

# Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung



***Die Hauptaufgabe der biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung besteht darin, die labilen, toxischen Reaktionsprodukte aus der Ozonung wieder zu eliminieren. In diesem Bericht wird ein detaillierter Verfahrensüberblick gegeben, da verschiedene Verfahren dazu eingesetzt werden können. Insbesondere wird aufgezeigt, welche Verfahren sich nach heutigem Stand des Wissens dazu eignen und bei welchen Verfahren noch ein zusätzlicher Wissens- und Erfahrungsbedarf besteht. Der Bericht richtet sich an Personen, die in ein Umsetzungsprojekt zur Spurenstoffelimination auf einer kommunalen Kläranlage involviert sind.***

## **Impressum**

**Redaktion** P. Wunderlin (VSA)

**Fachliche Begleitung** M. Thomann (Holinger AG, Projektleiter), C. Abegglen (ERZ, VSA), M. Baggenstos (früher Wabag AG, jetzt Hunziker Betatech AG), H. Blény (Bafu), D. Dominguez (Bafu), M. Böhler (Eawag), R. Frei (ProRheno), A. Meier (VSA), J. Grelot (VSA), M. Sommer (Kanton Basel-Stadt), D. Thonney (SIGE)

*Die vorliegende Publikation wurde mit aller Sorgfalt und nach bestem Wissen erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität kann jedoch keine Gewähr übernommen werden. Haftungsansprüche gegen den VSA wegen Schäden materieller oder immaterieller Art, welche durch die Benützung und Anwendung der vorliegenden Publikation entstehen könnten, werden ausgeschlossen.*

**Titelbild: Ozonung und Sandfilter Kläranlage Reinach, Oberwynental**

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>5</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1 Ausgangslage: Organische Spurenstoffe in den Gewässern	6
1.2 Gesetzliche Grundlagen	6
1.3 Struktur des Berichts	8
<b>2 Hauptaufgaben der Nachbehandlung</b>	<b>10</b>
<b>3 Biologische Reinigungsstufe</b>	<b>10</b>
<b>4 Ozonung</b>	<b>11</b>
4.1 Hauptaufgabe der Ozonung	12
4.2 Zusätzliche Effekte der Ozonung	13
4.3 Weitere Kriterien	15
<b>5 Verfahrensüberblick und Wahl des geeigneten Nachbehandlungsverfahren</b>	<b>17</b>
<b>A1 Vollozonung und Nachbehandlung durch Sandfiltration</b>	<b>21</b>
A1.1 Beschreibung des Verfahrens (mit Dimensionierungswerten)	22
A1.2 Bisherige Anwendungen	23
A1.3 Hauptanforderungen an einen Sandfilter	23
A1.4 Zusätzliche Effekte eines Sandfilters	24
A1.5 Weitere Kriterien	26
<b>A2 Vollozonung und Nachbehandlung durch ein Wirbelbett</b>	<b>29</b>
A2.1 Beschreibung des Verfahrens (mit Dimensionierungswerten)	30
A2.2 Bisherige Anwendungen	31
A2.3 Hauptanforderungen an ein Wirbelbett	31
A2.4 Zusätzliche Effekte eines Wirbelbetts	31
A2.5 Weitere Kriterien	32
<b>A3 Vollozonung und Nachbehandlung durch ein Festbett</b>	<b>35</b>
A3.1 Beschreibung des Verfahrens (mit Dimensionierungswerten)	36
A3.2 Bisherige Anwendungen	37
A3.3 Hauptanforderungen an ein Festbett	37
A3.4 Zusätzliche Effekte eines Festbetts	37

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

A3.5	Weitere Kriterien _____	38
<b>A4</b>	<b>Vollozonung und weitere Nachbehandlungsverfahren _____</b>	<b>41</b>
A4.1	Schönungsteich _____	41
A4.2	Nutzung bestehender biologischer Reinigungsstufen (z.B. Nitrifikationsstufe) _____	41
<b>B</b>	<b>TEILOZONUNG (Kombination mit Aktivkohlestufe) _____</b>	<b>42</b>
<b>B1</b>	<b>Teilozonung und Nachbehandlung durch granuliert Aktivkohle (GAK)-Filtration _____</b>	<b>43</b>
B1.1	Beschreibung des Verfahrens (mit Dimensionierungswerten) _____	44
B1.2	Bisherige Anwendungen _____	45
B1.3	Hauptanforderungen an einen GAK-Filter _____	45
B1.4	Zusätzliche Effekte eines GAK-Filters _____	46
B1.5	Weitere Kriterien _____	47
<b>B2</b>	<b>Teilozonung und weitere Aktivkohle-basierte Nachbehandlungsverfahren _____</b>	<b>50</b>
B2.1	Teilozonung in Kombination mit einer PAK-Stufe _____	50
B2.2	Teilozonung in Kombination mit GAK im Wirbelbett _____	50
	<b>Literaturverzeichnis _____</b>	<b>51</b>

### Zusammenfassung

Durch die Behandlung des kommunalen Abwassers mit Ozon wird eine grosse Bandbreite an organischen Spurenstoffen eliminiert, und die Abwasserqualität dadurch signifikant verbessert. Als Nebeneffekt können durch die Ozonung labile, toxische Reaktionsprodukte entstehen, die in einer biologisch aktiven Nachbehandlungsstufe wieder abgebaut werden müssen (= Hauptaufgabe der Nachbehandlungsstufe).

Dieser Bericht richtet sich an Personen, die in ein Projekt zur Spurenstoffelimination auf einer kommunalen Kläranlage involviert sind, wie Planer und Kläranlagen-Betreiber, und soll eine praktische Hilfestellung bei der Verfahrenswahl der Nachbehandlung nach einer Ozonung, und bei der Ausarbeitung des Bauprojekts sein. Der Bericht gibt eine Übersicht über das aktuelle Wissen. Da für einige der Nachbehandlungsverfahren erst relativ wenig Wissen und begrenzte Erfahrungen vorliegen – und in Zukunft möglicherweise noch weitere Erkenntnisse sowie weitere Verfahren dazu kommen werden – ist das Dokument modular aufgebaut. Auf diese Weise können spätere Ergänzungen einfach vorgenommen werden.

Im vorliegenden Bericht wird auf folgende Nachbehandlungsverfahren detailliert eingegangen: Sandfilter, Wirbelbett, Festbett (mit fixen Einbauten), Filtration mit granulierte Aktivkohle (GAK). Weitere Verfahren, wie beispielsweise Schönungsteiche, andere Aktivkohle-basierte Verfahren, werden weniger detailliert beschrieben, insbesondere auf Grund der noch wenigen Erfahrungen. Die Nachbehandlung kann nicht von den vorangehenden Behandlungsstufen isoliert betrachtet werden. Aus diesem Grund werden auch die in diesem Zusammenhang relevanten Aspekte der biologischen Reinigung sowie der Ozonung beschrieben.

Der aktuelle Stand des Wissens und die Erkenntnisse zu den einzelnen Verfahren lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

- **Sandfilter:** Ein bewährtes Nachbehandlungsverfahren, für das bereits viele Erfahrungen vorliegen. Neben der Elimination der labilen, toxischen Reaktionsprodukte weist der Sandfilter – aufgrund seiner Filterwirkung - weitere zusätzliche positive Effekte auf: dazu gehört beispielsweise ein gewisser DOC-, GUS-, oder P-Rückhalt, bzw. Abbau.
- **Filter mit granulierter Aktivkohle (GAK):** Ähnlich einzustufen wie der Sandfilter. Hier muss allerdings berücksichtigt werden, dass durch die Aktivkohle eine zusätzliche Spurenstoffelimination auftritt. Die spezifische Ozondosis kann daher entsprechend verringert werden.
- **Wirbelbett- und Festbettsystem:** Bei dem Wirbelbett- und dem Festbettsystem (mit fixen Einbauten) handelt es sich um sogenannte offene Systeme. Das bedeutet, dass keine substantielle Filterwirkung vorhanden ist. Die zusätzlichen positiven Effekte sind daher deutlich geringer als bei einem Sand- oder GAK-Filter. Im Weiteren sind die Erfahrungen mit diesen beiden Systemen als Nachbehandlungsverfahren noch eher gering. Beim Festbett gilt es zuerst noch gewisse technische Herausforderungen (z.B. Massnahmen gegen Schneckenbefall) zu lösen.
- **Weitere Nachbehandlungsverfahren:** Es sind auch weitere Nachbehandlungsverfahren denkbar, die eine biologische Aktivität aufweisen. Dazu gehören beispielsweise Schönungsteiche, bestehende biologische Reinigungsstufen oder andere Aktivkohle-basierte Verfahren.

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage: Organische Spurenstoffe in den Gewässern

Organische Substanzen, welche in Gewässern in Konzentrationen im Bereich von wenigen Nano- bis Mikrogramm pro Liter vorkommen, werden organische Spurenstoffe respektive Mikroverunreinigungen (MV) genannt. Sie können auf Wasserlebewesen bereits in diesen geringen Konzentrationen nachteilige Effekte haben. Die kommunalen Abwasserreinigungsanlagen (ARA) stellen – neben diffusen Quellen – den wichtigsten kontinuierlichen Eintragspfad für Spurenstoffe dar (Abegglen und Siegrist, 2012). Aus dem Projekt „Strategie Micropoll“ des Bundesamts für Umwelt (BAFU) resultierte, dass der Eintrag von Spurenstoffen aus kommunalen ARA mit technischen Massnahmen wesentlich reduziert werden kann.

Am 1. Januar 2016 traten das revidierte Gewässerschutzgesetz (GSchG) und die revidierte Gewässerschutzverordnung (GSchV) in Kraft. Damit sind die gesetzlichen Grundlagen für den Ausbau ausgewählter Kläranlagen in der Schweiz mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe geschaffen. Die Kriterien zur Auswahl der betroffenen ARA richten sich gemäss GSchV nach drei Zielen:

- Schutz der aquatischen Tier- und Pflanzenwelt
- Qualitätssicherung der Trinkwasserressourcen
- Reduktion der ins Ausland abgeleiteten Menge an Spurenstoffen. Als Oberlieger trägt die Schweiz eine besondere Verantwortung gegenüber flussabwärts liegenden Ländern.

Die in diesem Bericht diskutierten technischen Massnahmen auf ARA zur Elimination der MV sind somit als Teil einer Gesamtstrategie zu betrachten. Neben der Punktquelle ARA liefern diffuse Quellen, speziell die Landwirtschaft, massgebliche Einträge an MV (hauptsächlich Pflanzenschutzmittel) in die Gewässer (Braun et al., 2015). Im Rahmen des Aktionsplans Pflanzenschutzmittel (am 6.9.17 vom Bundesrat verabschiedet) sollen die dadurch entstehenden Risiken deutlich reduziert werden (WBF, 2016).

## 1.2 Gesetzliche Grundlagen

Die Festlegung der ARA, die Massnahmen bezüglich organischen Spurenstoffen treffen müssen, erfolgt in der Regel im Rahmen der kantonalen Planung und berücksichtigt die Kriterien gemäss Anhang 3.1. der Gewässerschutzverordnung. Die Verfahrenswahl trifft aber der Betreiber, in enger Zusammenarbeit mit dem zuständigen Planungsbüro, sowie in Absprache mit den kantonalen Behörden. Um abgeltungsberechtigt zu sein, müssen bei der Verfahrenswahl folgende gesetzliche Grundsätze berücksichtigt werden (Abbildung 1; Artikel 63 GSchG; Vollzugshilfe „Finanzierung von Massnahmen“, siehe auch Dominguez et al., 2016a):

- Zweckmässige Planung
- Sachgemässer Gewässerschutz
- Stand der Technik
- Wirtschaftlichkeit

Es ist somit eine systematische Herangehensweise notwendig (d.h. Definition der Zielsetzung und nachfolgende Entwicklung und Beurteilung unterschiedlicher Lösungsansätze), unter Berücksichtigung der relevanten Randbedingungen (wie beispielsweise der Abwasserzusammensetzung, oder der bestehenden Infrastruktur). Im Weiteren dürfen die

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

Massnahmen zu keiner Verschlechterung des aktuellen Gewässerzustands führen (z.B. keine übermässige Bildung von unerwünschten Oxidationsnebenprodukten, kein übermässiger Aktivkohle-Schlupf). Zudem soll die angestrebte Zielerreichung – ein Reinigungseffekt von 80% für organische Spurenstoffe bezogen auf Rohabwasser (GSchV, Anhang 3.1, Absatz 2 Ziffer 8) - mit der wirtschaftlichsten Massnahme durchgeführt werden.

Bei Abwässern, welche für eine Behandlung mit Ozon geeignet sind, können durch die Ozonung **LABILE, toxische Reaktionsprodukte** entstehen. Diese Stoffe sind gut biologisch abbaubar, und werden somit – wie auch deren negativen ökotoxikologischen Effekte - in der Nachbehandlungsstufe eliminiert. Aus diesem Grund ist der Ozonung eine geeignete biologisch aktive Behandlungsstufe nachzuschalten. Gewisse Abwässer sind nicht für eine Ozonbehandlung geeignet (z.B. bei bedeutenden Industrie- und Gewerbeabwassereinleitern). In diesen Fällen können **STABILE, toxische Reaktionsprodukte** (z.B. Bromat) in erhöhten Konzentrationen gebildet werden. Diese Aspekte müssen daher im Rahmen von Voruntersuchungen rechtzeitig und im notwendigen Umfang abgeklärt werden (siehe dazu VSA-Empfehlung „Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung“), und wenn nötig von einer Ozonung abgesehen, oder geeignete Massnahmen an der Quelle getroffen werden (nicht Teil dieses Berichts).

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

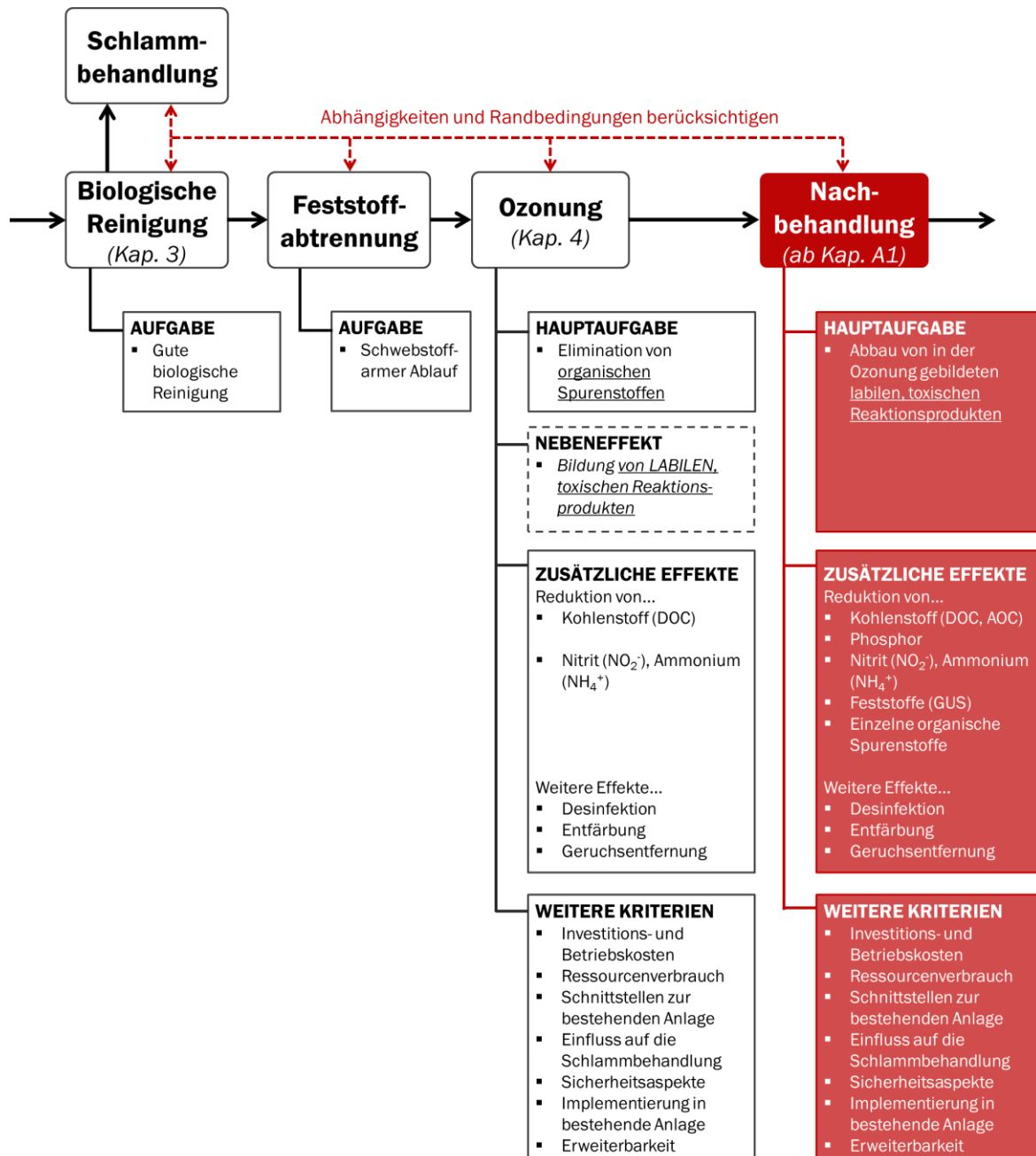
Allgemeine Voraussetzungen	Erläuterungen
Zweckmässige Planung	Unter einer zweckmässigen Planung versteht man eine systematische, am Gewässer und an dessen Einzugsgebiet orientierte Herangehensweise, bei der unterschiedliche Lösungsansätze und Zielsetzungen überprüft und gegeneinander abgewogen werden. Zu den Zielsetzungen gehören insbesondere Gewässerschutzaspekte (z. B. Vermeidung von Stoffeinträgen in Trinkwasserressourcen), aber auch betriebliche und volks- bzw. betriebswirtschaftliche Aspekte. Zu einer zweckmässigen Planung gehört unter anderem die Prüfung von Massnahmen an der Quelle bei industriellen und gewerblichen Grosseinleitern, insbesondere wenn diese eine nachteilige Einwirkung auf den Betrieb der massnahmenpflichtigen zentralen ARA haben.
Sachgemässer Gewässerschutz	Ein sachgemässer Gewässerschutz bedeutet, dass der Zustand des Gewässers durch die Massnahme verbessert wird. Massnahmen, die zu Verschlechterungen führen, entsprechen nicht einem sachgemässen Gewässerschutz. Verschlechterungen sind beispielsweise die übermässige Bildung von problematischen Abbauprodukten (z. B. starke Bildung von Bromaten oder Nitrosaminen) oder der zusätzliche Eintrag von Feststoffen (z. B. aufgrund von PAK-Schlupf). Um einen sachgemässen Gewässerschutz zu gewährleisten, müssen die Randbedingungen gründlich analysiert werden. So sollte u. a. geprüft werden, ob das gewählte Verfahren für die spezifische Situation (Abwasserzusammensetzung, Fremdwasseranteil usw.) geeignet ist. Zudem muss die Massnahme mit anderen betroffenen Sektoren der Wasserwirtschaft (z. B. Trinkwasserversorgung) abgestimmt werden.
Stand der Technik	Bei der vorgesehenen Massnahme müssen sowohl das gewählte Verfahren als auch die verwendeten Bauteile und Installationen dem Stand der Technik entsprechen. Die erreichbare Reinigungsleistung sollte plausibel mittels grosstechnischer Versuche belegbar und durch den Hersteller bzw. Anbieter garantiert sein.
Wirtschaftlichkeit	Beim Kriterium der Wirtschaftlichkeit stehen die Auswahl der wirtschaftlichsten Massnahme zur Erreichung der angestrebten Zielsetzung und die Sicherstellung derer kostengünstigsten Ausführung im Vordergrund. Ersteres wird als erfüllt erachtet, wenn die Massnahme im Rahmen der kantonalen Planung als wirtschaftlich ausgewiesen wurde bzw. vom Kanton im Rahmen von Abklärungen vorgängig zum Bauprojekt (z. B. Vorprojekt) als wirtschaftlich beurteilt wurde. Die kostengünstigste Ausführung der Massnahme wird als gegeben erachtet, wenn bei der Realisierung die Vorschriften über das öffentliche Beschaffungswesen (SR 172.056.1 und SR 172.056.11) eingehalten werden.

**Abbildung 1.** Erläuterung der gesetzlichen Grundsätze nach Artikel 63 GSchG: Zweckmässige Planung, sachgemässer Gewässerschutz, Stand der Technik, Wirtschaftlichkeit (Quelle: Vollzugshilfe „Finanzierung von Massnahmen“; siehe auch Dominguez et al., 2016a).

