

# Schlussbericht

Studie im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU

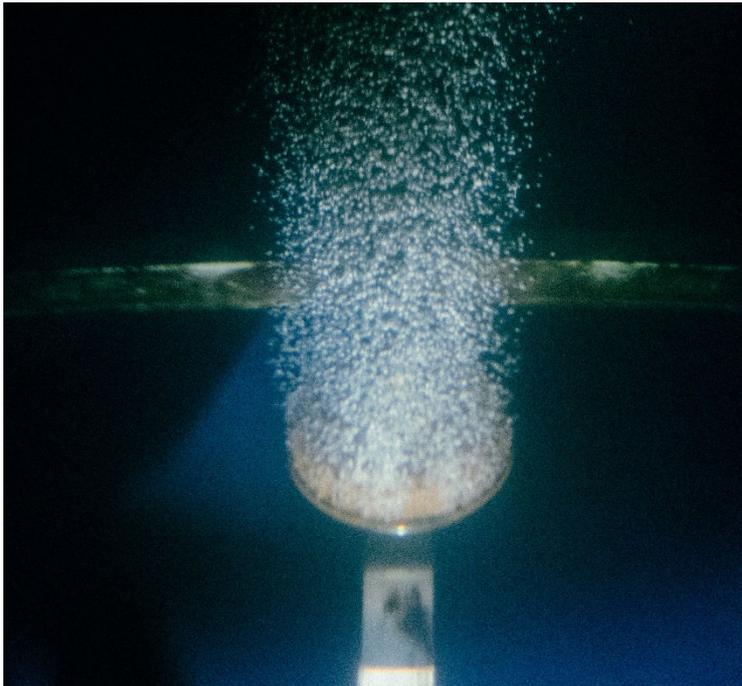


Foto: VSA, Milad Ahmadvand



Foto: Envilab AG

## Beurteilung Repräsentativität Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung

**Alessandro Piazzoli; Envilab AG**

**Pascal Wunderlin und Julie Grelot (ehem.); VSA Plattform Verfahrenstechnik  
Mikroverunreinigungen**

**Urs von Gunten, Eawag**

Dübendorf und Zofingen, November 2022

## Hintergrund und Ziel

Die «Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung» werden seit 2017 angewendet, um zu überprüfen, ob sich ein bestimmtes Abwasser für eine Ozonbehandlung eignet oder nicht. Sie sind eine wichtige Entscheidungsgrundlage bei der Verfahrenswahl für die Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen. In diesem Projekt soll die Repräsentativität eines Teils der Abklärungen im Labor anhand von chemischen Untersuchungen definiert und die vorhandene Datengrundlage mit diesen Daten erhärtet werden. Dabei soll überprüft werden ob die Versuche im Labor repräsentativ für die grosstechnische Anlagen sind, oder ob systematische Abweichungen gibt.

## Teil 1 - Zusammenstellen vorhandene Daten

Beim Batch-System unterscheidet sich der Ozoneintrag und somit die lokale Ozonkonzentration im Vergleich zum Grossmassstab, was einen Einfluss auf die Elimination von Mikroverunreinigungen sowie auf die Bildung der Oxidationsnebenprodukte (Nitrosamine und Bromat) hat.

### Elimination von Mikroverunreinigungen

Im Pilotprojekt der ARA Regensdorf [1], [2] wurde der Abbau von Mikroverunreinigungen parallel im Labor und auf der Pilotanlage untersucht. Der Abbau von Mikroverunreinigungen im Labormassstab (Batch-Versuch) wich bis zu einem Faktor von 1.5 von den Messungen der Pilotanlage ab. Dies kann auf die Unterschiede zwischen den Systemen (Ozondosierung, pH, ...) aber auch auf die unterschiedlichen analysierten Abwasserproben im Labor- und Pilotmassstab zurückgeführt werden.

### Bromat-Bildung

Im Projekt «Testtools» der TU Berlin [3] fand ein Vergleich der Bromat-Bildung zwischen Labor und Pilot/grosstechnischen Anlagen für 5 Standorte statt. Dabei war die Bromat-Bildung auf den Pilot-/grosstechnischen Ozonanlagen durchgängig geringer als jene der Batch-Ozonungen im Labor, denn die Bromat-Bildung hängt von der lokalen Ozon-Konzentration ab.

Auch in der Schweiz haben verschiedene Projekte bereits gezeigt, dass die Bromat-Bildung im Labor (Batch-System) im Vergleich mit der grosstechnischen Ozonung überschätzt wird (Daten aus den Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung, anonymisiert):

- Die Bromat-Bildung im grosstechnischen Massstab auf der ARA A wurde mit den früher im Labor gemessenen Werten verglichen. Dieser Vergleich zeigt, dass die Bromat-Bildung im Labor im Vergleich zur grosstechnischen Ozonung vermutlich überschätzt wird (eine Änderung der Abwasserzusammensetzung zwischen den beiden Analysen kann jedoch nicht ausgeschlossen werden).
- Auf der Pilotanlage der ARA B lag die Bromat-Bildungsrate bei einer Dosierung von 0.35 gO<sub>3</sub>/gDOC bei ca. 0.35 mol-%. Im Laborversuch lagen die Bromat-Bildungsraten im Vergleich etwa doppelt so hoch.
- Ein Vergleich mit Messungen auf der ARA C zeigen, dass im Laborverfahren generell eher höhere Bromid-Bromat-Umwandlungsraten resultieren als im grosstechnischen Verfahren.

