

# PROJEKT ReTREAT

## UNTERSUCHUNGEN ZU VERFAHREN FÜR DIE BIOLOGISCHE NACHBEHANDLUNG NACH OZONUNG

**Im Rahmen des Projekts ReTREAT wurden verschiedene Verfahren auf deren Eignung als biologische Nachbehandlung nach einer Ozonung getestet. Der Fokus lag dabei – neben allgemeinen Reinigungseffekten – insbesondere auf dem Abbau von labilen Reaktionsprodukten sowie deren ökotoxikologischen Wirkungen.**

*Marc Böhler\*, Julian Fleiner, Christa S. McCardell, Rebekka Teichler und Hansruedi Siegrist, Eawag  
Cornelia Kienle und Miriam Langer, Oekotoxzentrum Eawag-EPFL  
Pascal Wunderlin, VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen»*

### RÉSUMÉ

#### PROJET RETREAT: ÉTUDES RELATIVES AUX PROCÉDÉS DE TRAITEMENT SECONDAIRE BIOLOGIQUE APRÈS UNE OZONATION

Le présent article fournit une vue d'ensemble des résultats du projet ReTREAT. L'objectif du projet était de tester l'efficacité de différents procédés de traitement secondaire biologique après une ozonation. L'objectif était – outre les effets généraux d'épuration – en particulier d'évaluer l'élimination des produits de réaction instables et leurs effets écotoxicologiques.

Il s'est avéré que, dans la STEP de Neugut, très peu de produits de réaction instables toxiques se sont formés suite à l'ozonation. Dans les cas où une légère augmentation de la toxicité a été constatée, celle-ci a pu être réduite de manière efficace, voire éliminée, par le biais des procédés de traitement secondaire étudiés. Les procédés se sont donc avérés efficaces. Une comparaison définitive des procédés est impossible, en raison de la faible toxicité des eaux usées ozonisées.

En outre, les procédés de traitement secondaire étudiés ont permis également d'éliminer des substances organiques (COD, COA), ainsi que des matières solides. Pour ces dernières, le filtre à sable et à charbon actif en grain (CAG) a fourni de meilleurs résultats que les systèmes ouverts (lit fixe, lit fluidisé).

Les micropolluants (MP), tout comme les produits de transformation étudiés, n'ont pu être entièrement éliminés que par le biais de la filtration au CAG. Dans le cas en question, l'élimination des

### EINLEITUNG

Zur Reduktion der Einträge von Mikroverunreinigungen (MV) in Gewässer werden in der Schweiz in den nächsten Jahren – neben anderen Massnahmen – ausgewählte Abwasserreinigungsanlagen (ARA) mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe ausgebaut [1]. Die gesetzlichen Grundlagen (Gewässerschutzgesetz, Gewässerschutzverordnung) sind seit dem 1. Januar 2016 in Kraft. Als mögliche Verfahren zur Elimination der MV steht sowohl die Adsorption an Aktivkohle (PAK) [2, 3] wie auch die Oxidation mit Ozon zur Verfügung [4, 5]. Beide Verfahrensvarianten sind wirtschaftlich, lassen sich relativ gut in die bestehende ARA integrieren und eliminieren eine grosse Bandbreite an MV. In umfangreichen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass durch die Elimination der MV auch ökotoxikologische Effekte signifikant reduziert werden und dadurch die Wasserqualität verbessert wird (z. B. [6]).

Bei der Umsetzung der technischen Verfahren zur Elimination der MV ist es wichtig, dass ein sachgemässer Gewässerschutz gewährleistet ist (Vollzugshilfe «Finanzierung von Massnahmen» [7]). Dies bedeutet z. B., dass bei Aktivkohleverfahren der PAK-Schlupf in die Gewässer minimal sein muss. Mit den bekannten, etablierten Abtrennverfahren ist das gewährleistet. Bei der Ozonung muss eine übermässige Bildung von

\* Kontakt: marc.boehler@eawag.ch

stabilen und potenziell toxischen Reaktionsprodukten vermieden werden. Es ist bekannt, dass nicht alle Abwässer für eine Behandlung mit Ozon geeignet sind, insbesondere, wenn spezielle Belastungen wie z.B. bedeutende Industrie- oder Gewerbeabwässereinleiter vorliegen [8]. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass frühzeitig abgeklärt wird, ob ein Abwasser für eine Ozonbehandlung geeignet ist [9]. Bei geeigneten Abwässern kann aber teilweise trotzdem direkt nach der Ozonung ein Anstieg der Toxizität auftreten, was durch sogenannte labile, toxische Reaktionsprodukte hervorgerufen wird (s. *weiter unten* [5, 10, 11, 12]). Es hat sich aber auch klar gezeigt, dass dieser Anstieg der Toxizität durch eine biologische Nachbehandlung (z.B. durch einen Sandfilter) wieder effizient eliminiert wird [6, 11, 12]. Aus diesem Grund gehört zu einer Ozonbehandlung zwingend eine biologisch aktive Nachbehandlungsstufe. Die meisten Erfahrungen liegen aktuell für die Sandfiltration vor. Es gibt aber auch weitere Verfahren, die sich potenziell als Nachbehandlungsstufe eignen können. Dazu wurde – unterstützt durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und durch die Umwelttechnologie-Förderung des Bundes – das Projekt ReTREAT durchgeführt, um weitere Verfahren auf ihre Eignung als Nachbehandlung nach einer Ozonung zu testen und im Detail zu evaluieren. Dabei wurden insbesondere die folgenden Verfahren berücksichtigt:

- bestehende, grosstechnische Sandfiltration (als Referenz)
- Wirbelbettsystem
- Festbettsystem
- granuliert Aktivkohle-(GAK)-Filtration

Das Projekt wurde auf der ARA Neugut (Dübendorf) durchgeführt. Die ARA Neugut verfügt über die erste grosstechnische Ozonung von kommunalem Abwasser in der Schweiz. Sie ist seit Anfang 2014 in Betrieb.

#### UNTERSUCHTE NACHBEHANDLUNGSVERFAHREN UND STAND DES WISSENS

Die Hauptaufgabe der biologischen Nachbehandlung ist die effiziente Elimination der in der Ozonung gebildeten labilen Reaktionsprodukte und deren ökotoxikologischen Effekte. Zusätzlich zeichnen sich die Verfahren durch weitere positive Effekte auf die Reinigungsleistung aus. So findet beispielsweise bei Raumfiltern (Sand-, GAK-Filtern) eine zusätzliche

Elimination von Feststoffen (und daran gebundenen Schwermetallen), von gelösten organischen Stoffen (DOC) und von Nährstoffen (Stickstoff, Phosphor) statt. Bei den sogenannten offenen Systemen (Wirbelbett, Festbett) ist der zusätzliche Rückhalt von Feststoffen (sowie daran gebundenen Schwermetallen und von Phosphor) gering.

Sandfilter sind bereits in einigen Projekten als Nachbehandlungsstufe untersucht worden (z.B. ARA Wüeri, Regensdorf), daher sind die Erfahrungen mit diesem System bereits relativ gross. Grundsätzlich ist es so, dass sich auf den Sandkörnern ein Biofilm mit biologischer Aktivität ausbildet, welcher die labilen, toxischen Reaktionsprodukte effizient eliminiert. Beim Wirbelbettverfahren wird ein spezifisches Trägermaterial verwendet, das durch Turbulenzen (mittels Rührwerken oder Belüftungsvorrichtungen) im Reaktor durchmischt wird. Auf dem Trägermaterial wachsen Mikroorganismen, die für die biologische Reinigung verantwortlich sind. Als biologische Nachbehandlung nach einer Ozonung wurde das Wirbelbett erst in zwei Projekten eingesetzt: auf der Kläranlage Duisburg-Vierlinden (Deutschland; [13]) sowie auf der ARA ProReno (Basel; [14]). Die Erfahrungen sind daher noch limitiert.

Das Festbettverfahren funktioniert ähnlich wie das Wirbelbettsystem, mit dem einzigen Unterschied, dass die für die biologische Reinigung verantwortlichen Mikroorganismen auf strukturierten Kunststoff-Aufwuchsträgern wachsen,

die im Reaktor fixiert sind. Das Abwasser umströmt diese Aufwuchsträger. Das Festbett muss periodisch rückgespült werden, um Verstopfungen zu verhindern. Auch bei diesem Verfahren liegen noch nicht viele Erfahrungen vor.

