

## Reaktionsprodukte der Ozonung

Die Ozonung als zusätzlich nachgeschaltete Reinigungsstufe führt zu einer deutlichen Abnahme der Anzahl der derzeit analysierbaren Stoffe im Ablauf der Abwasserreinigungsanlagen (ARA) sowie von deren Konzentrationen. Problematische Effekte von Mikroverunreinigungen im gereinigten Abwasser werden dadurch stark verringert. Deutlich reduziert werden z.B. die Hormonaktivität und die Wirkung von Antibiotika. In der Regel werden Mikroverunreinigungen durch die Ozonung nicht vollständig abgebaut, sondern es entstehen teiloxidierte, meist unbekannte Substanzen (Transformationsprodukte). Weiter können bei der Ozonung auch Oxidationsnebenprodukte wie Bromat oder Nitrosamine entstehen. Da es analytisch nicht möglich ist, alle Reaktionsprodukte der Ozonung zu erfassen, werden neben chemischen Analysen Biotests durchgeführt, um die summarischen Effekte der Reaktionsprodukte zu erfassen. Diese Biotests zeigen ebenfalls grösstenteils eine Verbesserung der Abwasserqualität durch die Ozonung.

### Wie funktioniert die Ozonung?

Ozon ist ein starkes Oxidationsmittel, welches Moleküle von Mikroverunreinigungen und von natürlichen organischen Stoffen im Abwasser selektiv an bestimmten Stellen des Moleküls wie Doppelbindungen und spezifischen funktionellen Gruppen angreift. Ein Teil des Ozons zerfällt im Abwasser in sogenannte Hydroxyl-Radikale ( $\cdot\text{OH}$ ), die sehr schnell und vergleichsweise unspezifisch mit den meisten Substanzen reagieren. Sie tragen somit ebenfalls zur Reduktion von Mikroverunreinigungen bei. Ozon wirkt zusätzlich auf die meisten Bakterien letal und inaktiviert auch eine grosse Palette von Viren.

### Welche Reaktionsprodukte entstehen bei der Ozonung?

Mikroverunreinigungen werden durch die Oxidation in der Regel nicht vollständig abgebaut, sondern in sogenannte **Transformationsprodukte** umgewandelt. Diese sind meist besser biologisch abbaubar als ihre Vorläufersubstanzen. Gleichzeitig können aus natürlich vorhandenen organischen sowie aus anorganischen Stoffen sogenannte **Oxidationsnebenprodukte** gebildet werden, welche toxische Eigenschaften haben können (Abb. 2). Folgende bekannte, potentiell toxische Oxidationsnebenprodukte konnten beispielsweise in Pilotstudien auf ARAs nachgewiesen werden:

**Bromat:** Bromat gilt als potentiell krebserregend. Es entsteht in einer mehrstufigen Oxidationsreaktion aus Bromid und nimmt prinzipiell mit höherer Bromid-Hintergrundkonzentration, Ozondosis und der Zahl von Hydroxyl-Radikalen zu. Bei geringer Bromidkonzentration im Abwasser wie dies z.B. bei den Versuchen in der ARA Regensdorf und Duisburg-Vierlinden (D) der Fall war (ca.  $30 \mu\text{g/l}$ ), wurde der zulässige Trinkwassertoleranzwert von Bromat ( $10 \mu\text{g/l}$ ) nie überschritten. Dieser Toleranzwert wurde lediglich mit hoher Bromidkonzentration im Abwasser und bei gleichzeitig hoher Ozondosis teilweise überschritten (z.B. Versuche in der ARA Lausanne und Bad Sassendorf (D)). Die für Wasserlebewesen relevante PNEC (predicted no effect concentration; die Konzentration, bis zu der sich keine Auswirkungen auf die Umwelt zeigen) von  $3 \text{ mg/l}$  wurde jedoch nie überschritten.

**Nitrosamine:** Nitrosamine gelten als krebserregend. Sie können während der Ozonung aus organischen Aminen gebildet werden. Bei den Versuchen in der ARA Regensdorf stieg durch die Ozonung einzig die Konzentration von Nitroso-dimethylamin (NDMA). Diese wurde aber im abschliessenden Sandfilter wieder reduziert. In der Kläranlage Bad Sassendorf wurden keine Nitrosamine oberhalb der analytischen Bestimmungsgrenze von  $5 \text{ ng/l}$  festgestellt. Ein Grenzwert für NDMA ist in der Schweiz bisher nicht festgelegt. In Deutschland liegt der (provisorische) Trinkwassergrenzwert bei  $10 \text{ ng/l}$ .



Abb. 1: Durch Ozon gereinigtes und entfärbtes Abwasser bei der Monte Rosa Hütte.

## Ist das ozonierte Abwasser insgesamt weniger problematisch für die Umwelt?

Die Ozonung von Abwasser führt zu deutlichen Konzentrationsabnahmen verschiedener Stoffgruppen, während die Konzentrationen anderer Stoffgruppen nur teilweise reduziert werden. Beispielsweise werden Stoffe mit elektronenreichen funktionellen Gruppen wie das Schmerzmittel Diclofenac oder der Plastikinhaltstoff Bisphenol A zu 100% abgebaut, andere Stoffe wie z.B. das Herbizid Atrazin oder die meisten Röntgenkontrastmittel jedoch nur um ca. 20%.