### 1.3 Struktur des Berichts

Der Ozonung ist eine biologisch aktive Behandlungsstufe nachzuschalten. Dieser Bericht gibt eine Übersicht über das aktuelle Wissen zu Verfahrensstufen, die sich als Nachbehandlung eignen. Sie kann jedoch nicht isoliert von den vorangehenden Behandlungsstufen, wie Biologie und Ozonung, betrachtet werden. Aus diesem Grund wird in diesem Bericht auch auf die vorgeschalteten Behandlungsstufen, sowie auf die relevanten Schnittstellen mit der Nachbehandlung eingegangen (Abbildung 2). Da für einige der Nachbehandlungsverfahren erst wenige Erfahrungen vorliegen – und in Zukunft noch weitere Erfahrungen sowie möglicherweise weitere Verfahren dazu kommen werden – ist das Dokument modular aufgebaut. Auf diese Weise können spätere Ergänzungen einfach hinzugefügt werden.

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung



**Abbildung 2.** Die Nachbehandlung wird durch die vorangehenden Reinigungsstufen beeinflusst, und beeinflusst wiederum die vorangehenden Stufen. Daher ist eine Abgrenzung der (Haupt-) Aufgaben sowie der „zusätzlichen Effekte“ notwendig. Für eine fundierte Bewertung und Gegenüberstellung werden die Verfahren auch anhand „weiterer Kriterien“ beschrieben.

Der Bericht richtet sich an Personen, die in ein Projekt zur Elimination der Mikroverunreinigungen involviert sind, wie Planer und Kläranlagen-Betreiber, und soll eine praktische Hilfestellung bei der Verfahrenswahl (im Rahmen einer Variantenstudie), wie auch bei der Ausarbeitung von Vor- und Bauprojekten sein.

In einem ersten Teil wird auf die biologische Reinigung (Kapitel 3) sowie auf die Ozonung (Kapitel 4) eingegangen. Im zweiten Teil wird auf die verschiedenen Nachbehandlungsverfahren im Detail fokussiert, dies sind: Sandfilter (Kapitel A1), Wirbelbett (Kapitel A2), Festbett (Kapitel A3) und weitere Verfahren (A4) in Kombination mit einer Voll-Ozonung, sowie die granulierten Aktivkohle-Filtration (GAK; Kapitel B1) und weitere Aktivkohle-basierte Verfahren (B2) in Kombination mit einer Teil-Ozonung.

## 2 Hauptaufgaben der Nachbehandlung

Bei einer Ozonung entstehen typischerweise unproblematische Umwandlungsprodukte der Spurenstoffe – sogenannte Transformationsprodukte - ohne Wirkung oder mit deutlich geringeren Effekten als die Ausgangssubstanz. Zudem können aus der Abwassermatrix LABILE, toxische Reaktionsprodukte, wie Aldehyde, Ketone, organische Säuren etc., entstehen, die wieder eliminiert werden müssen, bevor das gereinigte Abwasser in den Vorfluter eingeleitet wird. Dazu ist eine biologisch aktive Nachbehandlungsstufe notwendig.

Einige bekannte labile, toxische Reaktionsprodukte können analytisch bestimmt und quantifiziert werden. Daneben können toxische Effekte mittels ausgewählter Biotests nachgewiesen werden. Geeignete Biotests dazu sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 zusammengefasst (nach Langer und Kienle, 2016).

*Durch die Behandlung eines „geeigneten“ Abwassers (gemäss VSA-Empfehlung „Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung“) mit Ozon werden die organischen Spurenstoffe sowie deren negative Effekte auf Wasserlebewesen eliminiert. Direkt nach der Ozonung kann teilweise eine erhöhte Toxizität – bedingt durch labile, toxische Reaktionsprodukte – auftreten. Diese Effekte werden aber durch eine geeignete biologische Nachbehandlung wieder weitestgehend eliminiert. Aus diesem Grund ist eine biologisch aktive Nachbehandlungsstufe notwendig.*

**Tabelle 1.** Geeignete Biotests zum Nachweis der Effekte von labilen, toxischen Reaktionsprodukten.

Biotest	Testorganismus	Nachweisbare Effekte (Wirkung)
Ames-Test	Bakterien (Salmonellen)	Vererbare Veränderung des Erbguts (Mutagenität)
UmuC-Test	Bakterien (Salmonellen)	Schädigung des Erbguts (Gentoxizität)
Chronischer Fortpflanzungstest mit Wasserflöhen	Wasserfloh	Hemmung der Fortpflanzung, verringertes Überleben
<b>→ Mit diesen Biotests lassen sich mögliche Effekte von labilen, toxischen Reaktionsprodukten der Ozonung erfassen.</b>		

**Tabelle 2.** Zwei in-vivo Tests, welche zwar aussagekräftig, aber relativ aufwändig sind (teuer und dauern relativ lange).

Biotest	Testorganismus	Nachweisbare Effekte (Wirkung)
Glanzwurm-Fortpflanzungstest	Glanzwurm	Hemmung der Fortpflanzung, Biomassereduktion
Fish Early life stage toxicity (FELST)-Test	Regenbogenforelle	Verringerung der Schlupfrate und des Überlebens, Fehlbildungen, Verhaltensstörungen, Hemmung des Wachstums, Bildung von Vitellogenin (Biomarker für Östrogenität)
<b>→ Diese Biotests sind aufwändiger, können aber oben genannte Biotests ergänzen.</b>		

## 3 Biologische Reinigungsstufe

Die biologische Reinigungsstufe alleine ist nicht ausreichend, um die organischen Spurenstoffe zu eliminieren, da eine Breitbandwirkung fehlt (Abegglen und Siegrist, 2012). Es wird gemäss bisheriger Erfahrung auf den meisten ARA in der biologischen Stufe eine Elimination der 12 Leitsubstanzen (gemäss Verordnung des UVEK) im Bereich von 20-25% erreicht. Zwar kann die Elimination einiger Stoffe durch eine Erhöhung des Schlammalters (z.B. von wenigen Tagen auf 15 Tage) verbessert werden. Trotzdem kann dadurch eine zusätzliche Reinigungsstufe nicht

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

ersetzt werden. In neusten Untersuchungen (Falas et al., 2016) konnte gezeigt werden, dass selbst durch eine biologische Behandlung bei einem Schlammalter von 25 Tagen und einer hydraulischen Verweilzeit von einem Tag unter aeroben Bedingungen die durchschnittliche Elimination der Spurenstoffe nicht wirklich verbessert werden konnte. Es wurde aber beobachtet, dass gewisse Stoffe – wie beispielsweise Diuron oder Diclofenac – einen deutlich besseren Abbau gezeigt haben. Diese Erkenntnis ist interessant für die biologisch aktive Nachbehandlungsstufe, wo gewisse Stoffe eine erhöhte Elimination zeigen können (wie beispielsweise Benzotriazol in gewissen Sandfiltern). Die „rein“ biologischen Verfahren sind aber nicht ausreichend, um die gesetzlichen Anforderungen zu erreichen.

*Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass ein erhöhtes Schlammalter (Nitrifikation im Vergleich zu einer Anlage mit nur Kohlenstoffabbau) nicht nur organische Spurenstoffe besser abbaut, sondern auch eine gute und stabile biologische Reinigung des Abwassers bewirkt (tiefe DOC- und NO<sub>2</sub>-Ablaufkonzentrationen). Eine zusätzliche Reinigungsstufe zur Elimination der MV kann dadurch aber nicht ersetzt werden. Eine gut funktionierende biologische Stufe sowie ein schwebstoffarmer Ablauf wirken sich positiv auf die Ozonung aus. Die Ozonung erfolgt daher nach der biologischen Reinigungsstufe (geringer Ozonverbrauch durch tiefe DOC- und Nitrit-Konzentrationen).*

## 4 Ozonung

Bei einer Ozonung werden die organischen Spurenstoffe durch Ozon und OH-Radikale umgewandelt. Typischerweise bleiben unproblematische Umwandlungsprodukte der Spurenstoffe – sogenannte Transformationsprodukte - ohne Wirkung oder mit deutlich geringeren Effekten als die Ausgangssubstanz zurück (z.B. Kienle et al., 2015; Lee und von Gunten, 2016). Neben dem Abbau von Spurenstoffen werden andere organische und anorganische Abwasserinhaltsstoffe ebenfalls oxidiert. Es können labile, toxische Reaktionsprodukte entstehen (wie Aldehyde, Ketone, organische Säuren; Lee und von Gunten, 2016), die in der biologisch aktiven Nachbehandlungsstufe wieder abgebaut werden (Stalter et al., 2010a und 2010b; Magdeburg et al., 2012).

Ozon wird vor Ort mit einem Ozongenerator erzeugt, und gasförmig ins Abwasser eingetragen (siehe Abbildung 3). Als Trägergas dient in der Regel Sauerstoff, der flüssig angeliefert wird. Alternativ kann auch getrocknete Luft oder vor Ort produzierter Sauerstoff zur Ozonherstellung verwendet werden. Nach dem Eintrag ins Abwasser reagiert das Ozon im Kontaktreaktor mit den Abwasserinhaltsstoffen (u.a. auch mit den organischen Spurenstoffen; Abbildung 4). Eine detaillierte Darstellung der Reaktionsmechanismen von Ozon mit verschiedenen Abwasserinhaltsstoffen ist in von Gunten (2003a, 2003b) sowie in von Sonntag und von Gunten (2012) gegeben.

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

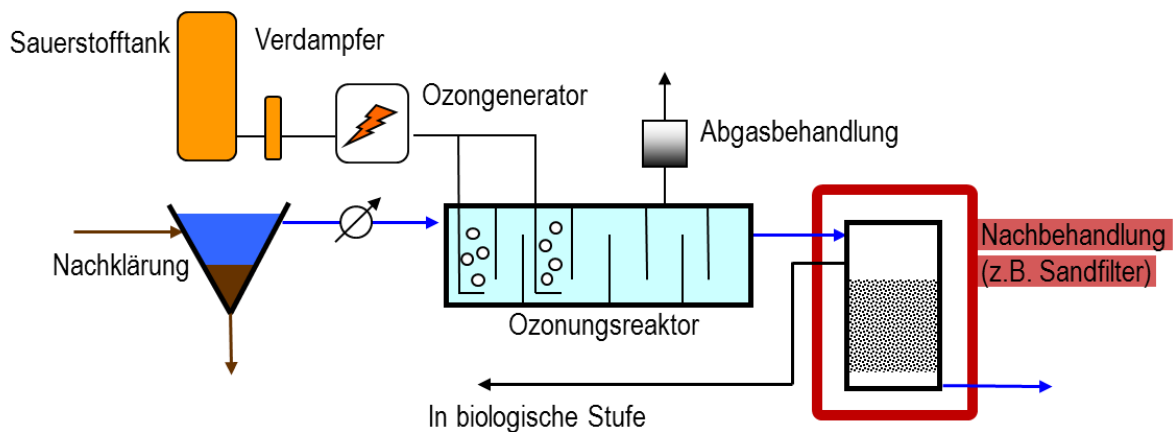


Abbildung 3. Beispiel eines allgemeinen Schemas einer Ozonung mit nachgeschaltetem 1-Schicht-Sandfilter (Quelle: Abegglen und Siegrist, 2012).

Ozon ist ein starkes Reizgas. Es müssen daher Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden (siehe Faktenblatt „Sicherheitsaspekte zum Umgang mit Ozon auf Kläranlagen“; Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“, 2016c). Unter anderem muss sichergestellt werden, dass das Rest-Ozon in der Abluft des Reaktors vernichtet wird, bevor es in die Umgebung ausgeblasen wird, und dass kein gelöstes Ozon aus dem behandelten Abwasser austritt. Auch im Umgang mit Sauerstoff, woraus Ozon hergestellt wird, sind sicherheitstechnische Aspekte zu berücksichtigen: beispielsweise sind nicht nur geringe, sondern auch erhöhte Sauerstoffkonzentrationen in der Umgebungsluft gefährlich (siehe Faktenblatt „Sicherheitsaspekte zum Umgang mit Sauerstoff auf Kläranlagen“; Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“, 2016d).

Die Elimination von organischen Spurenstoffen mit Ozon ist technisch und wirtschaftlich umsetzbar. Es werden dadurch eine breite Palette an Spurenstoffen (Breitbandwirkung) sowie deren negative Effekte auf Wasserlebewesen, wie beispielsweise die Hormonaktivität, weitgehend entfernt (Prasse et al., 2015; Kienle et al., 2015).

### 4.1 Hauptaufgabe der Ozonung

#### 4.1.1 Elimination von organischen Spurenstoffen sowie deren negativen Effekte

Die Elimination, beziehungsweise die Oxidation von organischen Spurenstoffen ist vor allem abhängig von den Stoffeigenschaften und der verfügbaren Ozonmenge (die wiederum von der Ozondosierung und der Abwasserzusammensetzung abhängt). Die bisherigen Erfahrungen und Untersuchungen zur Ozonung von kommunalem Abwasser haben gezeigt, dass viele Stoffe sehr rasch mit Ozon reagieren (z.B. Diclofenac, Carbamazepin, Ethinylestradiol), einzelne Stoffe aber selbst mit relativ hohen Ozondosierungen nur teilweise entfernt werden, wie z.B. Atrazin, Gabapentin oder iodierte Röntgenkontrastmittel.

Die Beurteilung der Reinigungsleistung der MV-Stufe erfolgt anhand von 12 Leitsubstanzen, welche periodisch gemessen werden. Es muss bei jeder Probenahme eine mittlere Elimination von 80% gegenüber Rohabwasser eingehalten werden.

Die in bisherigen Untersuchungen ermittelte, notwendige Ozondosis für eine mittlere Elimination von 80% der Leitsubstanzen bezogen auf Rohwasser bewegt sich für typisches kommunales Abwasser im Bereich von 0.4 bis 0.8 gO<sub>3</sub>/gDOC (Abbildung 4). Die DOC-Konzentration ist insofern relevant, als die Spurenstoffe (im µg/L-Bereich) nur einen kleinen Anteil des gesamten

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

organischen Anteils im kommunalen Abwasser ausmachen und das meiste Ozon mit dem „natürlichen“ Hintergrundmaterial (Abwassermatrix; im mg/L-Bereich) reagiert.

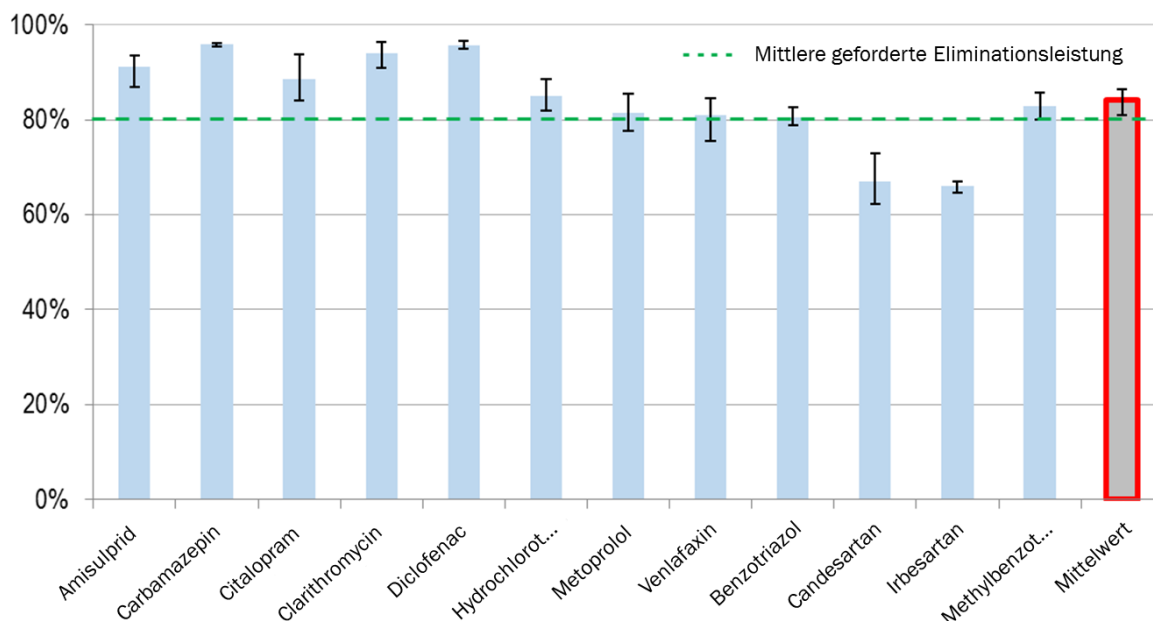


Abbildung 4. Elimination der 12 Leitsubstanzen über die Gesamtanlage auf der ARA Neugut (Quelle: ARA Neugut). Die spezifische Ozondosis lag bei 0.42 mgO<sub>3</sub>/mgDOC (BEAR-Strategie, LOD-Betriebskonzept, 24-Stunden-Sammelproben).

## 4.2 Zusätzliche Effekte der Ozonung

### 4.2.1 Elimination von gelöstem organischem Kohlestoff (DOC, TOC, CSB)

Die Ozonung führt zu einer Oxidation von organischen Stoffen. Es wird jedoch keine vollständige Mineralisation (Endprodukt CO<sub>2</sub>) aller gelösten organischen Stoffe erzielt. Der Einfluss auf TOC (totaler organischer Kohlenstoff) und DOC (gelöster organischer Kohlenstoff), respektive CSB (chemischer Sauerstoff Bedarf) ist daher gering. Die DOC-Elimination scheint abwasserspezifisch zu sein: Auf der ARA Neugut wurden beispielsweise DOC-Abnahmen im Bereich von 5 bis 15% alleine durch die Ozonung bei spezifischen Ozondosen von 0.5 bis 0.7 gO<sub>3</sub>/gDOC gemessen (Mineralisierung; Böhler et al., 2017). Bei Versuchen auf der ARA Regensdorf (Abegglen et al., 2009), wie auch im Rahmen der KOMOZAK-Projekts (Kreuzinger et al., 2015) hingegen wurde keine signifikante DOC-Elimination durch die Ozonung gemessen.

### 4.2.2 Bildung von assimilierbarem (gut abbaubarem) organischem Kohlenstoff (AOC)

Grundsätzlich wird durch die Ozonung ein Teil der refraktären Stoffe einem biologischen Abbau zugänglich gemacht, d.h. der BSB<sub>5</sub> (biologischer Sauerstoff Bedarf über 5 Tage) oder AOC (organischer Kohlenstoff, der von Mikroorganismen aufgenommen werden kann) ist nach der Ozonung höher als im Zulauf zur Ozonung (diese Stoffe sind in der DOC-Messung enthalten). Auf der ARA Neugut wurde eine AOC Konzentration nach der Ozonung im Bereich von 250 bis 300µg/L gemessen (es liegen jedoch nur wenige Messungen vor; Böhler et al., 2017.).

### 4.2.3 Elimination von Phosphor

Die Ozonung hat grundsätzlich keinen Einfluss auf die Phosphor-Komponenten. In den Versuchen in Lausanne (STEP de Vidy) wurde zwar eine Zunahme des gelösten Phosphors (Ortho-Phosphat) über die Ozonung gemessen, eine Erklärung dafür gibt es jedoch nicht (Margot et al., 2011). In

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

anderen Versuchen wurde keine solche Zunahme beobachtet, beziehungsweise wurde dieser Aspekt nicht speziell untersucht.

### **4.2.4 Elimination der Stickstoffkomponenten**

Die Oxidation von Ammonium mit Ozon findet zwar statt, ist aber sehr langsam (Hoigné und Bader 1983). Somit ist von den Stickstoffkomponenten einzig Nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) von (allerdings grosser) Relevanz für die Ozonung. Nitrit reagiert sehr schnell mit Ozon und wird nahezu vollständig zu Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) oxidiert (mit einer Stöchiometrie von 1:1; 1 mg  $\text{NO}_2^-$ -N /L verbrauchen 3.4 mg  $\text{O}_3$ /L). Enthält das Abwasser viel Nitrit, wird das Ozon rasch gezehrt und es steht weniger Ozon für den Abbau von organischen Spurenstoffen zur Verfügung. Parallel zur Nitrit-Konzentration verändert sich entsprechend die Nitrat-Konzentration. Periodisch erhöhte Nitrit-Konzentrationen müssen bei der Auslegung der Ozongeneratoren und des Sauerstoffbedarfes berücksichtigt werden. Zusätzlich sollte Nitrit in Steuerstrategien der Ozonung berücksichtigt werden.

### **4.2.5 Elimination der gesamten ungelösten Stoffe (GUS; inkl. Trübung)**

Die Ozonung hat keinen Einfluss auf die gesamten ungelösten Stoffe (GUS). Ob andererseits erhöhte GUS-Konzentrationen die Leistung der Ozonung beeinflussen ist unklar. Gemäss Huber et al. (2005) wurde bis zu einer GUS-Konzentration von 20 mg/L kein Effekt festgestellt. Wittmer et al. (2013) haben jedoch gezeigt, dass die Feststoffe einen Einfluss auf die Ozonzehrung und damit die Eliminationsleistung haben können. Grundsätzlich ist eine möglichst effiziente Feststoffabtrennung vor der Ozonung zu empfehlen (auch hinsichtlich der Belastung der Nachbehandlungsstufe).

### **4.2.6 Desinfektion**

Die Gesamtkeimzahl nimmt durch die Ozonung ab, und steigt in der Nachbehandlung – bedingt durch den biologisch verfügbaren Kohlenstoff (AOC) – tendenziell aber wieder an.

