. Diese Flockenfilterwirkung wird dadurch aktiviert, dass die höhenverstellbare Einlauföffnung ständig unter dem Schlamm Spiegel liegt und nicht absetzbare Mikrofloccen statt in das Klarwasser in den Schlamm Spiegel leitet, wo sie durch die Flockenfilterwirkung abfiltriert werden können. Weiterhin wird bei Hochlast das Aufwirbeln bereits abgesetzten Schlammes verhindert, wodurch die Belastbarkeit des Nachklärbeckens erhöht wird. Weiterhin kann durch einstellen des Zulaufquerschnitts die Einströmgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Wassermenge geregelt werden, sodass im Becken weniger Schlamm aufgewirbelt wird [31].

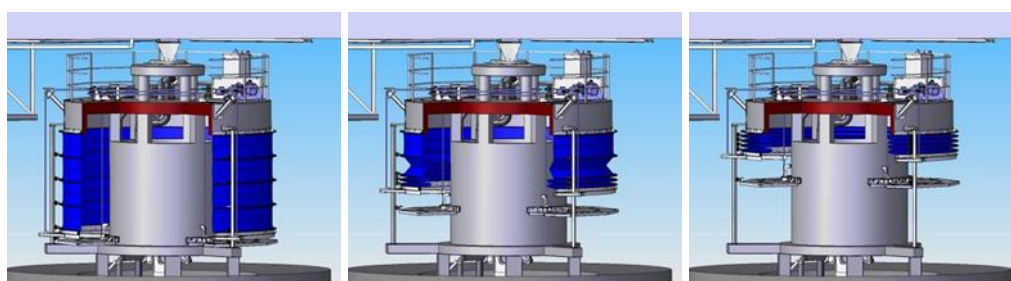


Abbildung 30: hydrograv adapt. Links tiefer Zulauf für Trockenwetter, Nachtzufluss, niedrigen ISV, in der Mitte stufenlos adaptiert auf höhere Belastung und rechts adaptiert auf höchste Belastung durch Anheben des Einlaufschlitzes [31]

Die Herstellkosten für diese Option wurden auf Grundlage eines Richtpreisangebotes mit rd. 470.000 € ermittelt. Aufgrund der enormen Verbesserung der Standzeiten der GAK-Filter sind die Herstellkosten für die höhenverstellbaren Mittelbauwerke voraussichtlich ebenso förderfähig, wie die Herstellkosten für die Vari-

ante 3. Dadurch sind nur rd. 141.000 € der Herstellkosten als Eigenanteil zu zahlen. Den erhöhten Investitionskosten im Vergleich zur Variante 3 stehen geringere Energiekosten für die Filterspülung und ein geringerer Bedarf an Betriebsmitteln gegenüber, welche sich nach der Barwertmethode über 15 Jahre zu einer vergleichbaren Einsparung zusammenfassen lassen. Nimmt man als recht pessimistische Annahme eine Steigerung der durchsetzbaren Bettvolumina von 10.000 BVT auf 12.000 BVT, entsprechend 20 % reduziertem Betriebsmitteleinsatz, so können im Mittel rd. 13.000 €/a Betriebskosten und rd. 10.000 €/a Energiekosten im Vergleich zu Variante 3 eingespart werden.

Die Herstellkosten für die GAK-Filtration inkl. der höhenverstellbaren Mittelbauwerke in der Nachklärung liegen somit bei insgesamt rd. 1.987.000 € (Variante 3: 1.517.000 €). Dies entspricht über 15 Jahre einem Projektkostenbarwert von rd. 1.748.000 € (Variante 3: 1.799.000 €) entsprechend mittleren Jahreskosten von rd. 146.000 €/a. Die spezifischen Kosten ergeben sich somit zu rd. 0,083 €/m³ bezogen auf die Jahreswassermenge, bzw. rd. 7,30 €/(EW·a) bezogen auf die mittlere CSB-Belastung im Zulauf zur Kläranlage.

10. Zusammenfassung

Mit der Weser liegt die Kläranlage Vlotho an einem verhältnismäßig großen Vorfluter. Auf diese Weise werden die mit dem Kläranlagenablauf eingeleiteten Frachten an Spurenstoffen stark verdünnt. Aufgrund dieser Verhältnisse ist der Einfluss der Kläranlage auf die Gewässerqualität der Weser nur relativ schwierig zu quantifizieren. Mit Blick auf die auslaufende Wasserrechtliche Genehmigung der Kläranlage, die stromabwärts teilweise praktizierte Nutzung von Uferfiltrat zu Trinkwasserzwecken und die unklare Gesamtbelastung des Flusses sollen die Kläranlage Vlotho sowie insbesondere deren Emissionen an Spurenstoffen dennoch genauer analysiert und betrachtet werden.