Ein weiteres potenzielles Nachbehandlungsverfahren stellt die granuliert Aktivkohle-(GAK)-Filtration dar. Auf dem Filtermaterial (GAK) entwickelt sich über die Zeit – analog zu den anderen Verfahren – eine biologische Aktivität, die sich positiv auf die Elimination von labilen, toxischen Reaktionsprodukten auswirkt. Wie bei Raumfiltersystemen üblich, weist auch die GAK-Filtration zusätzliche Reinigungseffekte auf – wie beispielsweise eine Feststoff- und DOC-Elimination. Zusätzlich werden MV durch Sorption eliminiert. Es gilt zu beachten, dass bei dieser Verfahrensordnung eigentlich zwei MV-Eliminationsverfahren seriell betrieben werden (Ozon und GAK). Eine derartige Verfahrenskombination (bei Vollozonung mit 0,4 bis 0,6 g O<sub>3</sub>/g DOC) geht daher über die gesetzlichen Anforderungen einer 80%-igen Reinigungsleistung bezogen auf Rohwasser [15] hinaus. Die Erfahrungen mit Verfahrenskombinationen sind noch gering, daher laufen gegenwärtig verschiedenste Untersuchungen im voll- und halbtechnischen Massstab (z.B. ARA Bülach-Furt, Abwasserverband Glarnerland). Eine andere Möglichkeit der biologischen Nachbehandlung stellt die Rückführung des mit Ozon behandelten Abwassers in die vorangehende biologische Stufe dar. Diese Verfahrensführung wurde auf der

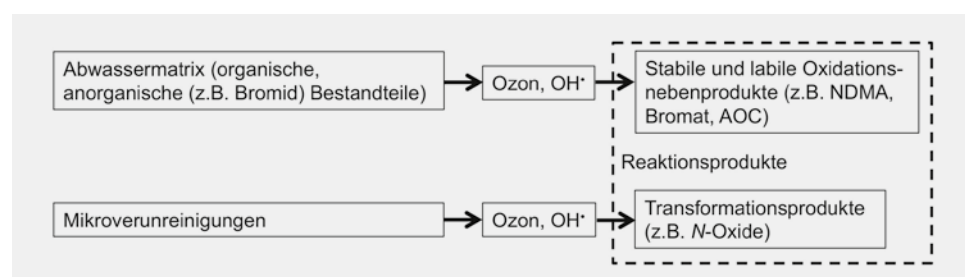


Fig. 1 Aus der Abwassermatrix entstehen durch die Behandlung mit Ozon stabile und labile Oxidationsnebenprodukte und aus den Mikroverunreinigungen Transformationsprodukte (z.B. N-Oxide). Labile, toxische Reaktionsprodukte werden in der Nachbehandlung wieder abgebaut. Entstehen stabile, toxische Oxidationsnebenprodukte (z.B. Bromat) ist das Abwasser nicht für eine Ozonung geeignet. Hierzu müssen frühzeitige Abklärungen zur Verfahrenseignung Ozonung gemäss der VSA-Empfehlung [9] durchgeführt werden. Die Darstellung ist in Anlehnung an [17].

*L'ozone peut entraîner dans les eaux usées la formation de produits de réactions instables et toxiques, qui sont ensuite éliminés lors du traitement secondaire, et celle de produits de transformation (N-oxydes) à partir des micropolluants. Si des produits d'oxydation toxiques stables (p. ex. du bromate) se forment, l'ozonation n'est pas appropriée pour les eaux usées concernées. À ce sujet, il convient de procéder suffisamment tôt à des clarifications relatives à l'adéquation des procédés d'ozonation, conformément à la recommandation du VSA [9]. La représentation se fonde sur [17].*

Kläranlage Schwerte (Deutschland) getestet [13]. Es hat sich gezeigt, dass dieses Betriebskonzept hydraulisch anspruchsvoll ist, und daher bei hohen Abwassermengen (Regenwetter) nur bedingt anwendbar ist. Aus diesem Grund wurde dieser Ansatz im vorliegenden ReTREAT-Projekt nicht weiterverfolgt.

#### HAUPTAUFGABE DER NACHBEHANDLUNG

Bei einer Ozonung werden die MV durch Ozon und OH-Radikale umgewandelt (Fig. 1). Typischerweise bleiben unproblematische Umwandlungsprodukte der Spurenstoffe – sogenannte Transformationsprodukte – zurück, die keine Wirkung oder deutlich geringere Effekte haben als die Ausgangssubstanz. Die Bestimmung dieser Transformationsprodukte ist sehr komplex und aufwendig. So wurde in einer umfangreichen Arbeit an der Eawag die Bildung von Transformationsprodukten aus der Umwandlung von Arzneimitteln untersucht [16]. Es zeigte sich, dass aus tertiären Aminen häufig N-Oxide entstehen. Erhöht man die spezifische Ozondosis, werden diese Transformationsprodukte weiter oxidiert. Eine eindeutige Bestimmung und die Quantifizierung eines Transformationsprodukts ist jedoch nur

dann möglich, wenn ein käuflicher Standard erhältlich ist. Dies ist aktuell nur für sehr wenige Stoffe der Fall, zum Beispiel für die N-Oxide.

Neben der Umwandlung von Spurenstoffen (Bildung von Transformationsprodukten) werden andere organische und anorganische Abwasserinhaltsstoffe ebenfalls oxidiert (Fig. 1). Aus Letzteren können sogenannte Oxidationsnebenprodukte entstehen, die potenziell eine erhöhte Toxizität aufweisen. Die meisten davon werden in der biologisch aktiven Nachbehandlungsstufe wieder abgebaut, wie beispielsweise Aldehyde, Ketone oder organische Säuren [17]. Aus diesem Grund ist eine biologische Nachbehandlung notwendig. Bei der Behandlung von ungeeigneten Abwässern mit Ozon können aber verschiedene stabile, toxische Oxidationsnebenprodukte, wie z. B. Bromat, gebildet werden, die in der Nachbehandlung nicht oder ungenügend abgebaut werden. Eine Ozonung ist in diesem Fall nicht geeignet. Diese Abwässer müssen frühzeitig identifiziert (VSA-Empfehlung «Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung») und ein alternatives (Aktivkohle-basiertes) Verfahren oder Massnahmen an der Quelle realisiert werden. Es kann somit