Bei *E.coli* und den *Enterokokken* war in bisherigen Studien durch die Ozonung eine Abnahme um 1 bis 2 log-Einheiten zu verzeichnen, die im Sandfilter sogar noch weiter abnahm, so dass eine Gesamtreduktion (über Ozonung und Sandfilter) von über 95% erreicht wurde (Abegglen et al., 2009).

In den Versuchen auf der STEP de Vidy wurden die Viren – über die Ozonung und den Sandfilter betrachtet - zu über 95% eliminiert (Margot et al., 2011).

Grundsätzlich führt eine hohe Ozondosis zu einer hohen Desinfektionsleistung. In diesem Zusammenhang gilt es aber auch zu berücksichtigen, dass eine hohe Ozondosis gleichzeitig zu einer erhöhten Bildung von unerwünschten Oxidationsnebenprodukten (siehe weiter oben) führen kann.

### **4.2.7 Entfärbung**

Die leichte Gelbfärbung des Abwassers wird in der Regel durch Stoffe mit Doppelbindungen verursacht. Diese werden durch Ozon schnell aufgespalten. Der Ablauf einer Ozonung ist daher meist sehr klar und weist keine sichtbare Färbung mehr auf. Die Abnahme der „Farbigkeit“ kann durch Absorptionsspektren vor und nach der Ozonung (Wellenlängenbereich von 250 bis 700nm) aufgezeigt werden (Wittmer et al. 2013). Bei Industriefarbstoffen muss diese Abnahme aber nicht zwingend gelten.

### 4.2.8 Geruchsentfernung

Im Pilotversuch in Regensdorf wurden Untersuchungen zur Geruchselimination durchgeführt (Abegglen et al., 2009). Da jedoch bereits im Ablauf der Nachklärung kaum Geruchsemissionen vorhanden waren, konnte keine klare Aussage über eine weitere Geruchselimination getroffen werden.

## 4.3 Weitere Kriterien

### 4.3.1 Investitions- und Betriebskosten

Die Investitionskosten einer Ozonung werden dominiert durch den Bau des Reaktors, sowie die elektromechanische Ausrüstung (z.B. Ozongenerator, Heizung, Lüftung, Klima). Die Investitionskosten wurden im Jahre 2008 für verschiedene Kläranlagen-Grössen in einer Studie abgeschätzt (Hunziker-Betatch, 2008) und im Jahre 2012 überprüft und angepasst (BG, 2012). Die spezifischen Investitionskosten sind insbesondere abhängig von der Anlagengrösse und Redundanz der Aggregate. Im Einzelfall sind aber auch andere Faktoren wie Landreserven, Baugrund, vorhandene Infrastruktur, Abwasserzusammensetzung etc. von Bedeutung. Aus diesem Grund können hier noch keine genauen Kostenangaben gemacht werden.

Die Betriebskosten einer Ozonung werden dominiert durch den Ozonverbrauch. Es fallen somit Kosten an für die Trägergasbereitstellung (d.h. Strom für die Lufttrocknung oder die Sauerstoffproduktion, respektive für den Einkauf des Sauerstoffs), sowie für die Ozonproduktion (Strom; siehe auch Kapitel „Ressourcenverbrauch“). Die Betriebskosten sind ebenfalls stark abhängig von der lokalen Situation. Daher können auch hierzu keine genauen Kostenangaben gemacht werden.

### 4.3.2 Ressourcenverbrauch

Bei der Ozonung werden hauptsächlich folgende Ressourcen benötigt: (i) Sauerstoff (als angelieferter Flüssigsauerstoff, oder gewonnen aus der Umgebungsluft), (ii) Strom (v.a. für Ozonerzeugung und Restozonvernichtung). (siehe dazu auch Energie in ARA, Kapitel Energieeffizienz in MV-Anlagen, 2017)

- **Trägergas:** Ozon wird im Ozongenerator durch stille elektrische Entladung aus Sauerstoff ( $O_2$ ) erzeugt. Der Sauerstoff kommt dabei entweder aus der Umgebungsluft ( $O_2$ -Gehalt zirka 21%) oder aus Reinsauerstoff (Reinheitsgrad von 98% bis >99.5%). In der technischen Umsetzung stehen zwei Varianten zur Verfügung:
  - **Einsatz von Flüssigsauerstoff:** Ozon kann aus flüssigem Sauerstoff erzeugt werden, der zentral produziert und mit Tanklastwagen zum Einsatzort geliefert wird. Vor Ort wird gaseitig keine Energie mehr benötigt. Bei einer Gesamtbetrachtung fallen aber die Sauerstoffproduktion (0.8 kWh/kg $O_2$ ) und der Transport (0.05 kWh/kg $O_2$ ) ins Gewicht (Abegglen et al., 2009; ISA, 2011; VSA-Empfehlung, 2018).
  - **Sauerstoffproduktion vor Ort:** Sauerstoff kann auch vor Ort, beispielsweise mit einer Druckwechseladsorption (PSA = Pressure Swing Adsorption) oder einer Vakuumdruckwechseladsorption (VPSA), erzeugt werden. Dabei wird Umgebungsluft durch Molekularsiebe gepresst, welche den Stickstoff ( $N_2$ ) aus der Luft entfernen (und den Sauerstoff dadurch aufkonzentrieren). Bei diesem Verfahren muss die Umgebungsluft komprimiert werden. Der Energiebedarf ist abhängig von der Anlagengrösse und dem benötigten Druck.

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

- **Strom für Ozonerzeugung und Restozonvernichtung:** Der grösste Energieverbraucher bei einer Ozonung ist der Ozongenerator. Die zugeführte elektrische Energie wird zu etwa 90% in Wärme umgewandelt, d.h. der Generator muss permanent gekühlt werden (siehe „Schnittstellen zur bestehenden Anlage“). Die Abwärme kann Rückgewonnen und beispielsweise zum Heizen von Betriebsgebäuden genutzt werden. Der Stromverbrauch von Ozongeneratoren liegt bei zirka 10 kWh/kgO<sub>3</sub> (bei grösseren und optimierten Anlagen ist der Stromverbrauch möglicherweise etwas tiefer). Nach dem Restozonvernichter besteht der Hauptanteil der Abluft aus Sauerstoff, und kann daher in der Biologie genutzt werden.

Im Projekt „Strategie Micropoll“ wurde der zusätzliche Energieverbrauch einer Ozonung für knapp 40 Kläranlagen berechnet, unter den Annahmen, dass Flüssigsauerstoff angeliefert wird, und die Ozonung bei einer spezifischen Ozondosis von 0.75 gO<sub>3</sub>/gDOC betrieben wird. Daraus resultierte im Durchschnitt ein zusätzlicher Stromverbrauch von 0.06 kWh/m<sup>3</sup> (ohne Sandfiltration; Abegglen und Siegrist, 2012; Datengrundlage aus den Versuchen in Regensdorf; Abegglen et al., 2009).

### 4.3.3 Schnittstellen zur bestehenden Kläranlage

Die Ozonung wird der biologischen Reinigungsstufe nachgeschaltet, denn die Abwasserinhaltsstoffe haben einen direkten Einfluss auf den Betrieb, wie auch auf den Reinigungseffekt. Daher ist die Effizienz der biologischen Reinigung sowie die Effizienz der Abtrennung der Feststoffe – hauptsächlich des Belebtschlammes - von grosser Bedeutung.

Ein sehr wichtiger Parameter in diesem Zusammenhang ist der organische Kohlenstoff (DOC), der massgeblich den spezifischen Ozonbedarf bestimmt: eine höhere DOC-Konzentration bedingt eine höhere Ozondosis (mgO<sub>3</sub>/mgDOC), da Ozon mit Teilen des DOC reagiert, und somit nicht mehr für die Oxidation der organischen Spurenstoffe zur Verfügung steht. Eine nitrifizierende biologische Reinigungsstufe mit einem Schlammalter im Bereich von 10 bis 20 Tagen weist DOC-Ablaufkonzentrationen von 5 bis 10 mgDOC/L auf.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Nitrit-Konzentration (siehe „Elimination der Stickstoffkomponenten“), da Nitrit sehr rasch mit Ozon reagiert. Eine möglichst vollständige und durchgehende Nitrifikation (auch während kalten Wintermonaten) senkt das Risiko von Nitrit-Spitzen, die unnötig Ozon zehren.

Weitere Aspekte, welche die bestehende Anlage betreffen können sind (nicht abschliessend): Kühlung, Lüftung, Stromzufuhr (eventuell wird ein grösserer Trafo benötigt), etc.

### 4.3.4 Einfluss auf die Schlammbehandlung

Die Ozonung hat keinen Einfluss auf die Schlammbehandlung der ARA, da kein zusätzlicher Schlamm produziert wird.

### 4.3.5 Sicherheitsaspekte

Im Umgang mit Ozon und Sauerstoff sind Sicherheitsaspekte zu berücksichtigen. Für die Nachbehandlungsstufe ist es von grosser Wichtigkeit, dass das zufließende Wasser kein Ozon mehr enthält. Das bedeutet, dass der Ozon-Kontaktreaktor hydraulisch ausreichend dimensioniert ist, und im Falle eines Störbetriebs der Austritt von Ozon durch geeignete Sicherheitsvorkehrungen verhindert werden kann, z.B. durch sofortiges Abschalten des Ozongenerators und Dosierung von Natrium-Bisulfit in den Ablauf der Ozonung. Ozon würde den Biofilm und dadurch die biologische Aktivität der Nachbehandlungsstufe reduzieren (zerstören), oder könnte durchschlagen und auch direkt ins Gewässer gelangen. Der Betrieb der Ozonung ist

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

grundsätzlich nicht zu empfehlen, wenn sich die Nachbehandlungsstufe in Revision befindet, da dann auch die Elimination von labilen, toxischen Reaktionsprodukten nicht mehr erfüllt würde.

Im Weiteren könnte das Ozon in die Umgebungsluft oder in die Betriebsräume entweichen, was zu einer Gefährdung des Betriebspersonals führen würde. Entsprechende Überwachungs- und Störfallkonzepte müssen daher implementiert werden. Eine Übersicht dazu ist in Faktenblättern der VSA-Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“ gegeben.

### 4.3.6 Implementierung in bestehende Anlage

Eine Ozonung ist in der Regel einfach in die bestehende Anlage integrierbar, da sie den bestehenden Behandlungsstufen nachgeschaltet wird. Bei bereits vorhandenen Filtrationsanlagen kann unter Umständen ein bestehendes Flockungsbecken als Kontaktreaktor umgenutzt werden (die bestehenden Flockungsbecken sind aber in den meisten Fällen zu wenig tief für einen effizienten Ozoneintrag). Die Hydraulik des Ozonreaktors sollte vorgängig mithilfe von geeigneten Simulationen visualisiert werden, um Kurzschlussströmungen zu vermeiden. Ebenfalls sollte darauf geachtet werden, dass die Ozonung durch möglichst geringfügige Anpassungen in der Hydraulik – d.h. ohne zusätzliches Hebewerk – in die Anlage integriert werden kann. Dabei ist zu prüfen, ob bei allen hydraulischen Lastfällen eine optimale hydraulische Beschickung des Ozonreaktors sichergestellt werden kann.

### 4.3.7 Erweiterbarkeit

Eine Erweiterung der Ozonung kann aus verschiedenen Gründen erforderlich sein: Die hydraulische Kapazität einer ARA wird erhöht oder der Ozoneintrag genügt nicht zur Erreichung der geforderten Spurenstoff-Eliminationsleistung. Für die Erhöhung der hydraulischen Kapazität muss, wenn die Aufenthaltszeit im Kontaktreaktor zu kurz ist, ein zusätzlicher Kontaktreaktor gebaut werden, sofern die zusätzliche Wassermenge weitergehend behandelt werden muss. In diesem Zusammenhang ist anhand hydraulischer Berechnungen sicherzustellen, dass sämtliche Anlagenteile inklusive den Zu- und Abläufen, sowie der Nachbehandlung, in der Lage sind, die zusätzliche Wassermenge abzuleiten. Falls der Ozoneintrag nicht genügt, sind Anpassungen beim Ozongenerator, dem Eintragungssystem, den Installationen bezüglich Heizung, Lüftung und Klima (HLK), und eventuell bei der Restozonvernichtung notwendig. Für die hydraulische Auslegung und die empfohlenen Redundanzen wird auf die VSA-Empfehlung (2015) verwiesen.

*Eine Ozonung eliminiert effizient ein breites Spektrum an organischen Spurenstoffen. Sie wird der biologischen Reinigungsstufe nachgeschaltet, weil dies effizienter, betrieblich optimaler und wirtschaftlicher ist. Zusätzliche Effekte sind die Elimination von Nitrit und teilweise von organischen Stoffen (DOC). Diese Stoffe konkurrieren mit den organischen Spurenstoffen um das verfügbare Ozon, beziehungsweise machen die Spurenstoffelimination weniger effizient. Es muss daher darauf geachtet werden, dass der Zulauf zur Ozonung möglichst wenig DOC und möglichst kein Nitrit aufweist. Im Weiteren wird das Abwasser durch die Behandlung mit Ozon teilweise desinfiziert und entfärbt.*

## 5 Verfahrensüberblick und Wahl des geeigneten Nachbehandlungsverfahrens

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Informationen und Aspekte zu den einzelnen Nachbehandlungsverfahren zusammengefasst, und in Bezug zur Verfahrenswahl gestellt. Zudem wird in Tabelle 3 eine kompakte Übersicht über die Nachbehandlungsverfahren und die

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

bisherigen Umsetzungen gegeben. Für detailliertere Informationen zu den einzelnen Verfahren (z.B. für die Erarbeitung des Bauprojekts) wird auf die Kapitel A1 bis B2 verwiesen.

Es gibt kein allgemeingültiges Vorgehen bei der Verfahrenswahl, da sich jedes Projekt vom anderen unterscheidet. Es muss somit für jede ARA die für sie beste Lösung gefunden werden. Dabei gilt es insbesondere die lokalen Gegebenheiten (z.B. Abwasserzusammensetzung, Platzverhältnisse, verfügbare Infrastrukturen etc.) zu berücksichtigen. Nachfolgende Aspekte können die Wahl des Nachbehandlungsverfahrens entscheidend beeinflussen (Liste nicht abschliessend):

- **Elimination der labilen Reaktionsprodukte sowie deren ökotoxikologischen Effekte durch die Nachbehandlung:** Die Hauptaufgabe einer Nachbehandlung nach der Ozonung ist der Abbau von in der Ozonung gebildeten labilen, toxischen Reaktionsprodukten. Ein Sandfilter ist dazu sehr gut geeignet. Für Wirbelbett- und Festbettsysteme sowie für die GAK-Filtration ist die Datengrundlagen noch sehr begrenzt. Aus dem ReTREAT-Projekt ist aber bekannt, dass der NDMA-Abbau bei allen vier Verfahren signifikant war (jedoch auch sehr variabel zwischen den Verfahren, was einen abschliessenden Vergleich schwierig macht; Böhler et al., 2017). Da in diesem Projekt die Toxizität des Abwassers im Ablauf der Biologie (Ablauf NKB) aber bereits sehr gering war – und sich durch die Behandlung mit Ozon nicht geändert hat – sind keine abschliessenden Aussagen möglich. Beim Festbett waren Schnecken eingewachsen, was sich durchaus negativ auf die biologische Aktivität auswirken kann.
- **Zusätzliche Anforderungen an die Nachbehandlung:** Ein Nachbehandlungsverfahren kann neben den Hauptanforderungen auch zusätzliche Reinigungseffekte aufweisen. So können beispielsweise durch Sand- und GAK-Filter zusätzlich auch die Feststoffe (und damit den gebundenen Phosphor, sorbierte Spurenstoffe und Schwermetalle) zurückgehalten, sowie die DOC- und AOC-Ablaufwerte weiter reduziert werden. Bei den „offenen“ Systemen wie beim einem Festbett oder Wirbelbett ist der Feststoffrückhalt wie auch die DOC-Elimination jedoch signifikant tiefer. Eine Restnitrifikation findet in allen biologisch aktiven Systemen statt, wenn konstant und genügend Ammonium vorhanden ist.
- **Betriebliche Aspekte der Nachbehandlungsverfahren:** Eine zusätzliche Belüftung zum Einbringen von Sauerstoff ist nicht notwendig, denn durch die vorangehende Ozonung ist der gelöste Sauerstoffgehalt im Wasser ausreichend hoch. Das Wirbelbettsystem muss aber aktiv durchmischt werden (beispielsweise mit Rührwerken). Im Weiteren muss beim Wirbelbett darauf geachtet werden, dass die Aufwuchskörper nicht über den Ablauf verloren gehen, oder in den Ozonreaktor eindringen. Beim Festbett ist darauf hinzuweisen, dass ein Schneckenbefall auftreten kann. Falls Schnecken den Biofilm abgrasen, kann dies zu einer verminderten biologischen Aktivität führen (was sich entsprechend auf den Abbau der labilen, toxischen Reaktionsprodukte auswirkt). Kann dieses Problem nicht durch technisch-betriebliche Massnahmen (z.B. periodisches Schaffen von anaeroben Zuständen) effizient behoben werden, ist dieses Verfahren in dieser Ausführung als biologisches Nachbehandlungsverfahren bedingt geeignet.
- **Schnittstellen zur bestehenden ARA:** Es ist zu beachten, dass bei Raumfiltersystemen (Sand-/GAK-Filtration) mit dem Rückspülwasser eine Rückbelastung von bis zu 5% des Abwassers anfallen kann. Das Wirbelbett wie auch das Festbett sind relativ einfach und robust im Betrieb, und deren Schnittstellen zur bestehenden Anlage sind minimal (allenfalls periodischer Anfall von Rückspülwasser beim Festbett).

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

Je nachdem, welches Nachbehandlungsverfahren gewählt, respektive wie das Verfahren dimensioniert wurde, sind möglicherweise nicht die ganzen Kosten abgeltungsberechtigt. Im Rahmen der Anhörung und der Zusicherung sind diese Aspekte mit der kantonalen Behörde und dem BAFU in einer frühen Projektphase zu besprechen.

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

	(A) Voll-Ozonung					(B) Verfahrenskombination (Teil-Ozonung mit Aktivkohle)		
	MV-Hauptstufe	Nachbehandlungsverfahren				MV-Hauptstufe	Nachbehandlungsverfahren	
	Voll-Ozonung (Kap. 4)	Sandfilter (Kap. A1)	Wirbelbett (Kap. A2)	Festbett (Kap. A3)	Schönungs- teich (Kap. A4.1)	Teil-Ozonung (Kap. B)	Filtration mit granulierter Aktivkohle (Kap. B1)	Andere Aktivkohle- basierte Verfahren (Kap. B2)
<b>HAUPTAUFGABEN</b>								
Labile, toxische Reaktionsprodukte	↑↑	↓↓↓	↓↓(↓)*	↓(↓)*	↓↓*	↑	↓↓↓*	↓↓*
<b>ZUSÄTZLICHE EFFEKTE</b>								
organische Spurenstoffe	↓↓↓	→	→	→	→	↓	↓↓	↓↓
Gelöster Kohlenstoff (DOC)	↓	↓	↓/→	↓/→	↓	↓/→	↓↓	↓↓
Biologisch abbaubarer Kohlenstoff (AOC)	↑↑	↓↓↓	↓↓	↓	↓↓	↑	↓↓↓	↓↓↓
Phosphor	→	↓↓	→	→	↓/→	→	↓↓	verfahrensabh.
Totaler Stickstoff	→	→	→	→	→	→	→	→
Ammonium	→	↓	↓	↓	↓	→	↓	↓
Nitrit	↓	↓/→	↓/→	↓/→	↓/→	↓	↓/→	↓/→
Feststoffe	→	↓↓	→	→	↓/→	→	↓↓	verfahrensabh.
Erzielte Desinfektion	↓↓	↑/→	↑/→	↑/→	↑/→	↓	↑/→	↑/→
Erzielte Entfärbung	↓	→	?	?	→	↓/→	↓↓	↓↓
Geruchsentfernung	→	→	→	→	→	→	→	→
<b>Bisherige Umsetzungen</b>								
		grosstechnisch - -	grosstechnisch halbtechnisch -	- halbtechnisch Pilotmassstab	grosstechnisch - -		grosstechnisch halbtechnisch Pilotmassstab	- - -

\* Geringe bis sehr geringe Datengrundlage

**Tabelle 3.** Übersicht über mögliche Nachbehandlungsverfahren sowie deren Effekte, unterteilt in klassische Verfahrensführung (mit einer „vollen“ Ozonung) und Verfahrenskombination (mit einer „Teil-Ozonung“). Die Pfeile haben folgende Bedeutung: ↓↓↓ = „nimmt stark ab“, ↑↑↑ = „nimmt stark zu“, ↓↓ = „nimmt mässig ab“, ↑↑ = „nimmt mässig zu“, ↓ = „nimmt geringfügig ab“, ↑ = „nimmt geringfügig zu“, → = „kein Effekt“. ? = „Effekt unklar“. Es handelt sich hier um eine qualitative Verfahrensbewertung mit zum Teil sehr limitierten Datengrundlagen.