### Nitrosamin-Bildung und -Abbau

Zurzeit gibt es keine Erfahrungen und Kenntnisse über den Einfluss von Batchsystemen auf die Bildung von Nitrosaminen. Da es sich um eine direkte Ozon-Reaktion mit einer Vorläufersubstanz handelt, ist zu erwarten, dass es eine gute Übereinstimmung gibt.

Der Nitrosamin-Abbau wird ebenfalls im Labor anhand eines biologischen Abbaus simuliert. Auch hier ist unklar, inwiefern dieser Prozess den Abbau, der im grosstechnischen Massstab im Sand-/Aktivkohlefilter stattfindet, abbildet.

## Teil 2 - Festlegung Probenahmestrategie

Mit der Expertengruppe «Ozonung und Industrieeinleiter» wurde entschieden, dass Stichproben am besten geeignet sind, um die Repräsentativität der Laborozonung mit der grosstechnischen Ozonung festzulegen. Bei Stichproben kann die genaue Ozondosis relativ einfach bestimmt werden. Durch Berechnung der Aufenthaltszeit in Ozonung/Sandfilter kann dasselbe Wasserpaket nach Ozonung/Nachbehandlung beprobt werden. Die Probenahme soll stattfinden, wenn nicht zu viele Schwankungen zu erwarten sind. Zudem soll die Probenahme bei Trockenwetter erfolgen, um eine Verdünnung der Stoffe zu vermeiden. Die 1. Probenahme wird durch einen Projektverantwortlichen (bzw. A. Piazzoli von ENVILAB AG) in Koordination mit dem Betreiber durchgeführt.

## Teil 3 – Auswahl Kläranlagen und Beprobung

Die Untersuchungen sollen auf drei Kläranlagen mit grosstechnischer Ozonung anhand von jeweils drei verschiedenen Proben durchgeführt werden, damit die Repräsentativität der einmalig durchgeführten Abklärungen festgelegt werden kann. Die Untersuchungen werden bei den folgenden Kläranlagen durchgeführt:

- **Klärwerk Werdhölzli**

Das Klärwerk Werdhölzli besteht aus zwei unabhängigen Abwasserstrassen; dieses Klärwerk ist für 650'000 EW dimensioniert und behandelt maximal 6'500 l/s.

Die Ozonung besteht aus vier parallelen Reaktoren, die jeweils aus einem Mehr-Kammer-System bestehen (siehe Abbildung 1); bei diesem System kann der Ozoneintrag an zwei unterschiedlichen Standorten erfolgen. Dadurch entsteht die Möglichkeit der 1-Punkt dosierung (nur in der ersten Kammer) und der 2-Punkt dosierung (in beiden Kammern). Während dieses Projekts wird der Unterschied der beiden Dosierungsmöglichkeiten zusätzlich auch untersucht; dabei wird eine Strasse mit der einen Ozoneintragsstrategie und die andere (unabhängige) Strasse mit der anderen Ozoneintragsstrategie betrieben<sup>1</sup>. Die Aufenthaltszeit des Abwassers im Reaktor beträgt meist zwischen 10 – 40 min.

Die nachgeschaltete Nachbehandlung erfolgt über einen bestehenden Sandfilter.

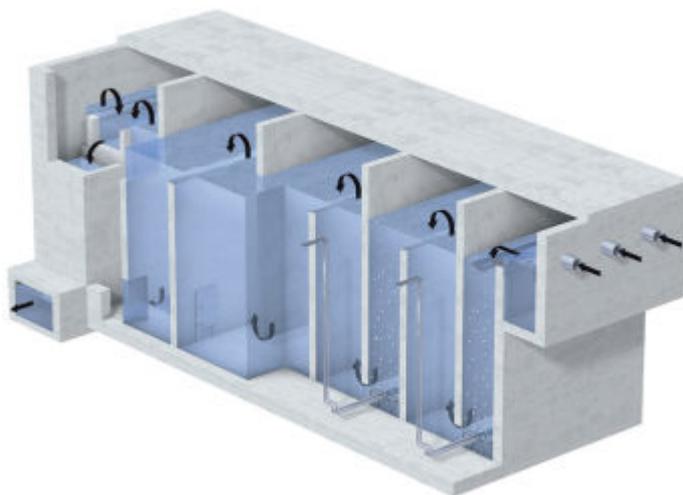


Abbildung 1: Ozonreaktor des Klärwerks Werdhölzli. Auf der Anlage sind vier solchen Reaktoren vorhanden. (Foto: Broschüre Klärwerk Werdhölzli)

<sup>1</sup> Separates Projektantrag beim AWEL eingereicht.