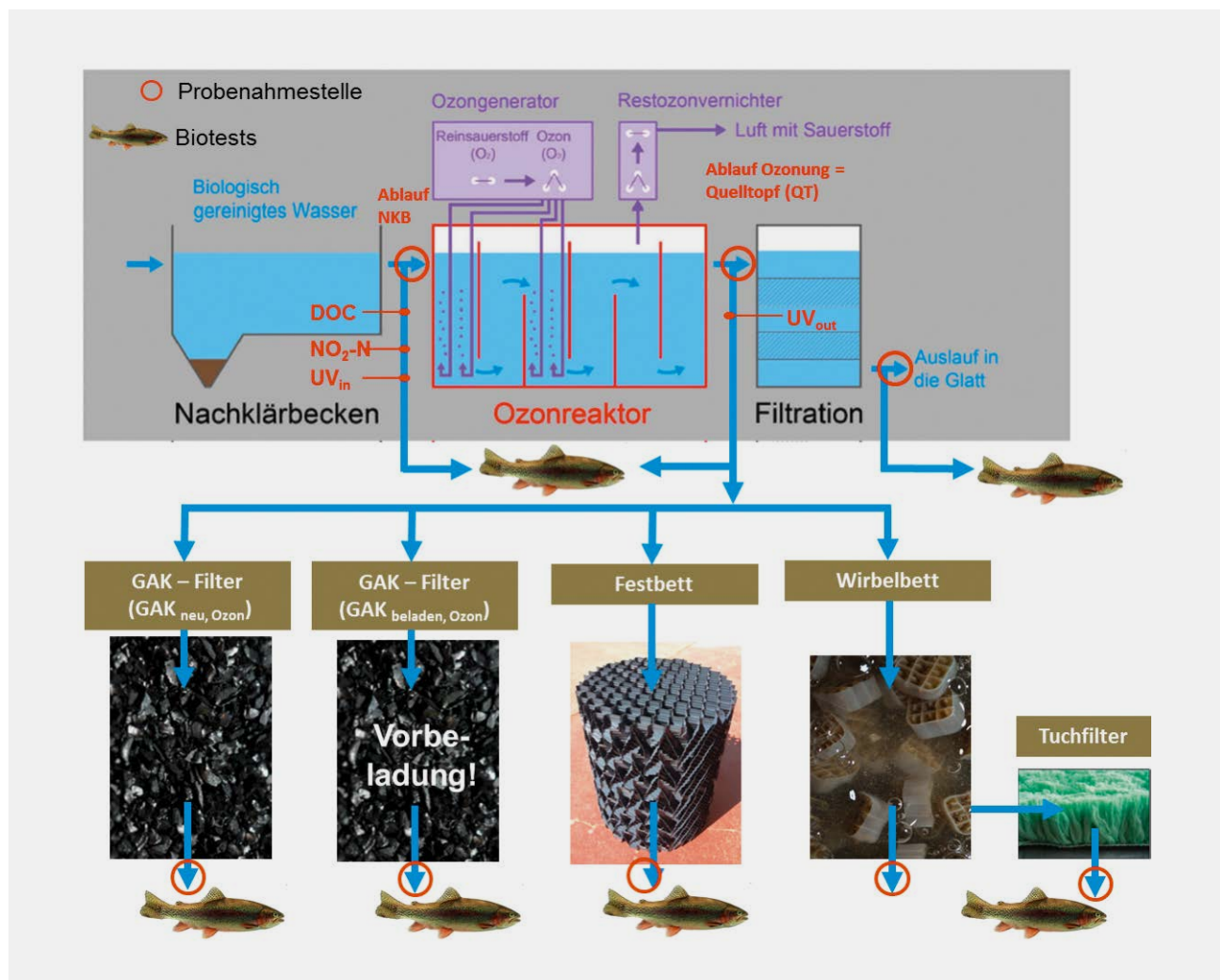


Fig. 2 Fließschema der Ozonung ARA Neugut und der biologischen Nachbehandlungen. Rote Kreise zeigen die Probenahmestellen an. Die Regenbogenforelle symbolisiert die Abläufe, mit denen Biotests durchgeführt wurden. Ein GAK-Filter (GAK<sub>beladen, Ozon</sub>) ist vorbeladen mit DOC sowie Spurenstoffen und wurde bereits zwischen 2012 und 2013 betrieben. (Quelle Fließschema: ARA Neugut)

Schéma de l'ozonation à la STEP de Neugut et des traitements secondaires biologiques. Les cercles rouges montrent les sites de prélèvement d'échantillons. La truite arc-en-ciel symbolise les processus, avec lesquels les tests biologiques ont été effectués. Un filtre à CAG (chargé de CAG, ozone) est préalablement chargé de COD et de micropolluants. Il était déjà utilisé entre 2012 et 2013.

festgehalten werden: Transformationsprodukte entstehen durch die Oxidation von MV und es entstehen typischerweise unproblematische Transformationsprodukte. Unerwünschte stabile und labile Oxidationsnebenprodukte (z. B. Bromat, NDMA) werden aus Reaktionen mit der Abwassermatrix gebildet. Es wird davon ausgegangen, dass bei kommunalem Abwasser Oxidationsnebenprodukte ökotoxikologisch relevanter sind als Transformationsprodukte [17]. Als Überbegriff für Transformations- und Oxidationsnebenprodukte kommt häufig der Ausdruck «Reaktionsprodukte» zur Anwendung.

## AUFBAU UND BETRIEB DER NACHBEHANDLUNGSVERFAHREN

Auf der ARA Neugut besteht die biologische Nachbehandlung aus zwei Sandfiltern mit je zwei Kammern, die über einen

Quelltopf (QT) beschickt werden (Fig. 2). Zusätzlich zu diesem grosstechnischen Sandfilter (in den Untersuchungen als Referenz herangezogen) wurden folgende drei Nachbehandlungsverfahren parallel im Pilotmassstab untersucht:

- Festbettsystem (FB)
- Wirbelbettsystem (WB)
- zwei GAK-Filter

Die beiden GAK-Filter unterscheiden sich darin, dass der eine Filter mit einer neuen granulierten Kohle ( $GAK_{neu,Ozon}$ ) betrieben wurde, während beim anderen Filter die Aktivkohle bereits mit rund 16 000 Bettvolumina (BV = behandelte Abwassermenge relativ zum Filterleerbettvolumen) vorbeladen war ( $GAK_{beladen,Ozon}$ ). Die durchschnittliche Aufenthaltszeit des Abwassers in beiden GAK-Filtern, wie auch im Sandfilter, war rund 15 Minuten. Die Kontaktzeit des

Abwassers im Festbett betrug im Mittel 25 Minuten respektive im Wirbelbett im Mittel 21 Minuten.

Die Pilotanlagen waren auf der ARA Neugut in einer separaten Versuchshalle untergebracht und wurden insgesamt über ein Jahr im Teilstrom betrieben. Die Beschickung erfolgte mengenproportional mit Pumpen über einen rund 200 Meter langen Werkkanal. Die Probenahme erfolgte im Ablauf der Nachklärung, im Ablauf der Ozonung (QT) sowie in den Abläufen der einzelnen Nachbehandlungsverfahren (Probenahmestellen sind in Figur 2 mit roten Kreisen markiert). Ebenfalls wurde an den jeweiligen Probenahmestellen kontinuierlich ein Teilstrom für die Biotests im Durchlaufsystem abgezweigt. Ein detaillierter Beschrieb der durchgeführten Untersuchungen ist in den Berichten [18] und [19] gegeben.

Kriterium	Ozonung	Sandfilter	GAK <sub>neu, Ozon</sub>	GAK <sub>beladen, Ozon</sub>	Wirbelbett	Wirbelbett und T.-filter	Festbett
<b>Hauptaufgabe der biologischen Nachbehandlung</b>							
1. NDMA	-	+	+	+	+	+	+
2. Ökotoxikologische Biotests zur Bestimmung der Effekte labiler, toxischer Reaktionsprodukte:							
Ames-Test		o	o	o		o	o
Wasserflöhe	o	o	o	o		o	o
Glanzwürmer	o	o	o	o		o	o
FELST-Test mit Regenbogenforellen	o	o	o	o		o	o
<b>Zusatzeffekte der Nachbehandlung</b>							
3. DOC-Reduktion	+	++	++	++	+	+	+
4. AOC-Reduktion	-	+++	+++	+++	+	+	+
5. Feststoffrückhalt (Schwermetalle, sorbierte MV, Nährstoffe)	o	+++	+++	+++	o	++	+
6. Mikroverunreinigungen	+++	o	+++	+	o	o	o
7. Transformationsprodukte	-	o	++	o	o	o	o
8. Ökotoxikologische Biotests zur Bestimmung der Effekte von MV:							
Leuchtbakterien	+++	o	+	o		o	o
Grünalgen	+++	o	++	+		o	o
Genexpression (FELST)	++	o	++	o		o	++
Histopathologie (FELST)	-	o	++	o		o	o
<i>Stabile Reaktionsprodukte (Ausschluss über VSA-Empfehlung «Abklärungen Verfahrenseignung Ozon»)</i>							
9. Bromat	-	o	o	o	o	o	o

Tab. 1 Übersicht über die Hauptaufgabe sowie Zusatzeffekte der verschiedenen Nachbehandlungen sowie die Einschätzung bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit. Die verwendeten Symbole sind wie folgt definiert: +++ = sehr gut / sehr hoch, ++ = gut / hoch, + = gering / mässig, o = neutral / keine Wirkung, - = negative Auswirkung. Die Bewertung basiert auf den Ergebnissen des Projekts ReTREAT. Andere Verfahrensführungen der betrachteten Technologien können zu anderen Ergebnissen und Erfahrungen führen. Die aufgeführten Kriterien entsprechen den betrachteten Aspekten in den Einzeluntersuchungen.

Aperçu du principal objectif et des effets complémentaires des différents traitements secondaires, et évaluation de leur efficacité. Les symboles utilisés dans ce tableau signifient: +++ = très bien / très élevé, ++ = bien / élevé, + = faible / moyen, o = neutre/ aucun effet, - = effet négatif. L'évaluation se fonde sur les résultats du projet ReTREAT dans la STEP Neugut. D'autres manières d'appliquer les technologies étudiées peuvent bien sûr aboutir à des expériences et des résultats différents. Les critères mentionnés correspondent aux aspects étudiés dans les différentes analyses.