## A1. Vollozonung und Nachbehandlung durch Sandfiltration

### **Das Wichtigste in Kürze**

Das Verfahren Ozonung mit Sandfiltration ist das wohl am besten untersuchte Verfahren in der Schweiz, da die Ozonung bisher meist auf ARA mit bestehendem Sandfilter getestet wurde. Diese Kombination kam beispielsweise in den Pilotversuchen auf der ARA Wüeri in Regensdorf (Abegglen et al., 2009) und auf der STEP de Vidy in Lausanne (Margot et al., 2011) zum Einsatz. Die ersten beiden grosstechnischen Ozonungen der Schweiz – auf der ARA Neugut (Dübendorf) und der ARA Reinach (Oberwytental) – sind ebenfalls mit einem Sandfilter kombiniert.

**Hauptanforderungen:** In den bisherigen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass labile, toxische Reaktionsprodukte durch den Sandfilter effizient eliminiert werden. Zudem konnte gezeigt werden, dass das durch die Ozonung gebildete NDMA (N-Nitrosodimethylamin) - ein Stoff der Gruppe der Nitrosamine und ein problematisches Reaktionsprodukt der Ozonung - durch einen Sandfilter wieder auf Konzentrationen vor der Ozonung reduziert werden konnte (Abegglen et al., 2009; Margot et al., 2011).

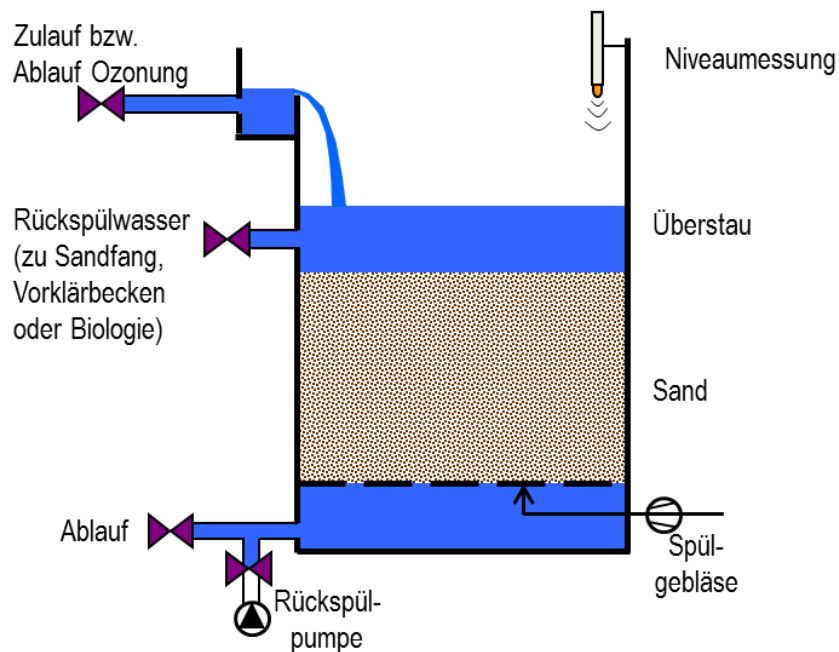
**Zusätzliche Effekte:** Der Sandfilter eliminiert zusätzlich Feststoffe (sowie die daran adsorbierten Stoffe wie Schwermetalle), sowie Nährstoffe (Ammonium, Nitrit, Phosphor) und DOC. Eine zusätzliche Spurenstoffelimination ist sehr stoffspezifisch und abhängig vom Filterregime (Sauerstoffgehalt im Zulauf, Kontaktzeit).

**Weitere Kriterien:** Der Sandfilter hat einen relativ grossen Druckverlust (z.B. verglichen mit einem Wirbelbett), was bei der Planung entsprechend berücksichtigt werden muss (Hebewerk). Im Weiteren ist zu beachten, dass mit dem Rückspülwasser bis 5% mehr in der Biologie zu reinigendes Abwasser anfallen kann.

**Fazit:** Momentan geht man davon aus, dass mit einem konventionell dimensionierten Einschicht-Sandfilter die Hauptanforderungen an die Nachbehandlung problemlos eingehalten werden können.

### A1.1 Beschreibung des Verfahrens

Bei dieser Verfahrenskombination wird dem Ozonungsreaktor ein diskontinuierlich oder kontinuierlich gespülter Sandfilter nachgeschaltet (siehe Abbildung 5). Obwohl anstelle von Sand auch andere Filtermaterialien alleine oder in Kombinationen zum Einsatz kommen können und einen Raumfilter bilden, wird nachfolgend grundsätzlich der Begriff Sandfilter verwendet. Sandfilter werden bereits heute auf vielen ARA zur weitergehenden Feststoffelimination und/oder zur Flockungsfiltration – und somit für die Phosphor-Elimination – eingesetzt. Dafür werden teilweise Zwei-Schicht-Filter verwendet, wobei für die biologische Nachbehandlung ein konventionell dimensionierter Einschicht-Filter nach heutigem Wissensstand ausreichend ist. Dementsprechend können neben der klassischen Filtration (Gravitationsandfilter) auch kontinuierliche Raumfiltersysteme (z.B. "Dynasand-Filter") zum Einsatz kommen.



**Abbildung 5.** Ein allgemeines Verfahrensschema eines Sandfilters als biologische Nachbehandlungsstufe (Quelle: Abegglen und Siegrist, 2012).

Eine wichtige Dimensionierungsgrösse beim Sandfilter ist die maximale Filtergeschwindigkeit (bei  $Q_{\max}$ ), die üblicherweise bei 15 m/h liegt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Filterzelle zur Spülung jeweils ausser Betrieb genommen wird, und das anfallende Rückspülwasser den Filter zusätzlich belastet. Dies ergibt je nach Anzahl Filterzellen und Rückbelastung eine maximale Filtergeschwindigkeit von etwa 12.5 m/h bezogen auf die gesamte Filterfläche. Die Kontaktzeit liegt bei  $Q_{\max}$  bei rund 5 Minuten (rund 15 Minuten bei  $Q_{TW}$ ). Weitere Informationen zur Dimensionierung und Auslegung von Filteranlagen sind in der Fachliteratur verfügbar.

Nachfolgend wird die notwendige Infrastruktur für einen Sandfilter aufgelistet und kurz erläutert:

- **Filterzellen:** Die Filterzelle besteht aus dem Filtermaterial (in der Regel Anthrazit oder ein anderes Material mit einer Oberflächenporosität; bei einem Zweischicht-Filter wird normalerweise Quarzsand in Kombination mit Anthrazit verwendet), dem Düsenboden (Filterdüsen werden benötigt für den Rückhalt des Filtermaterials und die Rückspülung), der Zulaufverteilung sowie der Ablaufverrohrung.

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

- **Spülwasserbecken:** Der Sandfilter muss periodisch rückgespült werden (d.h. zirka alle 1 bis 2 Tage). Die Rückspülung erfolgt mit Luft und Wasser. Für die Wasserrückspülung wird Filtratwasser verwendet.
- **Rückspülwasser- oder Schlammwasserbecken:** Mit der Rückspülung werden die zurückgehaltenen Feststoffe aus dem Filtermedium ausgelesen. Das Rückspülwasser wird im Schlammwasserbecken aufgefangen, und meist in den Zulauf der ARA oder vor die Vorklärung zurückgepumpt. Der Schlammwasseranfall beträgt bis zu 5% der behandelten Wassermenge.
- **Luftgebläse zur Filterspülung mit Luft:** Zur Filterrückspülung wird neben Wasser auch Luft verwendet. Neben dem Gebläse ist auch die entsprechende Verrohrung zu berücksichtigen.
- **Diverse Pumpen:** Es sind Pumpen notwendig für die Filterspülung, die Förderung des Rückspül- oder Schlammwassers sowie allenfalls zur Beschickung des Filters respektive zur Überwindung des hydraulischen Druckverlusts. Auch hier ist die entsprechende Verrohrung zu berücksichtigen.

### A1.2 Bisherige Anwendungen

Der Sandfilter als Nachbehandlungsstufe einer Ozonung wurde/wird bisher an folgenden Standorten grosstechnisch eingesetzt:

- ARA Neugut, Dübendorf (CH), in Betrieb: grosstechnische, fixe Behandlungsstufe
- ARA Oberwynental, Reinach (CH), in Betrieb: grosstechnische, fixe Behandlungsstufe
- St. Pourçain (F), in Betrieb: grosstechnische, fixe Behandlungsstufe
- ARA Basserdorf (CH), im Bau: grosstechnische, fixe Behandlungsstufe
- Klärwerk Werdhölzli, Zürich, im Bau: grosstechnische, fixe Behandlungsstufe
- Köln Rodenkirchen (D): grosstechnische, fixe Behandlungsstufe
- ...

An den folgenden Standorten wurde die Kombination Ozonung und Sandfilter im Pilotmassstab oder grosstechnisch untersucht:

- ARA Wüeri, Regensdorf (CH): grosstechnische Pilotanlage
- STEP de Vidy, Lausanne (CH): im Pilotmassstab
- ...

### A1.3 Hauptanforderungen an einen Sandfilter

#### Elimination von in der Ozonung gebildeten labilen, toxischen Reaktionsprodukten

Es wurde in verschiedenen Untersuchungen aufgezeigt, dass ein Sandfilter, als biologisch aktive Nachbehandlungsstufe, die Toxizitäten des Abwassers nach der Ozonung - verursacht durch labile Reaktionsprodukte - wieder signifikant reduzieren kann. So konnte beispielsweise in den Pilotversuchen in Regensdorf (Abegglen et al., 2009) unmittelbar nach der Ozonung sowohl beim Fish Early Life Stage Toxicity-Test (FELST) als auch beim Fortpflanzungs-Test mit dem Glanzwurm negative Effekte gemessen werden (d.h. das Abwasser im Ablauf der Ozonung war ökotoxikologisch problematischer als im Zulauf zur Ozonung). Im nachfolgenden Sandfilter wurden diese Effekte jedoch wieder auf das Niveau des Zulaufs zur Ozonung reduziert. Ähnliche Effekte sind auch in Stalter et al. (2010b) und Magdeburg et al. (2012) beschrieben.

In den Versuchen in Lausanne (Kienle et al., 2015; Margot et al., 2011) konnte keine signifikante Verbesserung durch den Sandfilter gemessen werden. In den Untersuchungen im Rahmen des ReTREAT-Projekts auf der ARA Neugut (Böhler et al., 2017) wurde in umfangreichen

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

ökotoxikologischen Untersuchungen eine geringfügige ökotoxische Reduktion durch den Sandfilter identifiziert (die ökotoxikologischen Effekte unmittelbar nach der Ozonung waren aber auch nicht stark ausgeprägt; Kienle et al., 2017).

### **Nitrosamine**

In Regensdorf wurde das Verhalten von 8 Nitrosaminen in der Ozonung untersucht. Einzig NDMA (*N*-Nitrosodimethylamin) wurde in der Ozonung substantiell gebildet, im Sandfilter aber wieder zu 50% abgebaut (d.h. wieder auf das Niveau des Ablaufs der Nachklärung reduziert). Andere Nitrosamine wurden nicht gebildet (Abegglen et al., 2009). Analog zu diesen Resultaten wurde im ReTREAT-Projekt eine durchschnittliche NDMA-Elimination durch den Sandfilter von zirka 66% gemessen (Böhler et al., 2017).

Mit einem Sandfilter können die Hauptanforderungen an die Nachbehandlung somit problemlos erreicht werden.

### **A1.4 Zusätzliche Effekte eines Sandfilters**

Die Leistung der Ozonung wird in Kapitel 4 ausführlich beschrieben. Diese Resultate gelten auch für die Kombination mit dem Sandfilter. Nachfolgend wird auf zusätzliche Aspekte eines Sandfilters eingegangen.

#### **Elimination von organischen Spurenstoffen**

Durch den Sandfilter können einzelne Spurenstoffe zusätzlich entfernt werden (z.B. Benzotriazol). Grundsätzlich ist aber keine Breitbandwirkung zu erwarten, da hauptsächlich biologische Prozesse involviert sind. Auf der ARA Neugut wurde beispielsweise keine zusätzliche Elimination durch den Sandfilter gemessen (Böhler et al., 2017), während auf der ARA Bülach-Furt bei einem Sandfilter ohne vorgeschaltete Ozonung eine signifikante Elimination von Benzotriazol (50 bis 60%), Diclofenac (10 bis 20%) und Methylbenzotriazol (30%) gemessen wurde (Zwischenbericht GAK-Versuch, ARA Bülach-Furt, 2017). In anderen Projekten wurde für Atenolol, Diclofenac, Naproxen, Trimethoprim (Abegglen et al., 2009), sowie für Atenolol, Benzotriazol, Codein, Mefenaminsäure (Böhler et al., 2011) eine Elimination von 10 bis 60% gemessen. Ein Einfluss der Nitrifikation kann nicht ausgeschlossen werden (Rattier et al., 2014). Eine signifikante zusätzliche Elimination der MV durch den Sandfilter wird daher als gering eingestuft.

#### **Elimination von organischem Kohlenstoff (DOC, CSB, BSB)**

Die organischen Kohlenstoffverbindungen im Ablauf der Nachklärung (bei einer nitrifizierenden Biologie) sind grösstenteils nicht mehr biologisch abbaubar, da die biologisch verfügbaren Anteile bereits abgebaut wurden. Durch den Sandfilter findet aber trotzdem eine gewisse Elimination des DOC statt: So wurde beispielsweise auf der ARA Bülach-Furt eine mittlere Elimination von 7% gemessen, bei einer durchschnittlichen Kontaktzeit von 12 Minuten (die DOC-Konzentration im Filterzulauf lag im Bereich von 4 bis 7 mg/L; Zwischenbericht GAK-Versuch, ARA Bülach-Furt, 2017). In Kombination mit einer Ozonung kann diese Elimination – in Abhängigkeit der spezifischen Ozondosis – auch abweichen. So betrug beispielsweise auf der ARA Neugut die DOC-Elimination durch den Sandfilter 5 bis 20% (Böhler et al., 2017). Es wird vermutet, dass ein Teil dieses DOC als AOC (siehe unten) biologisch abgebaut, und der andere Teil (kollodialer DOC) durch Anlagerung an den Biofilm auf dem Filtermaterial zurückgehalten wird (Böhler et al., 2017). Beim CSB konnte kein Effekt nachgewiesen werden, dies wohl aufgrund der grösseren Messunsicherheiten.

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

### **Elimination von assimilierbarem organischem Kohlenstoff (AOC)**

In der Ozonung werden organische Stoffe oxidiert und damit zum Teil biologisch besser verfügbar gemacht. Dieser Anteil des DOC wird assimilierbarer organischer Kohlenstoff (AOC) genannt. Die AOC-Bildung ist von der DOC-Zulaufkonzentration und der Ozondosis abhängig. In den Untersuchungen auf der ARA Wüeri in Regensdorf (Abegglen et al., 2009) hat sich gezeigt, dass durch die Ozonung AOC gebildet wird, der auf dem nachfolgenden Sandfilter aber wieder eliminiert wurde (um 10 bis 50%). Die Eliminationsleistung scheint dabei jahreszeitlich bedingt zu sein: in den warmen Sommermonaten war die Eliminationsleistung grösser als in den kalten Wintermonaten. Im ReTREAT-Projekt (Böhler et al., 2017) wurde der AOC durch den Sandfilter um rund 40% reduziert. Weitere Einflussgrössen, welche die AOC-Elimination durch den Sandfilter beeinflussen können, sind die gelöste Sauerstoffkonzentration, und die Kontaktzeit.

### **Nährstoffe (Stickstoff und Phosphor)**

Durch die aeroben Bedingungen im Sandfilter – der Sauerstoffgehalt im Wasser ist sehr hoch nach der Ozonung, da mit dem Ozoneintrag zusätzlich auch viel Sauerstoff ins Abwasser eingetragen wird - kann Ammonium (sofern vorhanden) weiter nitrifiziert werden. Die Eliminationsleistung ist aber von verschiedenen Faktoren abhängig, wie der Ausbildung eines nitrifizierenden Biofilms im Sandfilter, den anderen abbaubaren Stoffen, sowie den Schwankungen der Ammoniumkonzentration. Nitrit wird sehr effizient durch Ozon oxidiert, und wird daher bereits in der vorangehenden Ozonung eliminiert.

Partikulär gebundener Phosphor wird ebenfalls im Rahmen der GUS Reduktion (siehe nächster Abschnitt) zurückgehalten, gelöstes Phosphat hingegen nicht. Dieses kann prinzipiell über eine Fällmittelzugabe nach der Ozonung ausgefällt und in der Filtration über die GUS-Reduktion zurückgehalten werden (Flockungsfiltration).

### **Gesamte ungelöste Stoffe (GUS) und Trübung**

Die Elimination der gesamten ungelösten Stoffe ist analog zu herkömmlichen Sandfiltern, und nicht davon abhängig, ob eine Ozonung vorgeschaltet ist oder nicht. Entsprechend werden auch an Partikel adsorbierte Stoffe – durch die Filterwirkung - noch weiter zurückgehalten (z.B. Quecksilber oder andere Schwermetalle, aber auch adsorbierte organische Stoffe). Die GUS-Ablaufwerte hängen in erster Linie von der Zulaufqualität ab (typische Feststoffkonzentrationen im Zulauf von Sandfiltern liegen im Bereich von 5 bis 15 mg/L). In der Regel können GUS-Konzentrationen im Ablauf von < 5 mg/L problemlos eingehalten werden. Auf der ARA Neugut wurde im Rahmen des ReTREAT-Projekts eine GUS-Elimination von zirka 75% gemessen (die Feststoffe im Filterzulauf lagen jedoch bereits zwischen 1 bis 2 mg/L, was sehr tief ist; Böhler et al., 2017). Durch den Rückhalt von Partikeln kommt es auch zu einer weiteren Reduktion von CSB und TOC, sowie allen weiteren Parametern, die partikuläre Stoffe beinhalten.

### **Desinfektion**

Im Sandfilter steigt die Gesamtkeimzahl tendenziell wieder an. Das ist nicht überraschend, und auf das Ablösen von Teilen des Biofilms von den Sandkörnern zurückzuführen. Anders sieht es für Leitorganismen der pathogenen Keime aus: Sowohl *E.coli* als auch *Enterokokken* wurden durch den Sandfilter entweder noch weiter reduziert, oder zumindest nicht erhöht. Das bedeutet, dass in den bisherigen Studien keine signifikante Wiederverkeimung mit Pathogene im Sandfilter aufgetreten ist.

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

### Entfärbung

Sandfilter können Farbstoffe nicht zusätzlich entfernen. Die Entfärbung geschieht durch die Behandlung mit Ozon.

### Geruchsentfernung

Sandfilter tragen nicht zusätzlich zur Geruchsentfernung bei.

## A1.5 Weitere Kriterien

### Investitions- und Betriebskosten

Die spezifischen Kosten für einen Sandfilter sind abhängig von verschiedenen Faktoren, wie der Anlagengrösse, dem Baugrund, dem Grundwasserspiegel, oder den hydraulischen Randbedingungen auf der ARA (Pumpwerk im Zulauf notwendig oder nicht). In der Kostenstudie des Projekts „Strategie Micropoll“ von 2008 (Hunziker-Betatech, 2008) wurden die Kosten für einen Sandfilter auf 5 bis 30 Fr./EW/Jahr, beziehungsweise auf 0.05 bis 0.3 Fr./m<sup>3</sup> behandeltes Abwasser, abhängig von der Anlagengrösse geschätzt (siehe Tabelle 4).

**Tabelle 4.** Kosten Sandfilter (Quelle: Hunziker-Betatech, 2008).

KLÄRANLAGE	Untersee	Aadorf	Furt	Au	Luzern	Zürich
Ausbaugrösse (EW)	6'100	18'000	37'700	66'000	250'000	600'000
Abwassermenge (in 1000 m <sup>3</sup> /Jahr)	1'160	2'870	4'890	8'640	38'490	77'450
SANDFILTER	Untersee	Aadorf	Furt	Au	Luzern	Zürich
Investitionskosten (in Mio. Fr.)	1.7	3.8	5.8	5.6	11.8	37.8
Investition spezifisch (in Fr./EW)	284	214	154	86	47	63
Betriebskosten (in 1000 Fr./Jahr)	26	66	97	104	287	633
Betriebskosten (in Fr./EW/Jahr)	4.3	3.7	2.6	1.6	1.1	1.1
Jahreskosten (in 1000 Fr./Jahr)	182	430	621	627	1'331	3'732
spezifische Kosten (in Fr./m <sup>3</sup> )	0.16	0.15	0.13	0.07	0.03	0.05
Spezifische Kosten (in Fr./EW/Jahr)	30	24	17	9	5	6

Im Einzelfall sind aber – neben der Anlagengrösse – insbesondere auch die lokalen Gegebenheiten (Landreserven, Hydraulik, Baugrund, vorhandene Infrastruktur, etc.) von Bedeutung. Die Betriebskosten einer Filtration werden dominiert durch die Stromkosten für die Spülwasserpumpen und –gebläse und allfällige Hebewerke. Da sowohl die Investitions- wie auch die Betriebskosten stark abhängig sind von der lokalen Situation können hierzu noch keine genaueren Kostenangaben gemacht werden.