Die beprobten Tage und die dabei applizierten Ozondosen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 1: Beprobung auf Klärwerk Werdhölzli

| Probenahm-Datum | Ozondosis auf ARA 1-Punktdosierung [gO <sub>3</sub> /gDOC] | Ozondosis auf ARA 2-Punktdosierung [gO <sub>3</sub> /gDOC] | Proben-Nummern ENVILAB |
|-----------------|--|--|------------------------|
| 02.11.2020      | 0.63   | 0.63   | 6692 – 6697 (2020)     |
| 04.03.2021      | 0.73   | 0.73   | 1097 – 1102 (2021)     |
| 16.09.2021      | 0.80   | 0.66   | 5759 – 5763 (2021)     |

• **STEP de Porrentruy**

Die STEP du SEPE in Porrentruy ist eine Anlage dimensioniert für 25'000 EW und behandelt maximal 500 l/s. Die Ozonung besteht aus einem Reaktor mit einem Ein-Kammer-System (siehe Abbildung 2); im Vergleich mit dem Klärwerk Werdhölzli kann das Ozon nur an einem Eintragsort zugegeben werden. Die Aufenthaltszeit des Abwassers im Reaktor beträgt mindestens 10 min.

Die Nachbehandlung erfolgt über einen neuen Sandfilter.

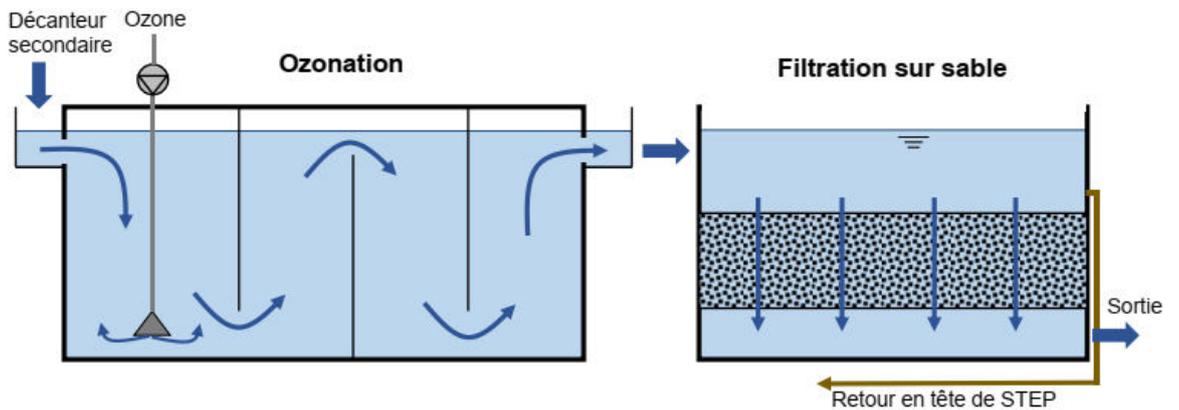


Abbildung 2: Ozonreaktor der ARA Porrentruy inklusiv neuer Sandfilter. (Foto: Vortrag "Projet micropolluants du SEPE", www.sepe-porrentruy.ch)

Die beprobten Tage und die dabei applizierten Ozondosen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 2: Beprobung auf der STEP de Porrentruy

| Probenahm-Datum | Ozondosis auf ARA 1-Punktdosierung [gO <sub>3</sub> /gDOC] | Proben-Nummern ENVILAB |
|-----------------|--|------------------------|
| 30.10.2020      | 0.75   | 6682 – 6684 (2020)     |
| 15.02.2021      | 0.57   | 0681 – 0683 (2021)     |
| 31.08.2021      | 1.08   | 5310 - 5312            |

- **ARA Altenrhein**

Die ARA Altenrhein ist eine Anlage dimensioniert für 120'000 EW und behandelt täglich ca. 25'400 m<sup>3</sup>/Tag (berechnet aus Daten 2020, ARA Altenrhein). Die Ozonung besteht aus einem Reaktor mit einem Mehr-Kammer-System (siehe Abbildung 1) wie beim Klärwerk Werdhölzli. Die Aufenthaltszeit des Abwassers im Reaktor beträgt ca. 15 min (bei 0.47 m<sup>3</sup>/s oder 470 L/s). Diese Anlage betreibt die Ozonung als "Teil"-Ozonung da die Elimination der organischen Spurenstoffe mittels Kombi-Verfahren (Ozon + Aktivkohle) erfolgt. Die Nachbehandlung nach der Ozonung erfolgt dementsprechend auf einem neuen GAK-Filter (granulierte Aktivkohle: Chemviron Cyclecarb 401 V).

Die beprobten Tage und die dabei applizierten Ozondosen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

*Tabelle 3: Beprobung auf ARA Altenrhein*

| Probenahm-Datum | Ozondosis auf ARA<br>1-Punktdosierung<br>[gO <sub>3</sub> /gDOC] | Proben-Nummern<br>ENVILAB |
|-----------------|--|---------------------------|
| 09.11.2020      | 0.14   | 6932 – 6934 (2020)        |
| 15.02.2021      | 0.14   | 0684 – 0686 (2021)        |
| 08.09.2021      | 0.12   | 5450 – 5452 (2021)        |

## Teil 4 – Durchführung der Laborversuche

### Methode

Die Ozonung im Labormassstab erfolgte gem. der Anleitung "Testverfahren zur Beurteilung der Behandelbarkeit von Abwasser mit Ozon" (ENVILAB, 2021).