## ERGEBNISSE UND BETRIEBSERFAHRUNGEN

In diesem Kapitel werden in einem ersten Teil die Ergebnisse der Eliminationsleistung bezüglich labiler, toxischer Reaktionsprodukte (und deren ökotoxikologischen Effekten) diskutiert, da dieser Aspekt die Hauptanforderung an die biologische Nachbehandlung nach einer Ozonung darstellt. In einem zweiten Teil wird auf die zusätzlichen Leistungen der untersuchten Verfahren sowie auf relevante Betriebserfahrungen eingegangen. Bei den zusätzlichen Eliminationsleistungen liegt der Fokus insbesondere auf folgenden Parametern: DOC- und AOC-Elimination, Feststoffabtrennung, zusätzliche Elimination von MV und der damit verbundenen Toxizität sowie die Elimination der gebildeten Transformationsprodukte. Eine kompakte Übersicht über die Resultate ist in *Tabelle 1* gegeben.

### HAUPTAUFGABE

Elimination der labilen, toxischen Reaktionsprodukte und der damit verbundenen ökotoxikologischen Effekte

Zur Evaluation der Eliminationseffizienz der labilen, toxischen Reaktionsprodukte durch die untersuchten Nachbehandlungsverfahren wurden verschiedene Biotests durchgeführt (*Fig. 3*):

- Ames-Test (Mutagenität)
- Fortpflanzungstests mit Wasserflöhen und Glanzwürmern
- *Fish Early Life Stage Toxicity*-(FELST)-Test mit Regenbogenforellen zur Erfassung von Auswirkungen auf die Fischentwicklung

Diese Biotests wurden in einer Betriebsphase durchgeführt, in welcher die Ozonung bei einer konstanten spezifischen Ozonosis von 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC (2,7 g O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>) betrieben wurde. Es wurden die Abläufe der Nachklärung, der Ozonung sowie der verschiedenen Nachbehandlungsverfahren untersucht. Weite-

re Biotests, die eine ökotoxikologische Verbesserung durch die zusätzliche Elimination von Mikroverunreinigungen anzeigen, werden weiter unten diskutiert.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass durch die Ozonung auf der ARA Neugut keine oder kaum labile, toxische Reaktionsprodukte gebildet wurden. Die Toxizität des Abwassers direkt nach der Ozonung (d.h. vor der Nachbehandlung) war insgesamt sehr gering. Lediglich in einer der untersuchten Proben wurde unmittelbar nach der Ozonung eine Mutagenität (Ames-Test) angezeigt, die jedoch in allen Nachbehandlungsverfahren wieder effizient verringert oder gar vollständig eliminiert wurde. Basierend auf diesen Resultaten kann gesagt werden, dass die untersuchten Nachbehandlungsverfahren – hinsichtlich ihrer Hauptaufgabe – insgesamt positiv abgeschnitten haben, und lediglich geringfügige Unterschiede in deren Effizienz detektiert werden konnten. Aufgrund der insgesamt geringen Toxizität des Abwassers unmittelbar nach der Ozonung ist ein direkter Vergleich der untersuchten Nachbehandlungsverfahren mit den angewandten Methoden nicht abschliessend möglich.

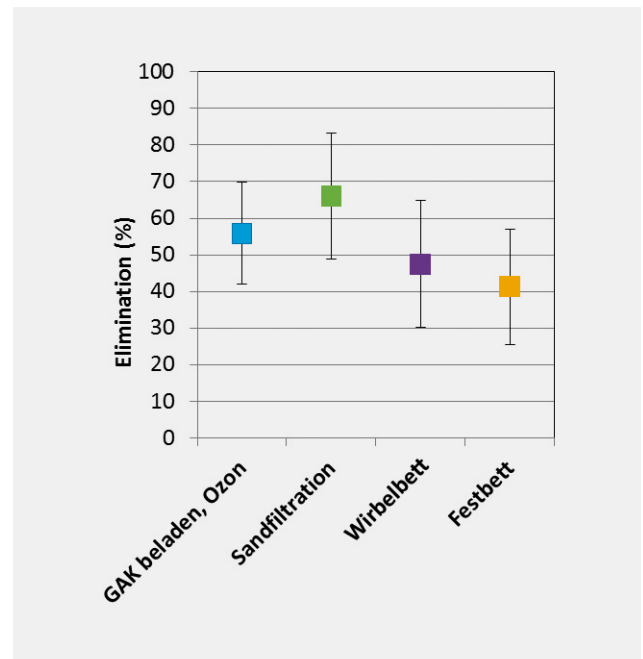
Die Nitrosamine, mit *N*-Nitrosodimethylamin (NDMA) als wichtigstem Vertreter, umfassen eine Gruppe von Stoffen mit kanzerogener Wirkung. Deren Bildung muss daher minimiert werden. Im Falle von NDMA hat sich gezeigt (*Fig. 4*), dass eine Bildung durch die Ozonung stattfindet, aber es durch die Nachbehandlung wieder teilweise eliminiert wird. Der NDMA-Abbau in den verschiedenen Messkampagnen war sehr variabel (relativ grosse Standardabweichung), was einen abschliessenden Vergleich der Verfahren schwierig macht.

Bromid wurde im Abwasser normalerweise im Konzentrationsbereich von 60 µg/l gefunden, was zu einer Bildung von unproblematischen Konzentrationen an Bromat führte (ca. 2 µg/l Bromat). Bromat wurde durch die verschiedenen Nachbehandlungsstufen erwartungsgemäss nicht abgebaut.



*Fig. 3* Aufbau des Fischtest in der Versuchshalle der ARA Neugut. Das kleine Bild (unten links) zeigt junge Regenbogenforellen mit Dottersack.

Test mis en place sur les poissons dans la halle d'essai de la STEP de Neugut; la petite photo (en bas à g.) montre de jeunes truites arc-en-ciel avec leur sac vitellin.



*Fig. 4* Elimination von NDMA in den verschiedenen biologischen Nachbehandlungen (Bettvolumen GAK<sub>beladen, Ozon</sub>: 40 000)

Elimination de NDMA lors des différents traitements secondaires biologiques (volume de lit CAG<sub>chargé, ozone</sub>: 40 000)

**ZUSATZEFFEKTE**

Elimination der gelösten organischen Stoffe (DOC)

Durch die Behandlung des Abwassers mit Ozon werden nicht nur die MV umgewandelt, sondern auch weitere organische Stoffe (DOC). Der Abbau des DOC ist dabei direkt abhängig von der spezifischen Ozondosis. In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass der DOC bei einer spezifischen Ozondosis von 0,5 bis 0,7 g O<sub>3</sub>/g DOC (2,5 bis 3 g O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>, bei einer DOC-Konzentration im Zulauf zur Ozonung von zirka 5 mg/l) um 5 bis 15% - bezogen auf den Ablauf der Nachklärung - reduziert wurde (Fig. 5). In absoluten Zahlen ergibt dies eine DOC-Abnahme um 0,4 mg/l bei einer spezifischen Ozondosis von 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC (2,7 g O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>; die zusätzlichen Beiträge durch die Nachbehandlungsverfahren werden weiter unten diskutiert). Diese DOC-Reduktion ist vergleichsweise hoch: So wurde in anderen Studien [5, 12, 13] keine oder lediglich eine sehr geringe Reduktion durch die Ozonung gemessen. Daraus wird gefolgert, dass die DOC-Elimination in der Ozonung hauptsächlich durch die Abwassermatrix beeinflusst wird.

Nachfolgend wird auf die zusätzliche DOC-Elimination durch die untersuchten Nachbehandlungsverfahren eingegangen. Die Resultate sind in der Figur 5 dargestellt.

Bei der Sandfiltration betrug die DOC-Elimination durchschnittlich 20%, was vergleichbar ist mit anderen halb- und volltechnischen Untersuchungen [5, 20]. Gesamthaft (Ozonung und Sandfilter) wurde der DOC somit um rund 10 bis 25% reduziert, bei einer spezifischen Ozondosis von 0,5 bis 0,7 g O<sub>3</sub>/g DOC. Die zusätzliche Elimination des DOC im Sandfilter resultiert einerseits aus dem Abbau der biologisch verfügbaren Anteile und andererseits aus der Anlagerung von kolloidalen organischen Stoffen an den Biofilm auf dem Filtermaterial.