### Ressourcenverbrauch

Für den Betrieb eines Sandfilters ist Strom für die Rückspülaggregate (Gebläse und Pumpen) notwendig. Der Stromverbrauch beträgt dabei – abhängig von der Anlagengrösse, der Abwasser-Zulaufqualität, dem Filteraufbau und dem Spülregime - zwischen 0.005 bis 0.01 kWh/m<sup>3</sup>

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

behandeltes Abwasser für die Filterspülungen (Energie in ARA, 2008). Zusätzlich ist der Strombedarf für ein allfälliges Zwischenpumpwerk zu berücksichtigen: bei typischen Förderhöhen von 3 bis 4 m ergibt sich ein Stromverbrauch von etwa 0.015 bis 0.02 kWh/m<sup>3</sup> (Energie in ARA, 2008).

Der Flächenbedarf für die Filtration kann anhand der maximalen Filtergeschwindigkeit abgeschätzt werden. Bei einer maximalen Filtergeschwindigkeit von 12.5 m/h (über die ganze Filteranlage betrachtet, inklusive einer Filterzelle für die Spülung) beträgt der Flächenbedarf der Filtration etwa 0.08 m<sup>2</sup>/(m<sup>3</sup>/h). Die Wassermenge bezieht sich dabei auf den maximalen Durchsatz. Der Gesamtplatzbedarf einer Filtrationsanlage (unter Berücksichtigung der Rohrkeller und Hilfseinrichtungen) ist somit - je nach Anlagengrösse - um 50 bis 100% grösser als die Filterfläche.

### **Schnittstellen zur vorgeschalteten (biologischen) Behandlung**

Als relevante Schnittstelle ist die Rückführung des Filter-Spülwassers in den ARA-Zulauf oder vor die Vorklärung zu nennen. Der mittlere Anfall von Rückspülwasser liegt – je nach Zulaufqualität des Filters - im Bereich von 2 bis 5% des filtrierte Wassers. Für die hydraulische Dimensionierung der vorgeschalteten Stufen kann bei einer korrekt funktionierenden Nachklärung mit einer maximalen, momentanen Rückbelastung von 5% der maximalen, behandelten Wassermenge ausgegangen werden, d.h. dass sich die maximale Wassermenge über die Anlage um nicht mehr als 5% erhöht.

### **Einfluss auf die Schlammbehandlung**

Bei einem Neubau eines Sandfilters kann von einem tendenziell höheren Schlammanfall von etwa 1.5 g TS/EW/d (Bereich 0.75 bis 3.0 g TS/EW/d, abhängig von der jeweiligen ARA) ausgegangen werden, bedingt durch einen zusätzlichen Feststoffrückhalt im Sandfilter. Dieser Schlamm fällt bei Rückführung des Schlammwassers in den Sandfang oder Vorklärung zum grössten Teil im Primärschlamm an.

### **Sicherheitsaspekte**

Für die Nachbehandlungsstufe (Sandfilter) ist es von grosser Wichtigkeit, dass das zufließende Wasser kein Ozon mehr enthält. Eine detailliertere Ausführung ist in Kapitel 4 gegeben, sowie in den Faktenblättern der VSA-Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“. Ansonsten sind für eine Sandfiltration keine weiteren speziellen Sicherheitsvorkehrungen notwendig.

### **Implementierung in bestehende Anlagen**

Sofern genügend Platz zur Verfügung steht, kann eine Ozonung mit Sandfiltration problemlos in eine bestehende Anlage integriert werden, da diese Stufe ganz am Schluss der Anlage platziert wird. Aufgrund des Druckverlustes im Sandfilter, ist in der Regel ein Hebewerk vor der Ozonung notwendig, was zu Zusatzkosten führt.

Bestehende Sandfilter können ohne aufwendige Anpassungen als Nachbehandlung genutzt werden. Auf der ARA Neugut – welche über einen bestehenden Sandfilter verfügt - wurden durch die Ozonung keine Änderungen im Betriebs- und Rückspülverhalten des Sandfilters beobachtet (Böhler et al., 2017).

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

### **Erweiterbarkeit**

Die limitierende Grösse einer Sandfiltration ist die maximale Filtergeschwindigkeit (respektive allenfalls die Hebewerke). Je nach Ausgestaltung des Bauwerks können zusätzliche Filterzellen ergänzt werden. Dabei muss aber auch gewährleistet sein, dass die zusätzliche Wassermenge durch die Zu- und Ablaufkanäle hydraulisch verarbeitet werden kann. Die Peripherie des Sandfilters (Spül- und Schlammwasserbecken) sowie entsprechende Spülluftgebläse und Pumpen müssen möglicherweise auch angepasst werden.

## A2 Vollozonung und Nachbehandlung durch ein Wirbelbett

### **Das Wichtigste in Kürze**

Die Datengrundlage sowie die Betriebserfahrungen zur Beurteilung des Wirbelbetts als mögliches Nachbehandlungsverfahren ist noch gering, da dieses Verfahren erst in drei Projekten – namentlich im ReTREAT-Projekt auf der ARA Neugut, auf der ARA ProRhenon sowie im grosstechnischen Massstab auf der Kläranlage Duisburg Vierlinden (D) – zum Einsatz gekommen ist. Die bisherigen Versuche lassen vermuten, dass es grundsätzlich ein geeignetes Verfahren zur Nachbehandlung sein kann. Es liegen aber im Moment noch zu wenige Erfahrungen vor für eine abschliessende Beurteilung.

**Hauptanforderungen:** Das Wirbelbett hat eine Abbauleistung bezüglich der Nitrosamine (NDMA) gezeigt. Die Elimination von labilen, toxischen Reaktionsprodukten konnte in den bisherigen Untersuchungen noch nicht überprüft werden, da in den durchgeführten Projekten keine substantiellen ökotoxikologischen Effekte durch die Ozonung aufgetreten sind (Böhler et al., 2017, Kienle et al., 2017). Eine abschliessende Beurteilung ist daher aktuell nicht möglich.

**Zusätzliche Leistungen:** Beim Wirbelbett handelt es sich um ein „offenes“ System. Das bedeutet, dass keine substantielle Feststoffabtrennung stattfindet. Dafür ist der Druckverlust über das Wirbelbett auch deutlich geringer als bei einem Filtersystem (wie beispielsweise beim Sandfilter). Auf Grund der biologisch aktiven Biofilmträger ist eine nitrifizierende Wirkung vorhanden, organische Spurenstoffe werden nicht weiter abgebaut.

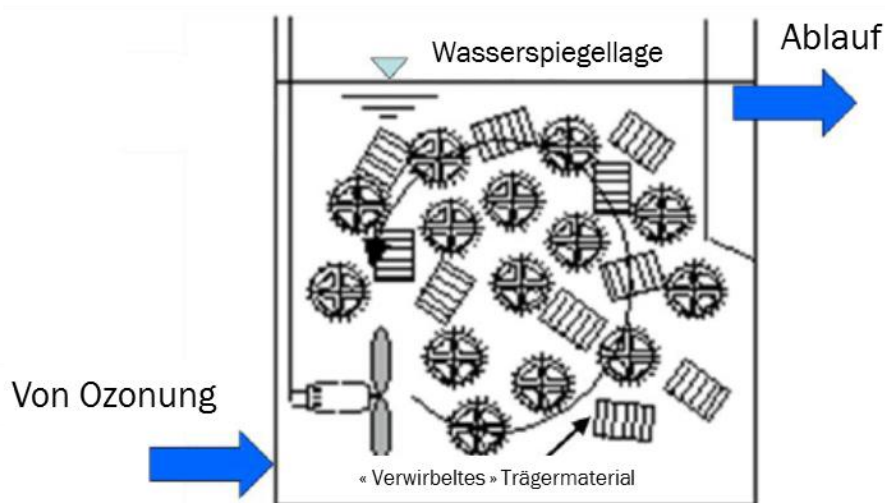
**Weitere Kriterien:** Das Wirbelbett ist relativ einfach im Betrieb. Die Schnittstellen zur bestehenden Anlage sind minimal. Eine zusätzliche Belüftung nach einer Ozonung ist nicht notwendig, jedoch muss der Reaktor aktiv durchmischt werden.

**Fazit:** Ein Wirbelbett scheint grundsätzlich als Nachbehandlung nach einer Ozonung geeignet zu sein. Allerdings kann aufgrund der aktuellen Datenlagen keine abschliessende Empfehlung abgegeben werden.

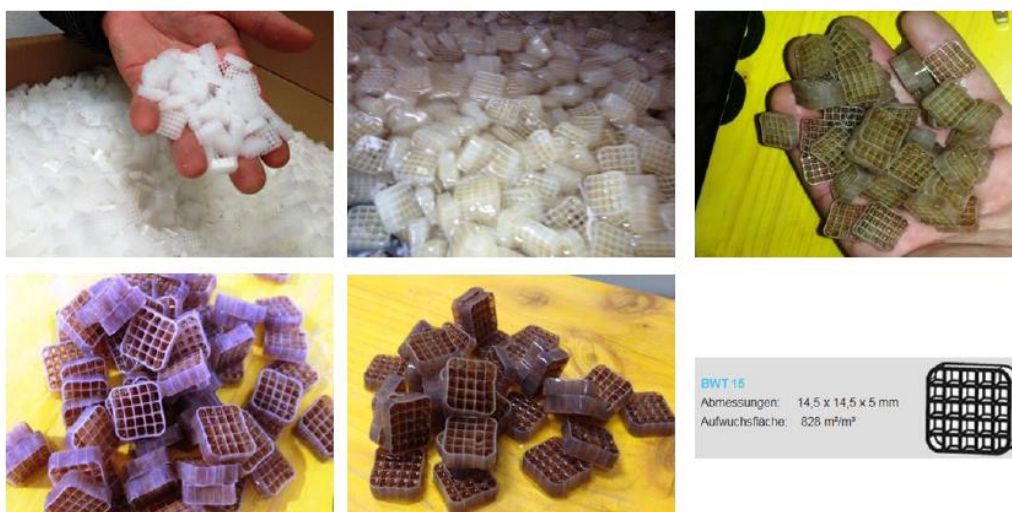
### A2.1 Beschreibung des Verfahrens

Beim Wirbelbett handelt es sich um ein in der biologischen Abwasserreinigung etabliertes Biofilmverfahren. Es besteht unter anderem aus einem Trägermaterial (geringere spezifische Dichte als Wasser und daher auf der Wasseroberfläche aufschwimmend), welches aktiv (mittels Rührwerken oder Belüftungsvorrichtungen) durchmischt werden muss. Auf dem Trägermaterial – mit einer hohen spezifischen Oberfläche – wachsen Mikroorganismen, welche für die biologische Reinigung verantwortlich sind (siehe Abbildung 6 und Abbildung 7).

Das Wirbelbett im ReTREAT-Projekt wurde mit einer Oberflächenbeschickung zwischen 7.3 und 13.3 l/m<sup>2</sup>/h (im Mittel bei 10.3 l/m<sup>2</sup>/h) und einer hydraulischen Kontaktzeit von 16 bis 30 Minuten (Mittel 21 Minuten) als einstufiges System betrieben (Böhler et al., 2017). In den Pilotversuchen auf der ARA ProRheno in Basel war die Oberflächenbeschickung deutlich kleiner als 10 l/m<sup>2</sup>/h (Fux et al., 2015).



**Abbildung 6.** Ein allgemeines Verfahrensschema eines Wirbelbetts als biologische Nachbehandlungsstufe (Quelle: Böhler et al., 2017).



**Abbildung 7.** Biofilmträger ohne Biofilmbewuchs und zunehmender Bewuchs im Verlauf der Betriebszeit. Das zweite Bild oberste Reihe zeigt bereits eine feine Biofilmbildung (hellbraune Einfärbung) nach knapp 6 Wochen Betrieb (Quelle: Böhler et al., 2017).

### A2.2 Bisherige Anwendungen

Das Wirbelbett als Nachbehandlungsstufe einer Ozonung wurde/wird bisher an folgenden Standorten grosstechnisch eingesetzt:

- ARA Duisburg, Vierlinden (D): Ozonung und Wirbelbett

An den folgenden Standorten wurde die Kombination Ozonung und Wirbelbett im Pilotmassstab untersucht:

- Projekt ReTREAT ARA Neugut (CH)
- Pilotversuch ARA ProRhen

### A2.3 Hauptanforderungen an ein Wirbelbett

#### Elimination von in der Ozonung gebildeten labilen, toxischen Reaktionsprodukten

Anhand der vorliegenden ökotoxikologischen Untersuchungen kann die Elimination von labilen, toxischen Reaktionsprodukten nicht abschliessend beurteilt werden, weil das Toxizitätsniveau des gereinigten Abwassers bereits nach der Ozonung jeweils sehr gering war (Kienle et al., 2017).

#### Nitrosamine

Untersuchungen im Rahmen des ReTREAT-Projekts haben ergeben, dass durch das Wirbelbett eine 40 bis 50%-ige NDMA-Elimination auftritt, was als Indiz für eine biologische Aktivität herangezogen werden kann (Böhler et al., 2017). Diese Eliminationsleistung lag in diesem Projekt zwar unter derjenigen eines Sandfilters (durchschnittlich bei 66%) jedoch nach wie vor in einem substantiellen Bereich. Die Daten haben zwischen den einzelnen Messkampagnen relativ stark gestreut.

Eine abschliessende Beurteilung der Effizienz der Elimination von labilen Reaktionsprodukten und deren ökotoxikologischen Effekten kann somit nicht vorgenommen werden.

### A2.4 Zusätzliche Effekte eines Wirbelbetts

Die Leistung der Ozonung wird in Kapitel 4 ausführlich beschrieben. Diese Resultate gelten auch für die Kombination mit dem Wirbelbett. Nachfolgend wird auf zusätzliche Aspekte eines Wirbelbetts eingegangen.

#### Elimination von organischen Spurenstoffen

In den bisherigen Projekten wurde keine substantielle Elimination von organischen Spurenstoffen im Wirbelbett gemessen.

#### Elimination von organischem Kohlenstoff (DOC, CSB, BSB)

Das Wirbelbett im ReTREAT-Projekt hat den DOC im Mittel von zirka 6% eliminiert, was deutlich geringer war als der Sandfilter (im Bereich von 5 bis 20%; Böhler et al., 2017). Ein stärkerer DOC-Abbau wurde in den Versuchen auf der ARA ProRhen gemessen (etwa 17%; Fux et al., 2015). Es kann vermutet werden, dass diese erhöhte Eliminationsleistung mit der geringen hydraulischen Belastung beziehungsweise der deutlich höheren Kontaktzeit zusammenhängen kann (Aufenthaltszeit bei den Untersuchungen auf der ARA ProRhen war bei zirka einem Tag). Zudem war die mittlere DOC-Konzentration im Zulauf zum Wirbelbett auf der ARA ProRhen mit 6.3 resp. 7.9 mgDOC/L etwas höher als auf der ARA Neugut (ca. 5 mgDOC/L), was die Abbauleistung beeinflusst haben könnte.

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

Ob mit einer kaskadierten Verfahrensführung (vgl. Escolà Casas et al., 2015) ein positiver Effekt auf den Abbau von organischen Stoffen erreicht werden kann, ist weiter zu untersuchen. Aus verfahrenstechnischer Sicht ist dies allerdings mit Vorbehalt zu genießen, denn im schwächer belasteten hinteren Kaskaden-Bereich ist die Wahrscheinlichkeit des Einwachsens von „höherwertigen“ Organismen (z.B. von Würmern, Schnecken und andere Weidegängern etc.) entsprechend erhöht.

### **Elimination von assimilierbarem organischem Kohlenstoff (AOC)**

In den Untersuchungen im Rahmen des ReTREAT-Projekts (Böhler et al., 2017) lag die Reduktion des AOC bei zirka 17%, und damit deutlich unter der AOC-Reduktion durch den Sandfilter. Die durch den AOC-Abbau zusätzlich produzierte Biomasse ist im Vergleich zu den Feststoffen zu vernachlässigen.

### **Nährstoffe (Stickstoff, Phosphor)**

Bei ausreichender Sauerstoffverfügbarkeit ist eine nitrifizierende Aktivität auf den Biofilmträgern zu erwarten. Aufgrund des geringen Feststoffrückhalts wird auch nur wenig partikulärer Phosphor zurückgehalten. Eine biologische Phosphatelimination findet auf den Biofilmträgern nicht statt. Eine gewisse Elimination des Phosphors kann auf das Biomassewachstum zurückgeführt werden.

### **Gesamte ungelöste Stoffe (GUS) und Trübung**

Beim Wirbelbett handelt es sich um ein „offenes“ System, das praktisch keine Feststoffe zurückhält: Im ReTREAT-Projekt lag der durchschnittliche Feststoffrückhalt bei rund 5% (Böhler et al., 2017). Durch eine zusätzliche nachgeschaltete Tuchfiltration konnte der Feststoffrückhalt substantiell erhöht werden. Auf diese Weise (Wirbelbett und Tuchfilter) konnte der Feststoffrückhalt auf zirka 50% erhöht werden. Es ist jedoch anzumerken, dass der verwendete Tuchfilter im ReTREAT-Projekt nicht optimal ausgelegt war, da er ursprünglich bei einer anderen hydraulischen Belastung eingesetzt wurde. Bei einer optimalen Auslegung kann von einem vergleichbaren Feststoffrückhalt wie bei einem Sandfilter ausgegangen werden (zirka 70%, Böhler et al, 2017).

### **Desinfektion**

Im Wirbelbett findet keine Desinfektion statt.

### **Entfärbung**

Im Wirbelbett findet keine Entfärbung statt.

### **Geruchsentfernung**

Das Wirbelbett leistet keinen signifikanten Beitrag zur Geruchsentfernung.

## **A2.5 Weitere Kriterien**

### **Investitions- und Betriebskosten**

Zum Wirbelbett als Nachbehandlungsverfahren liegen aktuell keine Investitions- und Betriebskosten vor. Die Kosten sind insbesondere stark abhängig von den lokalen Gegebenheiten (Landreserven, Hydraulik, Baugrund, vorhandene Infrastruktur, etc.). Die Betriebskosten eines Wirbelbetts werden dominiert durch die Stromkosten für die Umwälzung der Träger.

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

### **Ressourcenverbrauch**

Für den Betrieb eines Wirbelbettes ist Strom für die Umwälzung der Träger notwendig. Die Umwälzung kann mittels Luft und/oder Rührwerken erfolgen. Der Stromverbrauch beträgt dabei etwa 0.02 bis 0.03 kWh/m<sup>3</sup> behandeltes Abwasser, bezogen auf eine Kontaktzeit<sup>1</sup> von 60 Minuten (bei  $Q_{\text{Mittel}}$ ) sowie von 20 Minuten (bei  $Q_{\text{max}}$ ). Der spezifische Energieeintrag zur Umwälzung des Reaktors liegt bei 20 bis 30 W/m<sup>3</sup>. Zusätzlicher Strombedarf ist für ein allfälliges Zwischenpumpwerk zu berücksichtigen. Obwohl der Wirbelbettreaktor einen vernachlässigbaren Druckverlust aufweist, ergibt sich aus hydraulischen Verteilbauwerken und Bypass-Möglichkeiten meist ein Druckverlust von 0.5 bis 1 m. Dies entspricht einem Stromverbrauch von etwa 0.0025 bis 0.005 kWh/m<sup>3</sup> Abwasser (Energie in ARA, 2008).

Der Flächenbedarf kann anhand der Kontaktzeit im Wirbelbett abgeschätzt werden. Bei einer minimalen Kontaktzeit von 20 Minuten bei  $Q_{\text{max}}$  und einer Reaktortiefe von 5 m beträgt der Flächenbedarf der Wirbelbettreaktoren etwa 0.07 m<sup>2</sup>/(m<sup>3</sup>/h). Die Wassermenge bezieht sich dabei auf den maximalen Durchsatz. Der Gesamtplatzbedarf - unter Berücksichtigung der Zu- und Ablaufkanäle und allfälliger Hilfseinrichtungen - liegt aber je nach Anlagengrösse um 10 bis 50% höher.

### **Schnittstellen zur vorgeschalteten (biologischen) Behandlung**

Eine Nachbehandlung mittels Wirbelbett hat keine direkten Schnittstellen zu den vorgeschalteten Stufen.

### **Einfluss auf die Schlammbehandlung**

Die Ozonung in Kombination mit einem Wirbelbett hat keinen Einfluss auf die Schlammbehandlung.

### **Sicherheitsaspekte**

Für die Nachbehandlungsstufe (Wirbelbett) ist es von grosser Wichtigkeit, dass das zufließende Wasser kein Ozon mehr enthält. Eine detailliertere Ausführung ist in Kapitel 4 gegeben, sowie in den entsprechenden Faktenblättern der VSA-Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“ (siehe VSA-Plattform, 2016b-d).