Zu diesem Zweck wurde die PFI Planungsgemeinschaft mit der Erstellung einer Studie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho beauftragt. Im Rahmen der Bearbeitung wurden zunächst die vorhandenen Daten zur Belastung der Kläranlage und des Vorfluters Weser ausgewertet. Außerdem wurde der aktuelle Status zur Spurenstoffbelastung des Kläranlagenablaufes und des Vorfluters durch ein entsprechendes Messprogramm erhoben. Auf dieser Grundlage wurden fünf Verfahrensvarianten zur Spurenstoffentfernung für die Kläranlage entwickelt und miteinander verglichen. Für die ermittelte Vorzugslösung wurden zusätzlich noch drei als zweckmäßig erachtete Optionen vorgestellt und monetär bewertet.

Der Anteil des Kläranlagenablaufes am Gesamtablauf der Weser liegt bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss bei lediglich rd. 0,12 %. Im Rahmen der Studie kann die gesamte Belastung der Weser durch Abwasser weder bestimmt noch abgeschätzt werden. Die Auswertung des Messprogramms ergab, dass die aus der Kläranlage Vlotho abfließenden Spurenstoffkonzentrationen zum Großteil den allgemeinen Vorsorgewert überschreiten. Weiterhin zeigt sich, dass der Fluss oberhalb der Kläranlageneinleitung bereits durch Spurenstoffe belastet ist. Diese Vorbelastung wird durch die Einleitung des Ablaufes der Kläranlage Vlotho für insgesamt fünf Einzelsubstanzen messbar erhöht.

Die durchgeführten Variantenuntersuchungen führten zu folgenden Ergebnissen: Bei rein monetärer Betrachtungsweise stellt die Variante 3 (GAK-Filtration nach der Nachklärung) mit einem Projektkostenbarwert von rd. 1,8 Mio. € die wirtschaftlichste Lösung dar, gefolgt von Variante 2 (PAK in Zulauf Flockungsfiltration) mit einem PKBW von rd. 2,45 Mio. €. Werden auch qualitative, nicht-monetäre Aspek-

te mit einbezogen, bleibt diese Reihenfolge bei der gewählten Gewichtung der einzelnen Faktoren unverändert. Variante 3 (GAK-Filtration nach der Nachklärung) liegt weiterhin mit rd. 72,68 % Kriterienerfüllung vor Variante 2 (PAK in Zulauf Flockungsfiltration) mit rd. 47,73 % (siehe Tabelle 22).

Tabelle 22: Zusammenfassung der Bewertungsmatrix für die Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho

Bewertungsmatrix	Gewichtung	V1: PAK in Becken	V2: PAK in Zulauf FF	V3: GAK	V4: Ozon	V5: Ozon und GAK
1. Ökonomie	50,00%	26,46%	28,43%	46,84%	16,09%	0,00%
Projektkostenbarwert	35,00%	18,17%	18,63%	35,00%	10,07%	0,00%
Investitionskosten	10,00%	3,29%	4,80%	10,00%	2,61%	0,00%
Kostensicherheit / Sensitivitäten	5,00%	5,00%	5,00%	1,84%	3,42%	0,00%
2. Betriebliche Aspekte	30,00%	7,00%	7,00%	10,00%	0,00%	0,00%
Betriebs- und Wartungsaufwand	20,00%	4,00%	4,00%	5,00%	0,00%	0,00%
Arbeitssicherheit	10,00%	3,00%	3,00%	5,00%	0,00%	0,00%
3. Ökologie	20,00%	12,50%	12,30%	15,84%	15,51%	14,00%
Elimination von Verunreinigungen	10,00%	7,50%	7,50%	7,50%	7,50%	9,00%
CO ₂ -Belastung	5,00%	5,00%	4,80%	2,34%	3,01%	0,00%
Reststoffanfall	5,00%	0,00%	0,00%	6,00%	5,00%	5,00%
Summe gewichteter Anteile	100,00%	45,96%	47,73%	72,68%	31,60%	14,00%
Rangfolge	0,00%	3	2	1	4	5

Die Sensitivitätsanalysen bezüglich des Betriebsmittelverbrauchs, der Betriebsmittelpreise und des Strompreises ergaben, dass die Jahreskosten aller Varianten am sensibelsten auf Änderungen des Betriebsmittelverbrauches reagieren. Die größte Sensitivität insgesamt wies Variante 5 (Ozon + GAK) auf, dicht gefolgt von Variante 3 (GAK-Filtration). Jedoch legen die Betriebserfahrungen der aktuellen großtechnischen Versuche zur GAK-Filtration nahe, dass die festgestellten Standzeiten der GAK-Filter, und damit der Betriebsmittelverbrauch der Variante 3, günstiger ausfallen, als für die Bemessung angenommen.