Die durchschnittliche DOC-Reduktion im Wirbelbettsystem betrug rund 6%. Beim Festbettsystem lag dieser Wert ähnlich tief, im Bereich von 4 bis 5%. Die DOC-Elimination dieser beiden Verfahren ist somit deutlich geringer als beim Sandfilter (wie auch bei den GAK-Filtern; s. weiter unten), was sich mit einer geringeren Filterwirkung (offenes System) sowie einer geringeren Biomassedichte erklären lässt. Beim Festbettsystem konnte in der

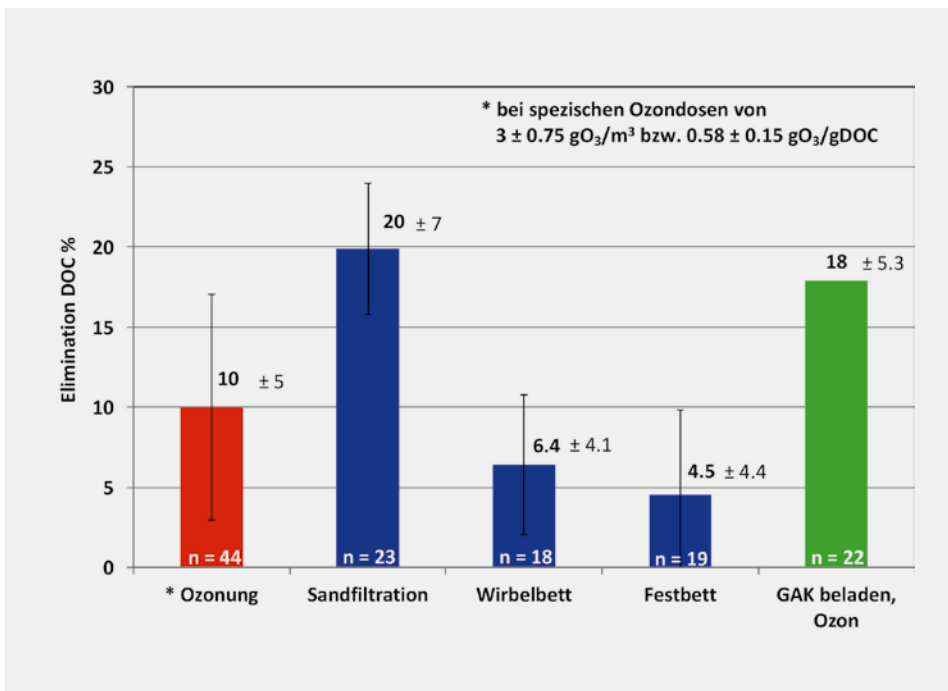


Fig. 5 Übersicht der mittleren DOC-Elimination in der Ozonung und in den verschiedenen Nachbehandlungen bei unterschiedlichen spezifischen Ozondosen.

Aperçu de l'élimination moyenne de COD lors de l'ozonation et des différents traitements secondaires avec différentes doses spécifiques d'ozone.

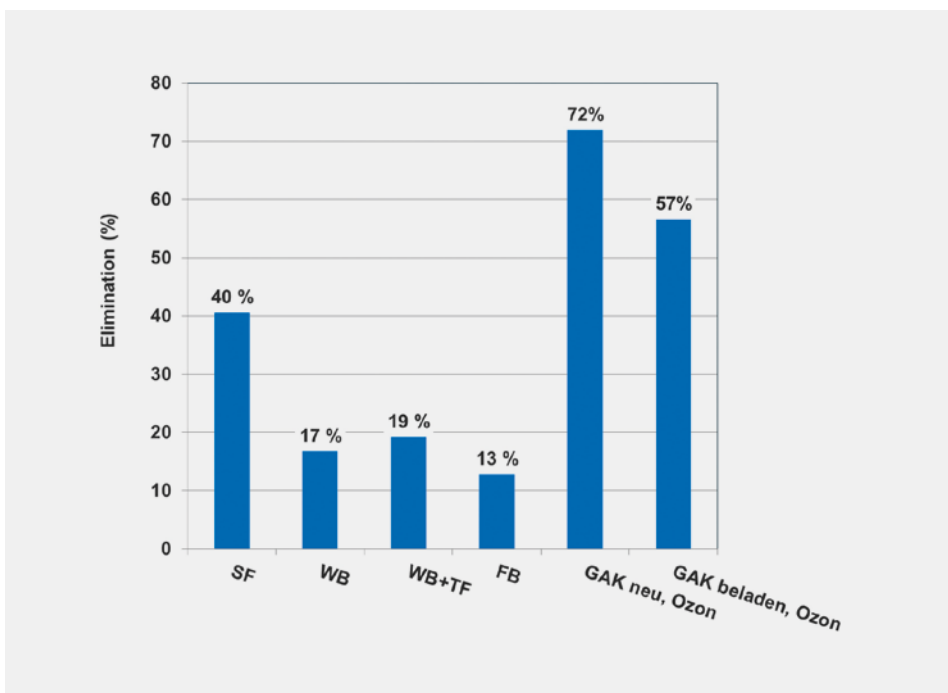


Fig. 6 Reduktion von assimilierbarem, organischem Kohlenstoff (AOC) in den Nachbehandlungen Sandfiltration (SF), Wirbelbett (WB), WB mit nachgeschaltetem Tuchfilter (TF), Festbett (FB) sowie den GAK-Filtern GAK<sub>neu, Ozon</sub> und GAK<sub>beladen, Ozon</sub>. Die Resultate basieren auf drei unabhängigen Messungen. Mittelwert ± Standardabweichung

Réduction du carbone organique assimilable (COA) lors des traitements secondaires filtration sur sable (FS), lit fluidisé (LFI), LF avec filtre textile situé en aval, lit fixe (LFI) et filtres à CAG de CAG<sub>nouveau, ozone</sub> et de CAG<sub>chargé, ozone</sub>. Les résultats se fondent sur trois mesures distinctes. Moyenne ± écart type

Tat kein deutlicher Biofilmbewuchs festgestellt werden. Dies lag daran, dass das

Festbett massiv mit Wasserschnecken befallen war, welche den Biofilm abfrassen.

Überraschend war hingegen die geringe Leistung des Wirbelbetts, was sich nicht abschliessend erklären lässt. Ähnliche Beobachtungen in Bezug auf eine geringe Leistung wurden jedoch auch in den Untersuchungen auf der Kläranlage Duisburg-Vierlinden (NRW, D) gemacht [13].

Die GAK-Filter sind insgesamt vergleichbar mit dem Sandfilter bezüglich der DOC-Elimination. Es hat sich gezeigt, dass der bereits vorbeladene GAK-Filter ( $GAK_{\text{beladen,Ozon}}$ ) den DOC im Mittel um rund 18% eliminiert hat. Daraus resultiert eine gesamte DOC-Elimination (Ozonung und GAK-Filter) von 25% bezogen auf den DOC im Zulauf zur Ozonung. Der Filter mit frischer GAK ( $GAK_{\text{neu,Ozon}}$ ) hat nach der Behandlung von zirka 20 000 BV auch nach Erlöschen der Adsorptionskapazität noch eine DOC-Elimination im Bereich von 15 bis 20% ergeben. Für die GAK-Filter ergeben sich daher die gleichen Eliminationsleistungen und -mechanismen wie beim Sandfilter.

Elimination des assimilierbaren organischen Kohlenstoffes (AOC)

Durch die Behandlung mit Ozon entstehen biologisch verfügbare organische Stoffe, sogenannter assimilierbarer organischer Kohlenstoff (AOC). Die Untersuchungen auf der ARA Neugut haben gezeigt, dass der AOC durch die Ozonung (bei einer spezifischen Ozondosis von 0,55 g  $O_3$ /g DOC) deutlich zunimmt

(von 90 auf 281  $\mu\text{g/l}$ ). Im Weiteren hat sich gezeigt, dass der gebildete AOC auf den untersuchten Nachbehandlungsstufen insgesamt sehr unterschiedlich abgebaut wurden: Die Sandfiltration eliminierte den AOC um durchschnittlich 40%, während beim Wirbelbett- und Festbettsystem die Elimination deutlich geringer ausfiel (Wirbelbett: 17%; Festbett: 13%, Fig. 6). Somit konnte zwar eine biologische Aktivität auf dem Fest- und Wirbelbett bestätigt werden, diese biologische Aktivität war aber insgesamt tief (u. a. bedingt durch den Schneckenbefall beim Festbett). Erwartungsgemäss lag die AOC-Elimination bei den GAK-Filtern am höchsten, wobei der Filter mit der frischen GAK ( $GAK_{\text{neu,Ozon}}$ ; 15 000 BV) tendenziell effektiver war (72%-ige Elimination) als der vorbeladene GAK-Filter ( $GAK_{\text{beladen,Ozon}}$ ; 35 000 BV; 57%-ige Elimination). Dieses bessere Abschneiden der GAK-Filter verglichen mit den anderen Nachbehandlungsverfahren kann damit erklärt werden, dass sie zusätzlich zur biologischen Elimination den AOC durch Sorption effizient aus dem Abwasser entfernt haben.