Bei der Planung des Wirbelbetts sollte unbedingt auf die hydraulische Gestaltung der Reaktoren und des Trägerrückhaltes geachtet werden (sowohl im Ablauf, wie auch im Zulauf, damit keine Träger in den Ozonreaktor gelangen können). Ebenso ist zu berücksichtigen, dass Trägerrückhaltevorrichtungen verstopfen können. Eine Niveaumessung erlaubt das Erkennen von Verstopfungen und somit Abstellen des Zulaufs, um den Trägerverlust in den Vorfluter zu vermeiden.

### **Implementierung in bestehende Anlagen**

Sofern genügend Platz zur Verfügung steht, kann eine Ozonung mit einem Wirbelbett in eine bestehende Anlage integriert werden. Der Druckverlust eines Wirbelbetts ist deutlich geringer als bei einem Sandfilter (zirka 0.5 bis 1.0 m Druckverlust über die ganze Stufe je nach Ausführung mit einer oder mehreren Strassen und entsprechender Abwasserverteilung).

---

<sup>1</sup> Eine minimale Kontaktzeit von 20 Minuten und ein Füllgrad von 300 m<sup>2</sup> Biofilm pro m<sup>3</sup> Reaktor ergibt eine "Flächenbelastung" des Biofilms von 10 l/m<sup>2</sup>/h (Quelle: Böhler et al., 2017).

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

### **Erweiterbarkeit**

Die limitierenden Größen eines Wirbelbettsystems sind (i) die Kontaktzeit, (ii) die hydraulische Belastung des Biofilmes, (iii) die hydraulische Dimensionierung des Trägerrückhaltes, und allenfalls (iv) auch das Hebewerk. Eine zukünftige Erweiterung sollte mittels zusätzlicher Reaktoren erfolgen, da die hydraulische Aufenthaltszeit oftmals der dominierende limitierende Faktor ist.

### **Diverses**

Auf schwach belasteten Wirbelbettsystemen mit erhöhtem gelöstem Sauerstoffgehalt, wie dies nach einer Ozonung der Fall ist, wachsen auch „höherwertige“ Organismen, welche die biologische Aktivität des Biofilms insgesamt reduzieren können. Dies soll verhindert werden, und muss daher bei der Wahl des Trägermaterials berücksichtigt werden: die dafür geeigneten Träger weisen kleine innere Volumina auf, zwecks Unterdrückung des Wachstums dieser „höheren“ Organismen.

Bei einer Ausführung der Wirbelbettreaktoren in Beton ist dieser zu beschichten, da die Wirbelbettträger sonst zu Betonerosion führen.

### **Offene Fragen**

Zur Zeit ist nicht klar, ob eine kaskadenartige Konzeption (2 oder 3 Reaktoren in Serie) anzustreben ist. Für eine kaskadenförmige Betriebsweise spricht, dass sich positive Effekte auf die Biomassevariabilität (Selektion) und dadurch auf die Biomasseaktivität ergeben können (siehe weiter oben; Escolà Casas et al., 2015). Allerdings ist zu bedenken, dass in den schwächer belasteten hinteren Kaskadenbereichen das Risiko des Einwachsens von „höherwertigen“ Organismen entsprechend erhöht ist. Im Weiteren ist die kaskadenartige Konzeption teurer, da die Trägerrückhaltesysteme mehrfach ausgeführt werden müssen (1 System pro Reaktor).

Die ideale Flächenbelastung für ein Wirbelbett als Nachbehandlung ist noch nicht klar.

## A3 Vollozonung und Nachbehandlung durch ein Festbett

### **Das Wichtigste in Kürze**

Die Datengrundlage sowie die Betriebserfahrungen zur Beurteilung des Festbetts mit fixen Einbauten als mögliches Nachbehandlungsverfahren sind noch sehr gering, da dieses Verfahren erst in einem Projekt in der Schweiz (im ReTREAT-Projekt; Böhler et al., 2017) zum Einsatz gekommen ist. Dort hat sich gezeigt, dass ein starker Schneckenbefall die biologische Aktivität sehr stark eingeschränkt hatte. Eine Unterdrückung des Schneckenbefalls ist zwar möglich, führt aber zu einem komplizierteren Betrieb und macht dieses Verfahren daher eher ungeeignet.

**Hauptanforderungen:** Das Festbett hat eine Abbauleistung bezüglich der Nitrosamine (NDMA) gezeigt. Verglichen mit anderen Nachbehandlungsverfahren war sie aber eher gering. Die Elimination von labilen, toxischen Reaktionsprodukten konnte in den bisherigen Untersuchungen noch nicht überprüft werden, da keine substantiellen negativen ökotoxikologischen Effekte durch die Ozonung aufgetreten sind (Böhler et al., 2017, Kienle et al., 2017). Eine abschliessende Beurteilung ist daher aktuell nicht möglich.

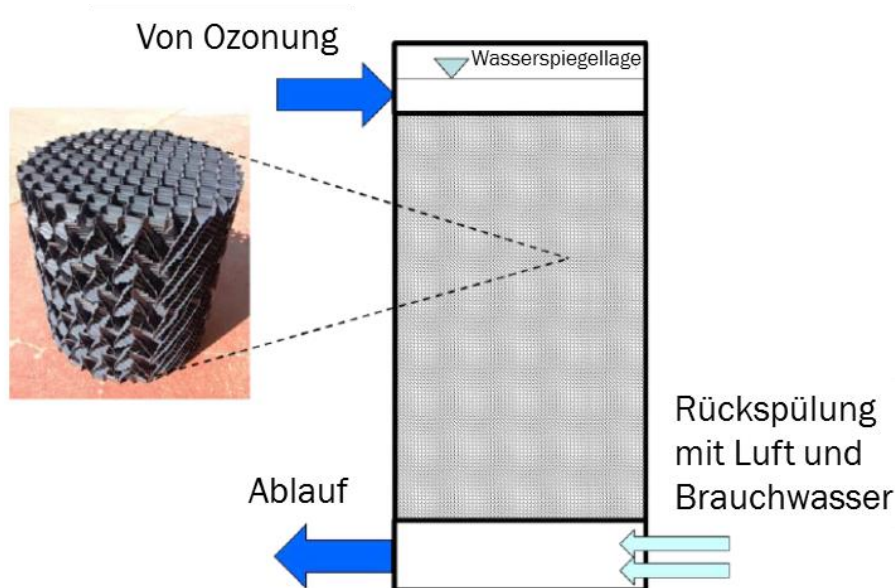
**Zusätzliche Leistungen:** Beim Festbett mit fixen Einbauten handelt es sich um ein „offenes“ System. Das bedeutet, dass keine substantielle Feststoffabtrennung stattfindet. Dafür ist der Druckverlust über das Festbett auch deutlich geringer als bei einem Filtersystem (wie beispielsweise beim Sandfilter). Die biologische Aktivität war – bedingt durch Schneckenbefall – gering.

**Weitere Kriterien:** Das Festbett ist relativ einfach im Betrieb. Die Schnittstellen zur bestehenden Anlage sind minimal (Rückspülwasser).

**Fazit:** Ein Festbett mit fixen Einbauten als Nachbehandlungsverfahren nach einer Ozonung ist aufgrund der aktuell vorliegenden Erfahrungen nicht geeignet. Es kann aber anhand der aktuellen Datenlagen keine abschliessende Empfehlung abgegeben werden.

### A3.1 Beschreibung des Verfahrens

Beim Festbett handelt es sich um ein Biofilm-Verfahren, wo die Mikroorganismen auf strukturierten Kunststoff-Einbauten festsitzen (Abbildung 8). Die Aufwuchsträger sind im Reaktor fest fixiert und werden vom Abwasser umströmt. Um Verstopfungen des Systems zu verhindern (Biofilmwachstum), wird dieses bei Bedarf in Intervallen rückgespült. Beim Einsatz als Nachbehandlung ist keine zusätzliche Belüftung notwendig, da das Abwasser in der Ozonung bereits ausreichend mit Sauerstoff angereichert worden ist. Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass das Festbett mit Schnecken befallen werden kann, was sich negativ auf die Leistung auswirkt (Wegfressen des Biofilms; Abbildung 9).



**Abbildung 8.** Ein allgemeines Verfahrensschema eines Festbetts als biologisch aktive Nachbehandlungsstufe (Quelle: Böhler et al., 2017).



**Abbildung 9.** Befall des Festbettes mit Schnecken: Ein Abstellen des Zulaufes über mehrere Tage führt dazu, dass sich die Schnecken aufgrund des Sauerstoffmangels an der Oberfläche ansammeln. Auf diese Weise können sie gut entnommen werden, was jedoch nur eine vorübergehende Reduktion des Schneckenbefalls gebracht hat. Am Ende der Versuchsdauer war auf den Wabenpackungselementen kein Biofilm sichtbar, jedoch waren massenhaft Schneckenhäuser vorhanden (Quelle: Böhler et al., 2017).

Mit der Bezeichnung Festbett sind in diesem Dokument Biofilm-Verfahren mit fix installierten Einbauten gemeint (keine Biofilter mit körnigen Einbauten). In diesem Kapitel werden hauptsächlich die Resultate des ReTREAT-Projekts (Böhler et al., 2017) vorgestellt, da aktuell

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

keine weiteren Erfahrungen zur Dimensionierung oder anderen Festbetttypen als Nachbehandlung vorliegen. In diesem Projekt wurde eine Wabenpackung mit einer spezifischer Oberfläche von 240 m<sup>2</sup> pro m<sup>3</sup> Packungsvolumen verwendet. Die hydraulische Aufenthaltszeit lag zwischen 20 und 35 Minuten (im Mittel bei zirka 25 Minuten; Böhler et al.,2017). Andere Auslegungen, Konfigurationen oder optimierte Prozessführungen können zu abweichenden Resultaten führen.

### **A3.2 Bisherige Anwendungen**

Das Festbett als Nachbehandlungsstufe nach einer Ozonung wurde/wird bisher an folgenden Standorten grosstechnisch eingesetzt:

- Keine grosstechnische Umsetzung bekannt

An den folgenden Standorten wurde die Kombination Ozonung und Festbett mit fixen Einbauten im Pilotmassstab untersucht:

- Projekt ReTREAT ARA Neugut (CH)
- Pilotuntersuchungen in den USA (McNaught und Wert, 2015; Wert et al., 2014)

### **A3.3 Hauptanforderungen an ein Festbett**

#### **Elimination von in der Ozonung gebildeten labilen, toxischen Reaktionsprodukten**

Anhand der vorliegenden ökotoxikologischen Untersuchungen kann die Elimination von labilen, toxischen Reaktionsprodukten nicht abschliessend beurteilt werden, weil das Toxizitätsniveau des gereinigten Abwassers bereits nach der Ozonung sehr gering war (Kienle et al., 2017).

#### **Nitrosamine**

Untersuchungen im Rahmen des ReTREAT-Projekts haben ergeben, dass durch das Festbett eine 40%-ige NDMA-Elimination auftritt (Böhler et al.,2017). Diese Eliminationsleistung war im Vergleich zu den anderen untersuchten Nachbehandlungsverfahren (Sandfilter, GAK-Filter, Wirbelbett) am Geringsten, was mit der geringen biologischen Aktivität erklärt werden kann (Abgrasen des Biofilms durch Schnecken; siehe Abbildung 9; Böhler et al.,2017). Die Daten haben zwischen den einzelnen Messkampagnen relativ stark gestreut.

Eine abschliessende Beurteilung der Effizienz der Elimination von labilen Reaktionsprodukten und deren ökotoxikologischen Effekten kann somit nicht vorgenommen werden.

### **A3.4 Zusätzliche Effekte eines Festbetts**

Die Leistung der Ozonung wird in Kapitel 4 ausführlich beschrieben. Diese Resultate gelten auch für die Kombination mit dem Festbett. Nachfolgend wird auf zusätzlichen Leistungen eines Festbetts eingegangen.

#### **Elimination von organischen Spurenstoffen**

Der Abbau von organischen Spurenstoffen im Festbett wurde in den bisherigen Projekten nicht beobachtet.

#### **Elimination von organischem Kohlenstoff (DOC, CSB, BSB)**

Die DOC-Elimination durch das Festbett ist als gering einzustufen: Im ReTREAT-Projekt lag diese bei zirka 5%, und war stark durch den Schneckenbefall beeinflusst. Kann das

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

Schneckenwachstum reduziert werden, ist eine effizientere Elimination des organischen Kohlenstoffes zu erwarten.

### **Elimination von assimilierbarem organischem Kohlenstoff (AOC)**

Vorhandene Daten (Böhler et al., 2017) zeigen, dass die AOC-Elimination durch das Festbett mit zirka 13% im Vergleich zu einem Sandfilter, einem GAK-Filter sowie einem Wirbelbett tief ist. Dies ist auf eine geringe Biomassedichte – bedingt durch den oben beschriebenen Schneckenbefall – zurückzuführen, was in einer anderen Untersuchung (McNaught und Wert, 2015) bestätigt wurde: die AOC-Elimination lag bei rund 60% und wurde durch einen Schneckenbefall signifikant verschlechtert.

### **Gesamte ungelöste Stoffe (GUS) und Trübung**

Das Festbett ist ein „offenes“ System, mit geringem Feststoffrückhalt. Im ReTREAT-Projekt war der Feststoffrückhalt mit 15% relativ gering (Böhler et al., 2017).

### **Nährstoffelimination (Stickstoff, Phosphor)**

Im Falle eines vorhandenen Biofilms ist eine gewisse Nitrifikationsleistung zu erwarten. Aufgrund des geringen Feststoffrückhalts wird auch nur wenig partikulärer Phosphor und andere an dem Belebtschlamm oder den Feststoffen sorbierten Substanzen zurückgehalten. Phosphat wird nicht biologisch abgebaut. Eine gewisse Elimination des Phosphors kann auf das Biomassewachstum zurückgeführt werden.

### **Desinfektion**

Im Festbett findet keine Desinfektion statt.

### **Entfärbung**

Im Festbett findet keine Entfärbung statt.

### **Geruchsentfernung**

Das Festbett leistet keinen signifikanten Beitrag zur Geruchsentfernung.

## **A3.5 Weitere Kriterien**

### **Investitions- und Betriebskosten**

Zu diesem Verfahren liegen aktuell keine Investitions- und Betriebskosten vor, da das Verfahren noch nicht grosstechnisch realisiert und betrieben wurde. Die Kosten sind insbesondere stark abhängig von den lokalen Gegebenheiten (Landreserven, Hydraulik, Baugrund, vorhandene Infrastruktur, etc.), liegen aber in einer ähnlichen Grössenordnung wie beim Wirbelbett. Die Betriebskosten eines Festbetts werden dominiert durch die Stromkosten für die Gebläse und Pumpen für allfällige Rückspülungen, sowie durch allfällige Hebewerke.

### **Ressourcenverbrauch**

Für den Betrieb eines Festbetts wird Strom für die Gebläse und Pumpen für allfällige Rückspülungen der Festbettreaktoren/-zellen benötigt. Dieser Stromverbrauch ist aber vernachlässigbar (es kann davon ausgegangen werden, dass im Normalbetrieb keine Rückspülungen vorgenommen werden müssen). Zusätzlich ist der Strombedarf für ein allfälliges Zwischenpumpwerk zu berücksichtigen (die Festbettzelle hat zwar einen vernachlässigbaren

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

Druckverlust, doch ergibt sich aus hydraulischen Verteilbauwerken und Bypass-Möglichkeiten meist ein Druckverlust von 0.5 bis 1.0 m), was einem Stromverbrauch von etwa 0.0025 bis 0.005 kWh/m<sup>3</sup> Abwasser entspricht.

Der Flächenbedarf für die Festbetтанlage kann anhand der maximalen "Filtergeschwindigkeit" abgeschätzt werden. Bei einer maximalen Filtergeschwindigkeit von etwa 15 m/h und einer minimalen Kontaktzeit von 20 bis 25 Minuten, beträgt der Flächenbedarf der Festbettzellen etwa 0.07 m<sup>2</sup>/(m<sup>3</sup>/h). Die Wassermenge bezieht sich dabei auf den maximalen Durchsatz ( $Q_{max}$ ). Der Gesamtplatzbedarf - unter Berücksichtigung der Rohrkeller und Hilfseinrichtungen - liegt aber je nach Anlagengrösse um 50 bis 100% höher.

### **Schnittstellen zur vorgeschalteten Behandlung**

Eine Nachbehandlung mittels Festbett hat keine direkten Schnittstellen zu den vorgeschalteten Stufen mit Ausnahme einer allfälligen Rückführung von Rückspülwasser. Der Bedarf an Rückspülungen wird aber als sehr gering eingeschätzt, und die Rückbelastung mit Rückspülwasser daher lediglich bei zirka 1 bis 2% des behandelten Wassers liegen. Im ReTREAT-Projekt wurde das Festbett nur sehr sporadisch rückgespült, und ein Druckanstieg wurde erst gar nicht beobachtet (Böhler et al., 2017). Für die hydraulische Dimensionierung der vorgeschalteten Stufen wird nach aktuellem Stand des Wissens von einer maximalen, momentanen Rückbelastung von 2% der maximalen, behandelten Wassermenge ausgegangen. Dies bedeutet, dass sich die maximale Wassermenge über die Anlage um insgesamt 2% erhöht.

### **Einfluss auf die Schlammbehandlung**

Die Ozonung in Kombination mit einem Festbett hat keinen Einfluss auf die Schlammbehandlung.

### **Sicherheit**

Für die Nachbehandlungsstufe (Festbett) ist es von grosser Wichtigkeit, dass das zufließende Wasser kein Ozon mehr enthält. Eine detailliertere Ausführung ist in Kapitel 4 gegeben, sowie in den Faktenblättern der VSA-Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“. Ansonsten sind für ein Festbett keine weiteren speziellen Sicherheitsvorkehrungen notwendig.

### **Implementierung in bestehende Anlagen**

Sofern genügend Platz zur Verfügung steht, kann eine Ozonung mit einem Festbett in eine bestehende Anlage integriert werden. Der Druckverlust eines Festbetts ist deutlich geringer als bei einem Sandfilter (zirka 0.5 bis 1.0 m je nach Ausführung mit einer oder mehreren Strassen und entsprechender Abwasserverteilung).

### **Erweiterbarkeit**

Die limitierende Grösse einer Festbetтанlage ist die maximale Filtergeschwindigkeit. Je nach Ausgestaltung des Bauwerks können zusätzliche Zellen ergänzt werden. Das Hebewerk ist in der Regel vor der Ozonung zwischengeschaltet, und müsste bereits auf eine hydraulische Erweiterbarkeit ausgelegt sein.

### **Diverses**

Auf schwach belasteten Festbettsystemen mit erhöhtem gelöstem Sauerstoffgehalt, wie dies nach der Ozonung der Fall ist, wachsen verschiedene Organismen, wie z.B. Schnecken. Es ist dementsprechend ein Betriebsregime mit Unterdrückung eines Schneckenwachstums anzustreben (z.B. mittels periodischem Isolieren der Zellen, d.h. durch periodisches Unterbrechen

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

der Beschickung und somit der Sauerstoffzufuhr wird die entsprechende Zelle anoxisch). Weitere mögliche Betriebsstrategien werden in Daigger und Boltz (2011) diskutiert.

### A4 Vollozonung und weitere Nachbehandlungsverfahren

*Neben den oben beschriebenen Nachbehandlungsverfahren existieren weitere Verfahren, die zur biologischen Nachbehandlung nach einer Ozonung potentiell genutzt werden können. Hierzu gehören beispielsweise Schönungsteiche, oder „allgemein“ biologisch aktive Stufen wie beispielsweise eine Nitrifikationsstufe. Es wird jedoch empfohlen, diese Verfahren nur zu verwenden, wenn sie bereits vorhanden sind oder wenn die lokale Situation eine solche Verfahrensführung anbietet. Es ist zu empfehlen, bei einem Neubau ein anderes geeignetes Verfahren (z.B. Sandfilter) zu wählen.*

#### A4.1 Schönungsteich

Schönungsteiche sind mit Pflanzen bewachsen, und werden zum Teil als Behandlungsstufe auf Kläranlagen eingesetzt. In Deutschland wurde auf dem Klärwerk Bad Sassendorf (NRW, D) der bestehende Schönungsteich zur Nachbehandlung der Ozonung eingesetzt (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2013). In der Schweiz sind Schönungsteiche selten anzutreffen. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass bestehende Schönungsteiche für die biologische Nachbehandlung im Zusammenhang mit einer Ozonung verwendet werden können. Da Schönungsteiche einen grossen Platzbedarf aufweisen, wird bei einem Neubau grundsätzlich ein anderes Nachbehandlungsverfahren empfohlen.

Ein Schönungsteich als Nachbehandlungsstufe nach einer Ozonung wurde/wird bisher an folgenden Standorten grosstechnisch eingesetzt:

- Bad Sassendorf, NRW (D): grosstechnische Umsetzung

#### A4.2 Nutzung bestehender biologischer Reinigungsstufen (z.B. Nitrifikationsstufe)

Grundsätzlich kann auch eine bestehende biologische Reinigungsstufe (z.B. Nitrifikation, Denitrifikation) zur Nachbehandlung verwendet werden. Bei einer anoxischen/anaeroben Zone muss berücksichtigt werden, dass der Ablauf einer Ozonung hohe gelöste Sauerstoffkonzentrationen aufweist. Zudem liegen noch keine Erfahrungen mit anoxischen Nachbehandlungsverfahren vor: beispielsweise ist unklar, wie effizient die Nitrosamine in einer anoxischen/anaeroben Stufe abgebaut werden.