### Resultate

- **Vergleich der MV-Elimination**

Die folgenden Abbildungen stellen die berechneten Eliminationsleistungen der Leitsubstanzen aus der Kategorie 1 und aus der Kategorie 2 für die Ozonung im Labor und auf den drei Kläranlagen dar.

Diese Darstellung ermöglicht den direkten Vergleich der Ozonung im Labor und der grosstechnischen Ozonungen.

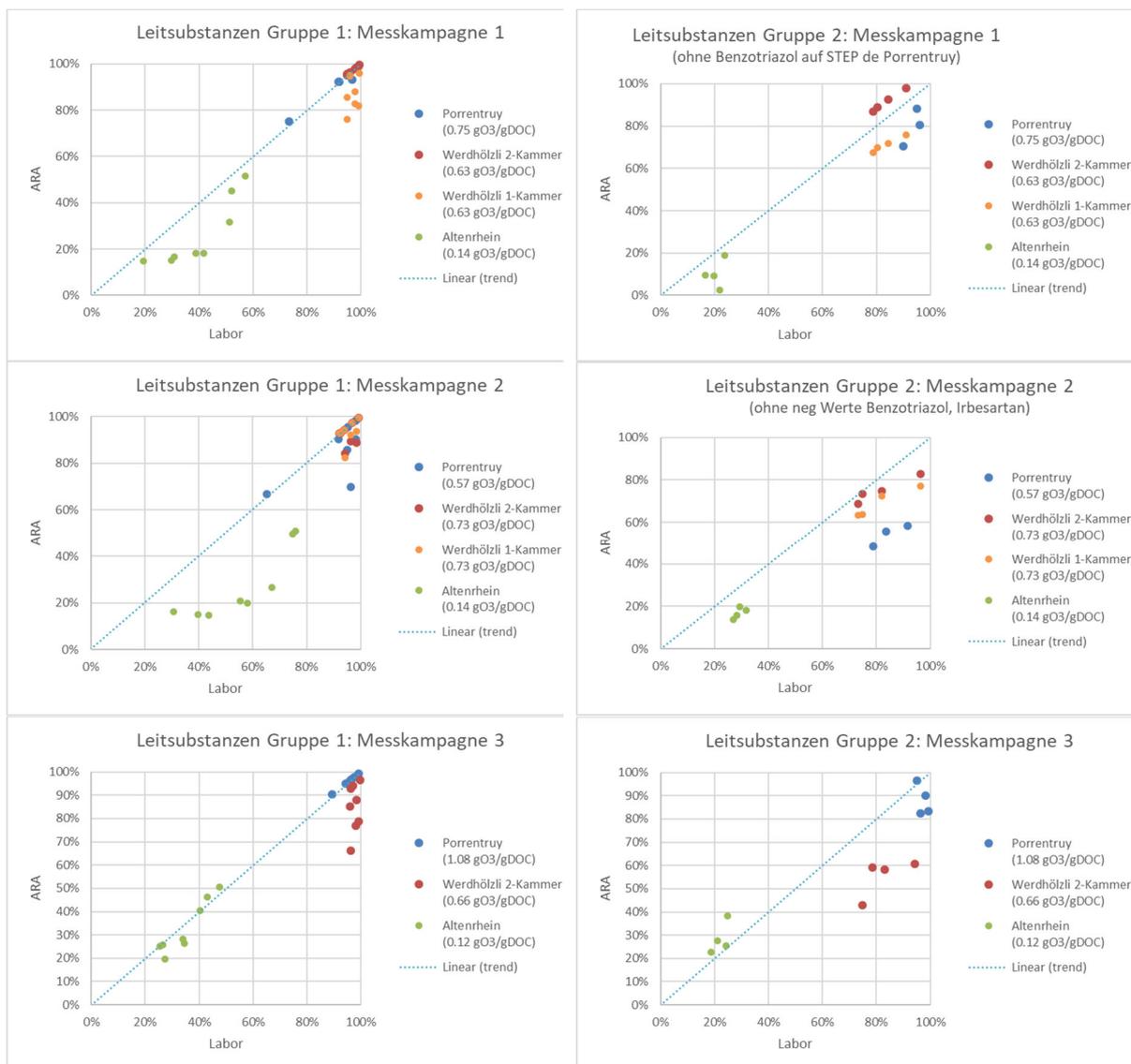


Abbildung 3: Berechnete Eliminationsleistungen der Leitsubstanzen (MV) nach der Ozonung im Labor und jeweils von den drei Kläranlagen für die drei unterschiedlichen Probenahmen.

Die Abbauraten waren tendenziell besser bei der Laborozonung. Interessanterweise sind die Eliminationsraten der Gruppe 2 (gut abbaubare Stoffe mit Eliminationen zwischen 60-90%) bei der ersten Messkampagne am besten auf der ARA Werdhölzli mittels 2-Punktodosierung. Diese Resultate werden in den weiteren Messkampagnen nicht bestätigt.