Elimination der Feststoffe (GUS)

Eine weitere zusätzliche Leistung der Nachbehandlung ist die Abtrennung der Feststoffe (GUS). Hier ist es grundsätzlich so, dass offene Systeme (Fest- und Wirbelbettsysteme) weniger effizient sind als Filtersysteme (Sand-, GAK-Filter).

Die Resultate in Fig. 7 bestätigen, dass das Wirbelbett (durchschnittlicher Feststoffrückhalt von 4%) sowie das Festbett (durchschnittlicher Feststoffrückhalt von 17%) deutlich schlechter abgeschnitten haben als die anderen Nachbehandlungsverfahren: Beim Sandfilter lag der GUS-Rückhalt bei durchschnittlich 75%, und beim GAK-Filter im Bereich von 70 bis 80% (die Feststoffe im Filterzulauf waren jedoch mit 1 bis 2 mg/l bereits recht tief).

Durch eine nachgeschaltete Tuchfiltration beim Wirbelbett konnte der Feststoffrückhalt erwartungsgemäss erhöht werden. Der Feststoffrückhalt lag durch diese Massnahme bei zirka 50% (über das Wirbelbett und den Tuchfilter betrachtet), was vergleichbar ist mit dem Sandfilter. Es ist jedoch anzumerken, dass der verwendete Tuchfilter nicht optimal ausgelegt war, da er ursprünglich bei einer anderen hydraulischen Belastung eingesetzt wurde. Nichtsdestotrotz kann bei einer optimalen Auslegung von einem vergleichbaren Feststoffrückhalt ausgegangen werden wie bei einem Sandfilter.

Weitere Elimination der MV und deren ökotoxikologischen Effekte durch GAK Grundsätzlich werden die Mikroverunreinigungen (MV) durch die Ozonung bei einer Ozondosis von 0,55 g  $O_3$ /g DOC (2,0–3,3 mg  $O_3$ /l) gut eliminiert. Eine Ozondosis von 0,40 g  $O_3$ /g DOC (1,5–2,5 mg  $O_3$ /l) wären für die 80%-ige Elimination der Leitsubstanzen eigentlich bereits ausreichend, jedoch kann mit der erhöhten Dosis sichergestellt werden, dass auch eventuell auftretende Nitritspitzen von bis zu 0,2 mg  $NO_2^-$ -N/l abgefangen werden können. Eine solche Kompensation ist nicht notwendig, wenn die Ozondosierung über das UV-Signal vor und nach der Ozonung (Delta-UV) geregelt wird [21]. Durch eine rein biologische Nachbehandlung (Sandfilter, Wirbelbett- und Festbettsystem) wurden die MV nicht weiter abgebaut. Ebenfalls wurden auch die quantifizierbaren und stabilen in der Ozonung gebildeten Transformationsprodukte wie z. B. N-Oxide [18, 19] nicht weiter abgebaut. Zu Transformationsprodukten, für die kein käuflicher Standard vorhanden ist, kann keine abschliessende Aussage gemacht werden.

Die Untersuchungen haben weiter gezeigt, dass bei der GAK-Filtration (sowohl bei der neuen als auch bei der vorbeladenen

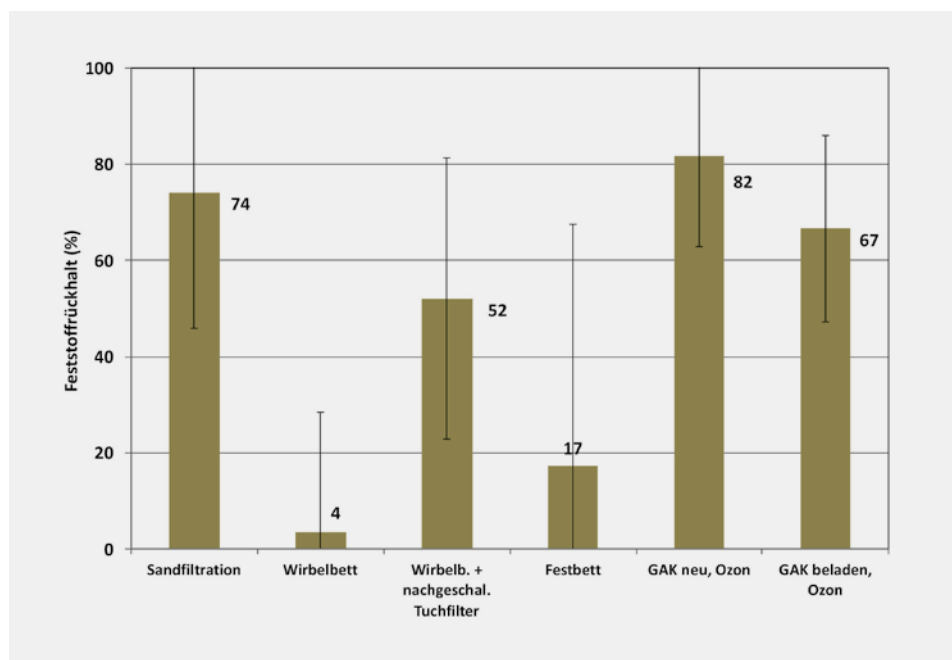


Fig. 7 Rückhalt von Feststoffen in den betrachteten Nachbehandlungen mit Bezug zum Ablauf der Ozonung  
Rétention de matières solides lors des traitements étudiés secondaires en rapport à l'ozonation

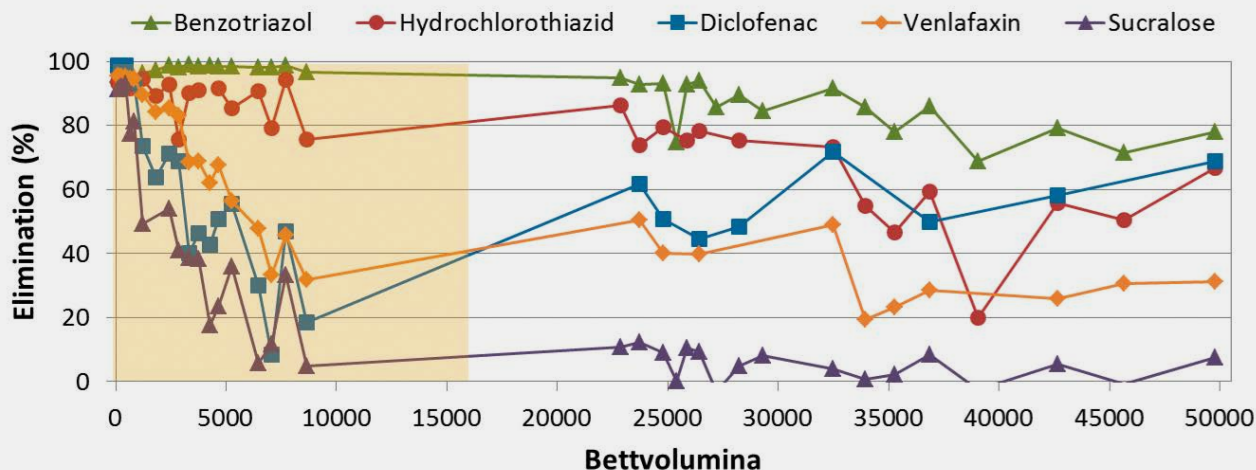


Fig. 8 Elimination einiger Leitsubstanzen und des Süßstoffes Sucralose im GAK-Filter  $GAK_{\text{beladen, Ozonung}}$ . Mit bis zu 16 000 Bettvolumen wurde der Filter mit Abwasser vom Ablauf der Nachklärung betrieben, danach mit ozontem Abwasser der ARA Neugut. Die Elimination der MV durch den GAK-Filter stellt einen zusätzlichen positiven Aspekt dar, der jedoch über die gesetzlichen Anforderungen hinausgeht und nicht zur Kernaufgabe der Nachbehandlung gehört.