Auf der Kläranlage Schwerte (NRW, D) wurde der Ablauf der Ozonung in die vorgeschaltete biologische Reinigungsstufe rezirkuliert (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2012). Es hat sich aber gezeigt, dass ein Rezirkulationsbetrieb hydraulisch sehr anspruchsvoll ist, und insbesondere bei Regenwetter nicht der gesamte Ablauf der Ozonung biologisch nachbehandelt werden konnte.

Eine biologisch aktive Stufe als Nachbehandlungsstufe einer Ozonung wurde/wird bisher an folgenden Standorten grosstechnisch eingesetzt:

- STEP de Bouillides, Sophia Antipolis (F): Nachbehandlung in einer nachgeschalteten Denitrifikationsstufe
- Kläranlage Schwerte (NRW, D): Rezirkulation in vorangehende biologische Reinigungsstufe
- Kläranlage in Linköping (Schweden): Nachbehandlung in einer nachgeschalteten Denitrifikationsstufe

### **B. TEILOZONUNG (Kombination mit einer Aktivkohlestufe)**

Bei einer Verfahrenskombination handelt es sich um zwei Behandlungsverfahren zur Spurenstoffelimination (Ozon und Aktivkohle) die seriell betrieben werden. Im Kapitel 4 wurde die Ozonung im Detail beschrieben und auf deren Effekte eingegangen. Wird nun aber der Ozonung eine Aktivkohlestufe nachgeschaltet, ist keine Voll-Ozonung (d.h. eine Ozondosis im Bereich von 0.4 bis 0.8 mgO<sub>3</sub>/mgDOC) mehr notwendig, um die gesetzlich geforderte Reinigungsleistung von 80% (GSchV, Anhang 3.1, Absatz 2 Ziffer 8) zu erreichen. In diesem Falle ist eine Teil-Ozonung bei einer entsprechend geringeren spezifischen Ozondosis ausreichend. Eine Verfahrenskombination hat somit zusätzliche Effekte (u.a. eine höhere Flexibilität, eventuell eine grössere Breitbandwirkung), führt aber auch zu einer höheren Komplexität der Anlage. Die Erfahrungen mit Verfahrenskombinationen sind noch nicht sehr gross, es laufen gegenwärtig verschiedene Untersuchungen im voll- und halbtechnischen Massstab dazu. Erste grosstechnischen Umsetzung befinden sich in der Realisierungsphase.

Um die Schnittstellen zwischen der Ozonung und den Aktivkohle-basierten Nachbehandlungsverfahren besser beschreiben und voneinander abgrenzen zu können, wird nachfolgend auf die relevanten Auswirkungen einer Teil-Ozonung eingegangen.

#### **Spurenstoffelimination**

Bei geringeren Ozondosen wird die Breitbandwirkung der Spurenstoffelimination reduziert, denn es werden noch hauptsächlich jene Stoffe abgebaut, die sehr gut mit Ozon reagieren (und weniger gut jene Stoffe, welche hauptsächlich über die OH-Radikale abgebaut werden). Diese reduzierte Spurenstoffelimination durch die Ozonung muss durch die nachfolgende Aktivkohlestufe kompensiert werden, um den geforderten Reinigungseffekt von 80% einhalten zu können.

#### **Auswirkungen auf die Bildung von toxischen Reaktionsprodukten**

Die Bildung von toxischen Reaktionsprodukten ist nicht grundsätzlich von der Ozondosis abhängig, sondern vielmehr von der Abwassermatrix und der im Abwasser enthaltenen Vorläufersubstanzen. Analog zur Voll-Ozonung kann es auch bei einer Teil-Ozonung zur Bildung von labilen, toxischen Reaktionsprodukten kommen, die (analog zur Voll-Ozonung) durch die Nachbehandlung wieder eliminiert werden müssen.

Bei Abwässern, welche nicht klar für eine Ozonung geeignet sind, weil stabile, toxische Reaktionsprodukte in erhöhten Konzentrationen gebildet werden können (z.B. Bromat), ist dies auch bei einer Teil-Ozonung entsprechend zu berücksichtigen. Im Falle von Bromat ist zwar bekannt, dass die Bromat-Bildung von der spezifischen Ozondosis abhängt (Soltermann et al., 2016). Es können aber auch weitere unerwünschte, toxische Reaktionsprodukte entstehen, die nicht chemisch-analytisch quantifizierbar sind, und deren Bildung nicht direkt mit der spezifischen Ozondosis korreliert. Es kann also zusammengefasst werden, dass bei problematischen oder unklaren Abwässern (gemäss VSA-Empfehlung „Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung“) die Auswirkungen einer Verfahrenskombination frühzeitig und sorgfältig abgeklärt werden müssen.

#### **Zusätzliche Effekte**

Eine reduzierte Ozondosis kann sich auf weitere Parameter, wie beispielsweise die DOC-Elimination, die Desinfektionsleistung, oder die Entfärbung des Abwassers, auswirken.

## **B1 Teilozonung und Nachbehandlung durch granulierten Aktivkohle (GAK)-Filtration**

### **Das Wichtigste in Kürze**

Das Verfahren Teilozonung in Kombination mit einer granulierten Aktivkohle (GAK)-Filtration ist noch nicht allzu gut untersucht worden. Es sind aber erste grosstechnischen Umsetzung sowie diverse Forschungsprojekte am Laufen.

**Hauptanforderungen:** Der GAK-Filter hat eine deutliche Abbauleistung bezüglich der Nitrosamine (NDMA) gezeigt (Böhler et al., 2017). Die Elimination von labilen, toxischen Reaktionsprodukten konnte in den bisherigen Untersuchungen noch nicht abschliessend überprüft werden, da beispielsweise im ReTREAT-Projekt keine substantiellen negativen ökotoxikologischen Effekte durch die Ozonung aufgetreten sind (Böhler et al., 2017, Kienle et al., 2017). Durch die GAK-Filtration werden die organischen Spurenstoffe effizient eliminiert, in Abhängigkeit der behandelten Bettvolumina (beziehungsweise in Abhängigkeit vom Beladungszustand der GAK) sowie in Abhängigkeit der Kontaktzeit.

**Zusätzliche Effekte:** Der GAK-Filter eliminiert zusätzlich Feststoffe (sowie die daran adsorbierten Stoffe wie Schwermetalle), und Nährstoffe (Ammonium, Nitrit, Phosphor), sowie DOC.

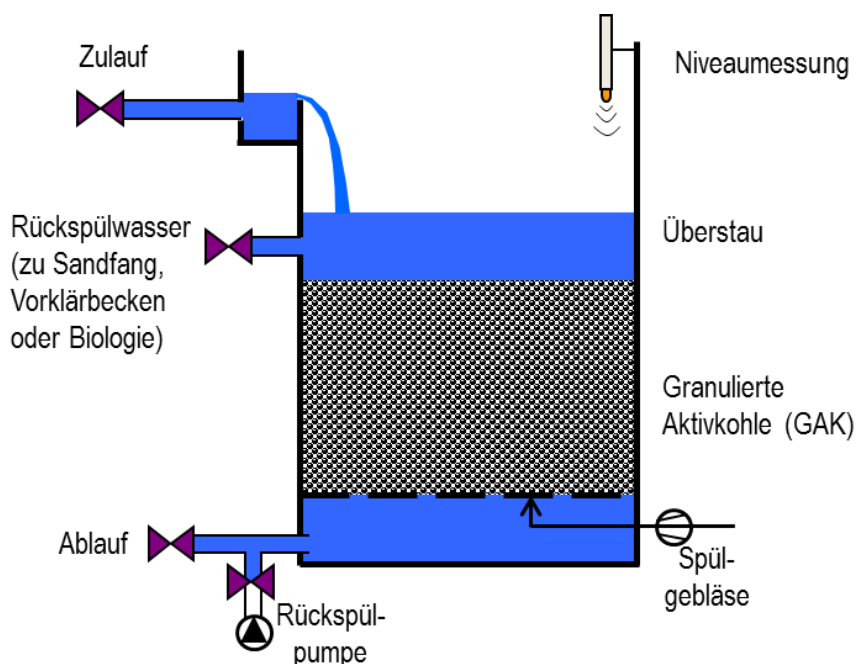
**Weitere Kriterien:** Der GAK-Filter hat einen vergleichbaren Druckverlust wie der Sandfilter, was bei der Planung entsprechend berücksichtigt werden muss (Hebewerk). Im Weiteren ist zu beachten, dass mit dem Rückspülwasser bis 5% mehr in der Biologie zu reinigendes Abwasser anfallen kann (analog zum Sandfilter). Das Rückspülregime muss angepasst werden, da häufige Rückspülungen zu vermeiden sind (unwirtschaftlich; ein zusätzlicher Abrieb der Kohle ist vernachlässigbar; Benstöm et al., 2015).

**Fazit:** Ein GAK-Filter scheint grundsätzlich als Nachbehandlung nach einer Ozonung geeignet zu sein. Allerdings kann aufgrund der aktuellen Datenlage keine abschliessende Empfehlung abgegeben werden. Insbesondere gibt es noch Unsicherheiten bezüglich der optimalen Filter-Auslegung (Kontaktzeit) und der GAK-Regenerationshäufigkeit. Weitere Untersuchungen dazu sind am Laufen.

### B1.1 Beschreibung des Verfahrens

Die GAK-Filtration kann entweder als eigenständiges Verfahren, oder in Kombination mit einer vorgeschalteten Ozonung betrieben werden. Die GAK-Filtration als eigenständiges Verfahren benötigt keine zusätzliche Nachbehandlungsstufe. Kommt die GAK in Kombination mit einer Ozonung zum Einsatz, dient die GAK-Filtration einerseits als Nachbehandlungsstufe für die Ozonung, und andererseits findet auch eine zusätzliche Spurenstoffelimination statt.

Die GAK-Filter können in verschiedensten anlagebautechnischen Varianten umgesetzt werden. Dazu wird die GAK in einen Raumfilter gefüllt, der mit dem Abwasser durchströmt ist. Er kann aufwärts oder abwärts durchströmt sein sowie diskontinuierlich oder kontinuierlich rückgespült werden. Die Leerbettkontaktzeit im Filter sowie die DOC-Zulauf-Konzentrationen sind relevante Betriebsparameter. Dabei sollte der DOC im Zulauf möglichst tief und die Kontaktzeit ausreichend sein (im Bereich von 20 bis 30 Minuten nach aktuellem Wissensstand; mindestens 25 Minuten bei einer GAK-Körnung von 1.2 bis 2.3 mm; Zwischenbericht GAK-Versuche, ARA Bülach-Furt, 2017). Geringe DOC-Konzentrationen sind durch eine möglichst gute Vorreinigung zu erreichen. Ausreichende Kontaktzeiten können bei bestehenden Sandfiltern, die zu GAK-Filtern umgenutzt werden, durch eine Reduktion der Filtergeschwindigkeit (durch den gleichzeitigen Betrieb von möglichst vielen Filterzellen bei Trockenwetter) oder durch eine Aufstockung des Filterbetts erreicht werden.



**Abbildung 10.** Beispiel eines allgemeinen Schemas einer GAK-Filtration zur Elimination von Spurenstoffe (Quelle: Abegglen und Siegrist, 2012).

Die GAK-Filter stellen eine besondere Ausführung von Raumfiltern dar (bis auf das Filtermedium sind die Bestandteile analog zu einem Sandfilter; Abbildung 10). Nachfolgend sind deshalb nur einige spezielle Bemerkungen zur GAK-Filtration zu finden (weitere Anmerkungen sind im Kapitel A1 zum Sandfilter erwähnt):

- **Korngrösse:** Granulierte Aktivkohlen sind in unterschiedlichen Körnungen erhältlich, welche an den Filteraufbau und an die Abwasserqualität bezüglich Feststoffen angepasst werden müssen.

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

- **GAK-Material:** Die Ausgangsmaterialien sind sehr vielfältig und reichen von Kokosnuss über Stein- und Braunkohle bis hin zu Torf. Im Weiteren kann die Kohle direkt ein abgeseibtes Produkt aus dem Aktivierungsprozess des Ausgangsmaterials oder ein Produkt aus einem Agglomerierungsprozess von feinerer Kohle sein. Grundsätzlich sind harte Kohlen mit einem geringen Schwimmanteil zu bevorzugen.
- **Regenerat vs. Frischkohle:** Es kann neuwertige Aktivkohle oder bereits reaktivierte Kohle eingesetzt werden.

Da im laufenden Betrieb ein Austausch oder eine Reaktivierung der Kohle wahrscheinlich ist, soll von Anfang an der Aus- und Einbau der GAK in der Planung der Anlage berücksichtigt werden.

### B1.2 Bisherige Anwendungen

Ein GAK-Filter als Nachbehandlungsstufe einer Ozonung wurde/wird bisher an folgenden Standorten grosstechnisch eingesetzt:

- ARA Furt, Bülach (CH): grosstechnische Untersuchungen
- AV Altenrhein (CH): grosstechnische Umsetzung (im Bau)
- Grosstechnische Untersuchungen in Australien (Reungoat et al., 2012)
- KOMOZAK-Projekt, Österreich
- Köln Rodenkirchen, Deutschland
- ...

An den folgenden Standorten wird/wurde die Kombination Ozonung und GAK-Filtration im Pilotmassstab untersucht:

- ARA Neugut, Dübendorf (CH): Pilotmassstab (Böhler et al., 2017)
- ARA Glarnerland (CH): Pilotmassstab
- Versuchskläranlage IWAR (D): Pilotmassstab (Knopp et al., 2016)
- Untersuchungen in Kanada: Pilotmassstab (Reaume et al., 2015)

### B1.3 Hauptanforderungen an einen GAK-Filter

#### Elimination von in der Ozonung gebildeten labilen, toxischen Reaktionsprodukten

In den Versuchen im Rahmen des ReTREAT-Projekts auf der ARA Neugut (Böhler et al., 2017) gaben umfangreiche ökotoxikologische Untersuchungen keinen direkten Hinweis auf toxische Reaktionsprodukte nach der Ozonbehandlung (Kienle et al., 2017). Analog zum Sandfilter in Kombination mit einer Ozonung spielt auch bei einem GAK-Filter die biologische Aktivität eine wichtige Rolle für den Abbau der labilen, toxischen Reaktionsnebenprodukte. Untersuchungen in Australien haben gezeigt, dass die nicht-spezifische Toxizität durch einen biologisch aktiven GAK-Filter weiter reduziert wird (Reungoat et al., 2012). Aufgrund der geringen Datengrundlage kann aktuell keine abschliessende Beurteilung vorgenommen werden. Es wird aber davon ausgegangen, dass ein GAK-Filter die labilen, toxischen Reaktionsprodukte effizient eliminiert (vergleichbar mit einem Sandfilter).

#### Nitrosamine

Im ReTREAT-Projekt wurde für einen länger betriebenen GAK-Filter (40'000 behandelte Bettvolumina) eine NDMA-Elimination im Bereich von 50 bis 60% gemessen, während der frischere und feinkörnigere GAK-Filter eine deutlich höhere Eliminationsleistung (80%) aufgewiesen hat (Böhler et al., 2017). Zum Vergleich: im parallel betriebenen Sandfilter wurde eine durchschnittliche NDMA-Elimination von rund 60% erzielt.

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

Ein GAK-Filter scheint somit grundsätzlich als Nachbehandlung nach einer Ozonung geeignet zu sein. Allerdings kann aufgrund der aktuellen Datenlage keine breit abgestützte Beurteilung abgegeben werden.

### **Elimination von organischen Spurenstoffen**

Die granulierten Aktivkohle (GAK) eliminiert organische Spurenstoffe, in Abhängigkeit des Beladungszustands der GAK. Eine frische GAK (mit wenigen durchgesetzten Bettvolumina) eliminiert die Spurenstoffe effizienter als eine beladene GAK (mit einigen tausend bis zehntausend behandelten Bettvolumina). Die frische GAK wirkt hauptsächlich adsorptiv. Mit zunehmenden behandelten Bettvolumina wird die GAK biologisch aktiver und ein Teil des beladenen DOC wird biologisch abgebaut (Reungoat et al., 2012) Es wird davon ausgegangen, dass durch eine vorgeschaltete Teil-Ozonung die Standzeit der GAK signifikant verlängert werden kann. Im Weiteren kann durch eine Parallelschaltung der einzelnen Filterzellen die Standzeit nochmals signifikant erhöht werden. In aktuellen Projekten werden diese Aspekte genauer untersucht.

## **B1.4 Zusätzliche Effekte eines GAK-Filters**

### **Gesamte ungelöste Stoffe (GUS)**

Der GAK-Filter ist - wie der Sandfilter - ein Raumfilter. Der Feststoffrückhalt hängt aber auch von der Korngrösse und der Korngrößenverteilung ab. Diese liegt üblicherweise im Bereich von 0.5 bis 2.5 mm, wobei eine zu feine Körnung zu einer häufigen Filterrückspülung führen würde (bedingt durch einen relativ schnellen Druckanstieg – andererseits ist eine feinere Körnung in Bezug auf die Spurenstoffelimination effizienter). Der Feststoffrückhalt durch einen GAK-Filter ist daher auch vergleichbar mit dem Feststoffrückhalt eines Sandfilters. Bei gleicher Filtergeschwindigkeit haben der GAK-Filter und der Sandfilter in den Untersuchungen auf der ARA Bülach-Furt einen Feststoffrückhalt von rund 50% aufgewiesen (Zwischenbericht GAK-Versuch, ARA Bülach-Furt, 2017). Im ReTREAT-Projekt war der GUS-Rückhalt durch den GAK-Filter im Bereich von 60 bis 80% (Böhler et al.,2017).

### **Organische Summenparameter (DOC, CSB, BSB<sub>5</sub>)**

Die GAK-Filtration eliminiert zu Beginn – d.h. wenn die Aktivkohle noch unbeladen ist – sehr effizient den organischen Kohlenstoff (DOC). Mit zunehmender Belegung der Aktivkohle nimmt auch die DOC-Elimination substantiell ab, wobei eine Restelimination von 15 bis 20% bleibt (Böhler et al.,2017). Bei den GAK-Versuchen auf der ARA Bülach-Furt hat sich gezeigt, dass sich nach einer gewissen Betriebszeit eine konstante DOC-Elimination von zirka 20% einstellt, was deutlich höher ist als beim Sandfilter (7%; Zwischenbericht GAK-Versuch, ARA Bülach-Furt, 2017). Dies deutet darauf hin, dass neben einem biologischen Abbau auch die Sorption eine Rolle spielt.

### **Elimination von assimilierbarem organischem Kohlenstoff (AOC)**

In der Ozonung werden organische Stoffe oxidiert und damit zum Teil biologisch besser verfügbar gemacht. Dieser Anteil des DOC wird assimilierbarer organischer Kohlenstoff (AOC) genannt. Die AOC-Bildung ist von der DOC-Zulaufkonzentration und der Ozondosis abhängig. In den Untersuchungen im Rahmen des ReTREAT-Projekts (Böhler et al.,2017) wurde der AOC durch den bereits beladenen GAK-Filter um knapp 60% eliminiert, was leicht höher lag als beim Sandfilter (40%-ige Elimination). Ein weiterer GAK-Filter, der noch nicht vollständig beladen ist, hat den AOC deutlich effizienter reduziert (70%). Hier spielt aber – im Gegensatz zum bereits stärker

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

beladenen GAK-Filter – vermutlich die noch vorhandene Sorptionskapazität eine grosse Rolle, wie auch die eher feine GAK-Körnung (0.44-2.34 mm; Böhler et al.,2017).

### **Nährstoffe (Stickstoff und Phosphor)**

Auf dem GAK-Filter stellt sich mit der Zeit, analog zum Sandfilter, eine biologische Aktivität ein. Somit ist auch von einer nitrifizierenden Aktivität auszugehen. Eine biologische Phosphor-Elimination – mit Ausnahme für das Biomassewachstums - findet nicht statt. Jedoch wird der partikulär vorliegende (gebundene) Phosphor durch die Filterwirkung zurückgehalten. Auf eine zusätzliche Fällmittelzugabe vor dem GAK-Filter sollte verzichtet werden, da sonst Probleme bei der Reaktivierung der Kohle auftreten können.

### **Desinfektion**

Aus dem ReTREAT-Projekt lassen sich keine abschliessenden Aussagen herleiten (Böhler et al.,2017). Es wird aktuell davon ausgegangen, dass sich GAK-Filter bezüglich der Elimination von Keimen ähnlich verhält wie der Sandfilter (siehe Kapitel zum Sandfilter).

### **Entfärbung**

Der GAK-Filter eliminiert die Farbstoffe analog zur Pulveraktivkohle, zumindest wenn die GAK noch relativ unbeladen ist. Unklar ist, wie schnell die GAK mit diesen Farbstoffen gesättigt ist. Hier ist eine Einzelfallbetrachtung vorzunehmen.