Bei der Teilozonung waren die Eliminationsleistungen der ersten zwei Messkampagnen deutlich besser im Labor für die Stoffe der Gruppe 1 und nur leicht besser für die Substanzen der Gruppe 2. Bei der letzten Messkampagne war dies nicht mehr zu sehen.

Die Elimination der organischen Spurenstoffe auf dem Klärwerk Werdhölzli waren bei gleicher Ozondosis deutlich besser mittels 2-Punktzoneintrag, dies ist vor allem bei den Stoffen der Gruppe 2 gut ersichtlich.

Bei der dritten Messkampagne auf der ARA Werdhölzli sind die Konzentrationen im Ablauf 1-Kammer Ozonung gleich wie die Konzentrationen im Auslauf der Nachklärung, dabei sind die Eliminationsraten nahe Null (auf der Abbildung 3 nicht gekennzeichnet). Die Analyse der Probe wurde mehrmals wiederholt und sehr wahrscheinlich wurden bei der Probenahme die Proben vertauscht; somit gibt es kein Resultat für diese Messkampagne.

• **Bromatbildung**

Die gemessenen Bromid- und Bromat-Gehalte sind in der Abbildung 4 abgebildet.

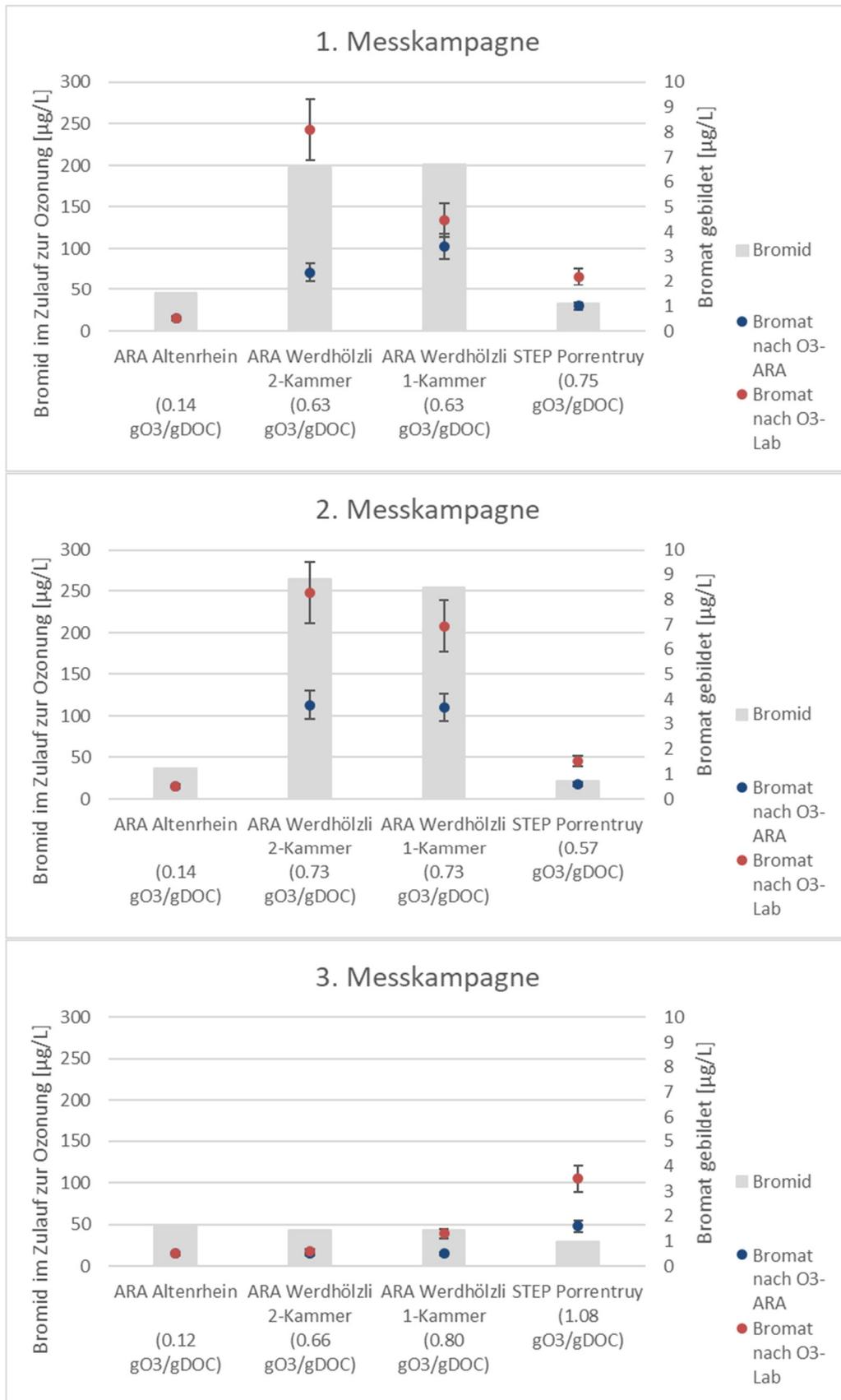


Abbildung 4: Bromid- und Bromat-Analysen für die drei unterschiedlichen Messkampagnen auf den drei Abwasserreinigungsanlagen. Die Messunsicherheit der Bromat-Messung beträgt ca. 15%.