Elimination de certains marqueurs et du sucralose (édulcorant) dans le filtre à  $GAK_{\text{chargé, ozonation}}$ . Jusqu'à 16 000 volumes de lit, le filtre a été utilisé avec des eaux usées provenant de la décantation, puis avec des eaux usées ozonisées de la STEP de Neugut. L'élimination des MP par le biais du filtre à GAK présente un aspect positif supplémentaire qui va toutefois au-delà des dispositions légales et ne fait pas partie de l'objectif principal du traitement secondaire.

GAK) aufgrund der Sorptionsleistung eine zusätzliche Elimination der MV stattfindet, was über die gesetzlichen Anforderungen hinausgeht. Zudem werden auch die quantifizierten Transformationsprodukte (*N*-Oxide) teilweise eliminiert. Figur 8 zeigt, dass bei einem GAK-Betrieb über eine längere Zeit (50 000 BV) nach wie vor eine gute Elimination (> 60%) für einzelne MV, wie beispielsweise Benzotriazol und Diclofenac, auftritt. Es kann daher spekuliert werden, dass zusätzlich zur Adsorption auch eine gewisse biologische Elimination dieser Stoffe stattfindet. Diese Prozesse müssen aber noch vertiefter untersucht werden. Bei den Transformationsprodukten zeigt sich, dass sie beim Filter mit der neuen GAK ( $GAK_{\text{neu, Ozon}}$ ) anfangs (wenige 1000 BV) relativ gut zurückgehalten werden, jedoch mit zunehmender Laufzeit rasch durchbrechen (bei 10 000 BV ist die Elimination bereits geringer als 80%). Bei 25 000 BV wird lediglich noch Chlorothiazid – das Transformationsprodukt von Hydrochlorothiazid – mit 40% relativ gut eliminiert. Diese schlechte Elimination der Transformationsprodukte durch die GAK kann damit erklärt werden, dass die Stoffe durch die Oxidation tendenziell kleiner und polarer werden, und dadurch weniger gut an die Aktivkohle adsorbieren.

Angewandte Biotests, welche eine Verbesserung der ökotoxikologischen Effekte durch die Elimination der MV aufzeigt, sind:

- Leuchtbakterientest
- kombinierter Grünalgentest
- Genexpressionsuntersuchungen mit Regenbogenforellen des *Fish Early Life Stage Toxicity-Tests*

Diese Untersuchungen wurden in einer Betriebsphase durchgeführt, in welcher die Ozonung bei einer konstanten spezifischen Ozondosis von 0,55 g  $O_3$ /g DOC (2,7 g  $O_3$ /m<sup>3</sup>) betrieben wurde. Es wurden die Abläufe der Nachklärung, der Ozonung sowie

der verschiedenen Nachbehandlungsverfahren untersucht (Fig. 2). Mit diesen Untersuchungen konnte bestätigt werden, dass durch die Behandlung des Abwassers mit Ozon die negativen ökotoxikologischen Effekte durch Mikroverunreinigungen (z. B. auf die Grünalgen) signifikant verringert werden. Das ist nicht überraschend, denn dies ist das Ziel der Ozonung. Eine weitere Abnahme dieser Effekte über die Nachbehandlungsstufen konnte lediglich bei den GAK-Filtern gemessen werden. Wobei nicht nur beim frischen ( $GAK_{\text{neu, Ozon}}$ ; mit 13 000 bis 20 000 BV), sondern auch beim beladenen GAK-Filter ( $GAK_{\text{beladen, Ozon}}$ ; mit 35 000 bis 43 000 BV) eine zusätzliche Verbesserung aufgetreten ist, bei Ersterem jedoch deutlich stärker als bei Letzterem. Diese weitere Abnahme der ökotoxikologischen Effekte ist klar dadurch zu erklären, dass die GAK zusätzlich zur Ozonung noch weitere MV eliminiert. Die mittlere Elimination der Leitsubstanzen lag hier aber bei 90% bis zum Erreichen von etwa 30 000 Bettvolumina (bei einer Ozondosis von 0,55 g  $O_3$ /g DOC mit  $GAK_{\text{neu, Ozon}}$ ), was über die gesetzlich geforderte Eliminationsleistung von 80% gegenüber Rohwasser hinausgeht.

Detaillierte Informationen zu den angewendeten Biotests finden sich in [6] und im Bericht zu den ökotoxikologischen Untersuchungen in ReTREAT [18].

#### ALLGEMEINE ASPEKTE ZU DEN BETRIEBSERFAHRUNGEN

Die untersuchten Nachbehandlungsverfahren zeigten sich insgesamt als sehr robust im Betrieb und relativ störungsfrei. Der Sandfilter ist ein etabliertes Verfahren, und es gibt keine nennenswerten Unterschiede in Kombination mit einer Ozonung. Beim Wirbelbett muss darauf geachtet werden, dass aufschwimmende Aufwuchskörper nicht über den Ablauf ausgeschwemmt werden. Insbesondere am Anfang, wenn sie noch nicht ausreichend bewachsen sind, neigen sie dazu, verstärkt



aufzuschwimmen. Ebenfalls muss bei der Ausführung berücksichtigt werden, dass die Aufwuchskörper nicht in den Ozonungsreaktor eindringen können. Das Festbettssystem wurde lediglich in grösseren Zeitabständen rückgespült (aufgrund der Wabenpackung kommt es nur zu einem geringen Rückhalt an Feststoffen). Dies kann gleichzeitig der Grund sein, warum es immer wieder zu einem massiven Schneckenbefall (Blasenschnecken der Familie der *Physidae*) kam. Diese können sich unter günstigen Bedingungen äusserst stark vermehren und fressen den Biofilm auf den Oberflächen der Wabenpackung ab, was sich entsprechend negativ auf die biologische Leistungsfähigkeit des Systems auswirken kann. Das Schaffen von periodischen anaeroben Zuständen im Festbett (durch Unterbrechen der Beschickung) hat zwar zum Absterben der Schnecken geführt, diese besiedelten das System danach aber wieder relativ schnell. Dieses Verfahren ist daher in dieser Ausführung bedingt als biologisches Nachbehandlungsverfahren geeignet. Schnecken wurden auch vereinzelt im Überstau bei einem der GAK-Filter (GAK<sub>beladen,Ozon</sub>) beobachtet. Sie besiedelten diesen jedoch deutlich weniger stark als das Festbett. Die Hauptursache dafür sind vermutlich die regelmässigen Rückspülungen – und

die Erzeugung von massiven Durchmischungen und Scherkräften –, wodurch der Schneckenlaich und die Schnecken zerrieben wurden.

## FAZIT

Bei Abwässern, die für eine Behandlung mit Ozon geeignet sind, können labile, toxische Reaktionsprodukte entstehen, die aber durch die biologische Nachbehandlung wieder eliminiert werden. Im Rahmen des Projekts ReTREAT wurden verschiedene Verfahren auf deren Eignung als biologische Nachbehandlung nach einer Ozonung untersucht. Es hat sich gezeigt, dass auf der ARA Neugut grundsätzlich sehr wenige labile, toxische Reaktionsprodukte durch die Ozonung gebildet wurden, da das Abwasser für eine Behandlung mit Ozon geeignet ist. In den Fällen, wo eine leichte Erhöhung der Toxizität aufgetreten ist, wurde diese aber durch die untersuchten Nachbehandlungsverfahren wieder effizient reduziert beziehungsweise eliminiert. Die Verfahren haben somit in diesem Sinne positiv abgeschnitten. Ein abschliessender Vergleich der Verfahren ist aufgrund der geringen Toxizität des ozonten Abwassers nicht möglich. Im Weiteren eliminieren die untersuchten Nachbehandlungsverfahren zusätzlich auch organische Stoffe

(DOC, AOC) wie auch Feststoffe, wobei die Sand- und GAK-Filter deutlich besser abgeschnitten haben als die offenen Systeme (Fest-, Wirbelbett).