### **Geruchsentfernung**

Untersuchungen zur Geruchsentfernung im Zusammenhang mit der GAK-Filtration sind nicht bekannt.

## **B1.5 Weitere Kriterien**

### **Investitions- und Betriebskosten**

Zur GAK-Filtration liegen aktuell keine Investitions- und Betriebskosten vor, da das Verfahren noch nicht grosstechnisch realisiert beziehungsweise über einen längeren Zeitraum betrieben worden ist. Es sind allerdings Projekte am Laufen, wo künftig Daten bezogen werden können.

Die Kosten sind insbesondere stark abhängig von der Filtergrösse, da eine ausreichende Kontaktzeit notwendig ist für eine effiziente Spurenstoffelimination. Im Einzelfall sind aber auch die lokalen Gegebenheiten (Landreserven, Hydraulik, Baugrund, vorhandene Infrastruktur, etc.) von Bedeutung. Die Betriebskosten eines GAK-Filters werden dominiert durch die Standzeiten der Kohle, die Stromkosten für die Rückspülung und allfällige Hebewerke. Der GAK-Filter ist aber tendenziell teurer als ein Sandfilter (tendenziell grössere Filter, teureres Filtermaterial).

### **Ressourcenverbrauch**

Für den Betrieb eines GAK-Filters ist Strom für die Rückspülaggregate (Gebläse und Pumpen) notwendig. Für die Filtrerrückspülung beträgt der Stromverbrauch – abhängig von der Anlagengrösse, der Abwasserzulaufqualität, dem Filtraufbau und dem Spülregime – zwischen 0.005 und 0.01 kWh/m<sup>3</sup> behandeltes Abwasser. Zusätzlich ist der Strombedarf für ein allfälliges Zwischenpumpwerk zu berücksichtigen: bei typischen Förderhöhen von 3 bis 4 m ergibt sich ein Stromverbrauch von etwa 0.015 bis 0.02 kWh/m<sup>3</sup>. Im Weiteren muss der Energieverbrauch für die Herstellung sowie die Regeneration der GAK berücksichtigt werden. Grundsätzlich gilt: Je mehr Bettvolumen behandelt werden können, desto besser wird die Energiebilanz und die

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

Wirtschaftlichkeit. In Kombination mit einer vorgeschalteten Ozonung wird erwartet, dass die Standzeit signifikant verlängert werden kann.

Der Flächenbedarf für die Filtration kann anhand der minimalen Kontaktzeit, beziehungsweise anhand der maximalen Filtergeschwindigkeit bei einer fixierten Filterbetthöhe abgeschätzt werden. Der Gesamtplatzbedarf - unter Berücksichtigung der Rohrkeller und Hilfseinrichtungen - liegt je nach Anlagengrösse um 25 bis 50% höher als jene der Filterfläche.

### **Schnittstelle zur vorgeschalteten Behandlung**

Erhöhte DOC-Konzentrationen im Ablauf der biologischen Stufe führen zu einer schnelleren Beladung der GAK. Die Aktivkohle muss somit häufiger regeneriert werden. Eine gute biologische Vorreinigung hat somit einen direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der GAK-Filtration. Zudem führt ein hoher Feststoffabtrieb aus der Nachklärung zu einem häufigen Rückspülen der Filterzellen. Dies wiederum erhöht den Anfall des Rückspülwassers, was die vorgeschalteten Reinigungsstufen zusätzlich belastet.

### **Einfluss auf die Schlammbehandlung**

Bei einem Neubau eines GAK-Filters kann von einem tendenziell höheren Schlammanfall von etwa 1.5 g TS/EWd (Bereich 0.75-3.0 g TS/EW/d, abhängig von der jeweiligen ARA) ausgegangen werden, bedingt durch einen zusätzlichen Feststoffrückhalt im GAK-Filter. Dieser Schlamm fällt bei Rückführung des Schlammwassers in den Sandfang oder Vorklärung zum grössten Teil im Primärschlamm an.

### **Implementierung in bestehende Anlagen**

Sofern genügend Platz zur Verfügung steht, kann eine Teil-Ozonung in Kombination mit einer GAK-Filtration problemlos in die bestehende Anlage integriert werden. In der Schweiz sind viele Kläranlagen bereits mit einer Sandfiltration ausgerüstet. Diese Sandfilter können zu GAK-Filtern umgerüstet werden. Es ist aber zu beachten, dass ein GAK-Filter eine tendenziell höhere Aufenthaltszeit des Abwassers benötigt als ein Sandfilter. Dies kann einerseits durch eine Erhöhung des Filterbetts oder durch eine Vergrösserung der Filterfläche erreicht werden. Auswirkungen auf die Hydraulik sind auf jeden Fall genau zu prüfen. Bei bestehenden Filtrationsanlagen kann unter Umständen ein bestehendes Flockungsbecken zur Ozonung genutzt oder mitgenutzt werden (für einen effiziente Ozoneintrag ist auf eine ausreichende Reaktorhöhe zu achten).

### **Sicherheitsaspekte**

Für die Nachbehandlungsstufe (GAK-Filtration) ist es von grosser Wichtigkeit, dass das zufließende Wasser kein Ozon mehr enthält. Eine detailliertere Ausführung ist in Kapitel 4 gegeben, sowie in den Faktenblättern der VSA-Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“. Ansonsten sind für GAK-Filter keine weiteren speziellen Sicherheitsvorkehrungen notwendig.

### **Erweiterbarkeit**

Die limitierende Grösse einer GAK-Filtration ist die Kontaktzeit, respektive allenfalls auch die Hebewerke. Je nach Ausgestaltung des Bauwerks können zusätzliche Filterzellen ergänzt werden.

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

### **Diverses**

Eine GAK-Filtration ist so auszuführen, dass der GAK-Austausch (für die Regeneration) möglichst einfach durchführbar ist.

### **Offene Fragen**

Aktuell ist noch offen, wie häufig die GAK ausgetauscht beziehungsweise regeneriert werden muss. Zudem ist noch nicht abschliessend geklärt, wie gross die Filter dimensioniert werden müssen (notwendige minimale Kontaktzeit). Diese beiden Punkte wirken sich direkt auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens aus.

## **B2 Teilozonung und weitere Aktivkohle-basierte Nachbehandlungsverfahren**

Auf weitere Aktivkohle-basierte Verfahren, die in Kombination mit einer Teilozonung kombiniert werden können, wird nachfolgend kurz eingegangen.

### **B2.1 Teilozonung in Kombination mit einer PAK-Stufe**

Die PAK-Dosierung vor einen Sandfilter ist eine kompakte, und relativ einfach realisierbare verfahrenstechnische Lösung. Die Filtration übernimmt hier neben der biologischen Nachbehandlung zusätzlich auch die Funktion der PAK-Abtrennung (inklusive „Polishing“). An dieser Stelle wird aber nicht weiter auf dieses Verfahren beziehungsweise diese Verfahrenskombination eingegangen, da der Sandfilter als biologische Nachbehandlungsstufe bereits im Kapitel A1 ausführlich beschrieben ist. Alternativ zu einer PAK-Dosierung vor den Sandfilter kann auch ein PAK-Verfahren mit Lamellenabscheider umgesetzt werden. Es ist noch nicht abschliessend geklärt, ob danach eine Schlussfiltration nötig ist.

Die PAK-Dosierung auf einen Sandfilter in Kombination mit einer Ozonung ist an folgenden Standorten grosstechnisch vorgesehen:

- ARA ProRhen, Basel (CH): Ozonung in Kombination mit einer PAK-Dosierung vor den Sandfilter

An den folgenden Standorten wurde die Kombination Ozonung und PAK-Dosierung vor den Sandfilter im Pilotmassstab untersucht:

- ARA ProRhen, Basel (CH): Pilotierung

### **B2.2 Teilozonung in Kombination mit GAK im Wirbelbett**

Das Verfahren GAK im Wirbelbett (auch GAK im Schwebbett genannt) wird in Wunderlin et al. (2017) erklärt. Momentan liegen zur Kombination von GAK im Wirbelbett erst wenig Erfahrungen vor.

Das Verfahren GAK im Wirbelbett in Kombination mit einer Ozonung wird bisher an folgenden Standorten grosstechnisch eingesetzt:

- Keine grosstechnische Umsetzung bekannt

An den folgenden Standorten wurde die Kombination Ozonung und GAK im Wirbelbett im Pilotmassstab untersucht:

- ARA Langmatt (CH): Pilotierung

### Literaturverzeichnis

- Abegglen, C. und Siegrist, H. (2012). Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser - Verfahren zur weitgehenden Elimination auf Kläranlagen. Bern, Bundesamt für Umwelt.
- Abegglen C., Escher B., Hollender J., Koepke S., Ort C., Peter A., Siegrist H., von Gunten U., Zimmermann S., Koch M., Niederhauser P., Schärer M., Braun C., Gälli R., Junghans M., Brocker S., Moser R., Rensch D. (2009). Ozonung von gereinigtem Abwasser – Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf. Eawag, AWEL, BAFU, BMG, Hunziker Betatech.
- Benstöm, F., Nahrstedt, A., Böhler, M., Knopp, G., Montag, D., Siegrist, H., Pinnekamp, J. (2016a). Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen – Ein ReView halb- und großtechnischer Untersuchungen – Teil 1: Veranlassung, Zielsetzung und Grundlagen, Korrespondenz Abwasser Abfall (KA), 63. Jahrgang, Nr. 3, März 2016, Hennef.
- Benstöm, F., Nahrstedt, A., Böhler, M., Knopp, G., Montag, D., Siegrist, H., Pinnekamp, J. (2016b). Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen – Ein ReView halb- und großtechnischer Untersuchungen – Teil 2: Methoden, Ergebnisse und Ausblick, Korrespondenz Abwasser Abfall (KA), 63. Jahrgang, Nr. 4, April 2016, Hennef.
- Benstöm, F.; Mousel, D.; Pinnekamp, J. (2015): Abrasion of granular activated carbon used for elimination of micropollutants in municipal wastewater treatment. 9th micropoll and ecohazard.
- BG (2012). Kosten der Elimination von Mikroverunreinigungen im Abwasser. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- Böhler, M., Zwickelpflug, B., Grassi, M., Behl, M., Neuenschwander, S., Siegrist, H., Dorusch, F., Hollender, J., Sinnet, B., Ternes, Th., Fink, G., Liebi, Ch., Wullschläger, W. (2011). Abschlussbericht: Aktivkohledosierung in den Zulauf zur Sandfiltration Kläranlage Kloten/Opfikon (Ergänzende Untersuchungen zum Projekt Strategie MicroPoll), Eawag, Dübendorf.
- Böhler, M., Blunsi, M., Czekalski, N., Fleiner, J., Kienle, C., Langer, M., McArdeall, C.S., Teichler, R. und Siegrist, H. (2017): Biologische Nachbehandlung von kommunalem Abwasser nach Ozonung - ReTREAT, Abschlussbericht für das Bundesamt für Umwelt (Bafu) im Rahmen eines Projektes der Technologieförderung, Eawag, Dübendorf.
- Braun, Ch., Gälli, R., Leu, Ch., Munz, N., Schindler Wildhaber, Y., Strahm, I., Wittmer, I. (2015). Mikroverunreinigungen in Fließgewässern aus diffusen Einträgen. Situationsanalyse. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1514: 78S.
- Daigger, T.G., Boltz, J.P. (2011). Trickling filter and trickling filter-suspended growth process design and operation: A state-of-the-art review. Water Environment Research, Volume 83, Number 5, 388-404.
- Dominguez, D., Diggelmann V., Binggeli S. (2016a). Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasseranlagen. Finanzierung von Massnahmen. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1618: 34S.

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

Dominguez, D., Schärer, M., Zimmermann-Steffens, S., Bleny, H. (2016b). Reduktion der Spurenstoffe in Gewässern. Aqua & Gas, Nr. 1, S. 16-23.

Elimination von Spurenstoffen durch granulierten Aktivkohle (GAK) Filtration: Grosstechnische Untersuchungen auf der ARA Bülach-Furt, Zwischenbericht, Kurzfassung, Dübendorf, Januar 2017.

ISA (2011): ENVELOSO - Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen – Phase I, Abschlussbericht. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (IW) im Auftrag von Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Aachen. [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/abwasser/forschung/pdf/Abschlussbericht\\_ENVELOSO.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/abwasser/forschung/pdf/Abschlussbericht_ENVELOSO.pdf)

Energie in ARA. Leitfaden zur Energieoptimierung auf Abwasserreinigungsanlagen, November 2008. Handbuch des VSA.

Energie in ARA, Kapitel „Energieeffizienz in MV-Anlagen“ (2017), InfraWatt, Hunziker Betatech, Energie Schweiz, im Auftrag des BFE. Verfügbar unter [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch)

Escolà Casas, M., Kumar Chhetri, R., Ooi, G., Hansen, K.M.S., Litty, K., Christensson, M., Kragelund, C., Andersen, H.R., Bester, K. (2015). Biodegradation of pharmaceuticals in hospital wastewater by staged Moving Bed Biofilm Reactors (MBBR). Water Research, 83, 293-302.

Fux, C., Kienle, C., Joss, A., Wittmer, A., Frei, R. (2015). Ausbau der ARA Basel mit 4. Reinigungsstufe – Pilotstudie: Elimination Mikroverunreinigungen und Ökotoxikologische Wirkungen. Aqua & Gas, Nr. 7/8, S. 10-17.

Hoigné, J., Bader, H. (1983): Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water – II. Water Research Vol. 17 S. 185 – 194.

Huber, M.M., Göbel, A., Joss, A., Hermann, N., Löffler, D., McArdeell, C.S., Ried, A., Siegrist, H., Ternes, T., von Gunten, U. (2005). Oxidation of pharmaceuticals during ozonation of municipal wastewater effluents: A pilot study. Environmental Science and Technology 39(11), p. 4290-4299.

Hunziker-Betatech (2008). Massnahmen in ARA zur weitergehenden Elimination von Mikroverunreinigungen – Kostenstudie. Studie im Auftrag des BAFU. Winterthur, Oktober 2008.

Kienle, C., Kase, R., Schärer, M., Werner, I. (2015). Ökotoxikologische Biotests – Anwendung von Biotests zur Evaluation der Wirkung und Elimination von Mikroverunreinigungen. Aqua & Gas, Nr. 7/8, S. 18-26.

Kienle C., Langer M., Ganser B., Gut S., Schifferli A., Thiemann C., Vermeirssen E und Werner I. (2017). Biologische Nachbehandlung von kommunalem Abwasser nach Ozonung – ReTREAT: Teilprojekt Biotests. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Schweizerisches Zentrum für angewandte Ökotoxikologie Eawag-EPFL, Dübendorf.

Knopp, G., Prasse, C., Ternes, T.A., Cornel, P. (2016). Elimination of micropollutants and transformation products from a wastewater treatment plant effluent through pilot scale

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

- ozonation followed by various activated carbon and biological filters. *Water Research*, 100, 580-592.
- Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (2013). Ozonung auf der Kläranlage Bad Sassendorf. Projektsteckbrief. Stand. 30.10.2013.
- Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (2013). Ozonierung und Aktivkohleadsorption in der Kläranlage Schwerte. Projektsteckbrief. Stand. 7.3.2012.
- Kreuzinger, N., Haslinger, J., Kornfeind, L., Schaar, H., Saracevic, E., Winkelbauer, A., Hell, F., Walder, C., Müller, M., Wagner, A. und Wieland, A. (2015). Weitergehende Reinigung kommunaler Abwässer mit Ozon sowie Aktivkohle für die Entfernung organischer Spurenstoffe, KOMOZAK Endbericht, Hrsg.: Bundesministerium für Land- und Forst, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien (A).
- Langer, M. und Kienle, C. (2016). Effektmessung: Ökotoxikologische Biotests zur Beurteilung der Abwasserbehandlung. 79./80. VSA-Fortbildungskurs: Mikroverunreinigungen, Emmetten.
- Lee, Y., von Gunten U. (2016). Advances in predicting organic contaminant abatement during ozonation of municipal wastewater effluent: reaction kinetics, transformation products, and changes of biological effects. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 2, 421-442.
- Lee, Y., Gerrity, D., Lee, M., Bogeat, A. E., Salhi, E., Gamage, S., Trenholm, R. A., Wert, E. C., Snyder, S. A., von Gunten U. (2013). Prediction of micropollutant elimination during ozonation of municipal wastewater effluents: Use of kinetic and water specific information. *Environmental Science and Technology*, 47, 5872-5881.
- Magdeburg, A., Stalter, D., Oehlmann, J. (2012). Whole effluent toxicity assessment at a wastewater treatment plant upgraded with a full-scale post-ozonation using aquatic key species. *Chemosphere* 88(8): 1008-1014.
- Margot J., Magnet A., Thonney D., Chèvre N., de Alencastro F., Rossi L. (2011). Traitement des micropolluants dans les eaux usées – Rapport final sur les essais pilotes à la STEP de Vidy (Lausanne). Ed. Ville de Lausanne.
- Rattier, M., Reungoat, J., Keller, J., Gernjak, W. (2014). Removal of micropollutants during tertiary wastewater treatment by biofiltration: Role of nitrifiers and removal mechanisms. *Water Research*, 54, 89-99.
- Reaume, M.J., Seth, R., McPhedran, K.N., Fidalgo da Silva, E., Porter, L.A. (2015). Effect of media on biofilter performance following ozonation of secondary treated municipal wastewater effluent: Sand vs. GAC. *Ozone: Science & Engineering*, 37, 137-153.
- Reungoat, J., Escher, B.I., Macova, M., Argaud, F.X., Gernjak, W., Keller, J. (2012). Ozonation and biological activated carbon filtration of wastewater treatment plant effluents. *Water Research*, 46, 863-872.
- Schaffner M., Studer P., Ramseier C. (2013). Beurteilung der Badegewässer. Empfehlungen zur Untersuchung und Beurteilung der Badewasserqualität von See- und Flussbädern. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1310: 42 S.

## Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung

- Soltermann, F., Abegglen, Ch., Götz, Ch., von Gunten, U. (2016). Bromide sources and loads in Swiss surface waters and their relevance for bromate formation during wastewater ozonation. *Environmental Science and Technology* 50: 9825-9834.
- Stalter, D., Magdeburg, A., Oehlmann, J. (2010a). Comparative toxicity assessment of ozone and activated carbon treated sewage effluents using an *in vivo* test battery. *Water Research* 44(8): 2610-2620.
- Stalter D., Magdeburg A., Weil M., Knacker T., Oehlmann J. (2010b). Toxication or detoxication? *In vivo* toxicity assessment of ozonation as advanced wastewater treatment with the rainbow trout. *Water Research*. 44(2): 439-448.
- Verordnung des UVEK zur Überprüfung des Reinigungseffekts von Massnahmen zur Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasserreinigungsanlagen, 15. Februar 2016, Anhörung.
- von Gunten, U. (2003a). Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. *Water Research* 37(7): 1443-1467.
- von Gunten, U. (2003b). Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine. *Water Research* 37(7): 1469-1487.
- von Sonntag, C. und U. von Gunten (2012). *Chemistry of ozone in water and wastewater treatment*. London, IWA Publishing, ISBN 9781843393139.
- Verordnung des UVEK zur Überprüfung des Reinigungseffekts von Massnahmen zur Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasserreinigungsanlagen, 814.201.231, vom 3. November 2016 (Stand am 1. Dezember 2016).
- VSA (2018). Empfehlung „Definition und Standardisierung von Kennzahlen für Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA“. Verfügbar unter [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch)
- VSA-Empfehlung (2017). Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung. Verfügbar unter [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch)
- VSA-Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“ (2017). Definition und Standardisierung von Kennzahlen für Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA. Verfügbar unter [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch)
- VSA-Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“ (2016a). Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung von weitergehenden Verfahren zur Spurenstoffelimination. [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch)
- VSA-Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“ (2016b). Sicherheitsaspekte zum Umgang mit Pulveraktivkohle (PAK) auf Kläranlagen. [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch)
- VSA-Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“ (2016c). Sicherheitsaspekte zum Umgang mit Ozon auf Kläranlagen. [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch)
- VSA-Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“ (2016d). Sicherheitsaspekte zum Umgang mit Sauerstoff auf Kläranlagen. [www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch)
- VSA-Empfehlung (2015). Zu behandelnde Abwassermenge und Redundanz von Reinigungsstufen zur Entfernung von Mikroverunreinigungen.

## **Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung**

WBF: Eidgenössisches Departement für Wirtschaft, Bildung und Forschung (2016). Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln, Entwurf vom 4. Juli 2016.

Wert, E.C., Stoughtenger, S.S., McNaught, H., Lew, J. (2014). Ozone by-product removal using a fixed bed biofilm reactor. *Journal AWWA*, 106:4, E176-E188.

Wunderlin, P., Meier, A., Grelot, J. (2017). Elimination von Mikroverunreinigungen auf ARA – aktueller Stand der Verfahren und künftige Entwicklungen. *Aqua und Gas* 11/17, S. 60-70.