Die Bromidkonzentrationen der ARA Altenrhein und STEP de Porrentruy sind tiefer als 100 µgBr/L, hingegen für das Klärwerk Werdhölzli sind die Konzentrationen während der beiden ersten Messkampagnen deutlich höher und grösser als 200 µgBr/L. Bei der dritten Messkampagne lag die Bromidkonzentration auch unterhalb 100 µgBr/L. Vor der Ozonung wurde bei allen ARA und in allen Messkampagnen kein Bromat quantifiziert (Bestimmungsgrenze von 0.5 µg/l).

Die Bromatbildung war bei der Ozonung im Labor deutlich höher; sowohl auf dem Klärwerk Werdhölzli (+ ca. 0.5-0.8 mol%) wie auch auf der STEP de Porrentruy (+ ca. 2.7-4.0 mol%) wurde in allen drei Messkampagnen deutlich mehr Bromat im Labor gemessen. Eine mögliche Erklärung dafür sind die unterschiedlichen Aufenthaltszeiten, praktisch unendlich im Labor und begrenzt auf ARA, und die lokalen Ozonkonzentrationen, die im Labor höher ausfallen können. Die Bromatbildungsraten werden in den folgenden Tabellen zusammengefasst:

Tabelle 4: Bromatbildungsraten in mol% mit Abwasser der ARA Werdhölzli

| Bromatbildungsrate in mol %                           | Messkampagne 1<br>Ozondosis<br>0.63 gO <sub>3</sub> /gDOC | Messkampagne 2<br>Ozondosis<br>0.73 gO <sub>3</sub> /gDOC | Messkampagne 3<br>Ozondosis 0.66 resp.<br>0.88 gO <sub>3</sub> /gDOC |
|---|---|---|--|
| ARA Werdhölzli grosstechnisch<br>1-Kammer Ozoneintrag | 1.06  | 0.90  | _*   |
| ARA Werdhölzli grosstechnisch<br>2-Kammer Ozoneintrag | 0.75  | 0.89  | _*   |
| ARA Werdhölzli in Labor                               | 1.39  | 1.70  | 1.85   |

\*kann nicht bestimmt werden da Bromat unterhalb Bestimmungsgrenze

Tabelle 5: Bromatbildungsraten in mol% mit Abwasser der STEP de Porrentruy

| Bromatbildungsrate in mol %       | Messkampagne 1<br>Ozondosis 0.75<br>gO <sub>3</sub> /gDOC | Messkampagne 2<br>Ozondosis 0.57<br>gO <sub>3</sub> /gDOC | Messkampagne 3<br>Ozondosis 1.08<br>gO <sub>3</sub> /gDOC |
|-----------------------------------|---|---|---|
| STEP de Porrentruy grosstechnisch | 1.89  | 1.73  | 3.33  |
| STEP de Porrentruy in Labor       | 4.18  | 4.51  | 7.29  |

Mit einer Teilozonung, Ozondosis von 0.12-0.14 gO<sub>3</sub>/gDOC wurde kein Bromat erzeugt, sowohl im Labor wie auch auf der ARA Altenrhein; es ist bekannt, dass die Bromatbildung erst ab einer Ozondosis von 0.4-0.5 gO<sub>3</sub>/gDOC stattfindet.

Es scheint bezüglich Bromatbildung keinen signifikanten Unterschied zwischen dem 1-Kammer und 2-Kammer grosstechnische Ozoneintrag zu geben. Bei der ersten Messkampagne wurde leicht weniger Bromat bei der 2-Kammerozondosierung quantifiziert; in der zweiten Messkampagne wurde mit beiden Steuerungsarten ähnlich viel Bromat erzeugt, und für die dritte Messkampagne fehlen diese Daten.

Trotz erhöhten Bromid-Gehalten von bis zu 250 µgBr/L wurde grosstechnisch weniger als 5 µgBrO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L nach der Ozonung gebildet.

Mit der Labor-Ozonung liegen die Bromatbildungsraten deutlich höher als grosstechnisch; vor allem auf der STEP de Porrentruy ist der Unterschied sehr gross.

• **Nitrosamine**

Die Nitrosamine wurden in vielen Proben analysiert; die Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8 fassen die Befunde für die drei Kläranlagen zusammen.