Bezüglich der als Vorzugsvariante ermittelten GAK-Filtration wurden weitere Optionen untersucht und auf ihre Wirtschaftlichkeit überprüft. Dabei hat sich ergeben, dass eine Kombination der Optionen 2 und 3, nämlich der kontinuierlich gespülten GAK-Filter mit einem Teilabriss des Filtrationsgebäudes in Kombination mit den höhenverstellbaren Mittelbauwerken in den Nachklärbecken, die betrieblich und wirtschaftlich günstigste Lösung zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Vlotho darstellt. Die Kombination der Vorteile beider Optionen bringt erhebliche Einsparungen an Wartungsaufwand sowie Personal-, Energie- und Betriebsmittelkosten mit sich.

Die Herstellkosten für die Errichtung einer GAK-Filtration mit kontinuierlich gespülten Filtereinheiten (z.B. Nordic Water DynaSand® Carbon) belaufen sich auf rd. 1.477.860 € brutto inkl. Baunebenkosten. Der Teilabbruch der Biofor-Anlage sowie die Verfüllungsarbeiten belaufen sich auf weitere rd. 180.000 € brutto und die Ausrüstung der neuen Nachklärbecken mit höhenverstellbaren Mittelbauwerken kostet rd. 470.000 € brutto. Für die Inbetriebnahmephase sind zusätzlich rd. 115.200 € für die Erstbefüllung der Filtereinheiten mit GAK vorzusehen und rd. 23.000 € für die begleitende Spurenstoffanalytik. Derzeit gewährt das Land NRW für die Errichtung einer solchen Anlage zur gezielten Spurenstoffelimination noch eine finanzielle Förderung von 70 % der Gesamtherstell- und Inbetriebnahmekosten. Die Abbruch- und Verfüllungsarbeiten sind nicht förderfähig. Der Förderfähige Gesamtbetrag beläuft sich somit auf rd. 2.086.000 € brutto inkl. Baunebenkosten, was einer Förderung in Höhe von rd. 1.460.000 € entspricht. Bei Realisierung der Maßnahme sind außerdem Einsparungen bei der Abwasserabgabe zu erwarten. Der Projektkostenbarwert über 15 Jahre errechnet sich zu rd. 1.769.000 € und ist rd. 30.000 € günstiger als Variante 3. Die spezifischen Kosten belaufen sich auf 0,084 €/m³ bezogen auf die jährliche Abwassermenge bzw. 7,40 €/(EW·a) bezogen auf 20.000 angeschlossene Einwohnerwerte.

Bleibt die Förderung der Investitionskosten durch das Land NRW unberücksichtigt, so ist für die oben beschriebene Umrüstung mit einem PKBW von rd. 3,23 Mio. € entsprechend rd. 271.000 €/a über 15 Jahre zu rechnen. Die spezifischen Kosten belaufen sich dann auf rd. 0,137 €/m³ oder rd. 13,55 €/(EW·a).

Abschließend danken wir dem Land Nordrhein-Westfalen und der Bezirksregierung Detmold für die Förderung der Studie sowie den Vlothoer Wirtschaftsbetrieben und dem Kläranlagenpersonal für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit.

Aufgestellt:

Bochum im November 2016

Dr.-Ing. Reiner Boll

11. Literatur

- [1] Mertsch, V. (2014): Mikroschadstoffe aus kommunalem Abwasser - Konzeption Nordrhein-Westfalen
- [2] Abegglen, C.; Siegrist, H. (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser - Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen
- [3] Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (2015): Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination
- [4] Internetauftritt und Projektsteckbriefe des Kompetenzzentrums Spurenstoffe Baden-Württemberg, eingesehen bzw. heruntergeladen am 17.02.2015, aktualisiert am 27.04.2016: www.koms-bw.de
- [5] Projektsteckbriefe aus der Rubrik „Anlagen/Projekte“ des Internetauftritts des Verbandes Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), heruntergeladen am 17.02.2015: www.micropoll.ch
- [6] Internetauftritt Institute für Umwelt- und Verfahrenstechnik der Hochschule für Technik Rapperswil, eingesehen am 03.03.2015: <http://www.umtec.ch/>
- [7] Projektsteckbriefe aus der „Tatenbank“ des Internetauftritts des Kompetenzzentrums Mikroschadstoff.NRW, heruntergeladen am 03.02.2015: www.masterplan-wasser.nrw.de
- [8] Internetauftritt Abwasserverband Obere Lutter: <http://www.mikroverunreinigungen.de/obere-lutter/>
- [9] Internetauftritt Abwasserverband Obere Lutter, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „CSB- und Spurenstoffadsorption im Aktivkohle Festbett – Teil 2“, heruntergeladen am 02.05.2016: <https://www.mikroverunreinigungen.de/wp-content/uploads/2014/10/KurzB-2014-September-final.pdf>
- [10] Präsentation Firma Hydro-Ingenieure, heruntergeladen am 04.03.2015: http://hydro-ingenieure.de/wp-content/uploads/2014/06/6_20140521_Groemping.pdf