Biotests mit verschiedenen Organismen zeigten grösstenteils eine Verbesserung der Abwasserqualität durch die Ozonung (Abb. 2). Vereinzelt wurden hingegen auch nachteilige Effekte nach der Ozonung festgestellt wie z.B. teilweise bei Regenbogenforellen und Glanzwürmern. Eine nachgeschaltete biologisch aktive Stufe eliminierte jedoch – mit einer Ausnahme - sämtliche negativen Effekte auf **Organismenebene** (Abb. 2).

Untersuchungen des **Zellgewebes** von Regenbogenforellen zeigten einzelne Veränderungen im Blutplasma sowie Anzeichen von zellulärem Stress. Diese Effekte wurden teilweise mit einer nachgeschalteten Stufe beseitigt (Abb. 2, „Andere Wirkungen“). Biotests mit **Zellkulturen** zeigten zudem eine deutliche Verringerung der hormonellen Aktivität, der Gentoxizität sowie der Wirkung von Insektiziden (Abb. 2). Vereinzelt wurde eine Zunahme der gentoxischen Wirkung durch die Ozonung festgestellt. Mit einer nachgeschalteten biologisch aktiven Stufe wurden jedoch ausschliesslich positive Ergebnisse ermittelt.

Diese Befunde zeigen, dass durch die Ozonung zwar toxische Oxidationsnebenprodukte und Transformationsprodukte entstehen können, diese aber mit einer anschliessenden biologischen Stufe grösstenteils wieder eliminiert werden. Die Bilanz des Verfahrens ist also insgesamt positiv.

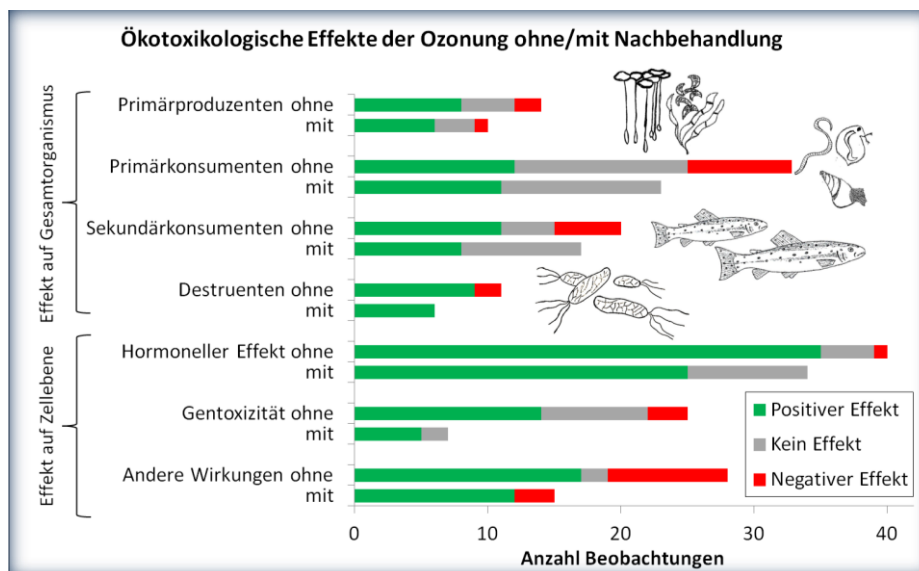


Abb. 2: Resultate von 52 ökotoxikologischen Untersuchungen mit ozoniertem Abwasser ohne biologische Nachbehandlung („ohne“), durchgeführt mit Abwasser von 24 ARAs und 25 Untersuchungen mit ozoniertem Abwasser mit anschliessender biologischer Nachbehandlung, durchgeführt in 7 ARAs („mit“). Pro Untersuchung wurden meist mehrere Biotests durchgeführt. Gezeigt wird jeweils der Vergleich zu konventionell gereinigtem Abwasser.

### Empfehlungen

- Die Ozonung kann eine Vielzahl von Mikroverunreinigungen und deren Effekte eliminieren.
- Eine Nachbehandlung mit einer biologisch aktiven Stufe (z.B. Sandfilter) wird sehr empfohlen, um potentiell toxische Reaktionsprodukte effektiv entfernen zu können.
- Bisher existieren nur wenige Erfahrungen mit der Ozonung auf ARAs. Insbesondere ARAs mit bedeutenden Industrie- oder Gewerbeabwassereinleitungen wurden kaum untersucht. Daher soll im Einzelfall geprüft werden, ob eine Ozonung des Abwassers zweckmässig ist. Dazu soll in Voruntersuchungen die Toxizität des Abwassers nach der Ozonbehandlung untersucht werden. Damit können Hinweise gewonnen werden, ob Reaktionsprodukte, die während der Ozonung dieser Abwässer gebildet werden, problematisch sind. Eine Empfehlung für geeignete Untersuchungen wird aktuell erarbeitet.