Tabelle 6: Nitrosamine-Analysen auf der ARA Werdhölzli. Ergebnisse in ng/L, <: kleiner als Bestimmungsgrenze von 10 ng/L

| ARA  | Vor Ozonung        | Messkam pagne 1 Ozondosis 0.63 gO <sub>3</sub> /g DOC | Vor Ozonung | Messkam pagne 2 Ozondosis 0.73 gO <sub>3</sub> /g DOC | Vor Ozonung | Messkam pagne 3 Ozondosis 0.66 resp. 0.88 gO <sub>3</sub> /g DOC |
|--|--------------------|---|-------------|---|-------------|--|
| ARA Werdhölzli grosstechnisch 2-Kammer Ozoneintrag   | 12 NPIP<br>58 NPYR | 14 NDBA<br>14 NPIP                                    | <           | <   | 12 NDPA     | 14 NDPA  |
| ARA Werdhölzli grosstechnisch 1-Kammer Ozoneintrag   | 26 NPIP            | 11 NDBA   | <           | <   | <           | 38 NDPA  |
| ARA Werdhölzli in Labor                              |                    | 19 NDMA   |             | 36 NDMA   |             | 31 NDMA  |
| ARA Werdhölzli grosstechnisch Sandfilter (1-Kammer)  |                    | 10 NDMA   |             | 26 NDMA   |             | 16 NMEA<br>18 NDPA   |
| ARA Werdhölzli Labor Simulation biol. Nachbehandlung |                    | <   |             | 10 NDMA   |             | 15 NDMA<br>18 NMOR   |

Tabelle 7: Nitrosamine-Analysen auf der STEP de Porrentruy. Ergebnisse in ng/L, <: kleiner als Bestimmungsgrenze von 10 ng/L

| STEP   | Vor Ozonung | Messkam pagne 1 Ozondosis 0.75 gO <sub>3</sub> /gDOC | Vor Ozonung | Messkam pagne 2 Ozondosis 0.57 gO <sub>3</sub> /gDOC | Vor Ozonung | Messkam pagne 3 Ozondosis 1.08 gO <sub>3</sub> /gDOC |
|--|-------------|--|-------------|--|-------------|--|
| ARA Porrentruy grosstechnisch 1-Kammer Ozoneintrag   | <           | <  | <           | <  | <           | <  |
| ARA Porrentruy Ozonung in Labor                      |             | <  |             | 16 NMEA  |             | 16 NDMA  |
| ARA Porrentruy grosstechnisch Sandfilter             |             | 10 NMOR  |             | <  |             | <  |
| ARA Porrentruy Labor Simulation biol. Nachbehandlung |             | <  |             | <  |             | 12 NDMA<br>14 NMOR                                   |

Tabelle 8: Nitrosamine-Analysen auf der ARA Altenrhein. Ergebnisse in ng/L, <: kleiner als Bestimmungsgrenze von 10 ng/L

| ARA  | Vor Ozonung | Messkam pagne 1 Ozondosis 0.14 gO <sub>3</sub> /g DOC | Vor Ozonung | Messkam pagne 2 Ozondosis 0.14 gO <sub>3</sub> /g DOC | Vor Ozonung | Messkam pagne 3 Ozondosis 0.12 gO <sub>3</sub> /gDOC |
|--|-------------|---|-------------|---|-------------|--|
| ARA Altenrhein grosstechnisch 1-Kammer Ozoneintrag   | <           | 15 NPIP   | <           | <   | <           | <  |
| ARA Altenrhein Ozonung in Labor                      |             | <   |             | 16 NMEA   |             | 46 NDBA  |
| ARA Altenrhein grosstechnisch GAK-Filter             |             | 11 NMOR   |             | <   |             | <  |
| ARA Altenrhein Labor Simulation biol. Nachbehandlung |             | <   |             | <   |             | <  |

Bei den beiden Kläranlagen Porrentruy und Altenrhein gab es deutlich weniger Befunde als bei der ARA Werdhölzli. Im Zulauf der Ozonung wurden bei den beiden ARA keine Nitrosamine nachgewiesen. Nach der Ozonung werden Nitrosamine entweder im Labor oder grosstechnisch erzeugt, nie aber in beiden Fällen gleichzeitig. Meistens wurden Nitrosamine mit der Ozonung im Labor in Konzentrationen nahe der Bestimmungsgrenzen erzeugt. Nur bei der letzten Messkampagne wurde eine höhere Konzentration von 46 ng NDBA/L nach der Ozonung im Labor mit Abwasser der ARA Altenrhein quantifiziert. Die Simulation der biologischen Nachbehandlung baut die bei der Ozonung im Labor generierten Nitrosamine allerdings wieder gut ab.

Auf der ARA Werdhölzli hingegen ist das Ganze ein bisschen komplexer und schwieriger zu interpretieren, da es deutlich mehr Befunde gibt. Es wurden Unterschiede zwischen den beiden Strassen festgestellt; bei der ersten Messkampagne wurden 12 ng NPIP/L und 58 ng NPYR/L im Zulauf zur Strasse 10 (wo die 2-Kammer-Ozoneintrag angewendet wurde) und 26 ng NPIP/L im Zulauf zur Strasse 40 (1-Kammer Ozoneintrag) gemessen. Die gebildeten Konzentrationen sind auch unterschiedlich; es wurden andere (als im Zulauf der Ozonung) und unterschiedliche Nitrosamine nach der Ozonung, im Labor und grosstechnisch, gebildet. Die gebildeten Konzentrationen sind in der Regel höher bei der Ozonung im Labor (Ausnahme bei der Messkampagne 3). Die Simulation der biologischen Nachbehandlung und der Sandfilter bauen die gebildeten Konzentrationen um ca. 50% ab.