Mikroverunreinigungen wurden nur durch die GAK-Filtration weiter eliminiert, ebenso die untersuchten Transformationsprodukte. Die Elimination der MV durch den GAK-Filter in Kombination mit der Vollozonung ging somit über die gesetzlichen Anforderungen hinaus. Die Betriebserfahrungen zeigen, dass alle vier Systeme robust im Betrieb und wartungsarm sind. Beim Festbett ist der massive Schneckenbefall hervorzuheben, der sich insgesamt negativ auf die biologische Aktivität ausgewirkt hat. Beim Wirbelbett ist auf einen effizienten Rückhalt der Aufwuchskörper zu achten.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Dominguez, D. et al. (2016): Reduktion der Spurenstoffe in Gewässern. *Aqua & Gas*; Nr. 1, S. 16-23
- [2] Boehler, M. et al. (2012): Removal of micropollutants in municipal wastewater treatment plants by powder-activated carbon. *Water Science and Technology*, Vol. 66 Issue: 10, pp. 2115-21
- [3] Metzger, S. (2010): Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser. *Dissertation TU Berlin, Oldenbourg Industrieverlag München*
- [4] Abegglen, C.; Siegrist, H. (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. *Bundesamt für Umwelt – Wissen Nr. 1214: 210 S.* ([www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01661/index.html?lang=de](http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01661/index.html?lang=de))
- [5] Abegglen, C. et al. (2009): Schlussbericht Pilotversuche Regensdorf, Eawag, AWEL, Bafu, BMG, Hunziker BetaTech.
- [6] Kienle, C. et al. (2015): Ökotoxikologische Biotests – Anwendung von Biotests zur Evaluation der Wirkung und Elimination von Mikroverunreinigungen. *Aqua & Gas* 7/8:18-26
- [7] Dominguez, D. et al. (2016): Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasseranlagen. Finanzierung von Massnahmen. *Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1618: 34 S.*
- [8] Wunderlin, P. et al. (2015): Behandelbarkeit von Abwasser mit Ozon – Testverfahren zur Beurteilung. *Aqua & Gas*, Nr. 7/8, S. 28-38
- [9] VSA (2017): Empfehlung «Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung»
- [10] Margot, J. et al. (2011): Traitement des micropolluants dans les eaux usées – Rapport final sur les essais pilotes à la STEP de Vidy (Lausanne), Ed. Ville de Lausanne
- [11] Stalter, D. et al. (2010): Toxication or detoxication? In vivo toxicity assessment of ozonation as advanced wastewater treatment with the rainbow

## WEITERE INFOS ZUM ReTREAT-PROJEKT

Ausführliche Details zu den Erfahrungen und Ergebnissen des Projekts ReTREAT sind im Projekt-Schlussbericht [19] sowie in einem separaten Bericht zu den ökotoxikologischen Untersuchungen [18] dokumentiert. Sie werden auf der Website der VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen» ([www.micropoll.ch](http://www.micropoll.ch)) zur Verfügung gestellt.

## EMPFEHLUNG

Aufgrund der in diesem Artikel beschriebenen Untersuchungen können die folgenden Empfehlungen abgegeben werden:

- Ein konventionell dimensionierter Sandfilter mit einer Aufenthaltszeit (Filterbettdicke/ Filtergeschwindigkeit) von rund 15 Minuten bei mittlerem Trockenwetterzufluss ist effektiv in der biologischen Nachbehandlung und weist zusätzliche Reinigungseffekte auf.
- Der GAK-Filter scheint ein alternatives, effizientes Nachbehandlungsverfahren zu sein, allerdings mit einer zusätzlichen MV-Elimination, was über die gesetzlichen Anforderungen einer Nachbehandlung hinausgeht. Es gibt aber nach wie vor Unsicherheiten bezüglich einer optimalen Auslegung einer Verfahrenskombination.
- Das Wirbelbettssystem ist grundsätzlich als Nachbehandlungsverfahren geeignet. Zusätzliche Untersuchungen sind jedoch zu empfehlen.
- Das Festbettssystem ist in der untersuchten Ausführung aufgrund eines massiven Schneckenbefalls bedingt geeignet.

- trout. *Water Res.* 44(2), 439–448
- [12] Stalter, D.; Magdeburg, A.; Oehlmann, J. (2010): Comparative toxicity assessment of ozone and activated carbon treated sewage effluents using an in vivo test battery. *Water Res.* 44(8), 2610–2620
- [13] ARGE (2014): Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen, Untersuchungs- und Entwicklungsvorhaben im Bereich Abwasser zum Themenschwerpunkt: Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen, Abschlussbericht zur Phase 2 (Januar 2012 bis Juni 2013), Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren, Vergabenummer 08-058/1, Arge Spurenstoffe NRW, Teilprojekt 6, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW [www.lanuv.nrw.de/uploads/tx\\_mmkresearchprojects/Phase2\\_Abschlussbericht\\_2014.pdf](http://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx_mmkresearchprojects/Phase2_Abschlussbericht_2014.pdf)
- [14] Fux, C. et al. (2015): Ausbau der ARA Basel mit 4. Reinigungsstufe – Pilotstudie: Elimination Mikroverunreinigungen und ökotoxikologischer Wirkungen, *Aqua & Gas*, Nr. 7/8, S. 10–17
- [15] Verordnung des UVEK zur Überprüfung des Reinigungseffekts von Massnahmen zur Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasserreinigungsanlagen, vom 3. November 2016 (Stand am 1. Dezember 2016), 814.201.231
- [16] Borowska, E. et al. (2016): Oxidation of cetirizine, fexofenadine and hydrochlorothiazide during ozonation: Kinetics and transformation products. *Wat. Res.*, 94, 350–362, [dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.020](https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.020)
- [17] 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, *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 2, 421, DOI: 10.1039/c6ew00025h
- [18] Kienle, C. et al. (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
- [19] Böhler, M. et al. (2017): Biologische Nachbehandlung von kommunalem Abwasser nach Ozonung – ReTREAT, Abschlussbericht für das Bundesamt für Umwelt im Rahmen eines Projektes der Technologieförderung, Eawag, Dübendorf
- [20] Kreuzinger, N. et al. (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)
- [21] Fleiner, J. et al. (2015): «Ozonung ARA Neugut, Dübendorf – Grosstechnische Optimierung der Ozondosierung», Schlussbericht BAFU, [www.micropoll.ch/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Dokumente/01\\_Berichte/02\\_Technische\\_Verfahren/02\\_Ozonung/Schlussbericht\\_2015-UTF\\_Optimierung\\_der\\_Ozondosierung\\_-\\_ARA\\_Neugut\\_Endfassung\\_17.12.15.pdf](http://www.micropoll.ch/fileadmin/user_upload/Redaktion/Dokumente/01_Berichte/02_Technische_Verfahren/02_Ozonung/Schlussbericht_2015-UTF_Optimierung_der_Ozondosierung_-_ARA_Neugut_Endfassung_17.12.15.pdf)

#### DANKSAGUNG

Dank gilt dem schweizerischen Bundesamt für Umwelt (BAFU) für die finanzielle Unterstützung des Projektes ReTREAT im Rahmen der Umwelttechnologie-Förderung (UTF). Grosser Dank gilt auch den beteiligten Industriepartnern wie der Degrémont Technologies Ltd. (Ozonia, Dübendorf), ENSOLA AG (Wetzikon), WABAG Wassertechnik AG (Winterthur), ChemViron Carbon GmbH (D) sowie der Mecana Umwelttechnik GmbH (Reichenburg) für die finanzielle, materielle und fachliche Begleitung des Projektes. Besonderen Dank der ARA Neugut (Dübendorf) für die Errichtung und Bereitstellung von Infrastrukturen und Betrieb. Vielen Dank auch *Urs von Gunten* und den vielen anderen Mitarbeitern von Eawag und Oekotoxzentrum für die vielfältige Unterstützung im Projekt. Finanzielle Unterstützung zur Untersuchung von Mikroverunreinigungen auf der ARA Neugut im Kontext der Ozonung kamen auch vom EU-FP7 Projekt DEMEAU (No. 308339) und dem MICROZO Projekt (12.333) von SCIEX Programm NMS.CH.

#### > SUITE DU RÉSUMÉ

MP par filtration au CAG, combinée à l'ozonation préalable, allait au-delà des exigences légales, car la dose d'ozone sélectionnée avait déjà permis d'éliminer en moyenne plus de 80% des marqueurs.