-
- [11] Kurzbericht zum Forschungsvorhaben Technische Erprobung des Aktivkohleeinsatzes zur Elimination von Spurenstoffen in Verbindung mit vorhandenen Filteranlagen FilterAK vom Oktober 2015, eingesehen am 10.08.2016
- [12] Internetauftritt Firma Nordic Water GmbH, eingesehen am 04.03.2015:
<http://www.spurenstoffelimination.de/index.php/referenzen#klärwerk-emmingen-liptingen-d>
- [13] Internetauftritt WAZ, abgerufen am 05.02.2015:
<http://www.derwesten.de/staedte/gelsenkirchen/klaeranlage-im-gelsenkirchener-marienhospital-fertiggestellt-id4915508.html>
- [14] RiSKWa (2013): Leitfaden Polare organische Spurenstoffe als Indikatoren im anthropogen beeinflussten Wasserkreislauf
- [15] Luo, X.; Guo, W.; Ngo, H. H.; Nghiem, L. D.; Hai, F. I.; Zhang, J.; Liang, S.; Wang, X. C. (2014): A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment
- [16] Türk, J.; Nafu, I.; Lyko, S.; Wermter, P.; Palm, N.; Reinders, M.; ... Hassani, V. (2013): Volkswirtschaftlicher Nutzen der Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen zur Elimination von organischen Spurenstoffen, Arzneimitteln, Industriechemikalien, bakteriologisch relevanten Keimen und Viren (TP 9)
- [17] Margot, J.; Kienle, C.; Magnet, A.; Weil, M.; Rossi, L.; de Alencastro, L. F.; Abegglen, C.; Thonney, D.; Chèvre, N.; Schärer, M.; Barry, D. A. (2013): Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon?
- [18] PFI (2015): Energieanalyse Kläranlage Vlotho
- [19] DWA A 131 (2000): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen
- [20] ATV-DVWK-A 198 (2003): Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen
- [21] PFI Planungsgemeinschaft GbR (2015): Studie zur Spurenstoffelimination auf dem Klärwerk Bielefeld-Brake

- [22] Herbst, H.; Hilbig, R. (2013): Einbindung einer Anlage zur Spurenstoffelimination mittels Aktivkohle in die Abwasserfiltration der Kläranlage Neuss Ost – Machbarkeitsstudie
- [23] Benstöm, F.; Stepkes, H.; Rolfs, T.; Montag, D.; Pinnekamp, J. (2014): Untersuchung einer bestehenden Filterstufe mit dem Einsatz von Aktivkohle zur Entfernung organischer Restverschmutzung auf der Kläranlage Düren-Merken, Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV)
- [24] Christ, O.; Mitsdoerffer, R. (2013): Weitergehende Reduzierung von Mikroverunreinigungen auf der Kläranlage Espelkamp – Studie
- [25] Neumann, K.-D.; Merkel, W.; Schmidt, T. C. (2011): Metabolitenbildung beim Einsatz von Ozon – Schlussbericht
- [26] Oberflächengewässerverordnung - OGewV (2011): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer
- [27] Oekotoxzentrum (2013): Vorschläge für akute und chronische Qualitätskriterien für ausgewählte schweizrelevante Substanzen. Heruntergeladen von www.oekotoxzentrum.ch am 11.12.2014
- [28] Trinkwasserverordnung – TrinkwV (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch
- [29] ATV-DVWK-A 203 (1995): Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung
- [30] RiSKWa (2015): Leitfaden Begriffe und Definitionen zu ausgewählten Technologien zur Elimination von Spurenstoffen und Krankheitserregern aus Abwasser
- [31] Richtpreisangebot Fa. Hydrograv GmbH vom 28.07.2016