Zum Teil werden weitere Nitrosamine durch die Simulation der biologischen Nachbehandlung oder durch den Sandfilter gebildet; das ist der Fall für NMOR mit Abwasser der ARA Porrentruy und ARA Werdhölzli (beide bei der dritten Messkampagne) oder NMEA nach dem Filter der ARA Werdhölzli (dritte Messkampagne).

Bei den Nitrosaminen ist einen klaren Trend in den Daten nicht zu erkennen. Die Interpretation der Daten ist daher schwierig und kaum möglich; unter anderem auch da die Nitrosamin-Bildungswege und deren Vorläufersubstanzen noch nicht ausreichend verstanden werden. Weiter sind die Befunden oft sehr tief und daher die Messunsicherheit in einem solchen komplexen Matrix (Abwasser) doch noch relativ gross. Schlussendlich ist die Datengrundlage zu klein und es braucht weiterhin mehr Daten.

- **Nitrit**

Auf der ARA Werdhölzli war im Ablauf Nachklärung immer Nitrit vorhanden; die Nitrit-Gehalte belaufen sich auf 200 µg/L (Messkampagne 1), 100 µg/L (Messkampagne 2) und 230 (Strasse 20) resp. 500 µg/L (Messkampagne 3). Nach der Labor-Ozonung wurde das Nitrit praktisch nicht mehr nachgewiesen (<15 µg/L), nur bei der dritten Messkampagne mit 500 µgNO<sub>2</sub>-N/L und einer Ozondosis von 0.66 gO<sub>3</sub>/gDOC wurden 67 µgNO<sub>3</sub>-N/L nach der Ozonung nachgewiesen. Grosstechnisch auf der ARA Werdhölzli wurde aber Nitrit nach der Ozonung immer nachgewiesen; bei der ersten und zweiten Messkampagne wurde ca. 40 µgNO<sub>2</sub>-N/L bestimmt und bei der dritten Messkampagne waren es 240 µgNO<sub>2</sub>-N/L. Dies kann ein Hinweis auf mögliche Kurzschlüsse im Reaktor geben. Eine weitere Erklärung dafür könnte die Nitrifikation von Ammonium nach der Ozonung sein, wobei die Proben möglichst schnell filtriert worden sind.

## Teil 5 –Fazit

Die Bromat-Bildung im Labor ist tendenziell höher als grosstechnisch auf der Kläranlage (d.h. im Labor erfolgt eher eine Überschätzung); somit sollten die Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung auf der sicheren Seite in Bezug auf Bromat sein. Auch wenn der Beurteilungswert für Bromat ( $5\mu\text{g/L}$ ) im Labor überschritten wird, war dies im untersuchten grosstechnischen Massstab nicht der Fall.

Auf der Klärwerk Werdhölzli wurden trotz erhöhten Bromid-Werten im Zulauf zur Ozonung ( $250\mu\text{gBr}^-/\text{L}$ ) weniger als  $5\mu\text{gBrO}_3^-/\text{L}$  Bromat gebildet. Daher ist der Beurteilungswert für Bromid ( $100\mu\text{g/L}$ ) im Zulauf der geplanten Ozonung bei den Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung auf der sicheren Seite.

Es konnte keine Aussage über die Spurenstoffelimination der 2-Kammer-Dosierung gegenüber der 1-Kammer-Dosierung gemacht werden. Zudem konnte in diesem Projekt auch nicht eindeutig gezeigt werden, ob weniger Bromat gebildet wird, wenn Ozon an 2 Orten eingetragen wird.

Keine Aussage über die Nitrosamine-Bildung und Abbau konnte gemacht werden, da die Daten sehr schwierig zu interpretieren sind.

## Literatur

- [1] Zimmermann, S., Wittenwiler, M., Hollender, J., Krauss, M., Ort, C., Siegrist, H., von Gunten, U. 2011. Kinetic assessment and modeling of an ozonation step for full-scale municipal wastewater treatment: Micropollutant oxidation, by-product formation and disinfection. *Water Research* 45, 605-617.
- [2] Abegglen, C., Escher, B., Hollender, J., Koepke, S., Ort, C., Peter, A., Siegrist, H., von Gunten, U., Zimmermann, S. 2009. Ozonung von gereinigtem Abwasser Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf. Studie der Eawag im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU und des AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich, in enger Zusammenarbeit mit BMG Engineering AG und Hunziker-Betatech AG.
- [3] Zietzschmann, F., Stapf, M., Sperlich, A., Ruhl, A., Miehe, U., Gnirß, R., Jekel, M. 2018. TestTools – Entwicklung und Validierung von schnellen Testmethoden zum Spurenstoffverhalten in technischen und natürlichen Barrieren des urbanen Wasserkreislaufs. Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- [4] von Sonntag C. und von Gunten U. 2012. *Chemistry of ozone in water and wastewater treatment*. IWA Publishing.
- [5] Lee, Y., Kovalova, L., McArdell, C. S., & Von Gunten, U. 2014. Prediction of micropollutant elimination during ozonation of a hospital wastewater effluent. *Water Research*, 64, 134-148.